

통가 물부족 대응을 위한 기후정보 활용 스마트 물관리 시스템 구축

Development of Smart Water Management System Using Climate Information
to Mitigate Water Shortages in the Kingdom of Tonga

신용희, 윤선권, 조원일, 정임국 응용사업팀, 김광형 사업기획팀

발간사

태평양도서국은 엘니뇨/라니냐 등 이상기후 영향으로 잦은 가뭄과 홍수가 발생하여 물 부족 문제가 심각한 실정입니다. 또한 기후변화에 따른 강수량 변동과 해수면상승은 안정적인 수자원 확보의 최대 위험 요소로 작용하고 있습니다. 이러한 도서지역의 가용 수자원은 주로 빗물과 지하수이나, 적은 집수면적과 지형의 영향은 지표수 확보를 어렵게 합니다. 특히 저지대 해안의 경우 해수침투에 의한 지하수오염 문제가 심각한 편이며, 식수나 농업용수로의 활용이 불가합니다. 또한 이 지역의 부족한 사회간접자본과 낮은 인프라 시스템은 수재해 발생 시 주민들의 고통을 더욱 가중시키는 요인으로 작용하고 있습니다.

태평양 도서국가 중 하나인 통가는 여러 개의 작은 섬으로 이루어져 있으며, 이상기후의 영향을 직접 받는 지역에 해당합니다. 실제 엘니뇨가 발생하면 부족한 강수량으로 인하여 국가적으로 심각한 가뭄 피해를 입는 경우가 빈번하며, 최근 강한 엘니뇨에 의한 용수공급 차질을 겪기도 하였습니다. 반면 기후예측 관점에서 바라보면, 이러한 이상기후 시그널과의 상관성은 정보의 효용성을 높일 수 있다는 장점이 있으며, 기후정보에 민감한 농업-수자원 분야 활용이 그 대표적인 사례라 할 수 있습니다.

APEC 기후센터는 이러한 태평양 도서국가가 겪고 있는 기후변화 위협과 물 부족 상황에 도움을 주고자, 「기후정보 활용 스마트 물 관리 시스템 구축」 사업(2016년~2018년)을 추진하게 되었습니다. 지난 2016년에 통가정부와 프로젝트 MOU를 체결 한 이후, 통가의 수도가 위치해 있는 통가타푸 섬을 대상으로 시범사업을

진행하고 있습니다. 사업의 주요내용을 살펴보면, 기후변화에 따른 물수지 분석 및 중장기 수자원 예측 기술개발, 실시간 지하수 모니터링 시스템 구축 및 지하수 계 흐름해석 모형 개발, 밭작물 재배 지역 토양수분 함량 모니터링 및 예측 시스템 구축, 웹기반 통합 물 관리 시스템 구축 등이며, 농업-수자원 분야 정부관계자들의 역량강화 프로그램을 포함합니다.

물은 인간생활에 없어서는 안 될 필수요소입니다. 본 사업을 통하여 통가정부 관계자와 지역주민들은 안정적인 수자원 확보를 위한 유용한 정보를 얻고, 가뭄상황에 적절히 대처함으로써 효율적인 물 관리가 이루어 질수 있을 것으로 기대됩니다. 또한 통가타푸 섬에 거주하고 있는 6만 여명의 지역 주민이 그 혜택을 누릴 수 있을 것으로 사료됩니다. 더불어 통가와 비슷한 실정에 놓여 있는 주변 도서국가 들 에게도 이 시스템을 확장 적용한다면, 물 부족 대응에 도움이 될 것이라 생각됩니다.

끝으로 본 연구 사업을 수행해 주신 우리 센터의 신용희 박사, 윤선권 박사, 김광형 박사, 정임국 연구원, 조원일 연구원, 전인자 사원의 노고에 감사드리며, 이번 연구가 성공적으로 진행될 수 있도록 외부에서 도움을 주신 동아대학교 박남식 교수님과 Roshina Babu 연구원, 서울시립대학교 문영일 교수님과 육지문 연구원, (주)하이드로넷 현민호 이사님과 김건수 과장님에게도 감사의 말씀을 드립니다. 무엇보다 통가 현지 정부관계자들의 적극적인 도움이 없었었다면, 성공적인 사업 수행을 보장하기 어려웠을 것입니다. 실제 활용 가능한 사업이 될 수 있도록 실무에서 도움을 주신 통가 농림부와 국토부 장관님 이하 정부 관계자 분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2018년 3월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

All nations share the fundamental responsibility to develop plans for securing water resources and their equitable distribution among the population, so as to sustainably maintain livelihoods as well as promote economic growth. The risk of extreme events caused by global warming, population growth, and urbanization are increasing at a faster rate than ever before. Over the past few decades, extreme drought and flood due to El Niño–Southern–Oscillation (ENSO) events have both increased and intensified in the South Pacific region. Therefore, securing water resources and managing them sustainably are of the utmost importance to Pacific Island Countries, including the Kingdom of Tonga.

Background of the joint project

Given that fresh water supply systems are lacking and adequate manmade water storage infrastructure is insufficient in Tonga, identifying and protecting available water resources, namely, groundwater, in a sustainable manner are priorities for Tonga. To confront this urgent issue, a joint project by the APEC Climate Center (APCC), the Ministry of Lands, Survey and Natural Resources (MLSNR), and the Ministry of Agriculture, Forestry, Food, and Fishery (MAFFF) was launched in 2017. The project focused on development of a smart groundwater management system utilizing climate information in response to water shortages in Tonga. The aim of the project is to help stakeholders and decision-makers in Tonga's water management and agriculture sector to secure and manage water resources sustainably by providing optimal alternatives to the current system. Both abovementioned ministries have actively

participated and collaborated with the APCC in the project activities. Notably, the MLSNR has collected water datasets and assisted in the digitization of these datasets as well as those from previously conducted climate and geophysical surveys. The APCC analyzed the overall aspects of water resource management in Tonga, including rainfall climatology, climate change impact, and water recharge for Tongatapu Island, main island of the Kingdom of Tonga and the location of its capital Nuku'alofa. In collaboration with teams from Dong-A University and a private company called HydroNET, the APCC installed a real-time groundwater observation system and developed a web-based model for analyzing and predicting the use and recharge of groundwater resources.

Prevailing conditions in Tonga with regard to water resources

The climate of Tonga consists of two seasons: a wet season, from November through April, and a dry season from May through October. About 60% to 70% of the annual rainfall occurs during the wet season. Average annual rainfall in Nuku'alofa for the period from 1945 to 2016 is 1,838 mm. Increasing population and climate change are exacerbating the vulnerability of limited freshwater and groundwater resources in Tonga. A steadily rising demand for groundwater and possible groundwater contamination are directly related to the rising population on Tongatapu Island.

Possible effects of ENSO and climate change on water resources in Tonga

Recent changes in the precipitation regime due to climate change and sea level rise have contributed to increased salinity of groundwater resources. The problem is worsened by the fact that Tonga belongs to a climatic zone directly affected by the ENSO. If a strong El Niño event should strike, there will be less than normal rainfall, and drought is very likely to occur. A composite analysis of precipitation

as per the Global Precipitation Climatology Project (GPCP) shows that average monthly precipitation would decrease by about 90 to 180 mm during the El Niño wet season (December to February). The large-scale atmospheric environment is closely linked with the local hydro-climate in Tonga, wherein precipitation and Southern Oscillation Index (SOI) are positively correlated. If a strong El Niño event occurs, the extent of rainfall received by Tonga is likely to decrease. Therefore, continuous monitoring of El Niño is required to prepare for possible drought events in Tonga.

Climate change scenarios predict that the uncertainty about groundwater recharge is likely to increase in the future. Thus, it is crucial to analyze water balance in the project area according to events associated with climate change. The WATBAL model was applied to estimate the groundwater recharge rate for Tongatapu island. The annual total groundwater recharge was estimated to be 141,584,597 per year at a recharge rate of 30%.

Estimating soil water content in the project area

Since agriculture is the sector most vulnerable to rainfall variations in Tonga, we focused on the smart use of groundwater resources based on climate forecast information. The computer simulation model Soil-Water-Atmosphere-Plant (SWAP) was applied to estimate soil moisture content for ungauged areas, the intention being to build a smart water management system for the agriculture sector in Tonga. Soil moisture sensors (soil water content: SWC; soil water potential: SWP) were installed in crop-growing areas in selected agricultural fields to observe how SWC content affects crop growth. These sensors were installed at the Vaini Research Station and the Fua'amotu Farm of the MAFFF to monitor soil moisture in taro and vanilla cultivation areas, respectively. Statistical correlation between SWC and SWP in each cultivation area during low rainfall periods was analyzed. The parameters

were found to be linearly and significantly correlated ($R^2 \geq 0.9$).

A soil moisture content model for crop-growing areas was then constructed using information on soil physical characteristics, weather, and crop growth. Soil samples were obtained using a spade and analyzed via hydrometric analyses. The results served as inputs to the ROSETTA model, which was used to estimate hydraulic parameters. Based on the physical characteristics of Vaini and Lapaha clay soils, which are representative of those on Tongatapu Island, and the information on the growth of taro, cassava, and yam (the main crops grown on the island), we devised a soil moisture content model for the project area. Overall, the estimation results from the soil moisture content model can be combined with groundwater modeling information for different crop growth stages to support an effective water management plan for the agricultural sector in Tonga.

Contribution of the project toward sustainable water resource use in Tonga

In conclusion, we found that both supply and demand of groundwater resources are significantly biased depending on the locations in question in the project area, and both the quantity and quality of these resources are at high risk because of contamination and depletion of surface water as well as seawater intrusion. Moreover, groundwater conditions in the project area are changing rapidly due to climate change and growing demands for water. Therefore, establishing a systematic and continuous monitoring and management system for groundwater is necessary for ensuring water sustainability in Tonga. The results of this project should guide the government of Tonga toward providing optimal solutions and establishing a strategic plan toward securing sustainable water resources in response to future water demand, climate change, and other extreme events. In doing so, this project will help enhance the quality of life and water security of local communities.

목 차

1. 서론	1
1.1 연구 목적	1
1.2 연구 필요성	2
1.3 연구 내용	2
2. 대상지 현황	4
2.1 위치	4
2.2 기후	4
2.3 해수면 상승	12
2.4 토양	13
2.5 수자원	16
2.6 농업	22
2.7 인구 및 경제	26
3. 연구 자료 및 방법	29
3.1 연구 자료	29
3.1.1 기상관련 자료	29
3.1.2 해수면 온도 관련 자료	33

3.1.3 기후변화 관련 자료	36
3.1.4 지하수 관측 정보	39
3.1.5 토양관련 자료	42
3.1.6 작물 생육정보	44
3.2 연구 방법	50
3.2.1 수자원 연구 방법	50
3.2.2 농업 연구 방법	54
3.2.2 토양 물리적 특성 분석	56
3.3 사용 모형	56
3.3.1 수자원분야 모형	56
3.3.2 농업분야 모형	61
4. 연구결과	65
4.1 수자원 분야	65
4.1.1 열대 태평양 해수면 온도 변화 분석	65
4.1.2 엘니뇨/라니냐에 따른 통가 강수량 변동 특성 분석	67
4.1.3 통가타푸섬 기후변화 영향 평가 및 강수량 전망	71
4.1.4 통가타푸섬 SPI 와 SOI의 상관 분석	76
4.1.5 통계 모형을 이용한 시계열 자료 예측	78
4.1.6 통가타푸섬 지하수 함양량 분석	82
4.1.7 기후변화에 따른 통가타푸섬 지하수 함양량 전망 분석	83
4.2 농업 분야	92
4.2.1 토양수분함량 관측 및 모니터링	92
4.2.2 토양 특성 정보 분석	98
4.2.3 토양수분함량 예측 결과	101
4.2.4 ToCSA시스템을 이용한 농업데이터 수집	106

5. 결론 및 토론-----	109
-----------------	-----

■ REFERENCES-----	114
-------------------	-----

■ 부록

[S1] MOU with APCC and Tongan Government-----	118
[S2] Tongatapu island DEM, villages, well locations and pipe line system-----	124
[S3] Information of real time groundwater monitoring system of salinity monitoring boreholes (SMBs) in Tongatapu island-----	127
[S4] Water balance model input parameters and output of Tongatapu island-----	130
[S5] Prediction of groundwater recharge under climate change-----	145

표 목차

표 2.1. 통가타푸섬 주요 토양에 대한 특성 정보	15
표 2.2. Rainfall Summary and summary of main freshwater resources in Pacific Island Countries	17
표 2.3. Sensors of drinking water coverage estimates between urban and rural (Source: WHO/UNICEF JMP, 2015)	20
표 2.4. 통가 지역별 주요 한해살이작물 재배면적(acres)	24
표 2.5. 통가타푸섬 지역별 주요 한해살이 작물 재배면적(acres)	24
표 2.6. 통가 지역별 주요 다년생 작물 재배면적(acres)	26
표 2.7. 통가타푸섬 지역별 주요 다년생 작물 재배면적(acres)	26
표 3.1. GCMs in used and BCSD CMIP5 projection ensembles provided by NEX-GDDP	38
표 3.2. Classification of SPI drought	53
표 3.3. Studies on estimation of Recharge Rates for Tongatapu	59
표 3.4. Parameters and output of WATBAL model	60
표 3.5. ROSETTA 모형 입력 자료	62
표 3.6. ROSETTA 모형 출력 자료	63
표 3.7. SWAP 모형 입력 자료	64
표 4.1. Percentage of eigenvalues with total variance for different indices (Embedding dimension: 120, =1)	79
표 4.2. Selected GCMs	86
표 4.3. 통가타푸섬 대표 토양에 대한 기존 토성분석 결과(Gibbs, 1976)	99
표 4.4. 입도분석기를 이용한 통가타푸섬 토양에 대한 토성분석 결과	99
표 4.5. 통가타푸섬 대표적 토양에 대한 토양 수리학적 매개변수 추정 결과	101

그림 목차

그림 1.1. 통가 농업/수자원 사업 구성 및 체계도	3
그림 2.1. 통가 주요 섬 그룹에 대한 위치 정보	6
그림 2.2. 통가타푸섬에 대한 주요 지역 구분도	7
그림 2.3. 통가타푸섬 과거 30년에 대한 월 평균 기온 및 월 평균 강수량	7
그림 2.4. 통가타푸섬 과거 30년에 대한 월 평균 최고 기온 및 월 평균 최저 기온	8
그림 2.5. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 연 평균 기온 및 강수량 변화	8
그림 2.6. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 월별 평균 기온 변화	9
그림 2.7. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 월별 강수량 변화	10
그림 2.8. 통가타푸섬 과거 30년 동안 월 강수량 50mm 이하인 빈도	11
그림 2.9. 통가타푸섬 최근 7년 동안 월 평균 최고 및 최저 기온과 월 강수량 변동	12
그림 2.10. Observed and projected relative sea-level change near Tonga (PCCSP, 2014).	13
그림 2.11. 통가타푸섬 토양분포 지도(Gibbs, 1976)	14
그림 2.12. 통가타푸섬 대표적 지층 단면(Ahononou 해변 채석장)	15
그림 2.13. Rainfall summary for Pacific Island Countries (Tony Falkland, 2015)	17
그림 2.14. Observed monthly rainfall and its coefficient variation (CV) at Nukualo'fa weather station in Tongatapu	19
그림 2.15. Tonga water board (Source: SOPAC, 2011)	20
그림 2.16. Water distribution system between urban and rural in the Kingdom of Tonga. The urban water supply system has concrete reservoir and pipe lines (left) and the rural water distribution system has elevation header tanks with well pump and rainwater harvesting from the roof (right).	22

그림 2.17. 통가지역 농업분야 토지이용 현황-----	23
그림 2.18. 통가지역에서 재배되고 있는 주요 한해살이 농작물-----	23
그림 2.19. 통가지역 주요 한해살이작물에 대한 재배면적-----	24
그림 2.20. 통가지역 주요 다년생 작물에 대한 재배면적-----	25
그림 2.21. 통가 인구 변화-----	27
그림 2.22. 통가 지역별 가구수 현황(2015년)-----	28
그림 2.23. 통가 1인당 GDP 변동-----	28
그림 3.1. Vaini 농업 시험장 내에 설치된 AWS 전경 및 센서 명칭-----	29
그림 3.2. ToCSA 농업기상 정보 서비스 시스템-----	31
그림 3.3. 통가타푸섬 두 관측소에 대한 강우 관측자료 비교-----	32
그림 3.4. Research Station의 월평균 최고 및 최저 기온과 상대습도 관측자료-----	32
그림 3.5. Research Station의 월평균 토양수분함량과 누적 일사량 관측자료-----	33
그림 3.6. Map of NINO Regions (Source: http://www.bom.gov.au/).-----	34
그림 3.7. Time series of some SST indices derived from the Tropical Pacific Ocean. The indices are area-averaged SST anomalies: NINO1+2 (0°-10°S, 90°W-80°W); NINO3 (5°S-5°N, 150°-90°W); NINO3.4 (5°S-5°N, 170°-120°W); NINO4 (5°N-5°S, 160°E-150°W).-----	36
그림 3.8. 통가 지역의 NEX-GDDP 기후모형 격자 공간장-----	37
그림 3.9. Structure of the mobile telecommunication based real-time groundwater monitoring system-----	39
그림 3.10. Installation of the real-time groundwater monitoring sensors and data loggers in 2016.-----	40
그림 3.11. Installation of the real-time groundwater monitoring sensors and data loggers in 2017.-----	40
그림 3.12. Group photo in front of the real time groundwater monitoring borehole located in Mataki 'Eua well field in Tongatapu.-----	41
그림 3.13. Location of the sensing in salinity monitoring boreholes-----	41

그림 3.14. 통가타푸섬 6개 대표 토양 샘플링 지점 위치 정보	43
그림 3.15. 통가타푸섬 토양 샘플링 지점에 대한 작물 재배 현황	43
그림 3.16. Cassava 부위별 설명(위) 및 Cassava 재배지 전경(아래)	45
그림 3.17. Cassava 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Tironi et al., 2017)	46
그림 3.18. Yam 부위별 명칭(위) 및 Yam 재배지 전경(아래)	47
그림 3.19. Yam 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Diby et al., 2011)	48
그림 3.20. Taro 부위별 명칭(위) 및 Taro 재배지 전경(아래)	49
그림 3.21. Taro 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Siban, 1979)	50
그림 3.22. 토양수분 관측센서 설치 지점(Nish Farm, Vaini Farm, Fua'amotu Farm)	54
그림 3.23. 토양수분 관측센서 및 설치 지점 전경	55
그림 3.24. Conceptual view of Singular Spectrum Analysis (SSA) by Empirical Orthogonal Function (EOF)	57
그림 3.25. Conceptual diagram for WATBAL model, which is water balance model for surface zone on a small island with no runoff (Falkland and Woodroffe, 1997).	58
그림 3.26. ROSETTA 모형의 토양 수리학적 매개변수 추정 흐름도(신용희, 2016)	62
그림 3.27. SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 시뮬레이션 개요	64
그림 4.1. Composite sea surface temperature anomalies (SSTA) in the developing phases of El Niño and La Niña during December–January. (a) and (b) show SSTA during strong El Niño and La Niña years, respectively.	67
그림 4.2. Composit anomalies of GPCP precipitation during wet season (December to February) in strong (a) El Niño years and (b) La Niña years over the South Pacific Ocean.	69
그림 4.3. Composit anomalies of GPCP precipitation during dry season (June to August) in strong (a) El Niño years and (b) La Niña years over the South Pacific Ocean.	70
그림 4.4. (a)~(d) 일 최저 기온, (e)~(h) 일 최고 기온, (h)~(k) 일 강수량에 대한 His(과거 재현기간, 1950–2005)와 RCP 4.5 시나리오의 P1(2020–2049), P2(2050–2079),	

P3(2080–2099)의 각 기간에 대한 연 평균 기후값의 공간 분포도.	72
그림 4.5. RCP 4.5와 8.5 시나리오에서의 강수 (a, b), 최고 기온 (c, d), 최저 기온 시계열. 파란색 실선은 21개 모형 앙상블 평균, 하늘색 면적은 21개 모형의 최솟값과 최댓값 레인지.	73
그림 4.6. 과거 재현 기간과 RCP 4.5, 8.5 시나리오에서의 강수량 모의 시계열. (a),(b) 21MME, (c),(d) 14MME, (e),(f) D4MME 모형에 대해 각각 평균된 시계열. 검은 실선은 과거 재현 기간, 파란색 실선은 RCP 4.5, 빨간색 실선은 RCP 8.5 시나리오에서의 강수 변동성 및 그 추세선을 나타냄.	74
그림 4.7. Bias corrected annual rainfall projection and their uncertainty by CMIP5 29-GCMs during historical and future. (a) and (b) show RCP4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively.	76
그림 4.8. Calculation of SPI 3-month drought index based on observed monthly precipitation at Nuku'alofa station in Tongatapu island.	77
그림 4.9. Comparison between SPI and SOI during different drought lag-time in Tonga. (a) to (f) indicate SPI 1-Month to 24-Month, respectively.	78
그림 4.10. Time series of reconstructed components for SPIs and SOI using SSA -----	80
그림 4.11. Eigenvalues for SPIs and SOI indices with 120 embedding dimensions and =1 sampling ratio -----	81
그림 4.12. Annual rainfall and recharge of historical period in Tongatapu island ---	82
그림 4.13. Relationship between monthly rainfall and monthly recharge in Tongatapu island.	83
그림 4.14. Comparison of WATBAL recharge and estimated recharge that predicted from equation (13) in Tongatapu island.	83
그림 4.15. Annual rainfall and recharge on RCP4.5 and RCP8.5 under climate change based on different CMIP5 GCMs in Tongatapu island -----	84
그림 4.16. Prediction of groundwater recharge by MPI-ESM-MR model -----	88
그림 4.17. Prediction of groundwater recharge by GFDL-ESM2M model -----	89
그림 4.18. Prediction of groundwater recharge by CNRM-CM5 model -----	90

그림 4.19. Prediction of groundwater recharge by HadGEM2-CC model -----	91
그림 4.20. 통가 농촌지도사에 대한 토양수분 관측 데이터 수집 교육 및 현장 실습 -----	92
그림 4.21. Vaini Farm 토양수분함량 관측 자료와 통가 기상청 강우 관측 자료 -----	93
그림 4.22. Vaini Farm 토양수분함량(SWC) 및 토양수분포텐셜(SWP) 관측 자료 -----	94
그림 4.23. Vaini Farm 관측 토양수분함량(SWC)과 토양수분포텐셜(SWP) 상관관계 ----	95
그림 4.24. Fua'amotu Farm 토양수분함량 관측 자료와 통가 기상청 강우 관측 자료 ---	96
그림 4.25. Fua'amotu Farm 토양수분함량(SWC) 및 토양수분포텐셜(SWP) 관측 자료	96
그림 4.26. Fua'amotu Farm 관측 토양수분함량(SWC)과 토양수분포텐셜(SWP) 상관관계 -----	97
그림 4.27. Nishi Farm의 토양수분센서 설치 전경과 케이블 손상 상태 -----	98
그림 4.28. 토양에 대한 입도분석 시험 -----	99
그림 4.29. 토양삼각도에 의한 통가타푸섬 대표적 토양의 토성(Soil texture) 기존 토성분석(왼쪽), 입도분석기 결과(오른쪽) -----	100
그림 4.30. 통가타푸섬 대표적 토양에 대한 토양수분함량 예측 결과(Baresoil 가정) ----	102
그림 4.31. Vaini Farm에 대한 토양수분함량 관측 및 예측 결과(Taro 재배지역) -----	103
그림 4.32. Fua'amotu Farm에 대한 토양수분함량 관측 및 예측 결과 (Vanilla 재배지역) -----	104
그림 4.33. 재배작물에 따른 토양수분함량 시뮬레이션 예측 결과(Vaini clay 토양 가정)	105
그림 4.34. Extension Diary 구성요소 - 오프라인 데이터 수집 어플리케이션과 온라인 데이터 분석 및 표출을 위한 ToCSA 시스템 -----	107

1. 서론

1.1 연구 목적

최근 기후변화와 이상기후 영향으로 지구상의 여러 지역에서는 극치사상의 발생 빈도와 강도가 날로 증가하고 있는 추세이며, 더불어 자연재해의 형태는 점차 대형화, 다양화되고 있다(e.g., IPCC, 2007; Wood et al., 2011; KMA, 2012; Sillmann et al., 2013; and Yoon and Moon, 2014). 특히 태평양 도서국은 기후변화와 해수면 상승, 엘니뇨/라니냐 등 이상기후 영향으로 지속가능한 수자원 확보가 어려운 실정이며, 여러 개의 작은 섬과 평탄한 지형으로 구성되어 있어 상대적으로 적은 집수면적으로 인한 지표수 확보가 어려운 실정이다. 이러한 도서지역의 가용 수자원은 주로 빗물과 지하수이나, 저지대 해안 지역의 경우 해수침투에 의한 염수영향으로 지하수오염 문제가 심각하며, 음용수나 농업용수로 활용이 어려운 실정이어서 주로 빗물을 사용하고 있다. 따라서, 2016년부터 3년간 APEC 기후센터는 통가 정부와의 MOU를 통하여 물 부족 대응을 위한 기후정보 활용 지하수자원관리 시스템 개발 및 농업지역 스마트 물관리 시스템 구축 사업을 추진하였다.

이번 사업을 통하여 통가타푸섬을 대상으로 지하수 관측정 6곳의 수위, 수온, EC값을 자동으로 측정할 수 있는 지하수 자동관측 시스템을 구축하였으며, 지하수계 변화를 모의할 수 있는 지하수 흐름 분석 모형을 개발하였다. 또한 통가 정부관계자의 효율적인 지하수 관리를 위한 통합 지하수정보 시스템을 개발하여 제공하였다. 향후 현지 정부관계자의 활용 및 서비스를 위하여 추가적인 사업을 진행시켜 더욱 고도화하고 발전시켜나갈 계획이다. 농업분야 스마트 물관리 시스템 구축을 위해 발작물 재배 지역에 토양수분 함량 관측 센서를 설치해 주기적으로 토양수분 상태를 모니터링하고 미계측 지역에 대해서는 토양수분 함량 추정 모형을 통해 토양수분 상태를 예측할 수 있는 시스템을 개발해 나갈 계획이다.

물은 인간생활에 필수적인 요소이다. 본 사업을 통하여 통가정부 관계자와 지역주민들은 지하수자원관련 유용한 정보를 얻고, 가뭄과 홍수에 대비한 물 관련 정책을 지원하고, 의사결정에 도움이 될 수 있는 시스템이 개발될 것으로 판단되며 농업분야에 있어서도 제한된 수자원의 보다 효율적인 이용을 위한 스마트 물관리 시스템 구축이 기대된다.

또한 이 사업의 성공적인 수행을 통해 통가와 비슷한 실정에 있는 여러 섬 지역에 대해서도 개발된 기술이 적용 가능하며, 태평양 도서국 및 개발도상국가의 물 부족 대응을 위한 안정적인 수자원 확보에 도움이 될 것으로 사료된다.

1.2 연구 필요성

태평양 도서국은 엘니뇨/라니냐 등 이상기후 현상에 따른 잦은 가뭄과 홍수 발생으로 물부족(농업, 수자원 분야) 문제가 심각하며, 기후변화에 따른 강수량 변동, 해수면 상승, 해수침투 등 안정적인 수자원 확보에 어려움을 겪고 있다(e.g., SOPAC and WHO, 2007; CSIRO, 2011; IPCC, 2013). 특히 통가는 여러 개의 작은 섬(170개, 유인도 35개)으로 구성되어 있어 지표수와 지하수의 양이 절대적으로 부족하고 해수면 상승과 강수량 변동에 따른 물부족 문제가 심각하다(Kula, 2009; White et al., 2009; NWP, 2011; Hyland, 2012). 2015년 통가를 비롯한 태평양 도서국에서는 엘니뇨 영향으로 인해 1년 가까이 극심한 건조 날씨가 지속되어 광범위하게 가뭄이 발생하였고 담수 공급에 취약한 외부 섬들에 대한 비상 급수가 이루어지기도 했으며 농업생산분야에서는 물 부족으로 인한 작물 생산량 감소 피해가 발생하였다(FAO, 2015; UNOCHA, 2015).

1.3 연구 내용

통가의 농업과 수자원은 기후변화와 이상기후현상에 매우 취약한 구조이며, 향후 APCC에서 개발된 기후정보 활용 스마트 물관리 시스템을 적용한다면 농업/수자원분야의 효율적인 물관리가 가능하며, 주민 생활안정 및 농업경제성장에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 현재 APCC-통가 정부간 프로젝트 MOU를 통한 농업과 수자원 분야 사업이 수행 중에 있으며, 이를 더욱 고도화 하고 원천기술 확보를 통한 범용시스템으로의 개발이 필요하다. 나아가 태평양 도서국 지역 확대적용 및 관련분야 해외사업 재원 마련에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

통가 Test Bed 지역을 중심으로 기후정보를 활용한 농업 수자원 분야 물부족 대응 스마트 물관리 시스템 구축을 연구의 목표로 한다. 농업/수자원 분야 기후변화 적응기술

과 계절예측 기술을 주요 핵심요소기술로 개발하며, 통가 정부 활용을 전제로 한 시스템 개발 및 서비스를 포함한다(2년 연속과제).

- 1차년도('17): 기후정보 활용 농업/수자원 기후변화 적응 및 계절예측 기술개발
 - 천수 농경지 가뭄피해 경감을 위한 토양수분 함량 예측 기술
 - ToCSA시스템을 이용한 농업데이터 구축 기술
 - 지하수자원 함량 계절예측 및 Web기반 시스템 구축 기술
- 2차년도('18): 통가 물부족 대응을 위한 스마트 물관리 시스템 고도화 및 서비스 기술개발
 - 농업/수자원 연계 기술 고도화 및 원천기술 확보
 - Web기반 통합 물관리 시스템의 현지화 및 서비스 기술개발
 - 개발 시스템의 범용화 및 태도국/개도국 확장 기술 개발

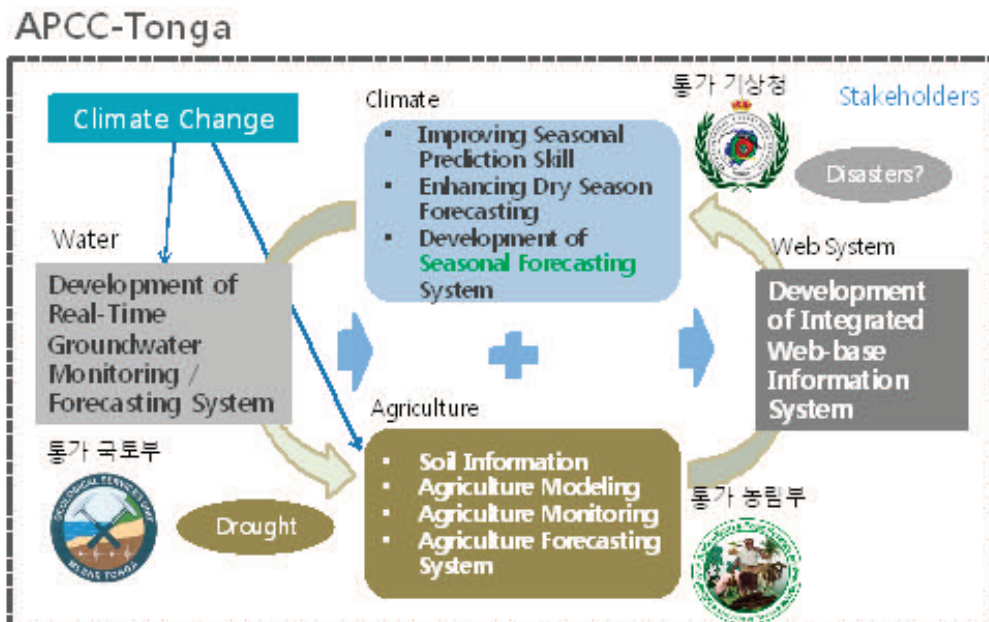


그림 1.1. 통가 농업/수자원 사업 구성 및 체계도

2. 대상지 현황

2.1 위치

통가는 남태평양에 위치한 작은 군도국가로 176개의 섬으로 이루어져 있으며 남위 15°-23.5°, 서경 173°-177° 사이에 위치한다. 통가의 섬들은 최북단에서 최남단까지 약 800km 떨어져 분포하고 있으며 총 육지 면적은 약 750km²이다. 통가에서 가장 가까운 나라는 피지로 북서쪽으로 약 700km 떨어져 있으며 다음으로 가까운 나라는 북동쪽으로 약 900km 떨어진 곳에 위치한 사모아이다. 그림 2.1은 통가왕국을 크게 4개 그룹으로 나누어 나타낸 것으로 가장 북쪽에 Ongo niua 그룹, 남쪽으로 내려오면서 Vava'u 그룹과 Ha'apai 그룹으로 구분되며 가장 남쪽에 Tongatapu 그룹이 위치해 있다. 통가의 수도는 Nuku'alofa로 Tongapapu island 북쪽 중앙에 위치해 있으며 약 4만명의 인구가 거주하고 있다. 통가타푸섬은 259km²의 면적으로 그림 2.2와 같이 크게 7개 지역으로 나누어지며 주요 농업지역은 Vaini(3), Lapaha(4), Tatakamotonga (5) 지역으로 통가타푸섬 전체 농업면적의 약 60%를 차지한다.

2.2 기후

통가의 기후는 습도가 높은 아열대 기후로 대체로 2-3월에 기온이 높고 7-8월에 기온이 낮은 특성을 보인다. 통가타푸섬의 과거(1980-2010년) 관측기록을 분석해보면 연평균 기온은 23.9 °C, 연평균 강수량은 1,754mm를 나타냈다. 최근(2011-2016년)들어 기후변화의 영향으로 연평균 기온은 24.5 °C로 과거 30년보다 0.6 °C 증가한 것으로 나타났으며 강수량의 경우 역시 2,110mm로 356mm 증가한 것으로 나타났다. 남태평양 수렴대(South Pacific Convergence Zone, SPCZ)는 남태평양 지역의 장기간 강우 분포와 밀접한 관련이 있는 지역으로 엘니뇨 남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)과 태평양 10년 주기 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO)의 영향을 받는다. 통가타푸섬의 강수는 대류 작용, 열대성 저기압 또는 아열대 제트 기류의 구름층과 관련된 비에서 비롯된다(Thompson, 1986). 통가타푸섬의 계절기후는 크게 11월에서 4월까지의 우기와 5월에서 10월까지의 건기로 나눌 수 있는데 과거 두 계절간 강수량

특성을 보면 우기에 1,056mm, 건기에 696mm로 우기에 360mm 더 많이 내리는 것으로 나타났다. 그림 2.3은 통가타푸섬 Fua'amotu 기상대에서 1981년부터 2010년까지 관측된 기온과 강수량 자료에 대한 월별 30년 평균값을 나타낸다. 관측자료를 분석해 보면 통가타푸섬의 월 평균 기온은 2월에 26.54 ℃로 가장 높고 8월에 21.29 ℃로 가장 낮게 나타나고 있으며 강수량의 경우 1월에 215.4mm로 가장 많고 10월에 92.0mm로 가장 적게 나타나고 있다. 그림 2.4는 최고 기온과 최저 기온에 대한 월별 30년 평균값을 나타내고 있으며 최고 기온과 최저 기온의 차는 10월에 7.01 ℃로 가장 컸으며 4월에 6.24 ℃로 가장 작게 나타났다. 통가타푸섬의 월별 최고 기온과 최저 기온의 연중 격차는 평균적으로 6.68 ℃ 차이를 보이고 있으나 연중 계절에 따른 격차의 변동은 크지 않은 것을 알 수 있다.

온실가스 배출 증가로 인한 지구 온난화의 영향으로 전 지구적인 기온 상승과 함께 강수량 변화도 함께 나타나고 있다. 통가타푸섬의 관측 기상자료를 분석해 본 결과 지난 30년(1981-2010년) 동안 통가타푸섬의 기온은 약 1.2 ℃ 상승하는 경향을 보인 것으로 나타났으며 강수량의 경우 약 900mm 증가하는 경향을 보인 것으로 나타났다(그림 2.5).

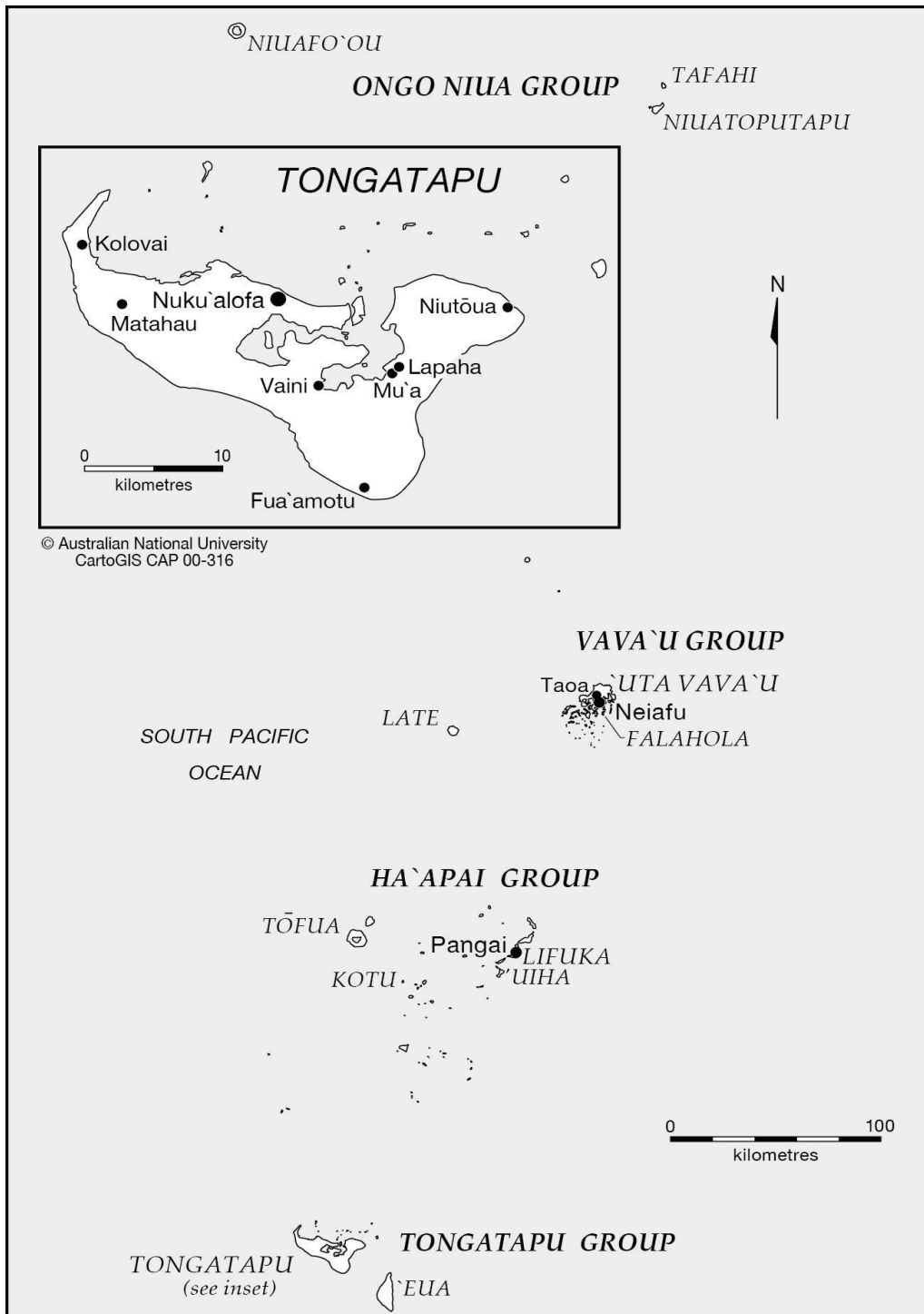


그림 2.1. 통가 주요 섬 그룹에 대한 위치 정보

<http://asiapacific.anu.edu.au/mapsonline/base-maps/tongatapu-1>



그림 2.2. 통가타푸섬에 대한 주요 지역 구분도

<http://asiapacific.anu.edu.au/mapsonline/base-maps/tongatapu-location>

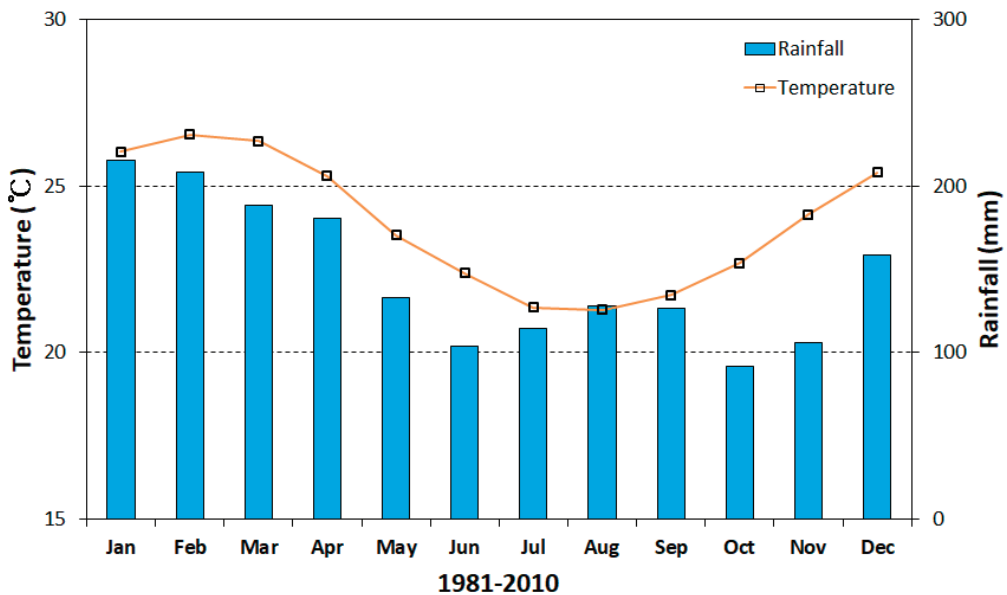


그림 2.3. 통가타푸섬 과거 30년에 대한 월 평균 기온 및 월 평균 강수량

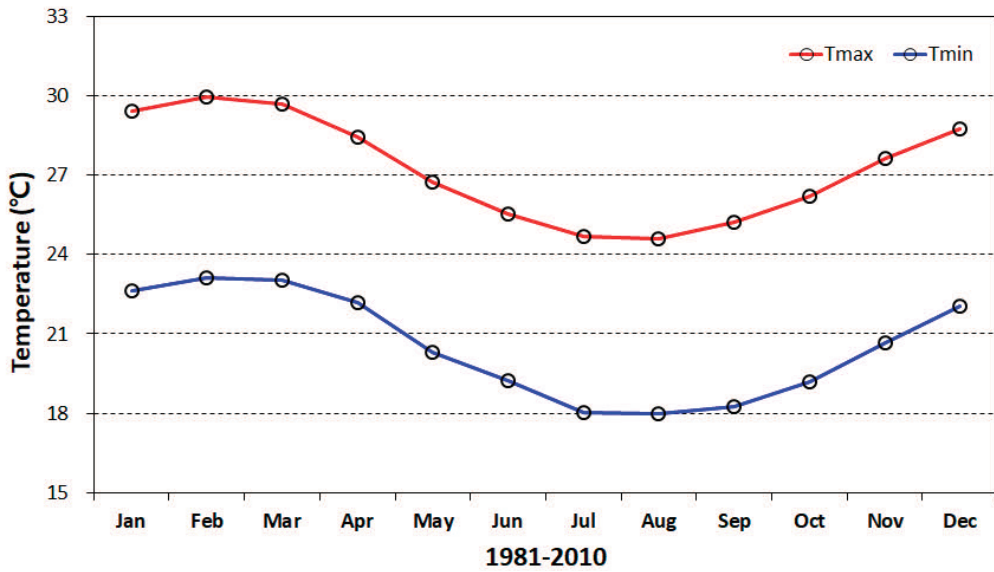


그림 2.4. 통가타푸섬 과거 30년에 대한 월 평균 최고 기온 및 월 평균 최저 기온

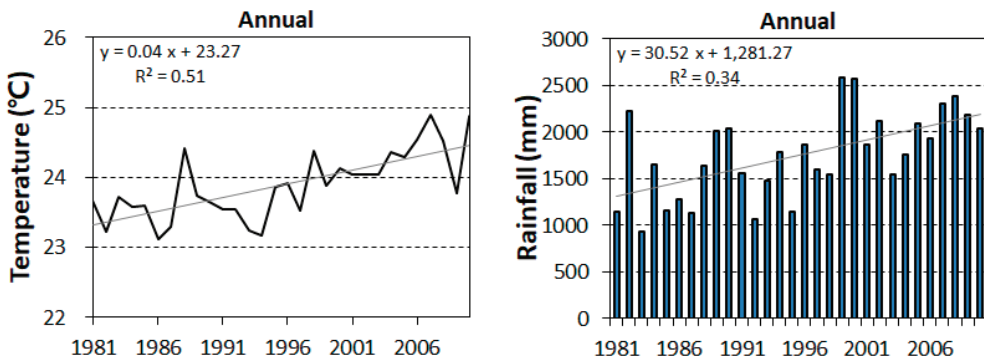


그림 2.5. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 연 평균 기온 및 강수량 변화

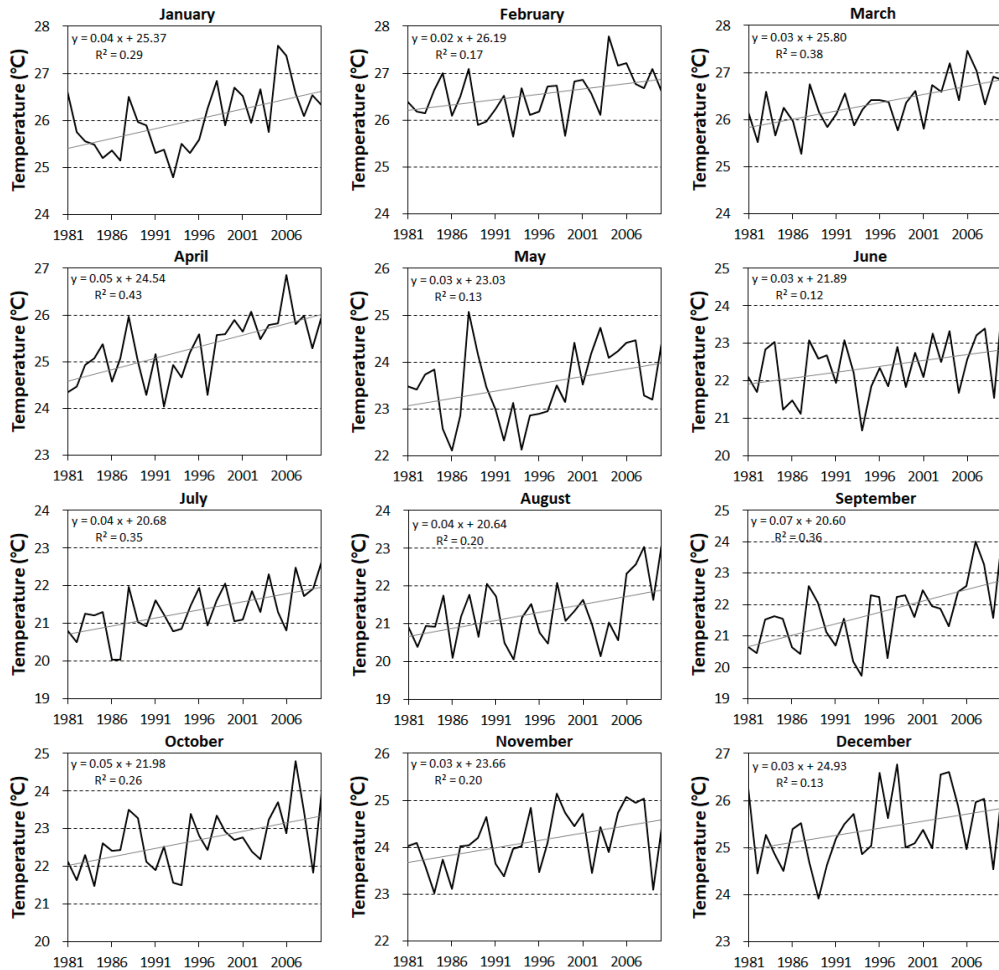


그림 2.6. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 월별 평균 기온 변화

그림 2.6은 지난 30년 동안 통가타푸섬의 월별 기온 변화를 나타내는 것으로 모든 월에 대해 기온이 상승하는 경향을 나타내고 있다. 특히 9월 기온이 크게 상승하는 경향을 보이고 있으며 지난 30년 동안 약 2.1 °C 상승한 것으로 나타났다. 월별 기온 상승률을 보면 9월에 0.07 °C로 가장 높고 4월과 10월에 0.05 °C 그리고 1월, 7월, 8월에 0.04 °C 였으며 3월, 5월, 6월, 11월, 12월에 0.03 °C 마지막으로 2월에 0.02 °C로 가장 낮게 나타났다. 월별 기온 변화 분석을 통해 통가타푸섬에서 기온 증가 현상이 뚜렷이 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있으며 통가 농작물 생육환경에 대한 기온 상승의 영향이 향후 어떻게 나타날지에 대한 연구 필요성이 정부차원에서 제기되고 있다.

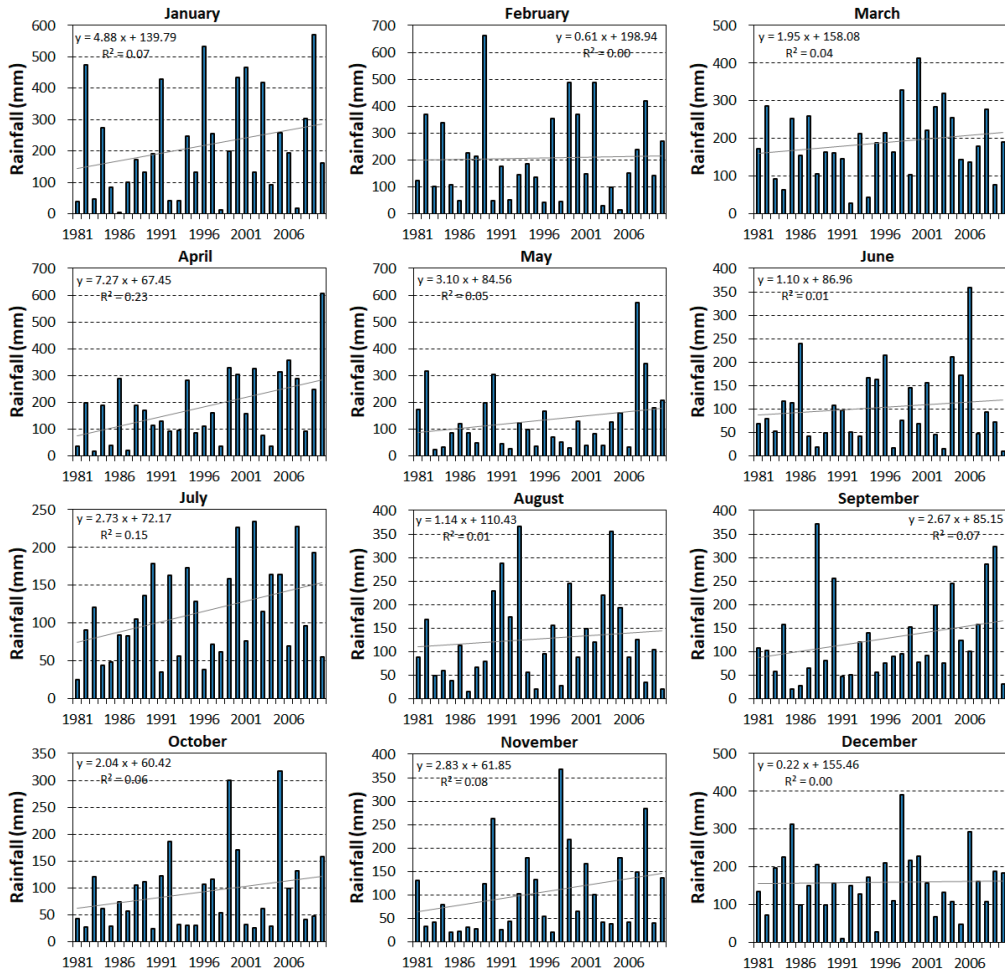


그림 2.7. 통가타푸섬 과거 30년 동안의 월별 강수량 변화

강수량의 경우 연년 변동이 크게 나타나고는 있지만 기온과 마찬가지로 지난 30년 동안 모든 월에서 조금씩 강수량이 증가하는 경향을 보이고 있다(그림 2.7). 통가타푸섬은 12월에서 5월까지 강수량이 많은 우기에 속하고 6월부터 11월까지 강수량이 적은 건기로 볼 수 있다. 그래프들은 월별 강수량 변화를 나타내는데 특히 4월에 연간 약 7.3mm 씩 강수량이 증가하는 것으로 나타나고 있으며 1월에도 연간 약 4.88mm 씩 강수량이 증가하는 경향을 보이고는 있으나 그 상관성은 매우 낮다. 전체적으로 월별 강수량이 증가하는 경향을 보이고는 있지만 어떤 해에는 강수량이 상당히 적게 나타나는 것을 그래프를 통해 확인 할 수 있다. 그림 2.8은 지난 30년 동안 월 강수량이 50mm가

채 되지 않는 해를 월별로 적산한 것으로 주로 10월과 11월에 각각 12년, 13년 동안 강수량이 적었던 것으로 나타나고 있다. 반면 3월에는 대체로 강수량이 많아 월 강수량이 50mm 이하인 해는 1992년과 1994년 두 번 밖에 없었다.

2014년 6월부터 2015년 12월까지를 슈퍼 엘니노 발생시기라고 알려지고 있으며 슈퍼 엘니노는 엘니노 감시구역(Niño 3, 4 지역: $5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)의 해수면 온도가 2.0°C 이상 상승하여 1년 이상 지속되는 경우를 말한다. 슈퍼 엘니노가 발생했던 시기에 대한 통가타푸섬의 강수량 특성을 분석해 보면 평년에 비해 강수량이 적은 것을 확인 할 수 있다(그림 2.9). 특히 슈퍼 엘니노의 시작과 함께 통가타푸섬의 8월 강수량은 13.9mm로 평년 128.2mm와 비교해 상당히 적었으며 9월 강수량 또한 19mm로 평년 126.5mm와 비교해 적게 나타났다. 슈퍼 엘니노 기간 동안 적은 강수량은 지속되었고 이로 인한 농작물 가뭄 피해가 발생해 주요 수출 상품인 단호박의 경우 수확량이 80%나 감소한 것으로 나타났다.

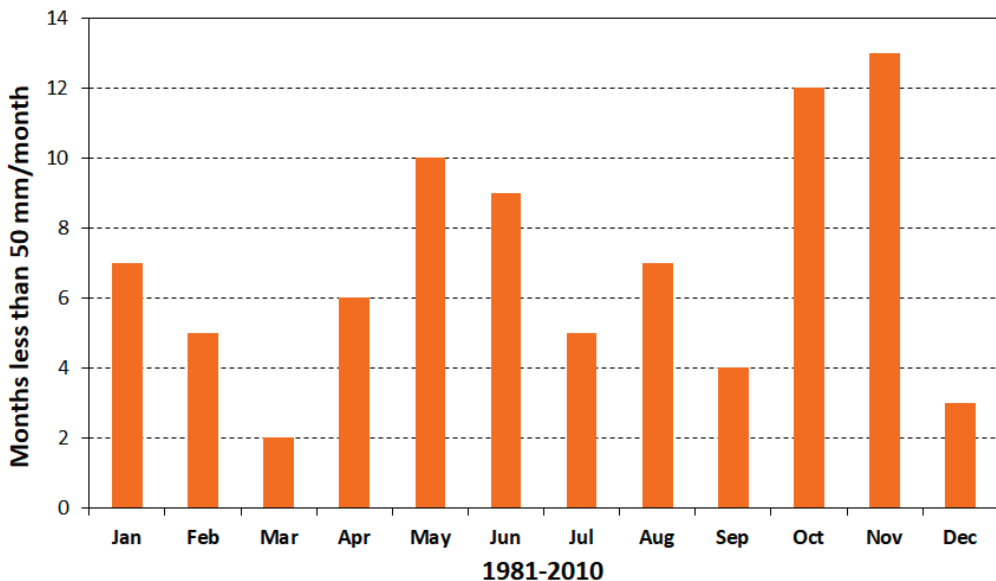


그림 2.8. 통가타푸섬 과거 30년 동안 월 강수량 50mm 이하인 빈도

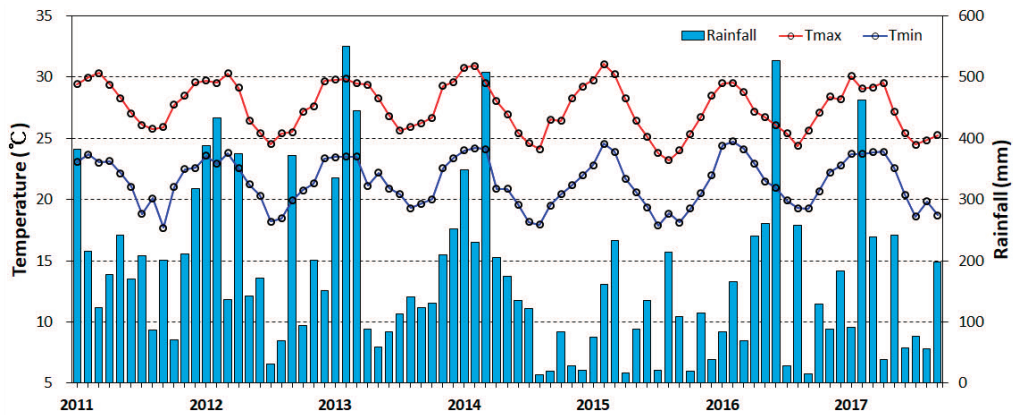


그림 2.9. 통가타푸섬 최근 7년 동안 월 평균 최고 및 최저 기온과 월 강수량 변동

2.3 해수면 상승

통가의 해수면 변동 추세는 1993년부터 2007년까지 기록이 시작된 이래로 해수면이 6.4mm/yr 수준으로 전반적으로 증가하고 있는 것으로 관측되었다(TMS, Tonga, 2007). 다양한 기후 변화 모델에서 예측된 해수면 상승고는 대략 2030년까지 5-15cm, 고 배출 시나리오 하에서 2090년까지 20-60cm 증가한다(PCCSP, 2014). 다양한 기후 변화 모델에서 예측된 해수면 상승량은 대략 2030년까지 5-15cm, 2090년까지 20-60cm 증가하는 것으로 예측되었다(PCCSP, 2014).

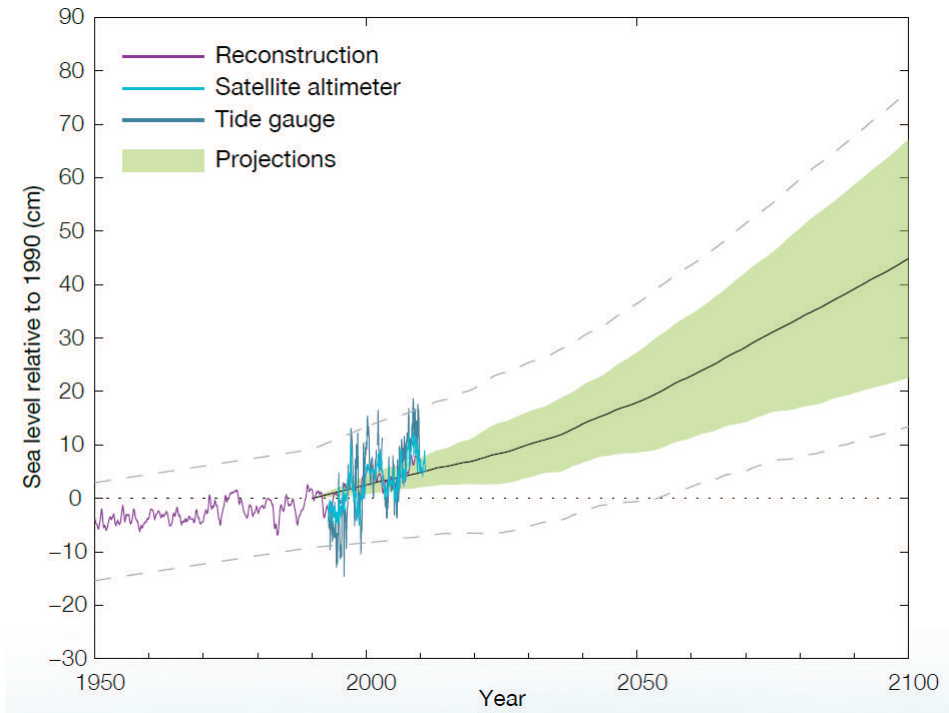


그림 2.10. Observed and projected relative sea-level change near Tonga (PCCSP, 2014).

2.4 토양

통가타푸섬은 비교적 평탄한 지형으로 되어 있으며 투수성이 큰 석회암 대수층 위에 얇은 점토질 토양층을 구성하고 있다. 통가타푸섬의 지표면은 서쪽에 위치한 화산의 분출로 인해 유입된 미세 안산암 테프라의 퇴적으로 형성된 토양층으로 덮여있으며 토양층은 크게 약 2 만년 전에 퇴적 된 화산재로부터 풍화된 부드러운 갈색의 점토층(Lapaha Clay)과 약 5 천년 전에 퇴적 된 보다 거친 토성의 적갈색 점토층(Vaini Clay)으로 구성되어 있다(Cowie, 1980; Manu, 2000). 섬의 서쪽에 있는 토양은 일반적으로 풍화작용이 덜 이루어져 질감이 거친 반면에 동쪽 토양은 상당한 풍화작용으로 미세한 질감을 띠고 있다. 토양층의 두께는 표면에 노출된 산호 석회암 층의 침식 정도 및 침식 후 화산재의 퇴적으로 인해 지역적으로 다를 수 있지만 일반적으로 화산 분출 지점에서 가까운 통가타푸섬 서부지역에서는 약 5 m의 토양층을 나타내고 있으며 동쪽으로 갈수록 토양층이 얇아져 통가타푸섬 동부지역에서는 1 m 미만의 토양층을 나타낸다.(Manu, 2000).

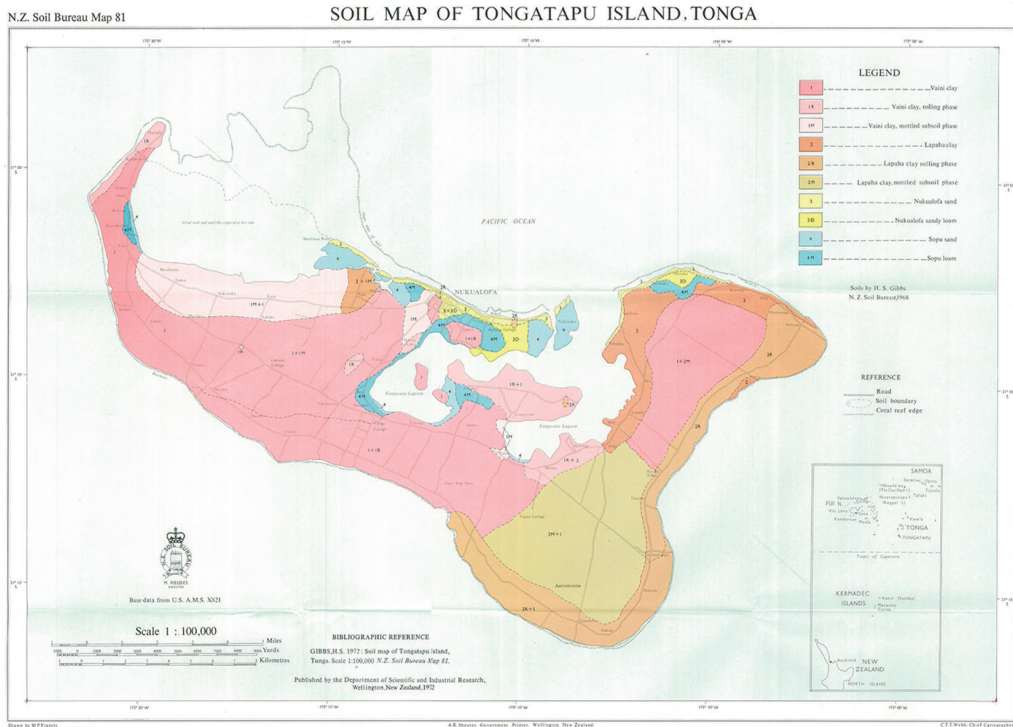


그림 2.11. 통가타푸섬 토양분포 지도(Gibbs, 1976)

그림 2.11은 Gibbs(1976)의 New Zealand Soil Survey Report 35에 수록되어있는 통가타푸섬의 토양분포도를 나타내고 있다. 이 보고서에서는 통가타푸섬의 토양을 크게 4가지(Vaini soils, Lapaha soils, Nuku'alofa soils, Sopa soils)로 분류하고 있으며 농작물의 생산은 주로 Vaini soils과 Lapaha soils 지역에서 이루어지고 있다. Vaini soils은 통가타푸섬에서 가장 넓게 분포하고 있으며 섬의 서쪽과 중앙에 주로 분포하고 동쪽 일부지역에 분포하고 있다. Lapaha soils은 주로 섬 중앙에서 동쪽으로 분포하고 있으며 Fua'amotu 국제공항 중심으로 하는 섬내륙 지역과 동쪽 해안을 따라 분포하고 있다. 표 2.1은 젊은 토양에 해당하는 Vaini clay와 오래된 토양에 해당하는 Lapaha clay의 물리적 특성을 실험한 결과를 나타내고 있으며 토층 깊이에 따라 차이는 있으나 Vaini clay는 50%-60%의 점토 성분을 함유하고 있으며 Lapaha clay는 점토 성분 함유율이 약 70% 이상을 차지하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 2.12는 Fua'amotu 국제공항 남쪽에 위치한 Ahononou 해변 주변 채석장의 지층 단면을 촬영한 것으로 통가타푸섬 대부분의 토양은 사진의 지층 단면에서 보이는

것 같이 두꺼운 산호 석회암 층 위에 화산재가 퇴적되어 풍화된 얇은 토양층으로 형성되어 있는 것이 특징이며 토양층을 기반으로 다양한 농작물 생산이 이루어지고 있다. 통가 타푸섬의 밭작물 재배지역은 화산재가 쌓여 풍화된 점토질 토양으로 상당히 비옥한 재배 환경을 갖고 있으며 비료를 투입하지 않는데도 불구하고 생산성이 좋게 나타나고 있다. 또한 투수성이 좋은 석회암 지반 위에 농사를 지을 수 있는 토양층이 형성되어 있어 대체적으로 물 빠짐이 좋은 편이다.

표 2.1. 통가타푸섬 주요 토양에 대한 특성 정보

Soil Name	Vaini clay				Lapaha clay			
Horizon	A _p	A ₁₂	A ₃	B ₂	A _p	A ₁₂	B ₂₁	B ₂₂
Depth (cm)	0-13	13-28	28-41	61-76	0-13	13-30	33-51	58-76
Clay (%)	53.1	53.8	57.6	39.8	68.0	71.5	79.6	82.7
Silt (%)	20.3	20.0	18.9	23.0	8.6	6.6	2.7	2.1
Sand (%)	19.2	18.4	16.6	16.3	11.3	10.6	4.8	3.1
pH (H ₂ O)	7.6	7.2	6.4	6.7	7.7	7.7	6.8	6.8
N (%)	0.42	0.20	0.17	0.07	0.59	0.23	0.10	0.09
C (%)	4.9	2.5	2.3	0.8	5.8	2.7	1.3	1.1



그림 2.12. 통가타푸섬 대표적 지층 단면(Ahononou 해변 채석장)

2.5 수자원

수자원은 안정적인 인간 생활과 환경유지, 관광 및 산업 활동에 필수 불가결한 기본 요소이며, 국민 건강유지와 기반산업 육성, 경제성장을 뒷받침하기 위하여 국가적으로 해결해야할 주요 선별 과제중 하나이다. 태평양 도서 국가는 기후변화에 따른 해수면 상승과 엘니뇨 및 라니냐 등 이상기후 현상 영향을 직접 받는 지역으로 연안지역 피해와 가뭄으로 인한 용수공급 차질 등 수자원 취약성 문제가 빈번히 발생하고 있다(IPCC, 2013; SOPAC and WHO, 2007; White, I et, al., 2007; and White, I et, al., 2009).

그림 2.13은 태평양 도서국의 연간 강수량 관측(평균, 최저, 최고) 값과 그 변동계수(coefficient of variation, CV)를 나타내고 있다. 연평균 강수량은 1,100mm에서 4,700mm로 다양하게 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 세계 평균 강수량(약 870mm)에 비하여 많은 것으로 나타난다. 그러나 국가별 강수량의 편차와 변동계수가 크게 나타나고 있어 지속적인 수자원 관리에 어려움이 있음을 확인할 수 있다. 특히 본 연구의 대상지역인 통가의 연평균 강수량은 1,700mm 정도로서 타 도서 국가들에 비하여 많지 않는 편이나 연간 최저 강수량과 최고 강수량의 편차가 그리 크지 않아 수자원 관리 측면에서 상대적으로 안정적인 국가에 해당하는 것으로 파악된다. 또한 표 2.2는 태평양 도서국가의 주요 수자원 출처를 나타내고 있다. 빗물과 지하수는 모든 도서국가의 주요 수자원으로 활용되고 있음을 확인할 수 있다. 또한 일부 도서국가에는 산지와 하천 등 지표수를 확보할 수 있는 지형 구조를 갖고 있는 반면, Kiribati, Nauru, Niue, RMI, Tonga, 그리고 Tuvalu는 낮은 지형과 적은 집수면적으로 인하여 지표수를 충분히 확보할 수 없는 취약한 국가들로 분류할 수 있다.

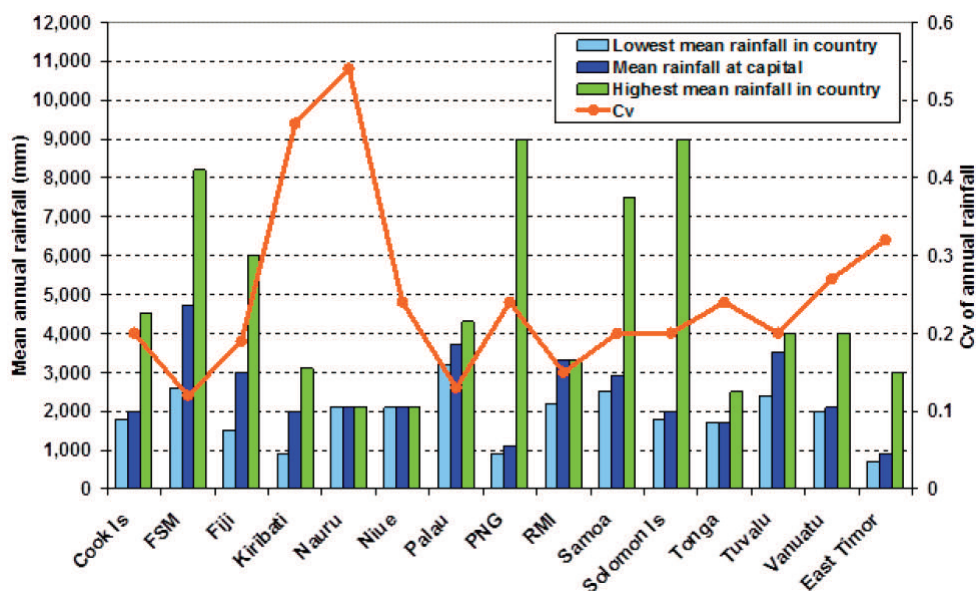


그림 2.13. Rainfall summary for Pacific Island Countries (Tony Falkland, 2015)

표 2.2. Rainfall Summary and summary of main freshwater resources in Pacific Island Countries

Country	Main Freshwater Resources	Rainfall (mm)	CV
Cook Island	SW, GW, RW	2,000	0.20
FSM	SW, GW, RW	4,700	0.12
Fiji	SW, GW, RW, D (tourist resort only)	3,000	0.19
Kiribati	GW, RW	2,000	0.47
Nauru	D (regular use), RW, GW (limited)	2,100	0.54
Niue	GW, RW	2,100	0.24
Palau	SW, GW, RW	3,700	0.13
PNG	SW, GW, RW	1,100	0.24
RMI	RW, GW (limited), D (regular & emergency)	3,300	0.15
Samoa	SW, GW, RW	2,900	0.20
Solomon Is	SW, GW, RW	2,000	0.20
Tonga	GW, RW, SW (limited)	1,700	0.24
Tuvalu	RW (primary), GW (limited), D (emergency)	3,500	0.20
Vanuatu	SW, GW, RW	2,100	0.27

* SW=Surface Water, GW=Groundwater, RW=Rainwater, D=Desalination

* FSM=Federal States of Micronesia, PNG=Papua New Guinea, RMI=Republic of Marshall Islands

* Coefficient of variation (CV)=standard deviation/mean

이중 통가는 여러 개의 작은 섬으로 구성되어 있어, 지표수와 지하수의 양이 절대적으로 부족하고 강우량의 경년 변화와 지하수위 변동에 따른 물 부족 문제가 매우 심각한 국가에 해당한다(Kula, T., 2009; and Hyland, K., 2012). 수자원관리 측면에서 통가의 주요 섬 지역에 대한 주요 현안 이슈를 정리하면 다음과 같다.

Niuafu'ou 섬의 경우 집수 유역의 과소, 빗물 탱크의 부족 및 유지관리의 부족으로 인하여 물의 중앙 공급을 위한 저수지 또는 공영 집수지역이 필요한 실정이다. Niuatoputapu 섬 지역은 Nouafu'ou 지역과 유사하나, 염도가 포함된 지하수를 보유하고 있으나, 신선한 물을 얻기 위한 담수렌즈 관련 연구는 수행되지 않아 관련 연구가 필요한 실정이다. Ha'apai 그룹에 속해있는 섬지역은 Niuafu'ou 및 Niuatoputapu와 수자원 상황이 유사하나, 낮은 지하수면과 해수면과 인접한 저지대가 많이 분포하고 있어 해수침투에 의한 담수렌즈를 결정하기 어려운 실정이며, 이에 대한 지질조사가 필요한 지역이다. 또한 통가의 가장 남쪽에 위치한 섬 중 하나인 'Eua 섬은 Niuafu'ou, Niuatoputapu 및 Ha'apai 섬들과 수자원 상황은 유사하나, 비교적 높은(해발 300 m 이상) 지형을 가지고 있어 소량의 지표수를 보유하고 있다. 하지만 이 지역의 지표수는 높은 유사로 인하여 음용수로 활용하기 어려우며, 홍수 시 Flash Flood 발생으로 인한 강우량 저수가 어려운 실정이다. 또한 정수 시스템이 잘 갖추어져 있지 않은 문제도 있다. 또한 바다와 인접해 있는 해안 지역은 높은 절벽으로 이루어져 있으며, 해안 침식을 가속화시키는 요인으로 작용하고 있다.

그림 2.14는 통가타푸(Tongatapu)섬의 월강수량 관측 자료로 부터 산정한 월강수량 평균과 변동계수(CV)를 나타내고 있다. 앞서 그림 2.13에서 설명한 바와 같이 통가 지역의 연간 강수량의 변동은 그리 크지 않은 것으로 확인되나, 월별 강수량 변동 특성을 살펴보면, 변동계수가 매우 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 특히 건기에 해당하는 4월에서 10월에는 강수량의 변동계수가 비교적 크게 나타나 안정적인 수자원 관리에 어려움이 있음을 확인할 수 있다.

기준에 발생했던 통가 지역의 과거 가뭄과 관련한 사례를 살펴보면, 1983년과 1998년, 그리고 2006년에 심각한 가뭄이 발생된 것으로 기록되었다(JNAP, 2010). 그리고 가장 최근에는 2015년에 1년 가까이 극심한 가뭄이 발생하여 Ha'apai 섬 등 수자원 확보가 취약한 어려운 지역에 비상 급수가 이루어졌다(UNOCHA, 2015). 또한 통가 지역

의 심각한 가뭄발생 피해가 발생했던 해를 살펴보면 엘니뇨현상과 직접적인 연관이 있음을 알 수 있다. 엘니뇨가 발생하면 연평균 강수량이 평년에 비하여 절반 가까이 줄어들고 이로 인하여 지하수 함양량이 감소하고 해수침투현상으로 인한 지하수자원 확보가 어려워진다. 이는 지하수 개발과 함께 기후변동성이 통가타푸섬에서 지하수자원의 취약성을 결정하는데 근본적으로 중요하다는 점을 시사한다(White, 2009).

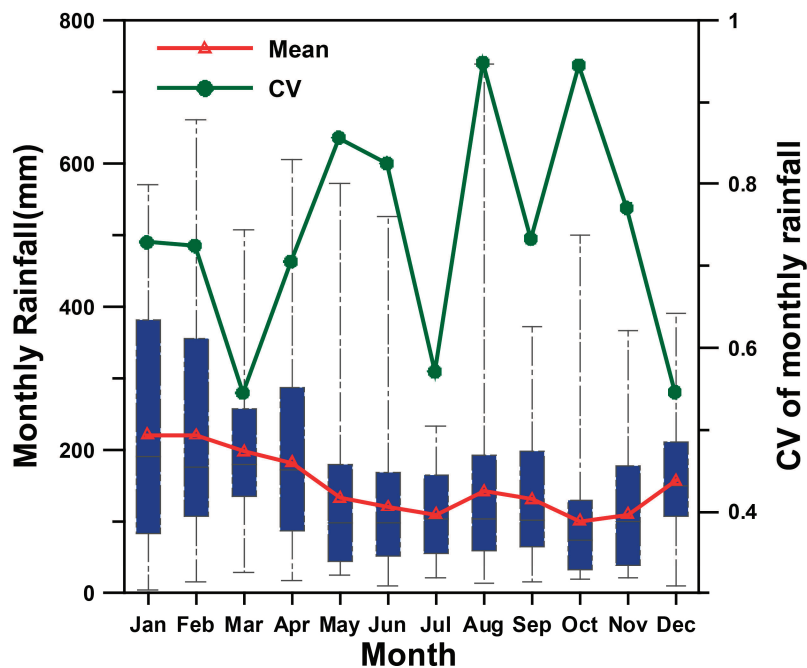


그림 2.14. Observed monthly rainfall and its coefficient variation (CV) at Nukualo'fa weather station in Tongatapu

그림 2.15는 통가의 물 관리 조직의 구성도를 나타내고 있다. Tonga Water Board (TWB)는 물 관리를 총괄하고 있으며, 주로 도시지역의 물 공급은 TWB에서 담당하고 있으며, 농촌지역은 Ministry of Health(MoH)에서 담당하고 있다. 또한 국제 원조 조직과 전문가 그룹이 물관리에 도움을 주고 있으며, 더불어 다양한 물관련 프로젝트를 수행하고 있다.

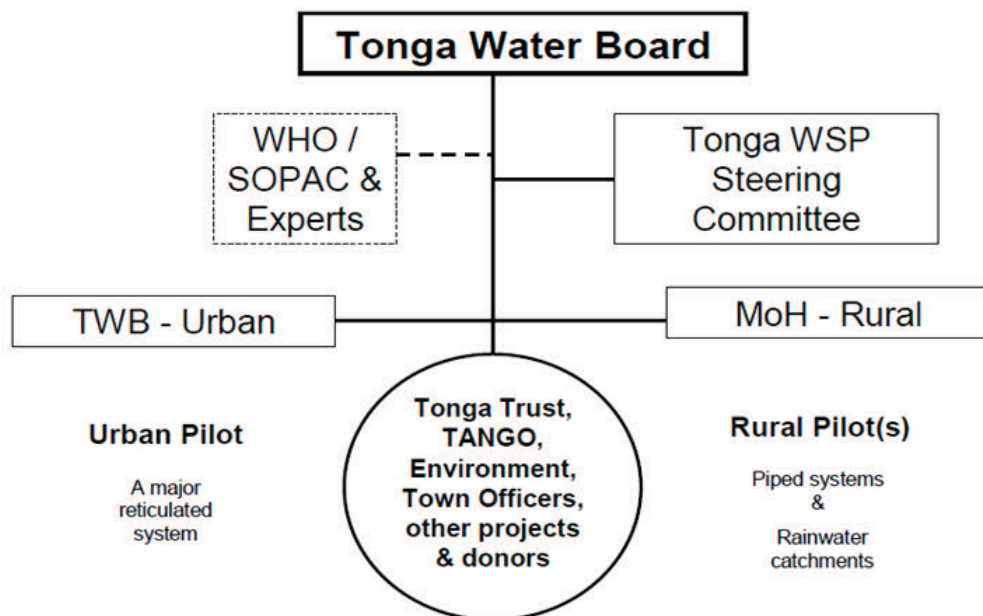


그림 2.15. Tonga water board (Source: SOPAC, 2011)

표 2.3 은 통가의 수자원 이용 현황 조사 결과이며, 도시와 농촌 지역으로 구분하여 1990년과 2015년 두 차례에 걸쳐 이루어 졌다. 통가는 일부 섬 지역에서 지표수를 제한적으로 확보하고 있으나, 가용한 수자원으로서의 역할하지 못하고 있음을 확인할 수 있으며, 대부분의 음용수와 생활용수를 빗물과 지하수에 의존하고 있음을 확인할 수 있다.

표 2.3. Sensors of drinking water coverage estimates between urban and rural (Source: WHO/UNICEF JMP, 2015)

Tonga	Drinking water coverage estimates					
	Urban (%)		Rural (%)		Total (%)	
	1990	2015	1990	2015	1990	2015
Piped onto premises		73		80		78
Other improved source	97	100	99	100	99	100
Other unimproved	3	0	1	0	1	0
Surface water		0		0		0

통가타푸섬의 수자원 현황을 정리하자면, 통가타푸 섬에는 하천이나 저수지 등의 지표 수 자원이 없으며 석회석 자유면 대수층에 부존된 지하수가 섬의 유일한 수자원이다. 인구와 기후 변화의 증가는 제한된 담수 지하수 자원의 취약성을 증대시키고 있다. 인구 증가에 따라 지하수 수요와 지표 오염 가능성이 증대되고 있다. 최근의 기후 변화로 인한 강수량 변동과 해수면 상승으로 수년 동안 지하수 자원의 염분을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다. 통가타푸의 기후는 우기(11 월-4 월)와 건기(5-10 월)의 대조를 특징으로 한다. 우기 중 약 60-70%의 비가 내린다. 가장 습한 달은 2 월과 3 월 사이에(약 220mm) 다양하며, 가장 건조한 달은 6 월에서 7 월 사이(약 80mm)이다. 1971년에서 2007년까지 누쿠알로파, 통가타푸의 연평균 강우량은 1721mm(JNAP, 2010)로 낮은 편차 계수를 보였다. 1990년에서 2095년 기간 동안 연평균 강우량의 증가율은 0.2에서 1.3mm/year 사이이다(White, 2009). 통가의 가장 최근의 3 가지 주요 가뭄은 1983년, 1998년, 2006년에 발생했으며(JNAP, 2010), 엘니뇨 사건과 직접적으로 연관되어 있다. 심한 가뭄 시 강우량은 연 평균 값의 약 절반이었고, 지하수 함양이 발생하지 않았다고 추정되었다. 이는 지하수 개발과 함께 기후 변동성이 통가타푸에서 지하수 자원의 취약성을 결정하는 데 근본적으로 중요하다는 것을 나타낸다(White, 2009). 그림 2.16은 통가타푸섬의 도시지역과 농촌지역의 물공급 시설을 나타내고 있다. 도시지역은 고지 배수지의 콘크리트 저류지와 상수관망을 통하여 물을 공급할 수 있는 시설을 갖추고 있으나, 농촌지역은 지하관정을 통하여 펌핑한 지하수를 탱크에 저장했다 공급하거나, 지붕을 통하여 차집된 빗물을 저장하는 빗물저장 탱크를 각 가정별로 갖추고 있다.

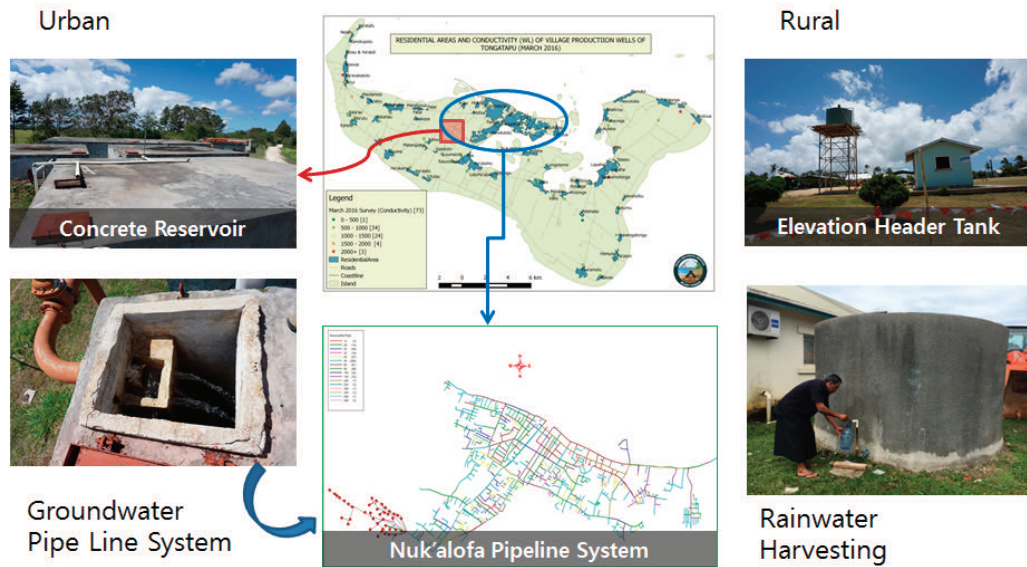


그림 2.16. Water distribution system between urban and rural in the Kingdom of Tonga. The urban water supply system has concrete reservoir and pipe lines (left) and the rural water distribution system has elevation header tanks with well pump and rainwater harvesting from the roof (right).

2.6 농업

통가 농업은 서비스 및 제조업의 발달로 최근 그 중요성이 상대적으로 줄어들고는 있지만 통가 주요 경제 활동의 하나로 GDP의 약 19%를 차지하고 있다. 통가에서 농업 활동을 영위하고 있는 가구 수는 통가 농업이 전체 경제에서 차지하는 비율에 비해 상당히 높은 전체 가구의 약 86%(13,944 가구)를 차지한다. 농업분야에 종사하는 인구가 상대적으로 많은 반면 농업분야에서 발생하는 수익이 다른 산업에 비해 상대적으로 적은 것으로 나타나 열악한 경제 상황에 처해 있음을 알 수 있다. 통가지역 농업분야에 대한 토지이용 현황을 보면 휴경지가 전체 농지의 51%를 차지하고 있어 농지 이용률이 적은 것으로 나타나고 있다. 다음으로 한해살이 작물의 경우 36%, 목초지가 7%, 다년생 작물이 5%, 목축용으로 1%의 토지가 이용되고 있다(그림 2.17).

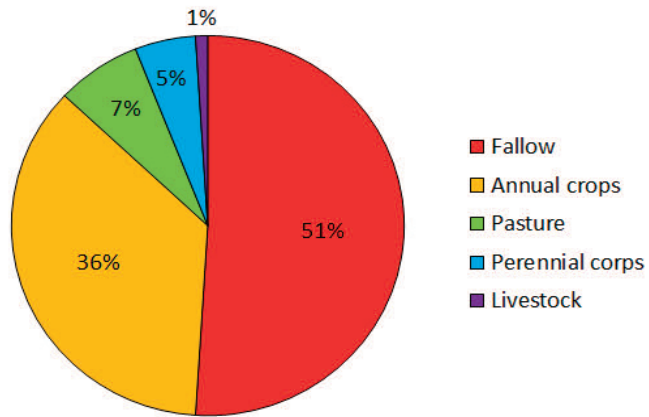


그림 2.17. 통가지역 농업분야 토지이용 현황(Source: Tonga national agricultural census, 2015)

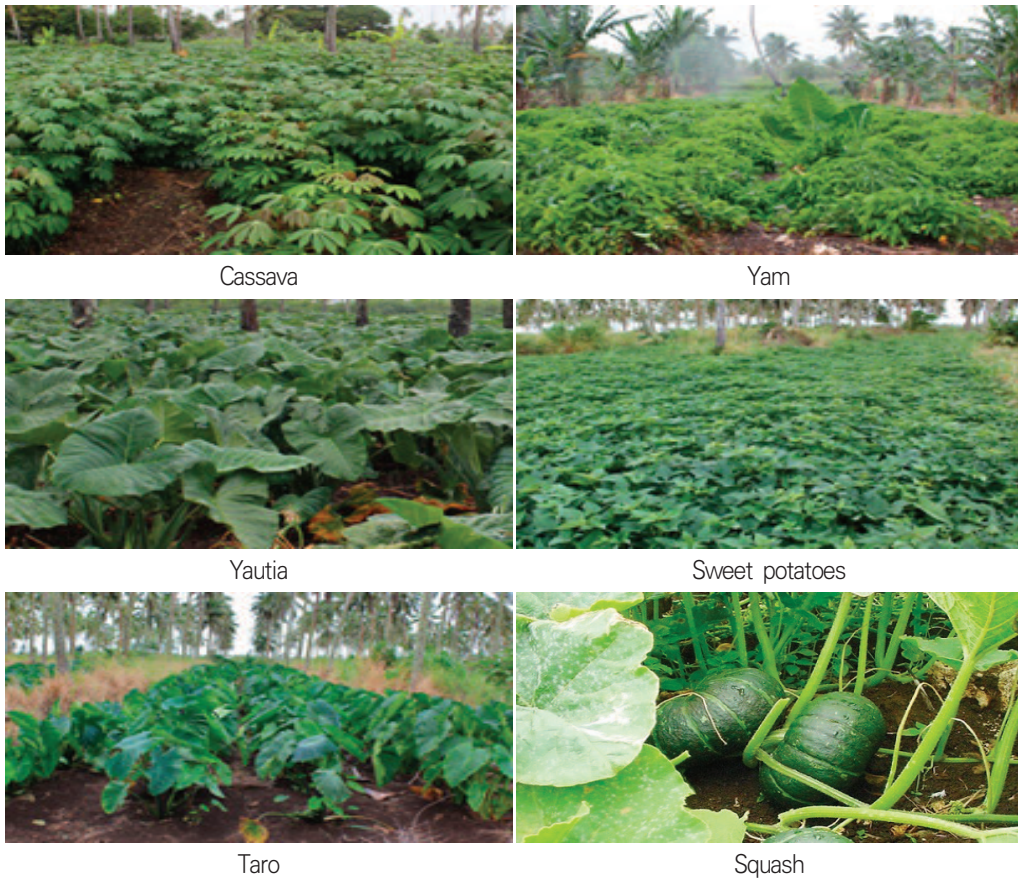


그림 2.18. 통가지역에서 재배되고 있는 주요 한해살이 농작물

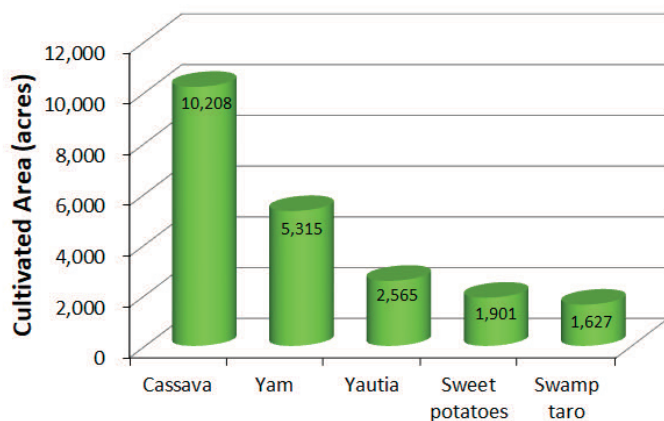


그림 2.19. 통가지역 주요 한해살이작물에 대한 재배면적(Source: Tonga national agricultural census, 2015)

표 2.4. 통가 지역별 주요 한해살이작물 재배면적(acres)

Crops	Cassava	Yam	Yautia	Sweet potato	Swamp taro
TONGA (total)	10,208	5,315	2,565	1,901	1,627
Tongatapu	8,160 (80%)	4,248 (80%)	1,956 (76%)	1,408 (74%)	1,216 (75%)
Vava'u	800 (8%)	585 (11%)	248 (10%)	154 (8%)	130 (8%)
Ha'apai	815 (8%)	197 (4%)	136 (5%)	127 (7%)	70 (4%)
'Eua	290 (3%)	164 (3%)	160 (6%)	166 (9%)	155 (10%)
Niuas	143 (1%)	121 (2%)	65 (3%)	46 (2%)	56 (3%)

Source: Tonga national agricultural census (2015)

표 2.5. 통가타푸섬 지역별 주요 한해살이 작물 재배면적(acres)

Crops	Cassava	Yam	Yautia	Sweet potato	Swamp taro
Tongatapu (total)	8,160	4,248	1,956	1,408	1,216
Kolomotu'a	844 (10%)	426 (10%)	222 (11%)	99 (7%)	215 (18%)
Kolofo'ou	890 (11%)	353 (9%)	181 (9%)	84 (6%)	183 (15%)
Vaini	1,809 (22%)	726 (17%)	356 (18%)	301 (21%)	301 (25%)
Lapaha	917 (11%)	1,023 (24%)	267 (14%)	235 (17%)	48 (4%)
Tatakamotonga	945 (12%)	699 (16%)	233 (12%)	222 (16%)	78 (6%)
Nukunuku	1,727 (22%)	673 (16%)	545 (28%)	264 (19%)	280 (23%)
Kolovai	1,028 (13%)	348 (8%)	153 (8%)	203 (14%)	111 (9%)

Source: Tonga national agricultural census (2015)

그림 2.18은 통가 지역에서 재배되고 있는 한해살이 작물에 대한 사진 자료를 보여준다. 통가 지역에서 재배되고 있는 한해살이 작물로는 Cassava, Yam, Yautia, Sweet potatoes, Swamp taro의 5 종이 주를 이루고 있다(그림 2.19). Cassava는 통가왕국 전체에서 한해살이 작물 중에서 가장 넓은 10,208 에이커의 재배 면적을 차지하고 있다. 다음으로 Yam 재배면적이 5,315 에이커, Yautia 재배면적이 2,565 에이커, Sweet potatoes 재배면적이 1,901 에이커 그리고 Swamp taro 재배면적이 1,627 에이커로 나타났다. Squash는 최근 수출용으로 생산량이 증가하고 있는 현금 작물로 재배면적은 84 에이커로 아직 넓지는 않다. 통가왕국의 농업 통계 조사는 크게 5개 지역(Tongatapu, Vava'u, Ha'apai, 'Eua, Niuas)으로 나누어 실시되었는데 Tongatapu 지역은 그 중에서도 한해살이 작물 재배면적이 넓게 분포되어 있다(표 2.4). Tongatapu 지역은 그림 2.2에서와 같이 다시 7개 구역으로 나눌 수 있는데 표 2.5을 통해서 지역에 따른 주요 재배작물 분포를 확인 할 수 있다. Cassava와 Swamp taro는 Vaini 지역에서 각각 1,809 에이커와 301 에이커로 가장 넓게 재배되고 있으며 Yam은 Lapaha 지역에서 1,023 에이커, Yautia와 Sweet potato는 Nukunuku 지역에서 각각 545 에이커와 264 에이커의 재배면적을 보였다.

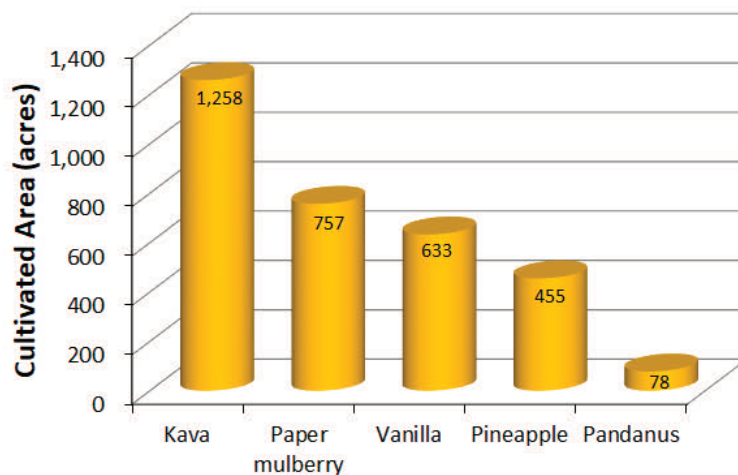


그림 2.20. 통가지역 주요 다년생 작물에 대한 재배면적(Source: Tonga national agricultural census, 2015)

표 2.6. 통가 지역별 주요 다년생 작물 재배면적(acres)

Crops	Kava	Paper mulberry	Vanilla	Pineapple	Pandanus
TONGA (total)	1,257	757	632	454	77
Tongatapu	141 (11%)	586 (77%)	159 (25%)	208 (46%)	9 (12%)
Vava'u	805 (64%)	4 (1%)	341 (54%)	226 (50%)	8 (10%)
Ha'apai	7 (1%)	92 (12%)	6 (1%)	7 (1%)	22 (29%)
'Eua	249 (20%)	73 (10%)	104 (16%)	10 (2%)	1 (1%)
Niuas	55 (4%)	2 (0.3%)	22 (4%)	3 (1%)	37 (48%)

Source: Tonga national agricultural census (2015)

표 2.7. 통가타푸섬 지역별 주요 다년생 작물 재배면적(acres)

Crops	Kava	Paper mulberry	Vanilla	Pineapple	Pandanus
Tongatapu (total)	142	587	160	209	10
Kolomotu'a	17 (12%)	12 (2%)	14 (9%)	16 (8%)	1 (10%)
Kolofo'ou	20 (14%)	20 (3%)	12 (8%)	19 (9%)	0 (0%)
Vaini	30 (21%)	76 (13%)	15 (9%)	80 (38%)	6 (60%)
Lapaha	21 (15%)	253 (43%)	67 (42%)	19 (9%)	0 (0%)
Tatakamotonga	6 (4%)	174 (30%)	26 (16%)	38 (18%)	1 (10%)
Nukunuku	42 (30%)	28 (5%)	14 (9%)	18 (9%)	1 (10%)
Kolovai	6 (4%)	24 (4%)	12 (8%)	19 (9%)	1 (10%)

Source: Tonga national agricultural census (2015)

통가 지역에서 재배되고 있는 주요 다년생 작물로는 Kava, Paper mulberry, Vanilla, Pineapple, Pandanus가 있다(그림 2.20). 표 2.6은 통가 지역에서 재배되고 있는 다년생 작물의 재배면적을 지역별로 조사한 결과로 Kava와 Vanilla, Pineapple은 Vava'u 지역에서 각각 805 에이커, 341 에이커, 226 에이커로 가장 넓게 재배되었고 Paper mulberry는 Tongatapu 지역에서 586 에이커로 가장 넓게 재배되었으며 Pandanus는 Niuas 지역에서 37 에이커로 가장 넓게 재배되고 있다. 표 2.7은 Tongatapu 지역의 7개 구역에 대한 다년생 작물의 재배면적을 나타내고 있다.

2.7 인구 및 경제

통가는 176개의 섬으로 구성되어 있으나 이 중 36개 섬에서만 사람이 거주하고 있으며 2011년 인구조사에서 통가 인구는 총 103,252명으로 조사되었다(그림 2.21). 통가

인구의 약 70% 이상이 통가 남단의 가장 큰 섬인 Tongatapu에 거주하고 있으며 이 섬의 북쪽 중앙에 위치한 통가의 수도 Nuku'alofa에는 약 24,500명의 인구가 거주하고 있다. 그림 2.22는 통가 주요 지역에 대한 가구수 현황을 나타내고 있으며 Tongatapu 지역에 12,824 가구가 거주하고 다음으로 Vava'u 지역에 2,813가구, Ha'apai 지역에 1,260 가구, Eua 지역에 863 가구, Niuas 지역에 282 가구 순으로 거주하고 있는 것으로 나타났다. 인종적으로 멜라네시아계가 혼합된 폴리네시아인에 해당하는 통가인은 통가 주민의 약 98% 이상을 차지한다. 인구조사 통계에 따르면 통가 인구는 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났으며 연령층을 보면 인구의 3분의 1 이상이 15세 미만이었 고 약 8%만이 60세 이상인 것으로 나타나 대체로 젊은 층이 많은 것을 알 수 있다.

통가의 1인당 GDP는 1980년 572 USD에서 성장하여 현재 2016년에는 3,688 USD를 기록하고 있다(그림 2.23). 통가의 분야별 GDP 경제 구성을 살펴보면 2011년에 농업분야가 18.9%, 산업분야가 22.0%, 서비스분야가 59.1%를 차지하고 있어 상당부분의 소득이 관광산업을 중심으로 하는 서비스 산업을 통해 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 농업분야가 차지하는 GDP 비율은 1976년 이전에는 50% 이상이었으나 그 비율이 점점 줄어들어 1994년 이후로는 30% 이하로 줄어들어 현재는 20% 이하로 나타나고 있다. 통가 정부에서는 농산물의 수출을 늘리기 위해 단호박이나 바닐라 같은 현금작물에 대한 생산을 농가에 장려하고 있으며 실제 단호박의 경우 중국, 한국, 일본 등지에 적극적인 마케팅을 통해 수출량을 늘려가고 있다.

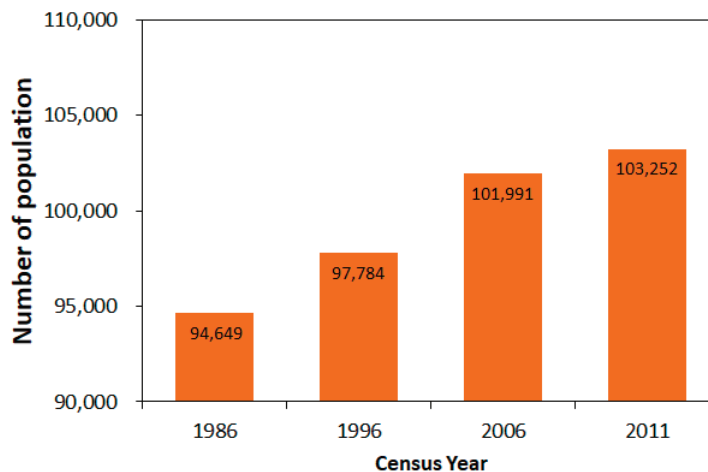


그림 2.21. 통가 인구 변화(Source: Tonga national agricultural census, 2015)

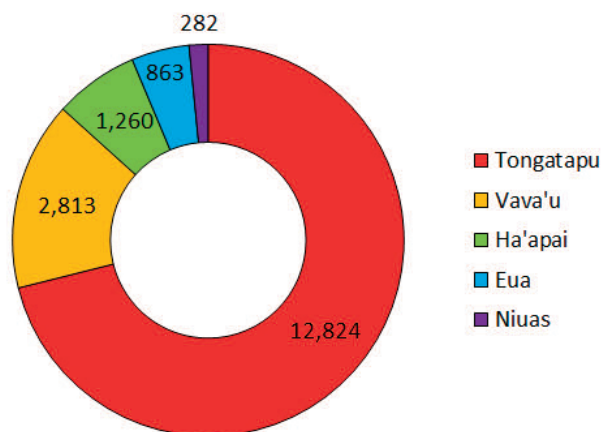


그림 2.22. 통가 지역별 가구수 현황(2015년)(Source: Tonga national agricultural census, 2015)

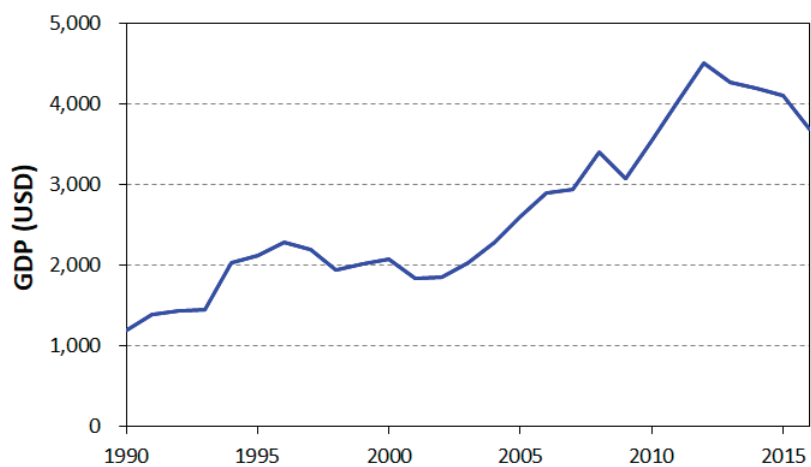


그림 2.23. 통가 1인당 GDP 변동(Source: World Bank)

3. 연구 자료 및 방법

3.1 연구 자료

3.1.1 기상관련 자료

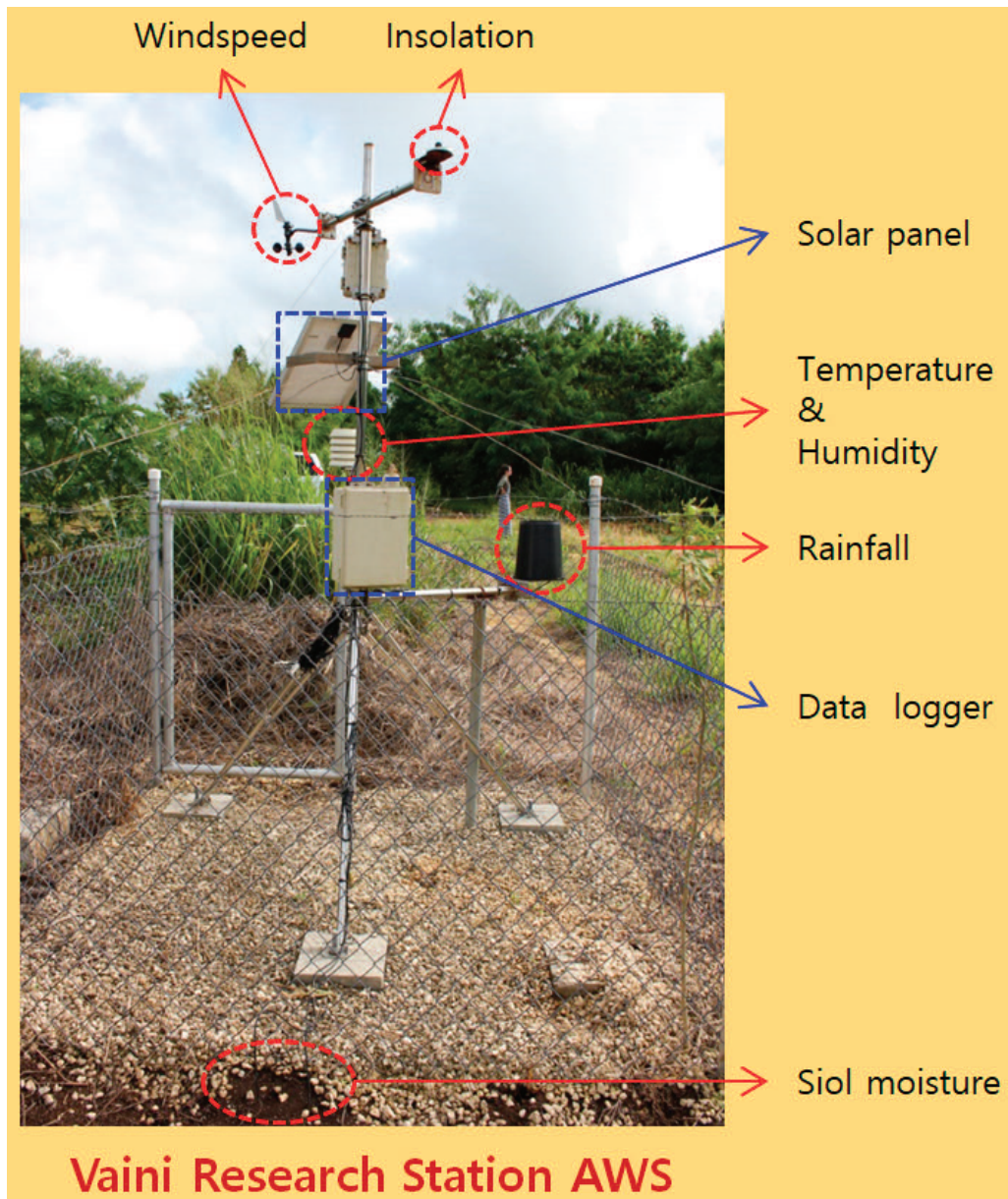


그림 3.1. Vaini 농업 시험장 내에 설치된 AWS 전경 및 센서 명칭

APCC에서는 통가 농업지역에 대한 기후정보 서비스를 위해 2014년 통가 정부에 자동 기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)를 기증해 같은 해 11월부터 관측을 시작하고 있다. 그림 3.1은 통가 농림부 소속의 Vaini 농업 시험장 내에 설치된 AWS의 전경을 나타내고 있으며 설치된 각종 센서에 대해 설명하고 있다. 관측되고 있는 기상 정보로는 기온(℃), 상대습도(%), 강우량(mm), 일사량(MJ/m²), 풍향(°), 풍속(m/s), 토양 수분함량(%), 토양온도(℃) 등이 있으며 Solar panel을 통해 사용 전력을 공급하고 있다. 또한 Data logger에 수집된 자료는 무선통신 설비를 통해 자동으로 통가 기상청에 구축되어 있는 ToCSA(Tonga Climate Service for Agriculture, <http://met.gov.to:2016/index.do>) 시스템의 DB 서버로 전송된다. APCC는 통가 농업의 지속 가능한 발전에 기여하기 위해 기후정보 서비스 지원 사업을 2015년부터 2016년에 걸쳐 수행했으며 그 결과물의 하나로 ToCSA 시스템을 구축해 현재 통가 기상청에서 운영하고 있다. 그림 3.2는 ToCSA 농업기상 정보 서비스 시스템의 날씨 정보에 대한 서비스 화면으로 총 5개 지역(Tongatapu & 'Eua, Ha'apai, Vava'u, Niuafo'ou, Niuatoputapu)에 대한 날씨 정보와 Research Station(Vaini 농업 시험장 내 AWS 관측 장비)의 날씨 정보를 시간단위 또는 일단위로 제공하고 있다.

토양수분함량 예측모형을 구축하기 위해서는 기상정보로 최저기온(℃), 최고기온(℃), 상대습도(%), 풍속(m/s), 강우량(mm)에 대한 일단위 정보가 필요하며 ToCSA에서 제공되고 있는 통가타푸섬 내 기상관측 지점인 Tongatapu & 'Eua 지점과 Research Station의 자료를 이용했다. 하지만 Tongatapu & 'Eua 지점에서는 일사량을 관측하고 있지 않기 때문에 Research Station의 자료와 공유해 사용했다. Tongatapu & 'Eua 지점은 통가 기상청이 운용하고 있는 Fua'amotu 국제공항 부지 내에 설치된 기상 관측 지점을 의미한다. Tongatapu & 'Eua 지점과 Research Station은 직선거리로 약 7.5km 떨어져 있어 일사량 정보를 공유해 사용하는데 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 Research Station의 기상관측 자료에 대해 면밀히 조사해 본 결과 강우량 자료에 문제가 발생하고 있는 것을 확인했다. 그림 3.3은 Tongatapu & 'Eua 지점과 Research Station에서 관측된 강우량 자료를 비교한 것으로 2016년 9월까지의 서로 비슷한 관측 결과를 나타내고 있으나 2016년 10월 이후로 Research Station의 강우량 관측 결과에서 과대측정 되거나 측정이 되지 않는 등의 문제가 발생하였다. 2017년 8월 통가 출장을 통해 우량계 센서를 교체하였고 그래프를 통해 확인 할 수 있듯이 정상적으

로 작동하고 있는 것을 확인했다. 본 연구에서는 토양수분 예측 모형의 입력 기상자료로 Research Station 자료를 이용하였지만 Research Station의 강우량 센서 문제 발생으로 인해 강우량 자료는 Tongatapu & 'Eua 지점의 자료를 이용하였다. 그림 3.4는 Research Station의 최저기온(℃), 최고기온(℃), 상대습도(%)에 대한 월 평균 값의 변동을 나타내고 있으며 그림 3.5는 월 누적 일사량(MJ/m²)과 10cm 깊이의 월평균 토양수분함량(%) 관측 값을 나타내고 있다. Research Station의 토양수분함량 관측 값은 Research Station을 대상으로 구축되는 토양수분함량 예측 모형의 시뮬레이션 결과의 검증용으로 활용된다.

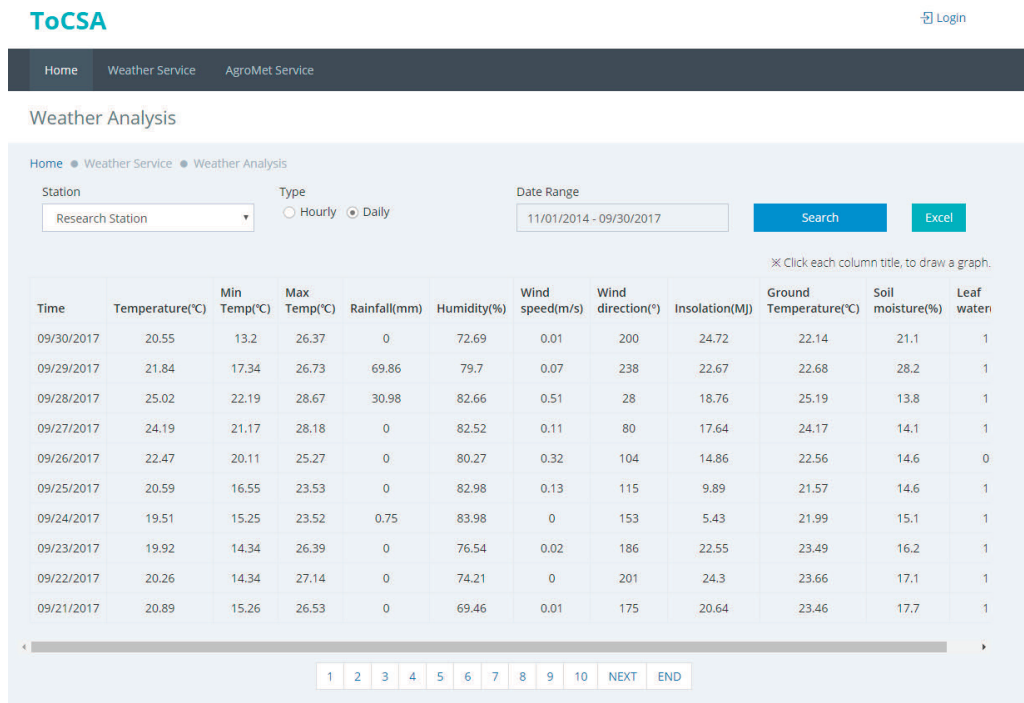


그림 3.2. ToCSA 농업기상 정보 서비스 시스템

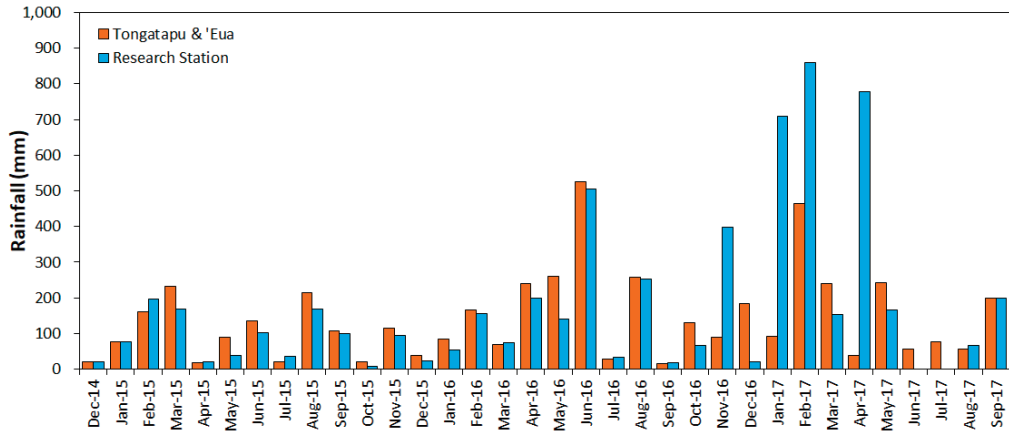


그림 3.3. 통가타푸섬 두 관측소에 대한 강우 관측자료 비교

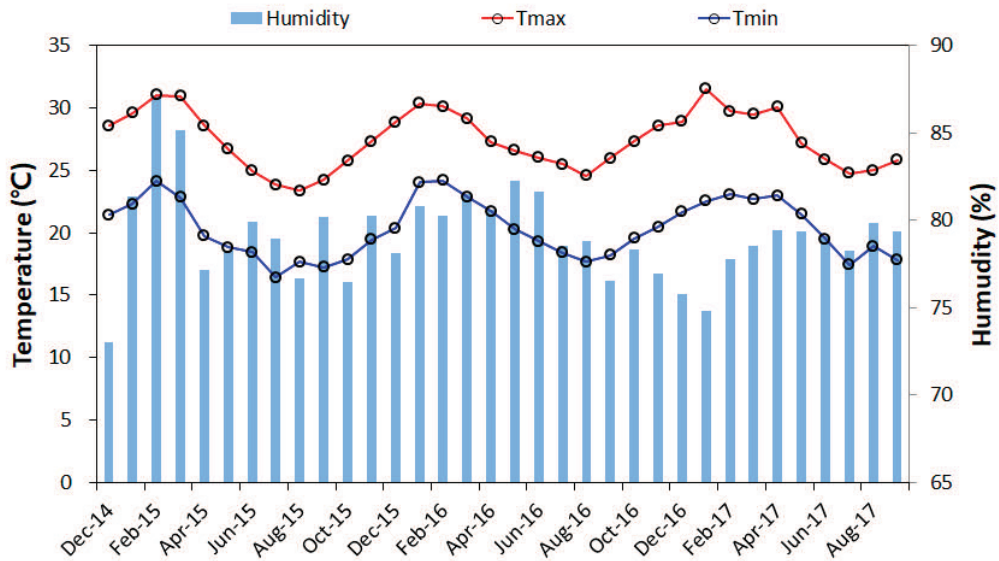


그림 3.4. Research Station의 월평균 최고 및 최저 기온과 상대습도 관측자료

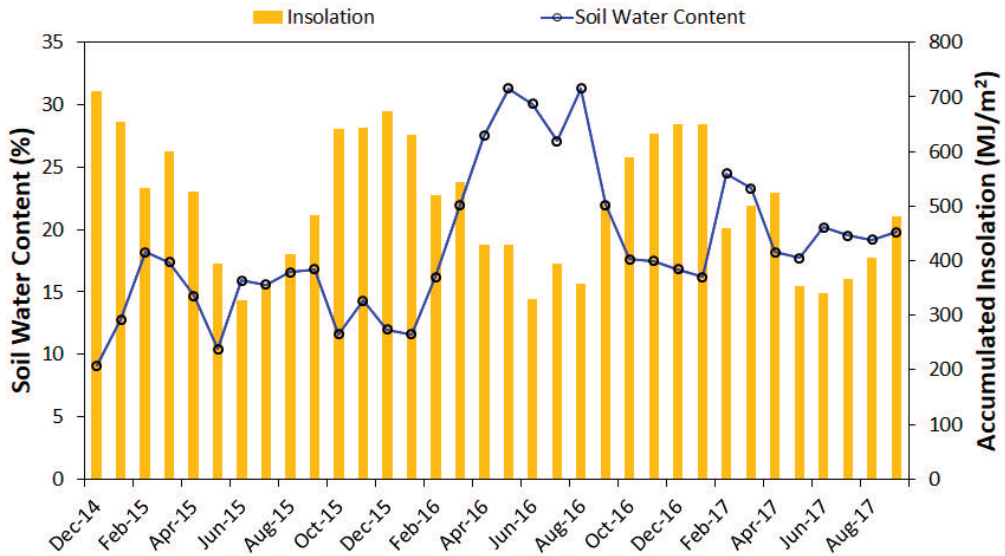


그림 3.5. Research Station의 월평균 토양수분함량과 누적 일사량 관측자료

3.1.2 해수면 온도 관련 자료

대기-해양관련 지수들은 미국의 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)를 중심으로 호주의 Bureau of Meteorology Research Centre, 영국의 The Royal Meteorological Society 등이 대서양과 태평양의 해수면 온도(Sea Surface Temperature : SST), 해수면 압력(Sea Level Pressure : SLP), 해수면 풍향(Sea Surface Wind : SLW) 등 대기와 해양의 많은 수문인자들을 월별 기준으로 점검하고 있다. 현재 NOAA에서 제공하는 월별 자료들은 Nino1+2, Nino3, Nino4, Nino3.5, Ship track1, 그리고 Ship track6의 6개 지역에서 관측되고 있으며, 이 지역 중에서 엘니뇨현상과 가장 강한 상관성을 보이는 곳은 Nino3.5지역으로 알려져 있고, Trenberth(1997)에 의하면 이 지역에서 관측된 SST 값의 5개월 이동평균이 6개월 이상 0.4 °C를 초과할 때를 엘니뇨현상으로 구분하고 있다. 엘니뇨는 열대 태평양 적도부근에서 남미해안으로부터 중태평양에 이르는 넓은 범위에서 해수면온도가 지속적으로 높아지는 현상으로 2~7년마다 한 번씩 불규칙하게 발생하는데 주로 9월에서 다음해 3월 사이에 일어나는 현상이다.

미국 기상청은 Niño 3.4 지역($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)에서 3개월 이동 평균한 해수면온도의 편차가 0.5°C 이상(-0.5°C 이하) 나타나는 달이 5개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 판단하고 있으며, 일본 기상청은 Niño 3 지역($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$)에서 5개월 이동 평균한 해수면온도의 편차가 0.5°C 이상(-0.5°C 이하) 나타나는 달이 5개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 본다. 또한 우리나라 기상청은 미국의 경우와 마찬가지로 Niño 3.4 지역($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W}\sim 120^{\circ}\text{W}$)의 해수면온도 감시 결과를 사용하나, 5개월 이동 평균 해수면온도 편차가 0.4°C 이상(-0.4°C 이하) 나타나는 달이 6개월 이상 지속될 때 그 첫 달을 엘니뇨(라니냐) 발달의 시작으로 본다.

그림 3.6은 열대 태평양지역의 해수면온도 감시구역을 나타내고 있으며, 각 지역위 위경도 위치는 NINO1+2($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{S}$, $90^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$), NINO3($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$), NINO3.4($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$), NINO4($5^{\circ}\text{N}\sim 5^{\circ}\text{S}$, $160^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{W}$)이다.

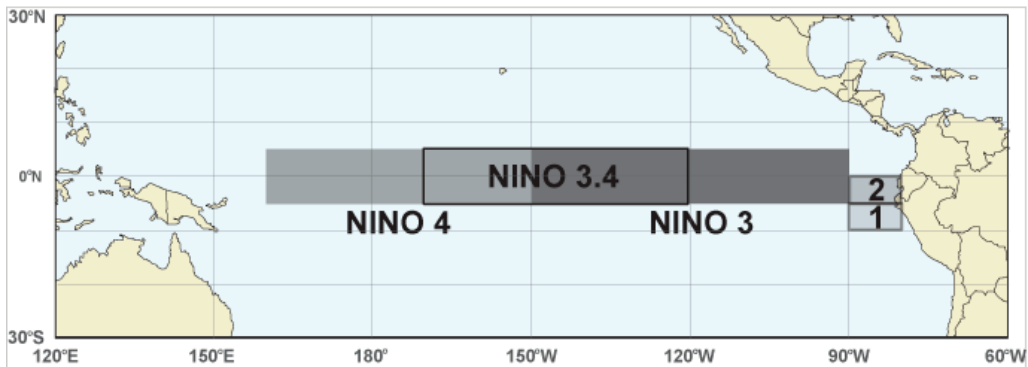


그림 3.6. Map of NINO Regions (Source: <http://www.bom.gov.au/>).

다음으로 ENSO를 모니터링하기 위한 가장 포괄적인 지표로 간주되는 다변량 ENSO 지수(Multivariate ENSO index, MEI)가 있으며, 이는 여러 해양관련 구성요소 변수를 결합한 것으로 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$MEI = f(SLP, SLW, SLT, SST, Cloud) \quad (1)$$

또한 엘니뇨 감시에 사용되는 주요 지표 중 하나인 남방진동지수(Southern Oscillation Index : SOI)는 남태평양에 위치한 타히티 섬(149°W, 17°S)과 호주 북부의 다아윈 시(131°E, 12°S) 사이의 정규화된 월별 해수면 압력 차이로 표현되며, 아래 식 (2)로부터 산정할 수 있다.

$$\text{SOI} = \text{SLP}(\text{Tahiti}) - \text{SLP}(\text{Darwin}) \quad (2)$$

Kiladis and Diaz(1989)는 SOI 값이 3개월 이상 -1.0 이하일 때를 엘니뇨현상으로 구분하였으며, 남방진동지수 값이 음의 값을 가지고 연속되는 기간 동안 지속되면 엘니뇨현상이 발달중이며, 이와는 반대현상으로 타히티 섬의 해수면 압력이 높아 지속적으로 양의 값을 가지면 라니냐 현상이 발달중인 것으로 구분한 바 있다.

본 연구에서 언급된 여러 해양관련 기후지수 중 통가의 강수량과 양의 상관성을 보이며 변동하는 SOI 지수를 주요 예측 인자로 사용하였다. 실제 SOI 지수의 생성지점은 통가가 위치한 지역과 근거리에 해당하여 직접적인 영향을 예상할 수 있으며, White et al. (2009) 보고서에 따르면 통가의 강수량변동과 상관성이 커서 통가타푸섬의 지하수자원 관리에 활용할 수 있는 주요 기후지수로 소개하고 있다. SOI 지수 분석을 통한 엘니뇨, 라니냐 등 이상기후 발생에 따른 가뭄/홍수 진단-예측을 통한 통가의 효과적인 수자원관리에 활용 가능하다. 위에서 언급한 열대태평양 지역의 해양관련 지수는 미국의 NOAA(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>) 홈페이지에서 다운로드가 가능하다. 그림 3.7은 NINO1+2, NINO3, NINO3.4, NINO4, SOI, MEI 지수의 관측 시계열자료를 도시한 결과이다.

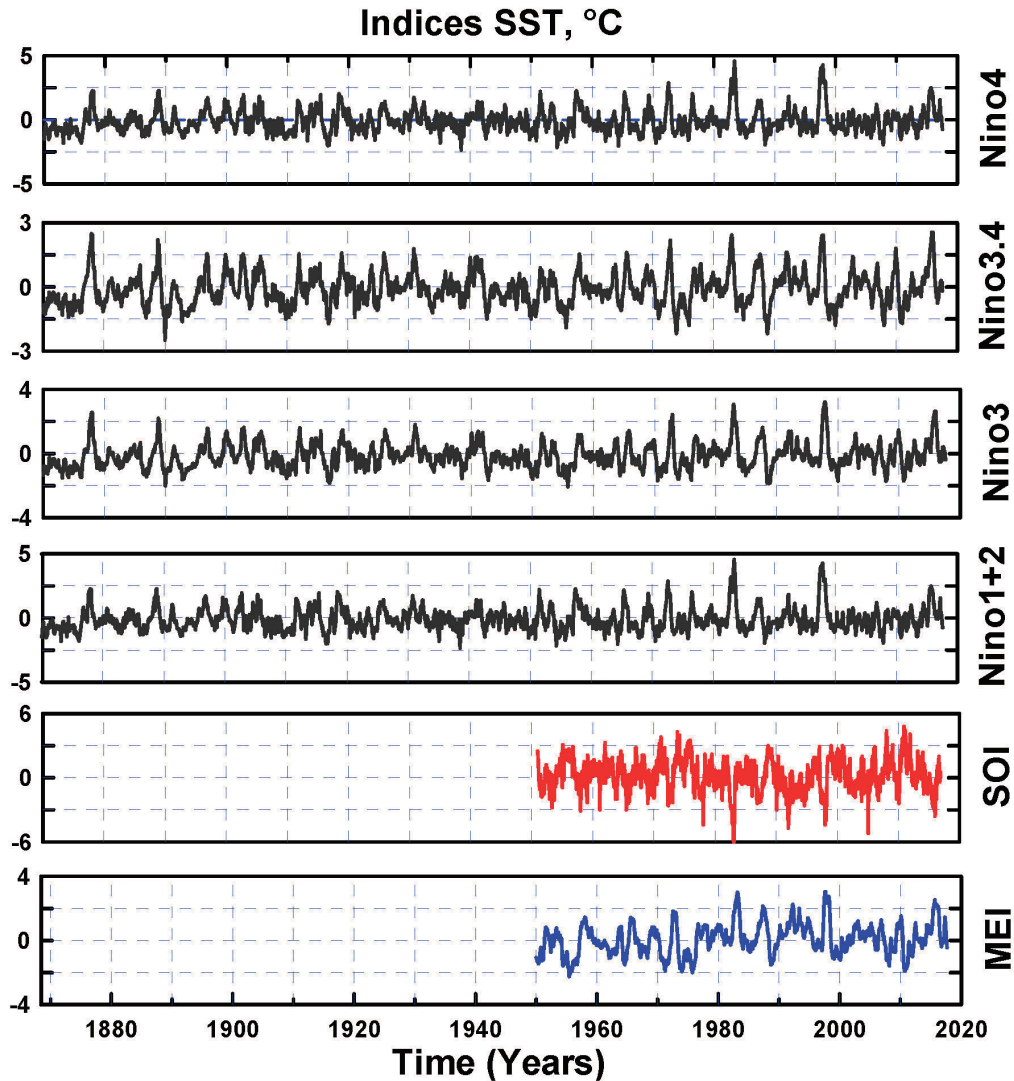


그림 3.7. Time series of some SST indices derived from the Tropical Pacific Ocean. The indices are area-averaged SST anomalies: NINO1+2 (0° – 10° S, 90° W– 80° W); NINO3 (5° S– 5° N, 150° – 90° W); NINO3.4 (5° S– 5° N, 170° – 120° W); NINO4 (5° N– 5° S, 160° E– 150° W).

3.1.3 기후변화 관련 자료

통가 지역의 기후변화에 따른 미래 기후 변화를 살펴보기 위하여 NASA에서 제공하는 NEX-GDDP(The NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections) 자료가 사용되었다. 여기서 사용된 NEX-GDDP 자료는 기후변화에 관한 정부간협의체

(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)의 세계기후연구 프로그램(WCRP, World Climate Research Programme) 사업의 일환인 5단계 결합모델 상호 비교 프로젝트(CMIP5, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)에 참여한 모형들 중 21개의 모형에 대해 BCSD(Bias-Correction/Spatial Disaggregation)을 이용하여 공간적으로 상세화(Downscaling)된 자료이다. CMIP5의 온실가스 배출량 시나리오인 대표 농도 경로(RCP, Representative Concentration Pathways) 중 2가지(RCP4.5, RCP8.5) 시나리오에서의 GCM(General Circulation Model) 자료에 대해서만 공간적 상세화를 하여 제공하며, 시간 규모는 일 단위 자료로 구성되어있다. 각 모형은 1950년부터 2100년까지의 기간에 대한 일 최고 기온, 일 최저 기온, 일 강수량에 대한 자료를 제공한다. NEX-GDDP 자료의 수평해상도는 0.25° (약 $25\text{km} \times 25\text{km}$)이다.

NEX-GDDP 자료셋은 과학계가 지역 규모에서의 기후 변화 영향을 연구하는데 도움을 주고, 개별 도시, 도시 및 강유역과 같은 특정 공간 규모에서 일어날 수 있는 미래 기후 변화 패턴에 대한 대중의 인식을 제고하기 위해 제공된다(NASA NEX-GDDP 웹사이트 <https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>). 21개의 NEX-GDDP 모형에 대해 구축된 자료는 일 단위 Historical 자료 및 RCP4.5, RCP8.5 시나리오에 대한 일 강수량, 일 최저 기온, 일 최고 기온이다. APEC 기후센터에서 구축한 자료의 용량은 약 11TB 정도의 용량을 가지는 방대한 양의 전 지구 자료이다. 그림 3.8은 본 연구의 대상지역인 통가의 NEX-GDDP 기후모형 격자의 공간장을 나타내고 있으며, 표 3.1은 본 연구에서 사용한 30개의 GCMs 모형의 공간해상도 및 모델링 그룹을 정리하여 나타내었다.

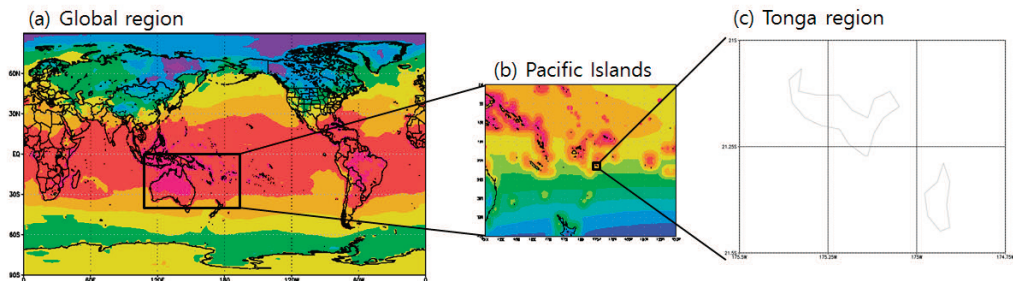


그림 3.8. 통가 지역의 NEX-GDDP 기후모형 격자 공간장

표 3.1. GCMs in use and BCSD CMIP5 projection ensembles provided by NEX-GDDP

No.	Model name	Resolution	Modeling Group
1	ACCESS1-0*	0.25° (25×25km)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization an Bureau of Meteorology, Australia
2	BCC-CSM1-1*	0.25° (25×25km)	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration
3	BCC-CSM1-1-m	0.25° (25×25km)	
4	BNU-ESM*	0.25° (25×25km)	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University
5	CanESM2*	0.25° (25×25km)	Canadian Center for Climate Modeling and Analysis
6	CCSM4*	0.25° (25×25km)	National Center for Atmospheric Research
7	CESM1-BGC*	0.25° (25×25km)	Community Earth System Model Contributors
8	CMCC-CM	0.750° × 0.748°	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
9	CMCC-CMS	1.875° × 1.865°	Centre National de Recherches Météorologiques/ Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Sceintifique
10	CNRM-CM5*	0.25° (25×25km)	
11	CSIRO-MK3-6-0*	0.25° (25×25km)	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Queensland Climate Change Centre of Excellence
12	FGOALS-g2	2.813° × 1.659°	Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and Center for Earth System Science, Tsinghua University
13	FGOALS-s2	2.813° × 1.659°	
14	GFDL-CM3*	0.25° (25×25km)	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
15	GFDL-ESM2G*	0.25° (25×25km)	
16	GFDL-ESM2M*	0.25° (25×25km)	
17	HadGEM2-AO	1.875° × 1.250°	Met Office Hadley Centre (additional HadGEM2-ES realizations contributed by Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)
18	HadGEM2-CC	1.875° × 1.250°	
19	HadGEM2-ES	1.875° × 1.250°	
20	INMCM4*	0.25° (25×25km)	Institute for Numerical Mathematics
21	IPSL-CM5A-LR*	0.25° (25×25km)	Institut Pierre-Simon Laplace
22	IPSL-CM5A-MR*	0.25° (25×25km)	
23	IPSL-CM5B-LR	3.750° × 1.895°	
24	MIROC-ESM*	0.25° (25×25km)	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), and National Institute for Environmental Studies
25	MIROC-ESM-CHEM*	0.25° (25×25km)	
26	MIROC5*	0.25° (25×25km)	
27	MPI-ESM-LR*	0.25° (25×25km)	Max-Planck-Institute für Meteorologie (Max Planck Institute for Meteorology)
28	MPI-ESM-MR*	0.25° (25×25km)	
29	MRI-CGCM3*	0.25°(25×25km)	Meteorological Research Institute
30	NorESM1-M*	0.25°(25×25km)	Norwegian Climate Centre

(*) indicates BCSD CMIP5 projection ensembles in use provided by NEX-GDDP.

3.1.4 지하수 관측 정보

본 연구에서는 통가타푸섬 지하수모니터링을 위하여 수위, 수온, EC(Electric Conductivity)를 자동으로 측정할 수 있는 지하수 관측시스템을 2년에 걸쳐 구축하였다. 지하수 자동계측 장비는 국내의 (주)하이드로넷에서 개발한 MK-21장비를 사용하였으며, GSM(Global System for Mobile communication) 무선 통신 방식을 사용하여 현지 통신사를 통한 원거리 통신이 가능하며, 원격제어 기능을 갖추고 있어 관리자가 직접 현장에 가지 않고도 Data Logger를 제어할 수 있다. 또한 자체적으로 전원을 생산하고 공급할 수 있는 태양광 전원공급 장치가 설치되어 있어 한 번 설치를 해 놓으면 지속가능한 관측이 가능하다. 그림 3.9는 지하수 자동관측 시스템과 통신사, 그리고 수신 서버의 데이터 통신 흐름도를 나타내고 있다.

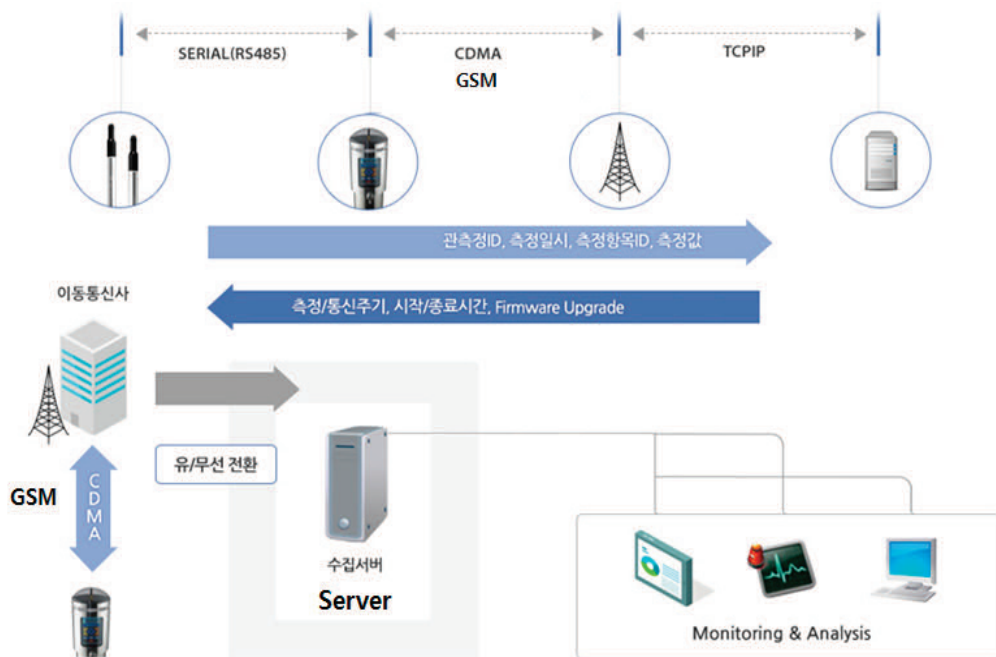


그림 3.9. Structure of the mobile telecommunication based real-time groundwater monitoring system

통가타푸섬 내에 존재하는 지하수 모니터링 관정(Salinity Monitoring Borehole, SMB)은 총 16개 이며, 이중 6개 지점(2016년 3곳, 2017년 3곳)에 Data Logger와 관

측센서를 설치하였다. 특히 도심지에 물공급을 위하여 개발한 공공관정이 넓게 분포하고 있는 마타키 에우아 통가마이(Mataki 'Eua and Tongamai) Well Field에는 다심도 센서를 3곳에 추가적으로 설치하여 수심에 따른 지하수 변동 특성을 확인하고자 하였다. 그림 3.10과 그림 3.11은 2016년과 2017년에 각각 설치한 지하수 자동관측 장비의 지점별 주소 및 위경도, 설치현장 사진 및 케이블 길이, 모바일 통신 전화번호 등 상세 설명 정보를 나타내고 있다. 또한 그림 3.12와 그림 3.13은 Mataki 'Eua Tongami Well Field에 위치한 SMB02지점 현장 사진과 설치된 지하수 모니터링 센서를 나타내고 있다.

SMBs	SMB 02	SMB 13	SMB 15
Address	Beside pump station 105, Mataki'eua	Next to pump station 313, Mataki'eua-Tongami	Middle of Hihifo well field
Lat/Long.	S: - 21.153897 W: - 175.241717	S: - 21.154274 W: - 175.253035	S: - 21.139717 W: - 175.316732
Photo			
Tube	No. 3 / N.4	No. 3 / N.4	No. 2
Cable Length (DSP)	• Tube #3: 16.50m • Tube #4: 22.50m	• Tube #3: 30.00m • Tube #4: 26.82m	• Tube #2: 17.00m
Tel.	+676-841-5229	+676-841-5231	+676-841-5230

그림 3.10. Installation of the real-time groundwater monitoring sensors and data loggers in 2016.

SMBs	SMB 01	SMB 08	SMB 09
Address	South side of track between Mataki'eua and Fanga'uta Lagoon	Houma, Hala Vaea Road	Tolooa-End of Airport Runway, Fua'amotu
Lat/Long.	S: - 21.158825 W: - 175.234643	S: - 21.154315 W: - 175.291506	S: - 21.229317 W: - 175.171285
Photo			
Tube	No. 2 / N.3	No. 5	No. 4
Cable Length (DSP)	• Tube #2: 19.79m • Tube #3: 14.70m	• Tube #5: 19.00m	• Tube #4: 38.00m
Tel.	+676-884-8617	+676-884-8618	+676-884-8619

그림 3.11. Installation of the real-time groundwater monitoring sensors and data loggers in 2017.



그림 3.12. Group photo in front of the real time groundwater monitoring borehole located in Mataki 'Eua well field in Tongatapu.

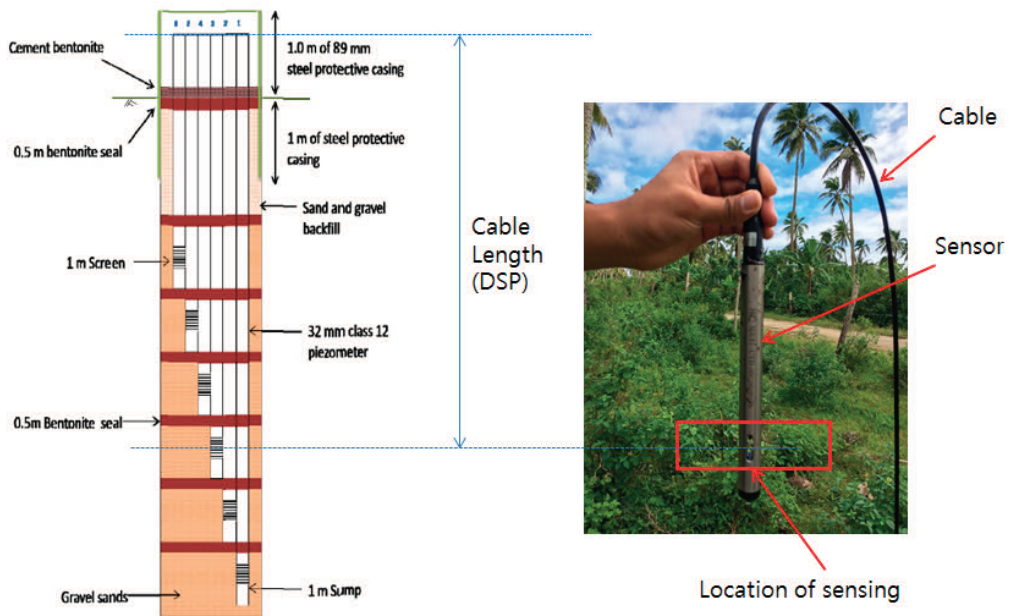


그림 3.13. Location of the sensing in salinity monitoring boreholes

3.1.5 토양관련 자료

통가타푸섬의 지층은 산호초 석회암층 위에 화산재가 쌓이고 풍화되어 형성된 점토질의 토양으로 구성되어있다. 통가타푸섬의 토양은 크게 화산재에서 유래되는 Vaini Soil 과 Lapaha Soil 그룹 그리고 산호 모래가 바닷가에 쌓여 형성된 Nuku'alofa Soil 그룹, 그리고 늪지와 라군 가장자리에 형성된 모래 또는 미사질 토양인 Sopa Soil 그룹으로 세분된다. Gibbs(1976)는 New Zealand Soil Survey Report 35를 통해 통가타푸섬 토양에 대한 조사 결과를 소개하고 있다. Gibbs의 보고서에는 Vaini Clay와 Lapaha Clay에 대한 토양샘플을 이용한 토양의 물리적 및 화학적 특성 분석 결과(표 2.1)가 정리되었고 통가타푸섬 전역에 대한 토성 분포도가 APPENDIX에 첨부되어있다(그림 2.11).

통가 농작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측 모델링 구축을 위해서는 기상관측 자료와 함께 토양의 물리적 특성 정보인 Sand, Silt, Clay의 구성 비율 정보가 최소한으로 요구된다. 본 연구에서는 현재 기상관측이 이루어지고 있는 Fua'amotu 지역과 Vaini 지역 그리고 상업적 농장인 Nishi trading 지역의 토양에 대한 샘플링을 실시하였고 향후 통가 기상청에서 AWS를 설치해 운용할 예정지 부근인 Alaki 지역, Niutoua 지역 그리고 Kolobai 지역에 대한 토양 샘플링을 실시하였다. 그림 3.14는 통가타푸섬의 6개 대표 토양 샘플링 지점의 위치를 위성사진 상에 표시한 것으로 가급적 샘플링 지점이 지역 대표성을 고려할 수 있도록 통가타푸섬 전역에 고르게 분포한 지점을 선정하였다. 그림 3.15는 8월 초 통가 출장에서 토양 샘플링 당시 촬영한 샘플링 지점의 사진으로 샘플링 지점의 작물재배 현황을 함께 나타내고 있다. 샘플링한 토양에 대한 물리적 특성 분석을 통가 토지조사 및 천연자원부(Ministry of Lands, Survey and Natural Resources, MLSNR)의 도움으로 실시하고자 했으나 몇 가지 실험장비의 부재로 통가 내에서는 실험이 불가능하여 부득이 국내로 토양을 반입해 물리적 특성 분석 실험을 실시하였다. 해외로부터 토양을 반입하기 위해서는 사전에 농림축산검역본부에 금지품 수입허가신청서를 제출하고 금지품에 대한 관리능력이 인정 되는 전문 인력 및 실험연구 시설에서 검역관의 입회하에 이용 허가를 얻은 다음에야 실험을 실시 할 수 있다. 본 연구에서는 통가 샘플링 토양에 대한 물리적 특성 분석 실험을 경북대학교에 의뢰하여 토양의 물리적 특성 정보를 얻었다.

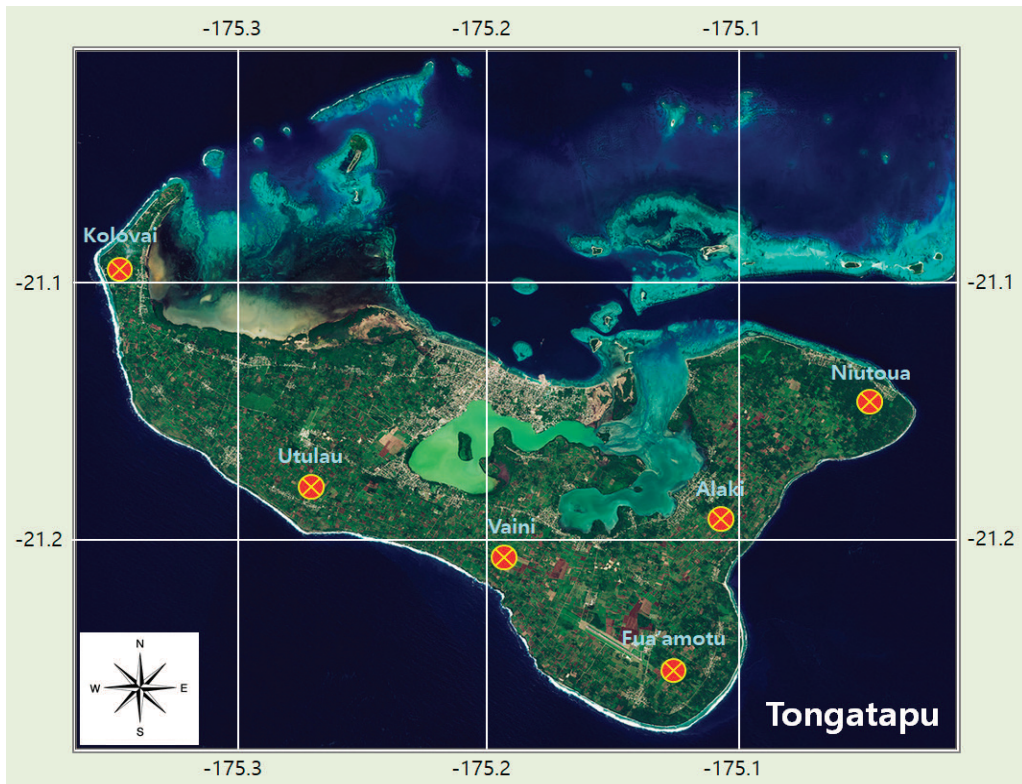


그림 3.14. 통가타푸섬 6개 대표 토양 샘플링 지점 위치 정보

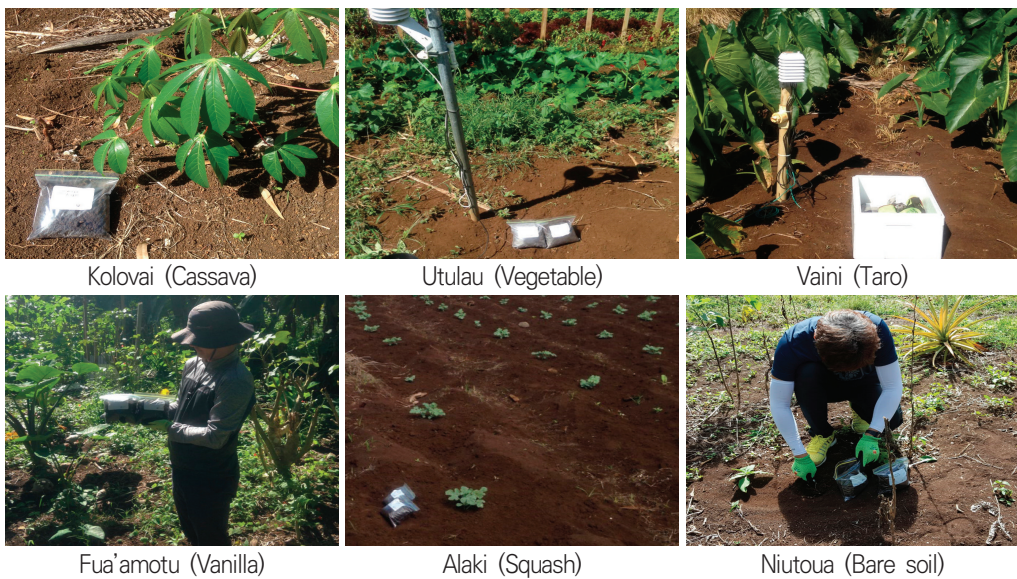


그림 3.15. 통가타푸섬 토양 샘플링 지점에 대한 작물 재배 현황

3.1.6 작물 생육정보

작물재배 지역에 대한 토양수분함량 예측모형 구축을 위해서는 기상정보, 토양정보와 함께 작물 생육정보가 요구된다. 작물에 따라 생육일수 및 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI), 작물 높이, 뿌리깊이 등의 생육 특성이 각기 다르기 때문에 토양으로부터의 물 사용량 또한 작물에 따라 다르게 나타나고 이는 토양수분함량 변화에도 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 통가타푸섬에서 재배되고 있는 주요 한해살이작물인 Cassava와 Yam 그리고 Taro에 대한 작물 생육정보를 수집해 토양수분함량 예측모형의 입력자료로 활용했다.

〈Cassava〉

Cassava는 열대지역에서 쌀과 옥수수 다음으로 중요한 작물이며 통가에서도 생산면적이 가장 넓은 한해살이작물로 2015년 통가 전체적으로 10,208 에이커의 면적에서 재배되었고 그 중 통가타푸섬에서는 통가 전체 Cassava 재배면적의 80%에 해당하는 8,160 에이커의 면적에서 재배되었다. 그림 3.16은 통가타푸섬에서 재배되고 있는 Cassava 재배지의 전경과 부위별 명칭 및 각각의 부위가 어떻게 활용되고 있는지에 대해 설명하고 있다. 뿌리작물인 Cassava는 주로 식량으로 이용되지만 바이오 연료로의 이용도 가능하다. Cassava는 가지의 일부를 잘라내 땅에 이식하면 다시 뿌리가 발생해 주목으로 성장하게 된다.

Cassava는 품종에 따라 생육기간이 다르지만 일반적으로 약 250일 정도라고 볼 수 있다. 그림 3.17은 Cascuda라는 품종과 Fepagro라는 품종의 Cassava에 대한 생육기간 중 LAI 변화를 실험을 통해 나타내고 있다(Tironi et al., 2017). 가지를 심은 뒤 30일 정도 지나면 잎이 나오기 시작하고 심은 뒤 60일이 지나면서 LAI가 급격히 증가한다. Tironi의 실험에서는 두 품종의 LAI가 가지를 심은 뒤 180일을 전후해 가장 높게 나타났으며 Cascuda 품종의 경우 최대 5.5, Fepagro 품종의 경우 최대 5.1을 기록했다. 본 연구에서는 Fepagro 품종의 생육기간에 따른 LAI 변동 값을 토양수분함량 예측모형의 작물특성 입력정보로 이용했다.

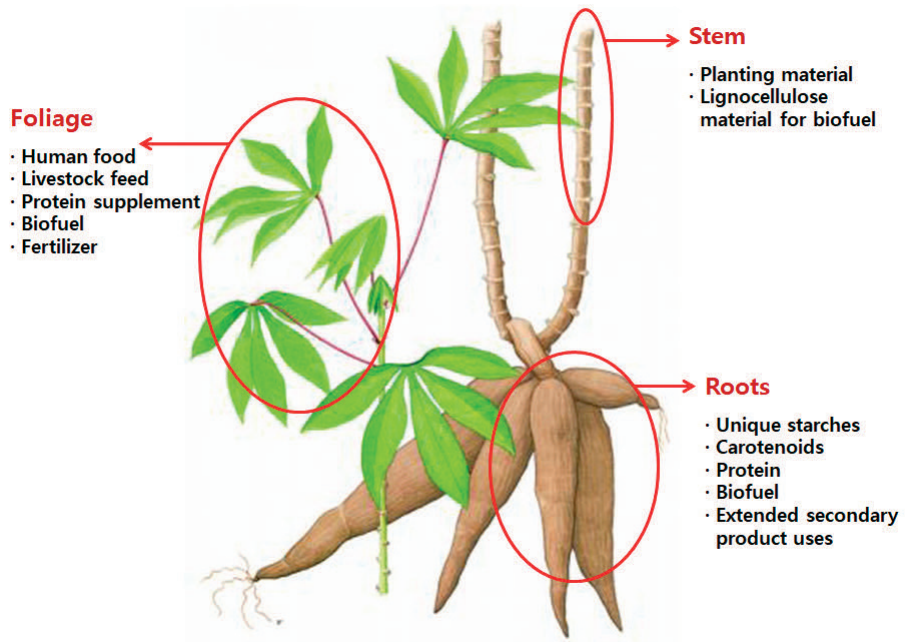


그림 3.16. Cassava 부위별 설명(위) 및 Cassava 재배지 전경(아래)

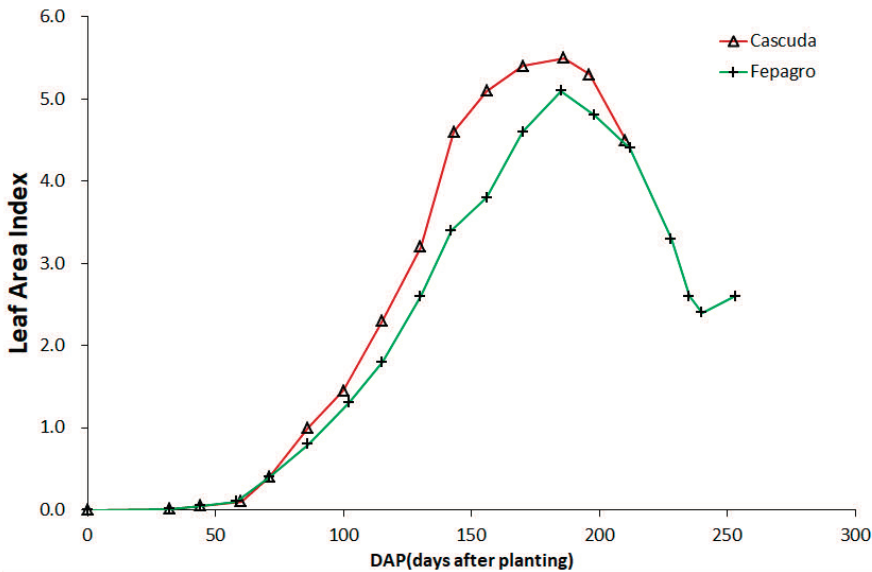


그림 3.17. Cassava 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Tironi et al., 2017)

〈Yam〉

참마라고도 불리는 Yam은 여러 온대 및 아열대 지역에서 재배되고 있는 뿌리작물로 2015년 통가 전체적으로 5,315 에이커에서 재배되고 있으며 그 중 통가타푸섬에서는 통가 전체 Yam 재배면적의 80%에 해당하는 4,248 에이커의 면적에서 재배되었다. 그림 3.18은 통가타푸섬에서 재배되고 있는 Yam 재배지의 전경과 부위별 명칭에 대해 설명하고 있다. 통가타푸섬에서는 사진과 같이 바나나나 코코넛 나무 사이에 다양한 작물을 재배하는 혼합 재배방식이 전통적으로 이어지고 있다. Yam 역시 품종에 따라 생육기간이 다르지만 일반적으로 약 220일 정도의 생육기간을 갖는다. 그림 3.19는 산림지역에서 재배되는 Yam과 초원지역에서 재배되는 Yam에 대한 생육기간 중 LAI 변화를 실험을 통해 나타내고 있다(Diby et al., 2011). Diby의 실험에서 산림지역의 Yam은 초원지역의 Yam보다 초기 성장 속도가 빠른 것을 알 수 있고 초원지역의 Yam은 덩이줄기를 심은 뒤 약 100일이 지나서 급격히 LAI가 증가하는 것으로 나타났다. 산림지역의 Yam과 초원지역의 Yam 모두 덩이줄기를 심고난 뒤 약 140일 경에 각각 LAI가 4.45, 5.28로 가장 높게 나타났다. 본 연구에서는 산림지역에서 재배되는 품종의 생육기간에 따른 LAI 변동 값을 토양수분함량 예측모형의 작물특성 입력정보로 이용했다.

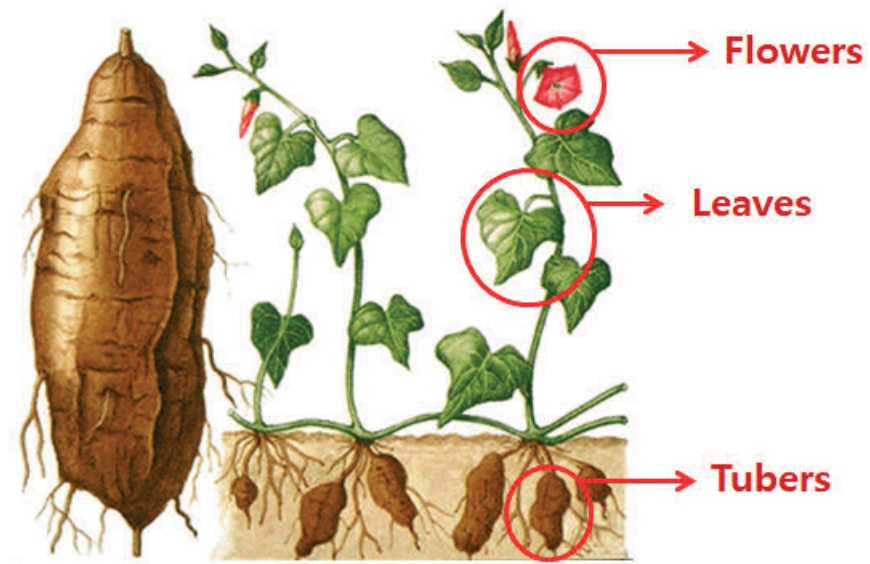


그림 3.18. Yam 부위별 명칭(위) 및 Yam 재배지 전경(아래)

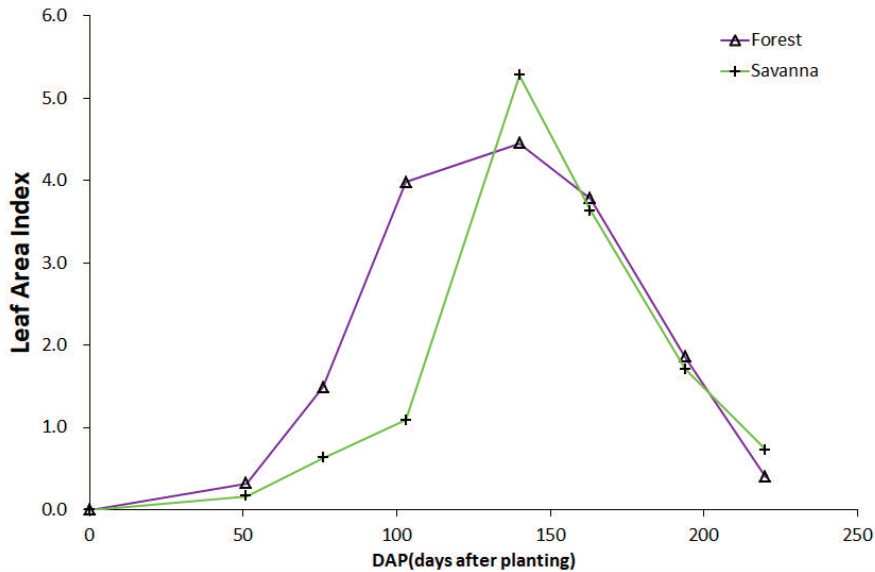


그림 3.19. Yam 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Diby et al., 2011)

〈Taro〉

토란이라 불리는 Taro는 나이지리아를 비롯한 아프리카 중서부지역과 중국, 일본의 동북아시아지역 그리고 파푸아뉴기니 등지에서 주로 재배되고 있으며 통가에서도 주요 식량작물로 재배되고 있다. 2015년 농업통계조사에 따르면 통가 전체적으로 Swamp taro는 1,627 에이커에서 재배되고 있으며 그 중 통가타프섬에서는 통가 전체 Taro 재배면적의 75%에 해당하는 1,216 에이커의 면적에서 재배되었다. 그림 3.20은 통가타프섬에서 재배되고 있는 Taro 재배지의 전경과 부위별 명칭에 대해 설명하고 있다. Taro는 다른 작물에 비해 잎이 상당히 큰편에 속하며 Giant taro의 경우 그 잎의 길이가 1.8 m 폭이 1.2 m에 달하기도 한다. 통가타프섬에서 재배되고 있는 Taro는 주로 Swamp taro로 Vaini 지역과 Nukunuku 지역을 중심으로 재배되고 있다. Taro는 수확할 때 알줄기(Corm)를 잘라내고 남은 줄기(Top) 또는 알줄기에서 나온 가지인 흡지(Sucker)를 다시 땅에 심어 재배를 하는데 대체로 2주 정도 지나면 새로운 잎이 나오고 약 8주 이상 성장하면 LAI가 급격히 증가한다. 그림 3.21은 세 종류의 Taro에 대한 생육기간 LAI 변화를 실험한 결과로 48주간의 생육기간 동안의 LAI 변화를 나타낸다(Sivan, 1979). Taro 줄기를 심은지 16주가 되면 LAI가 최대가 되는 것으로 나타났고 이후 24주가 지나

면서 알줄기가 커지면서 LAI가 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Hawai 품종의 생육기간에 따른 LAI 변동 값을 토양수분함량 예측모형의 작물특성 입력정보로 이용했다.

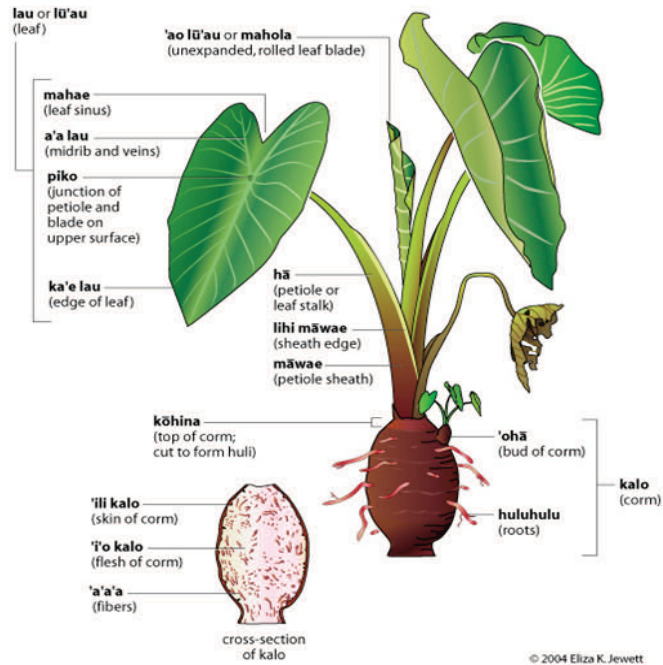


그림 3.20. Taro 부위별 명칭(위) 및 Taro 재배지 전경(아래)

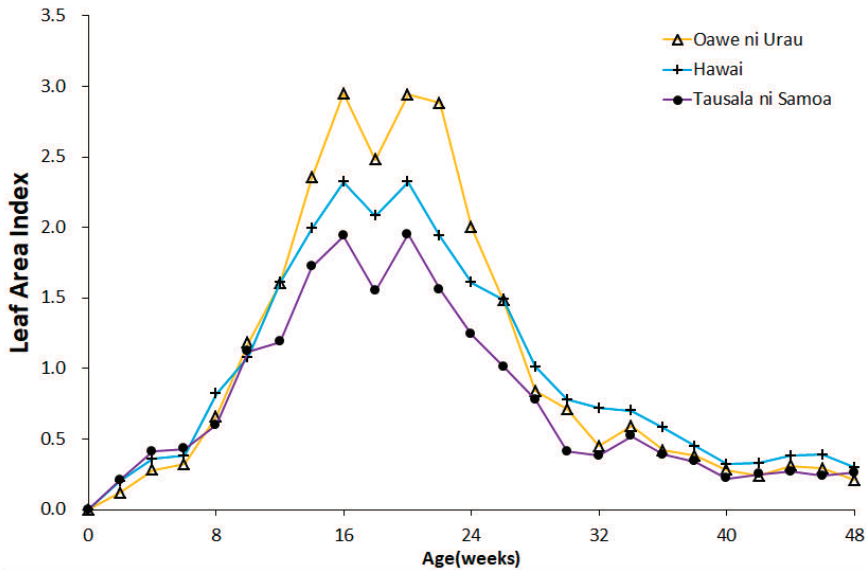


그림 3.21. Taro 생육기간에 따른 품종별 LAI 변동(Siban, 1979)

3.2 연구 방법

3.2.1 수자원 연구 방법

3.2.1.1 통가타푸섬 기후변화 시나리오 분석

3.2.1.1.1 통가 기후변화 시나리오 다중모델 앙상블 자료 처리

기후변화 시나리오 자료는 처리 방법에 따라 동일한 지역일지라도 결과가 상이한 경우가 발생한다. 따라서 표준화된 기후변화 시나리오 자료 생산에 대한 연구개발이 필요하다. 또한 단일 모형만 사용하는 것 보다 다양한 GCMs 결과를 활용하여 기후변화 시나리오와 기후모형이 가지고 있는 불확실성에 대해서도 언급해 줄 필요성이 있다. 본 연구에서는 통가타푸섬 기후변화 시나리오 상세화 자료 생산을 위하여 Cho(2013)가 개발한 R-CMIP5 패키지를 사용하였다. R-CMIP5에 의한 GCMs자료 처리절차는 다음과 같다. (1) Earth System Grid Federation(ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)에서 제공하는 CMIP5 GCMs 일 자료 자동추출, (2) 사용자가 입력한 위경도 좌표를 기준으로 원하는 지역에 해당하는 NetCDF 그리드를 추출하기 위하여 NCO(N

etCDF Operator) 기능 수행 및 Shell 스크립트를 이용한 자료의 클리핑, (3) CMIP5 GCMs 자료에 대하여 NetCDF포맷의 그리드 상에 존재하는 관측점의 좌표를 이용하여 지점별 텍스트 포맷의 시계열 자료 추출, (4) 지점별 관측자료와 R 프로그램의 qmap 패키지([ftp://ftp.gr.vim.org/mirrors/CRAN/web/packages/qmap/qmap.pdf](http://ftp.gr.vim.org/mirrors/CRAN/web/packages/qmap/qmap.pdf))를 이용하여 지점별 상세화 및 편이보정 된 시나리오 자료 생산의 순서로 이루어진다.

3.2.1.1.2 통가타푸섬 기후변화 시나리오 편이 보정

기후모형으로부터 생산된 격자별 자료는 공간 해상도가 낮을 뿐만 아니라 해양을 포함한 대상지역에 대한 공간평균의 의미를 가지고 있어 유역 규모에서의 시공간적인 기후 특성을 재현하는데 어려움이 따른다(Yoon and Cho, 2014). 또한 기후모형에 의해 생산된 미래 전망을 신뢰할 수 있기 위해서는 과거 및 현재 기후를 잘 모의해야 하며, 기후 모형으로부터 생산된 자료를 유역 규모에 해당하는 영역으로 세분화 시키는 다운스케일링 작업이 필요하다. 일반적으로 다운스케일링을 실시할 때, 관측기간 동안에 대해 모의된 기후모형의 결과와 동일 기간의 관측자료와의 비교를 통하여 GCMs의 계통오차를 보정해 주는데 이를 편이보정(Bias Correction)이라고 한다. GCMs의 기후변화 시나리오 자료 모의 결과에 대한 재현성이 검증된 후, 미래에 대한 전망의 신뢰도를 확보할 수 있으며, 본 연구에서는 관측기간에 대한 관측과 모의의 계통오차 편이보정을 위하여 분위사상법(Quantile Mapping)을 사용하였다. Cannon et al. (2015)에 의하면 일반적인 분위사상법에 대한 함수식은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1}\{F_{m,h}[x_{m,p}(t)]\} \quad (3)$$

여기서 $x_{m,p}(t)$ 는 미래 시간 t 에서의 편이보정 전의 값을 의미하며, $\hat{x}_{m,p}(t)$ 는 미래 시간 t 에서의 편이보정 후의 값을 의미한다. 또한 $F_{m,h}$ 는 과거기간(Historical Period) 동안 GCMs를 통해 모의된 자료의 누적확률밀도함수를 나타내며, $F_{o,h}^{-1}$ 는 과거기간 동안의 관측된 자료의 누적확률밀도함수의 역함수를 나타내고 있다. 또한 p 는 전망(Projection)을 h 는 과거(historical) 기간을, m 은 GCMs모형을, o 는 관측(observation)을 의미한다.

일반적으로 강우량의 경우 편이보정을 위하여 매개변수적 방법으로 Gumbel 분포형

을 적용할 수 있으며, 기준기간과 미래기간에 대한 변화율을 적용하여 미래 자료에 존재하는 추세를 반영하는 방법을 사용한다. 강우량에 대한 편이보정은 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_{m,p}(t) = F_{o,h}^{-1} \left\{ F_{m,h} \left[\frac{\bar{x}_{m,h} x_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,p}(t)} \right] \right\} \frac{\bar{x}_{m,p}(t)}{\bar{x}_{m,h}} \quad (4)$$

여기서 $\bar{x}_{m,h}$ 와 $\bar{x}_{m,p}$ 는 GCM 모형에 의해 모의된 과거기간과 미래기간에 대한 평균을 의미한다.

3.2.1.2 통가타푸섬 SPI 가뭄 분석

본 연구에서는 통가타푸섬의 월강수량 관측 자료를 바탕으로 가뭄분석을 실시하기 위하여 표준강수지수(Standard Precipitation Index, SPI)를 사용하였다. SPI는 가뭄이 상대적으로 물의 수요에 비해 물의 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의해 시작된다는 것에 착안하여 McKee et al. (1993)에 의해 개발되었다. 즉, 강수량이 부족하면 용수 공급원인 지하수량, 적설량, 저수지 저류량, 토양 함유수분, 하천 유출량 등에 각기 다른 영향을 미친다는 것으로부터 표준강수 지수를 개발한 것이다. 특히, SPI는 WMO(World Meteorological Organization)에 의해 기상학적 가뭄을 감시할 수 있는 대표적인 가뭄 지수로 권고되고 있다(Hayes et al., 2011).

SPI를 계산하기 위해서는 우선 시간 단위별 누가강수시계열을 구성하여야 하며, 이는 이동누가에 의한 방법으로 월 강수량을 시간단위에 따라 연속적으로 중첩하여 구한다. 즉, 각 월을 기준으로 하여 시간 단위별에 해당하는 누가강수 시계열을 산정하게 되며, 이는 누가된 월수로 나누어 고려해준 월에 따른 이동 평균 강수 계열을 획득하면 된다. 지속시간별 시계열이 구성되면 이 시계열을 월별로 분석하여 적정 확률분포형을 산정하는데 일반적으로 강수형태는 Gamma분포를 따른다. 따라서 지점별로 강수량의 분포를 Gamma 확률 밀도 함수로 추정하는 과정이 필요하며 최우도법(maximum likelihood method)를 이용해 최적해를 추정하여 도식적인 과정을 통해 계산한다. 하지만 실제 SPI 값의 계산은 다음 식 (5)~(8)과 같은 근사식을 이용하여 산정한다.

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (5)$$

$$SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (6)$$

여기서, $c_0=2.515517$, $c_1=0.802853$, $c_2=0.010328$, $d_0=1.432788$, $d_1=0.189267$, $d_2=0.001308$ 이며, $H(x) = q + (1 - q)G(x)$, $q = m/n$ 이다.

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (7)$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0.5 < H(x) \leq 1.5 \quad (8)$$

여기서, $H(x)$ 는 누적확률, $G(x)$ 는 Gamma함수, m 은 무강수일수, n 은 강수관측일수이다.

SPI에 의한 가뭄 분류체계는 다음 표 3.2와 같다.

표 3.2. Classification of SPI drought

SPI Value	Moisture Conditions	SPI Value	Moisture Conditions
2.0 over	Extremely Wet	-0.99 ~ 0.99	Near Normal
1.5 ~ 1.99	Very Wet	-1.0 ~ -1.49	Moderately Dry
1.0 ~ 1.49	Moderately Wet	-1.5 ~ -1.99	Severely Dry
-0.99 ~ 0.99	Near Normal	-2.0 below	Extremely Dry

3.2.2 농업 연구 방법

3.2.2.1 토양수분 관측센서 설치

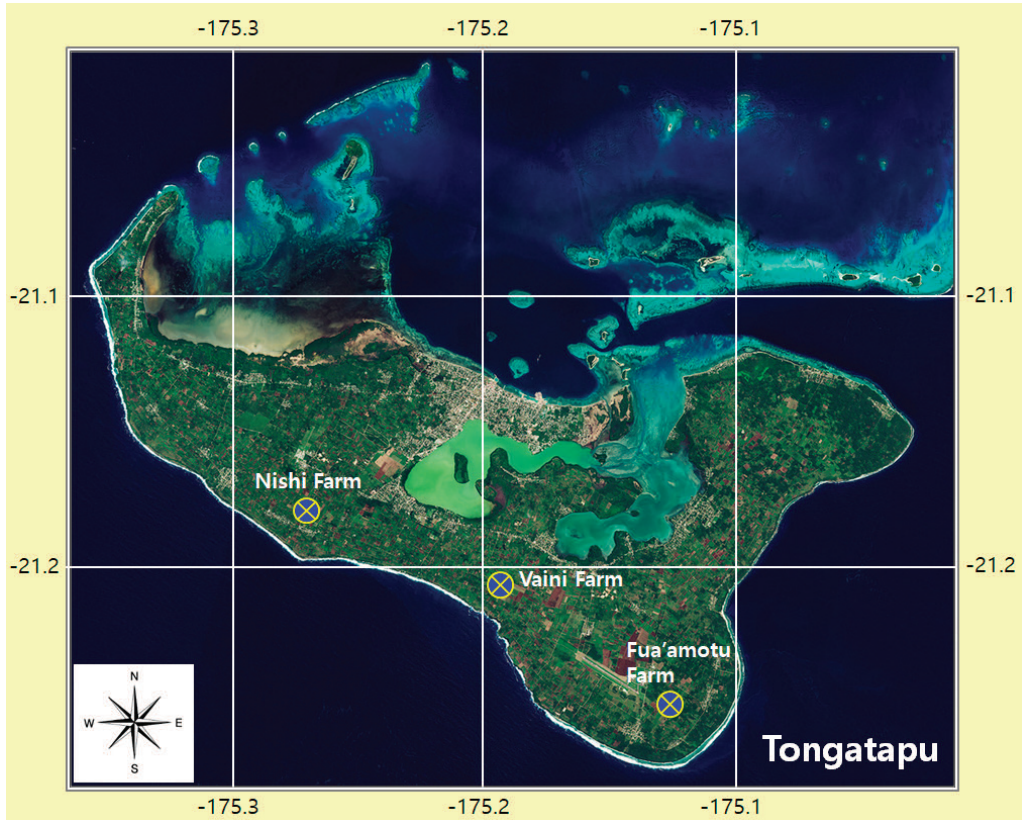


그림 3.22. 토양수분 관측센서 설치 지점(Nishi Farm, Vaini Farm, Fua'amotu Farm)

통가타푸섬 작물재배 지역 토양에 대한 수분 상태 변화를 확인하고 구축되는 토양수분 함량 예측 모형의 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 통가 농림부(MAFF)의 협조를 받아 그림 3.22와 같이 세 곳의 농장(Vaini Farm, Fua'amotu Farm, Nishi Farm)에 토양수분센서를 설치했다. Vaini Farm은 통가 농림부에서 운영하고 있는 시험농장에 위치해 있으며 농촌지도사의 관리하에 다양한 작물이 시험재배 되고 있다. Fua'amotu Farm은 통가 농림부 소속 농촌지도사의 개인 농장으로 Fua'amotu 국제공항 근처에 위치해 있다. Nishi Farm은 Nishi Trading이라는 상업영농회사가 운영하는 농장부지에 위치해 있으며 자체적으로 AWS를 운용하고 있어 기상관측자료의 토양수분함량 예측

모형에 이용 가능성 등을 고려해 연구 대상지역으로 선정되었다.

각 대상지역에 설치되는 토양수분 관측센서로는 비교적 가격이 저렴하고 설치가 편리한 WatchDog 사의 제품이 이용되었다. 본 연구에서는 토양수분함량(Soil Water Content, SWC)을 측정하는 센서와 토양수분포텐셜(Soil Water Potential, SWP)을 측정하는 센서 각각 2개씩을 대상 관측지점에 그림 3.23과 같이 약 20cm 깊이에서 설치하였다. WatchDog 제품은 0~200 kPa 범위의 SWP를 측정할 수 있다. 토양수분 데이터는 1시간 간격으로 자동으로 로거에 저장되도록 설정했으며 통가 농림부의 협조를 받아 통가 농림부 소속의 농촌지도사가 직접 노트북을 이용해 매일 1일 데이터 저장 로거로부터 데이터를 다운받아 이메일을 통해 정기적으로 APCC 연구자에게 전달해 준다.



Vaini Farm



Fua'amotu Farm



Nishi Farm

그림 3.23. 토양수분 관측센서 및 설치 지점 전경

3.2.2 토양 물리적 특성 분석

토양수분함량 예측모형을 구축하기 위해서는 대상지점에 대한 토양의 물리적 특성정보가 필요하며 토양의 물리적 특성을 분석하기 위해서는 전문적인 장비와 전문가의 경험 이 요구된다. 특히 통가타푸섬의 경우 대부분의 토양이 점토질로 되어 있어 각 토양성분에 대한 정확한 분석이 까다로울 뿐만 아니라 통가 내에는 토양의 물리적 특성을 분석할 만한 장비와 전문가가 부족하다. 본 연구에서는 연구 대상지역에서 샘플링된 토양을 국내로 반입하기로 결정했고 관련하여 반입을 위한 검역 준비와 토양에 대한 물리적 특성을 분석해 줄 기관을 선정했다. 분석기관(경북대)에서는 입도분석 시험을 통해 입도분포 곡선을 작성하여 토양의 Sand, Silt, Clay 비율 정보를 추출하였다.

3.3 사용 모형

3.3.1 수자원분야 모형

3.3.1.1 시계열 자료 주성분 분석 모형

본 연구에서는 열대태평양 엘니뇨 감시에 사용되는 SOI지수와 통가타푸섬 월강수량 자료로부터 산정한 SPI가뭄지수를 바탕으로 시계열자료의 주성분 추출을 통한 추계학적 예측모형을 구축하기 위하여 시계열자료의 저빈도해석에 주로 사용되는 단별량스펙트럼 분석(Singular Spectrum Analysis, SSA) 기법을 이용한 주성분분석(Principle Component Analysis, PCA)을 실시하였다.

SSA의 기본적인 개념은 원자료에서 비조화성분(Non-harmonics)을 제거함으로써 원자료에서 얻지 못하는 주기성과 경향성(trend)을 쉽게 파악할 수 있는 방법이다(Moon and Lall, 1996; 황성환, 2001). SSA는 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function; EOF) 방법을 응용한 것으로, 시계열 자료 X_i ($1 < i < N$)에 대하여 자료의 경향과 주기를 쉽게 표현할 수 있게 축을 경험적 직교함수를 이용하여 구성한 후, 원자료를 직교함수 EOF 1과 EOF 2에 정투영(Orthogonal) 시키는 방법이다(그림 3.24).

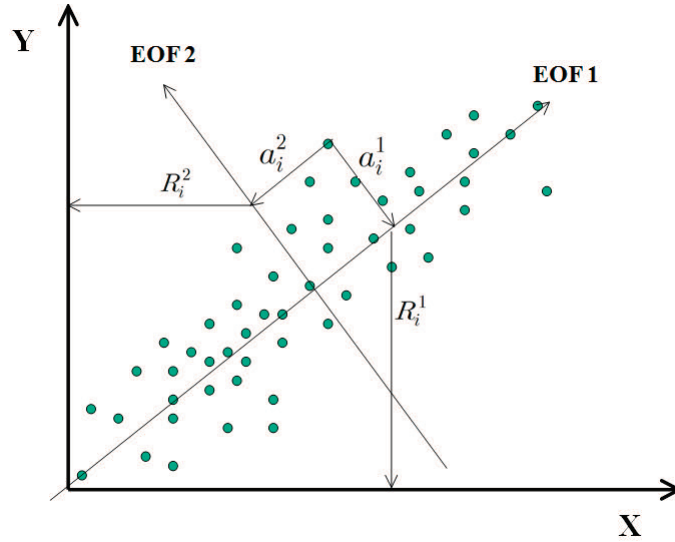


그림 3.24. Conceptual view of Singular Spectrum Analysis (SSA) by Empirical Orthogonal Function (EOF)

EOF 1과 EOF 2를 새로운 좌표축으로 사용하면, 자료가 가지고 있는 전체 분산 성향을 더욱 잘 표현할 수 있으며, 정투영 과정에서 고유치(eigenvalue)의 크기에 따라 자료의 비조화성분을 분리하고 조화성분에 해당하는 성분인 a_i^1 과 a_i^2 만 직교함수에 정투영한 후, 원좌표축인 X 와 Y 에 대응시켜 재구성요소(reconstructed component, RC)인 R_i^1 과 R_i^2 로 전환하여 원자료가 가지고 있는 고유특성(주기성과 경향성)을 반영한 추계 예측 모형을 구성할 수 있다. 이를 식 (9)로 다시 재구성하여 원자료를 대체할 수 있으며, 이렇게 구성된 자료는 잡음이 제거된 일정한 주기와 경향을 가진 시계열 자료로 구성된다.

$$\begin{aligned}
 (R_A X)_i &= \frac{1}{i} \sum_{j=1}^i \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & 1 \leq i \leq M-1 \\
 (R_A X)_i &= \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & M \leq i \leq N-M+1 \\
 (R_A X)_i &= \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=1-N+M}^i \sum_{k \in A} a_{i-j}^k E_j^k, & N-M+2 \leq i \leq N
 \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 a_i^k 는 투영계수, E_j^k 는 경험적 직각함수($1 \leq k \leq M$), M 는 smoothing window 역할을 하는 M 차의 공간, 그리고 τ 는 샘플의 추출비를 의미한다.

3.3.1.2 통가타푸섬 물수지 분석 모형

Falkland and Woodroffe(1997)는 지표유출이 발생하지 않는 작은 도서지역의 물수지 분석을 위하여 WATBAL 모형을 개발하였다. WATBAL모형의 기상관련 주요 입력변수는 월강수량과 월평균기온이며, 토양수분관련 매개변수는 토양특성을 고려한 추정 값을 사용한다. WATBAL 모형에 의한 지하수함양량 추정 식은 다음 식 (10)과 같다.

$$R = P - ET_a \pm \delta V \quad (10)$$

여기서 R 은 지하수 함양량(Recharge to groundwater, mm/t), P 는 강수량(rainfall, mm/t), ET_a 는 실제증발산량(actual evapotranspiration, mm/t), δV 는 토양수분변화량(change in soil moisture store, mm/t)을 의미한다. 다음 그림 3.25는 WATBAL 모형의 모식도를 나타내고 있다.

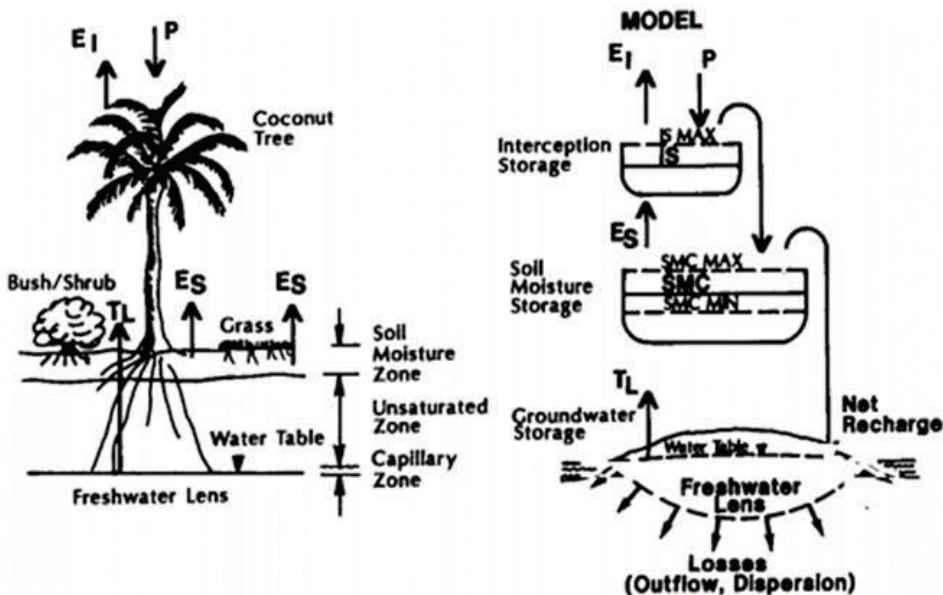


그림 3.25. Conceptual diagram for WATBAL model, which is water balance model for surface zone on a small island with no runoff (Falkland and Woodroffe, 1997).

WATBAL 모형에 의한 실제증발산량 계산은 월평균기온과 해당도서지역의 위도가 주어지면, 간략 식으로 산정할 수 있는 Hamon(1963)의 잠재증발산량 식을 사용하고 있

으며, Hamon의 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration) 계산식은 다음 식 (11), (12)와 같다.

$$PET = k \times 0.165 \times 216.7 \times N \times \left(\frac{e_s}{T + 273.3} \right) \quad (11)$$

$$e_s = 6.108e^{\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right)} \quad (12)$$

여기서, PET는 잠재증발산량(potential evapotranspiration, $mm \ day^{-1}$), k 는 비례상수(proportionality coefficient = 1¹, unit less), N 은 주간길이(daytime length, x/12hours), e_s 는 포화증기압(saturation vapor pressure, mb), T 는 월평균기온(average monthly temperature, °C)을 의미한다. 또한 포화증기압(e_s)은 다음 식을 통하여 산정할 수 있다. Lu et al. (2005)은 미국의 남동부 지역범위에서 사용을 위해 6가지 잠재증발산량 산정 식을 비교하였으며, Hamon식의 비례상수(k) 값을 1.2로 사용한 바 있다.

White(2009)는 지표수 유출이 없는 작은 섬에 대한 물수지 분석 컴퓨터 모델을 사용하여 지하수 함양율이 연평균 강수량의 23~32%의 범위에 있다고 제시하였다. 통가의 지하수 함양률 관련 주요 연구 결과는 표 3.3과 같다.

표 3.3. Studies on estimation of Recharge Rates for Tongatapu

Investigator (Year)	Method	Recharge as % of rainfall
Peiffer (1972)	Previous experience	10
Lao (1978)	Water Balance Approach	25
Hunt (1979)	Sharp Interface Mathematical Model	25-30
Kafri (1989)	Chloride Ion Concentration	25
Hasan (1989)	Water Balance Approach	20
Falkland (1991)	Water Balance Approach	30
White(2009)	Water Balance Approach	23-32

표 3.4는 WATBAL모형을 통하여 도시지역 물수지 해석을 위해 사용되는 주요 매개변수와 출력결과물이며, WATBAL모형 구동을 위하여 설정한 통가타푸섬의 초기 매개변수 값을 나타내고 있다.

표 3.4. Parameters and output of WATBAL model

Variables	Model parameters and output
RAIN	monthly rainfall (addition of daily values)
ET	monthly potential evaporation
EI	monthly interception loss
SMC1	soil moisture content at start of month
ES	monthly evaporation from soil moisture store
XCESS	rainfall minus evaporation losses above (EI + ES)
AVSMDEF	average soil moisture deficit for the month
SMC2	soil moisture content at end of month
GWR	gross recharge to freshwater lens
TL	transpiration due to deep-rooted vegetation
EA	sum of all evaporation losses (EI + ES + TL)
NETR	net recharge to freshwater lens (GWR - TL)

* Description of parameters

1. Interception Store Capacity (ISMAX) in mm
2. Initial Interception Store (IIS) in mm
3. Soil Moisture Zone Thickness (SMZ) in mm
4. Field Capacity (FC)
5. Wilting Point (WP)
6. Max. Soil Moisture Content (SMCMAX=SMZ*FC)
7. Min. Soil Moisture Content (SMCMIN=SMZ*WP)
8. Initial Soil Moisture Content (ISMC) in mm
9. Deep Rooted Vegetation (e.g. Coconut Trees) Ratio (DRVR)
10. Ratio of these roots reaching water table (DRWT)
11. Crop Factor for Deep Rooted Vegetation (CROPFD)
12. Crop Factor for Shallow Rooted Vegetation (CROPFS)

* Linear Relation of Ea/Et (actual/potential evap) ratio to SMC

ISMAX	IIS	SMZ	FC	WP	SMCMAX	SMCMIN	ISMC	DRVR	DRWT	CROPFD	CROPFS
90	90	1000	0.55	0.40	550	400	500	0.3	0	0.8	1

3.3.2 농업분야 모형

3.3.2.1 ROSETTA 모형

인공신경그물 열개(Artificial neural network)를 기반으로 하는 ROSETTA 모형은 미국 농무성의 농업연구소(USDA/ARS)에 의해 개발되었으며 다양한 토양(2,085개 샘플)의 실험정보를 바탕으로 하는 통계분석 모형으로 Pedotransfer functions(PTFs) 기법이 적용된다(Carlos et al., 2012). ROSETTA 모형은 가장 간단하게는 토양의 12가지 토성(TXT: Clay, Clay Loam, Loam, Loamy Sand, Sand, Sandy Clay, Sandy Clay Loam, Sandy Loam, Silt, Silty Clay, Silty Clay Loam, Silty Loam) 정보만을 가지고 토양의 수리학적 매개변수(θ_r , θ_s , K_s , K_o , α , n , L)를 추출할 수 있다. 보다 정확한 토양의 수리학적 매개변수를 추출하기 위해서는 Sand, Silt, Clay 비율(SSC,%), 용적밀도(Bulk density, BD), 33kPa 또는 1500kPa에서의 토양수분함량(TH33, TH1500)과 같은 정보가 추가적으로 필요하지만 본 연구에서는 현장에서의 토양 샘플링 및 운반 과정에서 토양이 교란되는 것을 피할 수 없어 SSC에 대한 실험 결과를 모형의 입력 자료로 이용하였다. ROSETTA 모형은 그림 3.26의 흐름도와 같이 토양의 물리적 특성 정보(TXT, SSC, BD, TH33, TH1500)를 입력으로 하는 Hierarchical ANN Models을 이용해 토양수분함량 예측모형의 토양관련 입력변수인 수리학적 매개변수를 추출한다. Model C2는 Hierarchical ANN Models에서 추정된 수리학적 매개변수(K_s , θ_r , θ_s , α , n)를 입력 자료로 재이용함으로 불포화 수리전도도 K_o 와 van Genuchten-Mualem 모형의 매개변수 L 을 추정한다. ROSETTA 모형을 이용한 토양의 수리학적 매개변수에 대해서는 신용희(2016)에 보다 자세히 설명되어 있다. 표 3.5는 ROSETTA 모형의 입력자료 항목에 대한 설명과 단위를 정리한 것이고 표 3.6은 ROSETTA 모형 실행을 통해 출력되는 항목에 대한 설명과 단위를 정리한 것이다.

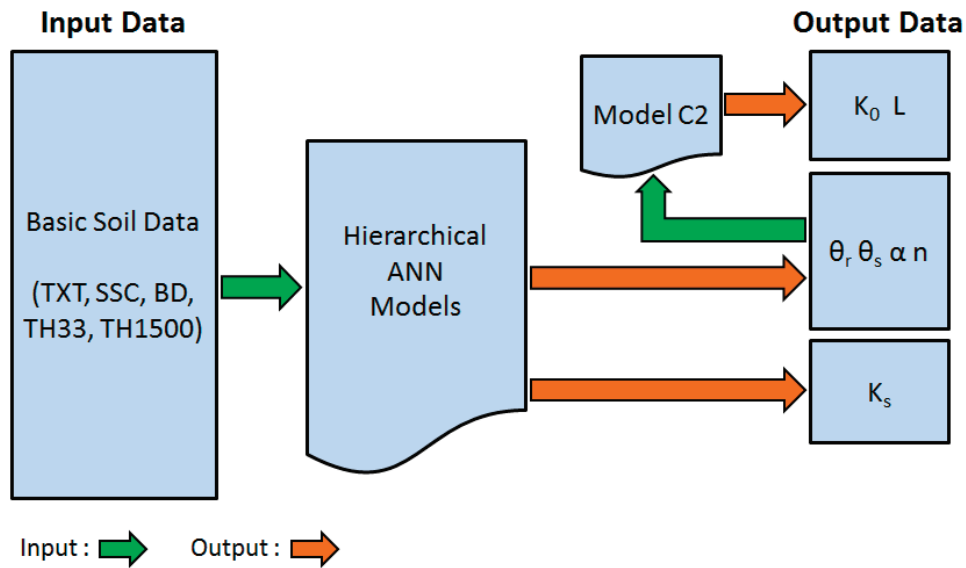


그림 3.26. ROSETTA 모형의 토양 수리학적 매개변수 추정 흐름도(신용희, 2016)

표 3.5. ROSETTA 모형 입력 자료

항목	설명	단위
TXT	Soil textural class (Clay, Clay Loam, Loam, Loamy Sand, Sand, Sandy Clay, Sandy Clay Loam, Sandy Loam, Silt, Silty Clay, Silty Clay Loam, Silty Loam)	-
SSC	Sand, Silt and Clay percentages	%
BD	Bulk density	g/cm ³
TH33	Water contents at 33 kPa	cm ³ /cm ³
TH1500	Water contents at 1500 kPa	cm ³ /cm ³

Source: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/us-salinity-laboratory/docs/ROSETTA-model/>

표 3.6. ROSETTA 모형 출력 자료

항목	설명	단위
θ_r	Residual water content	cm ³ /cm ³
θ_s	Saturated water content	cm ³ /cm ³
α	Curve shape parameter	1/cm
n	Curve shape parameter	-
K_s	Saturated hydraulic conductivity	cm/day
K_o	Unsaturated hydraulic conductivity	cm/day
L	Tortuosity/connectivity parameter	-

Source: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/us-salinity-laboratory/docs/ROSETTA-model/>

3.3.2.2 SWAP 모형

본 연구에서는 통가타푸섬 작물재배 지역에 대한 토양수분함량 예측모형으로 SWAP(Soil-Water-Atmosphere-Plant) 모형을 이용했다. SWAP 모형은 농경지 토양 층에 대한 물 수지를 계산하는 결정론적이며 기후특성과 지표특성(토양, 작물 등)을 고려할 수 있는 물리 기반형인 농업수문학적 모형(Agro-hydrological model)으로 경작지에 대한 물 수지와 관개 관리에 적용 가능한 도구로 활용되고 있으며 특히 작물의 생육시기별 토양수분 함량을 모의할 수 있는 장점이 있다(van Dam et al., 1997; 장태일, 2009; 장태일 등, 2009; Ma et al., 2011; Huo et al., 2012). 그림 3.27은 SWAP 모형을 이용한 토양수분함량 추정 시뮬레이션에 대한 개요를 나타내는 것으로 모형의 입력자료 생산에 대해 묘사하고 있으며 최종적으로 토양수분함량의 추정 결과를 보여준다. SWAP 모형에는 크게 기상관측정보, 토양특성정보, 작물특성정보와 같은 입력 자료가 요구된다(표 3.7). 기상관측정보로는 일단위의 최저기온(℃), 최고기온(℃), 기압(kPa), 풍속(m/s), 강수량(mm) 관측자료가 요구되며 ToCSA 시스템에서 제공되는 통가타푸섬내 기상관측지점인 Fua'amotu & 'Eua 지점과 Research Station 지점의 관측자료가 이용된다. 토양특성정보로는 연구 대상지점에 대한 Sand, Silt, Clay 비율(%) 자료와 ROSETTA 모형으로부터 추정된 잔류수분함량(θ_r)과 포화수분함량(θ_s), 포화수리전도도(K_s), 수분함량과 수리전도도의 형상계수인 α 와 n 값이 이용된다. 작물특성정

보로는 작물 생육기간(LCC), 생육단계(DVS), 엽면적지수(LAI), 작물의 높이(CH), 뿌리 깊이(RD) 등에 대한 자료가 이용된다.

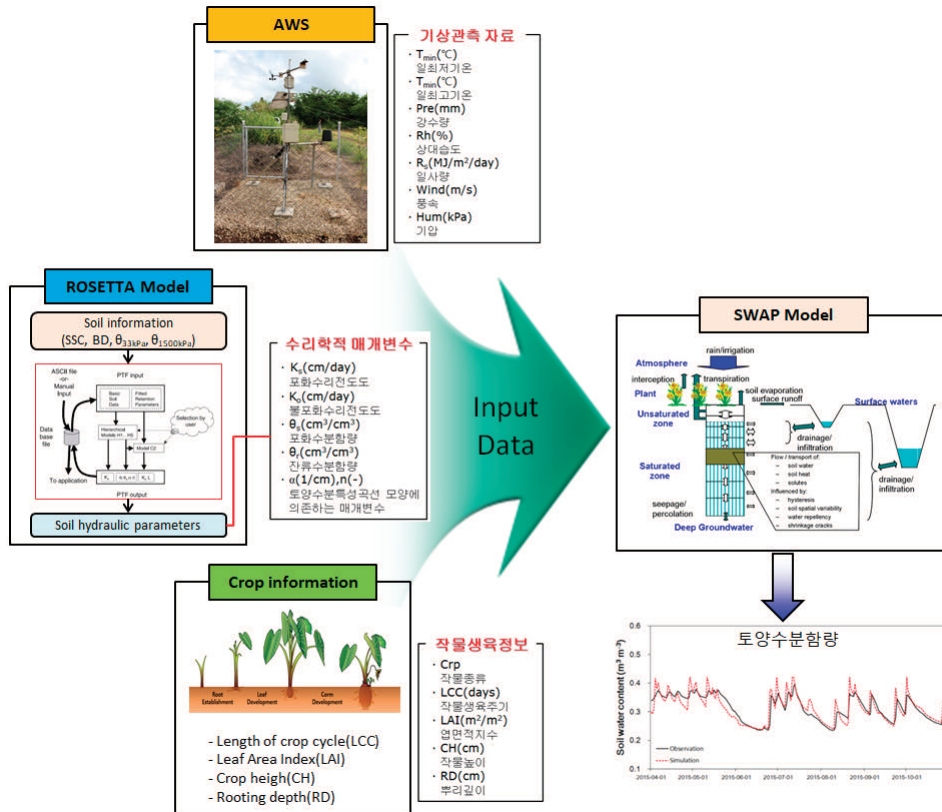


그림 3.27. SWAP 모형을 이용한 토양수분 함량 추정 시뮬레이션 개요

표 3.7. SWAP 모형 입력 자료

입력 자료	항목
토양특성정보	토양성분(Sand, Silt, Clay%) 토양 수리학적 매개변수($\theta_r, \theta_s, K_s, \alpha, n$)
기상관측정보	일사량(RAD), 일최저기온(Tmin), 일최고기온(Tmax), 기압(HUM), 풍속(WIND), 강수량(RAIN)
작물특성정보	작물생육단계(DVS), 엽면적지수(LAI), 작물높이(CH), 뿌리깊이(RD)

Source: Kroes et al., 2002

4. 연구결과

4.1 수자원 분야

4.1.1 열대 태평양 해수면 온도 변화 분석

통가를 비롯한 대부분의 남태평양 도서국 지역은 El Niño Southern Oscillation (ENSO)의 영향을 직접적으로 받는 지역으로, 엘니뇨가 발생하면 평상시 보다 강수량이 적어 가뭄이 발생할 가능성이 커지며, 라니냐 시기에는 평상시 보다 높은 강수량 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 열대태평양지역의 해수면온도 상승으로 인하여 발생하는 ENSO 현상은 강수량 변동과 해수면 상승에 직접적인 영향을 주어 태평양 도서국 지역의 수자원관리에 중요한 기후요소로 작용할 수 있다.

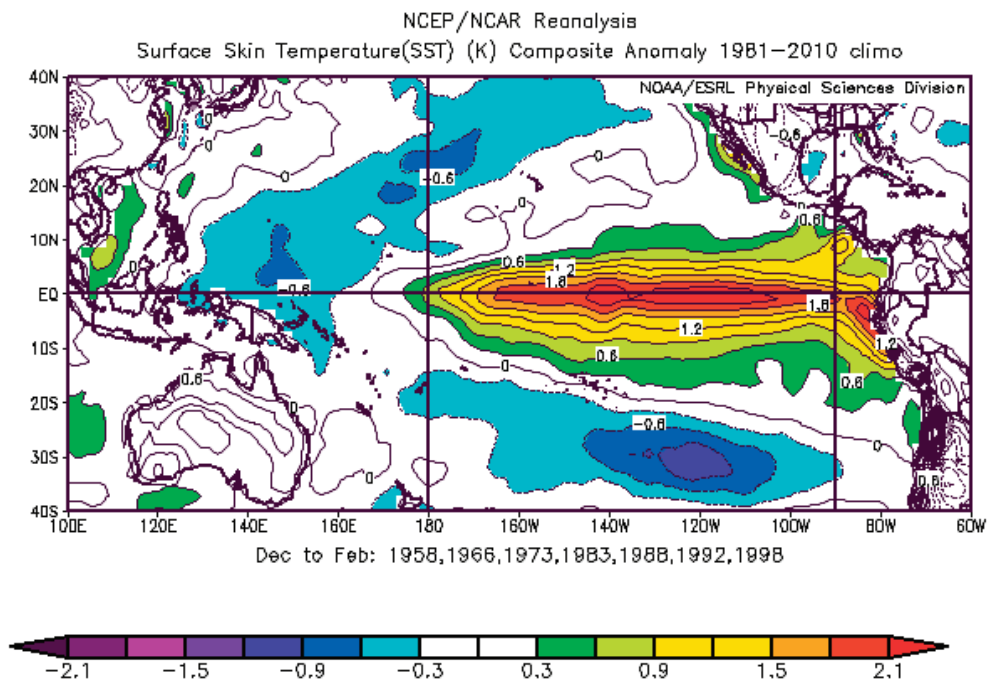
본 연구에서는 「윤선권, 2015. APEC기후센터 연구보고서 2015-12」의 연구결과를 바탕으로 엘니뇨 사상을 분리하였다. 전형적인 El Niño 사상의 구분은 $N_{CT}^{1)}$ 지수에 대하여 표준화된 3개월 이동평균(moving window)값을 산정하고 상위분위(upper quartile) 0.45 이상을 기준으로 하여, El Niño가 발달하기 시작하는 해(developing year)의 7월에서 그 다음해 즉, 쇠퇴하기 시작하는 해(decaying year)의 2월까지 8개월 동안 anomaly가 0.87 이상 지속되는 기간을 기준으로 선정하였다(Yoon et al., 2013). 위의 기준에 따라 선택된 7개의 강한 El Niño 사상은 1965/66, 1972/73, 1982/83, 1987/88, 1991/92, 1997/98, 2015/16이다. 또한 La Niña해의 구분은 미국의 NOAA CPC(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>)에서 제공하는 분류 기준을 적용하였으며, 강한 La Niña 사상으로 선택된 해는 1973/74, 1975/76, 1988/89, 1999/2000, 2010/11이다.

그림 4.1은 El Niño가 시작되는 해의 12월(DEC)에서 그 다음해 2월(FEB)까지의 3개월 동안 열대태평양(Tropical Pacific) 지역에서의 해수면온도(sea surface temperature, SST) 관측 자료에 대한 1981-2010년 Climatology의 합성편차(Composit Anomaly, CA)를 분석한 결과이다. 해수면온도의 합성편차 분석은 NCEP/NCAR Reanalysis(URL: <http://www.esrl.noaa.gov>) 자료를 사용하였다. 전형적인 El Niño 해의 경우 평년에 비하여 비정상적으로 높은 해수면 온도가 남아메리카 페루연안의 동태평양에서 부터 시작

1) N_{CT} 지수는 Ren and Jin (2011)에 의하여 제안되었다. $N_{CT} = N_3 - \alpha N_4$ (If, $N_3 \times N_4 > 0$ then $\alpha = 2/5$, otherwise $\alpha = 0$)와 같은 식으로 계산될 수 있으며, 전형적인 엘니뇨와 중앙태평양 엘니뇨 구분을 위하여 사용된다.

하여 중양태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 낮은 해수면 온도는 북서태평양지역과 남태평양 지역 전역에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(그림 4.1a). 반면에, La Niña 해의 경우 남아메리카 페루연안의 동태평양에서 부터 시작한 SST cold anomaly가 중양태평양까지 길게 늘어서 분포하고 있음을 확인할 수 있으며, 같은 해에 평년보다 높은 해수면 온도는 북태평양지역 일부와 남태평양 지역 전체에 걸쳐 발생하고 있음을 확인할 수 있다(그림 4.1b).

(a) SSTA during strong El Niño years



(b) SSTA during strong La Niña years

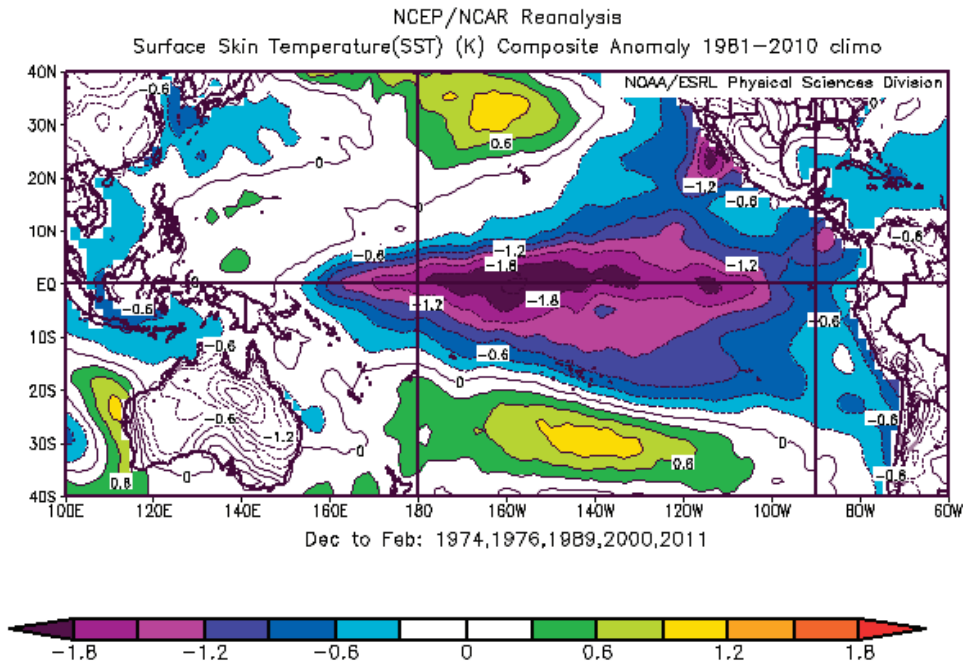


그림 4.1. Composite sea surface temperature anomalies (SSTA) in the developing phases of El Niño and La Niña during December-January. (a) and (b) show SSTA during strong El Niño and La Niña years, respectively.

4.1.2 엘니뇨/라니냐에 따른 통가 강수량 변동 특성 분석

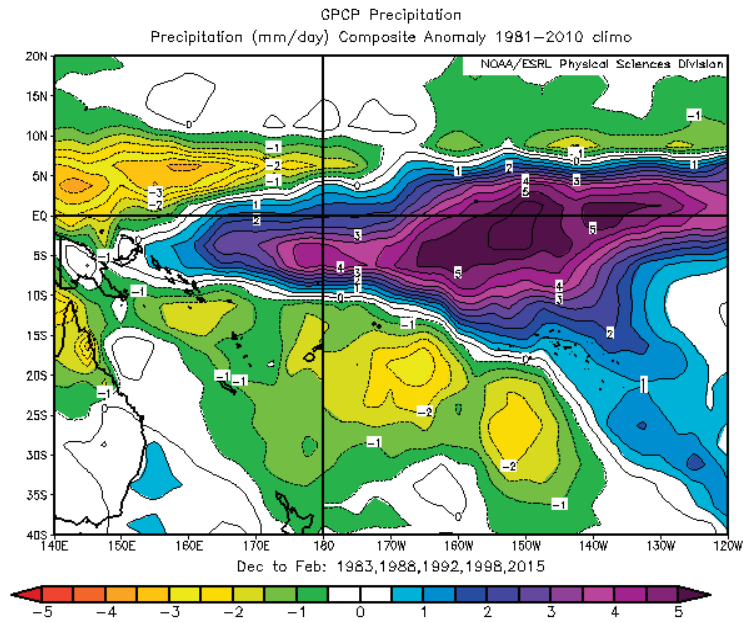
태평양 도서지역의 강수량 변동 특성분석을 위하여 미국 NOAA에서 제공하고 있는 전지구 월강수량관측 재분석 자료를 사용하였다. GPCP 강수량은 NOAA 홈페이지를 통하여 다운로드가 가능하며, 기본적인 합성편차 분석 툴을 웹상에서 제공하고 있다 (<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>).

앞서 언급한 바와 같이 통가는 상대적으로 습도가 높은 기간에 해당하는 우기와 습도가 낮고 건조한 건기의 두 개의 기후대로 구분된다. 따라서 본 연구에서는 엘니뇨/라니냐 등 이상기후 발생에 따른 통가의 강수량 변동 특성분석을 위하여 대표적인 우기에 해당하는 3개월(12월~이듬해 2월) 기간과 건기에 해당하는 3개월(6월~8월) 기간으로 구분하여 GPCP강수량의 합성편차 분석을 실시하였다. GPCP 자료가 1979년부터 현재 까지 존재하므로 강한 엘니뇨 해로 선정된 기간 값 중 1983, 1988, 1992, 1998, 2015

년의 5개 값을 적용하였으며, 강한 라니냐 해는 1989, 2000, 2011년의 3개 값만을 적용하여 강수량 합성편차 분석을 진행하였다. 따라서 적은 샘플 수에 따른 결과의 신뢰도 문제가 발생하지만, 이상기후 발생에 따른 태평양 도서지역 강수량 증감 등 전체적인 경향성 파악에는 도움이 될 것으로 판단된다.

그림 4.2는 통가의 우기에 해당하는 GPCP 관측 강수량의 3개월(December to February) 합성편차를 분석한 결과이다. 여기서 사용된 Anomaly 기후값(climatology)은 1981년부터 2010년까지 30년 자료이다. 전형적인 엘니뇨 시기에는 중앙태평양지역을 중심으로 적도지역의 강수량 증가패턴이 관측되고 있음을 확인할 수 있으며, 적도에 근접한 북서태평양 지역과 남태평양 대부분 지역의 강수량 감소패턴이 확인되고 있다(그림 4.2a). 더욱이 통가가 위치한 지역(16° - 21° S, 176° - 174° W)의 강수량 편차는 평년에 비하여 1~2mm/day 정도의 감소 패턴이 관측되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 엘니뇨가 발생하는 시기 여름철 우기에는 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 90~180mm정도 감소할 것으로 분석된다. 또한 라니냐 시기의 GPCP 강수량 합성편차는 엘니뇨 시기와 반대 패턴을 보이는 것으로 확인되며, 통가가 위치한 지역의 강수량 편차는 평년에 비하여 1.5~3mm/day 정도의 증가 패턴이 관측되고 있는 것을 확인 할 수 있다(그림 4.2b). 따라서 라니냐가 발생하는 시기 여름철 우기에는 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 135~270mm정도 증가할 것으로 분석된다.

(a) GPCP during strong El Niño years (Wet season)



(b) GPCP during strong La Niña years (Wet season)

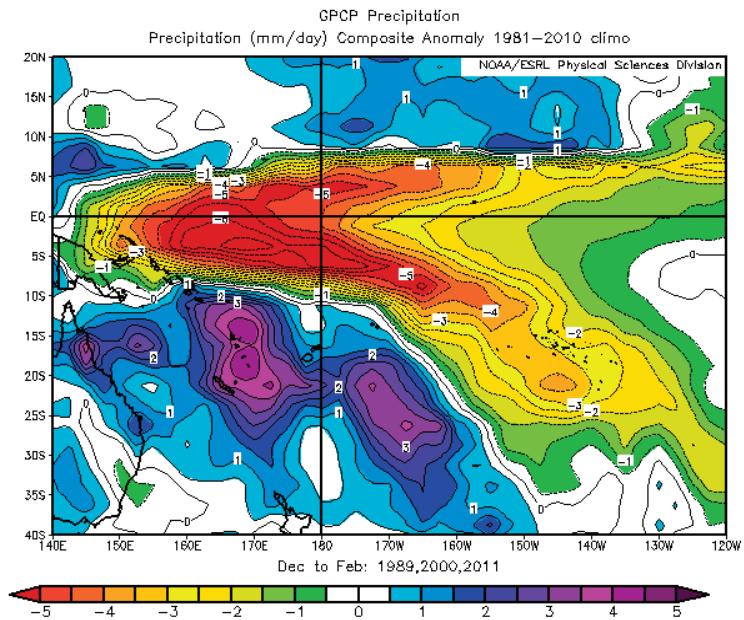
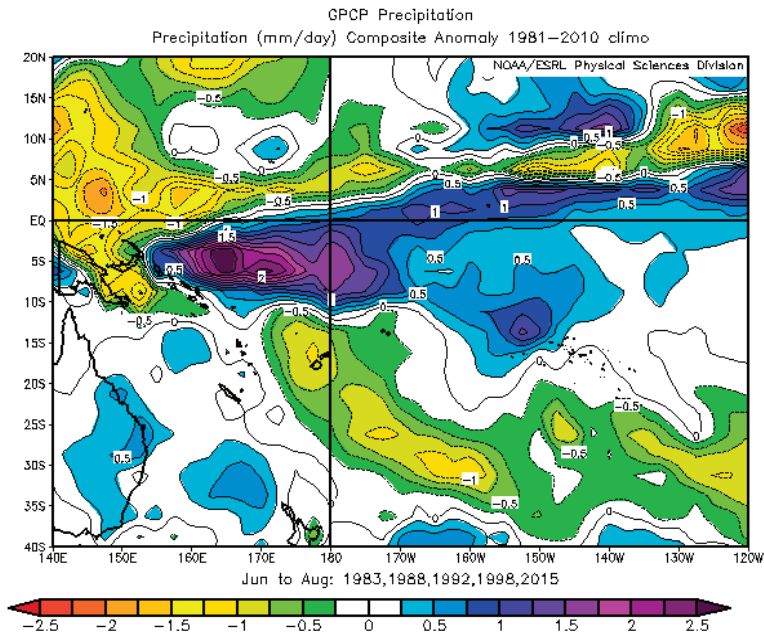


그림 4.2. Composite anomalies of GPCP precipitation during wet season (December to February) in strong (a) El Niño years and (b) La Niña years over the South Pacific Ocean.

(a) GPCP during strong El Niño years (Dry season)



(b) GPCP during strong La Niña years (Dry season)

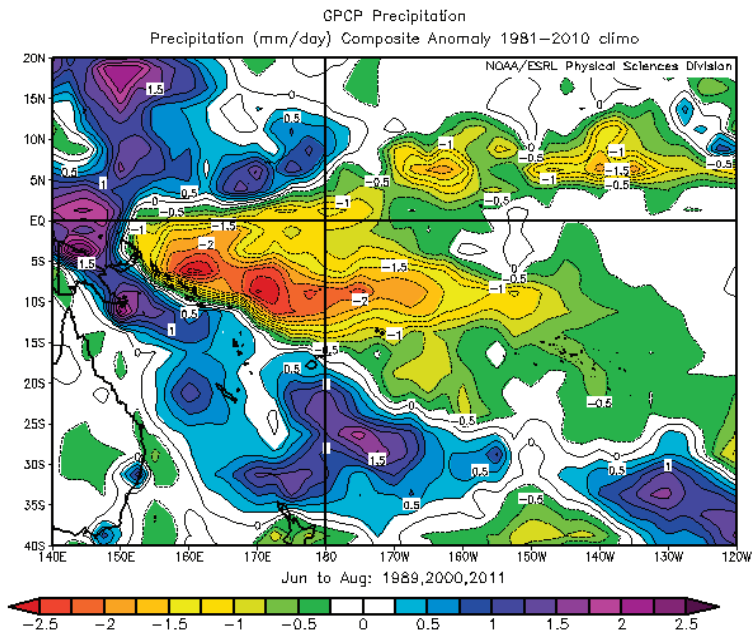


그림 4.3. Composite anomalies of GPCP precipitation during dry season (June to August) in strong (a) El Niño years and (b) La Niña years over the South Pacific Ocean.

그림 4.3은 통가의 건기에 해당하는 GPCP 관측 강수량의 3개월(June to August) 합성편차를 분석한 결과이다. 앞서 수행한 우기의 강수량 패턴이 건기에도 어느 정도 유지되는 것으로 분석되며, 전형적인 엘니뇨 시기에는 중앙태평양 일부지역에서 강수량 증가패턴이 관측되고 있음을 확인할 수 있으며, 북서태평양 대부분 지역과 남태평양 일부 지역의 강수량 감소패턴이 확인되고 있다(그림 4.3a). 또한 통가가 위치한 지역의 강수량 편차는 평년에 비하여 0.5~1mm/day 정도의 감소 패턴이 관측되고 있는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 엘니뇨가 발생하는 시기 겨울철 건기에는 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 45~90mm정도 감소할 것으로 분석된다. 또한 라니냐 시기의 GPCP 강수량 합성편차는 엘니뇨 시기와 반대 패턴을 보이며, 라니냐 우기의 강수량 패턴을 어느 정도 유지하는 것으로 보인다(그림 4.3b). 통가가 위치한 지역의 강수량 편차는 평년에 비하여 0~1mm/day 정도의 증가 패턴이 관측되고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 라니냐가 발생하는 시기 겨울철 건기에는 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 0~90mm정도 증가할 것으로 분석된다.

4.1.3 통가타푸섬 기후변화 영향 평가 및 강수량 전망

4.1.3.1 CMIP5 자료를 이용한 통가타푸섬 기후변화 영향 평가

본 연구에서 사용된 모형 자료 NEX-GDDP는 전지구 지역에 대한 다운스케일링 자료를 제공하고 있다. 그 중에서도 연구 지역은 태평양제도 지역의 한 부분인 통가 왕국의 170여개 섬 중 통가타푸 섬(Tongatapu island)과 에우아 섬(Eua island)이다. 통가 왕국의 많은 섬들은 남위 15도에서 남위 25도, 서경 173도에서 서경 177도 사이에 위치하고 있지만, 그 중에서 본 연구에서 분석하고자하는 대상 지역인 통가타푸 섬과 에우아 섬의 위치는 위도는 남위 21.5도에서 남위 21도, 경도는 서경 175.5도에서 175도에 속하는 지역이다. 연구에 사용된 모형 자료인 NEX-GDDP의 공간 해상도(0.25°)에 의해 총 6개의 그리드가 이용되었다. 평균 기후장의 분석에 있어서 단 6개의 그리드는 분석이 힘드므로, 주요 계절 평균장은 통가 지역을 포함하는 남서태평양 도서국 지역에 대해 살펴보았다.

Tonga 지역의 기후 특성을 분석하기 위해 평균장을 공간적으로 나타내어 과거 재현 기간 대비 미래 기간의 변화를 살펴보았다. 그림 4.4는 남서태평양 도서국 지역에 대한 연평균 최저 기온, 최고 기온, 강수량에 대한 공간장 분포를 보여준다. 일 최저 기온, 일 최고 기온, 일 강수량의 연 평균장을 과거 모의 기간(His)과 세 기간으로 나누어 공간

적인 변화를 살펴보았다. 과거 모의 기간에 비해 RCP 시나리오에서 기온을 더욱 높게 모의하는 특징이 나타나며, 먼 미래로 갈수록 기온의 증가가 뚜렷해짐을 알 수 있다. 강수 또한 먼 미래로 갈수록 더욱 증가하는 특징을 보인다.

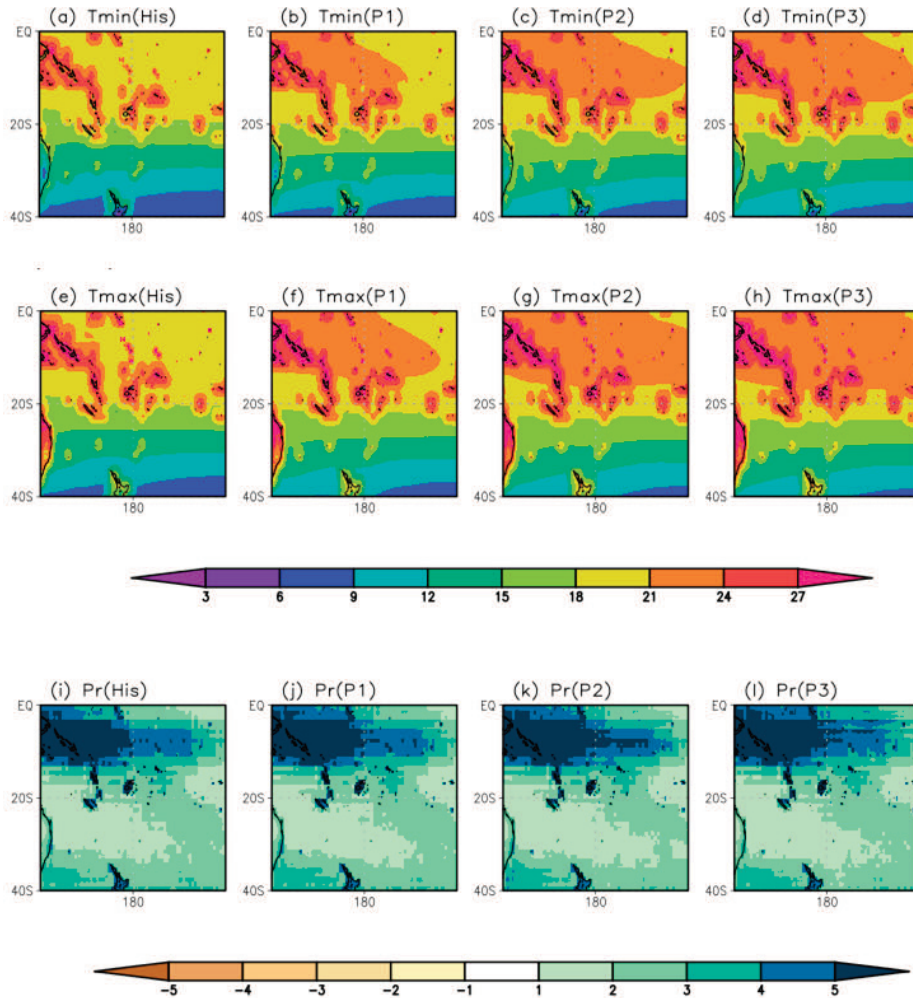


그림 4.4. (a)~(d) 일 최저 기온, (e)~(h) 일 최고 기온, (h)~(k) 일 강수량에 대한 His(과거 재현기간, 1950~2005)와 RCP 4.5 시나리오의 P1(2020~2049), P2(2050~2079), P3(2080~2099)의 각 기간에 대한 연 평균 기후 값의 공간 분포도.

그림 4.5는 Tonga 지역의 강수, 최고 및 최저 기온의 변화 추이를 RCP 4.5 시나리오와 8.5 시나리오에 대해 각각 나타낸 것이다. 강수의 경우 그림 4.5a, 그림 4.5b에서 보듯이, 증가하거나 감소하는 추세가 뚜렷하게 나타나지는 않지만 먼 미래로 갈수록 21개

모형이 나타내는 강수 변동성의 크기, 즉 불확실성이 더욱 크게 나타남으로써 극한 강수 발생의 가능성이 커짐을 알 수 있다. RCP 4.5 시나리오에서의 최고 기온과 최저 기온은 근 미래에서 약간 상승하는 추세를 보이다가 먼 미래에서는 상승 추세가 약해지고 유지되는 특징을 보인다. RCP 8.5 시나리오에서는 4.5 시나리오와는 달리 먼 미래로 갈수록 기온 상승이 더욱 가파르게 나타나고 모형 간 불확실성 또한 더욱 커짐을 알 수 있다.

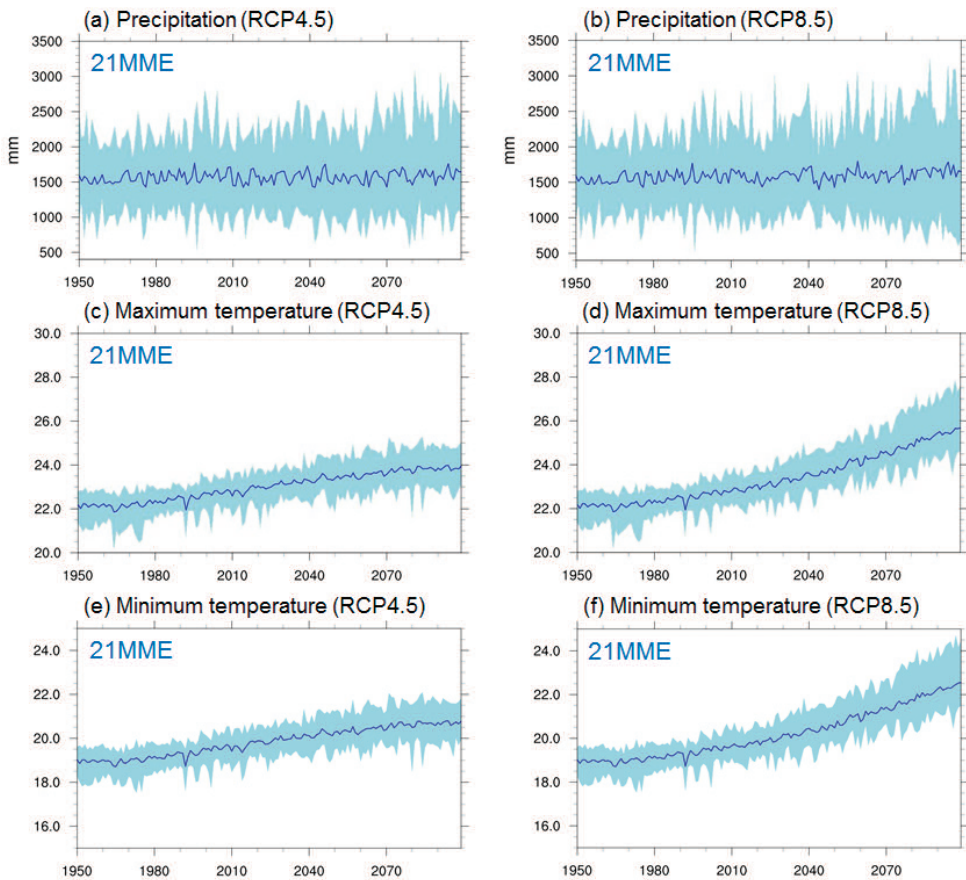


그림 4.5. RCP 4.5와 8.5 시나리오에서의 강수 (a, b), 최고 기온 (c, d), 최저 기온 시계열. 파란색 실선은 21개 모형 앙상블 평균, 하늘색 면적은 21개 모형의 최솟값과 최댓값 레인지.

그림 4.6은 일 강수량에 대해 21개 모형의 앙상블 평균(21 MME)과 I4MME, D4MME의 변화 추세를 나타낸다. Tonga 지역은 우기와 건기가 뚜렷하게 나뉘는 기후 특성을 가지고 있으므로, 우기(11월~다음해 4월), 건기(5월~10월) 기간에 대하여 기후 변화 전망을 살펴보았다. 그림의 왼쪽 패널은 건기(5월~10월), 오른쪽 패널은 우기(11

월~4월) 동안의 강수량 변화 추세를 보여주고 있다. 건기에는 21MME가 모형 간 변동성이 서로 상쇄됨에 따라 매우 작은 경년변동성을 보이고 있으며, I4MME, D4MME 모두 뚜렷한 변화 추세를 보이지는 않고 있다. 하지만 우기 동안의 강수 변화 추이를 살펴보면, 강수가 먼 미래까지 지속적으로 증가한다고 모의하는 I4MME에서 D4MME보다 더욱 가파른 증가 추세를 나타낸다. 이러한 증가는 RCP4.5에서보다 RCP8.5에서 더욱 뚜렷하다. 또한 먼 미래로 갈수록 강수의 경년 변동성이 매우 커짐으로써, 극한 강수 발생 가능성 또한 높을 것으로 보인다. 한 편, D4MME의 경우 RCP 8.5 시나리오에서보다 오히려 RCP 4.5 시나리오의 강수 증가가 더욱 큰 것으로 모의하였다. 21MME은 뚜렷한 변화 추세가 보이지 않으며, 건기 때와 마찬가지로 모형 간 변동성의 상쇄로 경년변동성을 매우 작게 모의함을 알 수 있다.

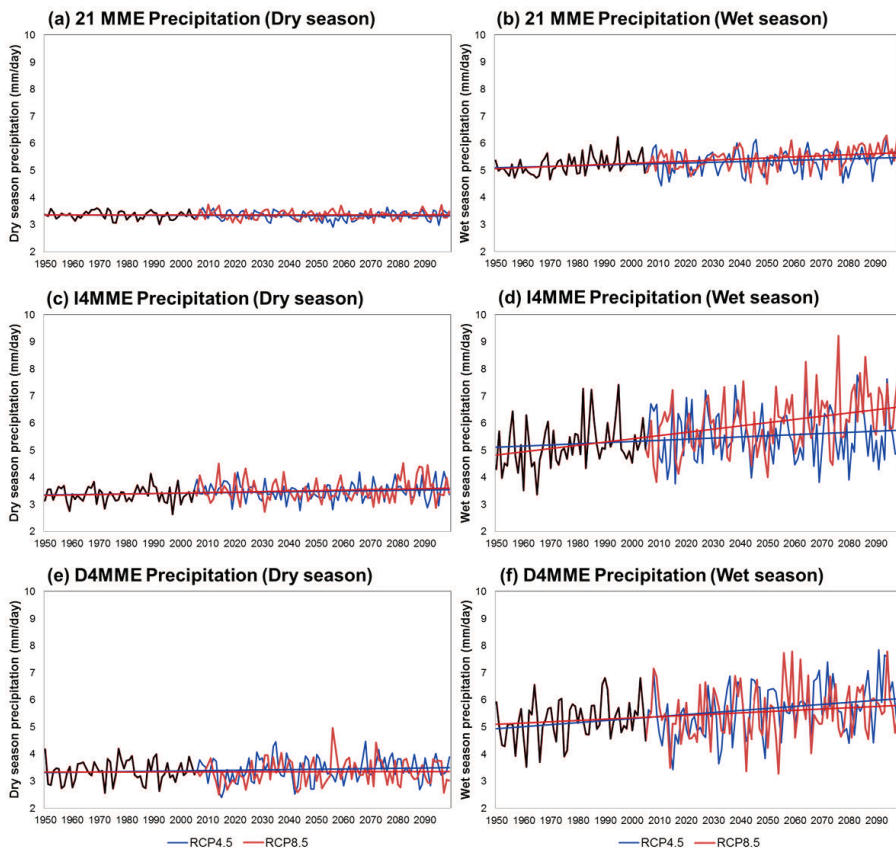
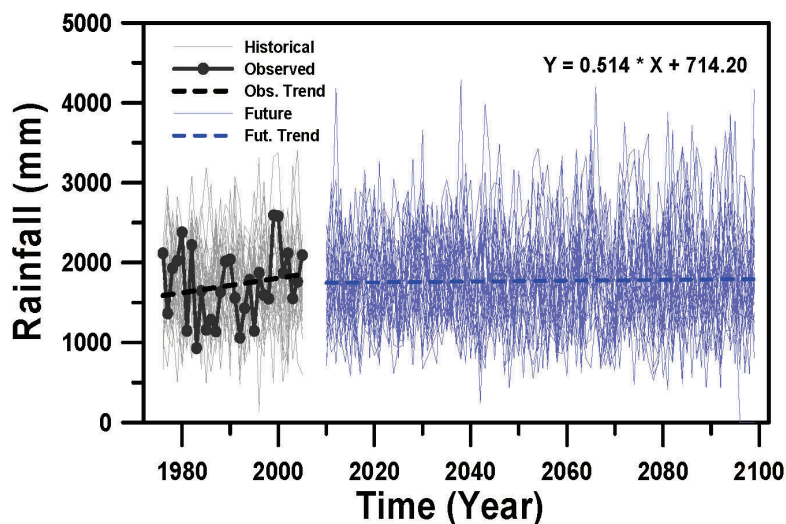


그림 4.6. 과거 재현 기간과 RCP 4.5, 8.5 시나리오에서의 강수량 모의 시계열. (a),(b) 21MME, (c),(d) I4MME, (e),(f) D4MME 모형에 대해 각각 평균된 시계열. 검은 실선은 과거 재현 기간, 파란색 실선은 RCP 4.5, 빨간색 실선은 RCP 8.5 시나리오에서의 강수 변동성 및 그 추세선을 나타냄.

4.1.3.2 통가타푸섬 누쿠알로파 지점 강수량 전망

그림 4.7은 다중모델 앙상블 기후변화시나리오 자료처리 및 편이보정을 위하여 APCC에서 개발한 R-CMIP5모형을 통하여 기후변화시나리오 분석을 실시한 결과이다. GCMs 모형의 편이보정을 위하여 사용되는 관측기간 일강수량 자료는 통가 기상청을 통하여 제공받아 사용하였으며, 통가지역에 가용한 29개 GCMs모형을 모두 사용하였다. 여기서 GCMs 모형의 편이 보정을 위하여 적용된 관측기간(Historical Periods)은 1976년부터 2005년까지 30년 자료를 사용하였으며, 미래 전망(Future Projection)기간은 2010년부터 2099년까지 자료를 분석하였다. 30년 Historical 기간의 관측 강수량은 증가경향이 뚜렷이 나타났으며, GCMs 모형에 의한 전망 또한 다소 증가경이 있는 것으로 분석되었다. 또한 미래 기간 RCP4.5 시나리오에서의 강수량 전망 기울기는 $S=0.514$ 의 값을 보였으며, RCP8.5 시나리오에서의 강수량 전망 기울기는 $S=1.364$ 로 분석되어 모두 양의 기울기 값을 보였다. 29개 GCMs 모형의 연평균 강수량이 증가하는 것으로 나타났으나 Historical 기간에 비하여 그 증가경향은 작은 것으로 분석되었다. 또한 과거 기간에 비하여 미래기간에 강수량 변동의 편차가 크게 발생하여 강수량의 불확실성이 큰 것으로 분석되며, 일부 모형에서는 오히려 미래 강수량이 감소하는 경향이 나타나기도 하였다.

(a) RCP 4.5 scenarios



(b) RCP 8.5 scenarios

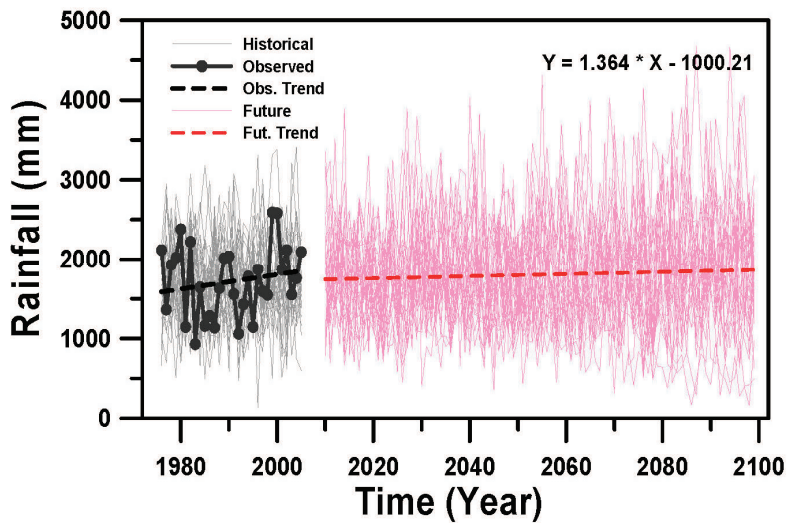


그림 4.7. Bias corrected annual rainfall projection and their uncertainty by CMIP5 29-GCMs during historical and future. (a) and (b) show RCP4.5 and RCP 8.5 scenarios, respectively.

4.1.4 통가타푸섬 SPI 와 SOI의 상관 분석

통가의 수도인 통가타푸섬 누쿠알로파(Nuku'alofa)에는 하나의 강수량 관측 지점이 존재하며, 1945년 이후부터 월강수량 관측이 시작되어 약 72년에 해당하는 자료가 존재한다. 본 연구에서는 관측시점부터 최근까지 강수량 관측 자료를 수집하여 분석에 사용하였으나, 비교적 최근 기간에 해당하는 1980년 이후의 분석 결과를 본문에 제시하고자 한다.

그림 4.8은 누쿠알로파 기상관측 지점(No. 3098)의 1980년부터 2016년까지의 월평균 강수량으로부터 SPI 3개월에 해당하는 가뭄지수를 산정한 결과이다. 또한 1980년 이후에 발생한 비교적 강한 엘니뇨 해(1982/83, 1988/89, 1992/93, 1997/98, 2004/05, 2011/12, 2015/16)를 구분하여 SPI 가뭄지수와 함께 표시하였다. 그림 4.8에서 보는바와 같이 강한 엘니뇨가 발생하였던 해의 SPI가뭄지수는 대부분 음의 값을 나타내고 있으며, -2.0이하의 극심한 가뭄(Extremely Dry)이 발생할 것으로 확인되는 경우도 3차례(1982/83, 1992/93, 2010/11)나타나고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 통가타푸 섬의 SPI 가뭄지수와 엘니뇨는 음의 상관성이 있음을 예상할 수 있으며, 엘니뇨가 강하게 발생한 해에는 통가 지역에는 가뭄이 발생할 확률이 높을 것으로 사료된다.

반면 강한 라니냐 발생 시기(1989/90, 2000/01, 2011/12)에는 SPI가뭄지수가 1.0 (Very Wet) 이상으로 다시 회복되어 양의 값을 갖게 됨을 확인할 수 있다.

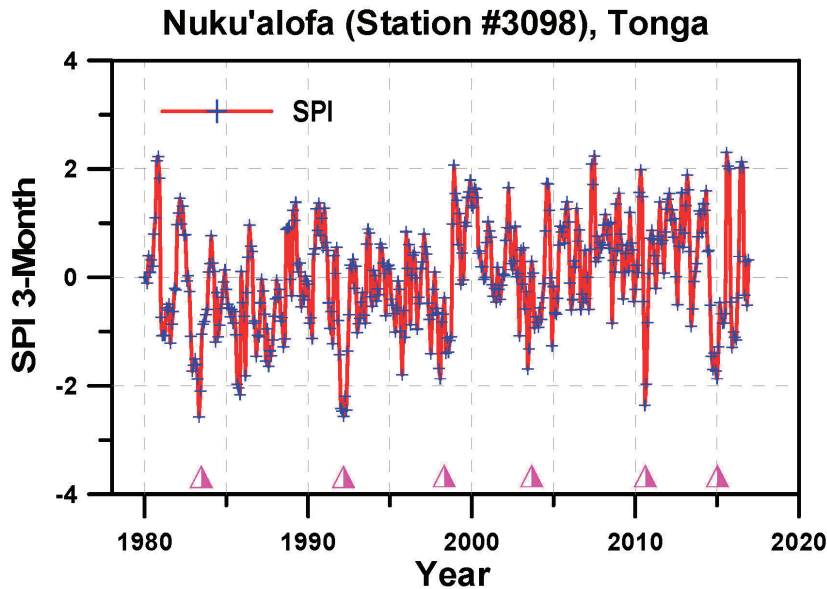
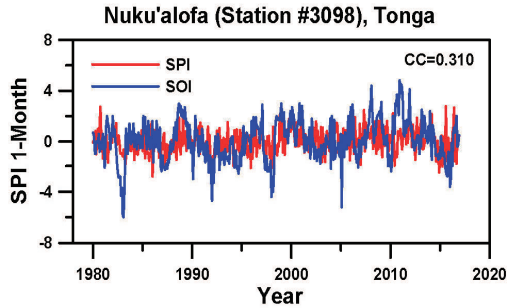


그림 4.8. Calculation of SPI 3-month drought index based on observed monthly precipitation at Nuku'alofa station in Tongatapu island.

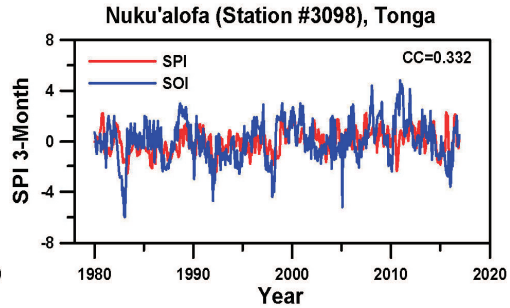
그림 4.9는 통가타푸섬 누쿠알로파 기상관측 지점의 월강수량 자료를 바탕으로 산정한 SPI 가뭄지수와 SOI를 비교한 결과이다. SPI 가뭄지수의 지속기간은 1개월, 3개월, 6개월, 9개월, 12개월, 24개월의 총 6개 구간으로 구분하였으며, 각 기간별 SOI와의 상관성을 분석하여 최적의 가뭄모니터링 기간을 설정하고자 한다.

SPI 지수와 SOI의 상관계수를 분석한 결과, 각 지속기간별 0.310, 0.332, 0.301, 0.268, 0.240, 0.222의 양의 상관성을 보이고 있음을 확인하였으며, SPI 3개월에서 가장 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다. 즉, 강한 엘니뇨 사상이 발생할수록 통가 지역의 강수량이 감소할 확률이 높음을 확인하였다. 따라서 통가 도서지역 수자원관리 관점에서 강한 엘니뇨는 가뭄을 발생시킬 확률이 크므로 이수 중심의 수자원 관리가 필요할 것으로 보이며, 지속적인 엘니뇨관련 대기해양지수(e.g., ENSO, SOI, MEI) 모니터링 분석을 통한 수자원 분야 활용이 요구된다.

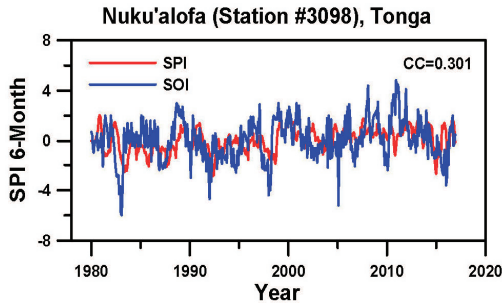
(a) SPI 1-Month



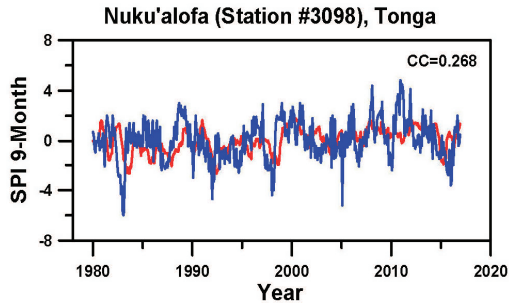
(b) SPI 3-Month



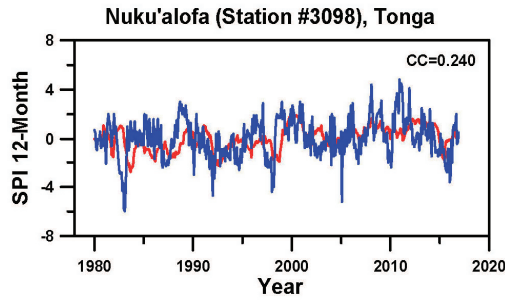
(c) SPI 6-Month



(d) SPI 9-Month



(e) SPI 12-Month



(f) SPI 24-Month

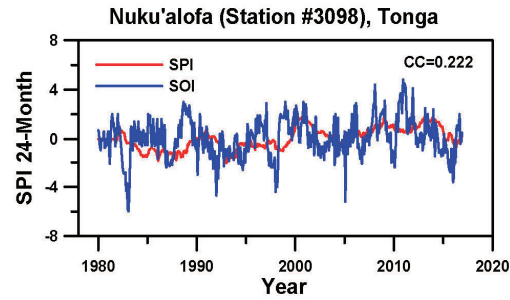


그림 4.9. Comparison between SPI and SOI during different drought lag-time in Tonga. (a) to (f) indicate SPI 1-Month to 24-Month, respectively.

4.1.5 통계 모형을 이용한 시계열 자료 예측

본 연구에서는 M차 공간 스무딩 윈도우 값은 120으로 설정하였으며, 샘플의 추출비(τ)는 1로 설정한 후 SSA에 의한 시계열 자료의 주성분을 추출하였다. 그림 4.10은 SSA기법을 이용하여 표준강수지수(SPI)와 남방진동지수(SOI)의 주성분을 추출한 후 RC1-4,

RC1-8, RC1-12, RC1-16 재구성 성분(Reconstructed Components) 시계열 자료를 도식한 결과이다.

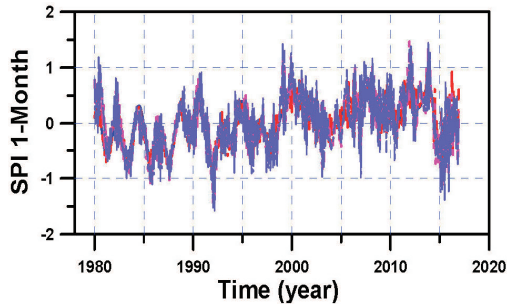
그림 4.10은 통가 누쿠알로파 기상관측 지점의 월강수량 자료로부터 추출한 표준강수 지수와 SOI, 그리고 SSA기법을 이용하여 주성분을 추출한 후 구축한 재구성성분의 시계열을 나타내고 있다. 또한 그림 4.11은 통가 누쿠알로파 지점 월강수량 자료로부터 추출한 표준강수지수들(그림 4.11a-f)과 남방진동지수(그림 4.11g)의 단변량 스펙트럼 분석을 통해 발생된 경험적 직교함수(EOF)에 대응하는 120개의 고유치(Eigenvalue) 분포를 나타내고 있다. 시계열자료의 12차원 공간까지의 EOF를 합산하여 추출된 주성분 시계열이 원시계열자료를 설명할 수 있는 능력을 총 분산에 대한 백분율로 평가하였다. 분석 결과 SPI 1-Month의 경우 24.8%, SPI 3-Month의 경우 49.7%, SPI 6-Month의 경우 68.5%, SPI 9-Month의 경우 83.0%, SPI 12-Month의 경우 90.0%, 그리고 SPI 24-Month의 경우 96.8%로 분석되었다. 또한 SOI의 경우 12차원 공간의 EOF는 원시계열자료의 71.9%까지 설명력이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 12차원 이상의 EOF는 비조화 성분으로 간주해도 될 것으로 판단된다. 다음 표 4.1은 시계열 자료 EOF의 고유치가 갖는 총 분산에 대한 백분율을 나타낸 결과이다.

SSA 기법을 이용하여 추출한 시계열 자료의 주성분자료를 바탕으로, 추후 추계학적 예측모형을 적용하여 기후지수 및 SPI 가뭄지수 예측이 장기 예측이 가능할 것으로 사료된다. 이는 열대태평양 지역에서 엘니뇨/라니냐 등의 이상기후가 발생할 경우 계절규모의 수자원예측에 활용이 가능할 것이다.

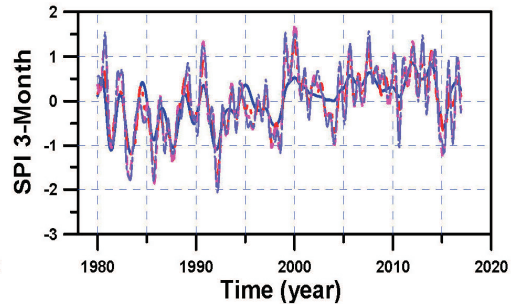
표 4.1. Percentage of eigenvalues with total variance for different indices (Embedding dimension: 120, $\tau=1$)

Variables		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-120
(%)	SPI-1M	6.0	4.5	4.0	3.6	3.4	3.3	75.2
	SPI-3M	14.5	9.0	7.5	7.1	6.2	5.4	50.3
	SPI-6M	23.0	12.8	10.7	9.3	6.8	5.9	31.5
	SPI-9M	30.9	14.8	13.7	10.9	7.3	5.3	17.0
	SPI-12M	37.7	17.4	13.7	10.0	7.0	4.2	10.0
	SPI-24M	59.9	23.1	8.9	3.4	0.9	0.6	3.2
	SOI	15.7	14.0	11.8	8.9	6.4	4.6	38.6

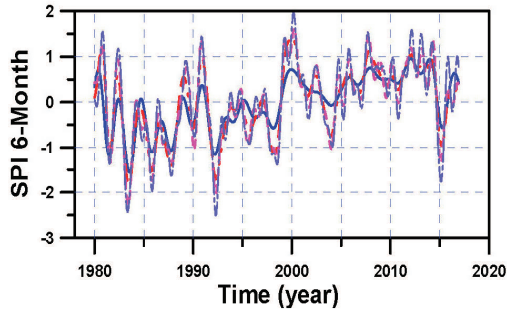
(a) RCs-SPI 1Month



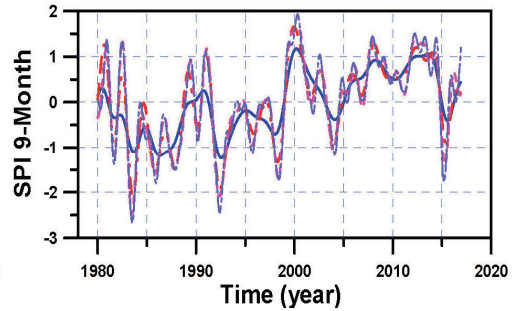
(b) RCs-SPI 3Month



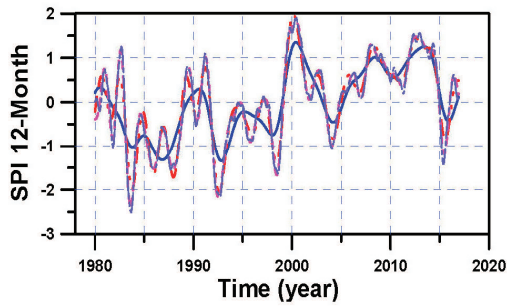
(c) RCs-SPI 6Month



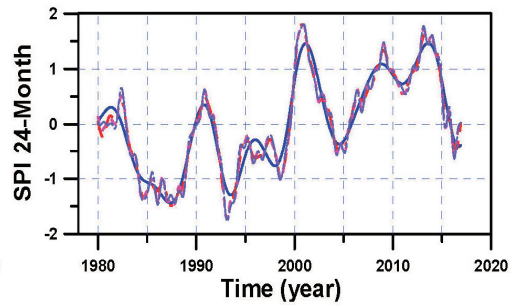
(d) RCs-SPI 9Month



(e) RCs-SPI 12Month



(f) RCs-SPI 24Month



(g) RCs-SOI

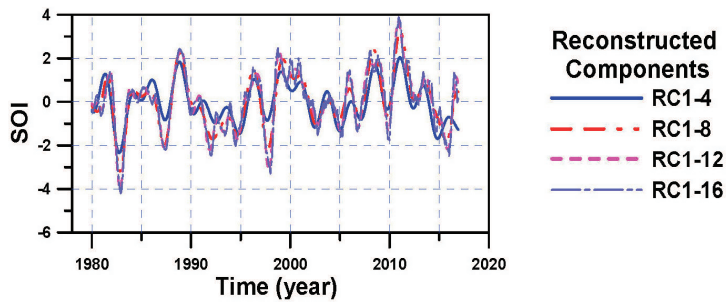
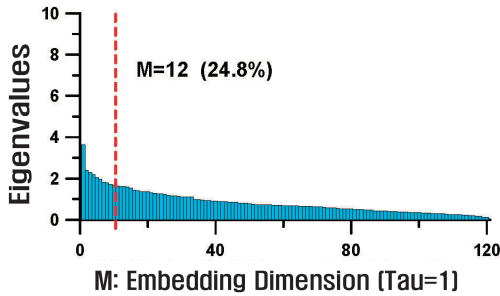
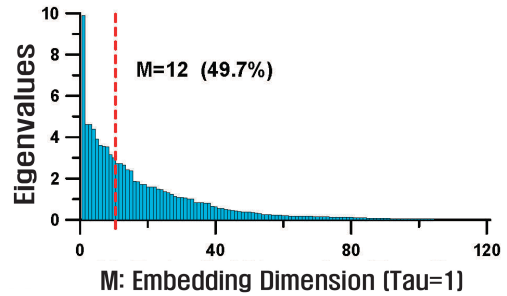


그림 4.10. Time series of reconstructed components for SPIs and SOI using SSA

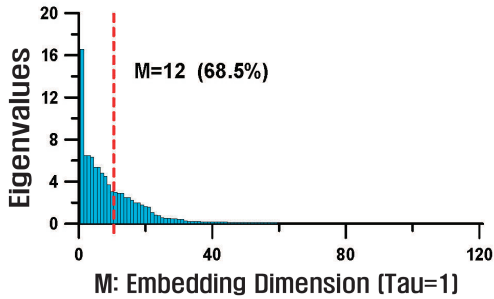
(a) EOF-SPI 1Month



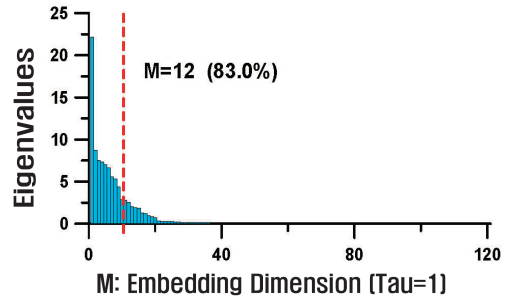
(b) EOF-SPI 3Month



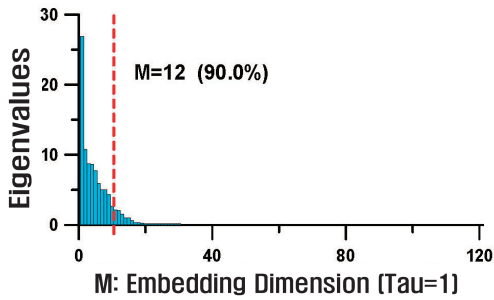
(c) EOF-SPI 6Month



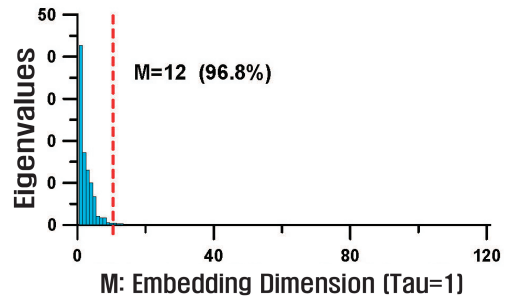
(d) EOF-SPI 9Month



(e) EOF-SPI 12Month



(f) EOF-SPI 24Month



(g) EOF-SOI

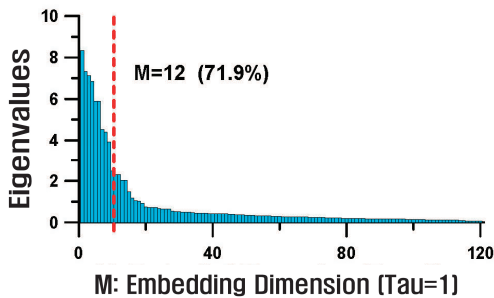


그림 4.11. Eigenvalues for SPIs and SOI indices with 120 embedding dimensions and $\tau=1$ sampling ratio

4.1.6 통가타푸섬 지하수 함양량 분석

통가타푸섬의 관측강수량 자료와 기온자료, 그리고 토양 및 토지피복 상태 조건에 따른 연간 지하수 함양량을 분석한 결과 연평균 지하수 함양률은 0.30으로 분석되었다. 통가타푸섬의 면적은 259km²이며, 누쿠알로파 기상관측 지점의 관측(1945년~2016년) 연평균 강수량은 1,837.7mm이다. 따라서, WATBAL 모형을 통하여 산정된 지하수 함양률은 30%이므로, 연간 총 지하수 함양량은 141,584,597 ton으로 추정된다. 다음 그림 4.12는 통가타푸섬의 관측기간 동안의 연강수량과 지하수함양량을 분석한 결과이다.

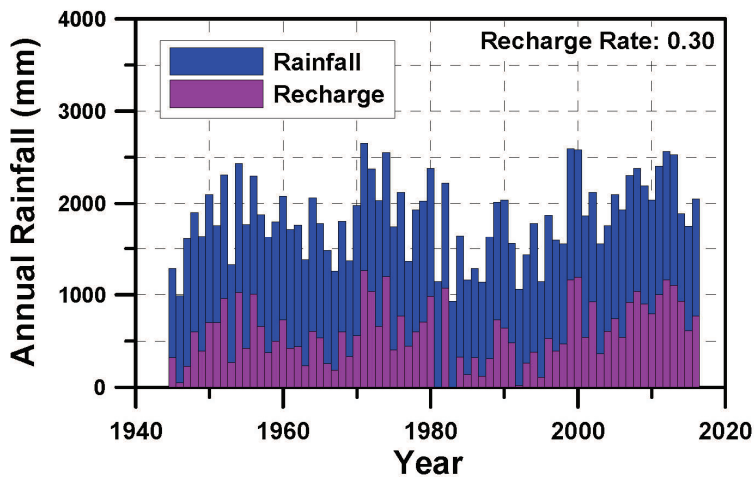


그림 4.12. Annual rainfall and recharge of historical period in Tongatapu island

그림 4.13은 통가타푸섬의 월별 강수량과 WATBAL모형을 통하여 산정한 지하수 함양량곡선식을 나타낸 결과이다. WATBAL모형을 통하여 월별로 추정한 지하수 함양량과 월강수량의 관계를 작성하면, 월강수량이 주어졌을 경우 대략적인 월별 지하수 함양량을 추정할 수 있다. 통가타푸섬의 월강수량과 지하수 함양량 관계를 2차 다항식으로 산정한 결과 상관계수는 0.9097, 결정계수는 0.8969로 나타나 높은 상관성을 보임을 확인하였다. 통가타푸섬 지하수함양량 추정 식은 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = 0.001X^2 + 0.1963X - 18.338 ; \quad (\text{if, } Y < 0, \text{ then } Y = 0) \quad (13)$$

여기서 X 는 월강수량이며, Y 는 지하수 함양량이다(다만 Y 가 0보다 작은 값이 산정될 경우 지하수 함양량 값은 0을 취한다).

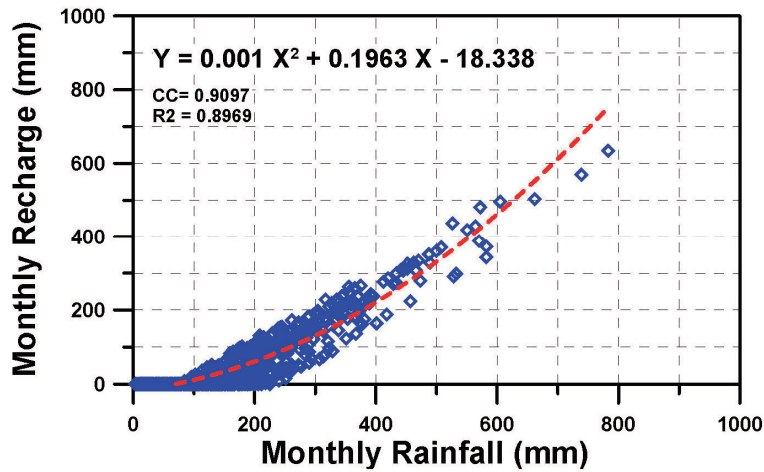
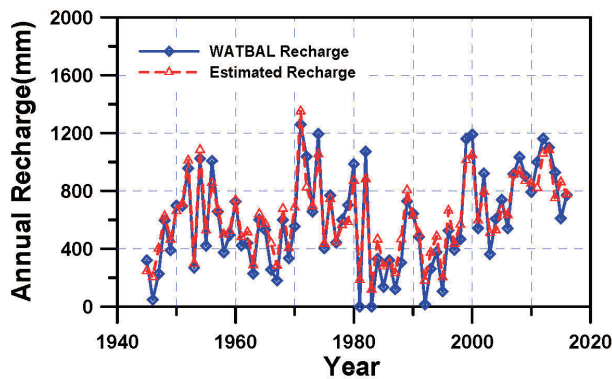


그림 4.13. Relationship between monthly rainfall and monthly recharge in Tongatapu island.

또한 그림 4.14는 월별 지하수 함양량 산정 식으로부터 추정한 연간 지하수 함양량을 WATBAL모형의 결과와 비교하여 나타내었으며, $R^2 = 0.9236$ 의 높은 상관성을 보임을 확인하였다.

(a) Comparison of recharge



(b) Q-Q plot

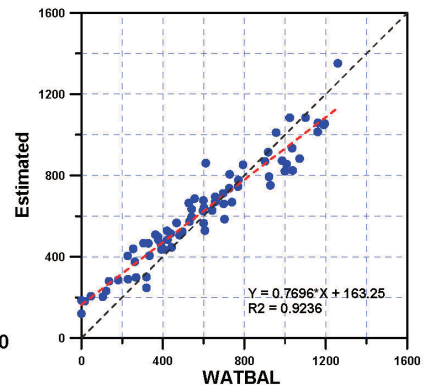


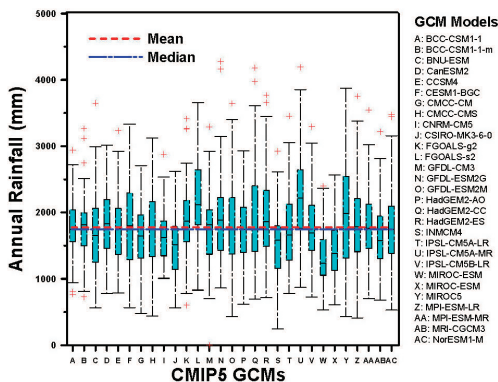
그림 4.14. Comparison of WATBAL recharge and estimated recharge that predicted from equation (13) in Tongatapu island.

4.1.7 기후변화에 따른 통가타푸섬 지하수 함양량 전망 분석

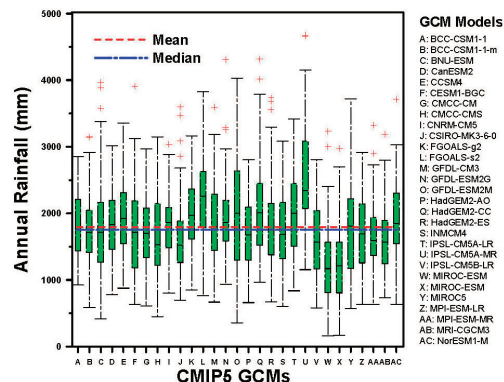
미래 기간에 대한 강수량과 기온 등의 전망을 위하여 다양한 GCMs 모형이 사용되고 있다. 본 연구에서도 통가의 기후변화 영향 분석을 위하여 총 29개의 GCMs모형을 사용

하였다. 본 연구에서는 기후변화에 따른 통가타푸 섬의 지하수 함양량 분석을 위하여 WATBAL 물수지 모형을 사용하였다. WATBAL 모형의 주요 입력변수는 월강수량과 기온이며, 미래 기후변화에 따른 GCMs 모형별 2010년부터 2099까지의 강수량과 기온 전망 자료를 사용하였다. 통가타푸섬 미래 지하수 함양량 전망 분석을 위하여 사용된 GCMs 모형은 총 29개이며, RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에 대하여 지하수 함양량 전망 분석을 수행하였다(그림 4.15). 분석결과 29개 GCMs 모형별 미래전망 강수량의 평균과 중앙값은 비슷하게 나타났으나, 그 변동 폭은 RCP8.5 시나리오에서 더 크게 발생하고 있음을 확인하였다. 또한 지하수 함양을 분석결과 전체적인 지하수 함양량과 평균값이 RCP8.5 시나리오에서 크게 발생한 것으로 분석되었다.

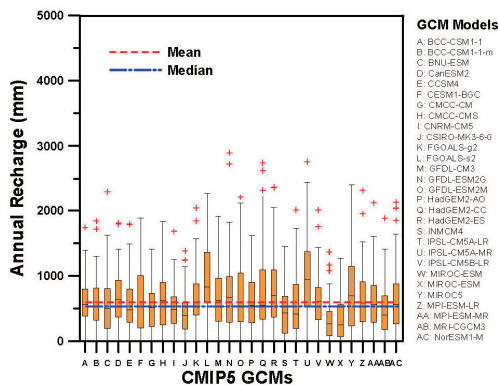
(a) RCP4.5: Rainfall



(b) RCP8.5: Rainfall



(c) RCP4.5: Recharge



(d) RCP8.5: Recharge

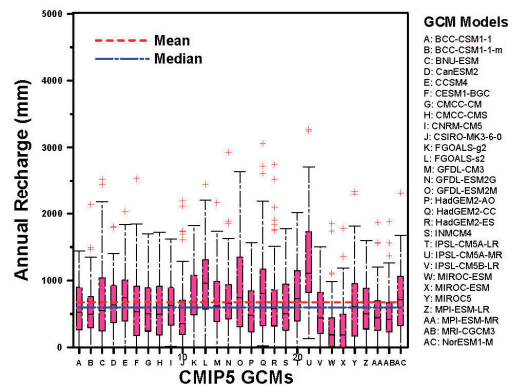


그림 4.15. Annual rainfall and recharge on RCP4.5 and RCP8.5 under climate change based on different CMIP5 GCMs in Tongatapu island

기후변화 전망 관점에서는 검증된 수많은 GCMs 모형들을 모두 적용하여 그 불확실성을 평가하고 통계적인 값을 제시하는 일이 중요하겠지만, 실제로 기후모형의 결과를 응용 분야에 활용하기 위해서는 정량적인 전망치 혹은 최적 모형의 선정이 필요하다. 따라서 통계적인 스코어링 방법을 통하여 강수량 산출물에 대한 과거 관측기간 동안에 GCMs 모형들의 모의능력을 평가하고 해당 연구 지역에 적합한 GCM을 식별하게 된다. 통계적 스코어링 방법은 정량적인 강수량 모의의 정확도 검증과 시간에 따른 강수량 변동 모의 결과를 신뢰할 수 있는 두 가지 정도의 방법을 선정할 수 있다. 본 연구에서는 첫 번째로, GCMs 모형의 정량적인 강수량 모의의 정확도 평가를 위해 Skill 점수(Skill Score)를 사용하였다. 이는 두 데이터 세트의 확률 밀도 함수(Probability Density Function : PDF)의 정량적인 상관관계를 비교하는 방법이며, 값이 클수록 우수한 모형이라 평가할 수 있다. Skill 점수의 산정 식은 다음 식 (14)와 같다(Perkins et al., 2007).

$$S_{score} = \sum_{i=1}^n \text{Min}(P_{mi}, P_{oi}) \quad (14)$$

여기서 P_{mi} 는 GCMs 모형에 의하여 모의된 강수량의 경험적확률밀도함수 값을 의미하며, P_{oi} 는 관측 강수량의 경험적확률밀도함수 값을 의미한다.

두 번째로, 관측과 모의 두 시계열 자료간의 시간에 따른 변동특성 모의의 정확도 확인을 위한 시간 상관 계수(Temporal Correlation Coefficient : TCC)가 사용될 수 있으며, 이 또한 값이 클수록 정확도가 높은 모형이라 평가할 수 있다. 통가는 건기와 우기로 기후대가 구분되며, 이러한 계절규모 기후현상 모의가 우수한 모형일수록 TCC 값이 크게 나타날 것으로 사료된다. TCC는 Pearson's Correlation Coefficient를 이용하여 계산하며, 동일 변량에 대한 관측과 예측을 비교한 경우 1에 가까울수록 높은 예측성을 보임을 의미한다. TCC의 계산식은 다음 식 (15)~(18)과 같다.

$$TCC = \frac{\text{cov}(F, O)}{S_F S_O} \quad (15)$$

$$\text{cov} = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O}) \quad (16)$$

$$S_F = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - \bar{F})^2} \quad (17)$$

$$S_O = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (18)$$

여기서, cov 는 공분산, S_O 는 관측값의 표준편차, S_F 는 예측값의 표준편차를 의미한다. 또한 O_i 는 관측값, F_i 는 예측값을 의미하며, $\bar{O}$ 는 관측값의 평균, $\bar{F}$ 는 예측값의 평균, n 은 총 관측 및 예측 횟수를 의미한다.

위에 기술된 두 지표(Skill Score, TCC)를 관측기간(1976-2005)에 대하여 관측강수량 자료와 GCMs 모의 결과를 건기(5월에서 10월)와 우기(11월에서 이듬해 4월)로 구분하여 비교한 후, 각 지표의 점수가 높은 상위 4개 모델을 선택하였다. 선택된 모델과 점수는 표 4.2와 같다.

표 4.2. Selected GCMs

Season	Models	Institute	TCC	Skill Score
Dry Season (May–October)	MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology	0.465	0.686
	GFDL-ESM2M	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	0.440	0.681
Wet Season (November–April)	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques	0.439	0.778
	HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre	0.433	0.764

기후모형별 Skill Score와 TCC를 이용하여 선정된 모형은 건기에는 MPI-ESM-MR 모형과 GFDL-ESM2M 모형이 선정되었으며, 우기에 적합한 모형은 CNRM-CM5 모형과 HadGEM2-CC모형이 선정되었다. 4개의 기후모형으로부터 전망된 2010년부터 2099년까지 90년간의 강수량과 기온자료를 바탕으로 통가타푸섬의 지하수 함양량 전망을 실시하였다. 그림 4.16과 그림 4.17은 통가타푸섬 건기에 적합한 기후모형으로 선정된 MPI-ESM-MR 모형과 GFDL-ESM2M모형에 의한 지하수 함양량 전망 결과이다. MPI-ESM-MR모형은 RCP4.5/8.5시나리오에서 각각 지하수함양율은 0.30과 0.27로 분석되었다. 또한 GFDL-ESM2M 모형에 의한 지하수 함양율을 분석한 결과 RCP4.5/8.5 시나리오에서 각각 0.34와 0.36로 분석되었다. 따라서 MPI-ESM-MR 모형 전망결과에 의하면 건기에 통가타푸섬 지역의 지하수 함양량이 현재보다 낮아지므로 수자원확보에 어려움이 있어 가뭄에 취약할 것으로 전망된다.

그림 4.18과 그림 4.19는 통가타푸섬 건기에 적합한 기후모형으로 선정된 CNRM-CM5 모형과 HadGEM2-CC모형에 의한 지하수 함양량 전망 결과이다. 통가타푸섬의 우기에 적합한 모형으로 선정된 CNRM-CM5 모형 결과를 활용한 지하수 함양량을 분석한 결과 RCP4.5/8.5시나리오에서 각각 지하수함양율은 0.29와 0.32로 분석되었다. 또한 HadGEM2-CC 모형에 의한 지하수 함양율을 분석한 결과 RCP4.5/8.5시나리오에서 각각 0.34와 0.37로 분석되었다. 따라서 HadGEM2-CC 모형 전망결과에 의하면 우기에 통가타푸섬 지역의 지하수 함양량이 현재보다 높아지므로 수자원확보에는 큰 어려움이 없을 것으로 전망되나, 지하수 함양량의 연간 변동성은 현재보다 큰 것으로 나타나 장기간에 걸친 가뭄에 대비할 필요성이 있을 것으로 전망된다.

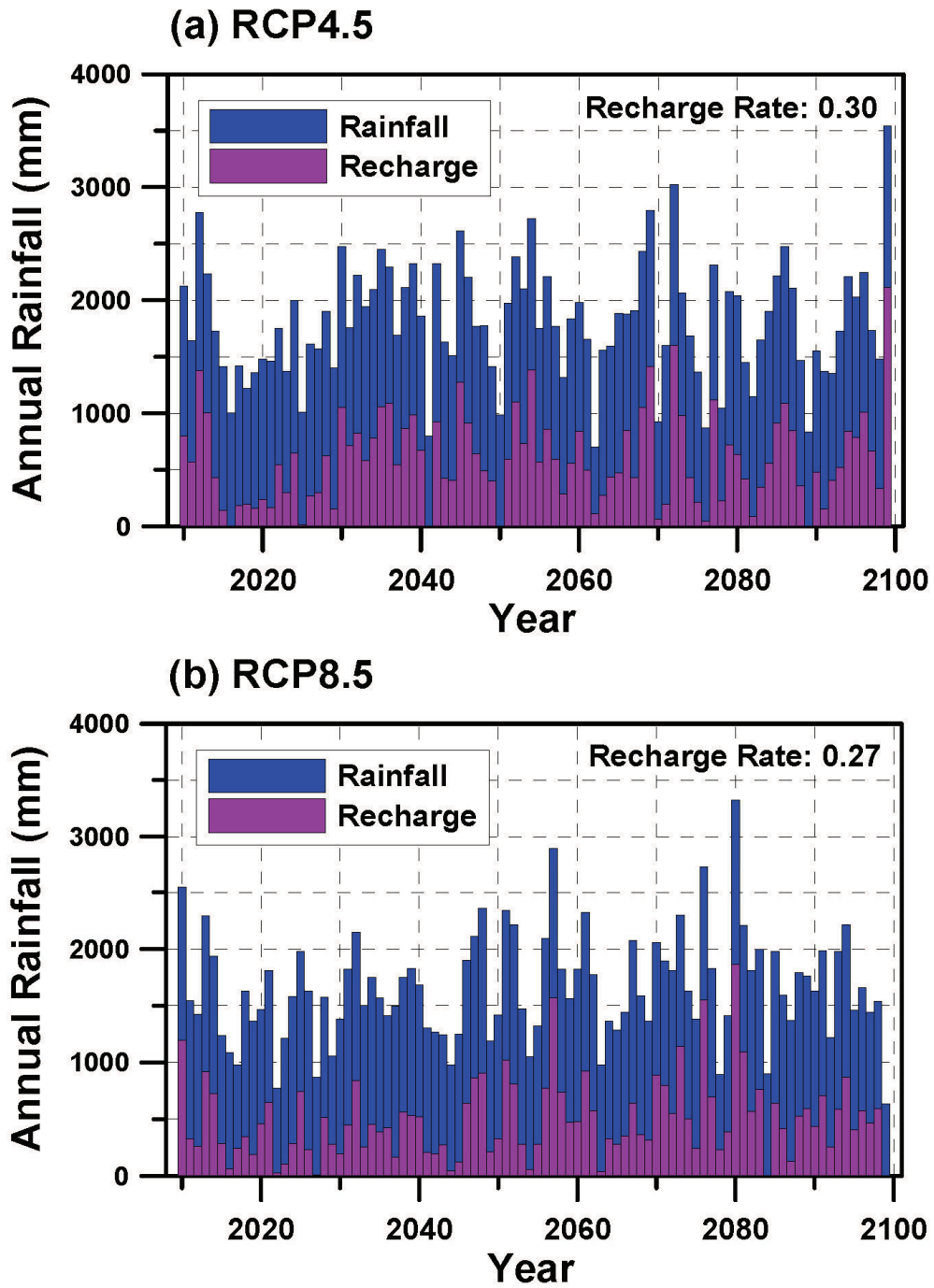


그림 4.16. Prediction of groundwater recharge by MPI-ESM-MR model

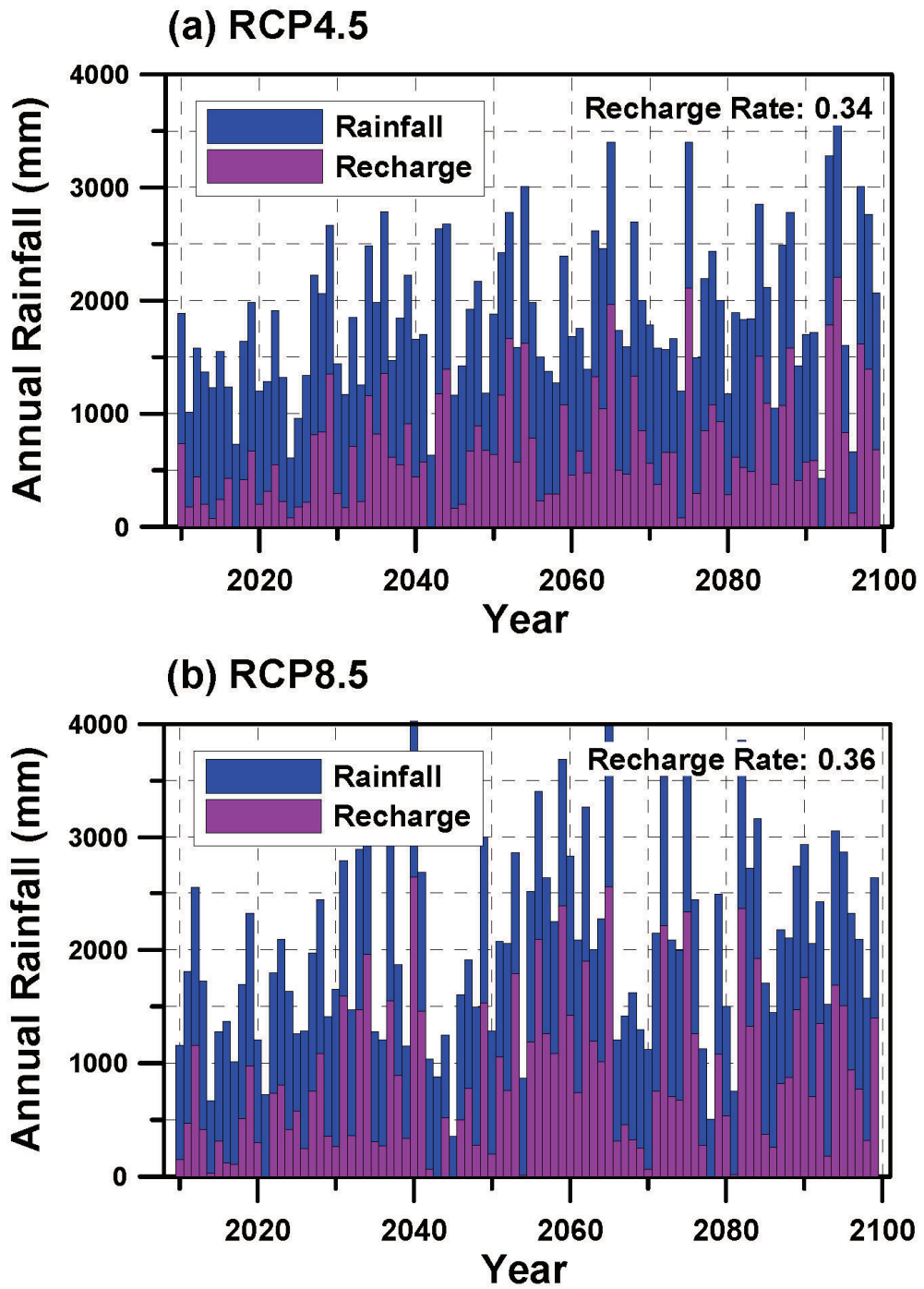


그림 4.17. Prediction of groundwater recharge by GFDL-ESM2M model

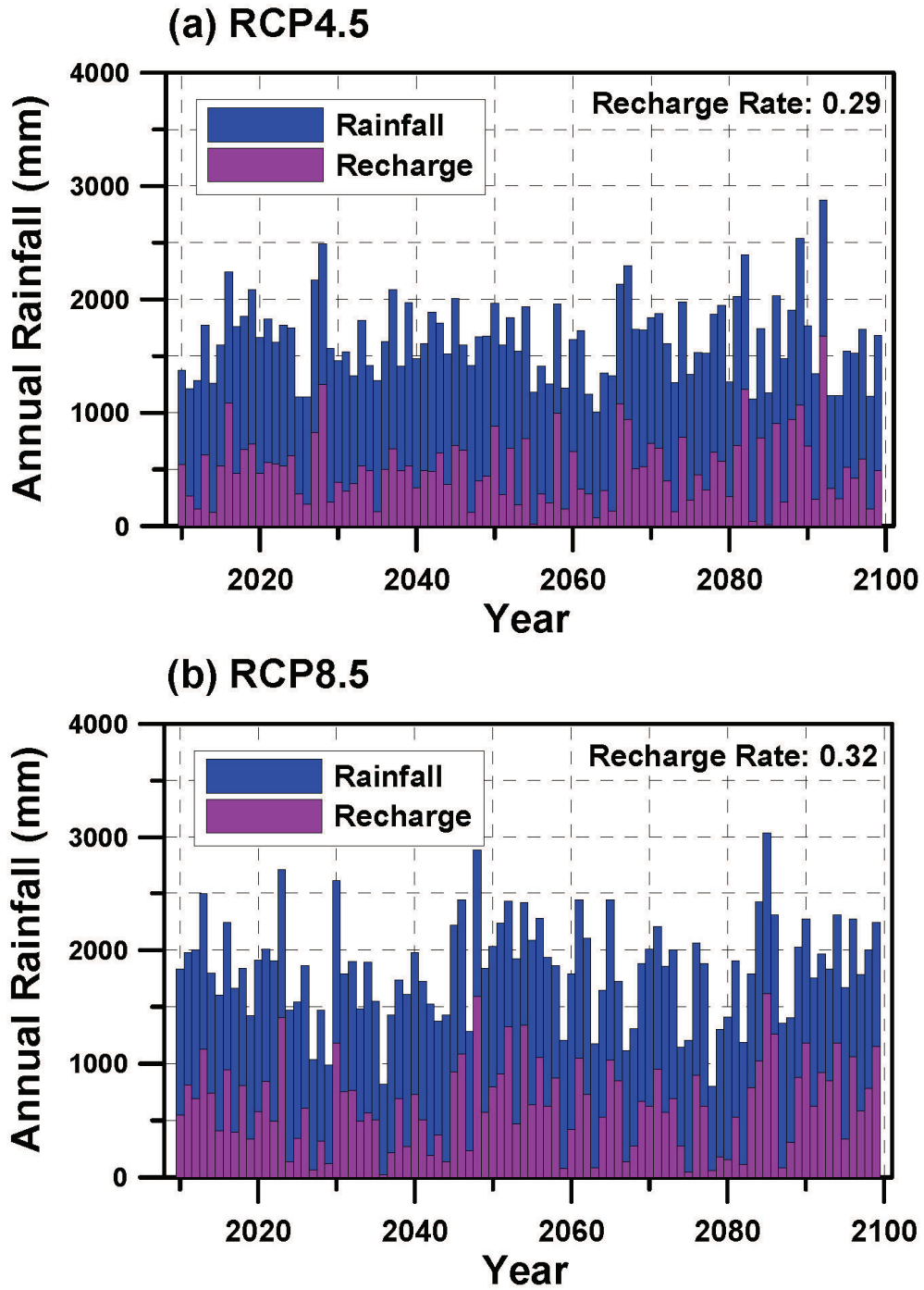


그림 4.18. Prediction of groundwater recharge by CNRM-CM5 model

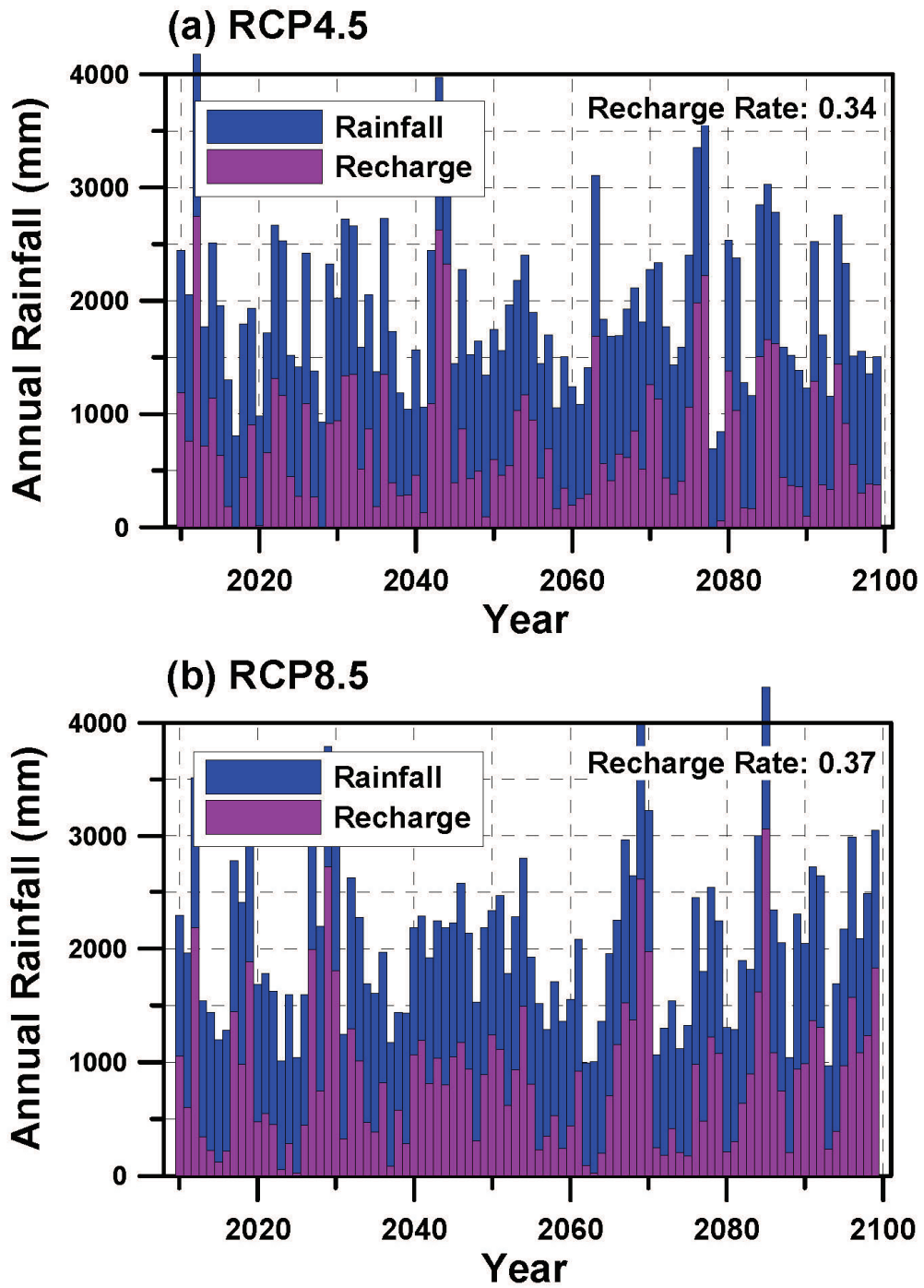


그림 4.19. Prediction of groundwater recharge by HadGEM2-CC model

4.2 농업 분야

4.2.1 토양수분함량 관측 및 모니터링

4.1.1.1 통가 토양수분 관측지점

토양수분 관측자료 수집 및 현지인 교육



그림 4.20. 통가 농촌지도사에 대한 토양수분 관측 데이터 수집 교육 및 현장 실습

통가타푸섬 연구 대상 농장에 설치된 토양수분 센서는 WatchDog사에서 제공하는 전용 제어 프로그램(SpecWare)을 통해 매시간 데이터 로거에 기록 되도록 설정되어 있으며 매월 1일 정기적으로 다운로드 받기 위해 현지 통가 농림부 소속의 농촌지도사에 게 간단한 사용자 매뉴얼을 제공하고 그림 4.20와 같이 자료 수집 방법에 대한 교육과 현장 실습을 실시하였다. 매월 현지 농촌지도사로부터 수집된 대상 농장별 토양수분 관측 데이터는 통가 농림부로부터 전자메일을 통해 APCC에 전달되어진다.

Vaini Farm 토양수분 관측자료 분석

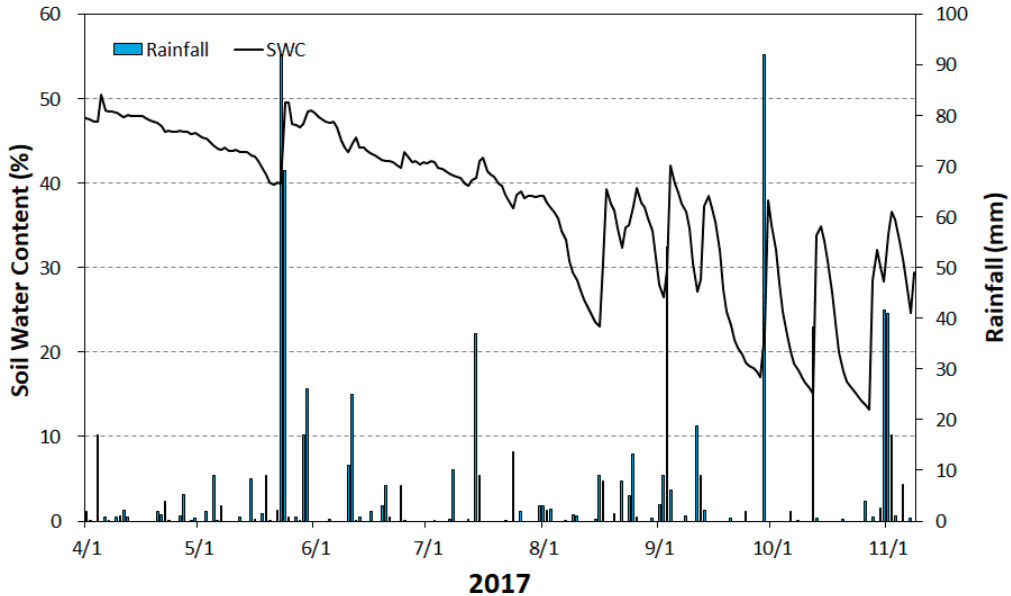


그림 4.21. Vaini Farm 토양수분함량 관측 자료와 통가 기상청 강우 관측 자료

Vaini Farm의 Taro 재배지역에 설치된 토양수분센서의 관측자료를 분석한 결과 그림 4.21과 같이 강우 발생 정도에 따라 토양수분함량이 변동하는 것을 확인 할 수 있다. 강우량 자료는 ToCSA 시스템을 통해 제공되는 Fuaamotu & Eua 지점의 자료가 분석에 이용되었다. 4월 4일에 발생한 17mm 강우의 영향으로 토양수분함량은 50.5%까지 증가했으며 그 후로도 강우가 발생했으나 5월 23일 92mm의 비교적 큰 강우가 오기 전까지 대부분 10mm 이하에 그치고 있어 토양수분함량은 지속적으로 감소해 39.8%까지 떨어지는 것으로 나타났다. 또한 2차 통가 방문 시기인 8월 3일 경 센서로부터 데이터를 다운로드 받으면서 케이블을 다시 연결하였는데 그 후로 토양수분함량의 관측 값의 변동성이 커지고 있는 것으로 나타났다. 토양수분함량 검증용 센서를 이용해 관측되고 있는 토양수분함량의 값에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 강우발생 시기와 토양수분함량 증가 시기를 보면 대체로 강우발생 다음날 토양수분함량이 증가하는 것으로 나타나고 있는데 이는 강우가 토양수분함량 증가에 미치는 지연시간 때문인 것으로 파악된다. Vaini Farm의 토양수분포텐셜(SWP) 관측 결과를 분석해보면 설치된 후 센서가 안정을 찾는 데까지 시간이 걸렸으며 4월 13일경부터 센서가 토양수분에 반응하기 시작

했고 5월 22일까지는 토양수분함량(SWC)이 감소할수록 증가하는 경향을 나타냈으나 5월 23일 92mm의 강우가 내린 이후 어떤 물리적인 영향으로 인해 센서가 데이터 로거에서 이탈되어 관측이 중단되었다. 그림 4.22는 센서가 안정되고 난 8월 5일부터 11월 8일까지의 SWC와 SWP의 변동을 나타내고 있다. 그림 4.23은 8월 5일부터 11월 8일까지 Vaini Farm의 Taro 재배 토양에 대한 SWC와 SWP의 분포를 나타낸 것으로 왼쪽 그래프는 시간 단위 자료를 나타내며 오른쪽 그래프는 일 단위 자료를 나타낸다. 일 단위 그래프의 경우 SWC와 SWP 사이의 상관관계를 분석한 결과 $R^2=0.91$ 의 상관을 나타내고 있다. 비록 관측된 기간이 길지 않아 보다 정확한 분석이 이루어졌다고 볼 수는 없지만 SWC가 감소할수록 SWP가 증가하는 특성은 명확히 보여주고 있다. 이 지점에 대해서는 센서 정비를 통해 추가적으로 분석이 이루어질 계획이다.

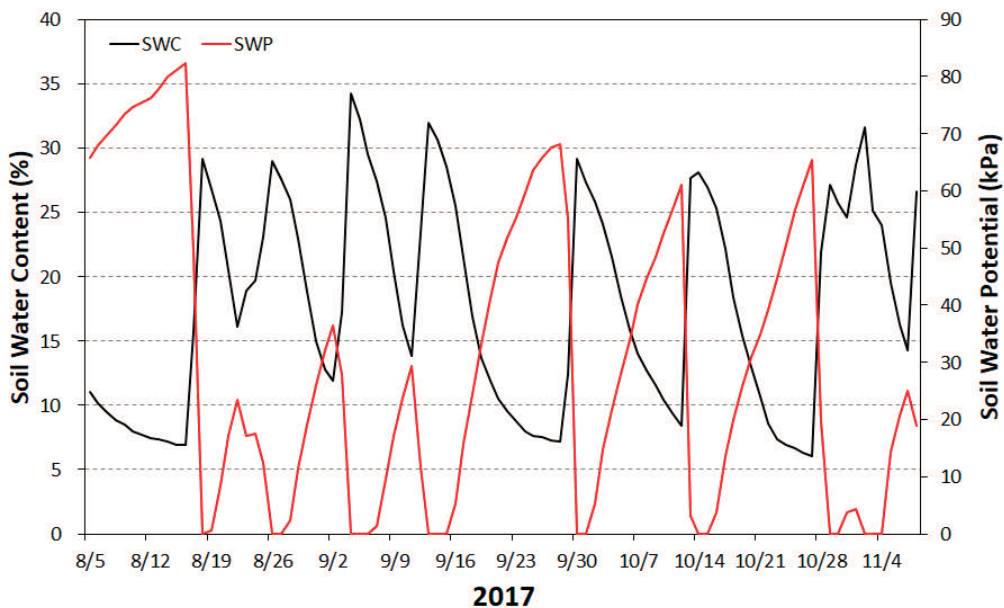


그림 4.22. Vaini Farm 토양수분함량(SWC) 및 토양수분포텐셜(SWP) 관측 자료

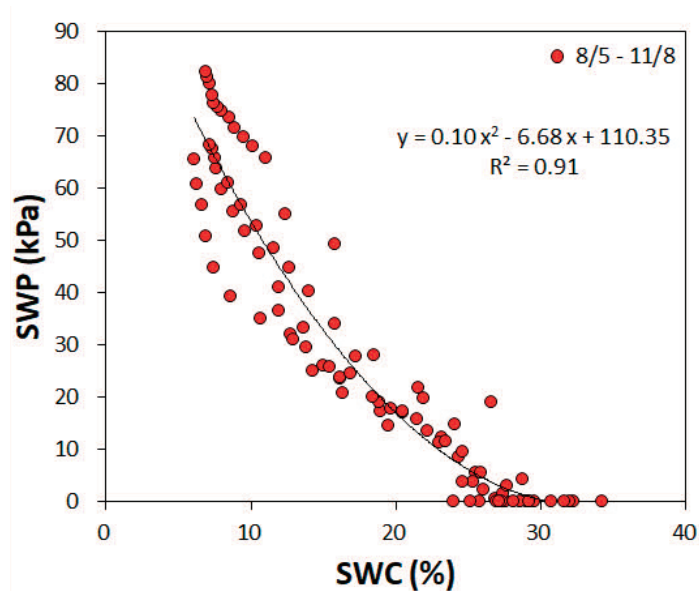


그림 4.23. Vaini Farm 관측 토양수분함량(SWC)과 토양수분포텐셜(SWP) 상관관계

Fua'amotu Farm 토양수분 관측자료 분석

Fua'amotu Farm의 Vanilla 재배지역에 설치된 SWC 관측자료와 강우 관측자료를 분석한 결과 강우 발생 정도에 따른 토양수분함량의 반응이 그림 4.24와 같이 나타났다. 강우량 자료는 Vaini Farm의 자료 분석에서도 이용된 Fua'amotu & Eua 지점의 자료가 이용되었다. 4월 4일에 발생한 17mm 강우의 영향으로 토양수분함량은 53.0%까지 증가했으며 이후 토양수분함량은 지속적으로 감소해 35.5%까지 떨어지는 것으로 나타나 같은 기간 Fua'amotu Farm에서 토양수분함량 감소가 크게 발생했다. 또한 5월 23일 92mm 강우로 인해 증가한 토양수분함량은 이후로도 20mm 이상의 강우로 인해 심각하게 감소하지는 않고 있다. 그림 4.25는 4월 1일부터 8월 3일까지 관측된 SWC와 SWP의 변동을 나타낸 것으로 강우로 인해 SWC가 51% 이상으로 증가할 경우 SWP는 0 kPa이 되고 SWC가 35%에 가깝게 감소할 경우 SWP는 160 kPa을 초과하는 것으로 나타났다. 센서의 Product manual에서는 통가타푸섬의 토양과 같이 점토질 성분이 높은 토양에 대해 60-100 kPa 범위의 관개권장 범위를 제시하고 있다. 적절한 관개시기를 제안하기 위해서는 시험재배를 통해 재배지역에 대한 토양특성 및 작물종류, 작물생육시기 등을 고려해야한다. 그림 4.26은 4월 1일부터 9월 4일까지 Fua'amotu Farm의

토양에 대한 SWC와 SWP의 분포를 나타낸다. SWC와 SWP 사이의 상관관계를 분석한 결과 일 단위 그래프의 경우 $R^2=0.95$ 의 상관을 나타내고 있다. Fua'amotu Farm에 대해 관개개시 시점을 80 kPa로 설정한다면 이때의 토양수분함량은 42.5%가 된다.

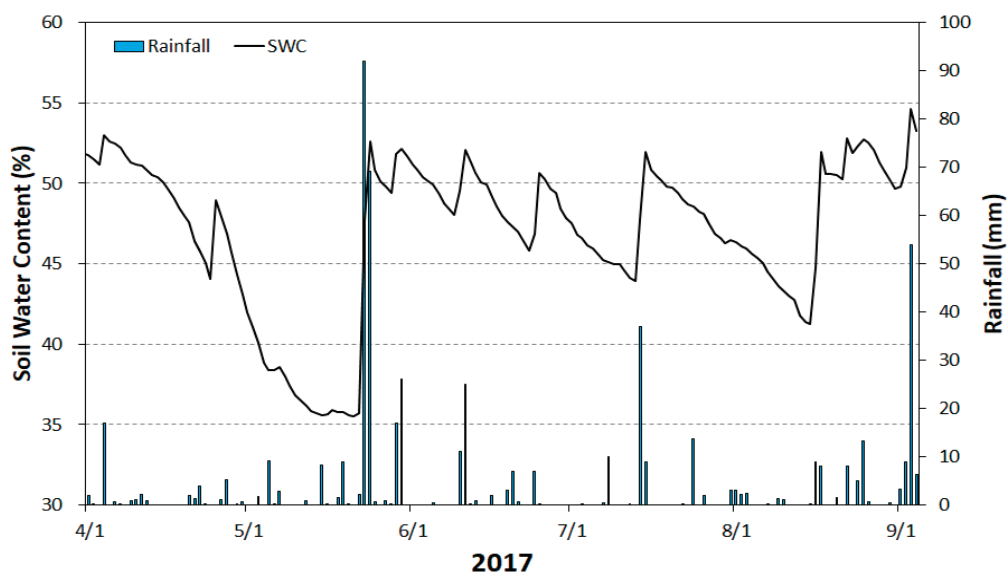


그림 4.24. Fua'amotu Farm 토양수분함량 관측 자료와 통가 기상청 강우 관측 자료

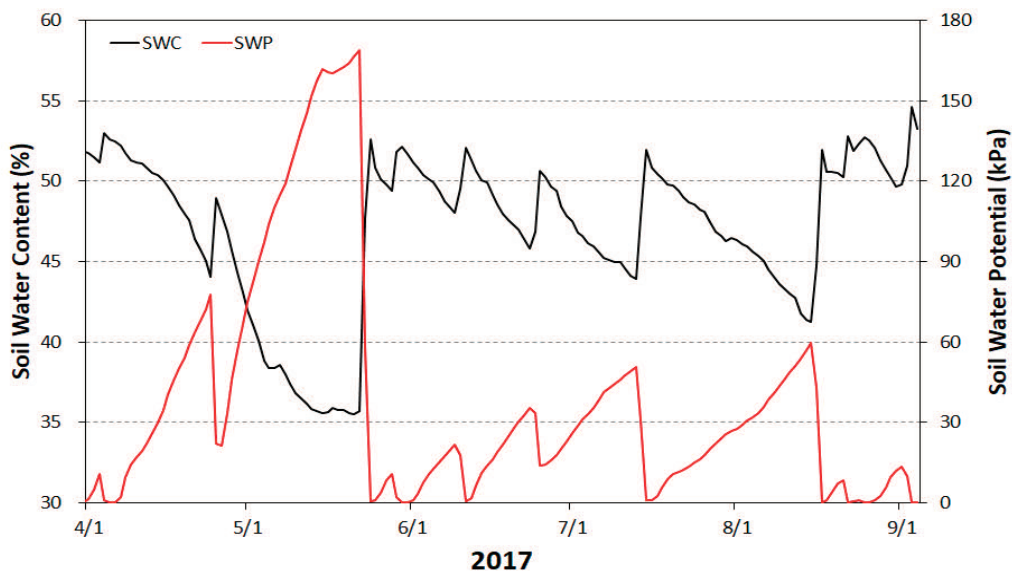


그림 4.25. Fua'amotu Farm 토양수분함량(SWC) 및 토양수분포텐셜(SWP) 관측 자료

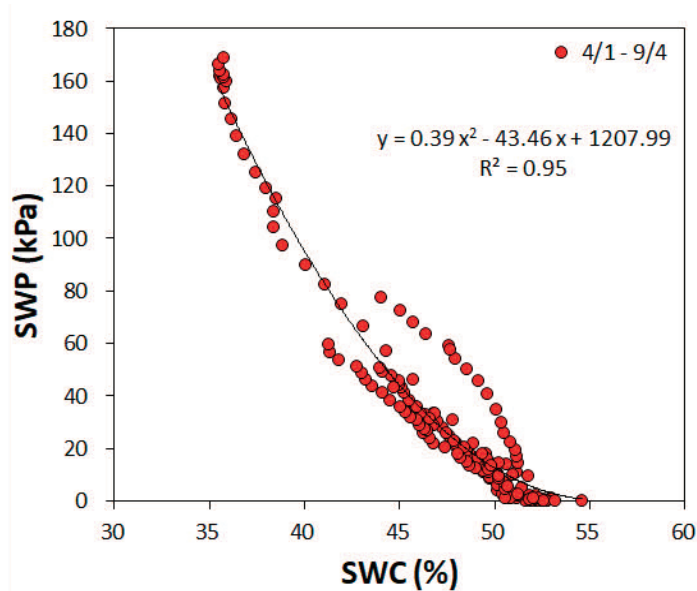


그림 4.26. Fua'amotu Farm 관측 토양수분함량(SWC)과 토양수분포텐셜(SWP) 상관관계

Nishi Farm 토양수분 관측자료 분석

Nishi Farm의 AWS 관측 부지에 그림 4.27과 같이 설치한 토양수분센서는 설치 당일 주변 동물에 의해 케이블이 손상되어 데이터 수집이 불가능했다. 데이터 로거로부터 다운로드 받은 관측 데이터를 분석해 본 결과 3월 7일 13시부터 정상적으로 데이터가 수집되기 시작했으나 19시를 기점으로 모든 센서의 데이터가 기록되지 않은 것으로 나타나 이 시간에 주변 동물에 의해 케이블이 손상된 것으로 파악된다. 토양수분 센서를 설치하면서 케이블을 보호할 수 있도록 차단막을 설치했어야 했으나 설치당시 이러한 문제점을 고려하지 못했다. Nishi Farm 지점에 대해서는 2차년도(2018년)에 다른 추가 3개 지점과 함께 센서를 다시 설치할 계획이다.



그림 4.27. Nishi Farm의 토양수분센서 설치 전경과 케이블 손상 상태

4.2.2 토양 특성 정보 분석

4.2.2.1 토양 물리적 특성

통가타푸섬 대표적 토양의 물리적 특성

통가타푸섬의 6개 지역에 대해 토양 샘플링을 실시하고 국내 토양분석 전문기관에 토양의 물리적 특성 분석을 의뢰하였다. 통가에서 샘플링한 토양을 국내로 반입하기 위해서는 반드시 농림축산검역본부의 허가를 받아야하는데 수입금지품목 반입허가서와 밀봉스티커를 통가 정부에 우편으로 전달하는 과정에서 시간이 약 1개월 소요되고 통가로부터 밀봉된 토양을 전달 받고 검역원의 입회하에 개봉하기까지 약 3주 정도의 시간이 소요되었다. 그림 4.28은 토양의 입도분석 시험기기 및 입도분석 시험을 위한 토양 샘플 준비 과정을 나타내고 있다. 전반적으로 Clay 성분을 많이 포함하고 있는 통가 토양의 경우 건조되면서 딱딱하게 굳어버려 토양 알갱이가 모래와 같이 큰 입자를 구성하고 있어 초음파 진동기를 이용해 응고되어 있는 토양을 원래 성질로 되돌려야만 한다. 기존의 입도분석 방법에서는 에탄올과 같은 용액을 넣어 응고된 토양을 분리시켰으나 초음파 진동기를 이용했을 때 보다 분리되는 정도가 약하여 실제로는 Silt 또는 Clay 성분인 토양이 Sand 질의 토양으로 분석되는 경우가 발생했을 것으로 판단된다.



그림 4.28. 토양에 대한 입도분석 시험

표 4.3. 통가타푸섬 대표 토양에 대한 기존 토성분석 결과(Gibbs, 1976)

Soil type	Soil depth (cm)	Soil Texture (%)		
		Sand	Silt	Clay
Vaini clay	13-28	20.0	21.7	58.3
Lapaha clay	13-30	12.0	7.4	80.6

표 4.4. 입도분석기를 이용한 통가타푸섬 토양에 대한 토성분석 결과

Soil type	Soil depth (cm)	Soil Texture (%)		
		Sand	Silt	Clay
Vaini	10-15	0.8	46.7	52.5
Fuaamotu	10-15	0.6	43.3	56.1
Utulau	10-15	0	41.7	58.3
Alaki	10-15	0.2	49.4	50.4
Niutoua	10-15	0.9	46.1	53
Kolovai	10-15	1.7	45.3	53

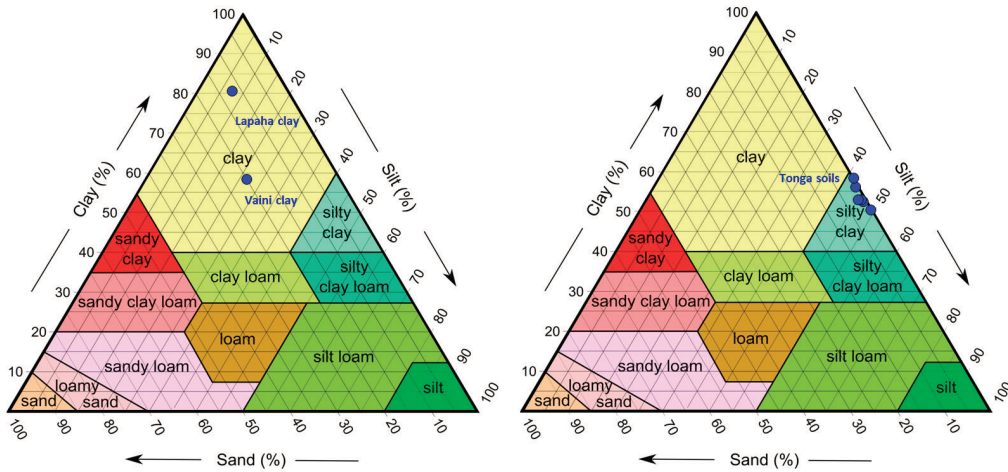


그림 4.29. 토양삼각도에 의한 통가타푸섬 대표적 토양의 토성(Soil texture)
기존 토성분석(왼쪽), 입도분석기 결과(오른쪽)

통가타푸섬 지표층을 구성하고 있는 주요 토양 중에는 Vaini clay와 Lapaha clay가 있으며 Vaini clay는 통가타푸섬의 동쪽과 서쪽에 넓게 분포되어 있고 Lapaha clay는 통가타푸섬의 중앙에 분포되어 있다(그림 2.10 참조). Vaini clay와 Lapaha clay에 대한 물리적 특성 분석 결과는 Gibbs(1976)의 보고서에 정리되어 있으며 본 연구에서는 표 4.3과 같이 약 20cm의 깊이에 해당하는 토양에 대한 Sand, Silt, Clay의 비율 정보를 정리하였다. Vaini clay 토양의 경우 Sand: 20.0%, Silt: 21.7%, Clay: 58.3%의 비율로 나타났으며 Lapaha clay 토양의 경우 Sand: 12.0%, Silt: 7.4%, Clay: 80.6%의 비율로 나타났다. 이 결과를 미국농부성의 토양삼각도법으로 분류해본 결과 그림 4.29의 왼쪽 토양삼각도와 같이 두 토양 모두 'Clay' 토양에 해당하지만 Lapaha clay 토양의 경우 Clay 성질이 더욱 강한 것으로 나타났다. 샘플링 한 토양을 입도분석기를 이용해 분석한 결과 Gibbs(1976)의 분석 결과와 차이를 보이는 것으로 나타나는데 이는 초음파 진동기를 이용해 샘플링 토양을 보다 잘 분해할 수 있어 입도분석기를 이용한 시험에서 Sand 성분이 적게 나타났다고 판단된다(표 4.4). 입도분석기에 의한 시험 결과 통가 6개 지점 토양의 토성은 모두 Silty clay로 나타났다(그림 4.29의 오른쪽 토양삼각도).

4.2.2.2 토양 수리학적 매개변수

통가타푸섬 대표적 토양의 수리학적 매개변수

통가타푸섬 대표적 토양(Vaini clay, Lapaha clay)과 6개 샘플링 토양에 대한 토양 물리적 특성 정보(Sand, Silt, Clay 비율)를 바탕으로 ROSETTA 모형을 통해 토양의 수리학적 매개변수를 추정한 결과 표 4.5와 같이 추정되었다. 통가타푸섬의 토양은 대부분 Clay 질의 토양성분이 많이 함유되어 있어 Vaini clay와 Lapaha clay 토양의 경우 포화수분 함량은 각각 $0.484(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 와 $0.497(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 로 비교적 크게 나타나고 있는 반면 포화수리전도도는 각각 $18.652(\text{cm}/\text{day})$ 와 $16.665(\text{cm}/\text{day})$ 로 작게 나타나고 있다. Vaini 지역의 샘플링 토양의 경우 포화수분 함량은 $0.520(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$, 포화수리전도도는 $16.989(\text{cm}/\text{day})$ 로 나타났으며 나머지 5개 지역에 대한 샘플링 토양도 비슷한 값을 나타내고 있다.

표 4.5. 통가타푸섬 대표적 토양에 대한 토양 수리학적 매개변수 추정 결과

Region	Soil hydraulic parameters						
	θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α ($1/\text{cm}$)	n	K_s (cm/day)	K_o (cm/day)	L
Vani clay	0.097	0.484	0.020	1.216	18.652	4.789	-2.353
Lapaha clay	0.102	0.497	0.020	1.150	16.665	3.734	-4.488
Vaini	0.107	0.520	0.015	1.322	16.989	3.559	-1.073
Fuaamotu	0.107	0.523	0.016	1.295	20.594	3781	-1.277
Utulau	0.108	0.525	0.016	1.281	23.014	3.927	-1.407
Alaki	0.107	0.519	0.014	1.342	14.962	3.459	-0.964
Niutoua	0.107	0.520	0.015	1.318	17.508	3.587	-1.100
Kolovai	0.106	0.518	0.015	1.316	18.075	3.577	-1.104

4.2.3 토양수분함량 예측 결과

통가타푸섬을 대표하는 주요 토양(Vaini clay, Lapaha clay)과 토양수분 관측지점(Vaini Farm, Fuaamotu Farm)에 대한 토양수분함량 예측모형을 구축해 시뮬레이션한 결과 20cm 깊이에 해당하는 토양층의 토양수분함량 일별 변동 값이 그림 4.30과 같이 나타났다. 토양수분함량 예측모형에는 기상입력 자료로 ToCSA 시스템에서 제공되

는 Tongatapu & Eua 지점 정보와 Research Station의 기상관측 자료가 이용되며 토지피복 자료로는 Baresoil 정보가 토양특성 자료로는 Vaini clay와 Lapaha clay 그리고 Vaini Farm과 Fuaamotu Farm 토양 각각에 대한 수리학적 매개변수 추정 값이 이용되었다. 각각의 토양수분함량 시뮬레이션 결과는 동일 기상 조건에서 3월 12일부터 8월 3일까지의 기간 동안 Vaini clay에서 평균 40.32%, Lapaha clay에서 평균 43.93%, Vaini Farm에서 평균 40.19%, Fuaamotu Farm에서 평균 41.58%로 차이를 보이며 Clay 질의 토양성분이 가장 많이 함유되어 있는 Lapaha clay 토양에서 토양수분함량이 높게 나타나고 있다. Vaini clay의 경우 토양수분함량의 최고 값은 48.1%로 나타났으며 강우량이 50mm 이상인 3월 21일, 5월 23-24일에 발생했고 토양수분함량의 최저값은 35%로 3월 21일의 큰 강수량 이후 적은 강우의 영향으로 서서히 감소해 5월 15일에 최저값이 발생해 13.1%의 변동 폭을 보였다. Lapaha clay의 경우 토양수분함량의 최고 값은 49.6%로 나타났고 최저값은 39.6%로 나타나 10%의 변동 폭을 보였다.

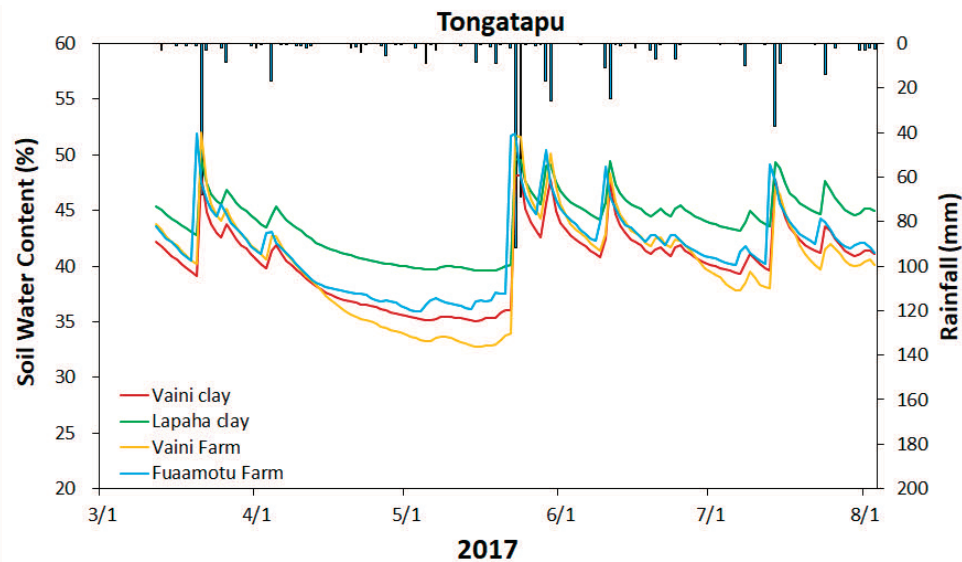


그림 4.30. 통가타푸섬 대표적 토양에 대한 토양수분함량 예측 결과(Baresoil 가정)

통가 농림부에서 운영하고 있는 Vaini Farm은 통가타푸섬 중앙 남쪽에 위치해 있으며 Gibbs(1976)의 보고서에 수록된 토양분포 지도(그림 2.11)에 의하면 Vaini Farm 지역의 토양은 Vaini clay 토양에 속하지만 샘플링 토양에 대한 입도분석 시험 결과

Silty clay에 속한다. Vaini Farm에서 샘플링 한 토양의 물리적 특성 분석 시험 결과를 바탕으로 토양수분함량 예측모형을 구축하였다. 그림 4.31은 Taro가 재배되고 있는 Vaini Farm에서 관측된 토양수분함량과 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 강우 발생에 따른 토양수분함량의 반응을 보면 관측 값이 하루 정도 늦게 반응하는 것을 확인할 수 있는데 이는 토양 중에 설치된 센서까지의 수분 이동 시간이 반영된 것으로 판단된다. 토양수분함량 시뮬레이션 결과 값의 일 변동을 보면 3월 21일에 발생한 68mm의 강우로 인해 토양수분함량이 51.7%로 증가한 후로 3월 26일의 8.5mm, 4월 4일의 17mm 강우에 반응하며 토양수분함량이 일시적으로 증가하는 것으로 나타났으나 5월 14일까지 적은 강우량의 영향으로 토양수분함량이 28.5%까지 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 5월 23일과 24일 이틀 동안 161mm의 강우가 발생함으로 인해 토양수분함량은 다시 51.7%까지 급격히 증가하는 것으로 나타났으며 그 후로도 20mm 이상의 강우에 반응하여 토양수분함량이 10~20% 정도 일시적(5월 30일, 6월 11일, 7월 14일, 9월 3일)으로 증가하지만 강우량이 적으면 바로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과는 Vaini Farm의 토양수분 관측지점의 실제 토양 정보가 아닌 통가타푸섬을 대표하는 Vaini clay의 토양 정보가 이용되고 있어 관측 결과와 차이를 보일 수 있다. 또한 토양수분 센서에 의한 관측 결과도 센서가 설치된 위치 특성(경사, 기복, 주변 식물 등)에 따라 차이를 보이게 된다.

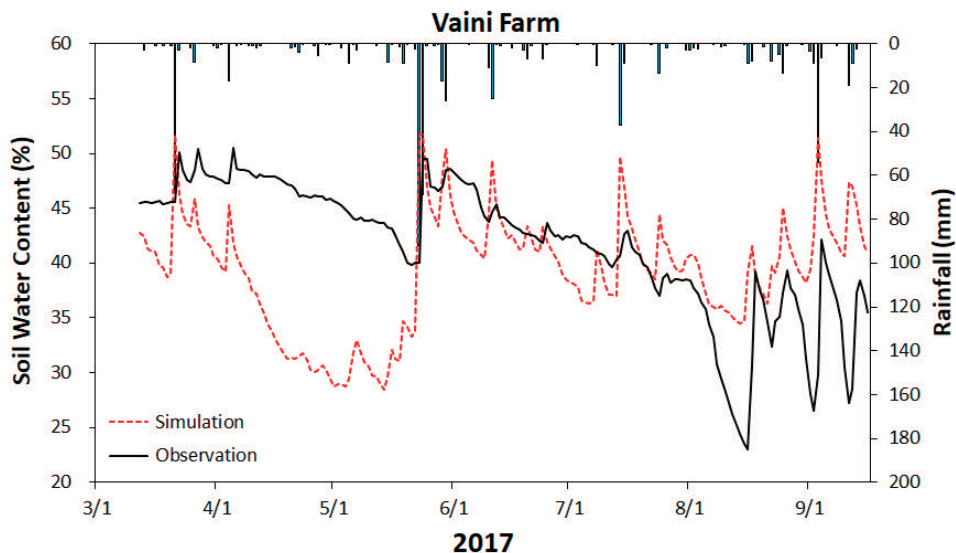


그림 4.31. Vaini Farm에 대한 토양수분함량 관측 및 예측 결과(Taro 재배지역)

통가 농림부 소속의 농촌지도사가 직접 운영하고 있는 Fua'amotu Farm은 통가타푸 섬의 남동쪽에 위치해 있으며 Gibbs(1976)의 토양분포 지도(그림 2.10)에 의하면 Lapaha clay 토양에 속하지만 샘플링 토양에 대한 입도분석 시험 결과 Silty clay에 속한다. 그림 4.32는 Vanilla가 재배되고 있는 Fua'amotu Farm에서 관측된 토양수분 함량과 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 입도분석 시험 결과에서 얻은 토양의 물리적 특성정보를 이용해 토양수분함량을 시뮬레이션 한 결과 관측 값에 비해 전반적으로 낮게 예측되고 있지만 5월 23과 24일 이틀 동안 큰 강우가 발생한 이후에는 상당히 유사한 패턴을 나타내고 있다. Fua'amotu Farm에 대한 토양수분함량 예측모형의 입력 기상자료는 Vaini Farm에 적용된 기상자료와 동일한 자료가 적용되고 있기 때문에 토양수분함량의 패턴 변화에는 큰 차이가 없다. Fua'amotu Farm과 Vaini Farm은 직선거리로 약 8.5km 떨어져 위치해 있기 때문에 일반적인 기상 상황이 크게 차이가 나지 않을 것으로 예상되지만 통가 기상청 관계자의 설명에 의하면 강우량의 경우 지역적 차이가 발생할 수 있으며 통가타푸섬에 대한 보다 정확한 강우량 관측을 위해 통가정부에서는 강우량 관측소를 추가적으로 설치할 계획을 세우고 있다고 한다. 본 연구에서는 통가 기상청장의 도움을 받아 강우량 관측소 설치가 예상되는 지역에 대한 토양 특성 분석을 위해 지난 8월 통가출장에서 토양 샘플링을 실시했다.

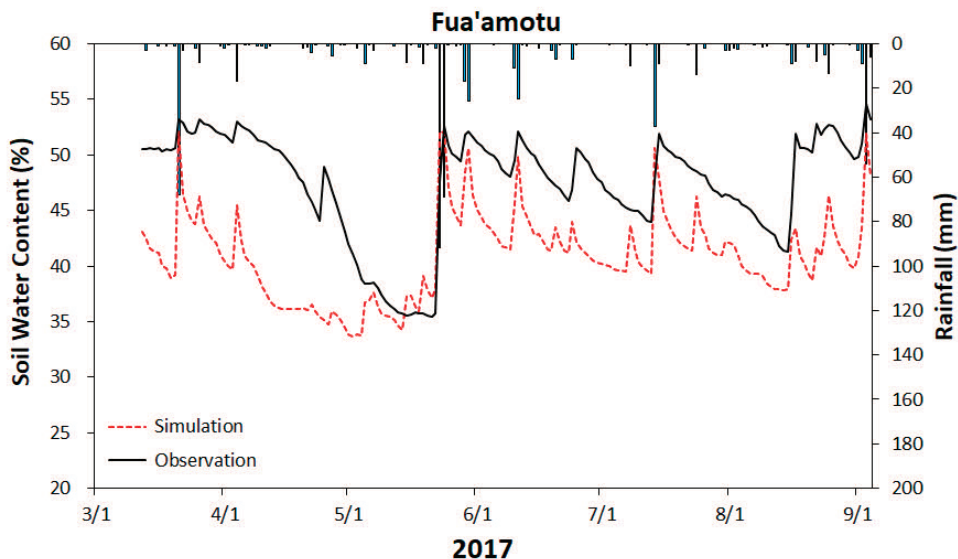


그림 4.32. Fua'amotu Farm에 대한 토양수분함량 관측 및 예측 결과(Vanilla 재배지역)

통가타푸섬에서는 연중 다양한 작물이 재배되고 있으며 토양수분함량의 변동은 어떤 작물을 어떻게 재배하고 있는가에 따라서도 다르게 나타난다. 그림 4.33은 작물 생육정보를 바탕으로 작물재배가 이루어지지 않는 Baresoil 상태와 Taro, Cassava, Yam이 Vaini clay 토양에서 재배된다는 가정 아래 토양수분함량 시뮬레이션을 실시한 결과를 나타내고 있다. 생육기간 전반에 걸쳐 20mm 이상의 강우량이 발생할 경우 작물 재배 상황에 관계없이 Baresoil과 거의 같은 토양수분함량을 나타내고 있으며 강우량이 적은 기간에 대해서는 작물 재배 상황에 따라 차이를 보이고 있다. 5월 20일의 경우 Baresoil의 토양수분함량과 비교해 Taro 재배 상황에서는 2.4%, Cassava 재배 상황에서는 1.8%, Yam 재배 상황에서는 2.2% 낮은 토양수분함량이 예측되었다. 향후 통가타푸섬 밭작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측모형의 시뮬레이션에서는 실제 작물 재배 현황을 고려함으로써 작물의 생육단계별 토양수분함량에 미치는 영향을 반영하고자 한다.

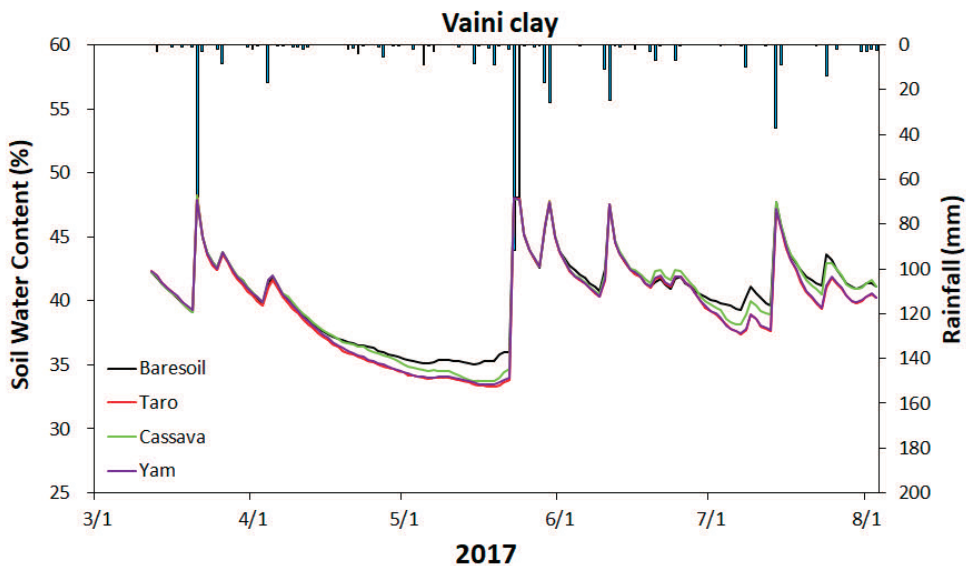


그림 4.33. 재배작물에 따른 토양수분함량 시뮬레이션 예측 결과(Vaini clay 토양 가정)

4.2.4 ToCSA시스템을 이용한 농업데이터 수집

농업분야 스마트 물관리 시스템 구축을 위해서는 수자원 데이터뿐만 아니라 관련되어 분석될 수 있는 농업데이터가 확보되어야 한다. 따라서 본 사업에서는 농업데이터 확보를 위한 민간 분야 및 공공 분야 활용을 위한 다양한 방법에 대해 제시하고자 한다.

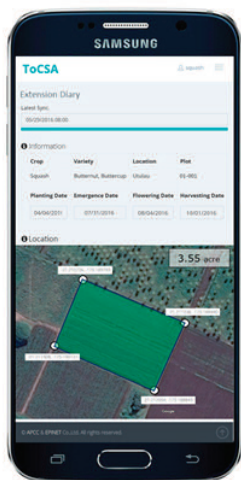
지난 통가 농업기후정보서비스 사업(2014-2016)의 산출물인 Tonga Climate Service for Agriculture(ToCSA)에는 Farm Diary를 통한 농가 별 농업데이터 수집이 가능하다. 개별 농가의 기후변화 적응력을 향상시키기 위해 해당 도구의 활용을 적극적으로 권장하였고, Nishi Trading과 같은 일부 상업농민을 중심으로 농업데이터의 체계적인 수집 및 관리가 이루어지고 있다. 이렇게 축적된 농업데이터는 수확 후 농업 산물의 수출을 위해 필요한 Compliance document를 작성하는데 활용될 수 있으며, 장기적인 관점에서는 체계적인 작물 생산의 관리 및 개선을 위한 자료로 활용될 것이다. 이는 초기 Farm Diary의 개발 목적이었던 개별 농가의 기후변화 적응력을 향상시키는 결과를 가져올 것으로 예상되며, 지속적인 모니터링 및 교육 훈련을 통한 데이터 수집 및 관리의 개선이 뒤따른다면 활용 포텐셜이 무한할 것으로 생각된다.

개별 농가의 활용과 달리 ToCSA를 플랫폼으로 하여 통가 농림수산부 정부 차원에서의 농업데이터 수집 및 관리에 대한 새로운 니즈가 창출되었다. 2017년 3월 통가 방문 시 이에 대한 농림수산부 장관의 구체적인 요청이 이루어졌고, 이를 바탕으로 Extension Diary의 개발을 통한 농업데이터의 수집이 농림수산부 주요 사업 계획에 포함되었다. Extension Diary를 통한 농업데이터 수집 및 분석은 통가 농업의 기후변화 대응 능력을 높이기 위해 필요한 양질의 데이터를 확보하고, 통가 농업기후정보서비스(ToCSA) 시스템과 연계하여 기후정보와의 상관성 분석을 통한 농업분야 기후위험관리 의사결정력 향상시키려는 목적을 가지고 있다.

ToCSA는 기상기후정보와 농업정보의 경험적/통계적 연결고리를 활용해 농업의사결정을 지원하는 포털시스템으로 개발되었지만 통가의 농업데이터 자체가 상당히 부족하여 의사결정 모형을 개발하고 검증하기 위해 필요한 경험적/통계적 분석이 제한되어 있는 형편이다. 이러한 제한점을 인지하고 있는 통가 정부에서는 필수 농업데이터를 수집하는데 활용할 수 있는 농업데이터 수집 및 분석 툴 개발을 의뢰하였고, APCC에서는 기존 ToCSA와의 연계성을 고려한 GIS 기반 데이터수집 어플리케이션 개발을 제안하였

다. Extension Diary는 기존 ToCSA에 연계된 Farm Dairy의 기술적 플랫폼을 기반으로 GIS 표출 및 분석 기능이 더해진 모바일 어플리케이션이다. 기존의 Farm Diary는 개별 농가 수준의 복잡한 농업정보를 수집하고 관리 할 수 있도록 개발되었으나, Extension Diary는 통가 농림수산부의 Extension 부서에서 정부 차원에서 필요한 농업정보만을 수집할 수 있도록 Interface를 최대한 단순화하여 개발할 필요가 있다. 또한 Google Map의 Open source GIS 기능을 최대한 활용하여 수집된 자료에 대한 GIS 기반 통계분석이 ToCSA 내에서 가능하도록 개발하는 것이 요청되었다. 성공적인 농업 데이터 수집이 가능하게 하기 위해서는 통가 농림수산부와 긴밀한 논의를 통해 농림수산부의 니즈를 최대한 반영할 필요가 있다.

오프라인 데이터 수집 어플리케이션



온라인 데이터 분석 및 표출을 위한 ToCSA 시스템



그림 4.34. Extension Diary 구성요소 - 오프라인 데이터 수집 어플리케이션과 온라인 데이터 분석 및 표출을 위한 ToCSA 시스템

Extension Diary의 시스템 구성요소는 다음과 같다(그림 4.34). Extension Diary는 오프라인(Offline) 농업데이터 수집을 가능하게 하며, 데이터 수집 장소의 GIS 정보와 함께 조사 대상 작물, 품종, 작형, 재배자 등의 기본 정보, 파종, 발아, 개화, 수확 등의 주요 생육시기 정보, 파종 재료 및 수확량 정보 등을 수집한다. 이렇게 수집된 정보가 온라인(Online) ToCSA 시스템으로 업로드 되고난 후, ToCSA interface 상에서 기본적인 GIS 기반 통계처리가 가능하고, 대상지역의 기후정보와의 통계적 연관성 분석이

가능하며 이러한 결과는 향후 관측 및 예측 기상정보 기반 농업의사결정 지원을 위한 모형 개발 및 검증에 활용될 수 있어, 장기적으로 통가 농업의 기후변화에 대한 탄력성(resilience)을 높이는데 기여할 수 있을 것이다.

Extension Diary는 통가 농림수산부에서 지속적으로 요청했던 도구로써, 농림수산부의 강한 니즈를 바탕으로 실질적인 현장에서의 활용이 가능한 산출물이 될 수 있을 것이다. 이는 기존 프로젝트를 통해 개발된 ToCSA 시스템에 대한 통가 농림수산부의 활용성을 높이고, 현재 진행 중인 통가 농업수자원 프로젝트(2017-18)의 성공을 위해 필요한 농업자료를 제공하는 역할을 담당할 것이다. 장기적으로는 고품질의 농업정보 확보를 가능하게 하여 향후 통가 농업의 탄력성을 높이기 위한 다양한 프로젝트의 기반 자료로써 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론 및 토론

통가타푸섬은 최대 고도가 65 m 밖에 되지 않는 대체로 평탄한 지형으로 되어 있어 저수지나 댐과 같은 저류시설이 없으며 이용 가능한 수자원으로는 빗물을 모아서 저장해 두었다가 이용하는 빗물탱크와 지하수 관정을 뚫어 펌핑을 통해 이용하는 지하수가 전부라고 할 수 있다. 통가의 농업은 일부 상업농민을 제외하고는 거의 모든 농가에서 천수 농경지에 작물을 재배하고 있는 실정이기 때문에 장기간에 걸친 가뭄이 발생할 경우 관개시설이 마련되어 있지 않은 대부분의 농가에서는 심각한 농작물의 피해를 입게 된다. 실제 2014년에서 2015년에 걸쳐 발생한 엘니뇨의 영향으로 통가타푸섬 전 지역에 걸쳐 심각한 가뭄이 발생하였으며 그로인해 전체 농산물 생산에 큰 피해를 경험한바 있다. 통가 정부에서는 엘니뇨와 같은 이상기후 현상의 영향으로 인해 통가 농업이 또다시 큰 피해를 당하지 않도록 정부차원에서 다양한 대응방안을 세우려고 노력하고 있으며 그 일환으로 APEC 기후센터와 함께 통가 물부족 대응을 위한 스마트 물관리 시스템 구축 사업을 추진하게 되었다. 본 연구사업에서는 통가 지역에 대한 효율적인 수자원 관리를 위해 강수량에 대한 미래 전망과 지하수 함양량의 변동을 전망하며 토양수분 관측센서 설치를 통해 작물 재배지역에 대한 토양 내 수분 상태를 모니터링하고 나아가 미세측 지역에 대해서는 토양수분함량 예측모형 구축을 통해 작물의 생육단계별 토양수분함량을 추정할 수 있는 기술을 개발해 가뭄 상황에 선제적으로 대비하기 위한 물관리 시스템을 구축하고자 한다. 수자원 분야와 농업분야 연구를 통해 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- ▶ **통가의 기후 특성 및 수자원 영향:** 통가타푸의 기후는 우기(11월-4월)와 건기(5월-10월)로 구성된다. 우기 중 약 60-70%의 비가 내린다. 가장 습한 달은 2월과 3월 사이에(약 220mm) 다양하며, 가장 건조한 달은 6월에서 7월 사이(약 80mm)이다. 1945년에서 2016년까지 누쿠알로파, 통가타푸의 연평균 강우량은 1,838mm로 낮은 변동계수를 보이는 것으로 분석되었다. 통가타푸 섬에는 하천이나 저수지 등의 지표수 자원이 없으며 석회석 자유면 대수층에 부존된 지하수가 섬의 유일한 수자원이다. 인구와 기후 변화의 증가는 제한된 담수 지하수 자원의 취약성을 증대시키고 있다. 인구 증가에 따라 지하수 수요와 지표 오염 가능성이 증대되고 있다. 최근의 기후 변화로 인한 강수량 변동과 해수면 상승으로 수년 동안 지하수 자원의 염분

을 증가시키는 요인으로 작용하고 있다.

- ▶ **이상기후(엘니뇨/라니냐) 발생에 따른 통가의 강수량 변동 특성:** 통가는 엘니뇨, 라니냐 등 이상기후의 영향을 직접 받는 지역으로 강한 엘니뇨가 발생할 경우 평년에 비해 강수량이 적어 가뭄이 발생한다. 이러한 이상기후 발생에 따른 통가의 강수량 변동 특성을 분석하기 위하여 GPCP 재분석 관측강수량 자료의 합성편차 분석을 실시하였으며, 우기(12월~이듬해 2월)와 건기(6월~8월)로 자료기간을 구분하여 분석을 진행하였다. 통가 지역은 엘니뇨 발생 우기에는 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 90~180mm정도 감소할 것으로 분석되며, 건기에는 약 45~90mm정도 강수량이 감소할 것으로 분석된다. 또한 라니냐 발생 우기에는 엘니뇨 시기와 반대로 3개월 평균 강수량이 평년에 비하여 약 135~270mm정도 증가할 것으로 분석되며, 건기에는 강수량이 평년에 비하여 약 0~90mm정도 증가할 것으로 분석된다.
- ▶ **기후 지수를 이용한 통가의 수자원 관리 및 예측:** 통가의 강수량과 SOI는 양의 상관성을 보이고 있음을 확인하였다. 즉, 강한 엘니뇨 사상이 발생할수록 통가 지역의 강수량이 감소할 확률이 커진다. 통가 도서지역 수자원관리 관점에서 강한 엘니뇨는 가뭄을 발생시킬 확률이 크므로 이수 중심의 수자원 관리가 필요하다. 또한 지속적인 엘니뇨 관리 및 분석이 요구된다. SSA 기법을 이용하여 추출한 시계열 자료의 주성분자료를 바탕으로, 추세학적 예측모형을 구성하여 기후지수 및 통가지역 SPI 가뭄지수 장기 예측이 가능할 것으로 사료된다. 이는 열대태평양 지역에서 엘니뇨/라니냐 등의 이상기후가 발생할 경우 계절규모 수자원예측에 활용이 가능할 것이다.
- ▶ **기후변화에 따른 강수량 전망 및 물수지 분석:** 29개 GCMs 모형을 통한 통가타푸 누쿠알로파 관측지점의 강수량 전망 결과 RCP4.5 시나리오와 RCP8.5 시나리오에서 모두 증가특성을 보였으나, 관측기간 강수량 증가 경향에 비하여 증가폭은 적을 것으로 판단된다. 또한 먼 미래 기간으로 갈수록 강수량의 편차가 크게 발생하여 불확실성 증가에 따른 가뭄과 홍수발생영향이 커질 것으로 전망된다. 통가타푸섬을 대상으로 구축한 WATBAL 물수지 모형을 통하여 분석한 지하수 함양률은 30%로, 연간 총 지하수 함양량은 141,584,597 ton으로 추정된다. 월별 추정 지하수 함양량과 월강수량의 관계 통하여 지하수 함양량 추정식을 개발하였으며,

WATBAL모형의 결과와 $R^2 = 0.9236$ 의 높은 상관성을 보임을 확인하였다. 또한 기후모형으로부터 생산된 강수량과 기온 전망 자료를 바탕으로 기후변화에 따른 지하수 함양량 전망을 실시하였으며, 기후변화에 따른 지하수 함양량 감소와 불확실성이 커져 장기간에 걸친 가뭄에 대비할 필요성이 있는 것으로 전망되었다.

- ▶ **토양수분 관측센서 설치 및 모니터링:** 통가 작물 재배지역에 대한 스마트 물관리 시스템 구축을 위해 통가 작물 재배지역(Vaini Farm, Fua'amotu Farm)을 대상으로 토양수분 관측센서(토양수분함량: SWC, 토양수분포텐셜: SWP)를 설치해 Taro 및 Vanilla 재배지역에 대한 작물 생육기간 동안의 토양 내 수분 상태 변화를 모니터링 했다. 강우량이 적은 기간 동안에 대한 각 재배지역의 SWC와 SWP의 상관관계 분석을 통해 $R^2=0.9$ 이상의 선형 상관관계를 나타내고 있는 것을 확인했다. 통가타푸섬의 토양과 같이 점토질 성분이 높은 토양에 대해서는 SWP가 60-100 kPa 범위 일 때 관개를 권장하고 있으며 토양 종류 및 작물의 종류 그리고 작물 생육단계에 따라 적정 관개 시기가 결정된다.

- ▶ **토양 특성 정보 분석:** 작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측모형 구축을 위해서는 기상 관측정보, 작물 생육정보와 함께 토양에 대한 물리적 특성 정보가 필요하다. 통가 작물 재배지역에 대한 토양을 샘플링 해 입도분석 시험을 실시하고 Sand, Silt, Clay 비율 정보를 얻어 그 결과를 ROSETTA 모형에 입력하여 수리학적 매개변수(θ_{res} , θ_{sat} , K_{sat} , a , n)를 추정했다. 통가타푸섬의 6개 대상지역에 대한 샘플링 토양은 국내 토양분석 전문기관에 의뢰하여 물리적 특성 분석을 실시하였다. 그 결과 기존의 통가지역에 대한 토양분석 결과와 Sand 비율에서 큰 차이를 보였는데 이는 응고된 점토질 토양을 얼마나 잘 분해하느냐에 따라 달라지는 것으로 나타났다.

- ▶ **토양수분함량 예측모형 구축:** 토양수분함량 예측을 위해 기후특성과 지표특성(토양, 지형, 작물 등)을 동시에 고려하는 프로세스 기반의 수문학적 모형인 SWAP 모형이 이용되었다. 밭작물 재배지역에 대한 생육시기별 토양 내 수분 변동을 모의하기 위해 기상정보와 토양정보 그리고 작물 생육정보 수집을 통해 모형의 입력자료를 생산했다. 통가 작물 재배지역에 구축된 토양수분함량 예측모형에는 기상정보로서 Fua'amotu 기상 관측소와 Vaini 시험포장 AWS의 관측자료가 이용되었고 토양

정보로서 입도분석 결과와 ROSETTA 모형을 통해 추출된 수리학적 매개변수가 이용되었으며 작물 생육정보로서 Taro와 Cassava, Yam에 대한 생육단계별 LAI 및 작물높이, 뿌리깊이 등의 정보가 이용되었다. 통가타푸섬의 작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측모형 구축은 아직 토양 물리적 특성 분석이 진행 중에 있어 추후에 추진하고자하며 우선 기존 연구에서 분석한 통가타푸섬을 대표하는 Vaini clay와 Lapaha clay 토양에 대한 물리적 특성 정보와 통가타푸섬의 주요 작물인 Taro와 Cassava 그리고 Yam에 대한 생육정보를 바탕으로 토양수분함량 예측모형을 구축했다.

- ▶ **토양수분함량 예측모형의 예측성 검증:** 토양수분함량 예측모형의 예측성 검증을 위해 시험포장에서 관측된 SWC 관측 값과 모형의 시뮬레이션 값에 대한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 시계열상관계수(Temporal Correlation Coefficient, TCC)를 산정한 결과 RMSE=3.45, TCC=0.73로 나타났다. 시뮬레이션 결과 값의 정확도를 높이기 위해서는 무엇보다 시험포장의 기상 상태를 잘 반영할 수 있는 기상관측 자료가 필요하며 용적밀도(Bulk density, BD), 33kPa 또는 1500kPa에서의 토양수분함량(TH33, TH1500) 자료와 같은 보다 상세한 토양 물리적 특성 정보가 요구된다. 통가타푸섬의 작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측은 Vaini Farm의 Taro 재배지역과 Fuaamotu Farm의 Vanilla 재배지역에 대해 시뮬레이션을 실시했다. 또한 작물 재배품종별로 시뮬레이션을 실시해 작물에 따른 생육기간별 토양수분함량 변동의 차이를 분석한 결과 강우량이 적은 기간 동안 Taro를 재배하는 곳에서 토양수분함량의 감소가 크게 나타나는 것으로 예측됐다. 장기간에 걸쳐 가뭄이 발생할 경우 작물에 따라 가뭄에 대한 적응능력이 다르기 때문에 미세측 작물 재배지역에 대한 토양수분함량 예측 결과를 가지고 어느 지역에 우선적으로 관개용수를 공급할지에 대한 판단이 가능 할 것으로 생각된다.

본 연구의 결과는 기후정보(기후변화, 계절예측)를 활용한 강수량 예측 및 수자원 관리에 활용되며, 지하수모델링 및 웹기반 물관리 통합 시스템과 연계하여 통가의 물관련 정책지원 및 재난(가뭄/홍수)관리, 수자원관리자의 의사결정 지원에 활용될 예정이다. 또한 본 연구에서는 작물 재배지역에 대한 농업적 가뭄 발생에 선제적으로 대응할 수 있도록 모델링을 통해 토양 내 수분 상태를 자동으로 진단할 수 있는 기술을 개발해 통가

타푸섬에 적용하고자 하였다. 본 연구사업은 2017년부터 2018년까지 2년에 걸쳐 추진되는 사업으로 통가타푸섬 작물 재배지역에 대한 생육단계별 토양수분함량 추정 결과를 통해 적정 관개시기 정보가 제공되고 지하수 모델링을 통해 작물 재배지역에서 이용할 수 있는 지하수 관정에 대한 수위 및 염분농도에 관한 정보가 제공되어 통가 농업지역의 물부족 상황에 보다 효율적인 물관리 방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다. 기후변화의 영향 속에서 통가 농업이 지속가능한 발전으로 농업 생산을 유지해 나가기 위해서는 본 연구사업을 통해 구축되는 스마트 물관리 시스템이 통가 정부 및 농업인에게 실질적으로 얼마만큼 도움이 될 수 있는지에 대한 사용자 중심에서의 다양한 고민이 필요하다. 2차년도 사업에서는 통가의 지속가능 농업을 지원할 수 있도록 농업/수자원을 연계한 스마트 물관리 의사결정 지원 기술을 개발하고 범용화 기술 개발을 통해 통가와 비슷한 상황에 놓여있는 다양한 개발도상국에 대해서도 지원할 수 있는 방안을 세우고자 한다.

REFERENCES

- 신용희 (2016) 발작물 재배지역의 생육시기별 토양수분 및 소비수량 추정기법 개발. APEC 기후센터 연구 보고서.
- 윤선권 (2015) 원격상관 기반 극한기후패턴 변화에 따른 한반도 지역수문변동 영향분석, APEC기후센터 연구보고서 2015-12, pp. 1-181.
- 장태일, 성충현, 박승우, 2009. 농업용수 재이용에 따른 토양염분 추저을 위한 SWAP 모형의 보정과 검증, 한국수자원학회 2009년도 학술발표회 초록집, 608-612 pp.
- 장태일, 2009. 하수처리수의 농업용수재이용에 따른 논에서의 환경영향 분석, 서울대학교 공학박사학위논문.
- 황성환 (2001) 우리나라 강수량과 엘니뇨 현상과의 저빈도 상관성 연구. 서울시립대학교 공학석사학위논문, 1-63.
- Allen et al. (1998). Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations, Rome.
- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requeriments, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, 1998Rome, ItalyFAO
- Cannon, A. J., S. R. Sobie, and T. Q. Murdock, (2015) Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? Journal of Climate, Vol. 28, 6938-6959, doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
- Carlos, A.A., Robert J.L., Leo S. 2012. Test of the ROSETTA pedotrnser function for saturated hydraulic conductivity. Open Journal of Soil Science 2: 203-212.
- Cho, J. P., (2013) Assessment of Climate Change Impacts on Agricultural Reservoirs in Consideration of Uncertainty. APEC Climate Center Annual Report 2013-05, pp. 1-136 (in Korean with English abstract).
- Cowie, J.D., 1980. Soils from Andesitic Tephra and their variability, Tongatapu, Kingdom of Tonga, Australian Journal of Soil Research 18(3), pp. 273-284.
- CSIRO, 2011, Current and future climate of Tonga, Pacific Climate Change Science Program, pp. 1-8.
- Diby, L. N., Hgaza, V. K., Tie, T. B., Assa, A., Carsky, R., Girardin, O., Sangakkara, U.R., Frossard, E., 2011, How does soil fertility affect yam growth?. Acta Agriculturae Scandinavica Section B – Soil and Plant Science. 61. pp. 448-457. 10.1080/09064710.2010.505578.
- Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)

- Extraterrestrial solar radiation (http://www.engr.scu.edu/~emaurer/tools/calc_solar.cgi.pl)
- FAO, 2015, 2015–2016 El Niño, early action and response for agriculture, food security and nutrition, Working draft (30th October, 2015).
- Gibbs, H. S., 1976, Soils of Tongatapu, Tonga, New Zealand Soil Survey Report 35. 15p.
- Hamon, W.R., 1963. Comparison of direct runoff amounts from storm rainfall. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.* 63:52–62.
- Hargreaves, George H., and Zohrab A. Samani. "Reference crop evapotranspiration from temperature." *Appl. Eng. Agric* 1.2 (1985): 96–99.
- Hayes, M., M. Svoboda, N. Wall, and M. Widhalm. (2011) The Lincoln Declaration on Drought Indices: Universal Meteorological Drought Index Recommended, *Bulletin of the American Meteorological Society*, pp.485–488.
- Hou, Z., S., Feng, X., Dai, Y., Zheng and Y., Wang, 2012. Simulation of hydrology following various volumes of irrigation to soil with different depths to the water table. *Soil Use Manage.* 28, 229–239.
- IPCC, (2007) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)–Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 1–594.
- Kiladis, G.N., and H.F. Diaz, Global climatic anomalies associated with extremes of the Southern Oscillation, *J. Clim.*, 2, 1069–1090, 1989
- KMA (Korean Meteorological Administration), (2012) *Korea Climate Change Prediction Report* Korean Meteorological Administration 1–153 (in Korean).
- Kula, T., 2009. An investigation of the feasibility of rainwater harvesting systems for water supply in the islands of the Kingdom of Tonga, GEOG5005 Spatial Research Project at School of Geosciences in the University of Sydney, pp. 1–77.
- MAFFF, TSD and FAO, 2015. 2015 Tonga National Agricultural Census Main Report, http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/ess_test_folder/World_Census_Agriculture/Country_info_2010/Reports/Reports_5/TONGA_ENG_REP_2015.pdf, Accessed Sep. 2017.
- Ma, Y., S.Y., Feng, Z.L., Huo and X.F., Song, 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Math. Compu. Model.* 54, 1044–1052.
- Manu, V.T., 2000, Effects of cropping on soil C and nutrient availability, and the amelioration practices that enhances optimum and sustainable crop yields in Tonga, PhD thesis,

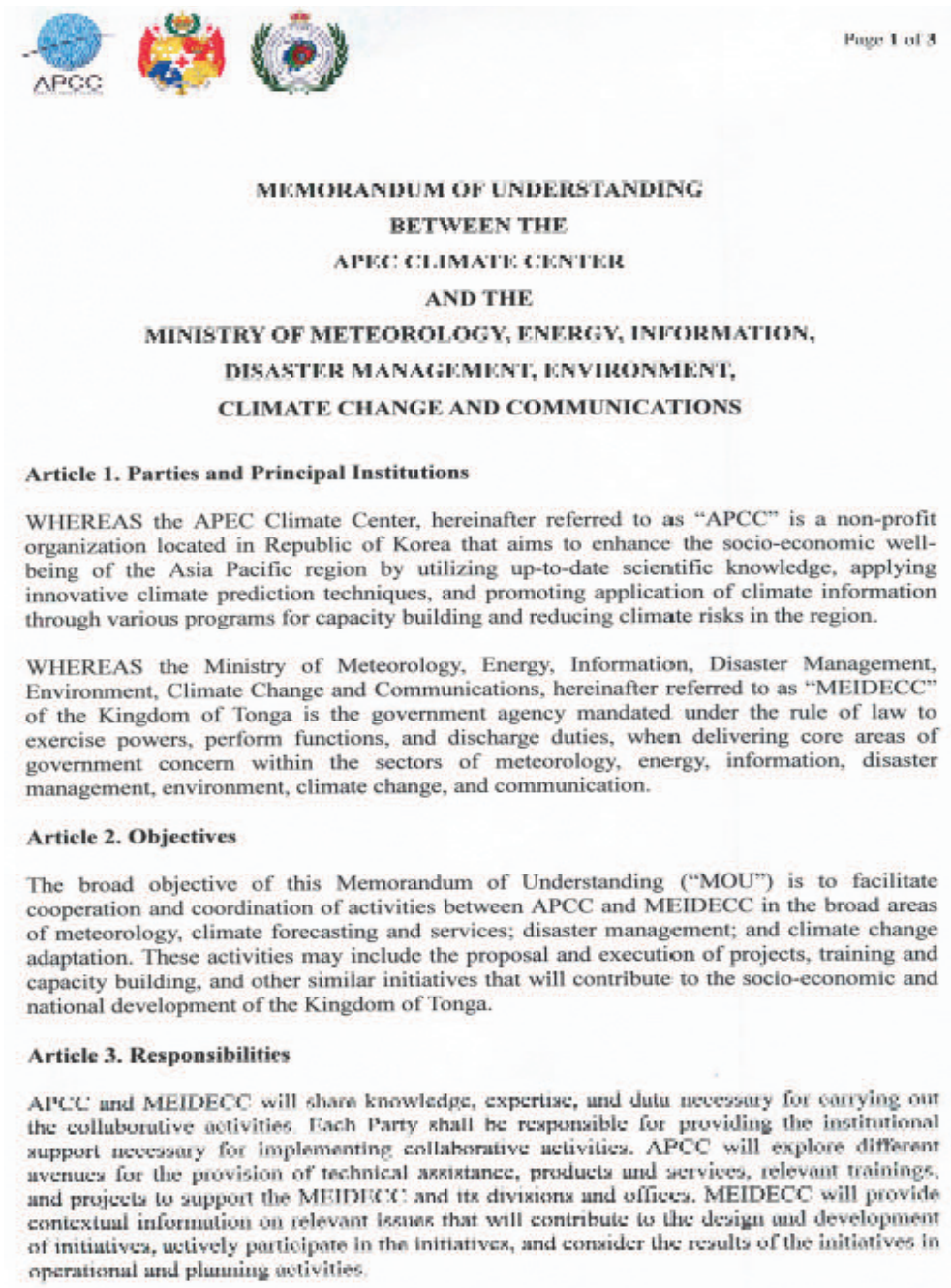
- University of New England, New South Wales, Australia. 153 p.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17–23, 1993, Anaheim CA, pp.179–186.
- Moon, Y. I., and U., Lall, 1996: Atmospheric flow indices and interannual Great Salt Lake variability. *Journal of Hydrologic Engineering*, 55–61.
- Lu, J., Sun, G., McNulty, S. G., & Amatya, D. M. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(3), 621–633.
- NASA NEX-GDDP <https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>
- National Integrated Water Resource Management Diagnostic Report SOPAC Reports 2007.
- National water policy, 2011. The Kingdom of Tonga, pp.1–20.
- Perkins, S.E., Pitman, A.J., Holbrook, N.J. and McAneney, J., 2007. Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. *Journal of climate*, 20(17), pp.4356–4376.
- Qmap package (<ftp://ftp.gr.vim.org/mirrors/CRAN/web/packages/qmap/qmap.pdf>)
- Ren, H. L., and F. F. Jin, 2011: Niño indices for two types of ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L04704, doi:10.1029/2010GL046031.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., and Bronaugh, D., (2013) Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 118, pp. 2473–2493.
- Sivan, P., 1979, Growth and development of taro (*Colocasia esculenta*) under dryland conditions in Fiji. *Proc. 5th Symp. Inter. Soc. Trop. Root Crops*, Philippines, pp.637–646.
- SPC Water, Sanitation and Hygiene: Tonga, URL: <http://www.pacificwater.org/pages.cfm/county-information/tonga.html>, Accessed Nov. 2016.
- Thompson, C., 1986, *The Climate and Weather of Tonga*. New Zealand Meteorological Service, Misc. Publications, Auckland, New Zealand. 60 p.
- Tironi, L. F., Streck, N. A., Gubiani, P. I., Benedetti, R. P., De Freitas, C. P., 2017, SIMANIHOT: A PROCESS-BASED MODEL FOR SIMULATING GROWTH, DEVELOPMENT AND PRODUCTIVITY OF CASSAVA *Eng. Agric.* 37(3), pp. 471–483.
- UNOCHA, 2015, Asia and the Pacific: Weekly Regional Humanitarian Snapshot(as of 8–14

- September 2015). Available from <http://reliefweb.int/report/myanmar/asia-and-pacific-weekly-regional-humanitarian-snapshot-8-14-september-2015>, Accessed Nov. 2016.
- van Dam, J. C., J. Huygen, J. G. Wesseling, R. A. Feddes, P. Kabat, P. E. V. van Walsum, P. Groenendijk, and C. A. van Diepen, 1997, Theory of SWAT version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil. Water. Air. Plant environment. Technical Doc. 45. Alterra, Wageningen, the Netherlands.
- White, I, Falkland, A. and Fatai, T., 2009, Vulnerability of Groundwater in Tongatapu, Kingdom of Tonga, Groundwater Evaluation and Monitoring Assessment, Report to Pacific Islands Applied Geoscience Commission, EU EDF8, pp. 1–351.
- Wood, E.F., Roundy, J.K., Troy, T.J., van Beek, L.P.H., Bierkens, M.F.P., Blyth, E., Roo, A. de, Döll, P., Ek, M., Famiglietti, J., Gochis, D., van de Giesen, N., Houser, P., Jaffé, P.R., Kollet, S., Lehner, B., Lettenmaier, D.P., Peters-Lidard, C., Sivapalan, M., Sheffield, J., Wade, A., and Whitehead, P., (2011) Hyperresolution global land surface modeling: Meeting a grand challenge for monitoring Earth's terrestrial water, *Water Resour. Res.*, Vol. 47, W05301, doi:10.1029/2010WR010090.
- Yoon, S. K., J. S. Kim, J. H. Lee, and Y. I. Moon, 2013: Hydrometeorological variability in the Korean Han River Basin and its sub-watersheds during different El Niño phases. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, **27**, 1465–1477.
- Yoon, S. K., and Y. L. Moon, (2014) The recent increasing trends of exceedance rainfall thresholds over the Korean major cities, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* Vol. 34, No. 1, pp. 117–133 (in Korean with English abstract).
- Yoon, S. K., and J. P. Cho, (2014) The Uncertainty of Extreme Rainfall in the Near Future and its Frequency Analysis over the Korean Peninsula using CMIP5 GCMs, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 48, No. 10, pp. 817–830 (in Korean with English abstract).

부록

[S1] MOU with APCC and Tongan Government

S1.1 APCC-Tonga MEIDECC MOU





The Ministry of Revenue and Customs, in support of MICHICC, shall in accordance with Tongan Law, exempt the import of any project supplies funded by APCC for MICHICC under this MOU, from import duties, and other taxes such as consumption tax, and excise tax. Any project supplies imported and exempted under this MOU disposed of to a third party within five years of the date of importation shall be subject to the duty and taxes payable at the date of importation. All vehicles and equipment imported and exempted under this MOU shall remain the property of MICHICC at the completion of the projects for which they were imported.

Article 4. Non-binding MOU

This MOU is not intended as a binding legal agreement. It is only an expression and record of the purpose and intention of the Parties concerned, to which they each honorably pledge themselves with the fullest confidence. This is based on their relationship with each other, and the understanding that this MOU will be carried through by each Party with mutual respect, loyalty, and friendly cooperation. Any differences between the Parties concerning the interpretation and /or application of this MOU should be settled amicably through mutual agreement.

Article 5. Validity and Renewal of MOU

1. This MOU will take effect immediately on the most recent date of signing and will remain in effect for five years from the most recent date of signing.
2. This MOU may be extended at the end of the 5th year after successful execution.
3. This MOU may be amended by written agreement among the Parties by mutual consent.

Article 6. Termination

1. This MOU may be terminated through mutual agreement between both parties.
2. In the event that one party wishes to terminate the MOU before the expiration date, that party shall inform the other party in writing within 30 working days.



IN WITNESS WHEREOF, the undersigned, being duly authorized thereto, have caused this document to be executed as of the date of the last signature shown below

Signed by:

**Ministry of Meteorology, Energy,
Information, Disaster Management,
Environment, Climate Change, and
Communications**

APEC Climate Center

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Siaosi Sovaleni', written over a horizontal line.

Honorable Siaosi Sovaleni
Deputy Prime Minister and Minister for
MEIDECC

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Chin-yeung Chung', written over a horizontal line.

Dr. Chin-yeung Chung
Director

Date: 22 July, 2015

Date: 22 July, 2015

Witnessed by:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Paula Pouvalu Ma'u', written over a horizontal line.

Mr. Paula Pouvalu Ma'u
CEO for MEIDECC

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Hyungjin Kim', written over a horizontal line.

Dr. Hyungjin Kim
Head of Climate Research Department

Date: 22 July, 2015

Date: 22 July, 2015

S1.2 APCC-Tonga MLSNR MOU



**MEMORANDUM OF UNDERSTANDING
BETWEEN THE
APEC CLIMATE CENTER
AND THE
MINISTRY OF LANDS, SURVEY, AND NATURAL RESOURCES,
KINDOM OF TONGA**

This Memorandum of Understanding (MOU) is entered into effect on the last day of the final signature between the APEC Climate Center, hereinafter referred to as “APCC” and the Ministry of Lands, Survey, and Natural Resources, hereinafter referred to as “the Ministry” (collectively hereinafter referred to as “the Parties”).

Article 1. Parties and Principal Institutions

1. WHEREAS, APCC is a non-profit organization located in Republic of Korea that aims to enhance the socio-economic well-being of the Asia Pacific region by utilizing up-to-date scientific knowledge, applying innovative climate prediction techniques, and promoting application of climate information through various programs for capacity building and reducing climate risks in the region.
2. WHEREAS, the Ministry of the Kingdom of Tonga is the Ministry managing lands, minerals and water resources for the benefit of all its stakeholders, as well as developing and implementing programmes for the nation.
3. WHEREAS, the Parties express the mutual desire to collaborate and develop a joint research project of “Development of Smart Groundwater Management System in the Kingdom of Tonga: Utilizing Climate Information in Response to Shortage of Water”, hereinafter referred to as “the Project”.

Article 2. Objectives

1. The broad objective of this MOU is to facilitate cooperation and coordination of activities for the Project.
2. The purpose of the Project is to support the stakeholders and decision-makers in the Kingdom of Tonga’s water resources sector to sustainably secure water resources by providing optimal alternatives to the current system.



Article 3. Accountability

1. APCC and the Ministry will share expertise and data necessary for carrying out the collaborative activities, and each Party shall be responsible for providing the institutional support necessary for implementing collaborative projects. Each Party will also develop a hydro-meteorological database and review the current operation and management policies as well as development plans of the Kingdom of Tonga.
2. APCC will analyze Tonga's climatology and install and monitor groundwater level observation system. APCC will also develop the web-based model for analyzing and predicting the sustainable use of water resources.
3. The Ministry will actively participate in and collaborate with APCC in the project activities. Furthermore, the Ministry will consider the results of the Project when forming relevant national policies and climate adaptation plans. The Ministry will collect and assist on digitizing water datasets, including information from previously conducted climate and geophysical surveys.
4. The Principle Investigators (PIs) will be:
 - (a) Dr. Sunkwon Yoon, Research Fellow, Climate Change Research Team, APCC
 - (b) Mr. Taaniela Kula, Deputy Secretary, Natural Resources Division, The Ministry of Lands, Survey, and Natural Resources, the Kingdom of Tonga

Article 4. Non-binding MOU

1. This MOU is not intended to be a binding legal agreement. It is only an expression and record of the purpose and intention of the Parties concerned, to which they each honorably pledge themselves with the fullest confidence. This is based on their relationship with each other, and the understanding that this MOU will be carried through by each Party with mutual respect, loyalty, and friendly cooperation.
2. Any differences between the Parties concerning the interpretation and/or application of this MOU should be settled amicably through mutual agreements.

Article 5. Duration of MOU

1. This MOU will take effect immediately on the most recent date of signing and will remain in effect for one year from that date.
2. This MOU may be amended in writing among the Parties by mutual consent.



Article 6. Termination of MOU

1. This MOU will be automatically terminated one year from the most recent date of signing.

IN WITNESS WHEREOF, the undersigned, being duly authorized by their respective Parties, have caused this MOU to be executed as of the date of the last signature shown below.

Signed by:

APEC Climate Center

Ministry of Lands, Survey, and Natural Resources, the Kingdom of Tonga

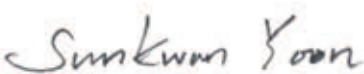

Dr. Chin-Seung Chung
 Director

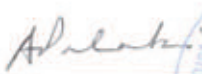

Lord Ma'afu
 Lord Minister

Date: Feb. 2, 2016

Date: 12/4/16

Witnessed by:


Dr. Sunkwon Yoon
 Research Fellow
 Climate Change Research Team

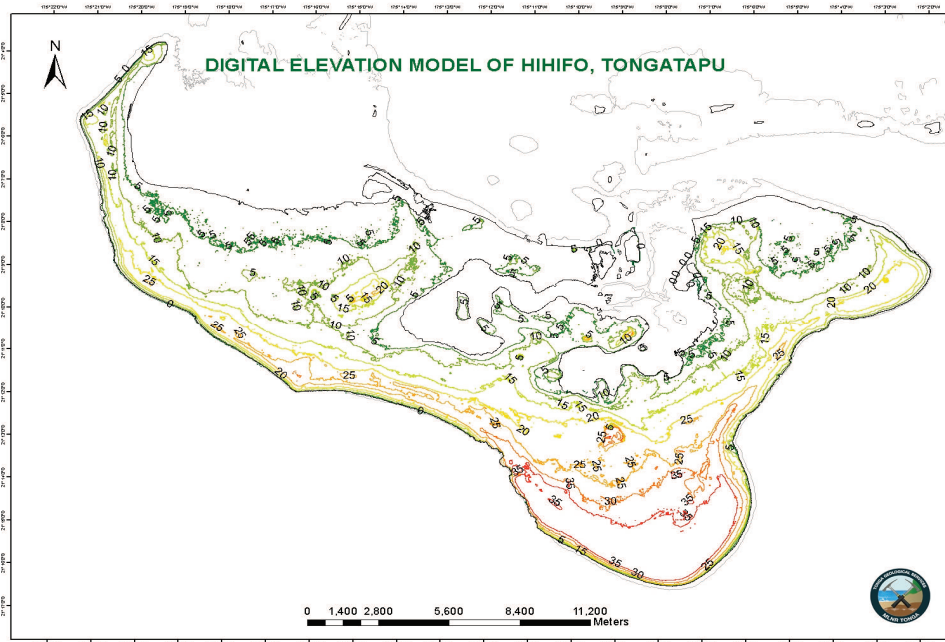

Mr. 'Asipeli Palaki
 Chief Executive Officer

Date: Feb. 2, 2016

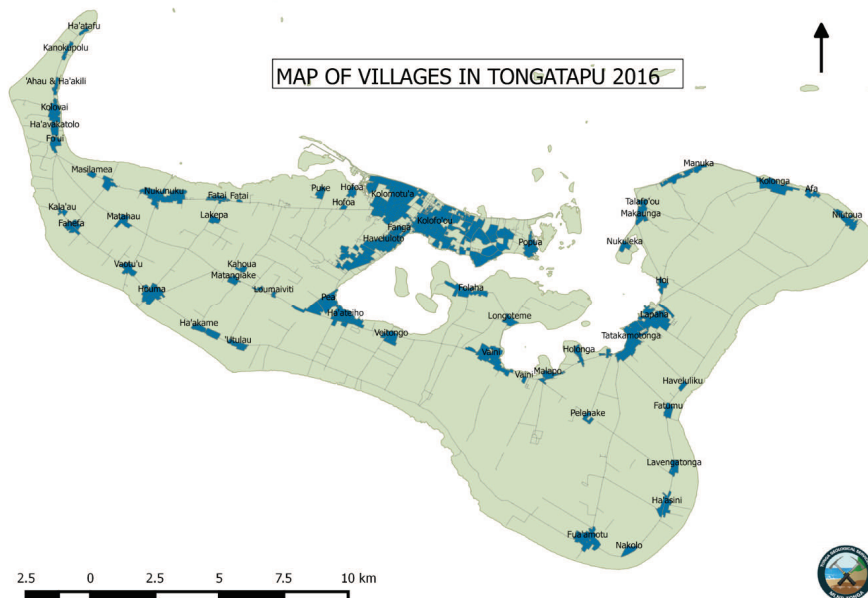
Date: Feb 12/4/16

[S2] Tongatapu island DEM, villages, well locations and pipe line system

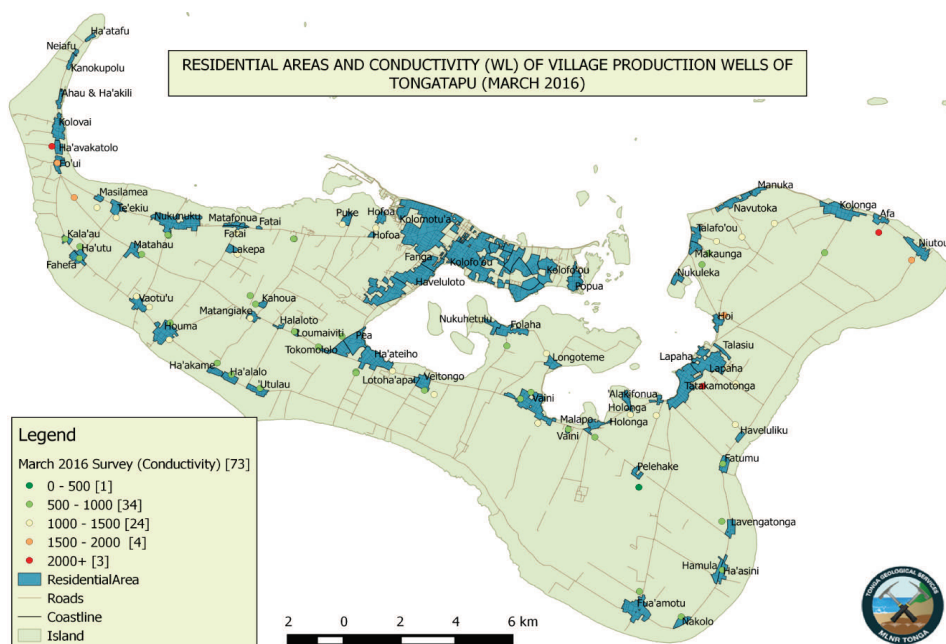
S2-1. Digital elevation map of Tongatapu



S2-2. Map of villages in Tongatapu



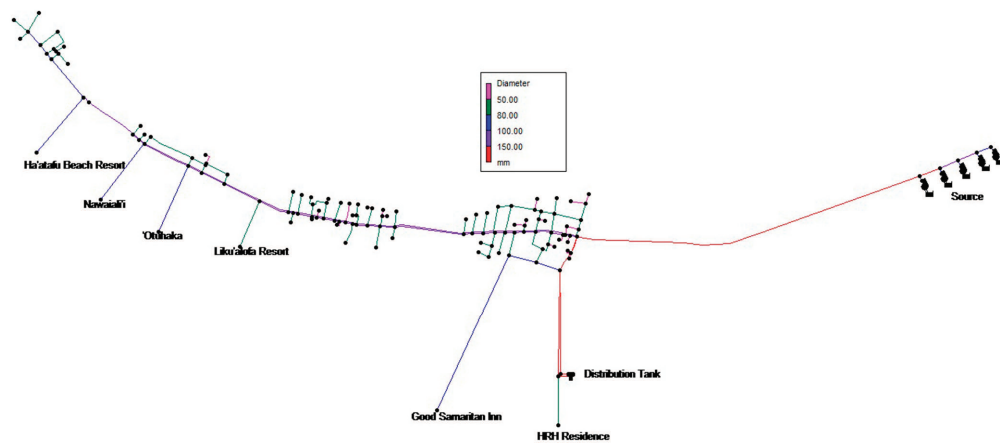
S2-3. Residential areas and electric conductivity (EC) of village wells of Tongatapu



S2-4. Nuku'alofa water supply system



S2-5. Hihifo water supply system



[S3] Information of real time groundwater monitoring system of salinity monitoring boreholes (SMBs) in Tongatapu island

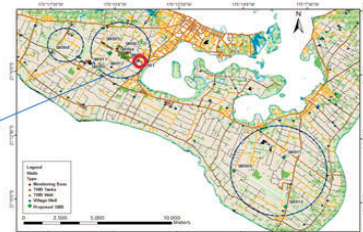
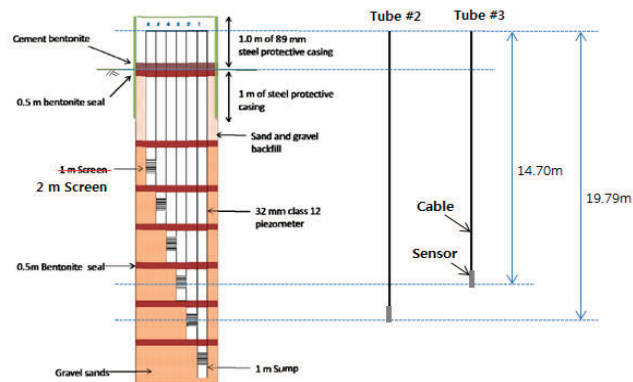
SMB01

Multi-Sensor
Tube #2, Tube #3

Location: South side of track between Mataki'eua and Fanga'uta Lagoon
(S: - 21.158825 W: - 175.234643)



Location of sensors



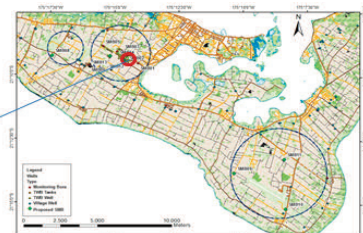
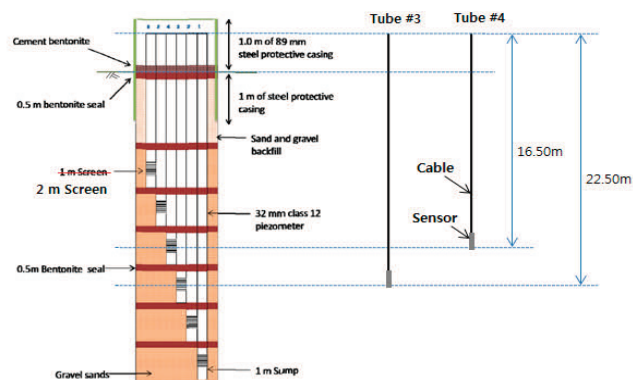
SMB02

Multi-Sensor
Tube #3, Tube #4

Location: Beside pump station 105, Mataki'eua
(S: - 21.153897 W: - 175.241717)



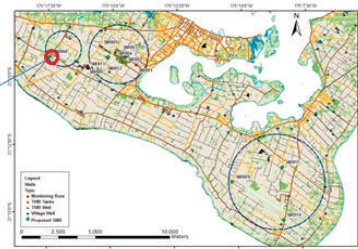
Location of sensors



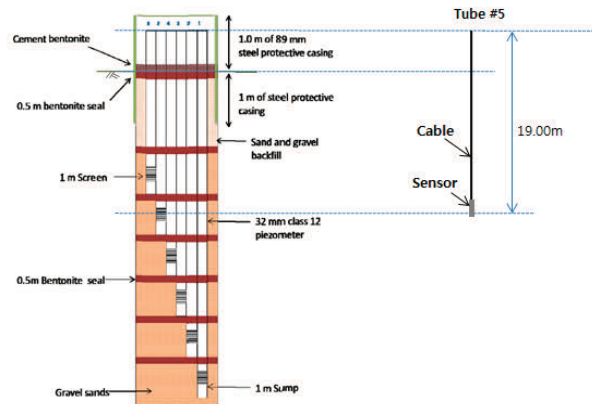
SMB08

Single Sensor
Tube #5

Location: Houma, Hala Vaea Road
(S: - 21.154315 W: - 175.291506)



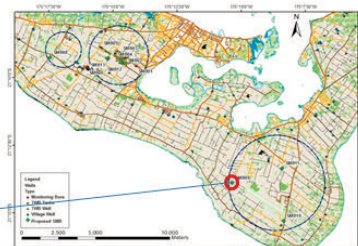
Location of sensor



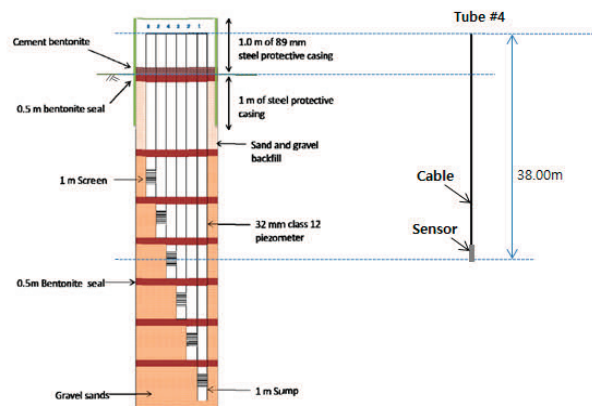
SMB09

Single Sensor
Tube #4

Location: Toloa-End of Airport Runway, Fua'amotu
(S: - 21.158825 W: - 175.234643)



Location of sensor



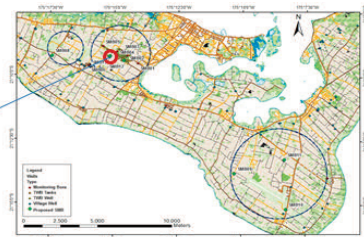
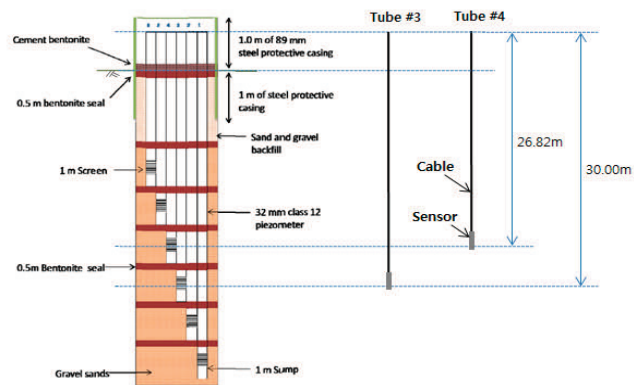
SMB13

Multi-Sensor
Tube #3, Tube #4

Location: Next to pump station 313, Matakī'eua-Tongami
(S: - 21.154274 W: - 175.253035)



Location of sensors



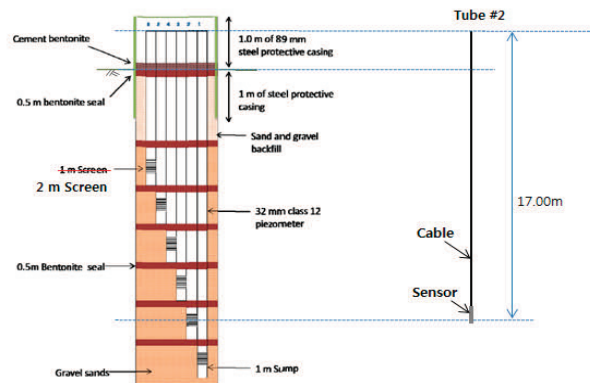
SMB15

Single Sensor
Tube #2

Location: Middle of Hihifo well field
(S: - 21.139717 W: - 175.316732)



Location of sensor



[S4] Water balance model input parameters and output of Tongatapu island

S4-1. WATBAL model input parameters

*Description of parameters

1. Interception Store Capacity (ISMAX) in mm
 2. Initial Interception Store (IIS) in mm
 3. Soil Moisture Zone Thickness (SMZ) in mm
 4. Field Capacity (FC)
 5. Wilting Point (WP)
 6. Max. Soil Moisture Content (SMCMAX=SMZ*FC)
 7. Min. Soil Moisture Content (SMCMIN=SMZ*WP)
 8. Initial Soil Moisture Content (ISMC) in mm
 9. Deep Rooted Vegetation (e.g. Coconut Trees) Ratio (DRVR)
 10. Ratio of these roots reaching water table (DRWT)
 11. Crop Factor for Deep Rooted Vegetation (CROPFD)
 12. Crop Factor for Shallow Rooted Vegetation (CROPFS)
- * Linear Relation of Ea/Et (actual/potential evap) ratio to SMC

ISMAX	IIS	SMZ	FC	WP	SMCMAX	SMCMIN	ISMC	DRVR	DRWT	CROPFD	CROPFS
-------	-----	-----	----	----	--------	--------	------	------	------	--------	--------

90	90	1000	0.55	0.40	550	400	500	0.3	0	0.8	1
----	----	------	------	------	-----	-----	-----	-----	---	-----	---

Start year	End year	PET_option (1=Con.Penman, 2=Hamon)	Latitude
------------	----------	------------------------------------	----------

1945	2016	2	-21.1
------	------	---	-------

S4-2. WATBAL model output

YEAR	MON	RAIN (mm)	ET (mm)	EI (mm)	SMC1 (mm)	ES (mm)	XCESS (mm)	SMDEF (mm)	SMC2 (mm)	GWR (mm)	TL (mm)	EA (mm)	NETR (mm)	RECHARGE RATIO
1945	1	142.	164.	90.	500.	46.	96.	50.	550.	46.	0.	136.	46.	0.32
1945	2	182.	137.	90.	550.	44.	48.	0.	550.	48.	0.	134.	48.	0.26
1945	3	138.	139.	90.	550.	46.	2.	0.	550.	2.	0.	136.	2.	0.01
1945	4	152.	108.	90.	550.	17.	45.	0.	550.	45.	0.	107.	45.	0.30
1945	5	182.	89.	1.	550.	0.	92.	0.	550.	92.	0.	1.	92.	0.51
1945	6	99.	77.	13.	550.	0.	10.	0.	550.	10.	0.	13.	10.	0.10
1945	7	113.	85.	5.	550.	0.	36.	0.	550.	36.	0.	5.	36.	0.32
1945	8	132.	96.	90.	550.	6.	41.	0.	550.	41.	0.	96.	41.	0.31
1945	9	73.	116.	73.	550.	40.	-40.	0.	510.	0.	0.	113.	0.	0.00
1945	10	21.	144.	21.	510.	84.	-84.	40.	425.	0.	0.	105.	0.	0.00
1945	11	37.	152.	37.	425.	18.	-18.	125.	407.	0.	0.	55.	0.	0.00
1945	12	12.	154.	12.	407.	6.	-6.	143.	401.	0.	0.	18.	0.	0.00
1946	1	10.	164.	10.	401.	1.	-1.	149.	400.	0.	0.	11.	0.	0.00
1946	2	101.	137.	90.	400.	0.	11.	150.	411.	0.	0.	90.	0.	0.00
1946	3	175.	139.	90.	411.	3.	82.	139.	493.	0.	0.	93.	0.	0.00
1946	4	33.	108.	33.	493.	44.	-44.	57.	449.	0.	0.	77.	0.	0.00
1946	5	139.	89.	1.	449.	0.	49.	101.	498.	0.	0.	1.	0.	0.00
1946	6	30.	77.	31.	498.	28.	-28.	52.	470.	0.	0.	59.	0.	0.00
1946	7	49.	85.	49.	470.	16.	-16.	80.	454.	0.	0.	65.	0.	0.00
1946	8	89.	96.	89.	454.	2.	-2.	96.	452.	0.	0.	91.	0.	0.00
1946	9	11.	116.	11.	452.	34.	-34.	98.	418.	0.	0.	45.	0.	0.00
1946	10	276.	144.	90.	418.	6.	180.	132.	550.	48.	0.	96.	48.	0.17
1946	11	40.	152.	40.	550.	105.	-105.	0.	445.	0.	0.	145.	0.	0.00
1946	12	36.	154.	36.	445.	33.	-33.	105.	412.	0.	0.	69.	0.	0.00
1947	1	118.	164.	90.	412.	5.	23.	138.	434.	0.	0.	95.	0.	0.00
1947	2	248.	137.	90.	434.	10.	148.	116.	550.	32.	0.	100.	32.	0.13
1947	3	94.	139.	90.	550.	46.	-42.	0.	508.	0.	0.	136.	0.	0.00
1947	4	73.	108.	73.	508.	24.	-24.	42.	484.	0.	0.	97.	0.	0.00
1947	5	84.	89.	84.	484.	3.	-3.	66.	482.	0.	0.	87.	0.	0.00
1947	6	74.	77.	74.	482.	2.	-2.	68.	480.	0.	0.	76.	0.	0.00
1947	7	142.	85.	5.	480.	0.	52.	70.	532.	0.	0.	5.	0.	0.00
1947	8	69.	96.	74.	532.	18.	-18.	18.	514.	0.	0.	92.	0.	0.00
1947	9	287.	116.	90.	514.	19.	178.	36.	550.	142.	0.	109.	142.	0.50
1947	10	115.	144.	90.	550.	51.	-26.	0.	524.	0.	0.	141.	0.	0.00
1947	11	32.	152.	32.	524.	93.	-93.	26.	431.	0.	0.	125.	0.	0.00
1947	12	272.	154.	90.	431.	12.	170.	119.	550.	50.	0.	102.	50.	0.19
1948	1	255.	164.	90.	550.	70.	95.	0.	550.	95.	0.	160.	95.	0.37
1948	2	212.	137.	90.	550.	44.	78.	0.	550.	78.	0.	134.	78.	0.37
1948	3	112.	139.	90.	550.	46.	-24.	0.	526.	0.	0.	136.	0.	0.00
1948	4	225.	108.	90.	526.	14.	121.	24.	550.	97.	0.	104.	97.	0.43
1948	5	49.	89.	49.	550.	38.	-38.	0.	512.	0.	0.	87.	0.	0.00
1948	6	226.	77.	13.	512.	0.	136.	38.	550.	98.	0.	13.	98.	0.44
1948	7	28.	85.	41.	550.	41.	-41.	0.	509.	0.	0.	82.	0.	0.00
1948	8	44.	96.	44.	509.	35.	-35.	41.	473.	0.	0.	79.	0.	0.00
1948	9	120.	116.	90.	473.	12.	18.	77.	491.	0.	0.	102.	0.	0.00
1948	10	22.	144.	22.	491.	70.	-70.	59.	421.	0.	0.	92.	0.	0.00
1948	11	351.	152.	90.	421.	8.	253.	129.	550.	124.	0.	98.	124.	0.35
1948	12	256.	154.	90.	550.	60.	106.	0.	550.	106.	0.	150.	106.	0.41
1949	1	244.	164.	90.	550.	70.	84.	0.	550.	84.	0.	160.	84.	0.35
1949	2	218.	137.	90.	550.	44.	84.	0.	550.	84.	0.	134.	84.	0.38
1949	3	201.	139.	90.	550.	46.	65.	0.	550.	65.	0.	136.	65.	0.32
1949	4	211.	108.	90.	550.	17.	104.	0.	550.	104.	0.	107.	104.	0.49
1949	5	23.	89.	23.	550.	62.	-62.	0.	488.	0.	0.	85.	0.	0.00
1949	6	25.	77.	25.	488.	29.	-29.	62.	459.	0.	0.	54.	0.	0.00
1949	7	104.	85.	5.	459.	0.	14.	91.	473.	0.	0.	5.	0.	0.00
1949	8	203.	96.	90.	473.	3.	115.	77.	550.	39.	0.	93.	39.	0.19
1949	9	66.	116.	66.	550.	47.	-47.	0.	503.	0.	0.	113.	0.	0.00

132 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

1949	10	84.	144.	84.	503.	39.	-39.	47.	464.	0.	0.	123.	0.	0.00
1949	11	8.	152.	8.	464.	58.	-58.	86.	406.	0.	0.	66.	0.	0.00
1949	12	251.	154.	90.	406.	3.	158.	144.	550.	15.	0.	93.	15.	0.06
1950	1	249.	164.	90.	550.	70.	89.	0.	550.	89.	0.	160.	89.	0.36
1950	2	249.	137.	90.	550.	44.	115.	0.	550.	115.	0.	134.	115.	0.46
1950	3	334.	139.	90.	550.	46.	198.	0.	550.	198.	0.	136.	198.	0.59
1950	4	210.	108.	90.	550.	17.	103.	0.	550.	103.	0.	107.	103.	0.49
1950	5	17.	89.	17.	550.	68.	-68.	0.	482.	0.	0.	85.	0.	0.00
1950	6	67.	77.	67.	482.	5.	-5.	68.	477.	0.	0.	72.	0.	0.00
1950	7	259.	85.	5.	477.	0.	169.	73.	550.	96.	0.	5.	96.	0.37
1950	8	148.	96.	90.	550.	6.	57.	0.	550.	57.	0.	96.	57.	0.39
1950	9	155.	116.	90.	550.	24.	41.	0.	550.	41.	0.	114.	41.	0.26
1950	10	131.	144.	90.	550.	51.	-10.	0.	540.	0.	0.	141.	0.	0.00
1950	11	146.	152.	90.	540.	54.	2.	10.	542.	0.	0.	144.	0.	0.00
1950	12	132.	154.	90.	542.	57.	-15.	8.	527.	0.	0.	147.	0.	0.00
1951	1	203.	164.	90.	527.	59.	54.	23.	550.	31.	0.	149.	31.	0.15
1951	2	564.	137.	90.	550.	44.	430.	0.	550.	430.	0.	134.	430.	0.76
1951	3	305.	139.	90.	550.	46.	169.	0.	550.	169.	0.	136.	169.	0.55
1951	4	104.	108.	90.	550.	17.	-3.	0.	547.	0.	0.	107.	0.	0.00
1951	5	127.	89.	1.	547.	0.	37.	3.	550.	34.	0.	1.	34.	0.27
1951	6	74.	77.	75.	550.	2.	-2.	0.	548.	0.	0.	77.	0.	0.00
1951	7	104.	85.	5.	548.	0.	14.	2.	550.	12.	0.	5.	12.	0.12
1951	8	25.	96.	30.	550.	62.	-62.	0.	488.	0.	0.	92.	0.	0.00
1951	9	188.	116.	90.	488.	14.	84.	62.	550.	22.	0.	104.	22.	0.12
1951	10	43.	144.	43.	550.	95.	-95.	0.	455.	0.	0.	138.	0.	0.00
1951	11	20.	152.	20.	455.	46.	-46.	95.	410.	0.	0.	66.	0.	0.00
1951	12	3.	154.	3.	410.	9.	-9.	140.	401.	0.	0.	12.	0.	0.00
1952	1	582.	164.	90.	401.	0.	492.	149.	550.	342.	0.	90.	342.	0.59
1952	2	442.	137.	90.	550.	44.	308.	0.	550.	308.	0.	134.	308.	0.70
1952	3	290.	139.	90.	550.	46.	154.	0.	550.	154.	0.	136.	154.	0.53
1952	4	127.	108.	90.	550.	17.	20.	0.	550.	20.	0.	107.	20.	0.16
1952	5	25.	89.	25.	550.	60.	-60.	0.	490.	0.	0.	85.	0.	0.00
1952	6	153.	77.	13.	490.	0.	63.	60.	550.	3.	0.	13.	3.	0.02
1952	7	165.	85.	5.	550.	0.	88.	0.	550.	88.	0.	5.	88.	0.53
1952	8	130.	96.	90.	550.	6.	39.	0.	550.	39.	0.	96.	39.	0.30
1952	9	99.	116.	90.	550.	24.	-15.	0.	535.	0.	0.	114.	0.	0.00
1952	10	20.	144.	20.	535.	105.	-105.	15.	430.	0.	0.	125.	0.	0.00
1952	11	119.	152.	90.	430.	12.	17.	120.	447.	0.	0.	102.	0.	0.00
1952	12	155.	154.	90.	447.	19.	46.	103.	493.	0.	0.	109.	0.	0.00
1953	1	127.	164.	90.	493.	43.	-6.	57.	487.	0.	0.	133.	0.	0.00
1953	2	198.	137.	90.	487.	26.	82.	63.	550.	19.	0.	116.	19.	0.10
1953	3	193.	139.	90.	550.	46.	57.	0.	550.	57.	0.	136.	57.	0.30
1953	4	290.	108.	90.	550.	17.	183.	0.	550.	183.	0.	107.	183.	0.63
1953	5	69.	89.	69.	550.	19.	-19.	0.	531.	0.	0.	88.	0.	0.00
1953	6	117.	77.	13.	531.	0.	27.	19.	550.	8.	0.	13.	8.	0.07
1953	7	48.	85.	61.	550.	23.	-23.	0.	527.	0.	0.	84.	0.	0.00
1953	8	37.	96.	37.	527.	47.	-47.	23.	480.	0.	0.	84.	0.	0.00
1953	9	23.	116.	23.	480.	47.	-47.	70.	434.	0.	0.	70.	0.	0.00
1953	10	38.	144.	38.	434.	22.	-22.	116.	411.	0.	0.	60.	0.	0.00
1953	11	71.	152.	71.	411.	6.	-6.	139.	406.	0.	0.	77.	0.	0.00
1953	12	114.	154.	90.	406.	2.	22.	144.	427.	0.	0.	92.	0.	0.00
1954	1	109.	164.	90.	427.	13.	6.	123.	434.	0.	0.	103.	0.	0.00
1954	2	218.	137.	90.	434.	10.	118.	116.	550.	2.	0.	100.	2.	0.01
1954	3	114.	139.	90.	550.	46.	-22.	0.	528.	0.	0.	136.	0.	0.00
1954	4	452.	108.	90.	528.	14.	348.	22.	550.	326.	0.	104.	326.	0.72
1954	5	64.	89.	64.	550.	24.	-24.	0.	526.	0.	0.	88.	0.	0.00
1954	6	241.	77.	13.	526.	0.	151.	24.	550.	128.	0.	13.	128.	0.53
1954	7	38.	85.	51.	550.	32.	-32.	0.	518.	0.	0.	83.	0.	0.00
1954	8	135.	96.	90.	518.	4.	41.	32.	550.	9.	0.	94.	9.	0.06
1954	9	302.	116.	90.	550.	24.	188.	0.	550.	188.	0.	114.	188.	0.62
1954	10	132.	144.	90.	550.	51.	-9.	0.	541.	0.	0.	141.	0.	0.00
1954	11	48.	152.	48.	541.	92.	-92.	9.	449.	0.	0.	140.	0.	0.00
1954	12	582.	154.	90.	449.	20.	472.	101.	550.	371.	0.	110.	371.	0.64

1955	1	198.	164.	90.	550.	70.	38.	0.	550.	38.	0.	160.	38.	0.19
1955	2	84.	137.	84.	550.	50.	-50.	0.	500.	0.	0.	134.	0.	0.00
1955	3	389.	139.	90.	500.	31.	268.	50.	550.	218.	0.	121.	218.	0.56
1955	4	79.	108.	79.	550.	27.	-27.	0.	523.	0.	0.	106.	0.	0.00
1955	5	61.	89.	61.	523.	22.	-22.	27.	501.	0.	0.	83.	0.	0.00
1955	6	64.	77.	64.	501.	8.	-8.	49.	493.	0.	0.	72.	0.	0.00
1955	7	122.	85.	5.	493.	0.	32.	57.	525.	0.	0.	5.	0.	0.00
1955	8	122.	96.	90.	525.	5.	32.	25.	550.	7.	0.	95.	7.	0.06
1955	9	38.	116.	38.	550.	73.	-73.	0.	477.	0.	0.	111.	0.	0.00
1955	10	102.	144.	90.	477.	26.	-14.	73.	463.	0.	0.	116.	0.	0.00
1955	11	290.	152.	90.	463.	24.	176.	87.	550.	88.	0.	114.	88.	0.30
1955	12	221.	154.	90.	550.	60.	71.	0.	550.	71.	0.	150.	71.	0.32
1956	1	259.	164.	90.	550.	70.	99.	0.	550.	99.	0.	160.	99.	0.38
1956	2	343.	137.	90.	550.	44.	209.	0.	550.	209.	0.	134.	209.	0.61
1956	3	340.	139.	90.	550.	46.	204.	0.	550.	204.	0.	136.	204.	0.60
1956	4	335.	108.	90.	550.	17.	228.	0.	550.	228.	0.	107.	228.	0.68
1956	5	152.	89.	1.	550.	0.	62.	0.	550.	62.	0.	1.	62.	0.41
1956	6	28.	77.	29.	550.	45.	-45.	0.	505.	0.	0.	74.	0.	0.00
1956	7	191.	85.	5.	505.	0.	101.	45.	550.	56.	0.	5.	56.	0.29
1956	8	86.	96.	90.	550.	6.	-5.	0.	545.	0.	0.	96.	0.	0.00
1956	9	133.	116.	90.	545.	24.	19.	5.	550.	15.	0.	114.	15.	0.11
1956	10	274.	144.	90.	550.	51.	133.	0.	550.	133.	0.	141.	133.	0.49
1956	11	150.	152.	90.	550.	58.	2.	0.	550.	2.	0.	148.	2.	0.01
1956	12	5.	154.	5.	550.	140.	-140.	0.	410.	0.	0.	145.	0.	0.00
1957	1	401.	164.	90.	410.	5.	306.	140.	550.	166.	0.	95.	166.	0.41
1957	2	447.	137.	90.	550.	44.	313.	0.	550.	313.	0.	134.	313.	0.70
1957	3	132.	139.	90.	550.	46.	-4.	0.	546.	0.	0.	136.	0.	0.00
1957	4	48.	108.	48.	546.	55.	-55.	4.	491.	0.	0.	103.	0.	0.00
1957	5	74.	89.	74.	491.	9.	-9.	59.	483.	0.	0.	83.	0.	0.00
1957	6	241.	77.	13.	483.	0.	151.	67.	550.	84.	0.	13.	84.	0.35
1957	7	69.	85.	82.	550.	3.	-3.	0.	547.	0.	0.	85.	0.	0.00
1957	8	193.	96.	90.	547.	6.	97.	3.	550.	95.	0.	96.	95.	0.49
1957	9	94.	116.	90.	550.	24.	-20.	0.	530.	0.	0.	114.	0.	0.00
1957	10	48.	144.	48.	530.	78.	-78.	20.	452.	0.	0.	126.	0.	0.00
1957	11	61.	152.	61.	452.	29.	-29.	98.	422.	0.	0.	90.	0.	0.00
1957	12	69.	154.	69.	422.	12.	-12.	128.	410.	0.	0.	81.	0.	0.00
1958	1	31.	164.	31.	410.	9.	-9.	140.	402.	0.	0.	40.	0.	0.00
1958	2	307.	137.	90.	402.	1.	216.	148.	550.	68.	0.	91.	68.	0.22
1958	3	269.	139.	90.	550.	46.	133.	0.	550.	133.	0.	136.	133.	0.49
1958	4	137.	108.	90.	550.	17.	30.	0.	550.	30.	0.	107.	30.	0.22
1958	5	38.	89.	38.	550.	48.	-48.	0.	502.	0.	0.	86.	0.	0.00
1958	6	8.	77.	8.	502.	44.	-44.	48.	458.	0.	0.	52.	0.	0.00
1958	7	117.	85.	5.	458.	0.	27.	92.	485.	0.	0.	5.	0.	0.00
1958	8	117.	96.	90.	485.	3.	29.	65.	514.	0.	0.	93.	0.	0.00
1958	9	56.	116.	56.	514.	43.	-43.	36.	471.	0.	0.	99.	0.	0.00
1958	10	338.	144.	90.	471.	24.	224.	79.	550.	145.	0.	114.	145.	0.43
1958	11	137.	152.	90.	550.	58.	-11.	0.	539.	0.	0.	148.	0.	0.00
1958	12	76.	154.	76.	539.	68.	-68.	11.	471.	0.	0.	144.	0.	0.00
1959	1	203.	164.	90.	471.	33.	80.	79.	550.	1.	0.	123.	1.	0.01
1959	2	61.	137.	61.	550.	71.	-71.	0.	479.	0.	0.	132.	0.	0.00
1959	3	366.	139.	90.	479.	24.	252.	71.	550.	180.	0.	114.	180.	0.49
1959	4	117.	108.	90.	550.	17.	10.	0.	550.	10.	0.	107.	10.	0.09
1959	5	114.	89.	1.	550.	0.	24.	0.	550.	24.	0.	1.	24.	0.21
1959	6	84.	77.	8.	550.	0.	0.	0.	550.	0.	0.	8.	0.	0.00
1959	7	56.	85.	64.	550.	20.	-20.	0.	530.	0.	0.	84.	0.	0.00
1959	8	272.	96.	90.	530.	5.	177.	20.	550.	157.	0.	95.	157.	0.58
1959	9	185.	116.	90.	550.	24.	71.	0.	550.	71.	0.	114.	71.	0.38
1959	10	193.	144.	90.	550.	51.	52.	0.	550.	52.	0.	141.	52.	0.27
1959	11	41.	152.	41.	550.	104.	-104.	0.	446.	0.	0.	145.	0.	0.00
1959	12	107.	154.	90.	446.	18.	-1.	104.	444.	0.	0.	108.	0.	0.00
1960	1	69.	164.	69.	444.	26.	-26.	106.	418.	0.	0.	95.	0.	0.00
1960	2	323.	137.	90.	418.	5.	228.	132.	550.	96.	0.	95.	96.	0.30
1960	3	470.	139.	90.	550.	46.	334.	0.	550.	334.	0.	136.	334.	0.71

134 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

1960	4	193.	108.	90.	550.	17.	86.	0.	550.	86.	0.	107.	86.	0.45
1960	5	102.	89.	1.	550.	0.	12.	0.	550.	12.	0.	1.	12.	0.12
1960	6	163.	77.	13.	550.	0.	74.	0.	550.	74.	0.	13.	74.	0.45
1960	7	102.	85.	5.	550.	0.	25.	0.	550.	25.	0.	5.	25.	0.25
1960	8	33.	96.	38.	550.	55.	-55.	0.	495.	0.	0.	93.	0.	0.00
1960	9	53.	116.	53.	495.	38.	-38.	55.	458.	0.	0.	91.	0.	0.00
1960	10	135.	144.	90.	458.	20.	25.	92.	483.	0.	0.	110.	0.	0.00
1960	11	206.	152.	90.	483.	32.	84.	67.	550.	17.	0.	122.	17.	0.08
1960	12	231.	154.	90.	550.	60.	81.	0.	550.	81.	0.	150.	81.	0.35
1961	1	371.	164.	90.	550.	70.	211.	0.	550.	211.	0.	160.	211.	0.57
1961	2	229.	137.	90.	550.	44.	95.	0.	550.	95.	0.	134.	95.	0.41
1961	3	241.	139.	90.	550.	46.	105.	0.	550.	105.	0.	136.	105.	0.44
1961	4	112.	108.	90.	550.	17.	5.	0.	550.	5.	0.	107.	5.	0.05
1961	5	48.	89.	48.	550.	39.	-39.	0.	511.	0.	0.	87.	0.	0.00
1961	6	58.	77.	58.	511.	13.	-13.	39.	498.	0.	0.	71.	0.	0.00
1961	7	84.	85.	84.	498.	1.	-1.	52.	498.	0.	0.	85.	0.	0.00
1961	8	152.	96.	90.	498.	4.	58.	52.	550.	6.	0.	94.	6.	0.04
1961	9	89.	116.	89.	550.	25.	-25.	0.	525.	0.	0.	114.	0.	0.00
1961	10	64.	144.	64.	525.	62.	-62.	25.	462.	0.	0.	126.	0.	0.00
1961	11	201.	152.	90.	462.	24.	87.	88.	549.	0.	0.	114.	0.	0.00
1961	12	66.	154.	66.	549.	82.	-82.	1.	467.	0.	0.	148.	0.	0.00
1962	1	381.	164.	90.	467.	31.	260.	83.	550.	177.	0.	121.	177.	0.46
1962	2	188.	137.	90.	550.	44.	54.	0.	550.	54.	0.	134.	54.	0.29
1962	3	262.	139.	90.	550.	46.	126.	0.	550.	126.	0.	136.	126.	0.48
1962	4	112.	108.	90.	550.	17.	5.	0.	550.	5.	0.	107.	5.	0.05
1962	5	139.	89.	1.	550.	0.	49.	0.	550.	49.	0.	1.	49.	0.35
1962	6	74.	77.	75.	550.	2.	-2.	0.	548.	0.	0.	77.	0.	0.00
1962	7	84.	85.	84.	548.	1.	-1.	2.	547.	0.	0.	85.	0.	0.00
1962	8	53.	96.	53.	547.	40.	-40.	3.	508.	0.	0.	93.	0.	0.00
1962	9	41.	116.	41.	508.	51.	-51.	42.	457.	0.	0.	92.	0.	0.00
1962	10	71.	144.	71.	457.	26.	-26.	93.	431.	0.	0.	97.	0.	0.00
1962	11	117.	152.	90.	431.	12.	15.	119.	446.	0.	0.	102.	0.	0.00
1962	12	241.	154.	90.	446.	18.	133.	104.	550.	28.	0.	108.	28.	0.12
1963	1	145.	164.	90.	550.	70.	-15.	0.	535.	0.	0.	160.	0.	0.00
1963	2	147.	137.	90.	535.	40.	17.	15.	550.	3.	0.	130.	3.	0.02
1963	3	226.	139.	90.	550.	46.	90.	0.	550.	90.	0.	136.	90.	0.40
1963	4	69.	108.	69.	550.	37.	-37.	0.	513.	0.	0.	106.	0.	0.00
1963	5	203.	89.	1.	513.	0.	113.	37.	550.	76.	0.	1.	76.	0.38
1963	6	102.	77.	13.	550.	0.	13.	0.	550.	13.	0.	13.	13.	0.13
1963	7	61.	85.	74.	550.	10.	-10.	0.	540.	0.	0.	84.	0.	0.00
1963	8	150.	96.	90.	540.	5.	55.	10.	550.	44.	0.	95.	44.	0.30
1963	9	107.	116.	90.	550.	24.	-7.	0.	543.	0.	0.	114.	0.	0.00
1963	10	135.	144.	90.	543.	48.	-3.	7.	539.	0.	0.	138.	0.	0.00
1963	11	10.	152.	10.	539.	124.	-124.	11.	415.	0.	0.	134.	0.	0.00
1963	12	23.	154.	23.	415.	13.	-13.	135.	403.	0.	0.	36.	0.	0.00
1964	1	99.	164.	90.	403.	1.	8.	147.	410.	0.	0.	91.	0.	0.00
1964	2	290.	137.	90.	410.	3.	197.	140.	550.	57.	0.	93.	57.	0.20
1964	3	279.	139.	90.	550.	46.	143.	0.	550.	143.	0.	136.	143.	0.51
1964	4	142.	108.	90.	550.	17.	35.	0.	550.	35.	0.	107.	35.	0.25
1964	5	117.	89.	1.	550.	0.	27.	0.	550.	27.	0.	1.	27.	0.23
1964	6	8.	77.	9.	550.	64.	-64.	0.	486.	0.	0.	73.	0.	0.00
1964	7	257.	85.	5.	486.	0.	167.	64.	550.	103.	0.	5.	103.	0.40
1964	8	102.	96.	90.	550.	6.	11.	0.	550.	11.	0.	96.	11.	0.11
1964	9	191.	116.	90.	550.	24.	77.	0.	550.	77.	0.	114.	77.	0.40
1964	10	104.	144.	90.	550.	51.	-37.	0.	513.	0.	0.	141.	0.	0.00
1964	11	254.	152.	90.	513.	44.	120.	37.	550.	83.	0.	134.	83.	0.33
1964	12	216.	154.	90.	550.	60.	66.	0.	550.	66.	0.	150.	66.	0.30
1965	1	396.	164.	90.	550.	70.	236.	0.	550.	236.	0.	160.	236.	0.60
1965	2	290.	137.	90.	550.	44.	156.	0.	550.	156.	0.	134.	156.	0.54
1965	3	211.	139.	90.	550.	46.	75.	0.	550.	75.	0.	136.	75.	0.36
1965	4	41.	108.	41.	550.	63.	-63.	0.	487.	0.	0.	104.	0.	0.00
1965	5	211.	89.	1.	487.	0.	121.	63.	550.	58.	0.	1.	58.	0.27
1965	6	31.	77.	32.	550.	42.	-42.	0.	508.	0.	0.	74.	0.	0.00

1965	7	69.	85.	69.	508.	11.	-11.	42.	497.	0.	0.	80.	0.	0.00
1965	8	130.	96.	90.	497.	4.	36.	53.	533.	0.	0.	94.	0.	0.00
1965	9	76.	116.	76.	533.	33.	-33.	17.	500.	0.	0.	109.	0.	0.00
1965	10	130.	144.	90.	500.	34.	6.	50.	506.	0.	0.	124.	0.	0.00
1965	11	178.	152.	90.	506.	41.	47.	44.	550.	3.	0.	131.	3.	0.02
1965	12	18.	154.	18.	550.	128.	-128.	0.	422.	0.	0.	146.	0.	0.00
1966	1	86.	164.	86.	422.	11.	-11.	128.	411.	0.	0.	97.	0.	0.00
1966	2	97.	137.	90.	411.	3.	4.	139.	415.	0.	0.	93.	0.	0.00
1966	3	84.	139.	84.	415.	5.	-5.	135.	410.	0.	0.	89.	0.	0.00
1966	4	457.	108.	90.	410.	1.	366.	140.	550.	226.	0.	91.	226.	0.49
1966	5	64.	89.	64.	550.	24.	-24.	0.	526.	0.	0.	88.	0.	0.00
1966	6	46.	77.	46.	526.	25.	-25.	24.	502.	0.	0.	71.	0.	0.00
1966	7	51.	85.	51.	502.	22.	-22.	48.	480.	0.	0.	73.	0.	0.00
1966	8	46.	96.	46.	480.	25.	-25.	70.	455.	0.	0.	71.	0.	0.00
1966	9	180.	116.	90.	455.	9.	81.	95.	536.	0.	0.	99.	0.	0.00
1966	10	180.	144.	90.	536.	46.	44.	14.	550.	30.	0.	136.	30.	0.17
1966	11	28.	152.	28.	550.	117.	-117.	0.	433.	0.	0.	145.	0.	0.00
1966	12	160.	154.	90.	433.	13.	57.	117.	490.	0.	0.	103.	0.	0.00
1967	1	188.	164.	90.	490.	42.	56.	60.	546.	0.	0.	132.	0.	0.00
1967	2	104.	137.	90.	546.	43.	-29.	4.	517.	0.	0.	133.	0.	0.00
1967	3	244.	139.	90.	517.	36.	118.	33.	550.	85.	0.	126.	85.	0.35
1967	4	203.	108.	90.	550.	17.	96.	0.	550.	96.	0.	107.	96.	0.47
1967	5	55.	89.	55.	550.	32.	-32.	0.	518.	0.	0.	87.	0.	0.00
1967	6	25.	77.	25.	518.	38.	-38.	32.	480.	0.	0.	63.	0.	0.00
1967	7	64.	85.	64.	480.	10.	-10.	70.	469.	0.	0.	74.	0.	0.00
1967	8	32.	96.	32.	469.	28.	-28.	81.	441.	0.	0.	60.	0.	0.00
1967	9	152.	116.	90.	441.	7.	55.	109.	497.	0.	0.	97.	0.	0.00
1967	10	147.	144.	90.	497.	33.	24.	53.	521.	0.	0.	123.	0.	0.00
1967	11	25.	152.	25.	521.	96.	-96.	29.	425.	0.	0.	121.	0.	0.00
1967	12	15.	154.	15.	425.	22.	-22.	125.	403.	0.	0.	37.	0.	0.00
1968	1	528.	164.	90.	403.	1.	437.	147.	550.	290.	0.	91.	290.	0.55
1968	2	244.	137.	90.	550.	44.	110.	0.	550.	110.	0.	134.	110.	0.45
1968	3	297.	139.	90.	550.	46.	161.	0.	550.	161.	0.	136.	161.	0.54
1968	4	97.	108.	90.	550.	17.	-10.	0.	540.	0.	0.	107.	0.	0.00
1968	5	59.	89.	59.	540.	26.	-26.	10.	514.	0.	0.	85.	0.	0.00
1968	6	86.	77.	9.	514.	0.	0.	36.	514.	0.	0.	9.	0.	0.00
1968	7	28.	85.	37.	514.	34.	-34.	36.	480.	0.	0.	71.	0.	0.00
1968	8	203.	96.	90.	480.	3.	110.	70.	550.	40.	0.	93.	40.	0.19
1968	9	91.	116.	90.	550.	24.	-23.	0.	527.	0.	0.	114.	0.	0.00
1968	10	94.	144.	90.	527.	43.	-39.	23.	488.	0.	0.	133.	0.	0.00
1968	11	25.	152.	25.	488.	70.	-70.	62.	418.	0.	0.	95.	0.	0.00
1968	12	51.	154.	51.	418.	12.	-12.	132.	406.	0.	0.	63.	0.	0.00
1969	1	178.	164.	90.	406.	3.	85.	144.	491.	0.	0.	93.	0.	0.00
1969	2	297.	137.	90.	491.	27.	180.	59.	550.	121.	0.	117.	121.	0.41
1969	3	348.	139.	90.	550.	46.	212.	0.	550.	212.	0.	136.	212.	0.61
1969	4	84.	108.	84.	550.	23.	-23.	0.	527.	0.	0.	107.	0.	0.00
1969	5	23.	89.	23.	527.	53.	-53.	23.	475.	0.	0.	76.	0.	0.00
1969	6	43.	77.	43.	475.	16.	-16.	75.	459.	0.	0.	59.	0.	0.00
1969	7	137.	85.	5.	459.	0.	47.	91.	506.	0.	0.	5.	0.	0.00
1969	8	18.	96.	23.	506.	48.	-48.	44.	457.	0.	0.	71.	0.	0.00
1969	9	132.	116.	90.	457.	9.	33.	93.	490.	0.	0.	99.	0.	0.00
1969	10	51.	144.	51.	490.	52.	-52.	60.	438.	0.	0.	103.	0.	0.00
1969	11	51.	152.	51.	438.	24.	-24.	112.	414.	0.	0.	75.	0.	0.00
1969	12	5.	154.	5.	414.	13.	-13.	136.	401.	0.	0.	18.	0.	0.00
1970	1	180.	164.	90.	401.	0.	90.	149.	490.	0.	0.	90.	0.	0.00
1970	2	373.	137.	90.	490.	27.	256.	60.	550.	197.	0.	117.	197.	0.53
1970	3	137.	139.	90.	550.	46.	1.	0.	550.	1.	0.	136.	1.	0.01
1970	4	112.	108.	90.	550.	17.	5.	0.	550.	5.	0.	107.	5.	0.05
1970	5	97.	89.	1.	550.	0.	7.	0.	550.	7.	0.	1.	7.	0.07
1970	6	84.	77.	8.	550.	0.	0.	0.	550.	0.	0.	8.	0.	0.00
1970	7	64.	85.	72.	550.	12.	-12.	0.	538.	0.	0.	84.	0.	0.00
1970	8	56.	96.	56.	538.	35.	-35.	12.	503.	0.	0.	91.	0.	0.00
1970	9	41.	116.	41.	503.	49.	-49.	47.	455.	0.	0.	90.	0.	0.00

136 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

1970	10	373.	144.	90.	455.	19.	264.	95.	550.	169.	0.	109.	169.	0.45
1970	11	107.	152.	90.	550.	58.	-41.	0.	509.	0.	0.	148.	0.	0.00
1970	12	353.	154.	90.	509.	44.	219.	41.	550.	178.	0.	134.	178.	0.50
1971	1	187.	164.	90.	550.	70.	27.	0.	550.	27.	0.	160.	27.	0.15
1971	2	210.	137.	90.	550.	44.	76.	0.	550.	76.	0.	134.	76.	0.36
1971	3	248.	139.	90.	550.	46.	112.	0.	550.	112.	0.	136.	112.	0.45
1971	4	176.	108.	90.	550.	17.	69.	0.	550.	69.	0.	107.	69.	0.39
1971	5	188.	89.	1.	550.	0.	98.	0.	550.	98.	0.	1.	98.	0.52
1971	6	36.	77.	37.	550.	38.	-38.	0.	512.	0.	0.	75.	0.	0.00
1971	7	18.	85.	18.	512.	47.	-47.	38.	465.	0.	0.	65.	0.	0.00
1971	8	112.	96.	90.	465.	2.	20.	85.	485.	0.	0.	92.	0.	0.00
1971	9	198.	116.	90.	485.	14.	94.	65.	550.	29.	0.	104.	29.	0.15
1971	10	131.	144.	90.	550.	51.	-10.	0.	540.	0.	0.	141.	0.	0.00
1971	11	368.	152.	90.	540.	54.	224.	10.	550.	214.	0.	144.	214.	0.58
1971	12	783.	154.	90.	550.	60.	633.	0.	550.	633.	0.	150.	633.	0.81
1972	1	197.	164.	90.	550.	70.	37.	0.	550.	37.	0.	160.	37.	0.19
1972	2	162.	137.	90.	550.	44.	28.	0.	550.	28.	0.	134.	28.	0.17
1972	3	326.	139.	90.	550.	46.	190.	0.	550.	190.	0.	136.	190.	0.58
1972	4	124.	108.	90.	550.	17.	17.	0.	550.	17.	0.	107.	17.	0.14
1972	5	166.	89.	1.	550.	0.	76.	0.	550.	76.	0.	1.	76.	0.46
1972	6	151.	77.	13.	550.	0.	62.	0.	550.	62.	0.	13.	62.	0.41
1972	7	160.	85.	5.	550.	0.	83.	0.	550.	83.	0.	5.	83.	0.52
1972	8	209.	96.	90.	550.	6.	118.	0.	550.	118.	0.	96.	118.	0.57
1972	9	341.	116.	90.	550.	24.	227.	0.	550.	227.	0.	114.	227.	0.66
1972	10	340.	144.	90.	550.	51.	199.	0.	550.	199.	0.	141.	199.	0.59
1972	11	33.	152.	33.	550.	112.	-112.	0.	438.	0.	0.	145.	0.	0.00
1972	12	167.	154.	90.	438.	15.	62.	112.	500.	0.	0.	105.	0.	0.00
1973	1	35.	164.	35.	500.	81.	-81.	50.	419.	0.	0.	116.	0.	0.00
1973	2	256.	137.	90.	419.	6.	160.	131.	550.	29.	0.	96.	29.	0.12
1973	3	205.	139.	90.	550.	46.	69.	0.	550.	69.	0.	136.	69.	0.34
1973	4	303.	108.	90.	550.	17.	196.	0.	550.	196.	0.	107.	196.	0.65
1973	5	37.	89.	37.	550.	49.	-49.	0.	501.	0.	0.	86.	0.	0.00
1973	6	103.	77.	13.	501.	0.	13.	49.	514.	0.	0.	13.	0.	0.00
1973	7	108.	85.	5.	514.	0.	31.	36.	545.	0.	0.	5.	0.	0.00
1973	8	25.	96.	30.	545.	60.	-60.	5.	485.	0.	0.	90.	0.	0.00
1973	9	207.	116.	90.	485.	14.	103.	65.	550.	38.	0.	104.	38.	0.18
1973	10	112.	144.	90.	550.	51.	-29.	0.	521.	0.	0.	141.	0.	0.00
1973	11	343.	152.	90.	521.	47.	206.	29.	550.	177.	0.	137.	177.	0.52
1973	12	294.	154.	90.	550.	60.	144.	0.	550.	144.	0.	150.	144.	0.49
1974	1	243.	164.	90.	550.	70.	83.	0.	550.	83.	0.	160.	83.	0.34
1974	2	462.	137.	90.	550.	44.	328.	0.	550.	328.	0.	134.	328.	0.71
1974	3	279.	139.	90.	550.	46.	143.	0.	550.	143.	0.	136.	143.	0.51
1974	4	346.	108.	90.	550.	17.	239.	0.	550.	239.	0.	107.	239.	0.69
1974	5	78.	89.	78.	550.	10.	-10.	0.	540.	0.	0.	88.	0.	0.00
1974	6	115.	77.	13.	540.	0.	25.	10.	550.	15.	0.	13.	15.	0.13
1974	7	67.	85.	80.	550.	5.	-5.	0.	545.	0.	0.	85.	0.	0.00
1974	8	90.	96.	90.	545.	5.	-5.	5.	540.	0.	0.	95.	0.	0.00
1974	9	196.	116.	90.	540.	23.	83.	10.	550.	73.	0.	113.	73.	0.37
1974	10	452.	144.	90.	550.	51.	311.	0.	550.	311.	0.	141.	311.	0.69
1974	11	151.	152.	90.	550.	58.	3.	0.	550.	3.	0.	148.	3.	0.02
1974	12	74.	154.	74.	550.	75.	-75.	0.	475.	0.	0.	149.	0.	0.00
1975	1	203.	164.	90.	475.	35.	78.	75.	550.	3.	0.	125.	3.	0.02
1975	2	83.	137.	83.	550.	51.	-51.	0.	499.	0.	0.	134.	0.	0.00
1975	3	174.	139.	90.	499.	30.	54.	51.	550.	3.	0.	120.	3.	0.02
1975	4	163.	108.	90.	550.	17.	56.	0.	550.	56.	0.	107.	56.	0.34
1975	5	140.	89.	1.	550.	0.	50.	0.	550.	50.	0.	1.	50.	0.36
1975	6	135.	77.	13.	550.	0.	46.	0.	550.	46.	0.	13.	46.	0.34
1975	7	95.	85.	5.	550.	0.	18.	0.	550.	18.	0.	5.	18.	0.19
1975	8	160.	96.	90.	550.	6.	69.	0.	550.	69.	0.	96.	69.	0.43
1975	9	84.	116.	84.	550.	30.	-30.	0.	520.	0.	0.	114.	0.	0.00
1975	10	133.	144.	90.	520.	41.	2.	30.	522.	0.	0.	131.	0.	0.00
1975	11	322.	152.	90.	522.	48.	184.	28.	550.	157.	0.	138.	157.	0.49
1975	12	54.	154.	54.	550.	94.	-94.	0.	456.	0.	0.	148.	0.	0.00

1976	1	252.	164.	90.	456.	26.	136.	94.	550.	42.	0.	116.	42.	0.17
1976	2	371.	137.	90.	550.	44.	237.	0.	550.	237.	0.	134.	237.	0.64
1976	3	231.	139.	90.	550.	46.	95.	0.	550.	95.	0.	136.	95.	0.41
1976	4	365.	108.	90.	550.	17.	258.	0.	550.	258.	0.	107.	258.	0.71
1976	5	94.	89.	1.	550.	0.	4.	0.	550.	4.	0.	1.	4.	0.04
1976	6	50.	77.	51.	550.	24.	-24.	0.	526.	0.	0.	75.	0.	0.00
1976	7	61.	85.	61.	526.	19.	-19.	24.	507.	0.	0.	80.	0.	0.00
1976	8	59.	96.	59.	507.	25.	-25.	43.	482.	0.	0.	84.	0.	0.00
1976	9	212.	116.	90.	482.	13.	109.	68.	550.	41.	0.	103.	41.	0.19
1976	10	129.	144.	90.	550.	51.	-12.	0.	538.	0.	0.	141.	0.	0.00
1976	11	246.	152.	90.	538.	54.	102.	12.	550.	91.	0.	144.	91.	0.37
1976	12	46.	154.	46.	550.	102.	-102.	0.	448.	0.	0.	148.	0.	0.00
1977	1	377.	164.	90.	448.	22.	265.	102.	550.	163.	0.	112.	163.	0.43
1977	2	284.	137.	90.	550.	44.	150.	0.	550.	150.	0.	134.	150.	0.53
1977	3	266.	139.	90.	550.	46.	130.	0.	550.	130.	0.	136.	130.	0.49
1977	4	43.	108.	43.	550.	61.	-61.	0.	489.	0.	0.	104.	0.	0.00
1977	5	46.	89.	46.	489.	24.	-24.	61.	465.	0.	0.	70.	0.	0.00
1977	6	17.	77.	17.	465.	24.	-24.	85.	441.	0.	0.	41.	0.	0.00
1977	7	73.	85.	73.	441.	3.	-3.	109.	437.	0.	0.	76.	0.	0.00
1977	8	130.	96.	90.	437.	1.	39.	113.	476.	0.	0.	91.	0.	0.00
1977	9	56.	116.	56.	476.	29.	-29.	74.	447.	0.	0.	85.	0.	0.00
1977	10	17.	144.	17.	447.	38.	-38.	103.	410.	0.	0.	55.	0.	0.00
1977	11	6.	152.	6.	410.	9.	-9.	140.	401.	0.	0.	15.	0.	0.00
1977	12	48.	154.	48.	401.	1.	-1.	149.	400.	0.	0.	49.	0.	0.00
1978	1	40.	164.	40.	400.	0.	0.	150.	400.	0.	0.	40.	0.	0.00
1978	2	151.	137.	90.	400.	0.	61.	150.	461.	0.	0.	90.	0.	0.00
1978	3	214.	139.	90.	461.	19.	105.	89.	550.	16.	0.	109.	16.	0.08
1978	4	248.	108.	90.	550.	17.	141.	0.	550.	141.	0.	107.	141.	0.57
1978	5	204.	89.	1.	550.	0.	114.	0.	550.	114.	0.	1.	114.	0.56
1978	6	46.	77.	47.	550.	28.	-28.	0.	522.	0.	0.	75.	0.	0.00
1978	7	82.	85.	82.	522.	2.	-2.	28.	520.	0.	0.	84.	0.	0.00
1978	8	250.	96.	90.	520.	4.	156.	30.	550.	125.	0.	94.	125.	0.50
1978	9	102.	116.	90.	550.	24.	-12.	0.	538.	0.	0.	114.	0.	0.00
1978	10	272.	144.	90.	538.	47.	135.	12.	550.	123.	0.	137.	123.	0.45
1978	11	229.	152.	90.	550.	58.	81.	0.	550.	81.	0.	148.	81.	0.35
1978	12	92.	154.	90.	550.	60.	-58.	0.	492.	0.	0.	150.	0.	0.00
1979	1	115.	164.	90.	492.	43.	-18.	58.	474.	0.	0.	133.	0.	0.00
1979	2	77.	137.	77.	474.	28.	-28.	76.	446.	0.	0.	105.	0.	0.00
1979	3	261.	139.	90.	446.	14.	157.	104.	550.	53.	0.	104.	53.	0.20
1979	4	183.	108.	90.	550.	17.	76.	0.	550.	76.	0.	107.	76.	0.42
1979	5	208.	89.	1.	550.	0.	118.	0.	550.	118.	0.	1.	118.	0.57
1979	6	243.	77.	13.	550.	0.	154.	0.	550.	154.	0.	13.	154.	0.63
1979	7	75.	85.	3.	550.	0.	0.	0.	550.	0.	0.	3.	0.	0.00
1979	8	237.	96.	90.	550.	6.	144.	0.	550.	144.	0.	96.	144.	0.61
1979	9	271.	116.	90.	550.	24.	157.	0.	550.	157.	0.	114.	157.	0.58
1979	10	60.	144.	60.	550.	79.	-79.	0.	471.	0.	0.	139.	0.	0.00
1979	11	133.	152.	90.	471.	28.	15.	79.	486.	0.	0.	118.	0.	0.00
1979	12	159.	154.	90.	486.	35.	34.	64.	521.	0.	0.	125.	0.	0.00
1980	1	164.	164.	90.	521.	56.	18.	29.	539.	0.	0.	146.	0.	0.00
1980	2	196.	137.	90.	539.	41.	66.	11.	550.	54.	0.	131.	54.	0.28
1980	3	204.	139.	90.	550.	46.	68.	0.	550.	68.	0.	136.	68.	0.33
1980	4	272.	108.	90.	550.	17.	165.	0.	550.	165.	0.	107.	165.	0.61
1980	5	32.	89.	32.	550.	54.	-54.	0.	496.	0.	0.	86.	0.	0.00
1980	6	170.	77.	13.	496.	0.	80.	54.	550.	26.	0.	13.	26.	0.15
1980	7	176.	85.	5.	550.	0.	99.	0.	550.	99.	0.	5.	99.	0.56
1980	8	158.	96.	90.	550.	6.	67.	0.	550.	67.	0.	96.	67.	0.43
1980	9	260.	116.	90.	550.	24.	145.	0.	550.	145.	0.	114.	145.	0.56
1980	10	500.	144.	90.	550.	51.	359.	0.	550.	359.	0.	141.	359.	0.72
1980	11	113.	152.	90.	550.	58.	-35.	0.	515.	0.	0.	148.	0.	0.00
1980	12	133.	154.	90.	515.	46.	-3.	35.	512.	0.	0.	136.	0.	0.00
1981	1	39.	164.	39.	512.	88.	-88.	38.	424.	0.	0.	127.	0.	0.00
1981	2	123.	137.	90.	424.	7.	26.	126.	450.	0.	0.	97.	0.	0.00
1981	3	173.	139.	90.	450.	15.	68.	100.	518.	0.	0.	105.	0.	0.00

138 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

1981	4	37.	108.	37.	518.	52.	-52.	32.	466.	0.	0.	89.	0.	0.00
1981	5	174.	89.	1.	466.	0.	84.	84.	550.	0.	0.	1.	0.	0.00
1981	6	68.	77.	70.	550.	7.	-7.	0.	543.	0.	0.	77.	0.	0.00
1981	7	25.	85.	25.	543.	53.	-53.	7.	489.	0.	0.	79.	0.	0.00
1981	8	89.	96.	89.	489.	4.	-4.	61.	486.	0.	0.	93.	0.	0.00
1981	9	108.	116.	90.	486.	14.	4.	64.	489.	0.	0.	104.	0.	0.00
1981	10	43.	144.	43.	489.	57.	-57.	61.	433.	0.	0.	99.	0.	0.00
1981	11	131.	152.	90.	433.	13.	28.	117.	461.	0.	0.	103.	0.	0.00
1981	12	135.	154.	90.	461.	24.	21.	89.	482.	0.	0.	114.	0.	0.00
1982	1	473.	164.	90.	482.	38.	345.	68.	550.	277.	0.	128.	277.	0.59
1982	2	370.	137.	90.	550.	44.	236.	0.	550.	236.	0.	134.	236.	0.64
1982	3	287.	139.	90.	550.	46.	151.	0.	550.	151.	0.	136.	151.	0.53
1982	4	200.	108.	90.	550.	17.	93.	0.	550.	93.	0.	107.	93.	0.47
1982	5	317.	89.	1.	550.	0.	227.	0.	550.	227.	0.	1.	227.	0.72
1982	6	79.	77.	3.	550.	0.	0.	0.	550.	0.	0.	3.	0.	0.00
1982	7	91.	85.	5.	550.	0.	4.	0.	550.	4.	0.	5.	4.	0.04
1982	8	169.	96.	90.	550.	6.	78.	0.	550.	78.	0.	96.	78.	0.46
1982	9	102.	116.	90.	550.	24.	-12.	0.	538.	0.	0.	114.	0.	0.00
1982	10	27.	144.	27.	538.	101.	-101.	12.	437.	0.	0.	128.	0.	0.00
1982	11	33.	152.	33.	437.	28.	-28.	113.	409.	0.	0.	60.	0.	0.00
1982	12	72.	154.	72.	409.	5.	-5.	141.	405.	0.	0.	77.	0.	0.00
1983	1	47.	164.	47.	405.	3.	-3.	145.	401.	0.	0.	50.	0.	0.00
1983	2	102.	137.	90.	401.	0.	11.	149.	412.	0.	0.	90.	0.	0.00
1983	3	92.	139.	90.	412.	4.	-2.	138.	411.	0.	0.	94.	0.	0.00
1983	4	18.	108.	18.	411.	6.	-6.	139.	405.	0.	0.	24.	0.	0.00
1983	5	25.	89.	25.	405.	2.	-2.	145.	403.	0.	0.	27.	0.	0.00
1983	6	53.	77.	53.	403.	0.	0.	147.	402.	0.	0.	53.	0.	0.00
1983	7	121.	85.	5.	402.	0.	31.	148.	433.	0.	0.	5.	0.	0.00
1983	8	50.	96.	55.	433.	9.	-9.	117.	424.	0.	0.	63.	0.	0.00
1983	9	59.	116.	59.	424.	9.	-9.	126.	416.	0.	0.	68.	0.	0.00
1983	10	122.	144.	90.	416.	5.	27.	134.	442.	0.	0.	95.	0.	0.00
1983	11	43.	152.	43.	442.	29.	-29.	108.	413.	0.	0.	72.	0.	0.00
1983	12	197.	154.	90.	413.	5.	102.	137.	515.	0.	0.	95.	0.	0.00
1984	1	273.	164.	90.	515.	54.	130.	35.	550.	95.	0.	144.	95.	0.35
1984	2	338.	137.	90.	550.	44.	204.	0.	550.	204.	0.	134.	204.	0.60
1984	3	64.	139.	64.	550.	70.	-70.	0.	480.	0.	0.	134.	0.	0.00
1984	4	190.	108.	90.	480.	9.	92.	70.	550.	21.	0.	99.	21.	0.11
1984	5	32.	89.	32.	550.	53.	-53.	0.	497.	0.	0.	86.	0.	0.00
1984	6	117.	77.	13.	497.	0.	27.	53.	524.	0.	0.	13.	0.	0.00
1984	7	44.	85.	57.	524.	22.	-22.	26.	502.	0.	0.	79.	0.	0.00
1984	8	60.	96.	60.	502.	23.	-23.	48.	479.	0.	0.	83.	0.	0.00
1984	9	158.	116.	90.	479.	13.	55.	71.	535.	0.	0.	103.	0.	0.00
1984	10	62.	144.	62.	535.	69.	-69.	15.	466.	0.	0.	131.	0.	0.00
1984	11	80.	152.	80.	466.	30.	-30.	84.	436.	0.	0.	109.	0.	0.00
1984	12	227.	154.	90.	436.	14.	123.	114.	550.	9.	0.	104.	9.	0.04
1985	1	85.	164.	85.	550.	75.	-75.	0.	475.	0.	0.	159.	0.	0.00
1985	2	108.	137.	90.	475.	22.	-4.	75.	471.	0.	0.	112.	0.	0.00
1985	3	253.	139.	90.	471.	22.	141.	79.	550.	62.	0.	112.	62.	0.24
1985	4	40.	108.	40.	550.	64.	-64.	0.	486.	0.	0.	104.	0.	0.00
1985	5	88.	89.	88.	486.	1.	-1.	64.	485.	0.	0.	88.	0.	0.00
1985	6	113.	77.	13.	485.	0.	23.	65.	508.	0.	0.	13.	0.	0.00
1985	7	49.	85.	62.	508.	16.	-16.	42.	492.	0.	0.	78.	0.	0.00
1985	8	39.	96.	39.	492.	33.	-33.	58.	459.	0.	0.	72.	0.	0.00
1985	9	21.	116.	21.	459.	35.	-35.	91.	424.	0.	0.	56.	0.	0.00
1985	10	29.	144.	29.	424.	17.	-17.	126.	407.	0.	0.	47.	0.	0.00
1985	11	22.	152.	22.	407.	6.	-6.	143.	401.	0.	0.	27.	0.	0.00
1985	12	313.	154.	90.	401.	1.	223.	149.	550.	74.	0.	91.	74.	0.24
1986	1	4.	164.	4.	550.	151.	-151.	0.	399.	0.	0.	154.	0.	0.00
1986	2	51.	137.	51.	399.	0.	0.	151.	400.	0.	0.	50.	0.	0.00
1986	3	156.	139.	90.	400.	0.	66.	150.	466.	0.	0.	90.	0.	0.00
1986	4	290.	108.	90.	466.	7.	192.	84.	550.	108.	0.	97.	108.	0.37
1986	5	122.	89.	1.	550.	0.	32.	0.	550.	32.	0.	1.	32.	0.26
1986	6	239.	77.	13.	550.	0.	150.	0.	550.	150.	0.	13.	150.	0.63

1986	7	84.	85.	5.	550.	0.	7.	0.	550.	7.	0.	5.	7.	0.09
1986	8	113.	96.	90.	550.	6.	22.	0.	550.	22.	0.	96.	22.	0.20
1986	9	28.	116.	28.	550.	83.	-83.	0.	467.	0.	0.	111.	0.	0.00
1986	10	74.	144.	74.	467.	29.	-29.	83.	438.	0.	0.	104.	0.	0.00
1986	11	23.	152.	23.	438.	31.	-31.	112.	407.	0.	0.	54.	0.	0.00
1986	12	100.	154.	90.	407.	3.	8.	143.	415.	0.	0.	93.	0.	0.00
1987	1	100.	164.	90.	415.	7.	4.	135.	418.	0.	0.	97.	0.	0.00
1987	2	225.	137.	90.	418.	5.	130.	132.	548.	0.	0.	95.	0.	0.00
1987	3	259.	139.	90.	548.	45.	123.	2.	550.	121.	0.	135.	121.	0.47
1987	4	21.	108.	21.	550.	82.	-82.	0.	468.	0.	0.	103.	0.	0.00
1987	5	86.	89.	86.	468.	1.	-1.	82.	466.	0.	0.	87.	0.	0.00
1987	6	42.	77.	42.	466.	15.	-15.	84.	452.	0.	0.	56.	0.	0.00
1987	7	83.	85.	83.	452.	1.	-1.	98.	451.	0.	0.	84.	0.	0.00
1987	8	16.	96.	16.	451.	26.	-26.	99.	426.	0.	0.	42.	0.	0.00
1987	9	66.	116.	66.	426.	8.	-8.	124.	417.	0.	0.	74.	0.	0.00
1987	10	58.	144.	58.	417.	9.	-9.	133.	408.	0.	0.	67.	0.	0.00
1987	11	31.	152.	31.	408.	6.	-6.	142.	402.	0.	0.	37.	0.	0.00
1987	12	150.	154.	90.	402.	1.	59.	148.	461.	0.	0.	91.	0.	0.00
1988	1	172.	164.	90.	461.	28.	54.	89.	515.	0.	0.	118.	0.	0.00
1988	2	215.	137.	90.	515.	34.	91.	35.	550.	56.	0.	124.	56.	0.26
1988	3	107.	139.	90.	550.	46.	-29.	0.	521.	0.	0.	136.	0.	0.00
1988	4	188.	108.	90.	521.	14.	85.	29.	550.	56.	0.	104.	56.	0.30
1988	5	49.	89.	49.	550.	38.	-38.	0.	512.	0.	0.	87.	0.	0.00
1988	6	19.	77.	19.	512.	41.	-41.	38.	472.	0.	0.	60.	0.	0.00
1988	7	105.	85.	5.	472.	0.	15.	78.	487.	0.	0.	5.	0.	0.00
1988	8	67.	96.	72.	487.	13.	-13.	63.	474.	0.	0.	85.	0.	0.00
1988	9	371.	116.	90.	474.	12.	269.	76.	550.	193.	0.	102.	193.	0.52
1988	10	105.	144.	90.	550.	51.	-35.	0.	515.	0.	0.	141.	0.	0.00
1988	11	28.	152.	28.	515.	89.	-89.	35.	426.	0.	0.	117.	0.	0.00
1988	12	206.	154.	90.	426.	10.	106.	124.	531.	0.	0.	100.	0.	0.00
1989	1	132.	164.	90.	531.	61.	-19.	19.	513.	0.	0.	151.	0.	0.00
1989	2	662.	137.	90.	513.	33.	538.	37.	550.	501.	0.	123.	501.	0.76
1989	3	164.	139.	90.	550.	46.	28.	0.	550.	28.	0.	136.	28.	0.17
1989	4	172.	108.	90.	550.	17.	65.	0.	550.	65.	0.	107.	65.	0.38
1989	5	200.	89.	1.	550.	0.	110.	0.	550.	110.	0.	1.	110.	0.55
1989	6	50.	77.	50.	550.	25.	-25.	0.	525.	0.	0.	75.	0.	0.00
1989	7	137.	85.	5.	525.	0.	47.	25.	550.	22.	0.	5.	22.	0.16
1989	8	79.	96.	84.	550.	11.	-11.	0.	539.	0.	0.	95.	0.	0.00
1989	9	82.	116.	82.	539.	30.	-30.	11.	509.	0.	0.	112.	0.	0.00
1989	10	111.	144.	90.	509.	37.	-16.	41.	494.	0.	0.	127.	0.	0.00
1989	11	124.	152.	90.	494.	36.	-2.	56.	492.	0.	0.	126.	0.	0.00
1989	12	100.	154.	90.	492.	37.	-27.	58.	464.	0.	0.	127.	0.	0.00
1990	1	192.	164.	90.	464.	30.	72.	86.	536.	0.	0.	120.	0.	0.00
1990	2	49.	137.	49.	536.	75.	-75.	14.	461.	0.	0.	124.	0.	0.00
1990	3	162.	139.	90.	461.	19.	53.	89.	514.	0.	0.	109.	0.	0.00
1990	4	113.	108.	90.	514.	13.	10.	36.	524.	0.	0.	103.	0.	0.00
1990	5	305.	89.	1.	524.	0.	215.	26.	550.	189.	0.	1.	189.	0.62
1990	6	108.	77.	13.	550.	0.	19.	0.	550.	19.	0.	13.	19.	0.18
1990	7	179.	85.	5.	550.	0.	102.	0.	550.	102.	0.	5.	102.	0.57
1990	8	229.	96.	90.	550.	6.	139.	0.	550.	139.	0.	96.	139.	0.60
1990	9	256.	116.	90.	550.	24.	142.	0.	550.	142.	0.	114.	142.	0.55
1990	10	24.	144.	24.	550.	113.	-113.	0.	437.	0.	0.	137.	0.	0.00
1990	11	263.	152.	90.	437.	14.	159.	113.	550.	46.	0.	104.	46.	0.17
1990	12	158.	154.	90.	550.	60.	8.	0.	550.	8.	0.	150.	8.	0.05
1991	1	429.	164.	90.	550.	70.	269.	0.	550.	269.	0.	160.	269.	0.63
1991	2	177.	137.	90.	550.	44.	43.	0.	550.	43.	0.	134.	43.	0.24
1991	3	146.	139.	90.	550.	46.	10.	0.	550.	10.	0.	136.	10.	0.07
1991	4	131.	108.	90.	550.	17.	24.	0.	550.	24.	0.	107.	24.	0.18
1991	5	46.	89.	46.	550.	40.	-40.	0.	510.	0.	0.	86.	0.	0.00
1991	6	98.	77.	13.	510.	0.	8.	40.	518.	0.	0.	13.	0.	0.00
1991	7	36.	85.	49.	518.	27.	-27.	32.	491.	0.	0.	75.	0.	0.00
1991	8	288.	96.	90.	491.	3.	194.	59.	550.	135.	0.	93.	135.	0.47
1991	9	47.	116.	47.	550.	65.	-65.	0.	485.	0.	0.	112.	0.	0.00

140 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

1991	10	123.	144.	90.	485.	29.	5.	65.	490.	0.	0.	119.	0.	0.00
1991	11	26.	152.	26.	490.	71.	-71.	60.	419.	0.	0.	97.	0.	0.00
1991	12	11.	154.	11.	419.	17.	-17.	131.	402.	0.	0.	28.	0.	0.00
1992	1	41.	164.	41.	402.	1.	-1.	148.	400.	0.	0.	43.	0.	0.00
1992	2	54.	137.	54.	400.	0.	0.	150.	400.	0.	0.	54.	0.	0.00
1992	3	28.	139.	28.	400.	0.	0.	150.	400.	0.	0.	28.	0.	0.00
1992	4	91.	108.	90.	400.	0.	1.	150.	401.	0.	0.	90.	0.	0.00
1992	5	26.	89.	26.	401.	1.	-1.	149.	401.	0.	0.	27.	0.	0.00
1992	6	52.	77.	52.	401.	0.	0.	149.	401.	0.	0.	52.	0.	0.00
1992	7	164.	85.	5.	401.	0.	74.	149.	474.	0.	0.	5.	0.	0.00
1992	8	173.	96.	90.	474.	3.	85.	76.	550.	10.	0.	93.	10.	0.06
1992	9	51.	116.	51.	550.	61.	-61.	0.	489.	0.	0.	112.	0.	0.00
1992	10	186.	144.	90.	489.	30.	66.	61.	550.	5.	0.	120.	5.	0.03
1992	11	44.	152.	44.	550.	102.	-102.	0.	448.	0.	0.	146.	0.	0.00
1992	12	150.	154.	90.	448.	19.	41.	102.	489.	0.	0.	109.	0.	0.00
1993	1	0.	164.	0.	489.	92.	-92.	61.	398.	0.	0.	92.	0.	NaN
1993	2	147.	137.	90.	398.	-1.	58.	152.	455.	0.	0.	89.	0.	0.00
1993	3	212.	139.	90.	455.	17.	105.	95.	550.	11.	0.	107.	11.	0.05
1993	4	97.	108.	90.	550.	17.	-10.	0.	540.	0.	0.	107.	0.	0.00
1993	5	125.	89.	1.	540.	0.	35.	10.	550.	25.	0.	1.	25.	0.20
1993	6	42.	77.	43.	550.	32.	-32.	0.	518.	0.	0.	75.	0.	0.00
1993	7	56.	85.	56.	518.	21.	-21.	32.	497.	0.	0.	77.	0.	0.00
1993	8	366.	96.	90.	497.	4.	272.	53.	550.	219.	0.	94.	219.	0.60
1993	9	121.	116.	90.	550.	24.	7.	0.	550.	7.	0.	114.	7.	0.06
1993	10	33.	144.	33.	550.	104.	-104.	0.	446.	0.	0.	137.	0.	0.00
1993	11	103.	152.	90.	446.	18.	-5.	104.	441.	0.	0.	108.	0.	0.00
1993	12	128.	154.	90.	441.	16.	22.	109.	463.	0.	0.	106.	0.	0.00
1994	1	248.	164.	90.	463.	29.	129.	87.	550.	42.	0.	119.	42.	0.17
1994	2	185.	137.	90.	550.	44.	51.	0.	550.	51.	0.	134.	51.	0.28
1994	3	44.	139.	44.	550.	89.	-89.	0.	461.	0.	0.	133.	0.	0.00
1994	4	283.	108.	90.	461.	7.	187.	89.	550.	97.	0.	97.	97.	0.34
1994	5	99.	89.	1.	550.	0.	9.	0.	550.	9.	0.	1.	9.	0.09
1994	6	168.	77.	13.	550.	0.	78.	0.	550.	78.	0.	13.	78.	0.47
1994	7	173.	85.	5.	550.	0.	96.	0.	550.	96.	0.	5.	96.	0.55
1994	8	57.	96.	62.	550.	32.	-32.	0.	518.	0.	0.	94.	0.	0.00
1994	9	141.	116.	90.	518.	19.	32.	32.	549.	0.	0.	109.	0.	0.00
1994	10	31.	144.	31.	549.	106.	-106.	1.	444.	0.	0.	137.	0.	0.00
1994	11	180.	152.	90.	444.	17.	73.	106.	517.	0.	0.	107.	0.	0.00
1994	12	174.	154.	90.	517.	47.	37.	33.	550.	3.	0.	137.	3.	0.02
1995	1	133.	164.	90.	550.	70.	-27.	0.	523.	0.	0.	160.	0.	0.00
1995	2	136.	137.	90.	523.	36.	10.	27.	534.	0.	0.	126.	0.	0.00
1995	3	189.	139.	90.	534.	41.	58.	16.	550.	42.	0.	131.	42.	0.22
1995	4	86.	108.	86.	550.	21.	-21.	0.	529.	0.	0.	107.	0.	0.00
1995	5	38.	89.	38.	529.	41.	-41.	21.	488.	0.	0.	79.	0.	0.00
1995	6	164.	77.	13.	488.	0.	74.	62.	550.	12.	0.	13.	12.	0.07
1995	7	129.	85.	5.	550.	0.	52.	0.	550.	52.	0.	5.	52.	0.40
1995	8	21.	96.	26.	550.	65.	-65.	0.	485.	0.	0.	92.	0.	0.00
1995	9	56.	116.	56.	485.	32.	-32.	65.	453.	0.	0.	88.	0.	0.00
1995	10	31.	144.	31.	453.	37.	-37.	97.	415.	0.	0.	68.	0.	0.00
1995	11	133.	152.	90.	415.	6.	37.	135.	453.	0.	0.	96.	0.	0.00
1995	12	29.	154.	29.	453.	41.	-41.	97.	411.	0.	0.	70.	0.	0.00
1996	1	532.	164.	90.	411.	5.	437.	139.	550.	299.	0.	95.	299.	0.56
1996	2	42.	137.	42.	550.	89.	-89.	0.	461.	0.	0.	131.	0.	0.00
1996	3	216.	139.	90.	461.	19.	107.	89.	550.	18.	0.	109.	18.	0.08
1996	4	112.	108.	90.	550.	17.	5.	0.	550.	5.	0.	107.	5.	0.05
1996	5	169.	89.	1.	550.	0.	79.	0.	550.	79.	0.	1.	79.	0.47
1996	6	215.	77.	13.	550.	0.	126.	0.	550.	126.	0.	13.	126.	0.59
1996	7	39.	85.	52.	550.	31.	-31.	0.	519.	0.	0.	83.	0.	0.00
1996	8	95.	96.	90.	519.	4.	0.	31.	519.	0.	0.	94.	0.	0.00
1996	9	77.	116.	77.	519.	29.	-29.	31.	490.	0.	0.	106.	0.	0.00
1996	10	108.	144.	90.	490.	30.	-13.	60.	477.	0.	0.	120.	0.	0.00
1996	11	54.	152.	54.	477.	47.	-47.	73.	430.	0.	0.	102.	0.	0.00
1996	12	212.	154.	90.	430.	12.	110.	120.	540.	0.	0.	102.	0.	0.00

1997	1	255.	164.	90.	540.	65.	101.	10.	550.	90.	0.	155.	90.	0.35
1997	2	356.	137.	90.	550.	44.	221.	0.	550.	221.	0.	134.	221.	0.62
1997	3	164.	139.	90.	550.	46.	28.	0.	550.	28.	0.	136.	28.	0.17
1997	4	163.	108.	90.	550.	17.	56.	0.	550.	56.	0.	107.	56.	0.34
1997	5	72.	89.	72.	550.	16.	-16.	0.	534.	0.	0.	88.	0.	0.00
1997	6	17.	77.	17.	534.	50.	-50.	16.	484.	0.	0.	67.	0.	0.00
1997	7	72.	85.	72.	484.	7.	-7.	66.	477.	0.	0.	79.	0.	0.00
1997	8	157.	96.	90.	477.	3.	64.	73.	541.	0.	0.	93.	0.	0.00
1997	9	90.	116.	90.	541.	23.	-23.	9.	518.	0.	0.	113.	0.	0.00
1997	10	116.	144.	90.	518.	40.	-14.	32.	504.	0.	0.	130.	0.	0.00
1997	11	20.	152.	20.	504.	85.	-85.	46.	418.	0.	0.	106.	0.	0.00
1997	12	112.	154.	90.	418.	7.	14.	132.	433.	0.	0.	97.	0.	0.00
1998	1	13.	164.	13.	433.	31.	-31.	117.	402.	0.	0.	44.	0.	0.00
1998	2	45.	137.	45.	402.	1.	-1.	148.	401.	0.	0.	46.	0.	0.00
1998	3	328.	139.	90.	401.	0.	238.	149.	550.	89.	0.	90.	89.	0.27
1998	4	36.	108.	36.	550.	68.	-68.	0.	482.	0.	0.	104.	0.	0.00
1998	5	53.	89.	53.	482.	19.	-19.	68.	463.	0.	0.	71.	0.	0.00
1998	6	76.	77.	76.	463.	0.	0.	87.	463.	0.	0.	77.	0.	0.00
1998	7	62.	85.	62.	463.	9.	-9.	87.	454.	0.	0.	71.	0.	0.00
1998	8	28.	96.	28.	454.	23.	-23.	96.	431.	0.	0.	51.	0.	0.00
1998	9	96.	116.	90.	431.	5.	1.	119.	431.	0.	0.	95.	0.	0.00
1998	10	54.	144.	54.	431.	18.	-18.	119.	414.	0.	0.	72.	0.	0.00
1998	11	367.	152.	90.	414.	5.	272.	136.	550.	136.	0.	95.	136.	0.37
1998	12	391.	154.	90.	550.	60.	241.	0.	550.	241.	0.	150.	241.	0.62
1999	1	201.	164.	90.	550.	70.	41.	0.	550.	41.	0.	160.	41.	0.21
1999	2	487.	137.	90.	550.	44.	353.	0.	550.	353.	0.	134.	353.	0.72
1999	3	103.	139.	90.	550.	46.	-33.	0.	517.	0.	0.	136.	0.	0.00
1999	4	331.	108.	90.	517.	13.	228.	33.	550.	195.	0.	103.	195.	0.59
1999	5	30.	89.	30.	550.	56.	-56.	0.	494.	0.	0.	85.	0.	0.00
1999	6	146.	77.	13.	494.	0.	56.	56.	550.	0.	0.	13.	0.	0.00
1999	7	159.	85.	5.	550.	0.	82.	0.	550.	82.	0.	5.	82.	0.52
1999	8	245.	96.	90.	550.	6.	155.	0.	550.	155.	0.	96.	155.	0.63
1999	9	153.	116.	90.	550.	24.	38.	0.	550.	38.	0.	114.	38.	0.25
1999	10	300.	144.	90.	550.	51.	160.	0.	550.	160.	0.	141.	160.	0.53
1999	11	219.	152.	90.	550.	58.	71.	0.	550.	71.	0.	148.	71.	0.32
1999	12	217.	154.	90.	550.	60.	67.	0.	550.	67.	0.	150.	67.	0.31
2000	1	434.	164.	90.	550.	70.	274.	0.	550.	274.	0.	160.	274.	0.63
2000	2	370.	137.	90.	550.	44.	236.	0.	550.	236.	0.	134.	236.	0.64
2000	3	413.	139.	90.	550.	46.	277.	0.	550.	277.	0.	136.	277.	0.67
2000	4	304.	108.	90.	550.	17.	197.	0.	550.	197.	0.	107.	197.	0.65
2000	5	132.	89.	1.	550.	0.	42.	0.	550.	42.	0.	1.	42.	0.32
2000	6	69.	77.	70.	550.	7.	-7.	0.	543.	0.	0.	77.	0.	0.00
2000	7	227.	85.	5.	543.	0.	137.	7.	550.	130.	0.	5.	130.	0.57
2000	8	88.	96.	90.	550.	6.	-2.	0.	548.	0.	0.	96.	0.	0.00
2000	9	78.	116.	78.	548.	35.	-35.	2.	513.	0.	0.	113.	0.	0.00
2000	10	171.	144.	90.	513.	38.	43.	37.	550.	6.	0.	128.	6.	0.03
2000	11	65.	152.	65.	550.	82.	-82.	0.	468.	0.	0.	147.	0.	0.00
2000	12	229.	154.	90.	468.	27.	111.	82.	550.	29.	0.	117.	29.	0.13
2001	1	466.	164.	90.	550.	70.	306.	0.	550.	306.	0.	160.	306.	0.66
2001	2	150.	137.	90.	550.	44.	16.	0.	550.	16.	0.	134.	16.	0.11
2001	3	222.	139.	90.	550.	46.	86.	0.	550.	86.	0.	136.	86.	0.39
2001	4	159.	108.	90.	550.	17.	52.	0.	550.	52.	0.	107.	52.	0.33
2001	5	41.	89.	41.	550.	45.	-45.	0.	505.	0.	0.	86.	0.	0.00
2001	6	155.	77.	13.	505.	0.	65.	45.	550.	20.	0.	13.	20.	0.13
2001	7	77.	85.	5.	550.	0.	0.	0.	550.	0.	0.	5.	0.	0.00
2001	8	149.	96.	90.	550.	6.	58.	0.	550.	58.	0.	96.	58.	0.39
2001	9	92.	116.	90.	550.	24.	-23.	0.	527.	0.	0.	114.	0.	0.00
2001	10	32.	144.	32.	527.	89.	-89.	23.	438.	0.	0.	122.	0.	0.00
2001	11	167.	152.	90.	438.	15.	62.	112.	500.	0.	0.	105.	0.	0.00
2001	12	157.	154.	90.	500.	40.	27.	50.	527.	0.	0.	130.	0.	0.00
2002	1	132.	164.	90.	527.	59.	-17.	23.	510.	0.	0.	149.	0.	0.00
2002	2	489.	137.	90.	510.	32.	367.	40.	550.	327.	0.	122.	327.	0.67
2002	3	285.	139.	90.	550.	46.	149.	0.	550.	149.	0.	136.	149.	0.52

142 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

2002	4	327.	108.	90.	550.	17.	220.	0.	550.	220.	0.	107.	220.	0.67
2002	5	84.	89.	84.	550.	5.	-5.	0.	545.	0.	0.	89.	0.	0.00
2002	6	47.	77.	47.	545.	28.	-28.	5.	518.	0.	0.	74.	0.	0.00
2002	7	235.	85.	5.	518.	0.	145.	32.	550.	113.	0.	5.	113.	0.48
2002	8	121.	96.	90.	550.	6.	30.	0.	550.	30.	0.	96.	30.	0.25
2002	9	199.	116.	90.	550.	24.	84.	0.	550.	84.	0.	114.	84.	0.42
2002	10	27.	144.	27.	550.	110.	-110.	0.	440.	0.	0.	137.	0.	0.00
2002	11	102.	152.	90.	440.	15.	-4.	110.	436.	0.	0.	105.	0.	0.00
2002	12	68.	154.	68.	436.	19.	-19.	114.	416.	0.	0.	87.	0.	0.00
2003	1	418.	164.	90.	416.	8.	320.	134.	550.	187.	0.	98.	187.	0.45
2003	2	30.	137.	30.	550.	100.	-100.	0.	450.	0.	0.	131.	0.	0.00
2003	3	321.	139.	90.	450.	15.	215.	100.	550.	115.	0.	105.	115.	0.36
2003	4	78.	108.	78.	550.	28.	-28.	0.	522.	0.	0.	106.	0.	0.00
2003	5	39.	89.	39.	522.	38.	-38.	28.	483.	0.	0.	77.	0.	0.00
2003	6	16.	77.	16.	483.	32.	-32.	67.	451.	0.	0.	48.	0.	0.00
2003	7	116.	85.	5.	451.	0.	26.	99.	477.	0.	0.	5.	0.	0.00
2003	8	221.	96.	90.	477.	3.	133.	73.	550.	60.	0.	93.	60.	0.27
2003	9	76.	116.	76.	550.	38.	-38.	0.	512.	0.	0.	114.	0.	0.00
2003	10	62.	144.	62.	512.	57.	-57.	38.	455.	0.	0.	120.	0.	0.00
2003	11	42.	152.	42.	455.	38.	-38.	95.	417.	0.	0.	80.	0.	0.00
2003	12	134.	154.	90.	417.	7.	37.	133.	454.	0.	0.	97.	0.	0.00
2004	1	94.	164.	90.	454.	25.	-22.	96.	433.	0.	0.	115.	0.	0.00
2004	2	98.	137.	90.	433.	10.	-2.	117.	431.	0.	0.	100.	0.	0.00
2004	3	254.	139.	90.	431.	10.	155.	119.	550.	36.	0.	100.	36.	0.14
2004	4	36.	108.	36.	550.	67.	-67.	0.	483.	0.	0.	104.	0.	0.00
2004	5	127.	89.	1.	483.	0.	37.	67.	519.	0.	0.	1.	0.	0.00
2004	6	211.	77.	13.	519.	0.	122.	31.	550.	91.	0.	13.	91.	0.43
2004	7	164.	85.	5.	550.	0.	87.	0.	550.	87.	0.	5.	87.	0.53
2004	8	355.	96.	90.	550.	6.	265.	0.	550.	265.	0.	96.	265.	0.74
2004	9	245.	116.	90.	550.	24.	131.	0.	550.	131.	0.	114.	131.	0.53
2004	10	30.	144.	30.	550.	107.	-107.	0.	443.	0.	0.	137.	0.	0.00
2004	11	38.	152.	38.	443.	30.	-30.	107.	412.	0.	0.	69.	0.	0.00
2004	12	108.	154.	90.	412.	5.	13.	138.	425.	0.	0.	95.	0.	0.00
2005	1	259.	164.	90.	425.	12.	157.	125.	550.	33.	0.	102.	33.	0.13
2005	2	15.	137.	15.	550.	114.	-114.	0.	436.	0.	0.	130.	0.	0.00
2005	3	144.	139.	90.	436.	11.	43.	114.	479.	0.	0.	101.	0.	0.00
2005	4	313.	108.	90.	479.	9.	214.	71.	550.	142.	0.	99.	142.	0.46
2005	5	161.	89.	1.	550.	0.	71.	0.	550.	71.	0.	1.	71.	0.44
2005	6	172.	77.	13.	550.	0.	83.	0.	550.	83.	0.	13.	83.	0.48
2005	7	165.	85.	5.	550.	0.	88.	0.	550.	88.	0.	5.	88.	0.53
2005	8	193.	96.	90.	550.	6.	103.	0.	550.	103.	0.	96.	103.	0.53
2005	9	125.	116.	90.	550.	24.	10.	0.	550.	10.	0.	114.	10.	0.08
2005	10	318.	144.	90.	550.	51.	177.	0.	550.	177.	0.	141.	177.	0.56
2005	11	179.	152.	90.	550.	58.	31.	0.	550.	31.	0.	148.	31.	0.17
2005	12	49.	154.	49.	550.	99.	-99.	0.	451.	0.	0.	148.	0.	0.00
2006	1	194.	164.	90.	451.	24.	80.	99.	531.	0.	0.	114.	0.	0.00
2006	2	153.	137.	90.	531.	39.	24.	19.	550.	5.	0.	129.	5.	0.04
2006	3	136.	139.	90.	550.	46.	0.	0.	550.	0.	0.	136.	0.	0.00
2006	4	357.	108.	90.	550.	17.	250.	0.	550.	250.	0.	107.	250.	0.70
2006	5	34.	89.	34.	550.	52.	-52.	0.	498.	0.	0.	86.	0.	0.00
2006	6	359.	77.	13.	498.	0.	269.	52.	550.	217.	0.	13.	217.	0.60
2006	7	70.	85.	83.	550.	2.	-2.	0.	548.	0.	0.	85.	0.	0.00
2006	8	90.	96.	90.	548.	6.	-6.	2.	542.	0.	0.	96.	0.	0.00
2006	9	100.	116.	90.	542.	23.	-13.	8.	530.	0.	0.	113.	0.	0.00
2006	10	99.	144.	90.	530.	44.	-35.	20.	495.	0.	0.	134.	0.	0.00
2006	11	43.	152.	43.	495.	65.	-65.	55.	430.	0.	0.	108.	0.	0.00
2006	12	293.	154.	90.	430.	12.	191.	120.	550.	71.	0.	102.	71.	0.24
2007	1	19.	164.	19.	550.	136.	-136.	0.	414.	0.	0.	155.	0.	0.00
2007	2	240.	137.	90.	414.	4.	146.	136.	550.	10.	0.	94.	10.	0.04
2007	3	180.	139.	90.	550.	46.	44.	0.	550.	44.	0.	136.	44.	0.25
2007	4	287.	108.	90.	550.	17.	180.	0.	550.	180.	0.	107.	180.	0.63
2007	5	572.	89.	1.	550.	0.	482.	0.	550.	482.	0.	1.	482.	0.84
2007	6	48.	77.	48.	550.	27.	-27.	0.	523.	0.	0.	75.	0.	0.00

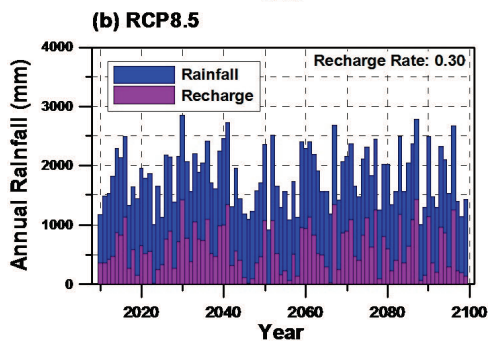
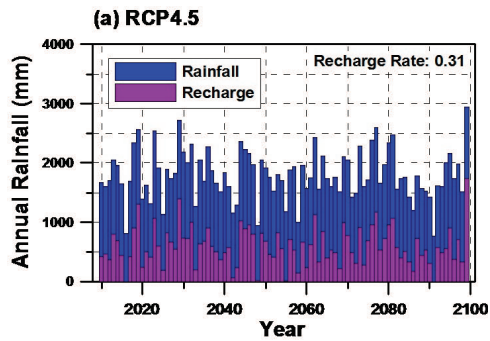
2007	7	228.	85.	5.	523.	0.	138.	27.	550.	111.	0.	5.	111.	0.49
2007	8	126.	96.	90.	550.	6.	35.	0.	550.	35.	0.	96.	35.	0.28
2007	9	158.	116.	90.	550.	24.	44.	0.	550.	44.	0.	114.	44.	0.28
2007	10	132.	144.	90.	550.	51.	-8.	0.	542.	0.	0.	141.	0.	0.00
2007	11	149.	152.	90.	542.	55.	4.	8.	546.	0.	0.	145.	0.	0.00
2007	12	163.	154.	90.	546.	59.	14.	4.	550.	10.	0.	149.	10.	0.06
2008	1	304.	164.	90.	550.	70.	144.	0.	550.	144.	0.	160.	144.	0.47
2008	2	420.	137.	90.	550.	44.	286.	0.	550.	286.	0.	134.	286.	0.68
2008	3	278.	139.	90.	550.	46.	142.	0.	550.	142.	0.	136.	142.	0.51
2008	4	92.	108.	90.	550.	17.	-15.	0.	535.	0.	0.	107.	0.	0.00
2008	5	344.	89.	1.	535.	0.	254.	15.	550.	239.	0.	1.	239.	0.69
2008	6	94.	77.	13.	550.	0.	5.	0.	550.	5.	0.	13.	5.	0.06
2008	7	96.	85.	5.	550.	0.	20.	0.	550.	20.	0.	5.	20.	0.20
2008	8	35.	96.	40.	550.	53.	-53.	0.	497.	0.	0.	93.	0.	0.00
2008	9	285.	116.	90.	497.	16.	180.	53.	550.	127.	0.	106.	127.	0.44
2008	10	42.	144.	42.	550.	96.	-96.	0.	454.	0.	0.	138.	0.	0.00
2008	11	284.	152.	90.	454.	21.	174.	96.	550.	77.	0.	111.	77.	0.27
2008	12	108.	154.	90.	550.	60.	-42.	0.	508.	0.	0.	150.	0.	0.00
2009	1	570.	164.	90.	508.	50.	430.	42.	550.	388.	0.	140.	388.	0.68
2009	2	144.	137.	90.	550.	44.	10.	0.	550.	10.	0.	134.	10.	0.07
2009	3	77.	139.	77.	550.	59.	-59.	0.	491.	0.	0.	135.	0.	0.00
2009	4	249.	108.	90.	491.	10.	149.	59.	550.	90.	0.	100.	90.	0.36
2009	5	181.	89.	1.	550.	0.	91.	0.	550.	91.	0.	1.	91.	0.50
2009	6	73.	77.	74.	550.	3.	-3.	0.	547.	0.	0.	77.	0.	0.00
2009	7	193.	85.	5.	547.	0.	103.	3.	550.	100.	0.	5.	100.	0.52
2009	8	105.	96.	90.	550.	6.	14.	0.	550.	14.	0.	96.	14.	0.13
2009	9	323.	116.	90.	550.	24.	208.	0.	550.	208.	0.	114.	208.	0.65
2009	10	48.	144.	48.	550.	90.	-90.	0.	460.	0.	0.	138.	0.	0.00
2009	11	40.	152.	40.	460.	42.	-42.	90.	418.	0.	0.	82.	0.	0.00
2009	12	189.	154.	90.	418.	7.	91.	132.	510.	0.	0.	97.	0.	0.00
2010	1	163.	164.	90.	510.	51.	22.	40.	532.	0.	0.	141.	0.	0.00
2010	2	269.	137.	90.	532.	39.	140.	18.	550.	122.	0.	129.	122.	0.45
2010	3	191.	139.	90.	550.	46.	55.	0.	550.	55.	0.	136.	55.	0.29
2010	4	605.	108.	90.	550.	17.	498.	0.	550.	498.	0.	107.	498.	0.82
2010	5	209.	89.	1.	550.	0.	119.	0.	550.	119.	0.	1.	119.	0.57
2010	6	10.	77.	11.	550.	62.	-62.	0.	488.	0.	0.	73.	0.	0.00
2010	7	56.	85.	56.	488.	16.	-16.	62.	472.	0.	0.	72.	0.	0.00
2010	8	21.	96.	21.	472.	34.	-34.	78.	438.	0.	0.	55.	0.	0.00
2010	9	32.	116.	32.	438.	20.	-20.	112.	418.	0.	0.	52.	0.	0.00
2010	10	158.	144.	90.	418.	6.	62.	132.	480.	0.	0.	96.	0.	0.00
2010	11	136.	152.	90.	480.	31.	15.	70.	495.	0.	0.	121.	0.	0.00
2010	12	185.	154.	90.	495.	38.	57.	55.	550.	2.	0.	128.	2.	0.01
2011	1	382.	164.	90.	550.	70.	222.	0.	550.	222.	0.	160.	222.	0.58
2011	2	215.	137.	90.	550.	44.	81.	0.	550.	81.	0.	134.	81.	0.38
2011	3	123.	139.	90.	550.	46.	-13.	0.	537.	0.	0.	136.	0.	0.00
2011	4	177.	108.	90.	537.	15.	72.	13.	550.	59.	0.	105.	59.	0.33
2011	5	242.	89.	1.	550.	0.	152.	0.	550.	152.	0.	1.	152.	0.63
2011	6	171.	77.	13.	550.	0.	82.	0.	550.	82.	0.	13.	82.	0.48
2011	7	208.	85.	5.	550.	0.	131.	0.	550.	131.	0.	5.	131.	0.63
2011	8	87.	96.	90.	550.	6.	-4.	0.	546.	0.	0.	96.	0.	0.00
2011	9	201.	116.	90.	546.	24.	87.	4.	550.	83.	0.	114.	83.	0.41
2011	10	71.	144.	71.	550.	68.	-68.	0.	482.	0.	0.	140.	0.	0.00
2011	11	210.	152.	90.	482.	32.	89.	68.	550.	20.	0.	122.	20.	0.10
2011	12	318.	154.	90.	550.	60.	168.	0.	550.	168.	0.	150.	168.	0.53
2012	1	388.	164.	90.	550.	70.	228.	0.	550.	228.	0.	160.	228.	0.59
2012	2	434.	137.	90.	550.	44.	300.	0.	550.	300.	0.	134.	300.	0.69
2012	3	137.	139.	90.	550.	46.	1.	0.	550.	1.	0.	136.	1.	0.01
2012	4	375.	108.	90.	550.	17.	268.	0.	550.	268.	0.	107.	268.	0.71
2012	5	142.	89.	1.	550.	0.	52.	0.	550.	52.	0.	1.	52.	0.36
2012	6	171.	77.	13.	550.	0.	82.	0.	550.	82.	0.	13.	82.	0.48
2012	7	31.	85.	44.	550.	39.	-39.	0.	511.	0.	0.	83.	0.	0.00
2012	8	69.	96.	69.	511.	19.	-19.	39.	492.	0.	0.	88.	0.	0.00
2012	9	372.	116.	90.	492.	15.	267.	58.	550.	209.	0.	105.	209.	0.56

144 | 통가 물부족 대응을 위한 기후정보활용 스마트 물관리 시스템 구축

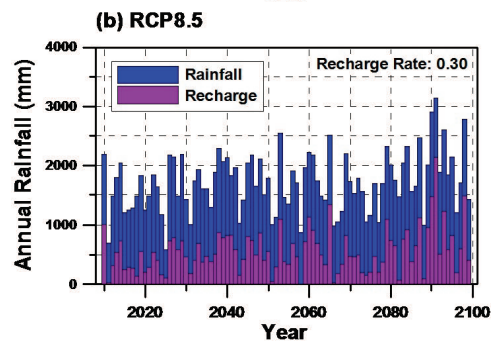
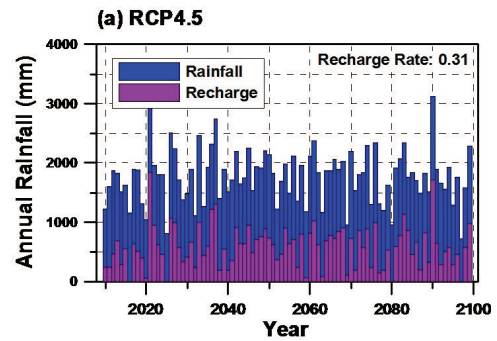
2012	10	95.	144.	90.	550.	51.	-46.	0.	504.	0.	0.	141.	0.	0.00
2012	11	201.	152.	90.	504.	40.	71.	46.	550.	24.	0.	130.	24.	0.12
2012	12	150.	154.	90.	550.	60.	0.	0.	550.	0.	0.	150.	0.	0.00
2013	1	335.	164.	90.	550.	70.	176.	0.	550.	176.	0.	160.	176.	0.52
2013	2	550.	137.	90.	550.	44.	416.	0.	550.	416.	0.	134.	416.	0.76
2013	3	445.	139.	90.	550.	46.	309.	0.	550.	309.	0.	136.	309.	0.69
2013	4	88.	108.	88.	550.	19.	-19.	0.	531.	0.	0.	107.	0.	0.00
2013	5	59.	89.	59.	531.	25.	-25.	19.	507.	0.	0.	84.	0.	0.00
2013	6	84.	77.	8.	507.	0.	0.	43.	507.	0.	0.	8.	0.	0.00
2013	7	112.	85.	5.	507.	0.	30.	43.	537.	0.	0.	5.	0.	0.00
2013	8	141.	96.	90.	537.	5.	51.	13.	550.	37.	0.	95.	37.	0.26
2013	9	124.	116.	90.	550.	24.	9.	0.	550.	9.	0.	114.	9.	0.07
2013	10	130.	144.	90.	550.	51.	-11.	0.	539.	0.	0.	141.	0.	0.00
2013	11	210.	152.	90.	539.	54.	66.	11.	550.	55.	0.	144.	55.	0.26
2013	12	252.	154.	90.	550.	60.	102.	0.	550.	102.	0.	150.	102.	0.40
2014	1	349.	164.	90.	550.	70.	189.	0.	550.	189.	0.	160.	189.	0.54
2014	2	230.	137.	90.	550.	44.	96.	0.	550.	96.	0.	134.	96.	0.42
2014	3	507.	139.	90.	550.	46.	371.	0.	550.	371.	0.	136.	371.	0.73
2014	4	205.	108.	90.	550.	17.	98.	0.	550.	98.	0.	107.	98.	0.48
2014	5	174.	89.	1.	550.	0.	84.	0.	550.	84.	0.	1.	84.	0.48
2014	6	135.	77.	13.	550.	0.	46.	0.	550.	46.	0.	13.	46.	0.34
2014	7	121.	85.	5.	550.	0.	44.	0.	550.	44.	0.	5.	44.	0.37
2014	8	14.	96.	19.	550.	72.	-72.	0.	478.	0.	0.	91.	0.	0.00
2014	9	19.	116.	19.	478.	47.	-47.	72.	430.	0.	0.	66.	0.	0.00
2014	10	83.	144.	83.	430.	12.	-12.	120.	419.	0.	0.	95.	0.	0.00
2014	11	29.	152.	29.	419.	15.	-15.	131.	404.	0.	0.	43.	0.	0.00
2014	12	20.	154.	20.	404.	4.	-4.	146.	401.	0.	0.	24.	0.	0.00
2015	1	76.	164.	76.	401.	0.	0.	149.	400.	0.	0.	76.	0.	0.00
2015	2	161.	137.	90.	400.	0.	71.	150.	471.	0.	0.	90.	0.	0.00
2015	3	232.	139.	90.	471.	22.	121.	79.	550.	42.	0.	112.	42.	0.18
2015	4	17.	108.	17.	550.	85.	-85.	0.	465.	0.	0.	103.	0.	0.00
2015	5	88.	89.	88.	465.	0.	0.	85.	464.	0.	0.	89.	0.	0.00
2015	6	135.	77.	13.	464.	0.	45.	86.	510.	0.	0.	13.	0.	0.00
2015	7	21.	85.	34.	510.	35.	-35.	40.	475.	0.	0.	69.	0.	0.00
2015	8	739.	96.	90.	475.	3.	646.	75.	550.	570.	0.	93.	570.	0.77
2015	9	108.	116.	90.	550.	24.	-6.	0.	544.	0.	0.	114.	0.	0.00
2015	10	20.	144.	20.	544.	112.	-112.	6.	432.	0.	0.	132.	0.	0.00
2015	11	114.	152.	90.	432.	12.	12.	118.	444.	0.	0.	102.	0.	0.00
2015	12	39.	154.	39.	444.	31.	-31.	106.	412.	0.	0.	71.	0.	0.00
2016	1	84.	164.	84.	412.	6.	-6.	138.	406.	0.	0.	90.	0.	0.00
2016	2	166.	137.	90.	406.	2.	74.	144.	480.	0.	0.	92.	0.	0.00
2016	3	70.	139.	70.	480.	35.	-35.	70.	445.	0.	0.	104.	0.	0.00
2016	4	240.	108.	90.	445.	5.	145.	105.	550.	40.	0.	95.	40.	0.17
2016	5	261.	89.	1.	550.	0.	171.	0.	550.	171.	0.	1.	171.	0.66
2016	6	526.	77.	13.	550.	0.	437.	0.	550.	437.	0.	13.	437.	0.83
2016	7	28.	85.	41.	550.	42.	-42.	0.	508.	0.	0.	82.	0.	0.00
2016	8	257.	96.	90.	508.	4.	163.	42.	550.	122.	0.	94.	122.	0.47
2016	9	15.	116.	15.	550.	95.	-95.	0.	455.	0.	0.	110.	0.	0.00
2016	10	130.	144.	90.	455.	19.	21.	95.	476.	0.	0.	109.	0.	0.00
2016	11	89.	152.	89.	476.	30.	-30.	74.	446.	0.	0.	119.	0.	0.00
2016	12	184.	154.	90.	446.	18.	76.	104.	522.	0.	0.	108.	0.	0.00

[S5] Prediction of groundwater recharge under climate change

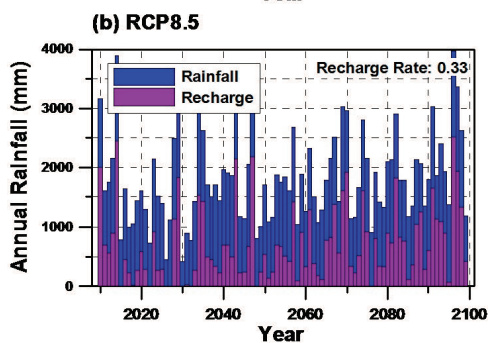
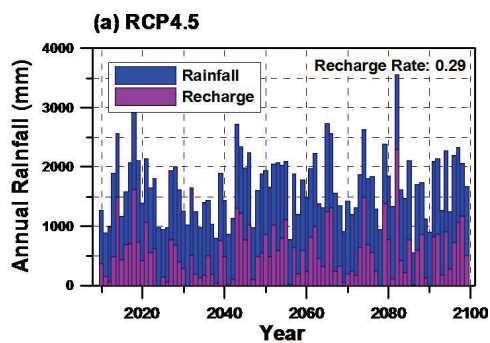
S5-1. Bcc-csm1-1



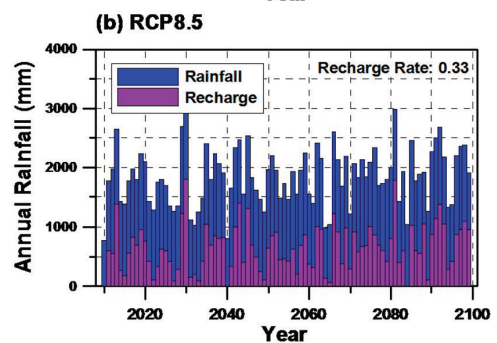
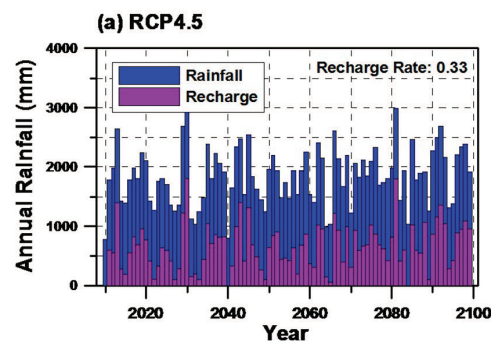
S5-2. Bcc-csm1-1-m



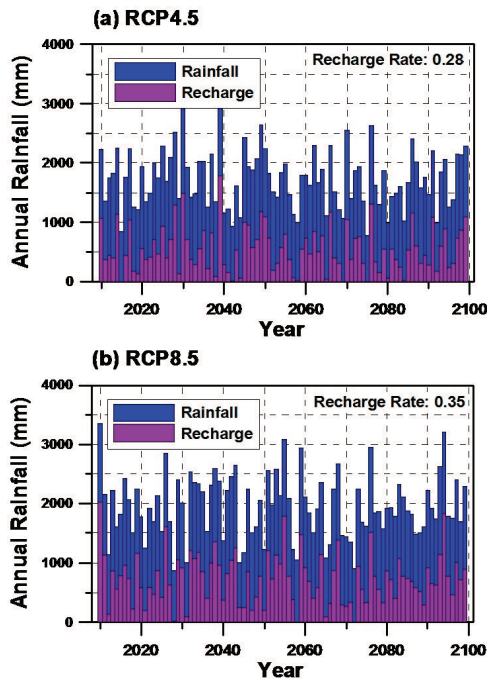
S5-3. CanESM2



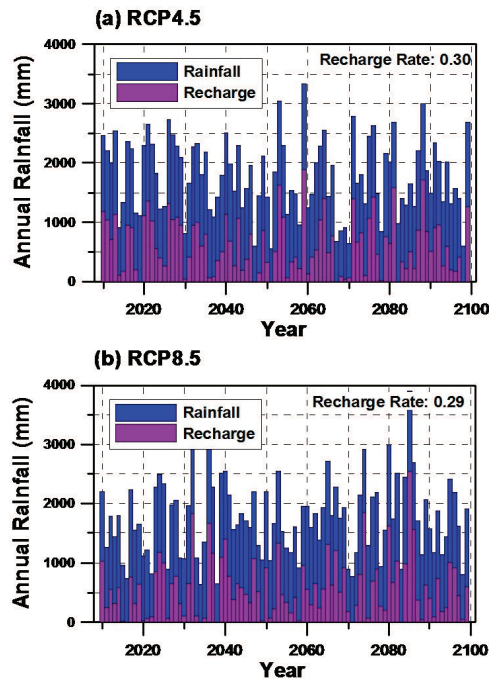
S5-4. CCSM4



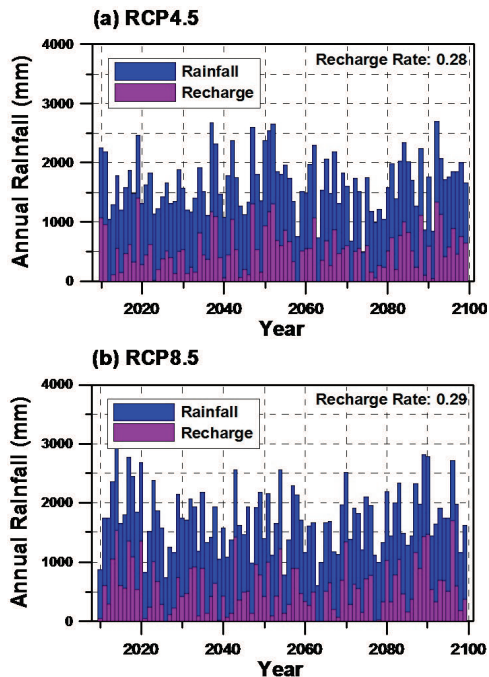
S5-5. CESM1-BGC



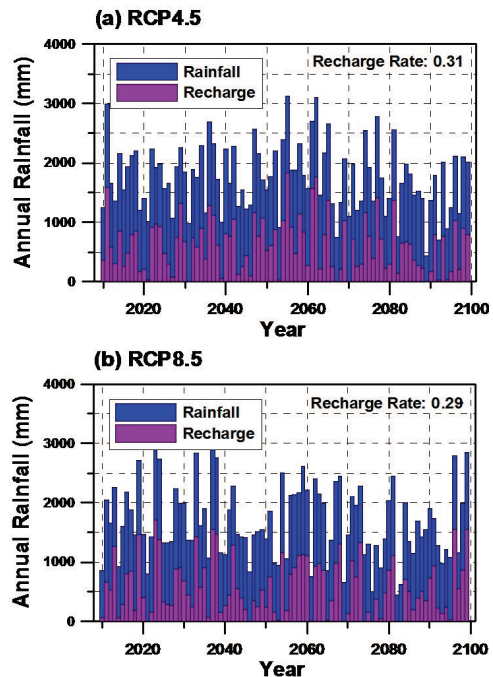
S5-6. CESM1-CAM5



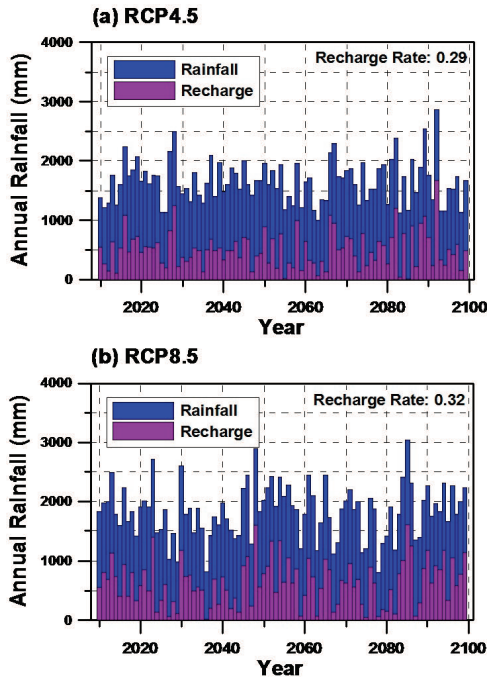
S5-7. CMCC-CM



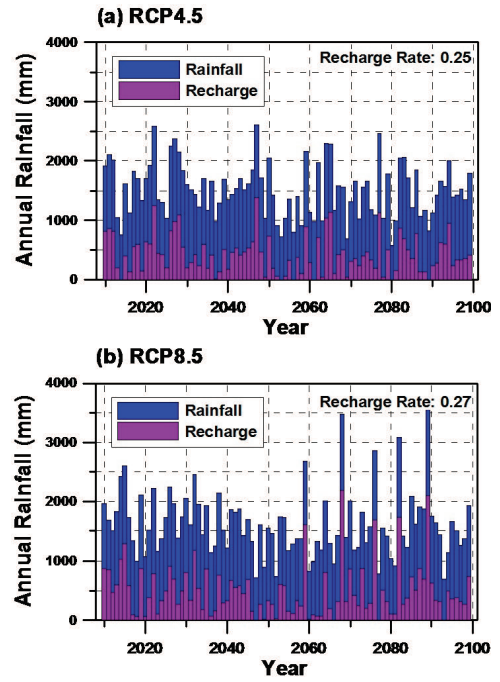
S5-8. CMCC-CMS



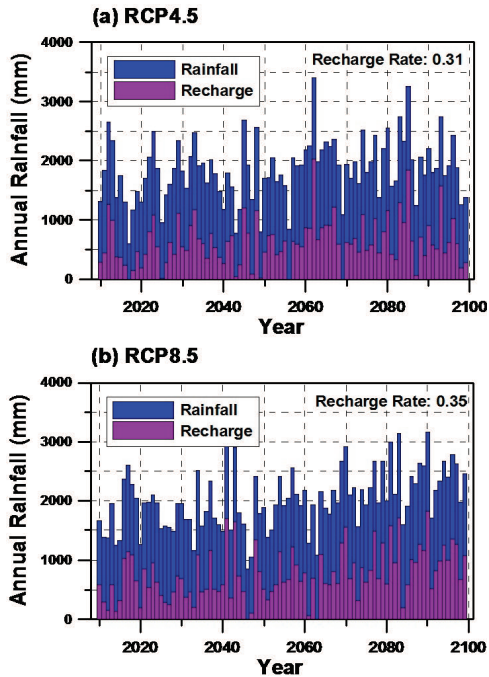
S5-9. CNRM-CM5



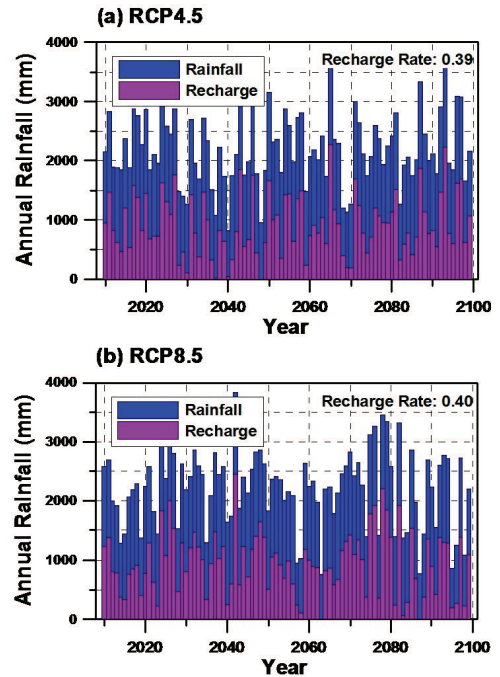
S5-10. CSIRO-MK3-6-0



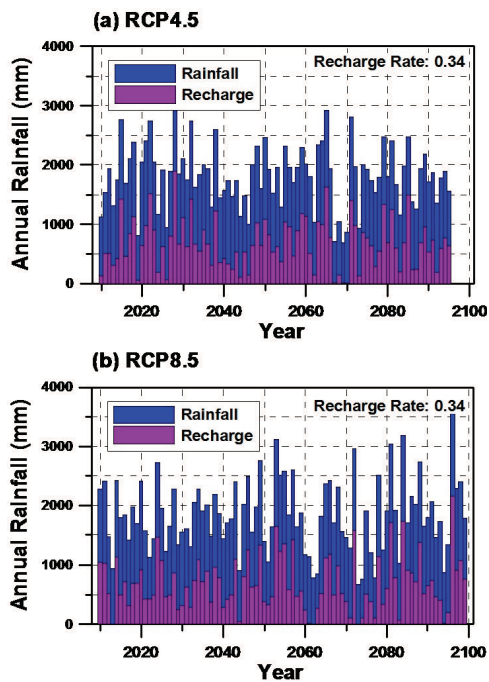
S5-11. FGOALS-g2



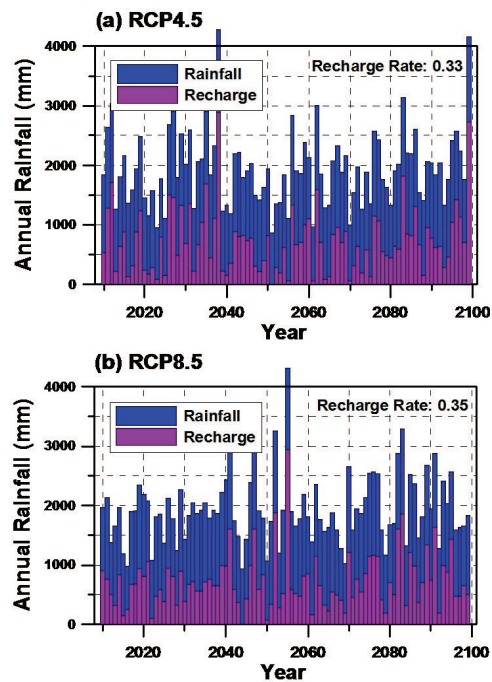
S5-12. FGOAL-s2



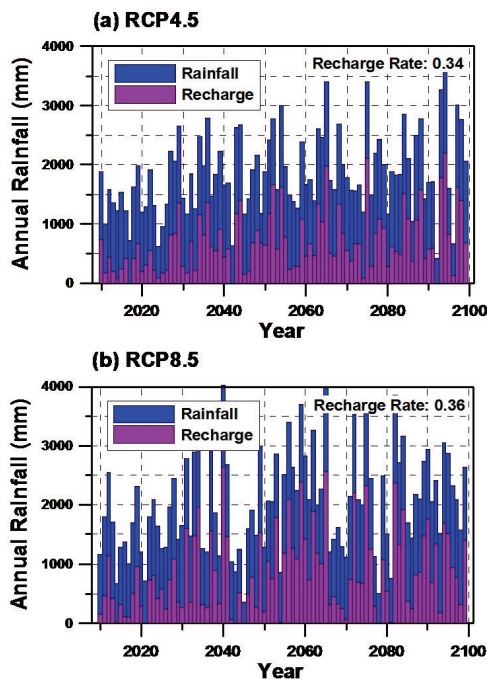
S5-13. GFDL-CM3



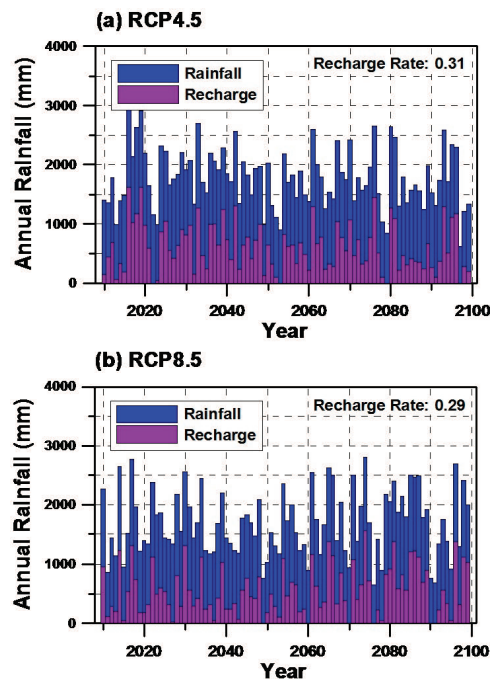
S5-14. GFDL-ESM2G



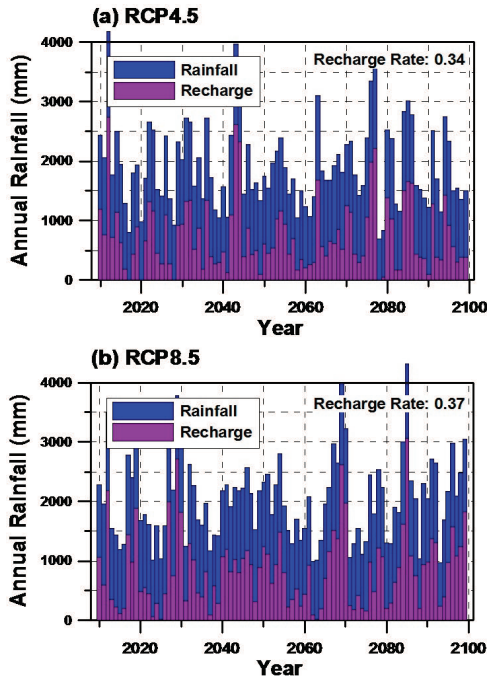
S5-15. GFDL-ESM2M



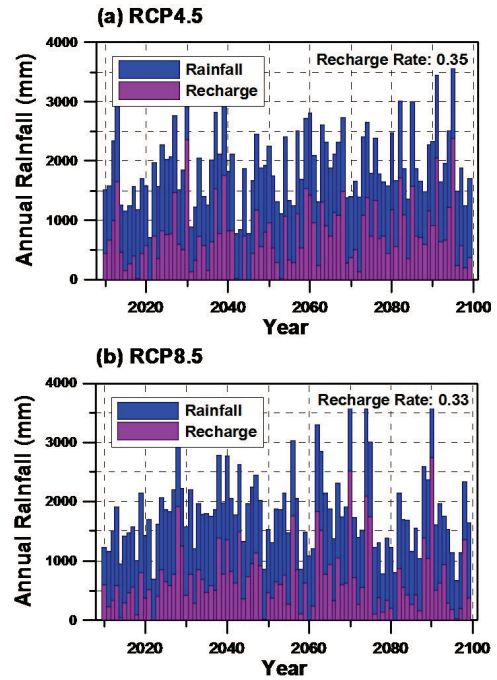
S5-16. HadGEM2-AO



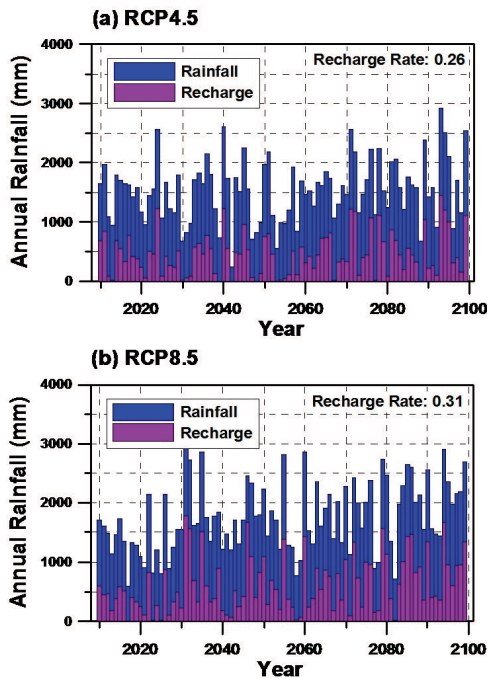
S5-17. HadGEM2-CC



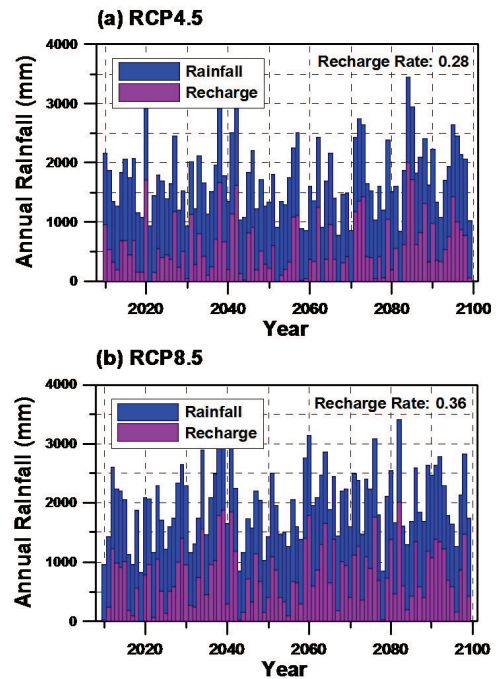
S5-18. HadGEM2-ES



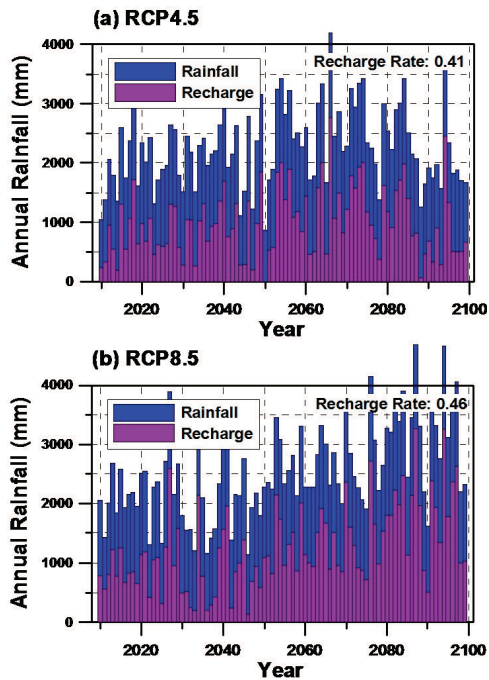
S5-19. Inmcm4



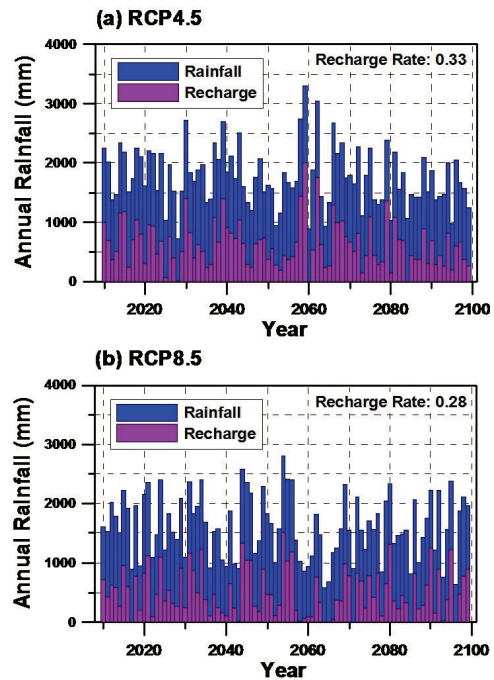
S5-20. IPSL-CM5A-LR



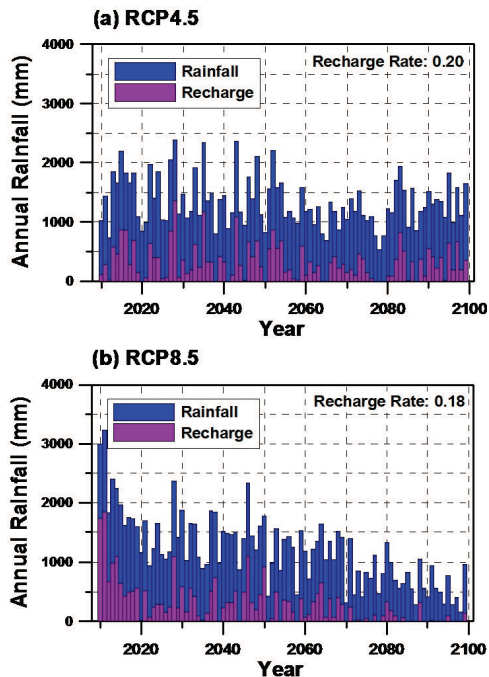
S5-21. IPSL-CM5A-MR



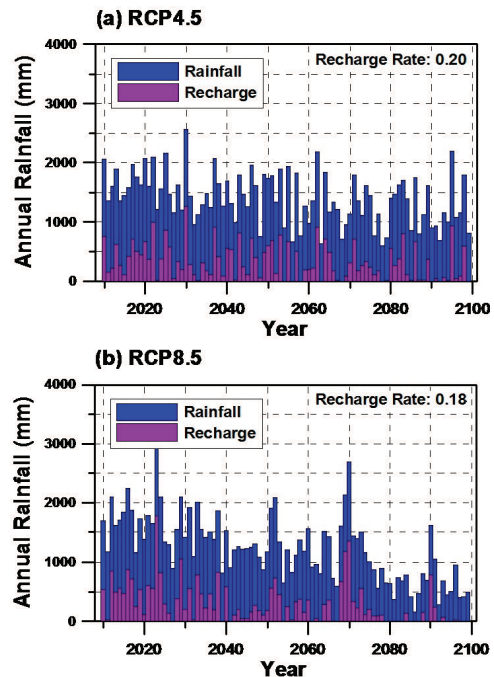
S5-22. IPSL-CM5B-LR



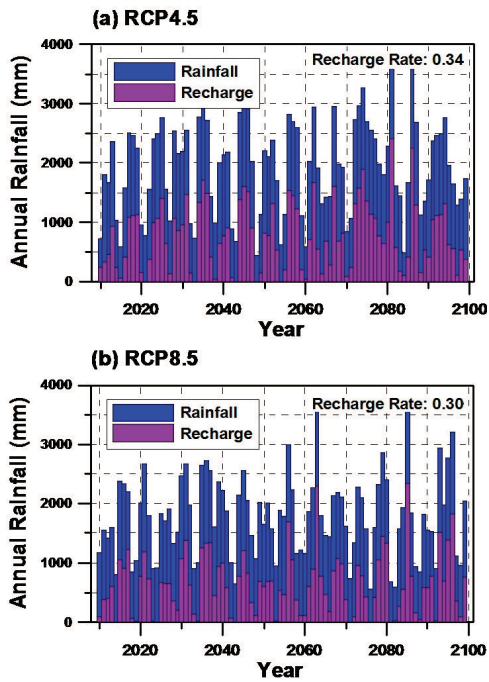
S5-23. MIROC-ESM



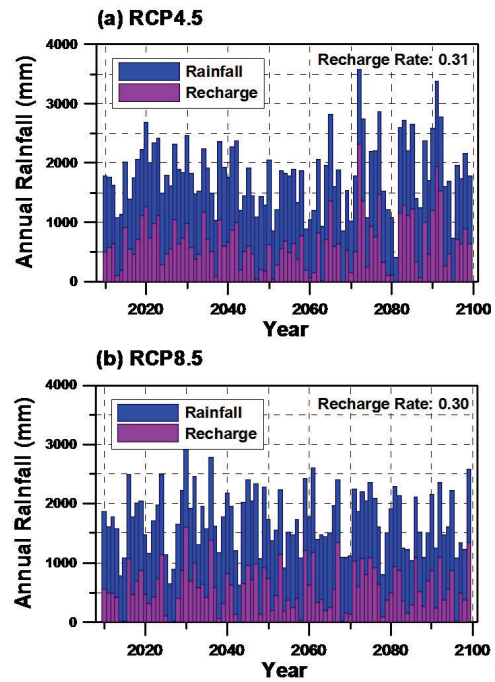
S5-24. MIROC-ESM-CHEM



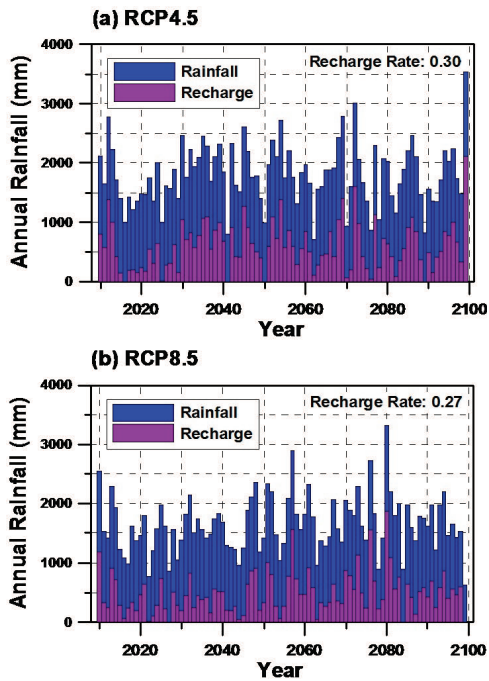
S5-25. MIROC5



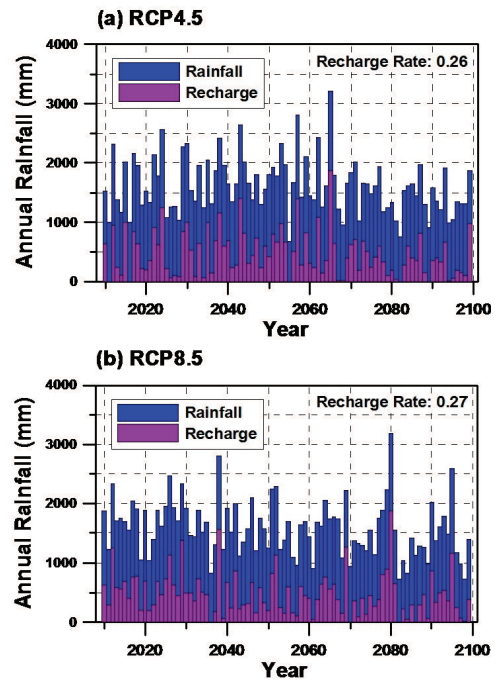
S5-26. MPI-ESM-LR



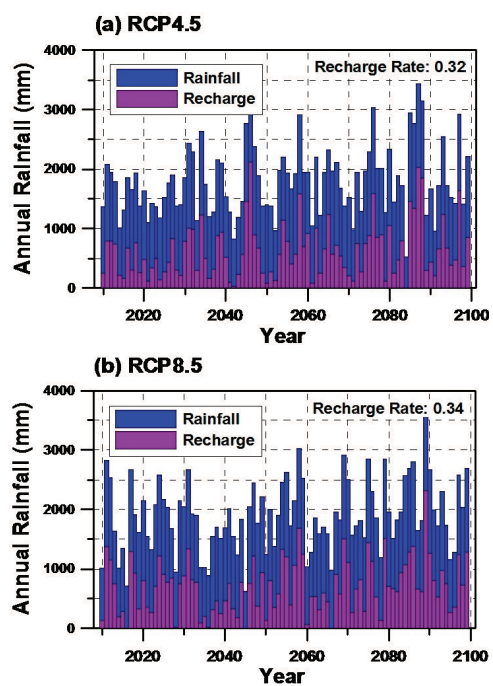
S5-27. MPI-ESM-MR



S5-28. MRI-CGCM3



S5-29. NorESM1-M



【연구자】

신용희 선임연구원

윤선권 선임연구원

김광형 선임연구원

조원일 연구원

정임국 연구원

연구보고서 2017-19

통가 물부족 대응을 위한 기후정보 활용 스마트 물관리 시스템 구축

I S B N 979-11-5698-209-8

발 행 2018년 3월

발 행 인 정 홍 상

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.