

미계측유역 대상 위성영상 기반 기후 자료 관리 시스템 개발

Development of Climate Data Management System Based on Satellite
Imagery for Ungauged Regions

박경원, 조원일 융합기술팀

박지훈, 정임국 서비스개발팀

발간사

기후변화에 따른 폭염과 가뭄 등의 자연재해로 인한 사회·경제적 피해가 갈수록 증가하고 있습니다. 기후변화로 인해 발생하는 피해를 저감하기 위해서는 과거와 현재의 기후 모니터링 시스템을 구축하는 작업을 우선적으로 수행해야 합니다. 현재 대부분의 국가들이 기후모니터링 시스템의 지점단위 자료를 기초자료로 활용하고 있으나 격자단위의 양질 자료 구축은 부족한 실정입니다. 특히 아시아 태평양 지역은 기후 모니터링 시스템이 체계적으로 구축되지 않은 경우가 대부분이며 기후 자료를 수집하여 활용하고자 하여도 자료 품질 관리가 적절하게 이루어지지 않아 양질의 자료를 구축하기에는 많은 어려움이 있습니다. 이로 인해 기후변화로 인한 영향을 평가하는 데 있어 상당한 제약을 받고 있습니다. 따라서 우리 센터는 현 상황을 개선하기 위해 위성영상 기반 고해상도 격자 기후자료를 편의보정하고 공간적으로 상세화한 기후 자료를 제공하고자 합니다.

이 연구보고서는 위성강우 자료를 지점 관측자료를 이용하여 편의보정하고 공간 상세화하였습니다. 편의보정 기법은 한반도 내에서 몇 개의 지점으로 편의보정한 결과를 아시아 태평양 지역 등 미계측지역에서도 활용할 수 있도록 새로운 연구로 기획하였습니다. 다양한 분야에 활용하기 위하여 고해상도 격자자료로 공간상세화를 하여 비교 분석하였습니다. 이 연구보고서에서 위성영상 기반 격자단위의 신뢰성 높은 기후 자료를 구축하여 제공하는 것은 아시아 태평양 지역의 기후변화 적응 대책을 마련할 수 있는 기반을 제공하는 획기적인 전환점이 될 것이라 사료됩니다. 또한 이 연구보고서에 의해 구축된 고해상도 격자 위성기후 자료를 국내 자치단체나 아시아 태평양 지역의 정책 결정자가 이용한다면 이상기후로 인한 자연피해가

실질적으로 저감될 것으로 생각합니다.

이 연구보고서가 발간되기까지 센터 내의 많은 분들의 도움이 있었습니다. 위성 자료 분석에 박경원 박사, 편의보정기법 개발에 박지훈 박사, 공간상세화 및 비교 검증에 정임국 연구원, 마지막으로 연구 초기에 DEM 구축과 공간상세화에 매진한 조원일 연구원에게도 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가 본 센터가 아시아 태평양 지역의 기후변화 대응 및 적응능력을 향상시키는 데 선도적인 역할을 하기를 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

Research-based countermeasures to respond preemptively to disasters caused by climate change must be established for various sectors. For this, it is necessary to collect past and present weather monitoring data and pre-process it using other reliable data. Many advanced countries, including Korea, have built considerable climate monitoring systems and utilize the data obtained at the branch level. However, most of these climate monitoring systems in the Asia-Pacific region have not been constructed systematically. Considering this, satellite image-based climate data can provide an alternative to the absence of data for the Asia-Pacific region. Furthermore, there is an increasing need for grid-based climatic data in various application sectors. In this study, we developed a climate management system that produces grid-based precipitation data from satellite imagery to provide reliable climate data in the Asia-Pacific region. This system provides three kinds of satellite data (raw, bias-corrected, and spatially downscaled). The spatial resolution of the satellite data is 0.1° and 0.05° and the temporal resolution is 1 day. The Korean peninsula was selected as a target area, the original satellite data was constructed, and the correction method and spatial specification method were validated. We applied the technique tested and proved on the Korean Peninsula to Vanuatu to produce the final satellite data. The raw satellite data was constructed using the Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM) and Global Precipitation Mission (GPM) satellites. The Geographical Ratio Analysis-Inverse Distance Weighted (GRA-IDW), GRA-Kriging, and Quantile Mapping (QM) methods were developed to correct bias and GRA-IDW was finally selected. Spatial downscaling was performed

using Parameter–elevation Regressions on Independent Slopes Model (PRISM). The correlation coefficient between 1998 and 2017, 0.775, is relatively high; and the 0.1° daily rainfall correlation coefficients for the Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) and the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) are 0.776 and 0.753, respectively. The bias value presents that raw satellite rainfall is overestimated than observed rainfall from Automated Synoptic Observing System (ASOS). As a result of cross-validation of the bias-correction methods, GRA-IDW method shows better correction results than GRA-Kriging and QM based on the correlation coefficient and Root Mean Square Error (RMSE). The results of spatial downscaling show that the correlation coefficient is smaller and RMSE is larger than that before spatial downscaling. However, since the difference is not large, it can be used in application sectors. It is possible to obtain reliable climate observation data to an ungauged watershed based on the technique developed in this study. It is also basic data for projects overseas, including in the Asia-Pacific region. It is expected that applying the system developed in this study to the Asia-Pacific region can provide reliable climate data on the latter.

목 차

1. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 필요성 및 활용성	3
1.2.1 아시아-태평양 지역 기후 자료 구축 필요성	3
1.2.2 격자단위의 기후 자료 활용성	4
1.2.3 아시아-태평양 지역의 관측소 현황	6
1.3 연구 목적	7
1.4 연구 내용 및 범위	7
2. 연구자료	9
2.1 대상유역	9
2.2 지형자료	11
2.3 위성영상 자료	14
2.3.1 정지궤도 위성	14
2.3.2 TRMM 위성	15
2.3.3. GPM 위성	18
2.3.4. 위성영상자료 특징	22
2.4 응용부문별 기후 자료 활용 현황	22

3. 연구방법	25
3.1 위성영상 자료 수득 및 전처리	26
3.1.1 PERSIANN-CDR 자료수집	26
3.1.2 TRMM TMPA 자료수집	26
3.1.3 GPM IMERG 자료수집	27
3.1.4. 위성자료 전처리	31
3.2 위성영상 상세화 기법	35
3.2.1 편익보정 기법	35
3.2.2 공간상세화 기법	38
3.3 위성영상 검증 방법	39
3.3.1 원시위성영상 검증	39
3.3.2 상세화 기법 검증	40
3.4 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템	41
4. 연구결과	43
4.1 위성영상 검증 결과	43
4.1.1 원시위성자료	43
4.1.2 편익보정한 위성자료	44
4.1.3 공간상세화한 위성자료	47
4.2 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템	49
4.2.1 편익보정한 위성자료	49
4.2.2 공간상세화한 위성자료	73
5. 결론	84
Ⅰ REFERENCES	86

그림 목차

Figure 1. Station density in the Asia-Pacific region -----	7
Figure 2. Station location for South Korea and Vanuatu -----	11
Figure 3. DEM, aspect, and distance from the coast for South Korea (Spatial resolution: 0.05°) -----	12
Figure 4. DEM, aspect, and distance from the coast for Vanuatu (Spatial resolution: 0.05°) -----	13
Figure 5. Geostationary satellites radmap -----	15
Figure 6. TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission) satellite -----	16
Figure 7. TRMM 1 day orbit -----	17
Figure 8. TRMM TMI measurement -----	17
Figure 9. Microwave measurements of TMPA for 3-hour period. -----	18
Figure 10. GPM(GPM Precipitation Mission) Satellite -----	19
Figure 11. Coverage of TRMM orbits(yellow) vs orbits of the GPM core satellite(blue) -----	20
Figure 12. Swath of GPM GMI(GPM Microwave Imager) sensor -----	20
Figure 13. Swath of GPM Ku 13.8GHz(a) and Ka 35GHz(b) precipitation sensor ---	21
Figure 14. Flow chart of satellite rainfall based climate data management system -----	25
Figure 15. Flowchart of processing data of TRMM and GPM -----	28
Figure 16. Precipitation(rainfall+snowfall) of IMERG data -----	30
Figure 17. Pre-processing of satellite data for bias correction -----	32

Figure 18. Conversion UTC to KST time of daily data	32
Figure 19. Clipping data by pre-processing module	33
Figure 20. NASA SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)	34
Figure 21. Input data for bias correction module and PRISM model	35
Figure 22. Overview of GRA bias-correction techniques	37
Figure 23. Example of climate data service system for Vanuatu	42
Figure 24. Cross-validation result of three bias-correction methods for South Korea	45
Figure 25. Scatter plot before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea	46
Figure 26. Bias-correction(GRA-IDW) result for South Korea	47
Figure 27. Statistics before and after PRISM for South Korea	48
Figure 28. Scatter plot after applying PRISM for South Korea	49
Figure 29. Box plot of 20-year average annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea and Vanuatu	50
Figure 30. Box plot of 20-year monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea	51
Figure 31. Box plot of 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu	52
Figure 32. Annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea	53
Figure 33. 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea	53
Figure 34. Annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu	54
Figure 35. 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu	54

Figure 36. Box plot of 11 climate indices before and after bias-correction (GRA-IDW) for South Korea -----	57
Figure 37. Box plot of 11 climate indices before and after bias-correction (GRA-IDW) for Vanuatu -----	58
Figure 38. Spatial correlation matrix before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea -----	59
Figure 39. Spatial correlation matrix before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu -----	59
Figure 40. Variogram before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea -----	60
Figure 41. Variogram before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu -	60
Figure 42. Correlation coefficient between observation and satellite estimates for 49 ASOS in South Korea -----	61
Figure 43. RMSE between observation and satellite estimates for 49 ASOS in South Korea -----	62
Figure 44. Correlation coefficient between observation and satellite estimates for 49 ASOS in Vanuatu -----	63
Figure 45. RMSE between observation and satellite estimates for 49 ASOS in Vanuatu -----	64
Figure 46. Monthly correlation coefficient between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in South Korea -----	65
Figure 47. Monthly correlation coefficient between observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in South Korea -----	66
Figure 48. Monthly RMSE between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in South Korea -----	67
Figure 49. Monthly RMSE between observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in South Korea -----	68
Figure 50. Monthly correlation coefficient between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in Vanuatu -----	69

Figure 51. Monthly correlation coefficient between observation and BC_SRE (GRA-IDW) for 49 ASOS in Vanuatu -----	70
Figure 52. Monthly RMSE between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in Vanuatu -----	71
Figure 53. Monthly RMSE observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in Vanuatu -----	72
Figure 54. Box plot of 20-year average annual precipitation after applying PRISM for South Korea and Vanuatu -----	73
Figure 55. Box plot of 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for South Korea -----	74
Figure 56. Box plot of 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for Vanuatu -----	75
Figure 57. Annual precipitation after applying PRISM for South Korea -----	76
Figure 58. 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for South Korea -----	76
Figure 59. Annual precipitation after applying PRISM for Vanuatu -----	77
Figure 60. 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for Vanuatu -----	77
Figure 61. Box plot of 11 climate indices after applying PRISM for South Korea -----	79
Figure 62. Box plot of 11 climate indices after applying PRISM for Vanuatu ---	80
Figure 63. Spatial correlation matrix after applying PRISM for South Korea -----	81
Figure 64. Spatial correlation matrix after applying PRISM for Vanuatu -----	81
Figure 65. Variogram after applying PRISM for South Korea -----	82
Figure 66. Variogram after applying PRISM for Vanuatu -----	83

표 목차

Table 1. Final result of this study	8
Table 2. Station list for South Korea	9
Table 3. Station list for Vanuatu	10
Table 4. Overview of satellite imagery	22
Table 5. Climate variable list by application sector	24
Table 6. Bioclimatic variables list (WorldClim, 2018)	24
Table 7. Summary of TRMM Level 2 products	27
Table 8. Summary of TRMM Level 3 products	27
Table 9. Summary of GPM Level 2 products	29
Table 10. Summary of GPM Level 3 products	30
Table 11. The subfield for GPM data file names	31
Table 12. Indication of accumulation subfield for file names	31
Table 13. Contingency table for comparison of SRE with ASOS gauge	40
Table 14. Final products of satellite rainfall estimations	42
Table 15. Statistics evaluation of the performance of Raw_SRE	43
Table 16. Comparison of FBS, POD, FAR for Raw_SRE	44
Table 17. Statistics evaluation of the best performance of BC_SRE(IDW)	46
Table 18. Correlation and RMSE before and after PRISM for South Korea	48
Table 19. List of 11 climate indices (Karl et al., 1999; Peterson et al., 2001)	55

1. 서론

1.1 연구 배경

기후변화로 인해 발생하는 재해에 선제적으로 대응하기 위해서는 보건, 산림, 생태계, 농업, 물관리, 해양/수산, 재해 등의 다양한 응용부문의 연구를 통해 대응 및 적응 대책을 수립해야 한다. 이를 위해서는 과거와 현재의 기후 모니터링 자료를 수집하여 신뢰성 있는 자료로 전처리하여 구축하는 작업을 우선적으로 수행해야 한다. 선행연구를 통해 살펴보면 우리나라를 포함한 대부분의 선진국은 기후 모니터링 시스템을 상당한 수준으로 구축하여 지점 단위의 자료를 활용하고 있다. 다만 아시아-태평양 지역은 이러한 기후 모니터링 시스템이 체계적으로 구축되지 않은 경우가 대부분인 실정이다. 그나마 몇 개 지점에 대한 기후 자료를 수득하여 활용하고자 하여도 자료 품질 관리가 적절하게 이루어지지 않아 양질의 자료를 구축하기에는 많은 어려움이 존재한다. 이러한 상황을 고려할 때 위성영상 기반 기후 자료를 아시아-태평양 지역 각국의 자료 부재에 대한 대안으로 제시할 수 있다. 또한 응용부문별 격자단위의 기후 자료에 대한 필요성이 증가하고 있어 이에 대한 해결책으로 기존의 관측된 일부 지점 자료를 이용하여 보정하고, 위성영상 기반의 자료를 공간적으로 상세화하여 격자단위의 기후 자료를 제공하는 시스템을 개발할 필요가 있다.

위성영상 기반 격자단위의 기후 자료를 제공하는 선행 연구를 살펴보면 국가 기관에서 주도적으로 수행하는 경우가 대부분이다. 미국 항공우주국(NASA)는 최초의 기상 레이더 센서를 탑재한 TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission) 위성과 협력위성을 결합하여 격자화된 TRMM TMPA(The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis)를 산출하여 1998년부터 자료를 제공하고 있으며(Huffman et al., 2007), TRMM 위성이 연료소진으로 임무수명을 다하고 이어 더욱 개선된 센서를 탑재한 GPM(Global Precipitation Mission)을 성공적으로 발사하고 이전보다 더 많은 협력위성과 고도화된 알고리즘을 바탕으로 GPM IMERG(Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM)와 같은 고해상도 격자 위성강우를 제공하고 있다(Huffman et al., 2014). 다만 위성영상 자료를 기반으로 개별 연구자의 경우에는 특정 유역을 대상으로 수행하는 경우가 많아 범용

적으로 바로 활용하기에는 한계가 존재한다(Xue et al., 2013). 이 중 IRI(International Research Institute for Climate and Society)는 ENACTS(The Enhancing National Climate Services) 프로젝트를 통해 의사결정자에게 아프리카 전역에 고해상도의 신뢰성 있고 쉽게 접근할 수 있는 기후 자료를 제공하고 있다(Dinku et al., 2014). 아프리카 많은 지역에서 기상관측소의 수가 희박하고 불균등하게 분포하고 있어 ENACTS를 수행하여 신뢰성 있는 기후 자료를 제공하며, 기후 자료를 개선하는 것에서 더 나아가 자료에 대한 접근성과 사용성을 높이는 데 중점을 두었다. IRI는 Climate and Society Map Room, IRI Data Library을 통해 지역별 기후 자료를 제공하고 있다.

APCC는 아시아-태평양 지역의 지속가능한 성장을 지원하는 연구를 수행한다. 따라서 아시아-태평양 지역의 기후변화로 인한 취약성 및 위험도를 최소화하기 위해서는 아시아-태평양 지역에 최적화된 기후자료와 응용 정보를 제공할 필요가 있다. 현재 대부분의 아시아-태평양 지역의 기후 자료 모니터링 시스템은 매우 열악하다. 이로 인해 기후변화로 인한 영향을 평가하는 데 있어 상당한 제약을 받고 있는 실정이다. 이러한 상황에서 APCC에서 위성영상을 기반으로 하는 격자단위의 신뢰성 높은 기후 자료를 구축하여 제공하는 것은 아시아-태평양 지역의 기후변화 적응대책을 마련할 수 있는 기반을 제공하는 획기적인 전환점이 될 것이라 사료된다. 과거 선행 연구의 경우 위성영상 자료를 이용하여 지점 기후 자료를 제공한 바 있다. 특정 유역 단위의 영향평가를 초점으로 하는 경우 일부분의 지점 자료로 의미 있는 결과를 도출할 수 있다. 다만 기후변화 적응정책이 국가 단위로 수립되고 행정구역 단위로 실행이 되어야 하는 점을 고려할 때 미계측유역을 포함한 지역 전체의 격자단위 기후 자료를 구축하여 제공하는 것은 보다 과학적이고 실용적인 적응 정책을 수립하는데 있어 반드시 필요하다. 우선적으로 관측자료가 잘 구축되어있는 한반도를 대상으로 본 연구에서 달성하고 하는 기법을 획득하고 추후 연구를 통해 아시아-태평양 지역 전체로 확장한다면 APCC가 아시아-태평양 지역의 기후변화 대응 및 적응능력을 향상시키는 데 선도적인 역할을 할 수 있을 것이라 사료된다.

1.2 연구 필요성 및 활용성

1.2.1 아시아-태평양 지역 기후 자료 구축 필요성

아시아-태평양 지역을 대상으로 해외사업을 수행하기 위해서는 기후자료의 구축이 반드시 필요하다. 특히 수자원과 관련되는 홍수, 가뭄 분석 등 주로 수문분석을 위한 양질의 과거 또는 미래의 기후자료를 얻는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 동남아시아의 경우 기후변화에 대한 인식이 부족할 뿐만 아니라, 관련 자료를 구하기가 쉽지 않아 사업을 추진함에 있어 많은 어려움을 겪고 있다.

한국농어촌공사도 태국정부와 수자원분야에서 기술협력사업을 해오면서 차오프라야강 유역에 대해 수자원관리시스템개발을 위한 공동연구, 관개관리정보시스템개발 시범사업 등을 추진한 사례가 있다. 수자원관리시스템개발 공동연구를 함에 있어, 차오프라야강 유역에서의 유출량, 관개수량을 분석하기 위해 왕립관개청을 통해 태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)에 기후자료를 요청한 바 있다. 당시 왕립관개청을 통해 공문으로 자료를 요청했음에도 불구하고 자료를 받기까지 2개월 이상 시간이 소요되었다. 또한 관측소별 계측을 실시한 연도부터 2014년도까지 자료를 요청하였으나, 2007년도까지 자료만 제공받아 수문분석을 제대로 하지 못한 사례가 있다.

또 다른 사례로는 관개정보시스템개발 시범사업의 일환으로 태국 북부에 위치한 쾨노이댐(Kwae Noi Dam)지점에 대한 농업용수공급 의사결정 툴을 개발하는 업무를 수행하면서 기상청에서 제공한 기후자료를 활용한 적이 있다. 활용한 자료는 1951년부터 2014년도까지 일별 온도(Tmax, Tmin), 상대습도(%), 일조량(hr), 증발량(mm/day), 강우량(mm/day) 등이었으나, 기상 인자별 약 30%의 결측치로 인해 자료를 보완하는데 몇 개월의 시간이 소요되었다.

일반적으로 기후자료는 태국 기상청에서 홈페이지를 통해 전국의 약 90개 관측소지점에 대해 최대 3년치 자료를 제공하고 있지만, 실제로 통계분석을 하기 위해서는 최소 30년치의 과거 자료가 필요하다. 또한 앞선 사례에서와 같이 공식적으로 자료를 요청하더라도 자료를 받기까지 오랜 시간이 소요되므로 사업 또는 연구를 수행하는데 많은 어려움이 있다고 할 수 있다. 기상청 자료 외에 다른 방안으로 왕립관개청에서 관리하는 전국의

497개의 강우량 계측을 위한 모니터링시스템 자료를 이용할 수도 있으나, 시스템의 유지 관리가 미비하여 현재 50%정도인 229개만 운영되고 있으며, 자료의 신뢰도가 낮아 과업에 활용하기에는 한계가 있다.

태국의 사례뿐만 아니라, 해외사업에 있어서 실제로 동남아시아 그리고 아프리카 지역의 대다수 국가에서 기후자료를 확보하는데 많은 시간이 소요되며, 또한 기후자료의 품질이 낮아 세계기상기구(WMO)에서 제공하는 자료를 활용하는 사례가 빈번하다. 근래에 들어 농업뿐만 아니라 사회간접자본(Social Overhead Capital, SOC) 관련 공공기관, 민간기업의 해외시장 진출이 활발해지고 있으며, 이에 따라 기후자료의 활용 측면 및 필요성이 높아지고 있다.

1.2.2 격자단위의 기후 자료 활용성

위성영상 기반 격자형 기후 자료를 구축하여 제공하면 다양한 응용분야에서 활용할 수 있다.

(1) 수문모델링을 수행시 격자형 자료의 활용성

수자원분야에서 기후자료를 사용하여 수문모델링을 수행할 시 기후자료가 대상구역에 대한 일관적인 분포를 가지는 것이 중요하다. 현재 관측자료는 지점 관측소에서 측정된 지점자료로 수자원에서 적용하는 유역을 대표한다고 보기는 어려워 실무에서는 티센망을 이용하여 사용하고 있는 실정이다. 티센망의 경우 지형학적 인자를 고려하지 않아 지점 관측소간의 거리가 클 경우 오차가 발생할 가능성이 큰 한계가 있다. 특히 댐 상류 유역은 일반적으로 산악지형으로 구성되어있어 기존의 티센망과 같은 유역 평균 강수정보 산정 기법을 사용할 경우 지형효과를 고려하지 못해 강우-유출 해석 시에 오차가 크게 발생할 수 있다.

(2) GCM 결과 자료 평가시에 격자형 자료의 활용성

기후모델 산출물은 특정 격자 단위의 지역 평균값을 의미한다. 따라서 기후모델 결과

의 합리적인 보정을 위해서는 동일한 해상도의 지역 평균 관측 자료가 필요하다. 이를 위해서는 격자형 관측정보가 필요하다. 특히 우기에 발생하는 대류성 강우사상(convective storm)의 경우에는 강도 및 지속시간 등의 특성이 근거리에 대해서도 다를 수가 있으므로 지점 관측 자료를 일반적인 기후모델 결과 자료와 직접 비교/분석하는 것은 적절하지 않다. 지점 관측 자료 밖에 사용할 수 없는 상황이어도 지점 자료를 보간을 해서 비교하는 것이 타당하다고 사료된다.

- (3) 지역의 수문 기작을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 강수량의 공간적인 분포를 정확하게 나타내는 것이 중요함

격자형 관측정보는 일관적인 형태의 기상정보이기 때문에 해당되는 기후정보를 재현할 수 있다면 보다 정확한 수문해석을 수행할 수 있다. 특히 고해상도 자료를 쓰면 수문학적으로 유량의 분포를 더 적절히 모의할 수 있다. 예를 들면 공간적으로 균일한 작은 강우강도는 해당 유역에 대한 증발산량과 지하수 충전량을 크게 생산한다. 이로인해 공간적으로 분포된 같은 총량의 강우강도와 비교하면 지표유출이 작게 산정되는 경우가 발생한다.

- (4) 정책적으로 지역단위의 신뢰도를 높인 자료를 만들어야할 필요성이 있음

우리나라의 예를 들면 국가기후변화적응센터는 광역 및 기초 지방자치단체의 기후변화 적응 세부시행계획 수립을 지원하기 위해 Climate Change adaptation toolkit based on GIS(CCGIS)와 Local Climate Change adaptation toolkit based on GIS(LCCGIS)에 기반한 웹 기반 기후변화 취약성 평가 지원도구(Vulnerability assESsment tool To build climate change Adaptation Plan, VESTAP) 서비스를 제공하고 있다. 격자형 관측자료를 VESTAP 서비스에 입력하여 보다 신뢰도가 높은 취약성 평가를 수행할 수 있다.

1.2.3 아시아-태평양 지역의 관측소 현황

본 연구에서 대상으로 하는 미계측유역은 관측소가 하나도 존재하지 않은 유역이 아니라 응용 분야에서 활용하기에는 관측소 밀도가 낮은 유역을 의미한다. WMO는 도시 지역의 강수관측소를 10-20 km² 마다 1개씩 설치하도록 권장하고 있다(WMO, 1994). 우리나라 댐 설계기준에 따르면 유역면적이 100 km² 이상이 댐에 대해서는 30 km² 마다 1개 관측소 이상에서 강수량 자료를 구축하여 사용하도록 규정하고 있다(댐설계기준, 2011). 또한 하천설계기준은 강수량 관측망을 구성할 때 강수 발생 상황이 균일하게 나타나도록 구역을 분할하여 관측소를 배치하도록 하고 있다. 균일한 강수 발생 상황으로 분할하기 어려운 경우에는 50 km² 마다 1개 관측소를 설치하고, 도시와 같이 홍수예보가 중요한 곳에서는 50 km² 마다 2개 관측소 이상을 설치하도록 규정하고 있다.

GHCN(Global Historical Climatology Network)에서 제공하는 국가별 관측소 현황 자료를 이용하여 아시아-태평양 지역의 관측소 밀도를 분석하였다(Figure 1). 관측소 밀도가 가장 낮은 국가는 캄보디아로(425.5 km/station) 나타났으며, 가장 높은 국가는 마셜 제도로(2.9 km/station) 나타났다. 아시아-태평양 국가 중 선진국에 해당하는 국가는 대체로 관측소 밀도가 높은 것으로 나타났다. 아시아-태평양 지역의 관측소 밀도는 대부분 50-200 km/station의 범위를 보여주고 있으며, 중간값은 95.7 km/station 으로 산정되었다. 이는 앞에서 언급한 WMO 권장 기준에 전혀 부합하지 못하는 것을 의미하며 대부분의 아시아-태평양 지역이 미계측유역에 해당함을 의미한다.

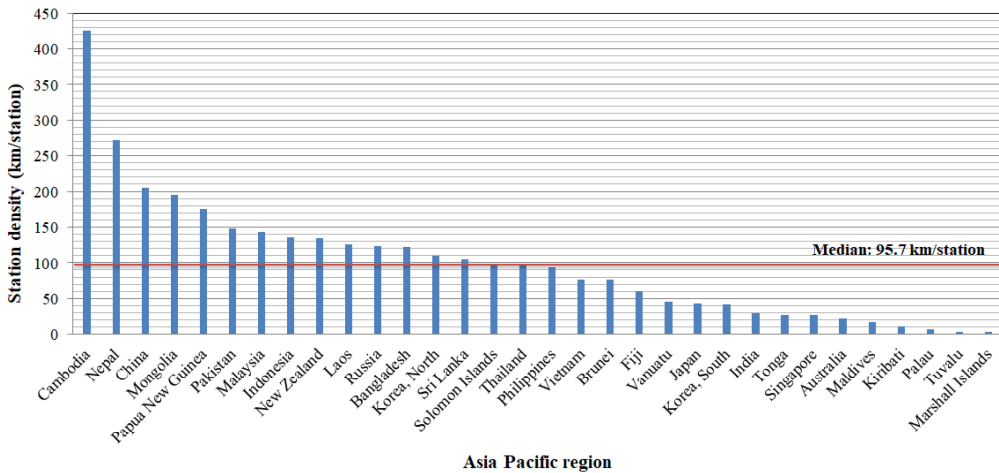


Figure 1. Station density in the Asia-Pacific region

1.3 연구 목적

본 연구의 목적은 미계측지역 대상으로 기후자료 현황을 파악하여 활용 가능한 위성영상 자료(강수량)를 구축하고, 편의보정, 공간상세화를 수행하여 의사결정자에게 고해상도 (1 day / 0.1°, 0.05°)의 신뢰성 있고 쉽게 접근할 수 있는 기후 자료를 제공하는 데 있다. 비교적 신뢰성이 높은 기후 자료가 구축된 한반도를 대상으로 위성영상 상세화 기법을 검증한 다음, 바누아투에 적용하여 위성영상 기반 기후 자료를 구축하였다.

1.4 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 기후 자료가 잘 구축된 한반도를 대상으로 위성영상 편의보정, 공간상세화 기법을 검증하고, 개발한 기법을 미계측유역인 바누아투에 적용하여 기후 자료를 생산하였다. 따라서 한반도에 대한 검증 결과를 먼저 분석한 다음, 바누아투에 적용한 결과를 제시하였다.

기후 변수는 응용분야에서 많이 쓰이는 강수량을 우선적으로 선정하여 구축하였다. 한반도의 관측소는 60개의 종관기상관측장비(Automated Synoptic Observation System, ASOS), 바누아투의 관측소는 총 6개의 관측소를 사용하였다. 본 연구에서 제공

하고자 하는 시간단위가 일자료이기 때문에 관측 자료도 기본적으로 일자료가 필요하다. 한반도는 기상청에서 품질관리를 수행한 일자료를 활용하여 구축하였고, 바누아투는 관계 기관과 MOU를 체결하여 받은 일자료를 활용하여 구축하였다. 바누아투 일자료를 분석한 결과 결측치가 존재하는 것을 확인하였으며 결측치는 인근 관측소 자료를 사용하여 대체하였다.

본 연구의 최종 결과물을 Table 1에 정리하였다. Raw_SRE는 원시위성자료, BC_SRE(IDW)는 IDW 기법으로 편의보정한 위성자료, Raw_SRE_PRISM는 원시위성자료를 공간상세화한 자료, BC_SRE(IDW)_PRISM는 IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료를 의미한다. BC_SRE는 편의보정 기법에 따라 BC_SRE(IDW), BC_SRE(Kriging), BC_SRE(QM)으로 구분할 수 있다. BC_SRE(IDW), BC_SRE(Kriging), BC_SRE(QM)은 각각 GRA-IDW, GRA-Kriging, Quatile Mapping 기법¹⁾으로 편의보정한 위성자료를 의미한다. 최종적으로는 GRA-IDW 기법을 적용한 BC_SRE(IDW) 자료만 생산하였다.

Table 1. Final products of this study

Type	Period	Temporal resolution	Spatial resolution
1. Raw_SRE	1998-2017	1 day	0.1°
2. BC_SRE(IDW)	1998-2017	1 day	0.1°
3. Raw_SRE_PRISM	1998-2017	1 day	0.05°
4. BC_SRE(IDW)_PRISM	1998-2017	1 day	0.05°

- SRE: Satellite Rainfall Estimates, BC: Bias-corrected, PRISM: Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model

1) GRA: Geographical Ratio Analysis

2. 연구자료

2.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 한반도와 바누아투로 선정하였다. 한반도는 총 60개 관측소, 바누아투는 총 6개의 관측소를 분석에 사용하였다. 한반도는 30년 이상의 관측 자료가 축적된 관측소를 선정하였고, 바누아투는 GHCN에서 제공하는 모든 관측소를 선정하였다. Table 2-Table 3은 한반도와 바누아투의 관측소 목록을 보여주고 있다. Figure 2는 한반도와 바누아투의 관측소 위치를 나타내고 있다.

Table 2. Station list for South Korea

ID	Name	Lon.	Lat.	Start year	ID	Name	Lon.	Lat.	Start year
90	Sokcho	128.550	38.250	1968	202	Yangpyeong	127.483	37.483	1973
100	Daegwallyeong	128.717	37.667	1972	203	Icheon	127.483	37.250	1973
101	Chuncheon	127.733	37.900	1966	211	Inje	128.167	38.050	1973
105	Gangneung	128.883	37.750	1912	212	Hongcheon	127.867	37.683	1973
108	Seoul	126.950	37.567	1908	221	Jecheon	128.183	37.150	1973
112	Incheon	126.617	37.467	1949	226	Boeun	127.733	36.483	1973
114	Wonju	127.933	37.333	1973	232	Cheonan	127.117	36.767	1973
119	Suwon	126.983	37.267	1964	235	Boryeong	126.550	36.317	1973
127	Chungju	127.950	36.967	1973	236	Buyeo	126.917	36.267	1973
129	Seosan	126.483	36.767	1968	238	Geumsan	127.467	36.100	1973
130	Ulsan	129.400	36.983	1972	243	Buan	126.700	35.717	1973
131	Cheongju	127.433	36.633	1967	244	Imsil	127.283	35.600	1973
133	Daejeon	127.367	36.367	1969	245	Jeongeup	126.850	35.550	1973
135	Chupungnyeong	127.983	36.217	1949	247	Namwon	127.317	35.400	1973
138	Pohang	129.367	36.017	1949	256	Juam	127.233	35.067	1973

ID	Name	Lon.	Lat.	Start year	ID	Name	Lon.	Lat.	Start year
140	Gunsan	126.750	36.000	1968	260	Janheung	126.917	34.683	1973
143	Daegu	128.617	35.883	1909	261	Haenam	126.567	34.550	1973
146	Jeonju	127.150	35.817	1919	262	Goheung	127.267	34.617	1973
152	Ulsan	129.317	35.550	1946	272	Yeongju	128.517	36.867	1973
156	Gwangju	126.883	35.167	1940	273	Mungyeong	128.133	36.617	1973
159	Busan	129.017	35.100	1905	277	Yeongdeok	129.400	36.517	1973
162	Tongyeong	128.433	34.833	1968	278	Uiseong	128.683	36.350	1973
165	Mokpo	126.367	34.817	1906	279	Gumi	128.317	36.117	1973
168	Yeosu	127.733	34.733	1943	281	Yeongcheon	128.950	35.967	1973
170	Wando	126.700	34.383	1973	284	Geochang	127.900	35.667	1973
184	Jeju	126.517	33.500	1954	285	Hapcheon	128.167	35.550	1973
188	Seongsan	126.867	33.383	1972	288	Miryang	128.733	35.483	1973
189	Seogwipo	126.550	33.233	1961	289	Sancheong	127.867	35.400	1973
192	Jinju	128.033	35.150	1970	294	Geoje	128.600	34.883	1973
201	Ganghwa	126.433	37.700	1973	295	Namhae	127.917	34.800	1973

Table 3. Station list for Vanuatu

ID	Name	Lon.	Lat.	Elevation	Start year
NH000091554	PEKOA AIRPORT	167.217	-15.517	44	1976
NH000091568	ANEITYUM	169.767	-20.233	7	1952
NHM00091551	SOLA/VANUA LAVA ISL	167.55	-13.850	18	1979
NHM00091555	LAMAP/MALEKOULA ISL	167.800	-16.417	26	1979
NHM00091557	PORT VILA BAUERFIELD	168.320	-17.699	21.3	1985
NHM00091565	TANNA	169.224	-19.455	5.8	1979

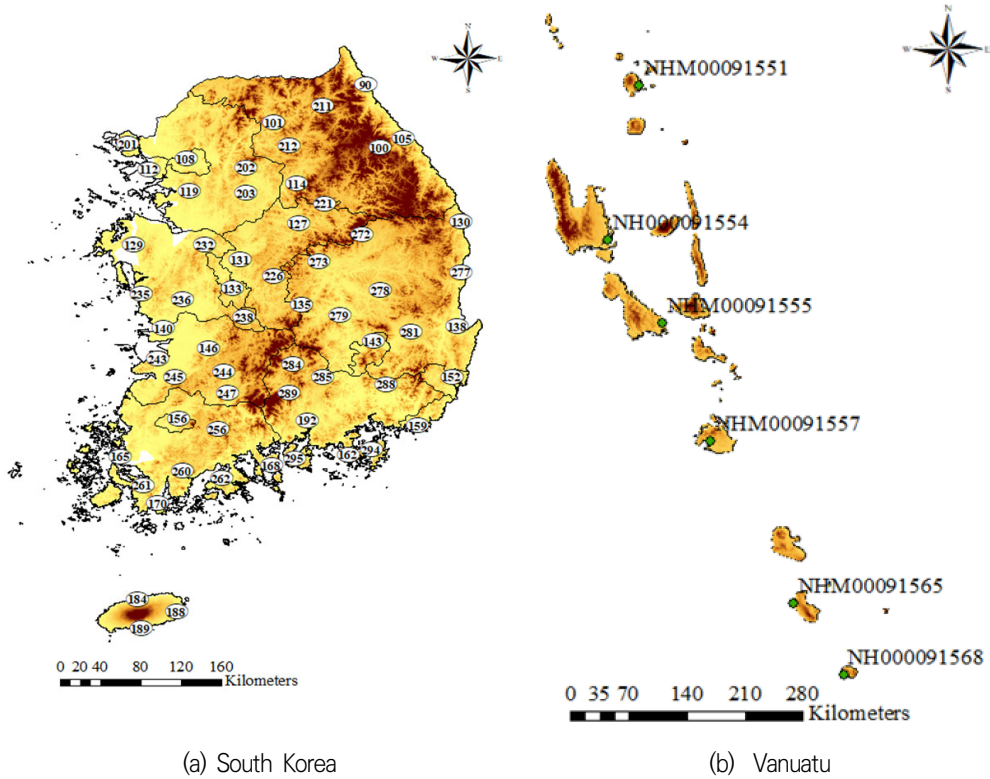


Figure 2. Station location for South Korea and Vanuatu

2.2 지형자료

한반도와 바누아트의 지형자료는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission, 250m 공간해상도) 자료를 이용하여 구축하였다. PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)을 모의하기 위해 DEM을 이용하여 경사향, 해안으로부터 거리를 추가적으로 구축하였다. Figure 3-Figure 4는 한반도와 바누아트의 지형자료를 구축한 결과를 보여주고 있다. 지형자료는 공간상세화를 수행할 해상도인 0.05° 로 변환하여 구축하였다. 경사향은 총 3개의 그룹으로, 해안으로부터 거리는 6개 그룹으로 구분하여 구축하였다.

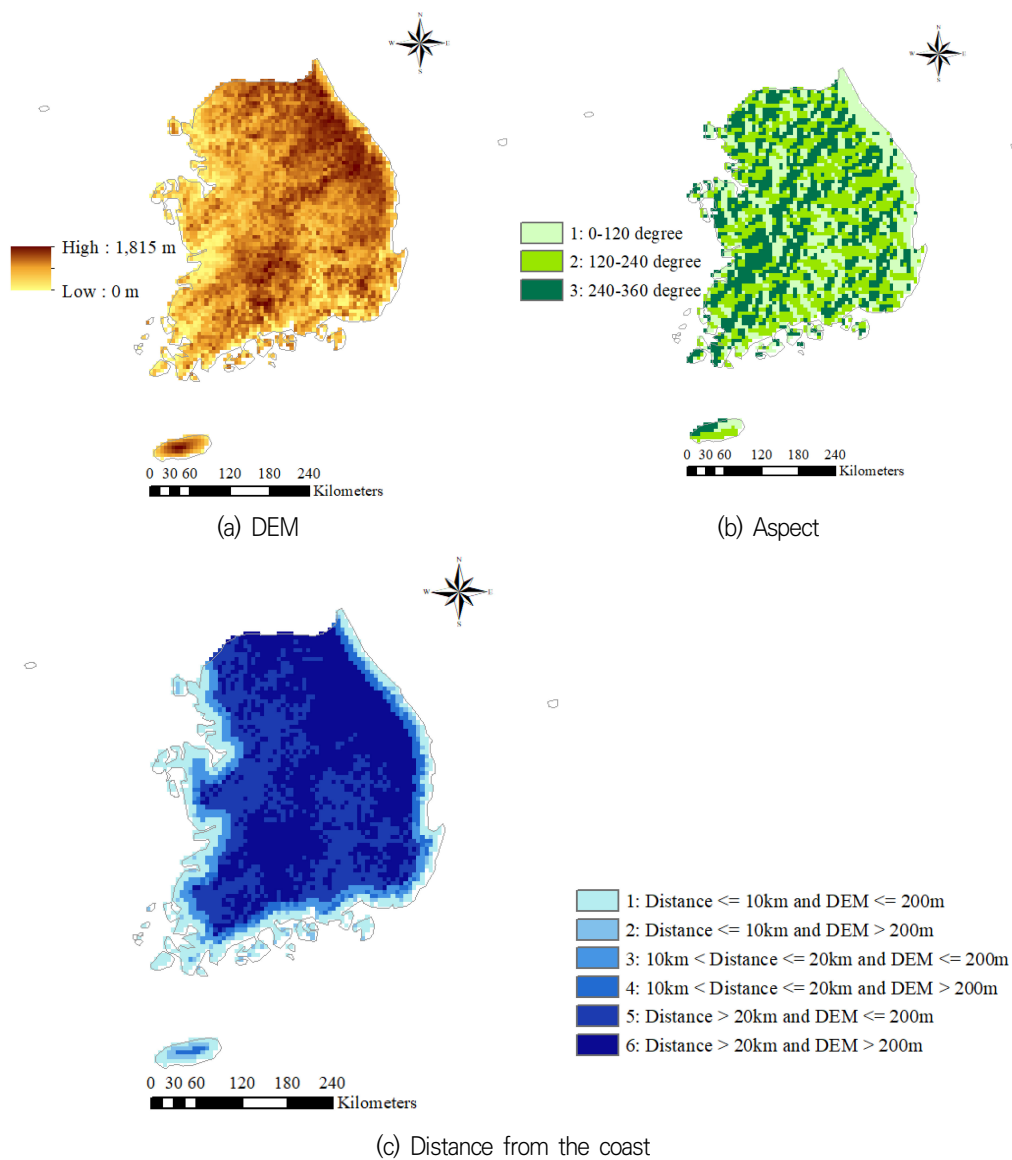


Figure 3. DEM, aspect, and distance from the coast for South Korea (Spatial resolution: 0.05°)

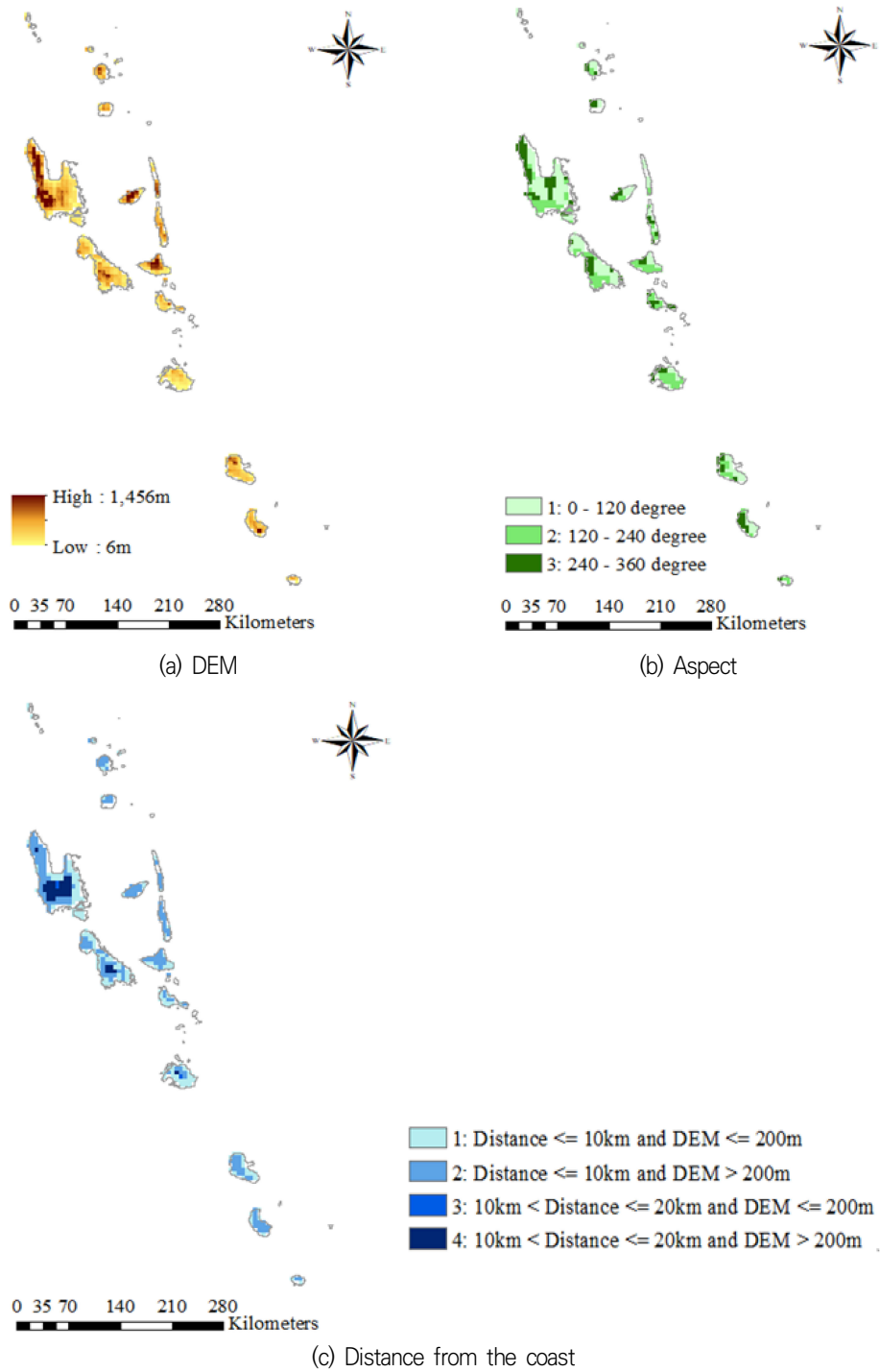


Figure 4. DEM, aspect, and distance from the coast for Vanuatu (Spatial resolution: 0.05°)

2.3 위성영상 자료

2.3.1 정지궤도 위성

TRMM 위성이 세계최초로 강수레이더를 탑재하고 강수량을 측정하기 이전에는 정지궤도 위성자료를 이용하여 강수량을 측정하였다. 전지구의 기상을 위성으로 관측하기 위하여 발사된 위성은 전지구를 커버하기 위하여 미국은 GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite), 아시아는 일본 GMS(Geostationary Meteorological Satellite), 유럽은 METEOSAT위성이 같은 센서 구성을 가지고 구름과 수치예보의 입력자료로 이용되었다. 최근에는 한국 천리안 위성이 최초로 발사되고, 인도는 INSAT(The Indian National Satellite), 중국 FY(FengYun), 러시아 Electro-L 등 더 많은 나라에서 정지궤도 위성이 발사되었다. 가시, 수증기, 적외채널 등 5개의 채널로 구성된 정지궤도 위성은 현재 일본 Himawari 위성을 선두로 미국 GOES-R, MTG(Meteosat Third Generation)위성 등 차세대 정지궤도 위성 센서가 탑재되어 발사되고 있으며, 이에 발맞춰 한국도 천리안 2 위성이 2018년 가을 발사 준비 중에 있다. 차세대 정지궤도 센서는 현재의 5개보다 많은 16개의 센서를 가지고 있으며, 보다 다양한 기상 및 기후 분야에 활용이 가능하다. 천리안 위성은 2010년 6월 27일 성공적으로 발사되었고, GOES, MTSAT(Multifunctional Transport Satellites)와 같은 5개의 센서를 탑재되었다. 가시채널은 $0.5 \sim 0.9\mu\text{m}$ 의 파장대로 안개, 적설, 해빙 등의 기상변수 관측에 유용하며, 단파적외 채널은 $3.7\mu\text{m}$ 의 파장대로 하층운, 안개, 산불 등에 이용가능하다. 수증기 채널은 대기의 수증기량 관측이 가능하며 두 개의 적외채널은 강우강도, 구름 탐지, 바람장, 해수면 온도 관측에 이용되고 있다(Figure 5).

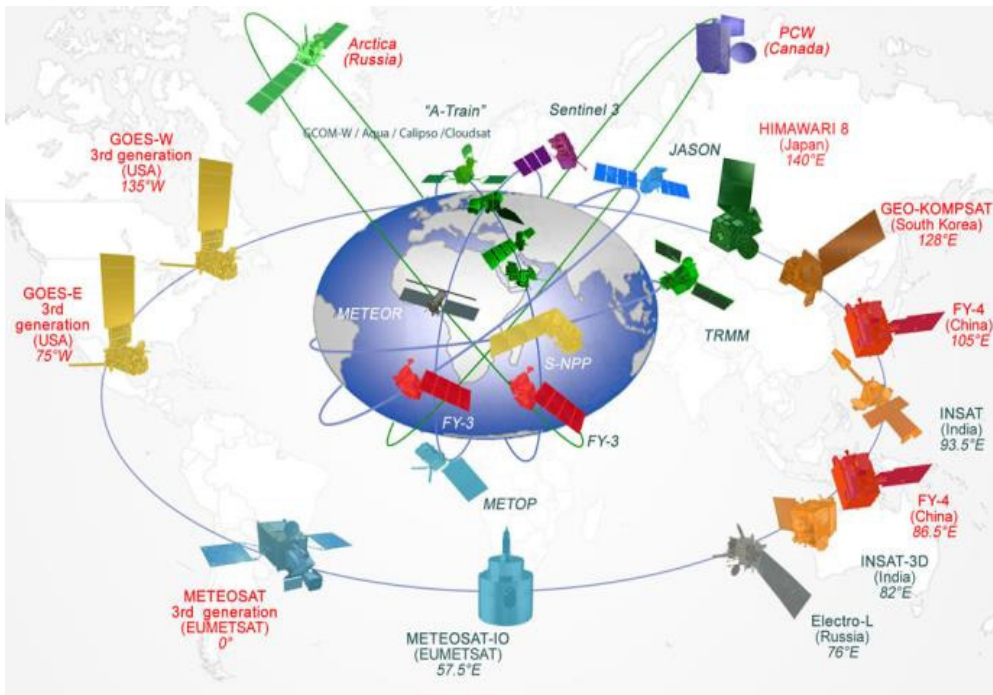


Figure 5. Geostationary satellites radmap

2.3.2 TRMM 위성

TRMM 위성은 적도지역의 강우량을 관측함으로써 기후변화에 대한 연구를 위해 기획되었으며, 정확한 강수량 관측을 위하여 세계최초로 강우레이더가 탑재되어 1997년에 발사되었다(Figure 6).

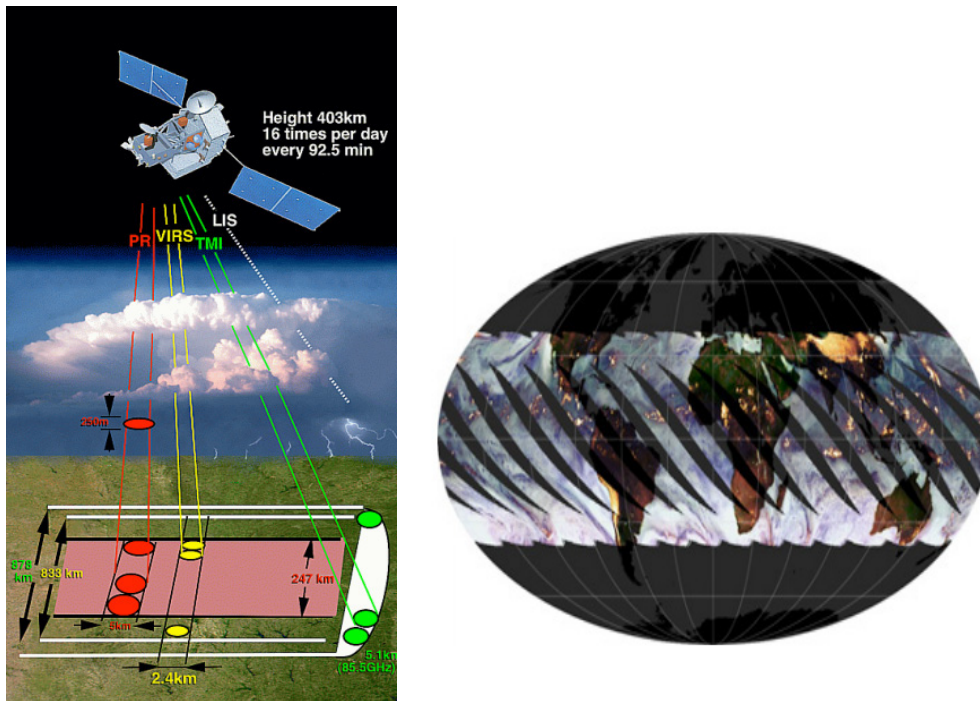


Figure 6. TRMM(Tropical Rainfall Measurement Mission) satellite

TRMM 위성은 적도를 관측하며 재방문 주기가 12시간 정도이며, 남위 35도부터 북위 35도까지 하루 16번 정도의 위성궤도로 관측한다(Figure 7). 최초의 강우레이더 PR(Precipitation Radar)와 TMI(TRMM Microwave Imager), VIRS(Visible and Infrared Scanner) 센서가 탑재되어 있다. PR센서는 13.6GHz의 주파수로 한번에 220km Swath거리로 관측하며, 공간해상도는 5 km이다. TMI 수동 마이크로파 이미저는 10.7, 19.4, 21.3, 37, 85.5GHz 수직, 수평 편광주파수를 가지고 있으며 공간해상도는 5 km에서 45 km로 주파수에 따라 달리 공간해상도를 가진다(Figure 8).

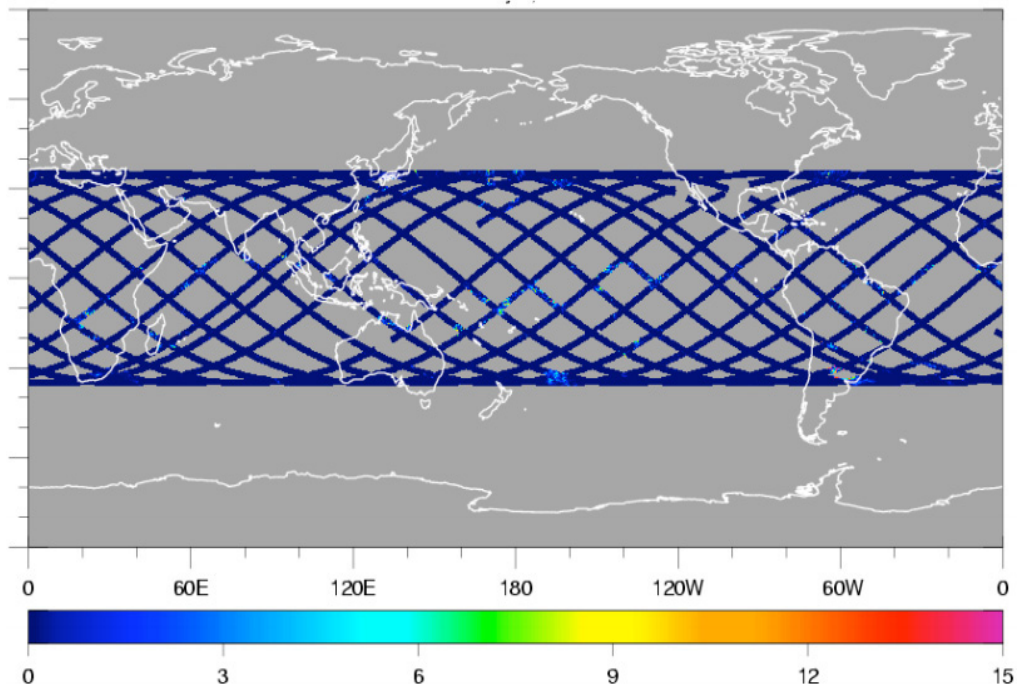


Figure 7. TRMM 1 day orbit

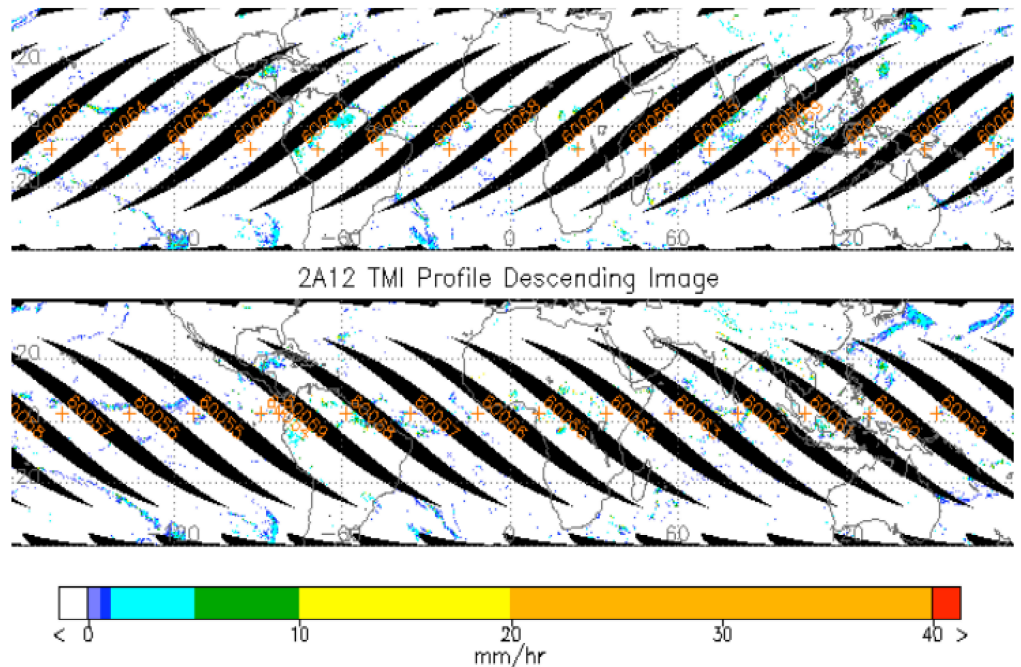


Figure 8. TRMM TMI measurement

기후변화와 응용분야 활용에 강수자료를 이용하기 위하여 NASA에서는 TRMM 위성의 PR, TMI 센서, SSM/I(Special Sensor Microwave Imager), AMSR(Advanced Microwave Scanning Radiometer), AMSU-B(Advanced Microwave Sounding Unit) 수동마이크로파 센서들, 정지궤도 NOAA위성 VIRS 등 다양한 센서를 결합하여 TMPA (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis; 3B42)자료를 산출한다. 최종산출물은 3시간 간격으로 25 km의 공간해상도로 남위 50도에서 북위 50도의 관측 범위를 가진다. Figure 9는 TMPA 자료 중에서 3시간 동안 TMI, SSM/I, AMSR-E, AMSU-B 센서가 관측할 수 있는 범위를 나타낸다.

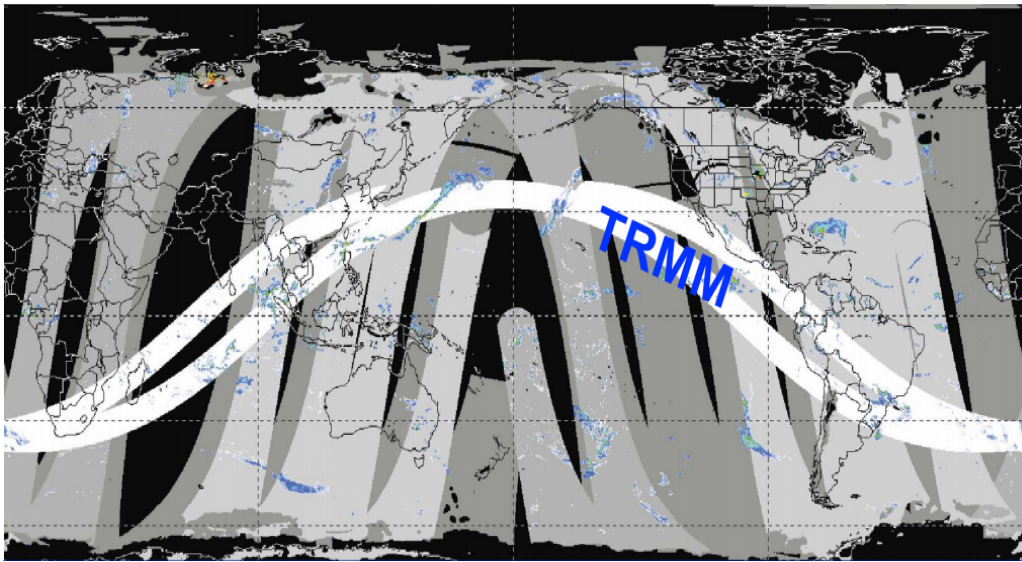


Figure 9. Microwave measurements of TMPA for 3-hour period.

2.3.3. GPM 위성

GPM 위성은 듀얼레이더가 탑재된 핵심 코어 위성과 강수량을 관측할 수 있는 협력위성의 조합으로 보다 정확한 강수량을 관측하기 위한 연구로 시작되었다. 핵심 코어 위성인 GPM 위성은 TRMM 위성의 후속위성으로 전 지구 강수량을 관측하기 위한 목적으로 일본 JAXA 듀얼레이더를 탑재하고 NASA 수동마이크로파 GMI센서를 탑재하고 2014년 2월 27일 발사되었다(Figure 10).

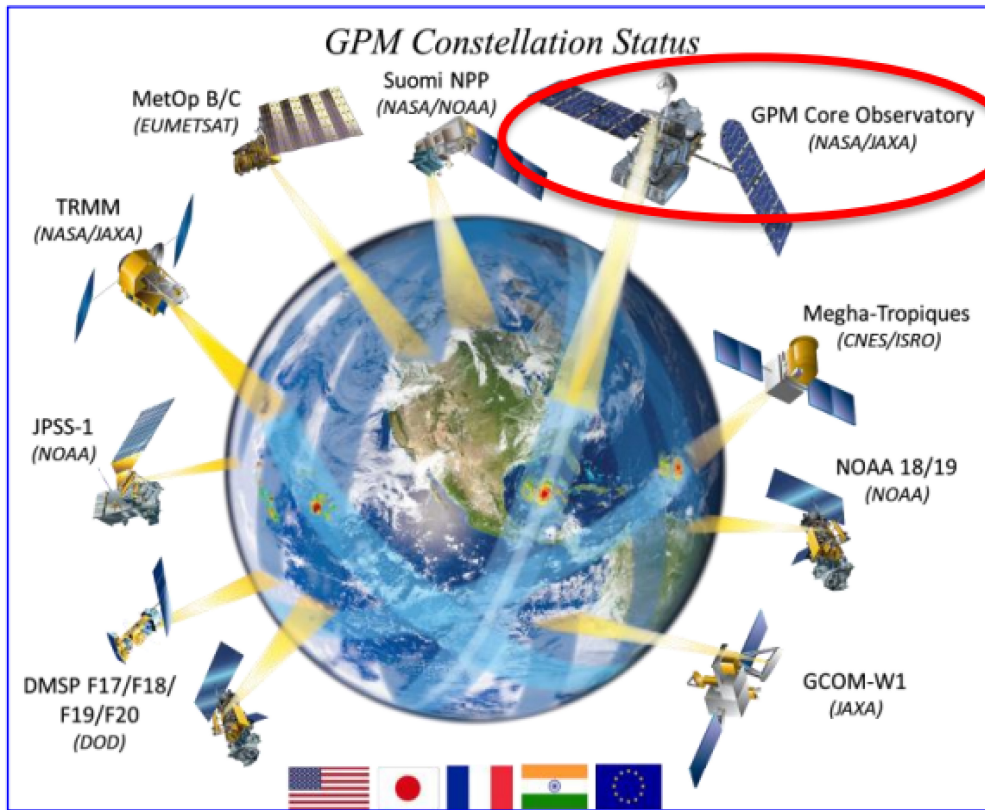


Figure 10. GPM(GPM Precipitation Mission) Satellite

GPM위성의 위성궤도는 적도지역의 강수량을 관측하기 위해 발사된 TRMM위성(북위 35°~남위 35°)과 달리 극궤도 위성으로 남위 70°와 북위 70°의 관측범위로 관측한다 (Figure 11).

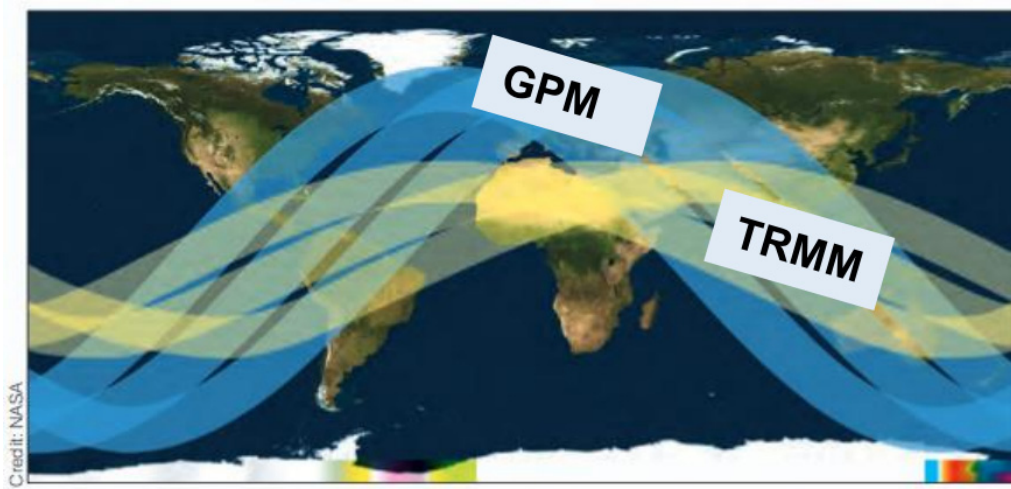


Figure 11. Coverage of TRMM orbits(yellow) vs orbits of the GPM core satellite(blue)

GMI(GPM Microwave Imager) 센서는 10.6, 18.7, 23.8, 36.5, 89GHz 채널과 TRMM TMI 센서와 달리 166 및 183GHz의 채널이 추가되고 Figure 12와 같이 Swath 거리가 885 km로 넓은 지역을 관측 가능하다. 공간해상도는 10GHz채널일 때 19.4 km × 32.2 km, 183GHz일 때 4.4 km × 7.3 km의 공간해상도는 가진다.

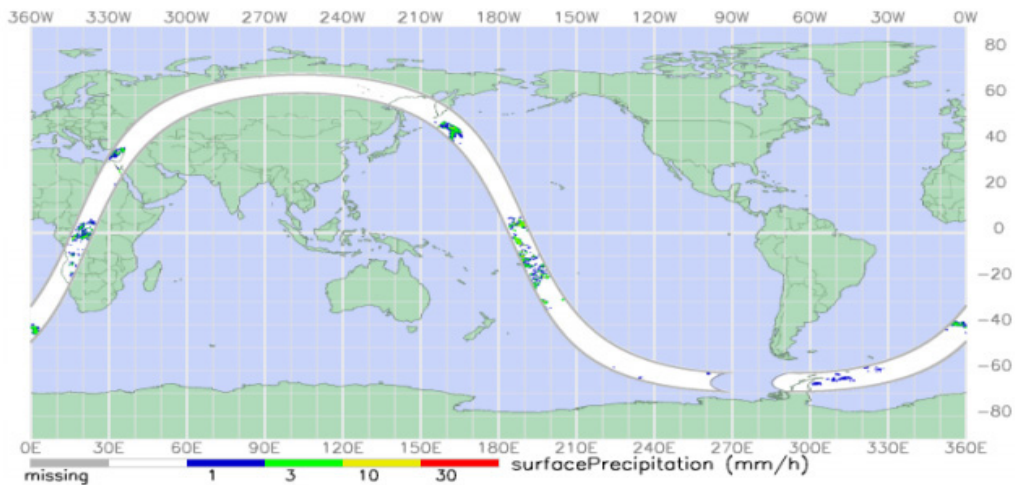


Figure 12. Swath of GPM GMI(GPM Microwave Imager) sensor

GPM위성은 TRMM 13.5GHz의 단일 레이더에서 35GHz 레이더 하나가 더 추가되어 듀얼레이더(Dual Precipitation Radar; DPR)가 장착되었다. Ku 13.5GHz레이더는 Swath 거리가 245 km이며 공간해상도는 5.2 km이고 (Figure 13(a)) 추가된 Ka 35GHz레이더는 Swath 거리가 120 km 공간해상도는 Ku레이더와 같은 5.2 km이다 (Figure 13(b)).

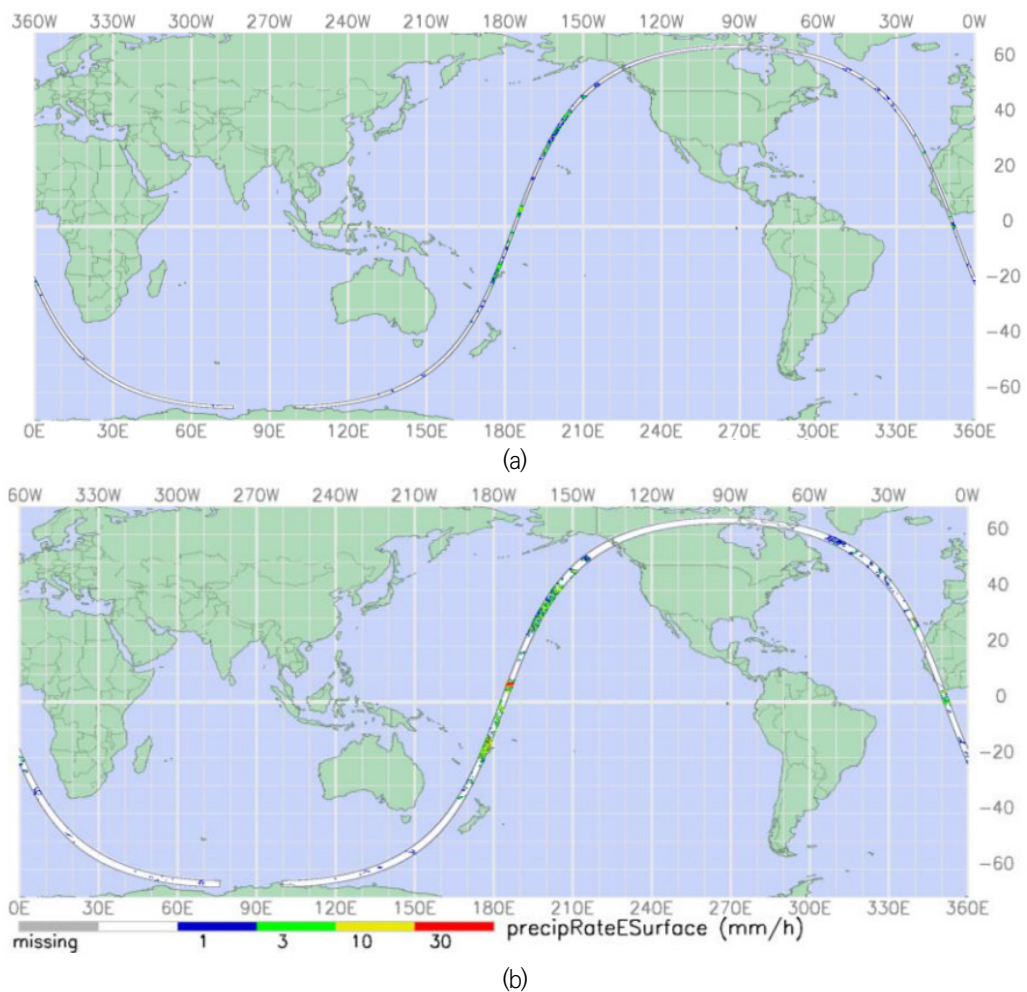


Figure 13. Swath of GPM Ku 13.5GHz(a) and Ka 35GHz(b) precipitation sensor

2.3.4. 위성영상자료 특징

정지궤도 위성은 강수량 관측에 있어 레이더 센서와 수동 마이크로파 센서에 비해 강수량 관측 정확도는 떨어지지만 15분에서 30분 간격으로 관측하기 때문에 시간해상도가 좋은 장점이 있다. 더불어 레이더 센서가 장착되어 지구를 관측하기 시작한 1998년 이전에 70, 80, 90년대 자료가 구축이 되어 있어 긴 시간의 자료가 필요한 기후분야 중요한 자료 중의 하나이다. TRMM 데이터는 남위 35도에서 북위 35도의 범위로 전지구 관측이 어려운 뚜렷한 한계를 가지고 있으나 세계 최초로 레이더 센서가 장착되어 이전 정지궤도 센서에서 관측하는 강수량보다 정확한 강수량을 제공한다. 협력위성 자료와의 결합으로 NASA TMPA자료는 기후연구의 기본 자료로 활용되고 있다. GPM GMI센서는 TRMM TMI 센서와 비교하여 공간해상도가 더 좋아졌으며, 166, 183GHz 센서 탑재로 적은양 비($< 0.5 \text{ mm/hr}$)의 관측 정확도가 향상되었고 더불어 강설량 관측도 가능하게 되었다. GPM 위성의 듀얼레이더(DPR)는 TRMM 위성의 단독 레이더에 비하여 Ka(35GHz) 레이더 추가로 TRMM단독 레이더보다 더 정확성이 향상되었고 GMI센서와 마찬가지로 적은 양의 보다 정확한 강수량과 이전에 관측하지 못했던 강설량 관측이 가능하다. 강수관측이 가능한 모든 협력위성들과 결합되어 격자화된 GPM IMERG자료를 현재 생산 제공하고 있다. Table 4는 본연구에서 사용한 위성영상의 개요를 설명하고 있다.

Table 4. Overview of satellite imagery

	Period			Etc.
	1983-1997	1998-2014.7	2014.8-2017	
Satellite type	PERSIANN-CDR	TRMM TMPA	GPM IMERG	GPM is in operation
Temporal resolution	1 day	3hr	30min	
Time zone	UTC	UTC-)>KST	UTC-)>KST	

2.4 응용부문별 기후 자료 활용 현황

응용부문별 주로 활용하는 기후 자료 현황을 파악하기 위해 APCC내에 내부 전문가 자문을 수행하였다. APCC는 다년간 기후 자료를 응용부문에 활용하는 연구를 수행하고

있다. 다양한 응용부문 중 농업, 물관리, 해양생태계 부문을 선정하여 연구에 필요한 기후 변수 목록을 조사하여 Table 5에 정리하였다. 대체로 농업, 물관리, 해양생태계 부문에서 강수량, 기온 등의 변수는 공통적으로 필요한 변수로 나타났다.

농업 부문은 작물생산과 관련하여 변수가 가장 많이 필요한 것으로 나타났다. 일단위의 강수량, 기온 자료를 활용하여 무강수일수, 적산온도를 산정하는 것이 농업 가뭄과 작물의 생육에 중요한 것으로 조사되었으며, 냉해로 인한 피해를 공간적으로 확인하기 위해 격자 기반의 자료가 필요한 것으로 나타났다. 또한 산지에 위치한 농경지의 경우 고도에 따른 기온차가 크기 때문에 1 km 정도의 고해상도 격자 자료가 필요한 것으로 나타났다.

물관리 부문은 치수 측면과 이수측면으로 기후 자료의 활용성이 구분된다. 홍수 대비와 같은 치수 측면의 경우에는 시간 단위의 강수량 자료가 가장 중요한 것으로 조사되었고, 가뭄 관리와 같은 이수 측면의 경우에는 일단위 강수량, 기온, 상대습도, 일사량, 풍속 등이 필요한 것으로 조사되었다.

해양 부문은 전반적으로 기온과 강수량이 중요한 기후 변수로 파악되었다. 특히 해수면 온도(Sea surface temperature)가 추가로 필요한 것으로 파악되었다. 해양 부문의 경우는 월단위의 기후 변수를 활용하여 분석을 수행할 수 있으며 일단위의 자료가 구축된다면 보다 정밀한 결과를 생산할 수 있다. Table 6은 해양 부문과 관련된 생물 기후에서 활용하는 변수 목록을 보여주고 있다. 강수량과 기온을 활용하여 변수를 추가로 생산하여 활용하는 것을 알 수 있다.

Table 5. Climate variable list by application sector

Variable	Agriculture	Water management		Marine ecosystem	
	Daily	Daily	Hourly	Monthly	Daily
Precipitation	O	O	O	O	O
Average temperature	O	O		O	O
Maximum temperature	O	O		O	O
Minimum temperature	O	O		O	O
Sea surface temperature				O	O
Solar radiation	O	O			
Evapotranspiration	O	O			
Relative humidity	O	O			
Wind speed	O	O			
NDVI	O				
Soil moisture	O				

Table 6. Bioclimatic variables list (WorldClim, 2018)

BIO1	Annual Mean Temperature
BIO2	Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))
BIO3	Isothermality (BIO2/BIO7) (*100)
BIO4	Temperature Seasonality (standard deviation *100)
BIO5	Max Temperature of Warmest Month
BIO6	Min Temperature of Coldest Month
BIO7	Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)
BIO8	Mean Temperature of Wettest Quarter
BIO9	Mean Temperature of Driest Quarter
BIO10	Mean Temperature of Warmest Quarter
BIO11	Mean Temperature of Coldest Quarter
BIO12	Annual Precipitation
BIO13	Precipitation of Wettest Month
BIO14	Precipitation of Driest Month
BIO15	Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)
BIO16	Precipitation of Wettest Quarter
BIO17	Precipitation of Driest Quarter
BIO18	Precipitation of Warmest Quarter
BIO19	Precipitation of Coldest Quarter

3. 연구방법

본 연구는 총 3단계(1. 위성영상 자료 수득 및 전처리, 2. 위성영상 상세화 기법 개발, 3. 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템 개발)로 나누어 수행하였다. Figure 14는 본 연구의 전체적인 개요를 보여주고 있다. “1. 위성영상 자료 수득 및 전처리”는 원시위성자료의 격자단위 강수량을 추출하여 데이터베이스로 구축하고 전처리 작업을 수행한다. “2. 위성영상 상세화 기법 개발”은 원시위성자료를 지점 관측자료를 이용하여 보정한 자료를 생산하고, 지형자료를 이용하여 공간적 상세화를 수행한다. “3. 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템 개발”은 최종 생산된 원시위성자료, 편의보정한 위성자료, 공간상세화한 위성자료를 지점별, 격자별로 배포할 수 있는 기법을 개발한다.

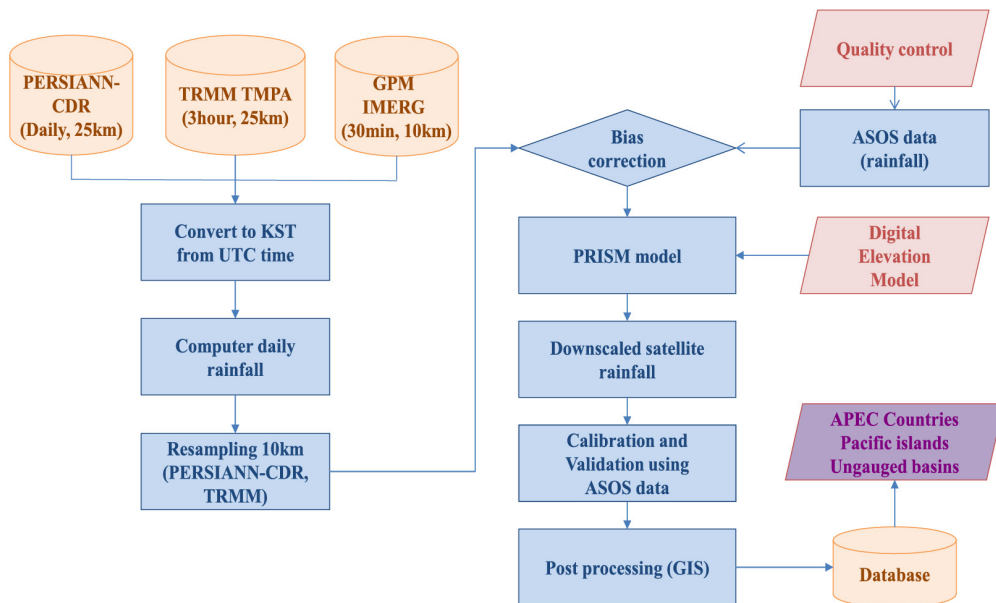


Figure 14. Flow chart of satellite rainfall based climate data management system

3.1 위성영상 자료 수득 및 전처리

응용부문별 (보건, 산림, 생태계, 농업, 물관리, 해양/수산, 재해) 기후 자료 수요와 활용 현황을 파악하여 우선적으로 구축해야 할 자료 목록을 생성하였다. 응용부문별 필요한 기후 변수(강수량, 기온), 공간해상도(25 km, 10 km grid 등), 시간해상도(Month, Day, Hour 등)를 조사한 다음, 위성영상 별로 제공하는 해상도가 모두 다르므로 필요한 해상도에 맞추어 기관별로 제공하는 위성영상(Raw 데이터)을 수득(from NASA, NOAA)하여 데이터베이스를 구축하였다. 응용부문별 수요를 고려한 활용 가능 변수, 공간해상도, 시간해상도를 분석하여 전처리 과정을 수행하였다.

3.1.1 PERSIANN-CDR 자료수집

PERSIANN 자료는 기후연구와 수문분야 활용을 위한 일 강수량자료이다. 기후분야에서 기본적으로 30년 자료가 필요한 관계로 위성에 레이더가 장착된 1998년 이전 일자료는 PERSIANN-CDR 자료를 이용하였다. 정지궤도 적외채널과 극궤도 위성의 수동 마이크로파 채널을 인공지능망(artificial neural network) 방식으로 강수량을 추정하였다. 정지궤도 강수량은 적외채널의 휘도온도에 따른 경험식을 이용하여 산출하였다(Hsu et al., 1997, 1999; Sorooshian et al., 2000). 수동마이크로파 정보와 결합하여 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 시간 강수량을 산출한다. 이 자료를 기후분야에 활용하기 위하여 GPCP 자료로 편의 보정하여 최종적으로 자료를 생산한다.

3.1.2 TRMM TMPA 자료수집

TRMM 자료는 8시간의 레이턴시 간격으로 자료가 업데이트 되고 있으며, <ftp://trmmopen.pps.eosdis.nasa.gov> FTP 사이트를 통하여 PR, TMI, combined TMI & PR 자료를 얻을 수 있다. 센서별 시간 공간 해상도는 Table 7에 표시하였다. 자료 포맷은 HDF4이며, IDL, Matlab와 같은 상용 소프트웨어나 Python과 같은 오픈 프로그램으로 자료를 읽어 전처리를 하게 된다.

Table 7. Summary of TRMM Level 2 products

Sensor/Product	Spatial Resolution & Coverage	Temporal Resolution	Data Format
PR only: 2A25	5 km×5 km single orbit 16 orbits/day (35°S - 35°N)	7-day latency for Near Real-Time 3-hour, 2-day, 5day	HDF4
TMI only: 2A12	5 km×5 km orbital 16 orbits/day (38°S - 38°N)	3-hour, 2-day, 15-day	
Combined TMI & PR: 2B31	5 km×5 km orbital 16 orbits/day (38°S - 38°N)	7-day latency for Near Real-Time 3-hour, 2-day, 5-day	

본 연구에 사용한 TRMM 자료는 TMPA 3B42 자료를 1998년부터 GPM 자료가 산출되기 시작 전인 2014년 7월까지 자료를 수집 완료하였다(Table 8).

Table 8. Summary of TRMM Level 3 products

Sensor/Product	Spatial Resolution & Coverage	Temporal Resolution	Data Format
TMPA:3B42RT & Final 3B42	0.25° × 0.25° 50°S × 50°N	RT is NRT with 8hr latency 3-hourly	RT data in binary and OpenDAP
TMPA: 3B43		Monthly 2 month latency	HDF4 NetCDF
PR only:3A12	0.5° × 0.5° and 5° × 5° 37°S × 37°N	Monthly	HDF4 OpenDAP
TMI only:3A12	0.5° × 0.5° 38°S × 38°N	Monthly	
TMI-PR Combined 3B31	5° × 5° 40°S × 40°N	Monthly	

3.1.3 GPM IMERG 자료수집

GPM 자료는 NASA 서버를 통해서 직접 자료를 수신할 수 있다. 여러 가지 자료 중 준 실시간 자료는 <ftp://jsimpson.pps.eosdis.nasa.gov> 서버에서, 최종산출물은 <ftp://arthurhou.pps.eosdis.nasa.gov> 에서 자료를 내려받기가 가능하다. 자료는 변수, Level

2, Level 3 와 daily, monthly와 HDF, NetCDF, Geotiff 등 연구에 필요한 자료 선택하고 자료를 수신하게 되는데, 본 연구에서는 Level 3, IMERG, 30분간 자료를 수집 완료하였다. GPM 자료는 Level 0의 Raw 자료에서 위치보정과 여러 보정을 통해서 Level 1 자료로 변환한다. 레이더의 반사도값, 수동마이크로파의 휘도온도가 Level 1자료에 해당한다. 이 자료를 기반으로 알고리즘에 의하여 물리적 변수 강우량과 같은 변수를 산출하게 되는데 보통 Level 2 단계이다. 산출된 변수의 값은 위성의 궤도에 따라 관측자료가 생성되는데 이자료를 시공간적으로 다시 변환하면 Level 3 자료가 산출된다(Figure 15).

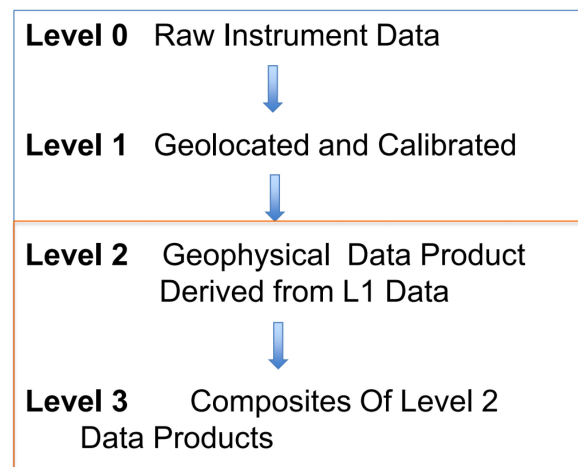


Figure 15. Flowchart of processing data of TRMM and GPM

GPM 강수량 자료 중에서 Level 2 자료는 Table 9와 같이 각각 Ku, Ka 레이더에서 산출된 강우량 자료 및 듀얼레이더 자료를 결합한 자료가 산출된다. GMI자료에서 산출된 자료는 해상도는 4 km로 HDF5 자료로 저장되어 배포된다. 듀얼레이더 자료와 GMI 강수량 자료가 결합되어 현재 서비스 되고 있다.

Table 9. Summary of GPM Level 2 products

Sensor/Product	Spatial Resolution and	Temporal Resolution	Data Format
DPR Ku-only/2A-Ku DPR Ka-only/2A-Ka DPR Ku & Ka/ 2A-DPR	5.2 km × 5.2 km Single Orbit and 16 orbits per day (70°S~70°N)	20~120minutes 24hours	HDF5
GMI/2A-GPROF	4 km×4 km orbital and 16 orbits per day (70°S~70°N)	2~40 hours	HDF5
Combined GMI and DPR/2A-CMB	Orbital(70°S~70°N) 5km×5km, Coincident Ku-Ka-GMI footprints	3~40 hours	HDF5

Level 2 자료의 강우량값과 협력 위성의 강우량값을 보정하여 10 km 공간해상도와 30분 간격 시간해상도를 가진 격자화된 자료가 IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) Level 3자료이며 본 연구에서 이용하였다 (Figure 16). IMERG 자료는 레이턴시 6시간, 16시간, 3개월 자료로 구성되며, 30분, daily, monthly 자료를 내려받아 사용가능하다. Level 3자료에는 IMERG자료 이외에 10 km, monthly 해상도로 GMI와 DPR 강수량자료와 Ku, Ka, Ku+Ka의 자료 결합으로 25 km와 50 km, daily, monthly의 자료도 구축되어 있다 (Table 10).

Table 10. Summary of GPM Level 3 products

Sensor/Product	Spatial Resolution and Coverage	Temporal Resolution	Data Format
IMERG	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (90°S–90°N)	30-minutes(Near Real Time) with 6-hour latency, 16-hour latency and 3-months latency	HDF4, NetCDF ASCII GIF, PNG KML for google earth
3-CMB Combined GMI+DPR rainfall averages	$0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (70°S–70°N)	Monthly	
3-DPR rainfall averages	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$ $5.0^\circ \times 5.0^\circ$ (67°S–67°N) for Daily (70°S–70°N) for Monthly	Daily and Monthly Daily and Monthly	
3-GPROF GMI rainfall averages	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (90°S–90°N)	Daily and Monthly	

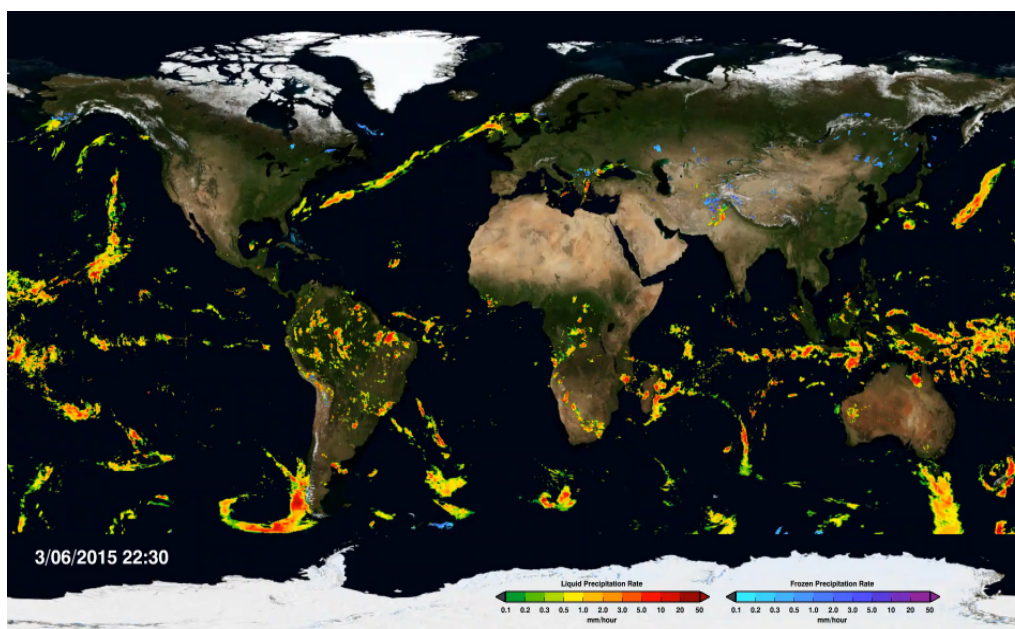


Figure 16. Precipitation(rainfall+snowfall) of IMERG data

3.1.4. 위성자료 전처리

NASA에서 내려받은 GPM자료는 파일에 기본 메타정보를 제공하고 있다. 파일에 나타내는 속성 정보는 Level 따라 제공하는 정보가 다르다. 이에 대한 속성정보를 Table 11에 표시하였다.

Table 11. The subfield for GPM data file names

Type	Description
1A	Instrument count, geolocated, at instantaneous field of view(IFOV).
1B	Geolocated, calibrated Tb or radar power at IFOV.
1C	Intercalibrated brightness temperature at IFOV from a single instrument.
2A	Geolocated geophysical parameters at IFOV from a single instrument.
2B	Geolocated geophysical parameters at IFOV from multiple instruments.
3A	Space/time averaged geophysical parameters from a single instrument.
3B	Space/time averaged geophysical parameters from multiple instruments.
4	Combined satellite, ground and/or model data.

강수량 관측시간에 따른 정량적 합(hourly, daily, monthly)은 다음 파일 속성으로 나타낸다(Table 12).

Table 12. Indication of accumulation subfield for file names

Name	Description
HR	The product accumulates data for 1hour.
HHR	The product accumulates every half hour
DAY	The product accumulates data for a single day.
PENT	The product accumulates data 5-day period.
7DAY	The product accumulates data 7-day period.
MO	The product accumulates data a designated month.

TRMM TMPA, GPM IMERG 자료는 UTC 시간으로 저장되어 배포된다. 따라서 미계측지역에서 현지시간으로 일자료로 변환하기 위해서 TRMM TMPA 는 3시간 시간해상도 자료로 수집하였고, GPM IMERG 자료는 30분간 자료를 내려받았다. TRMM UTC에

서 9시간을 더해서 한국시간(KST)으로 변환이 가능하기 때문에 3시간 간격의 자료를 한국시간 디렉토리로 만들어서 15시부터 다음날 12시까지 총 8개의 자료가 들어갈수 있도록 처리하였다(Figure 17).

이름	수정된 날짜	유형	크기
20101231	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110101	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110102	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110103	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110104	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110105	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110106	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110107	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110108	2018-05-18 오전...	파일 폴더	
20110109	2018-05-18 오전...	파일 폴더	

Figure 17. Pre-processing of satellite data for bias correction

TRMM 자료는 각 디렉토리 안에 있는 3시간 자료들을 합하여 한국시간(KST) daily 자료로 변환하였다. GPM 30분 간격의 자료를 더해서 TRMM 자료와 같이 daily 자료로 변환하여 구축하였다(Figure 18).

TRMM2011 > data > daily_merged				daily_merged 검색
이름	수정된 날짜	유형	크기	
TRMM.20110101.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110102.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110103.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110104.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110105.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110106.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110107.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	
TRMM.20110108.KST.nc	2018-05-18 오후 1:17	NC 파일	2,281KB	

Figure 18. Conversion UTC to KST time of daily data

구축된 자료는 편의 보정과 PRISM 모형의 입력자료로 이용하기 위하여 DEM 해상도에 맞추어 한반도 지역만 clipping 하여 자료 전처리를 실시하였다 (Figure 19).

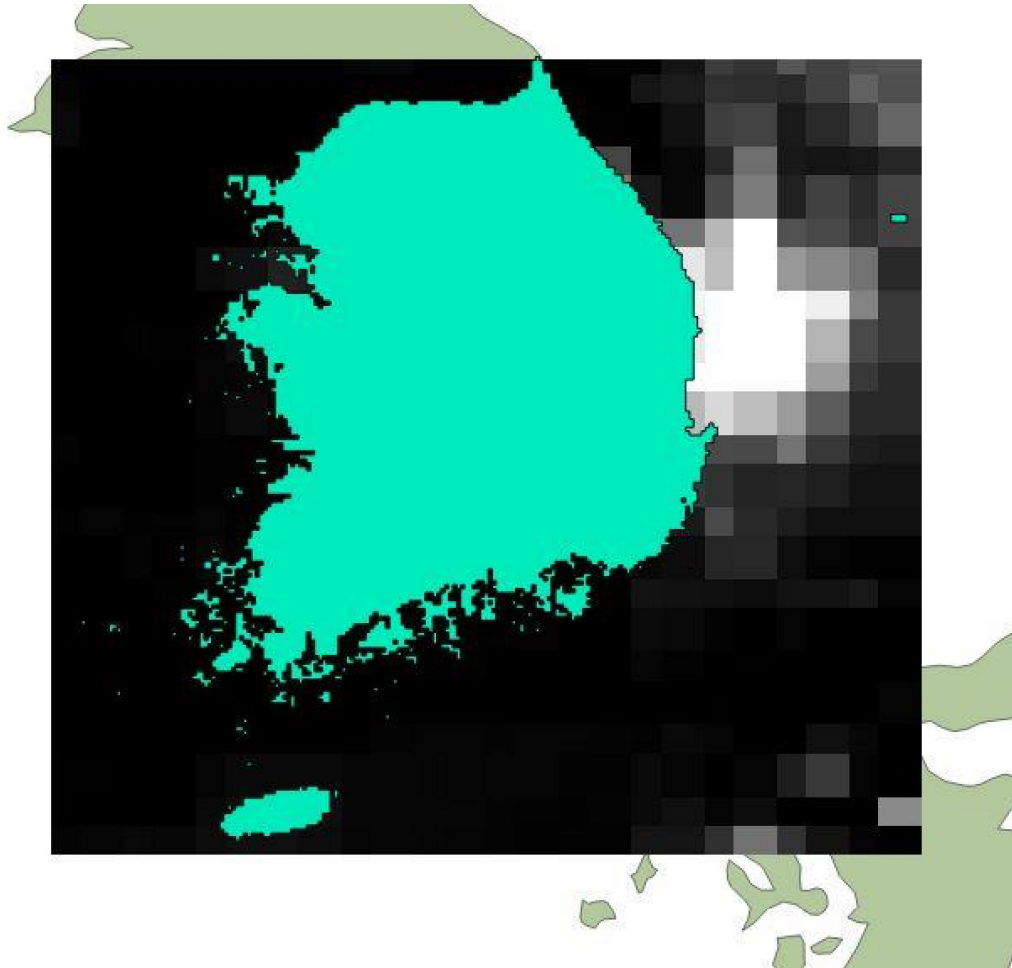


Figure 19. Clipping data by pre-processing module

DEM 자료는 PRISM 모형의 경사각과 고도를 알기 위한 자료로 본 연구에서는 미국 NASA SRTM 250 m 자료를 이용하였다(Figure 20). SRTM 미션은 우주왕복선이 고도를 관측할 수 있는 간섭합성개구레이더를 장착하여 지구를 반복 관측하면서 90 m의 정밀 수치지도를 만들어서 배포한다. 이 자료를 바탕으로 5 km 공간해상도로 다시 변환하여 DEM을 구축하였다.

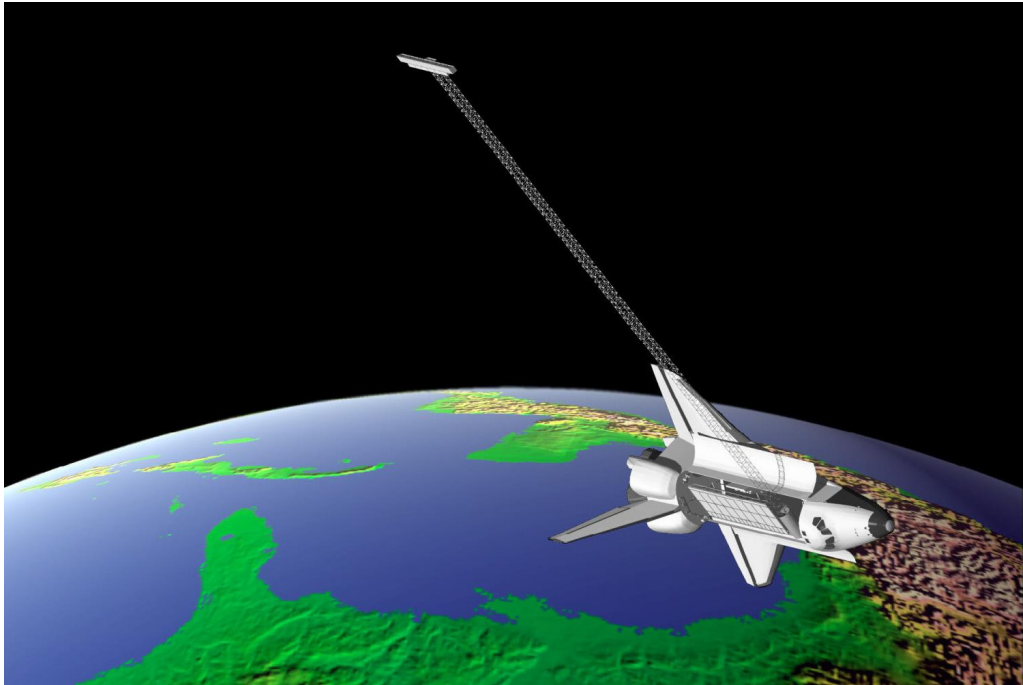


Figure 20. NASA SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)

자료 상세화를 위한 입력자료를 만들기 위하여 한반도 지역으로 잘라낸 위성자료를 격자별 위 경도로 변환하여 다시 shape 파일로 저장하였다. 위성 격자별로 라벨링하고 각각의 격자에 맞는 ID, 위/경도, 고도 값을 지정하고 CSV 파일로 만들어 PRISM 모형의 입력자료로 이용하였다 (Figure 21).

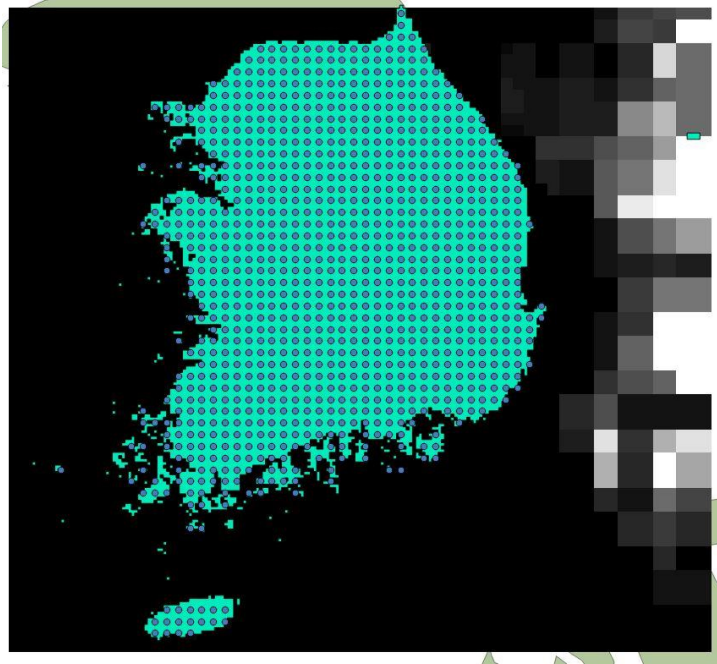


Figure 21. Input data for bias correction module and PRISM model

3.2 위성영상 상세화 기법

위성영상 상세화 기법은 편의보정 기법과 공간적 상세화 기법으로 구성되어있다. 편의 보정은 원시위성자료를 지점 관측자료를 이용하여 일단위로 보정을 수행하고, 상세화 기법은 DEM 자료를 이용하여 지형학적 변수를 생산한 뒤 이를 기반으로 원시위성자료와 편의보정한 위성자료를 공간적으로 상세화하는 기법이다.

3.2.1 편의보정 기법

지점 관측자료를 이용한 위성영상 자료 보정 기법은 위성영상 보정에 보편적으로 사용하는 GRA(Geographical Ratio Analysis)와 선행연구에서 사용한 예가 있는 분위사상 법(Quantile Mapping, QM)을 선정하여 수행하였다(Jia et al., 2011; Duan and Bastiaanssen, 2013; Laurent et al., 2013).

GRA는 GDA(Geographical Differential Analysis)와 더불어 위성영상 보정에 보편

적으로 사용하는 기법으로 관측자료와 위성영상 자료의 오차 비율을 파악하여 보정하는 기법이다(Cheema and Bastiaanssen, 2012, Baik and Choi, 2016). GRA에서 오차 비율을 보간하는 기법 중 IDW와 Kriging을 모두 적용하여 보정을 수행하였다. Figure 22는 GRA 편의보정 기법의 개요를 나타내고 있다. GRA는 아래와 같이 총 3단계로 구분하여 수행할 수 있다.

- (1) 지점 관측자료(P_{Obs}^{Point})와 지점 위치에 대응되는 원시위성자료($P_{Raw-SRE}$) 격자의 오차 비율(P_{Ratio}^{Point})을 산정한다.

$$P_{Ratio}^{Point} = P_{Obs}^{Point} / P_{Raw-SRE}$$

- (2) 지점 관측 위치에서 산정된 오차 비율(P_{Ratio}^{Point})을 IDW와 Kriging 기법을 사용하여 원시위성자료와 같은 공간해상도인 10 km로 격자(P_{Ratio}^{Grid})로 보간한다.

$$P_{Ratio}^{Grid} = IDW(P_{Ratio}^{Point}), P_{Ratio}^{Grid} = Kriging(P_{Ratio}^{Point})$$

- (3) 원시위성격자자료($P_{Raw-SRE}$)에 10 km 격자의 오차 비율(P_{Ratio}^{Grid})를 곱해서 지점 자료로 편의보정한 위성강우 값(P_{BC-SRE})을 산정한다.

$$P_{BC-SRE} = P_{Raw-SRE} \times P_{Ratio}^{Grid}$$

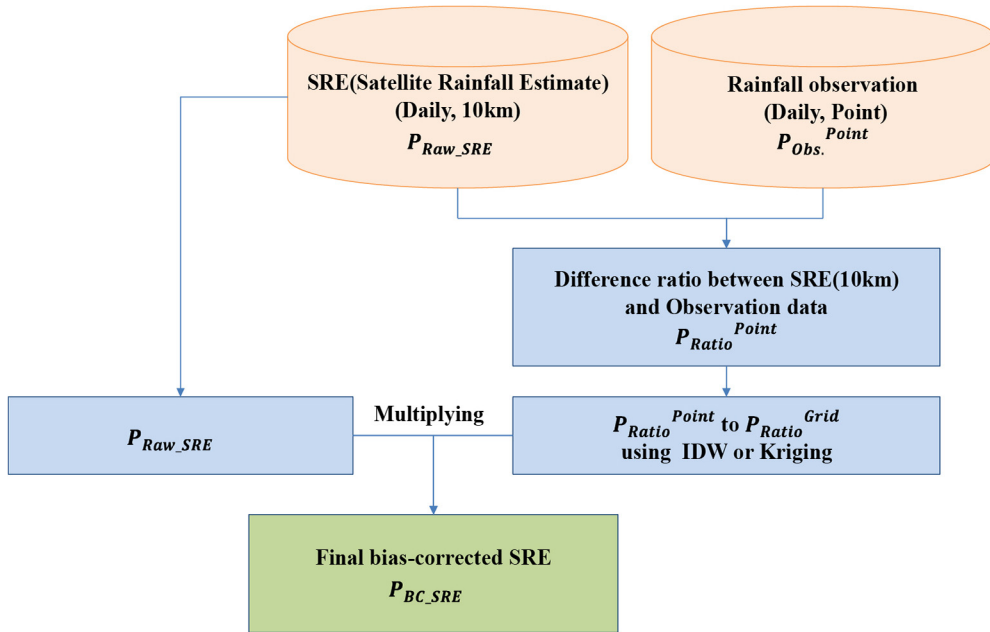


Figure 22. Overview of GRA bias-correction techniques

분위사상법(QM)은 지점 관측자료($P_{Obs.}^{Point}$)와 지점 위치에 대응되는 원시위성자료($P_{(i,j)SRE}^{Uncorrected-10km}$) 격자의 누적확률분포를 이용하여 원시위성자료($P_{(i,j)SRE}^{Uncorrected-10km}$) 격자의 확률 분포를 지점 관측자료의 확률 분포에 사상시키는 방법으로 Eq. (1)로 나타낼 수 있다(Hashino, 2007). 원시위성자료를 보정하기 위해 Bernoulli-gamma 분포를 사용하여 원시위성자료 격자의 확률분포를 지점 관측자료의 확률 분포로 적합시켰다. Bernoulli-gamma 분포는 강수의 발생확률을 Bernoulli 분포로, 강수량의 크기는 gamma 분포로 구분하여 각각 산정할 수 있어 보간을 이용하여 격자자료를 보정하는 기법에 적합한 것으로 사료된다.

$$Z_j^i = F_{oj}^{-1}(F_{sj}(\hat{Y}_j^i)) \quad (1)$$

GRA-IDW, GRA-Kriging, QM 기법을 검토하여 본 연구에 적합한 알고리즘을 개발하고 이 중 최적의 결과를 보여주는 기법을 최종적으로 선정하였다.

3.2.2 공간상세화 기법

본 연구에서는 Daly et, al(1994)가 제안한 PRISM 모형을 활용하여 자료상세화를 하였다. PRISM 모형은 해양도, 고도, 산악의 경사방향, 거리 등을 고려하여 공간분포화 할 수 있도록 설계되었다. PRISM 모형은 독립변수로 고도를 사용하고 종속변수로 위성 강우자료로 수행되며, Eq. (2)-(5) 나타낸다.

$$\hat{r} = \beta_0 \hat{z} + \beta_1 \quad (2)$$

여기서, $\hat{r}$: 격자자료에서의 위성강우값, $\hat{z}$: 격자지점의 고도, β_0, β_1 : 격자지점의 가중회귀계수

각 격자점에서 가중 회귀계수는 다음 식으로 산정한다.

$$\beta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i (r_i - \bar{r})(z_i - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n \omega_i (z_i - \bar{z})^2}, \quad \beta_1 = \bar{r} - \beta_0 \bar{z} \quad (3)$$

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i r_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}, \quad \bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (4)$$

여기서, n : 영향반경의 관측자료 개수, ω_i : 격자별 가중계수로 해양도, 고도, 경사방향, 거리의 계산값, r_i, z_i : 격자자료와 지점내에 강수량과 고도

ω 는 격자별 가중계수로 다음식과 같다.

$$w = (F_d w(d)^2 + F_z w(z)^2)^{1/2} w(f) w(c) \quad (5)$$

여기서, F_d : 거리가중치계수 0.8, F_z : 고도가중치계수 0.2, $w(d), w(z), w(f), w(c)$: 각각 거리 가중치, 고도 가중치, 경사방향 가중치, 해안도 가중치이다. $w(d)$ 는 현재 원시 영상의 격자점과 자료상세화된 격자점 거리를 나타내는 거리 가중치이며, $w(z)$ 는 원시영

상의 격자점과 자료 상세화된 격자의 고도차이에 의한 고도 가중치로 나타낸다. $\omega(f)$ 는 DEM 기초자료로 지향면에 의한 가중치, 마지막으로 $\omega(c)$ 는 원시강우 격자점과 자료상 세화된 격자점이 해안으로부터 떨어진 거리에 대한 가중치를 반영하였다.

3.3 위성영상 검증 방법

3.3.1 원시위성영상 검증

위성자료는 TRMM 25km의 공간해상도를 보간하여 GPM 10 km로 변환하고 지상관측자료와 검증하였다. 변환하여 구축한 위성자료와 지상관측자료의 검증하기 위하여 기본적으로 상관계수(Correlation; Cor)을 구하고, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error; RMSE), BIAS(bias), MAE(mean absolute error)의 통계적 방법을 이용하였다 (Eq. (6)-(9)).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{sat,i} - X_{obs,i})^2}{n}} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{sat,i} - X_{obs,i}| \quad (7)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{sat,i} - X_{obs,i}) \quad (8)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n X_{sat,i}}{\sum_{i=1}^n X_{obs,i}} \quad (9)$$

위성강우값과 지상관측자료와의 정량적 비교를 위해서는 평균제곱근오차(RMSE)와 절대평균오차(MAE)를 계산하여 검증하였다. Bias는 위성강우가 관측된 값과 지상관측자료의 차이로 나타내며, ME는 위성강우와 지상관측자료의 평균 오차를 의미한다.

또한 위성강우와 지상관측자료의 강수감지 빈도를 알아보기 위하여 FBS(False Bias)와 위성강우의 강수발생의 정확도를 추정하기 위하여 POD(Probability of Detection), ASOS의 강수량이 0으로 없을 때 위성강우가 발생한 빈도를 나타내는 FAR(False Alarm Ratio)의 평가항목으로 위성강우 자료의 정확도를 검증하였다 (Table 13, Eq. (10)-(12)).

Table 13. Contingency table for comparison of SRE with ASOS gauge

	ASOS ≥ 1 mm/day	ASOS < 1 mm/day
SRE ≥ 1 mm/day	x	y
SRE < 1 mm/day	w	z

$$FBS = (x + y) / (x + w) \quad (10)$$

$$POD = x / (x + w) \quad (11)$$

$$FAR = y / (x + y) \quad (12)$$

3.3.2 상세화 기법 검증

상세화 기법의 검증은 한반도를 대상으로 지점 관측자료와 지점 관측자료 위치에 해당하는 위성자료 격자값을 추출한 다음 상관계수(Correlation coefficient, COR), RMSE, MAE, NSE를 산정하여 수행하였다. 지점 관측자료와 원시위성자료, 편의보정한 위성자료, 공간상세화한 위성자료를 각각 비교하여 수행하였다.

검증을 수행하기 전 지점 관측자료와 격자 위성자료를 직접 비교하는 것에 대한 과정상의 문제를 보완하기 위해 한반도 60개 관측소에 대한 일강수량을 IDW 기법을 이용하여 0.005°(≒500 m)의 공간해상도로 보간한 다음, 0.01°(≒1 km), 0.025°(≒3 km), 0.05°(≒5 km), 0.1°(≒10 km)의 공간해상도를 가지는 격자 관측자료로 변환하였다. 각

각의 격자 관측자료에 대해 60개 관측소를 포함하는 격자를 추출하여 60개 관측소에 대한 격자 관측자료를 생산하였다. 이후부터 원시위성자료, 편의보정한 위성자료, 공간상세화한 위성자료를 검증할 때 사용한 지점 관측자료는 격자 관측자료를 의미한다.

편의보정 기법 검증은 한반도의 60개 관측소를 기준으로 수행하였으며, 3가지 편의보정 기법(GRA-IDW, GRA-Kriging, QM)에 대해 교차검증을 수행하여 최적 편의보정 기법을 선정하였다. 60개 관측소 중 보정을 위한 세트 크기를 정하기 위해 아시아-태평양 지역 관측소 밀도의 중간값(95.7 km/station)을 기준으로 사용하였다. 60개 관측소 (60-fold) 중 11개를 보정 세트(calibration set)로, 49개를 검증 세트(validation set)의 크기로 설정하면 95.7 km/station 관측소 밀도를 충족시킬 수 있다.

다음으로 계통임의추출(systematic random sample)을 사용하여 60개 관측소 중 11개를 보정 세트를 추출하여 총 60개 모델을 생성하였다. 최종적으로 3가지 편의보정 기법을 각각 60개 모델에 적용하여 COR, RMSE, MAE, NSE를 산정하였다.

3.4 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템

격자화된 위성강우 자료는 최종적으로 한반도 지역 자료는 일별자료로 1998년부터 2017년까지 TRMM과 GPM 위성이 결합한 10 km 해상도로 Raw_SRE 강우자료, 편의보정된 BC_SRE 자료 DB화 하였다. PRISM 모형에 의해 상세화된 자료는 5 km 지상해상도로 원시 위성영상 Raw_SRE_PRISM, 편의보정된 BC_SRE_PRISM의 형태로 DB화 하고 NetCDF로 제공이 가능하고, 향후 최종 사용자들이 이용하기 편하게 하기 위하여 Geotiff형태로 자료 제공가능하며, 이에 대한 최종 결과물에 대한 설명을 Table 14에 나타내었다.

Table 14. Final products of satellite rainfall estimations

Type	Period	Temporal resolution	Spatial resolution
1. Raw_SRE	1998-2017	1 day	0.1°
2. BC_SRE	1998-2017	1 day	
3. Raw_SRE_PRISM	1998-2017	1 day	0.05°
4. BC_SRE_PRISM	1998-2017	1 day	

바누아트는 작은 섬으로 이루어져 있기 때문에 격자화된 자료를 바누아트 가뭄, 농업 수자원에 활용하기 위해서는 행정구역 및 유역 등 원하는 지역(Shape파일 형태)으로 Clipping하여 자료를 제공할 필요성이 있다(Figure 23). APCC내에 관련 모듈이 완성되어 있기 때문에 최종적으로는 원하는 기간, 원하는 지역 및 NetCDF, Geotiff, 일자료, 월자료들을 웹에서 End user 들이 선택하여 내려받을 수 있도록 기후 자료 관리시스템을 개발할 예정이다.

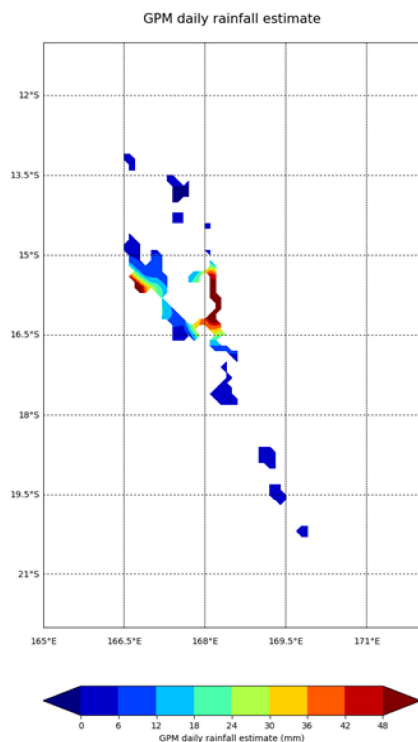


Figure 23. Example of climate data service system for Vanuatu

4. 연구결과

4.1 위성영상 검증 결과

4.1.1 원시위성자료

원시위성자료 일강수량에 대한 검증 결과를 Table 15에 나타내었다. 1998년부터 2017년 10 km 공간해상도의 일자료에 대한 ASOS 관측자료와 TRMM과 GPM 위성 결과를 비교하기 위하여 1998년부터 2014년 7월까지 일강수량과 2014년 8월부터 2017년까지 통계적 분석 자료를 표시하였다.

Table 15. Statistics evaluation of the performance of Raw_SRE

Statistics	All satellite products	TRMM TMPA	GPM IMERG
	1998-2017	1998-2014.7	2014.8-2017
COR	0.7750	0.7760	0.7530
NSE	0.5360	0.5360	0.5140
BIAS	1.0420	1.0350	1.0650
MAE	2.9490	3.0450	2.5040
ME	0.1590	0.1400	0.2050
RMSE	9.2840	9.5750	7.7700

상관계수는 원시위성자료 1998년부터 2017년까지 0.775로 비교적 정확도가 높게 나왔으며, TRMM TMPA, GPM IMERG 10 km 일강수량 상관계수값은 0.776, 0.753으로 크게 차이 나지 않았다. BIAS값은 편의를 알아보기 위한 통계적 분석방법으로 최적값이 1일 경우이고 값이 1보다 클 경우에는 원시위성자료 값이 ASOS 보다 과대 추정을 1보다 적을 때는 과소추정하는 값을 나타내는 지수로 모든 기간에서 원시위성자료 값이 지상관측자료보다 과대추정하는 것을 알 수 있다. MAE, RMSE 값은 정량적으로 원시위성자료 값이 ASOS 자료값에 근접하는지를 나타내는 통계값으로 0일수록 정확도가 높게 된다.

모든 위성강우의 MAE, RMSE 값은 2.9490, 9.2840로 비교적 정확도가 높게 나왔다. MAE, RMSE값을 TRMM TMPA, GPM IMERG로 나누어서 보면 MAE가 3.0450, 2.5040, RMSE 9.5750, 7.7700로 GPM IMERG 자료가 TRMM TMPA보다 우수한 결과를 나타내었다. 이는 최근에 발사한 GPM 위성 센서의 시·공간해상도(30분, 10 km)가 TRMM TMPA(3시간, 25 km) 보다 높기 때문인 것으로 판단된다. 위성강우의 정성적 평가를 알아보기 위해 앞에서 설명한 FBS, POD, FAR를 표에 나타내었다(Table 16).

Table 16. Comparison of FBS, POD, FAR for Raw_SRE

Statistics	All satellite products	TRMM TMPA	GPM IMERG
	1998-2017	1998-2014.7	2014.8-2017
FBS	0.9680	0.9460	1.0460
POD	0.6710	0.6620	0.7080
FAR	0.3060	0.3000	0.3230

원시위성자료의 강수 감지 정확도는 FBS, POD, FAR 0.9680, 0.6710, 0.3060 값을 나타내었고, TRMM TMPA, GPM IMERG의 차이는 크게 없이 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

4.1.2 편의보정한 위성자료

한반도를 대상으로 3가지 편의보정 기법(GRA-IDW, GRA-Kriging, QM)에 대해 교차검증을 60번씩 수행하여 COR, RMSE, MAE, NSE를 산정하였다. Figure 24는 한반도를 대상으로 3가지 편의보정 기법으로 교차검증을 수행한 결과를 보여주고 있다. Raw_SRE는 관측자료와 원시위성자료를 평가한 결과를 의미하며 BC_SRE(IDW), BC_SRE(Kriging), BC_SRE(QM)은 각각 GRA-IDW, GRA-Kriging, Quantile Mapping 기법을 이용하여 교차검증을 60번씩 수행한 결과를 의미한다.

COR값을 살펴보면 Raw_SRE는 0.7750, BC_SRE(IDW) 중간값은 0.8150, BC_SRE(Kriging) 중간값은 0.8115, BC_SRE(QM) 중간값은 0.7730으로 나타났다. RMSE를 살

퍼보면 Raw_SRE는 9.2840, BC_SRE(IDW) 중간값은 8.3650, BC_SRE(Kriging) 중간값은 8.4500, BC_SRE(QM) 중간값은 9.2840으로 나타났다. COR, RMSE를 살펴보면 BC_SRE(IDW)와 BC_SRE(Kriging) 기법이 BC_SRE(QM) 기법보다 우수한 보정 결과를 보여주고 있다. MAE, NSE까지 검토한 결과 BC_SRE(IDW) 기법이 제일 우수한 보정 결과를 보여주는 것으로 분석되어 최종적인 보정 기법을 BC_SRE(IDW)으로 선정하여 편의보정한 위성자료를 생산하였다.

최종적으로 편의보정을 수행할 때에는 60개 모델에 대해 교차검증을 수행한 결과 중에서 가장 좋은 통계량을 보이는 모델을 선정하여 사용하였다. Table 17은 본 연구에서 선정한 BC_SRE(IDW) 기법의 통계량 결과를 보여주고 있다

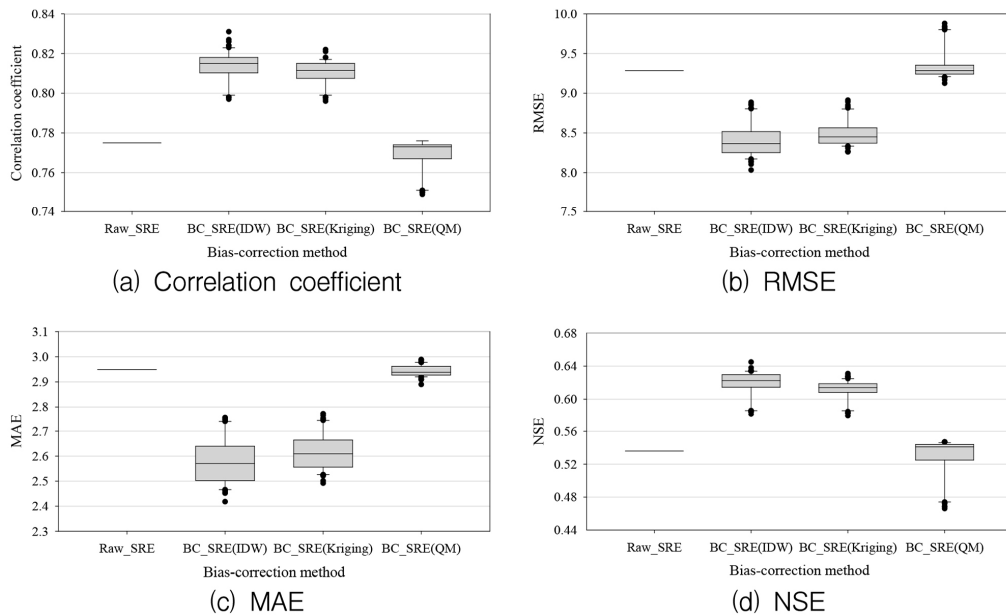


Figure 24. Cross-validation result of three bias-correction methods for South Korea

Table 17. Statistics evaluation of the best performance of BC_SRE(IDW)

Statistics	BC_SRE(IDW)	Statistics	BC_SRE(IDW)
COR	0.8310	RMSE	8.0320
NSE	0.6450	FBS	0.9130
BIAS	1.0160	POD	0.6870
MAE	2.4180	FAR	0.2470
ME	0.0620		

Figure 25는 한반도를 대상으로 BC_SRE(IDW) 기법을 이용하여 편의보정 전후의 결과를 산포도로 보여주고 있다. 90 mm 이상인 강수량에 대해 편의보정 전에는 관측값보다 크게 추정하였는데, 편의보정 후에는 관측값과 비슷하게 추정하는 것을 확인할 수 있다. 40-90 mm의 강수량도 편의보정전과 비교하여 개선된 것을 확인할 수 있다. 회귀식을 살펴보았을 때 전체적으로는 조금 더 개선된 것으로 사료된다.

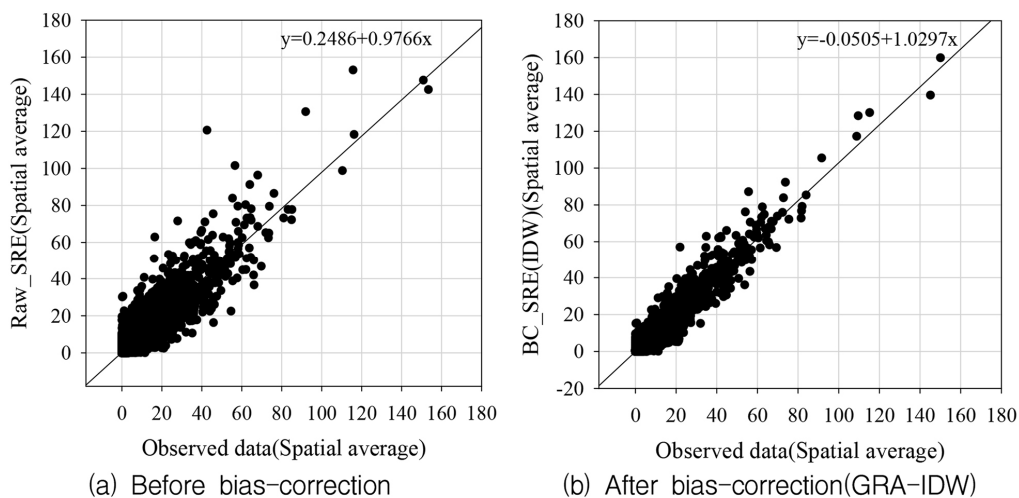


Figure 25. Scatter plot before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

Figure 26은 한반도를 대상으로 BC_SRE(IDW) 기법을 이용하여 편의보정을 수행한 결과를 보여주고 있다. 관측자료와 비교해서 원시위성자료가 작게 추정된 부분이 높게 보정된 결과를 확인할 수 있다.

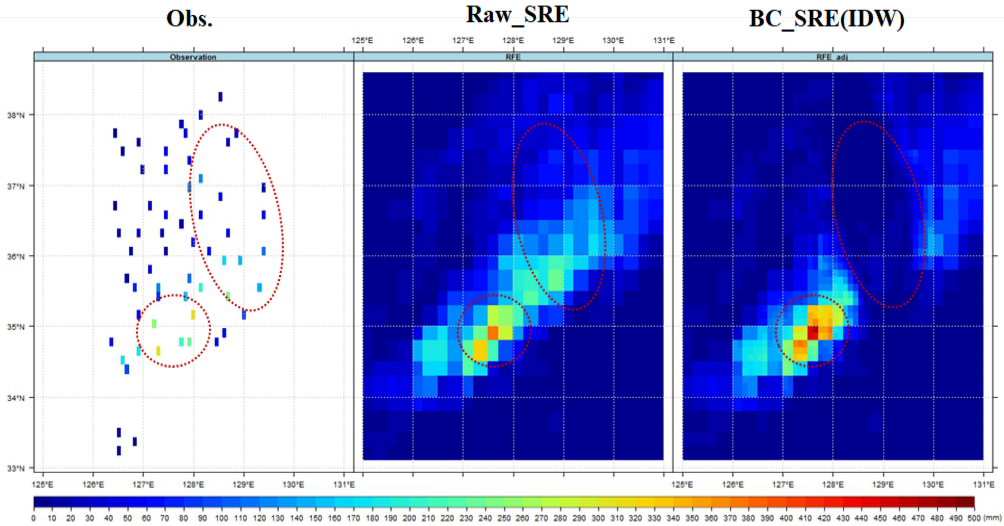


Figure 26. Bias-correction(GRA-IDW) result for South Korea

4.1.3 공간상세화한 위성자료

한반도를 대상으로 원시위성자료와 GRA-IDW 기법을 이용하여 편의보정한 위성자료에 대해 PRISM 기법을 이용하여 공간상세화를 수행하였다. Figure 27은 한반도를 대상으로 GRA-IDW 기법을 이용하여 편의보정한 결과에 대해 PRISM 기법을 이용하여 공간상세화를 수행한 결과를 보여주고 있다. 공간상세화한 위성자료 검증은 COR, RMSE, MAE, NSE를 이용하여 수행하였다. Raw_SRE_PRISM은 원시위성자료를 공간상세화한 결과, BC_SRE(IDW)_PRISM은 GRA-IDW 기법을 이용하여 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 결과를 의미한다.

COR값을 살펴보면 Raw_SRE_PRISM은 0.6527, BC_SRE(IDW)_PRISM은 0.7117로 나타났다. RMSE를 살펴보면 Raw_SRE_PRISM은 11.6621, BC_SRE(IDW)_PRISM은 10.6004로 나타났다. 특히 앞서 분석한 공간상세화를 수행하기 전의 Raw_SRE, BC_SRE(IDW) 결과와 비교하면, 상관계수와 RMSE가 공간상세화를 수행하기 전보다 다소 작아지는 것으로 나타나나(Table 18) 그 차이가 크지 않아 0.05°로 공간상세화한 위성자료를 응용분야에 직접 사용해도 위성자료의 결과를 크게 왜곡하지 않을 것으로 분석된다.

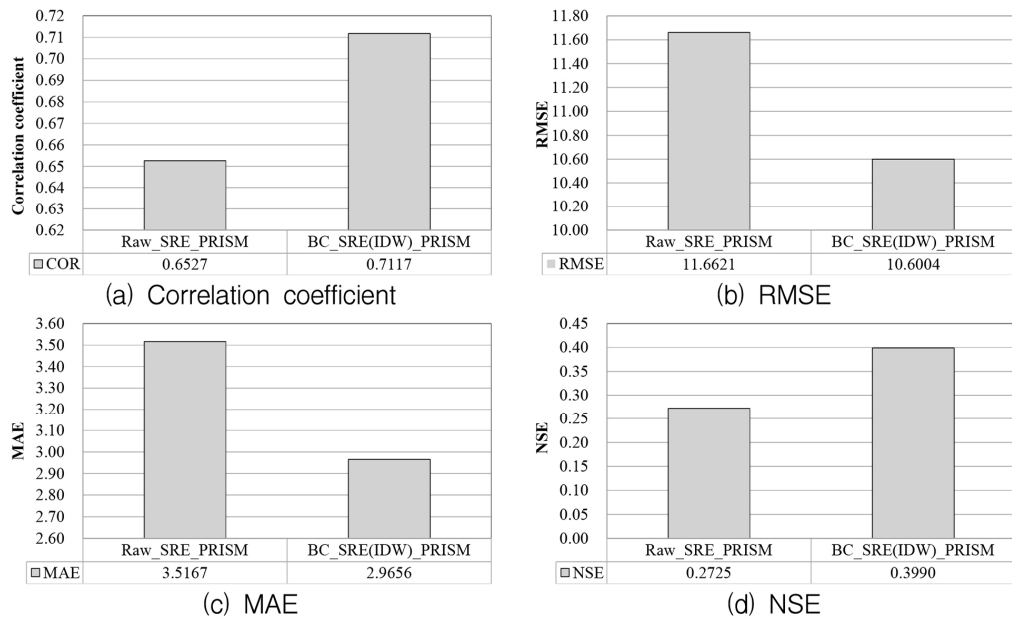


Figure 27. Statistics before and after PRISM for South Korea

Table 18. Correlation and RMSE before and after PRISM for South Korea

Statistics	Before PRISM		After PRISM	
	Raw_SRE	BC_SRE(IDW)	Raw_SRE_PRISM	BC_SRE(IDW)_PRISM
COR	0.7750	0.8310	0.6527	0.7117
RMSE	9.2840	8.0320	11.6621	10.6004

Figure 28은 한반도를 대상으로 원시위성자료와 IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 PRISM으로 공간상세화한 결과를 산포도로 보여주고 있다. 회귀식을 살펴보았을 때 전체적으로는 공간상세화 전보다 조금 더 개선된 것으로 사료된다.

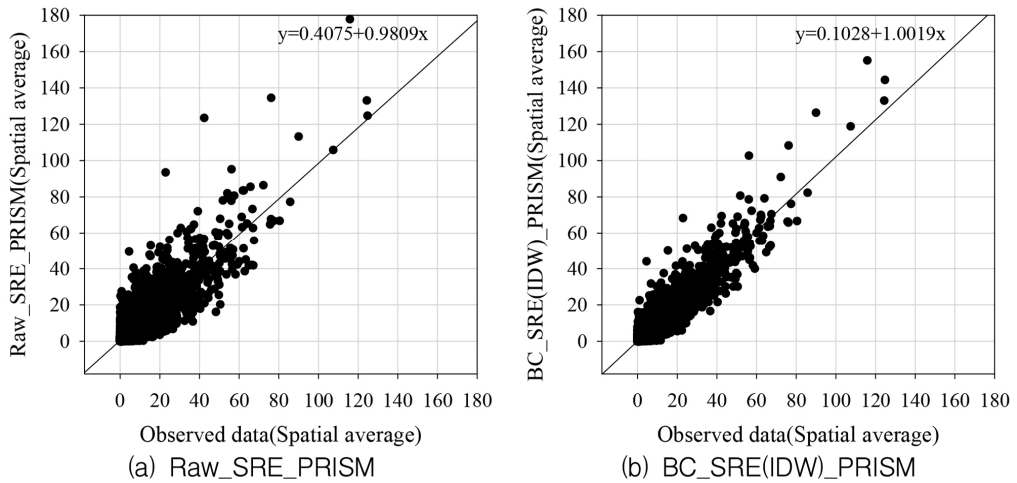


Figure 28. Scatter plot after applying PRISM for South Korea

4.2 위성강우 기반 기후 자료 관리 시스템

4.2.1 편의보정한 위성자료

4.2.1.1 기후특성 분석

Figure 29는 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 20년 평균 연강수량을 상자그림으로 보여주고 있다. 한반도의 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료의 평균값은 각각 1397.5 mm, 1455.6 mm, 1408.4 mm으로 산정되었다. 바누아투의 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료의 평균값은 각각 2556.7 mm, 1675.6 mm, 2277.8 mm으로 산정되었다.

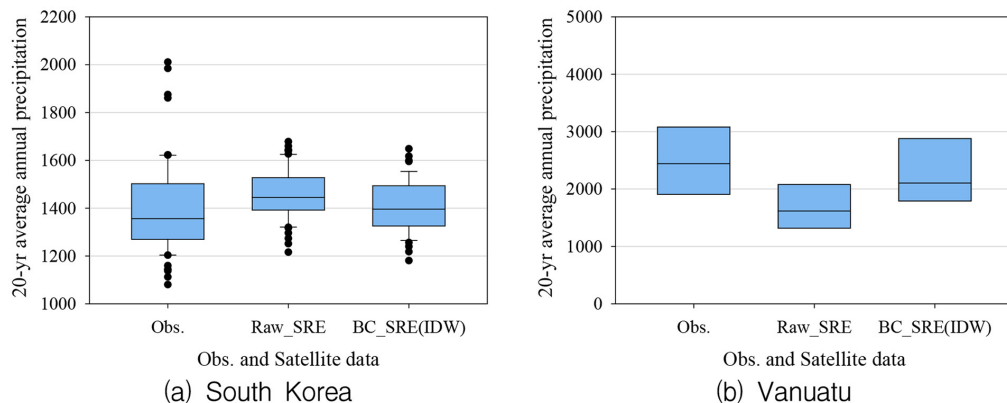


Figure 29. Box plot of 20-year average annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea and Vanuatu

Figure 30은 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 20년 평균 월강수량을 상자그림으로 보여주고 있다. 월별로 살펴보면 4, 6, 7, 8, 9월에 관측자료와 원시위성자료가 차이가 큰 것으로 나타나며 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다. Figure 31은 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 20년 평균 월강수량을 상자그림으로 보여주고 있다. 전체적으로 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다.

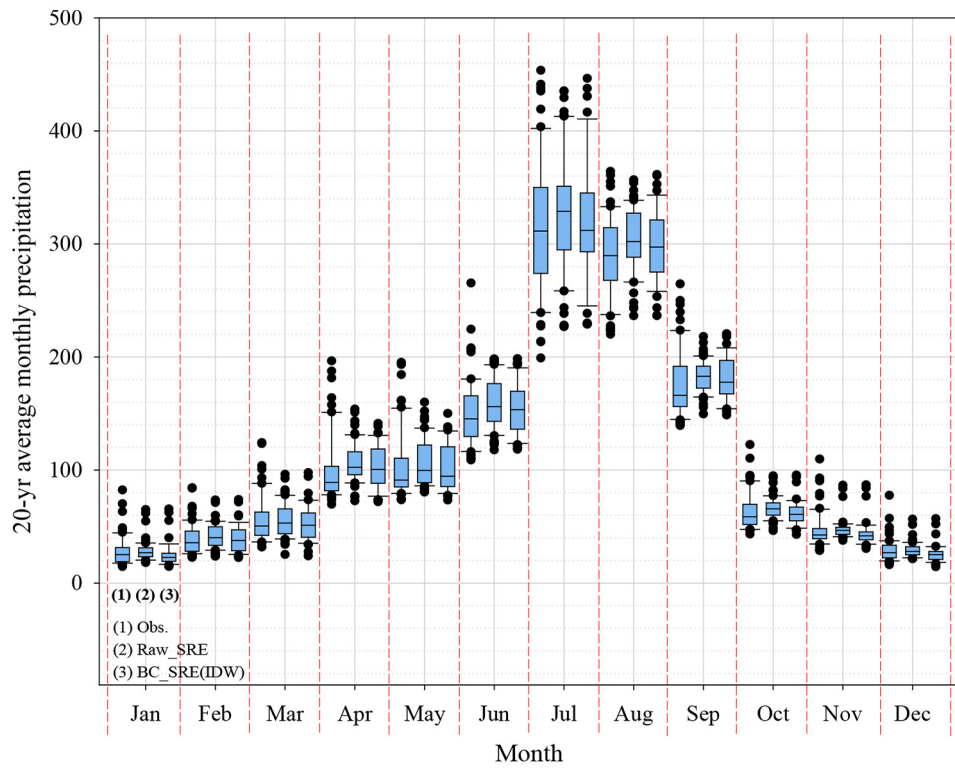


Figure 30. Box plot of 20-year monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

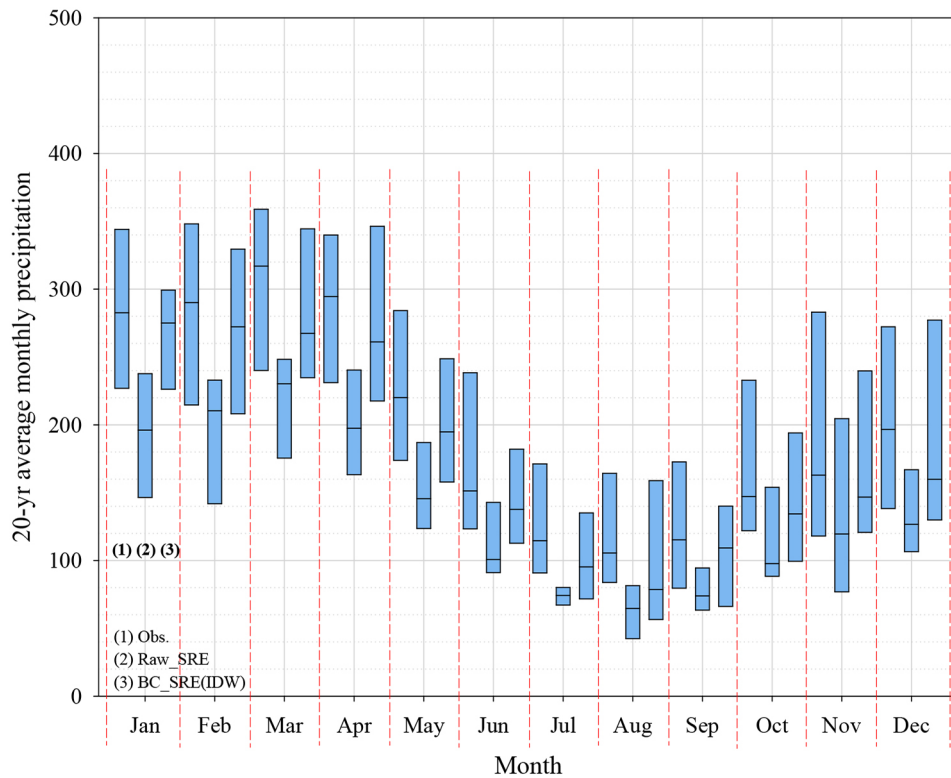


Figure 31. Box plot of 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

Figure 32-Figure 33은 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 연강수량, 20년 평균 월강수량을 평균값과 함께 막대그래프로 나타내고 있다. 전체적으로 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다.

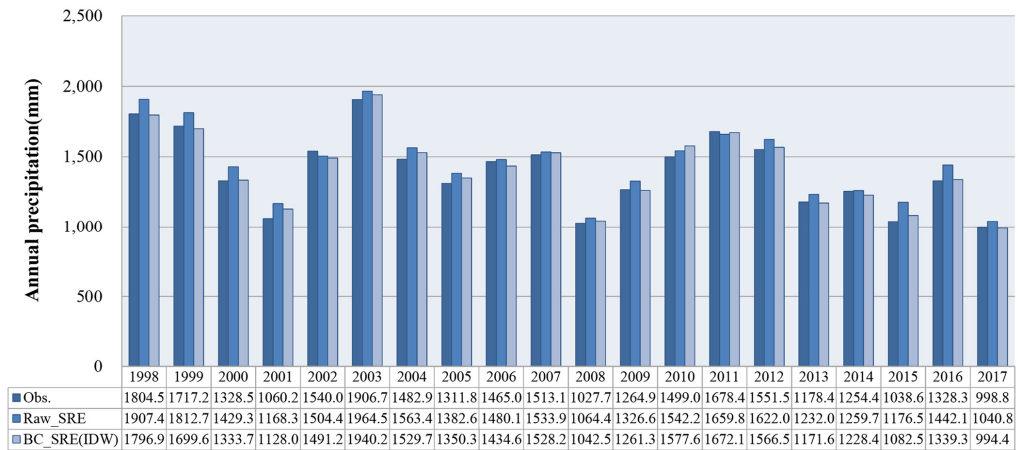


Figure 32. Annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

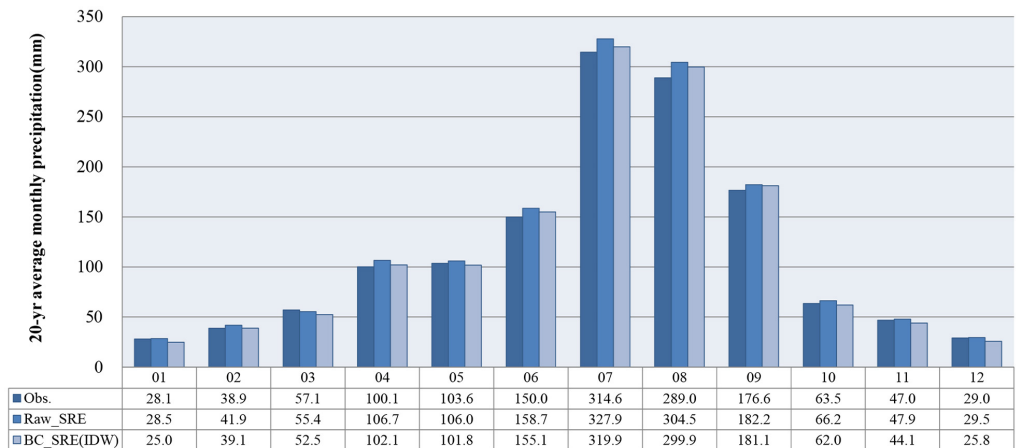


Figure 33. 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

Figure 34-Figure 35는 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 연강수량, 20년 평균 월강수량을 평균값과 함께 막대그래프로 나타내고 있다. 전체적으로 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다.

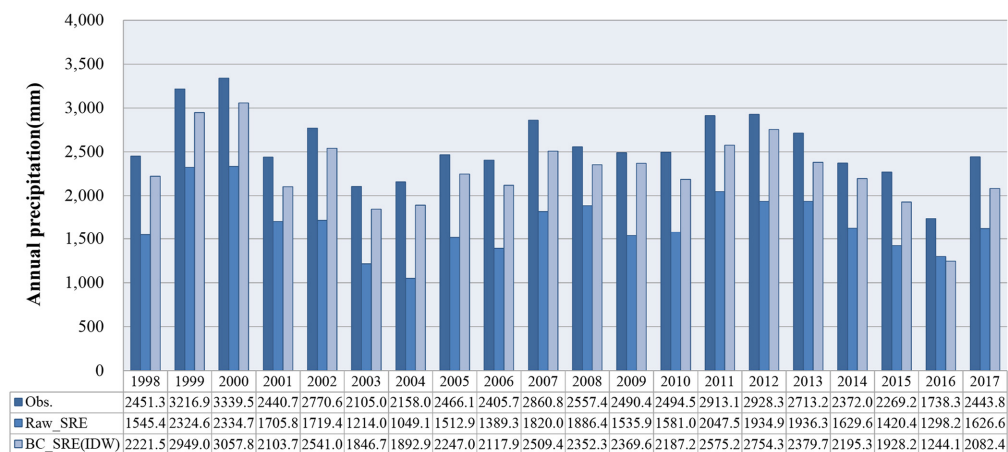


Figure 34. Annual precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

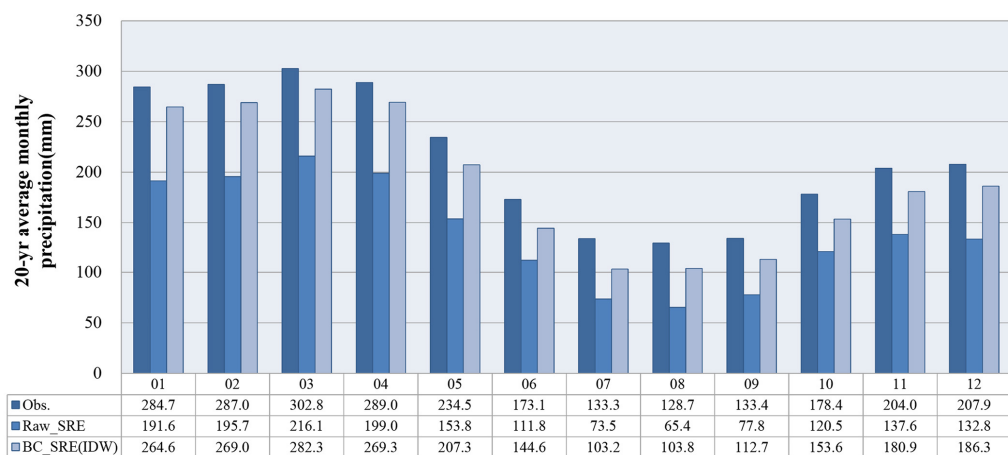


Figure 35. 20-year average monthly precipitation before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

4.2.1.2 기후지수 분석

WMO(World Meteorological Organization)에서 제공하는 ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)를 이용하여 본 연구에서 생산한 위성자료의 기후지수를 분석하였다. 본 연구에서 사용한 강수량과 관련된 기후지수는 총 11개이며 기후지수에 대한 설명은 Table 19에 정리하였다.

Table 19. List of 11 climate indices (Karl et al., 1999; Peterson et al., 2001)

No.	Index	Description	Unit
1	CDD	Maximum number of consecutive days with daily PRCP < 1mm	day
2	CWD	Maximum number of consecutive days with daily PRCP ≥ 1mm	day
3	PRCPTOT	Annual total PRCP in wet days (daily PRCP ≥ 1mm)	mm
4	R10mm	Annual count of days when PRCP ≥ 10mm	day
5	R20mm	Annual count of days when PRCP ≥ 20mm	day
6	R80mm	Annual count of days when PRCP ≥ 80mm	day
7	R95pTOT	Annual total PRCP when daily PRCP > 95 percentile	mm
8	R99pTOT	Annual total PRCP when daily PRCP > 99 percentile	mm
9	SDII	Annual precipitation divided by the number of wet days	mm/day
10	Rx1day	Annual maximum 1-day precipitation	mm
11	Rx5day	Annual maximum 5-day precipitation	mm

Figure 36~Figure 37은 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 11개의 기후지수를 연도별로 분석한 결과를 상자그림으로 보여주고 있다. 빨간색 선은 관측자료의 평균값을 의미한다.

한반도의 경우는 R10mm, R95pTOT, R99pTOT, Rx1day, Rx5day 지수가 관측자료와 위성자료가 비슷한 것으로 나타났다. CDD, SDII는 Raw_SRE, BC_SRE(IDW) 모

두 관측자료 보다 크게 나타났으며, CWD는 관측자료 보다 작게 나타났다. PRCPTOT, R20mm, R80mm는 Raw_SRE는 관측자료보다 크게 산정되었지만, BC_SRE(IDW)는 관측자료와 비슷하게 나타나는 특징을 보였다. 바누아투의 경우는 전반적으로 Raw_SRE가 관측자료와 차이가 크게 나타나는 특성을 보였으며 편의보정을 수행하면 SDII 제외한 나머지 기후지수는 관측자료와 비슷한 값을 보여주는 것으로 나타났다.

기후지수를 통해 위성자료의 특징을 살펴본 결과 한반도에서는 Raw_SRE가 관측자료에 비해 20 mm, 80 mm 이상인 강수량을 과대추정하는 것으로 분석되었다. 이로 인해 강우강도, 연강수량도 과대 추정되는 결과를 가져왔다. 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW) 결과를 살펴보면 R20mm, R80mm가 확실히 개선된 점을 확인할 수 있으며 따라서 PRCPTOT 또한 개선된 점을 확인하였다. 다만 CWD가 편의보정 후에도 지속적으로 관측자료보다 작게 산정되는 문제는 남아있어 SDII 값이 개선이 안 되는 것으로 사료된다. 추후 이러한 점을 고려한 편의보정 기법을 개선할 필요가 있다. 바누아투의 경우는 한반도와는 다른 섬으로 구성된 지형학적인 특징을 가지고 있으며 국지성 호우가 빈번히 발생하는 특징이 있다. 위성자료가 국지성호우로 발생하는 극치강수량을 정확하게 측정하지 못하는 한계가 존재하여 Raw_SRE 지수 결과를 살펴보면 전반적으로 강수량이 작게 추정되는 특징을 보인다. 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW) 지수 결과를 보면 상당부분 개선된 점을 확인할 수 있다.

바누아투의 경우는 한반도와는 달리 섬으로 구성된 지형학적인 특징을 가지고 있으며 국지성 호우가 빈번히 발생하는 특징이 있다. 위성자료가 국지성호우로 발생하는 극치강수량을 정확하게 측정하지 못하는 한계가 존재하여 Raw_SRE 지수 결과를 살펴보면 전반적으로 강수량이 작게 추정되는 특징을 보인다. 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW) 결과를 살펴보면 Rx1day, Rx5day가 확실히 개선된 점을 확인할 수 있다. R10mm, R20mm, PRCPTOT이 편의보정 후에도 관측자료보다 작게 산정되기는 하나 상당부분 개선된 점을 확인할 수 있다. 다만 R80mm이 편의보정 후에 관측자료보다 크게 산정되어 SDII 값 또한 크게 산정된 것으로 사료된다. 추후 이러한 점을 고려한 편의보정 기법을 개선할 필요가 있다.

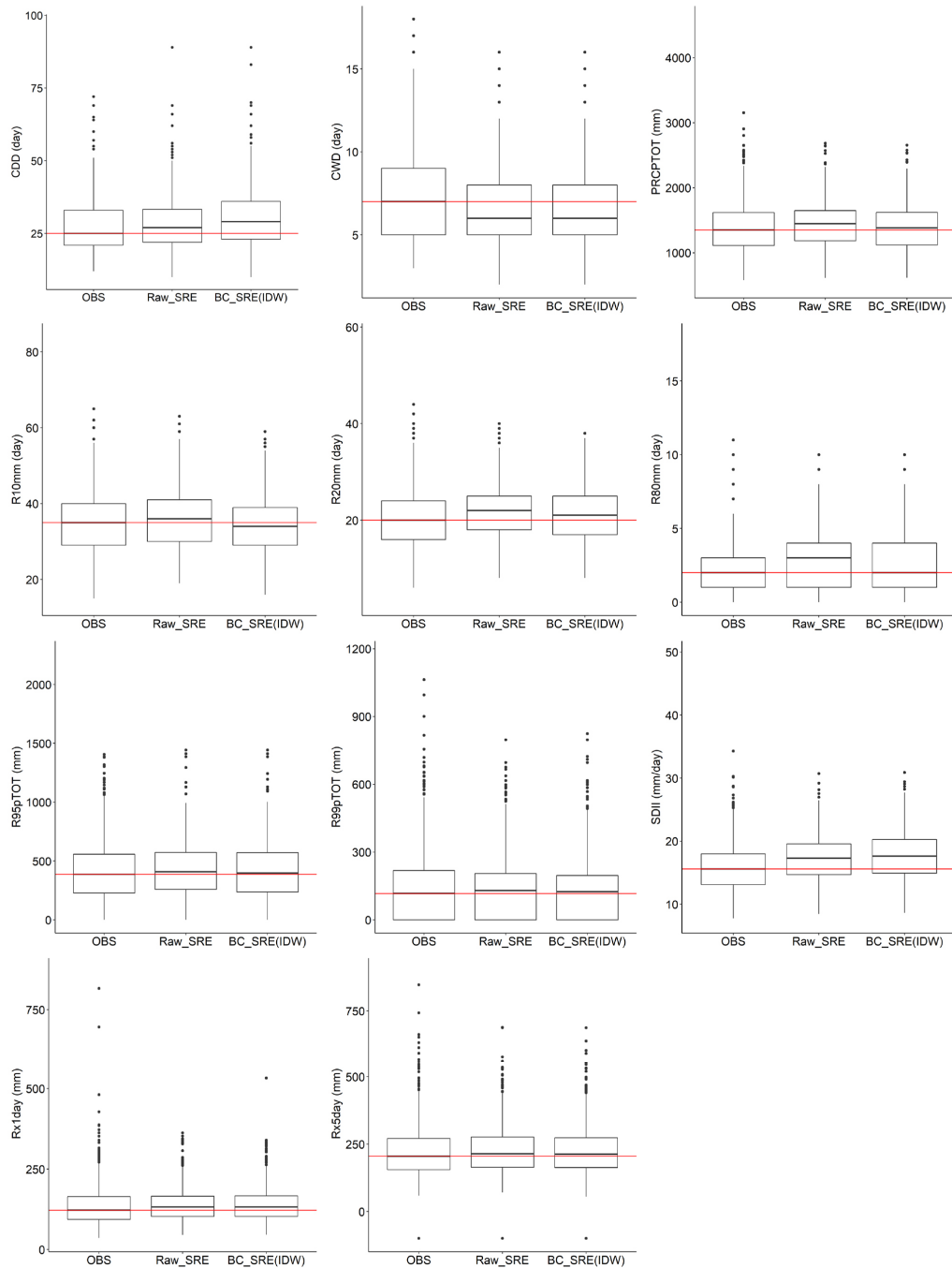


Figure 36. Box plot of 11 climate indices before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

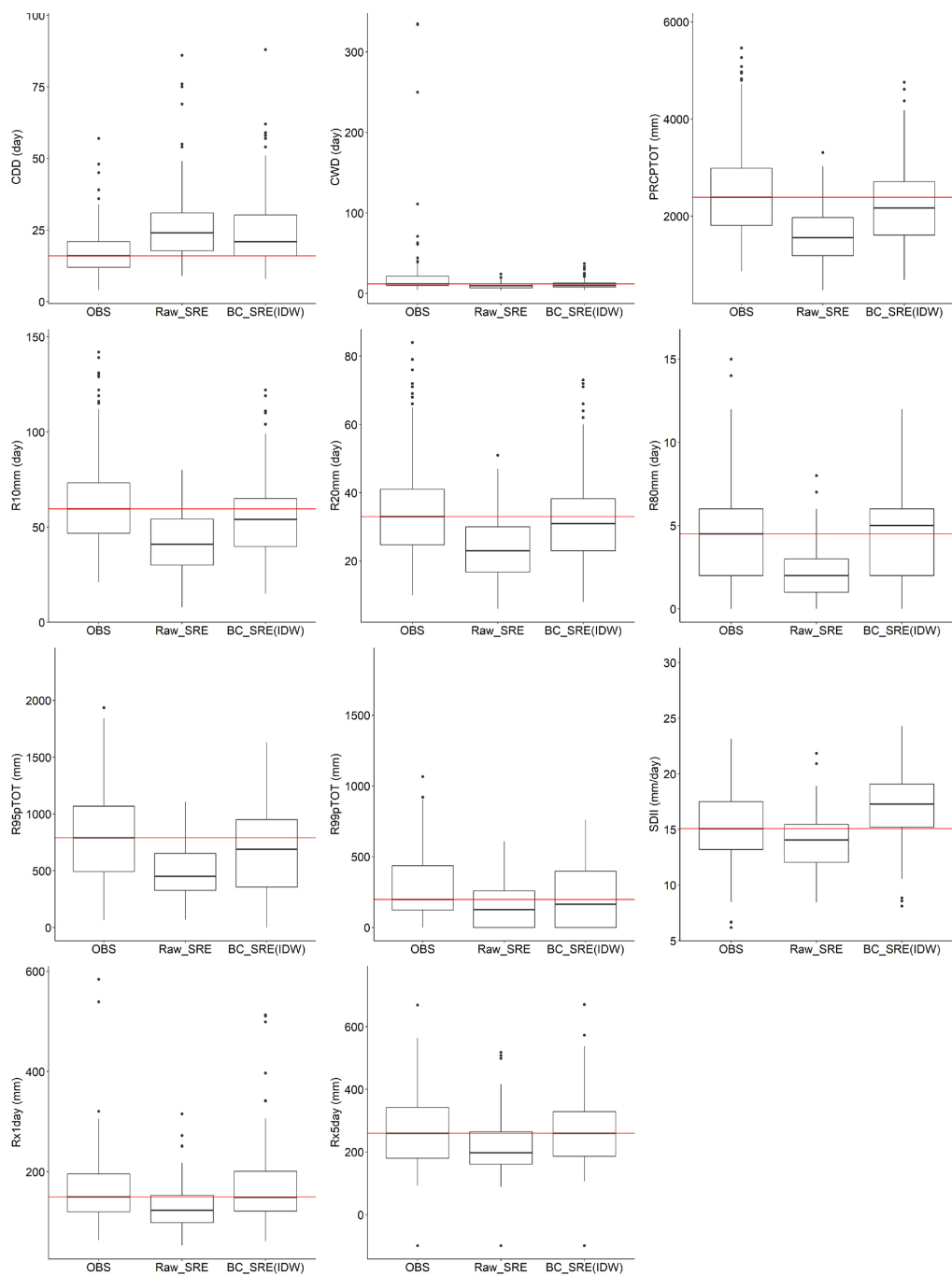


Figure 37. Box plot of 11 climate indices before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

4.2.1.3 공간 상관성 및 공간 분포 분석

Figure 38-Figure 39는 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 지점별 공간 상관성을 산정한 결과를 행렬로 보여주고 있다.

한반도의 경우는 Raw_SRE, BC_SRE(GRA-IDW)의 공간 상관성이 관측자료의 공간 상관성을 유사하게 나타나는 것으로 분석되었다. Raw_SRE의 공간 상관성이 관측자료에 비해 조금 더 강한 상관관계를 나타내었는데 편의보정을 통해 조금 감소한 것을 확인할 수 있다. 바누아투의 경우는 Raw_SRE, BC_SRE(GRA-IDW)의 전체적인 공간 상관성이 관측자료의 공간 상관성을 유사하게 나타나는 것으로 분석되었다. Raw_SRE의 공간 상관성이 관측자료에 비해 강한 상관관계를 나타내었는데 편의보정을 통해 조금 감소한 것을 확인할 수 있다.

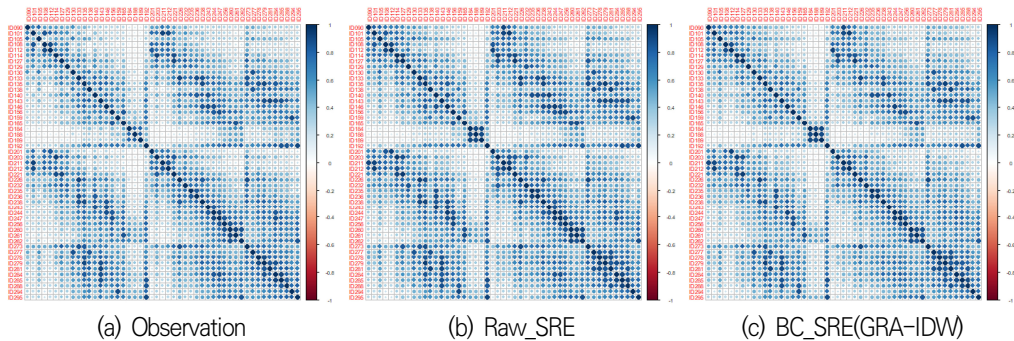


Figure 38. Spatial correlation matrix before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

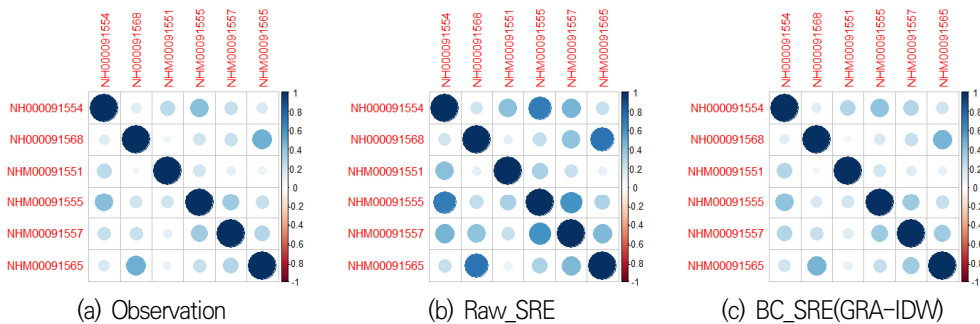


Figure 39. Spatial correlation matrix before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

Figure 40-Figure 41은 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 베리오그램을 산정한 결과를 보여주고 있다. 한반도는 전반적으로 관측자료, Raw_SRE, BC_SRE(IDW)의 공간적 유사성이 높은 것으로 분석되었으며, 바누아투는 관측자료와 Raw_SRE의 공간적 유사성이 낮으나 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW)의 공간적 유사성이 높아진 것으로 분석되었다.

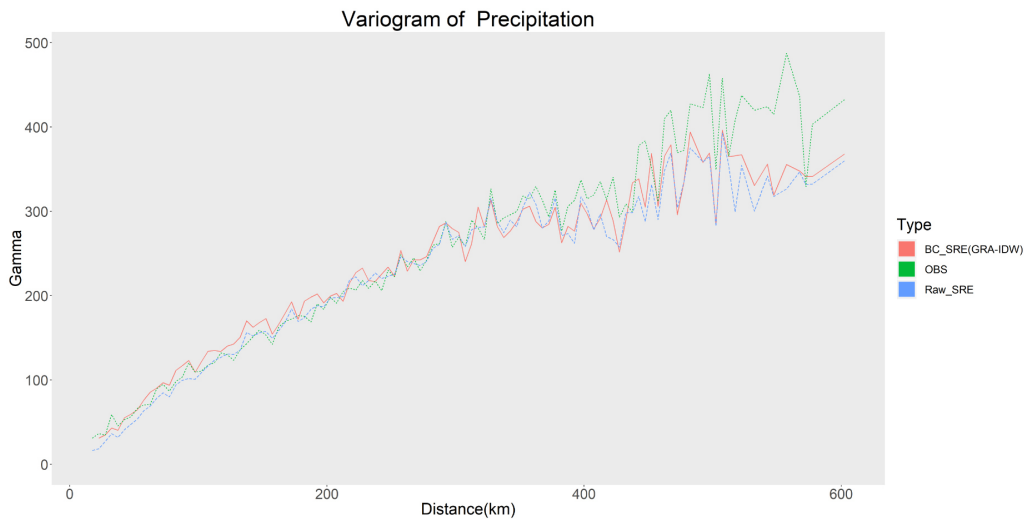


Figure 40. Variogram before and after bias-correction(GRA-IDW) for South Korea

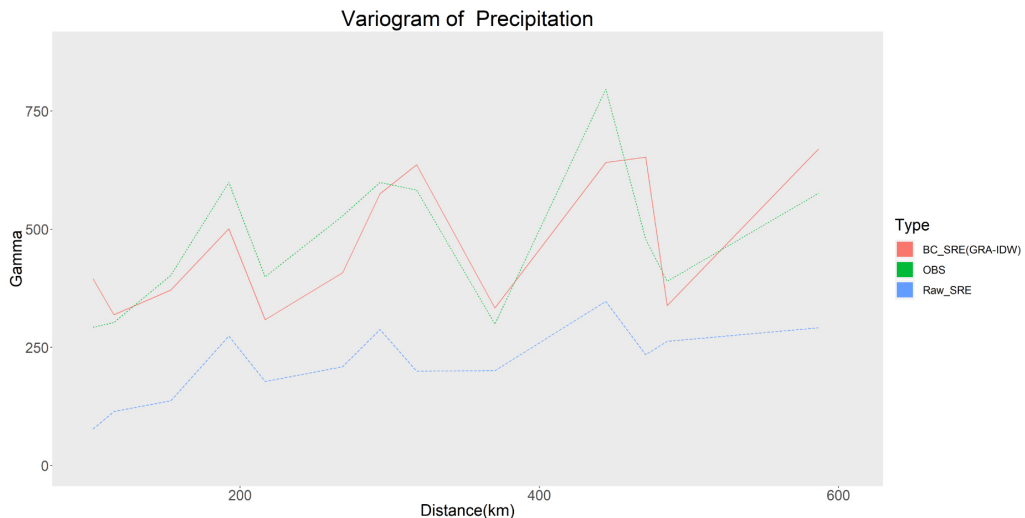
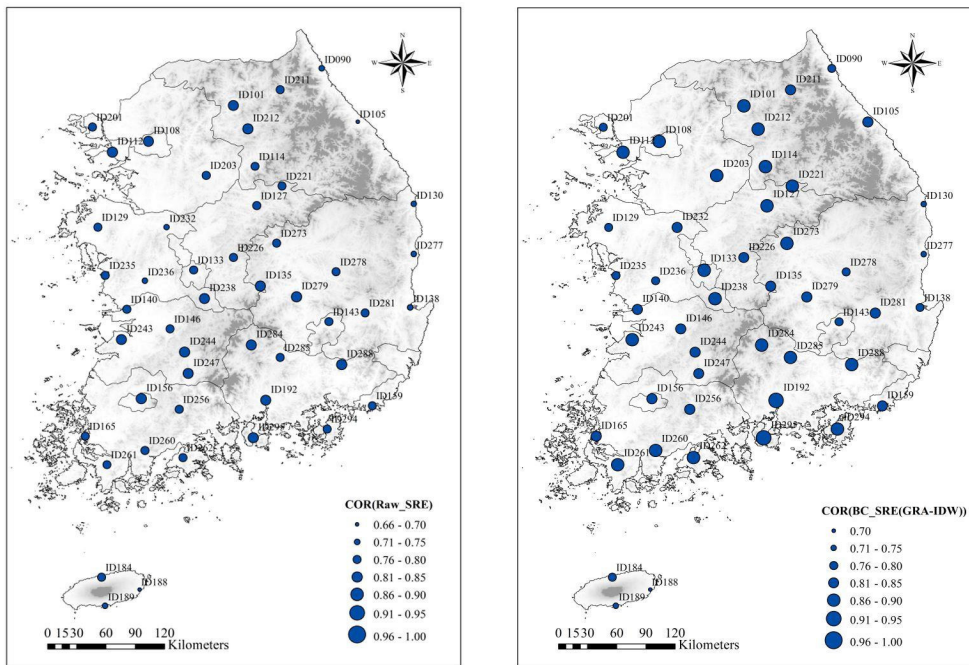


Figure 41. Variogram before and after bias-correction(GRA-IDW) for Vanuatu

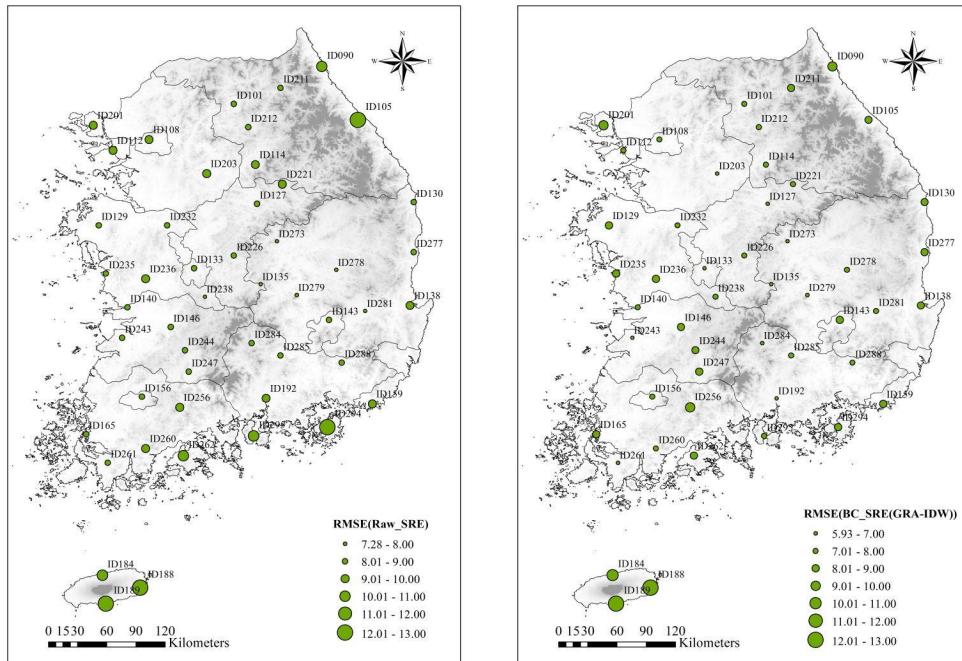
Figure 42-Figure 45은 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 지점별 상관계수, RMSE를 산정한 결과의 공간 분포를 보여주고 있다. 한반도는 49개 지점에 대한 검증 결과를 의미하며 바누아투는 6개 지점에 대한 보정 결과를 의미한다. 한반도는 영서지방, 충청도, 남해안 지역의 상관계수가 편의보정 전에 비해 증가한 것으로 분석되었다. 영동지방, 남해안 지역의 RMSE는 편의보정 전에 비해 감소한 것으로 분석되었다. 바누아투는 6개 지점에 대한 보정 결과이므로 전체적으로 편의보정 전에 상관계수가 증가하고, RMSE가 감소하는 것으로 분석되었다. 다만 바누아투가 섬나라이고 지점 간 거리가 100 km 이상인 경우가 있어 지점별로 편의보정 결과의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.



(a) Correlation coefficient between observation and Raw_SRE

(b) Correlation coefficient between observation and BC_SRE(GRA-IDW)

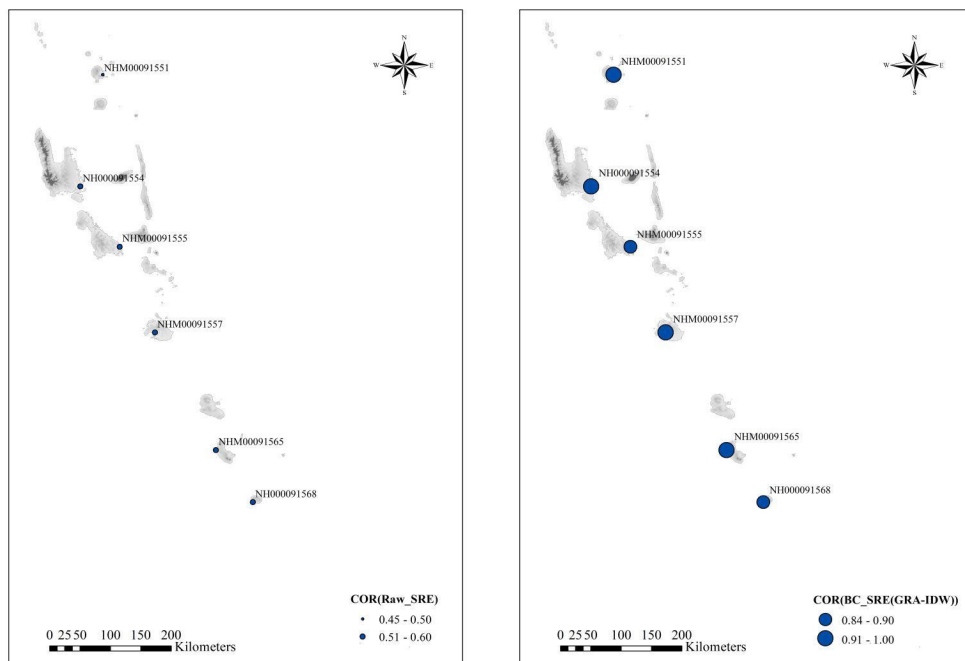
Figure 42. Correlation coefficient between observation and satellite estimates for 49 ASOS in South Korea



(a) RMSE between observation and Raw_SRE

(b) RMSE between observation and BC_SRE (GRA-IDW)

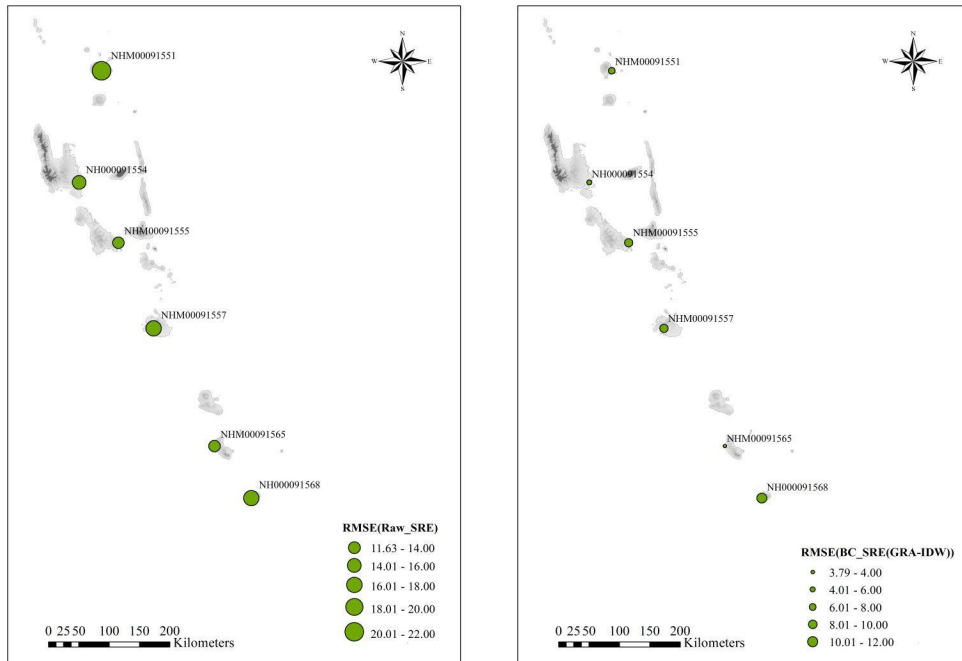
Figure 43. RMSE between observation and satellite estimates for 49 ASOS in South Korea



(a) Correlation coefficient between observation and Raw_SRE

(b) Correlation coefficient between observation and BC_SRE(GRA-IDW)

Figure 44. Correlation coefficient between observation and satellite estimates for 49 ASOS in Vanuatu



(a) RMSE between observation and Raw_SRE (b) RMSE between observation and BC_SRE (GRA-IDW)

Figure 45. RMSE between observation and satellite estimates for 49 ASOS in Vanuatu

Figure 46-Figure 53은 한반도와 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 지점별, 월별 상관계수, RMSE를 산정한 결과의 공간 분포를 보여주고 있다. 한반도는 49개 지점에 대한 검증 결과를 의미하며 바누아투는 6개 지점에 대한 보정 결과를 의미한다.

한반도는 상관계수, RMSE의 변화량의 차이가 크지 않아 그림 상에서 확연하게 드러나지는 않지만 전반적으로 편의보정 전에 비해 상관계수는 증가하고, RMSE는 감소하는 것을 확인하였다. Raw_SRE의 1월, 12월의 상관계수가 상대적으로 작은 것으로 나타났으며, RMSE는 7월, 8월에 큰 것으로 나타났다. RMSE가 7월, 8월에 크게 산정되는 것은 우리나라의 강수량이 여름철에 집중되는 점을 고려하면 Raw_SRE가 일정 크기 이상의 강수량에 대한 정확도가 부족한 것으로 판단된다. 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW) 결과를 살펴보면 일정부분 상관계수와 RMSE가 개선된 점을 확인할 수 있다. 바누아투는

6개 지점에 대한 보정 결과이므로 전체적으로 편의보정 전에 상관계수가 증가하고, RMSE가 감소하는 것으로 분석되었다.

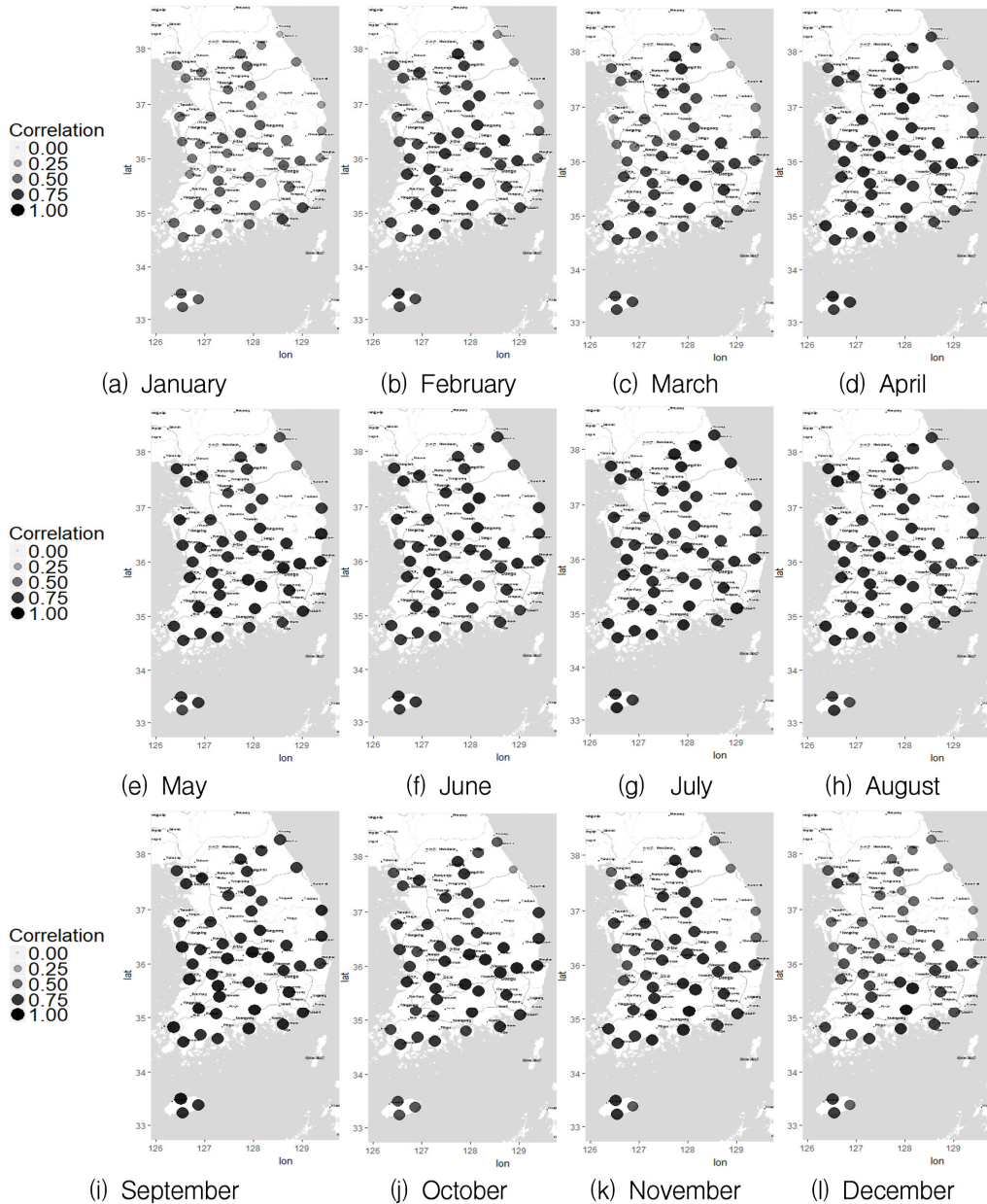


Figure 46. Monthly correlation coefficient between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in South Korea

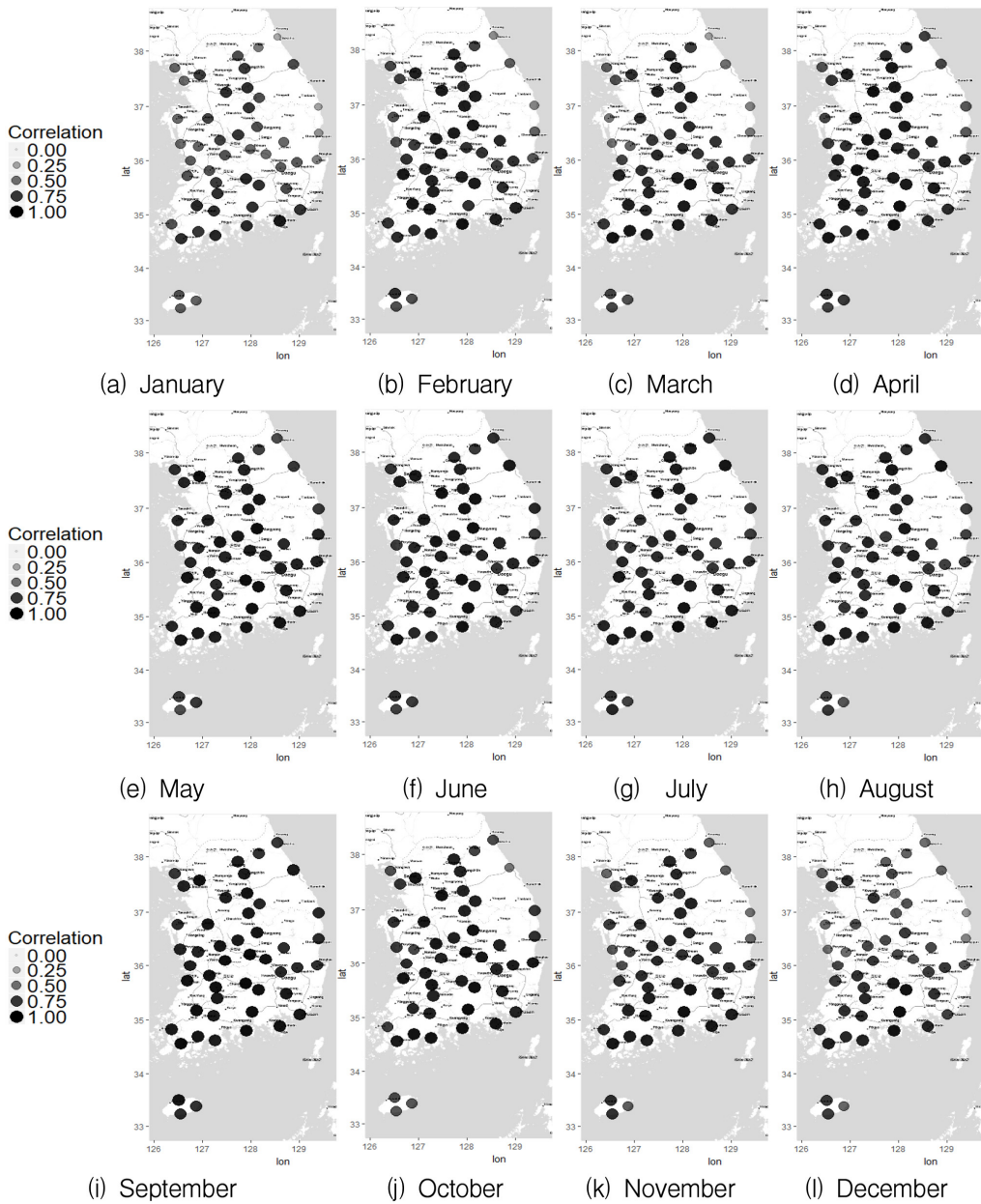


Figure 47. Monthly correlation coefficient between observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in South Korea

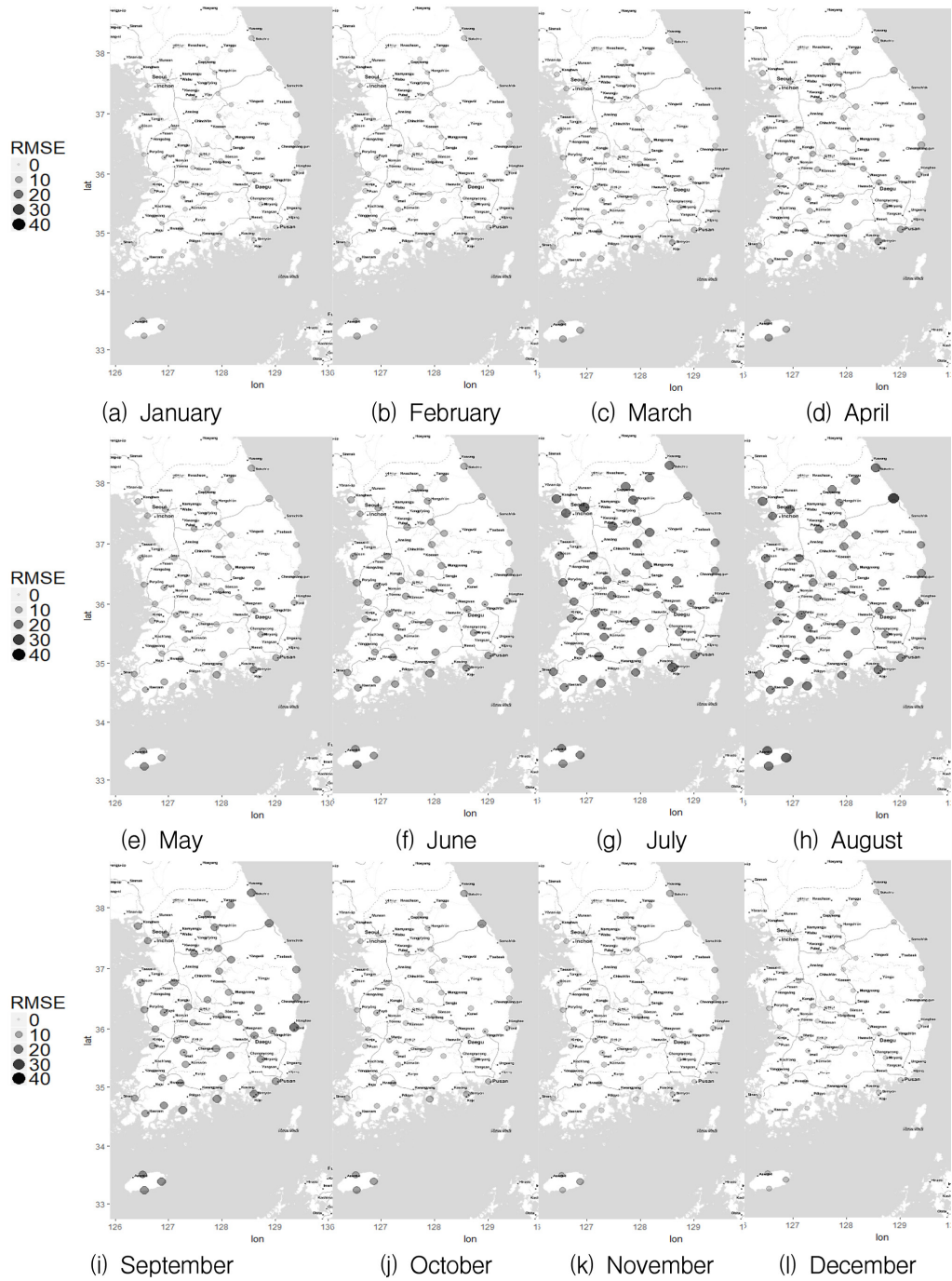


Figure 48. Monthly RMSE between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in South Korea

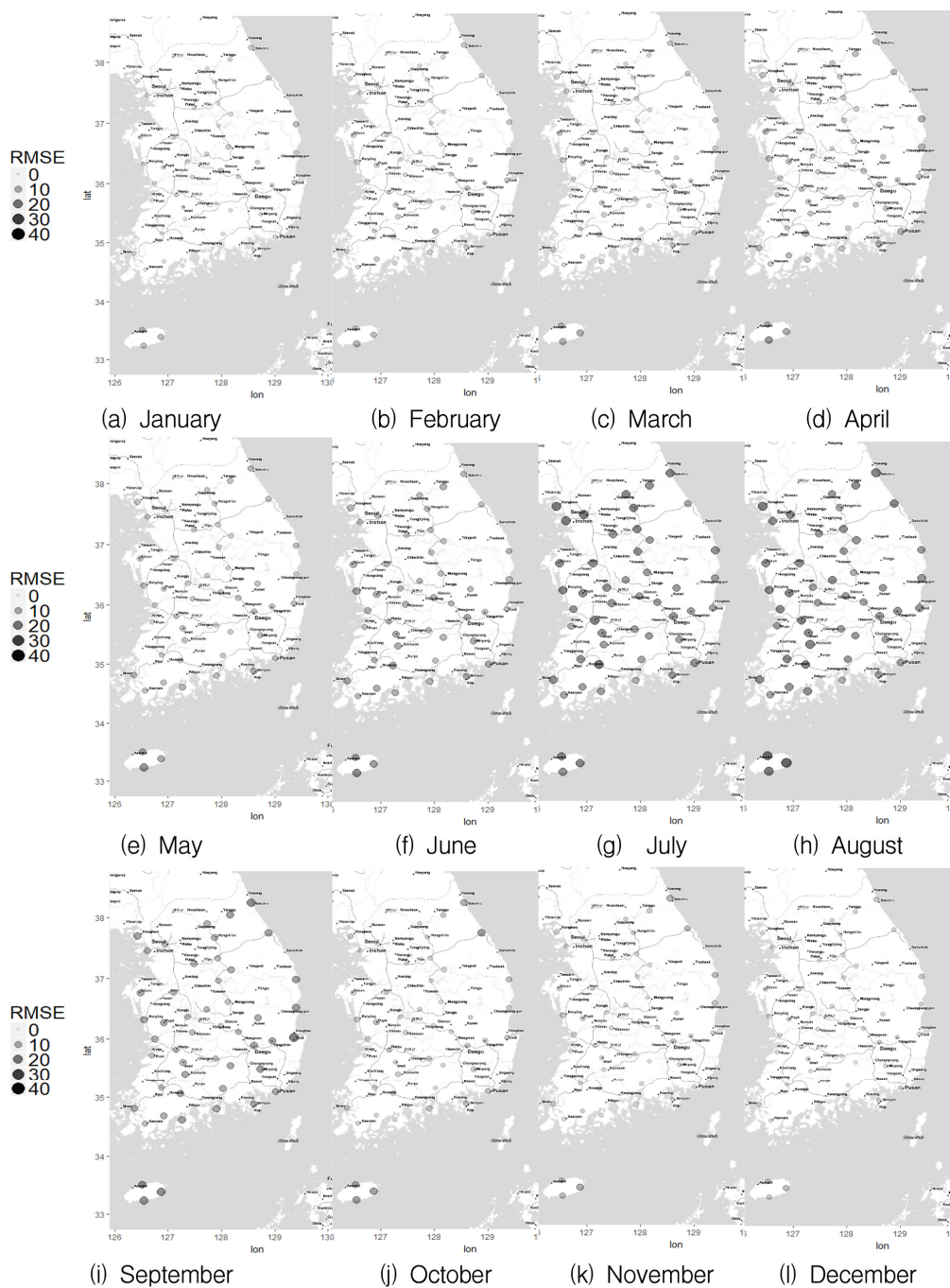


Figure 49. Monthly RMSE between observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in South Korea

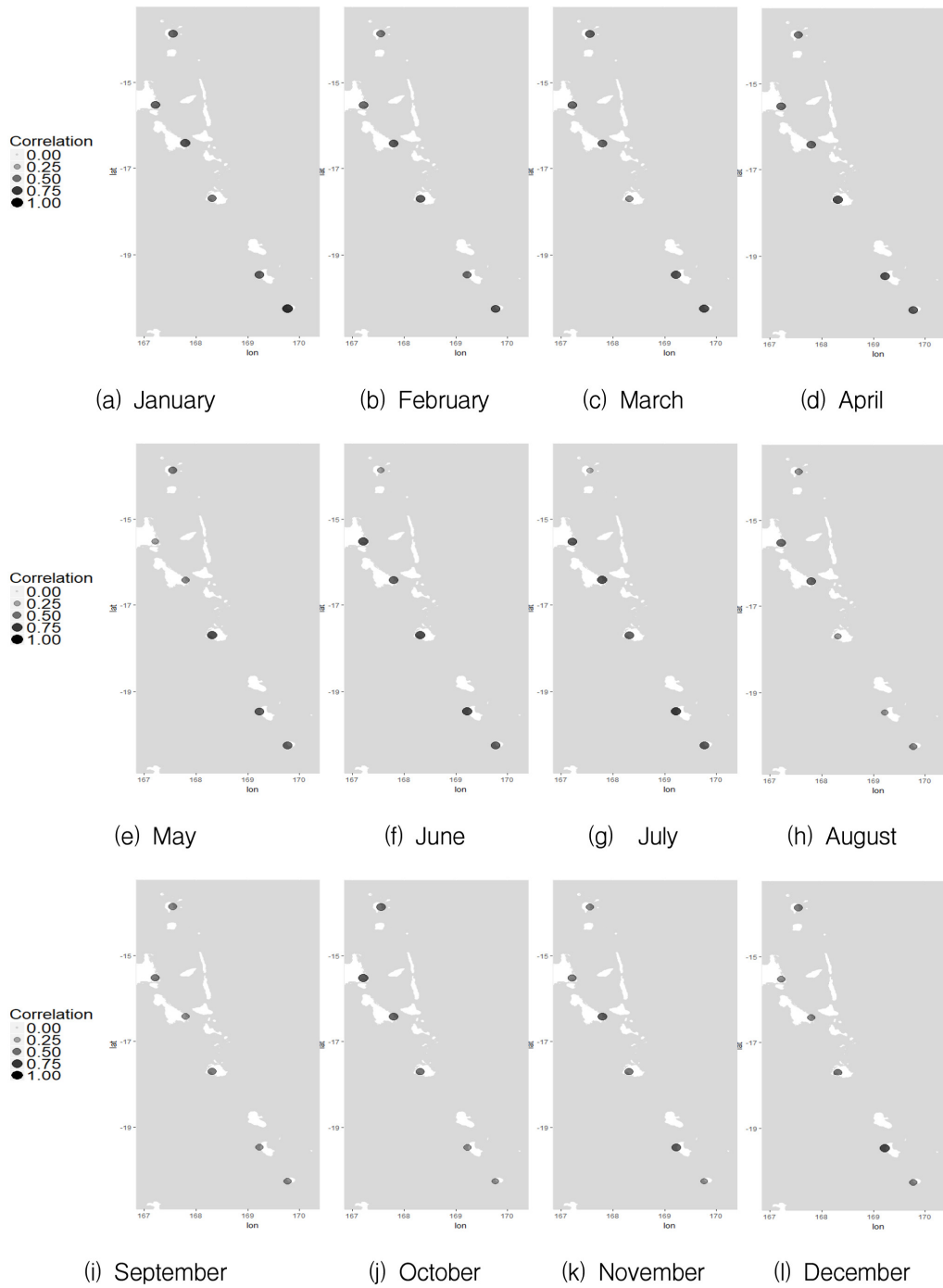


Figure 50. Monthly correlation coefficient between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in Vanuatu

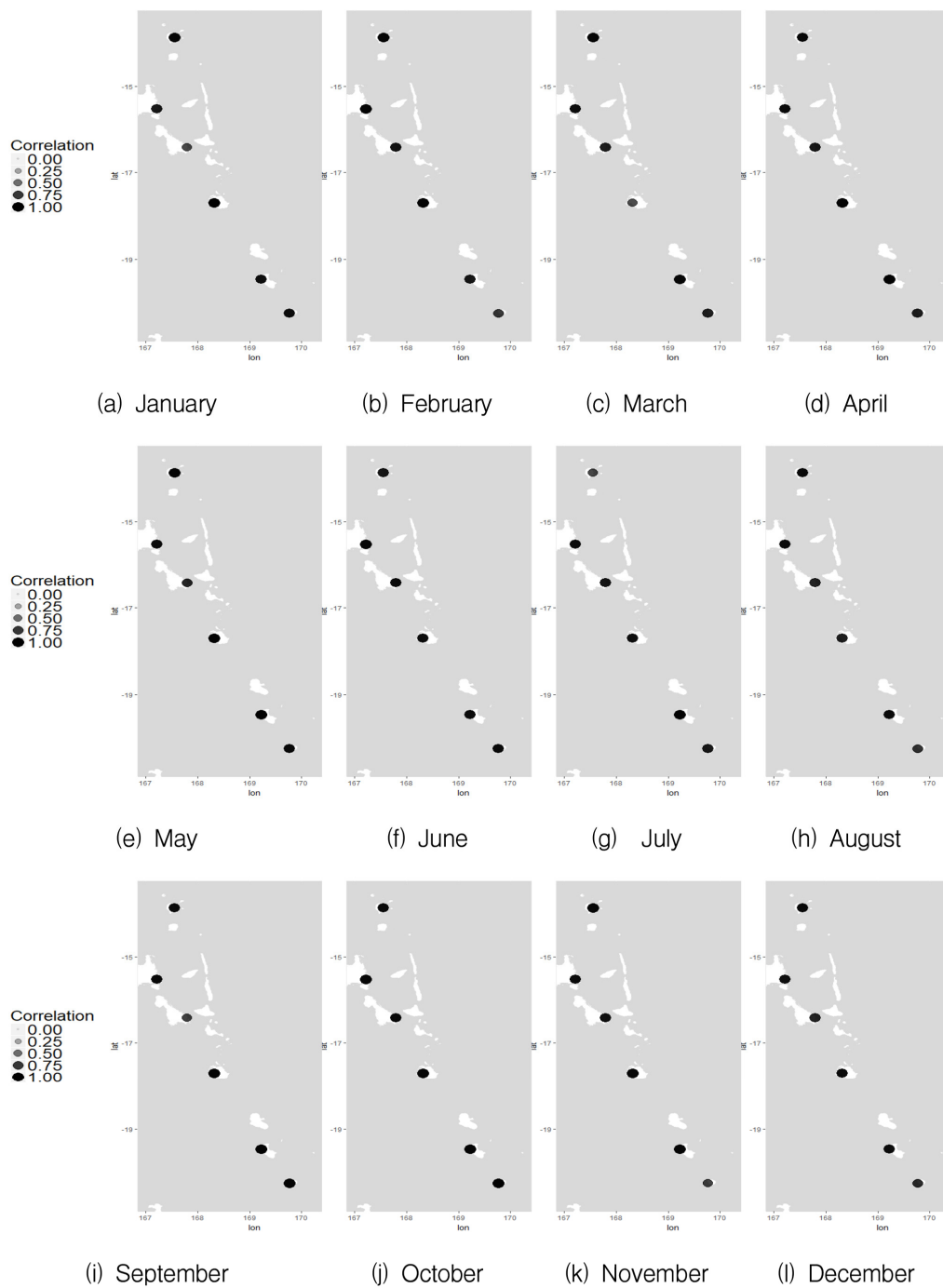


Figure 51. Monthly correlation coefficient between observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in Vanuatu

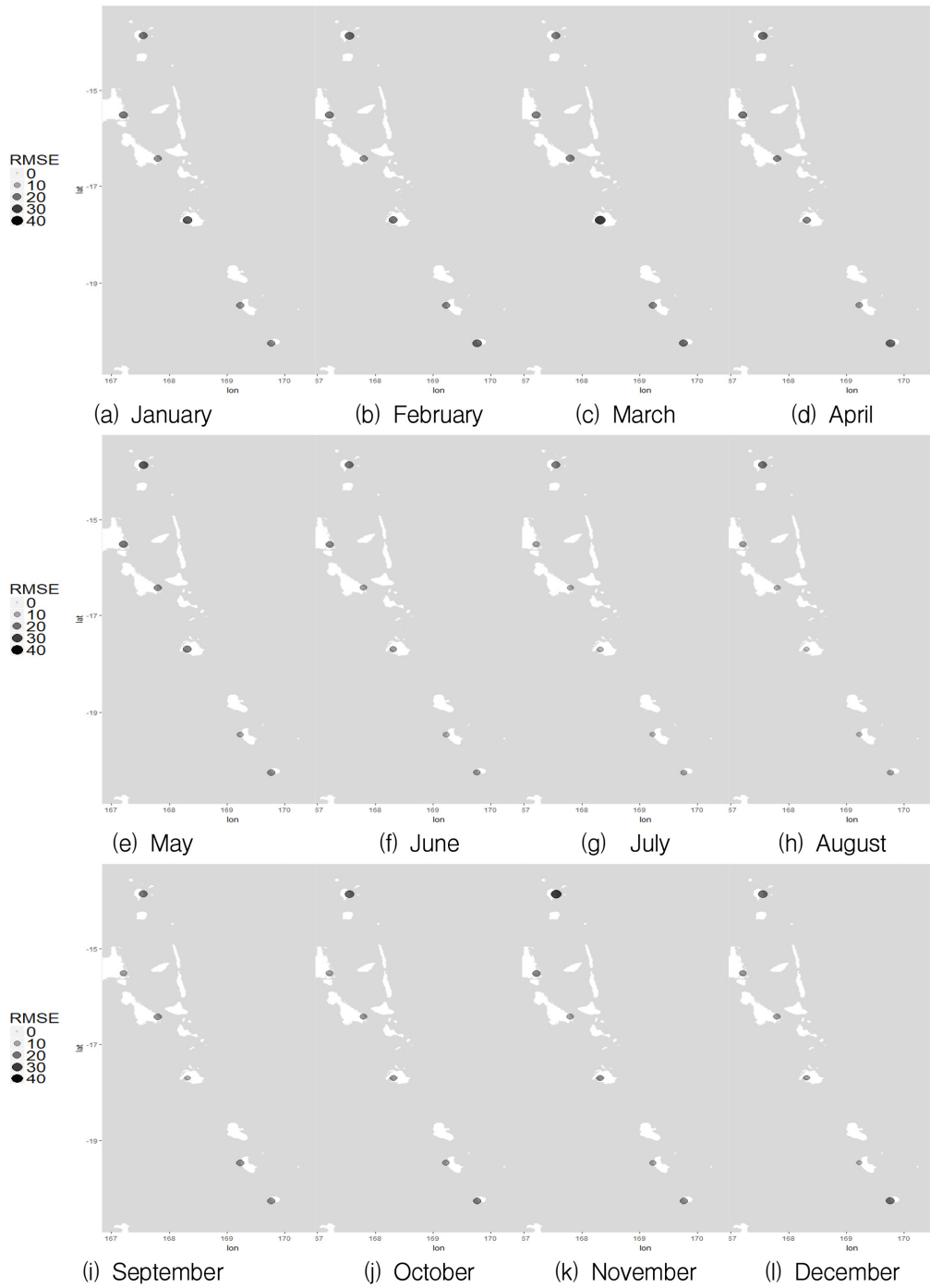


Figure 52. Monthly RMSE between observation and Raw_SRE for 49 ASOS in Vanuatu

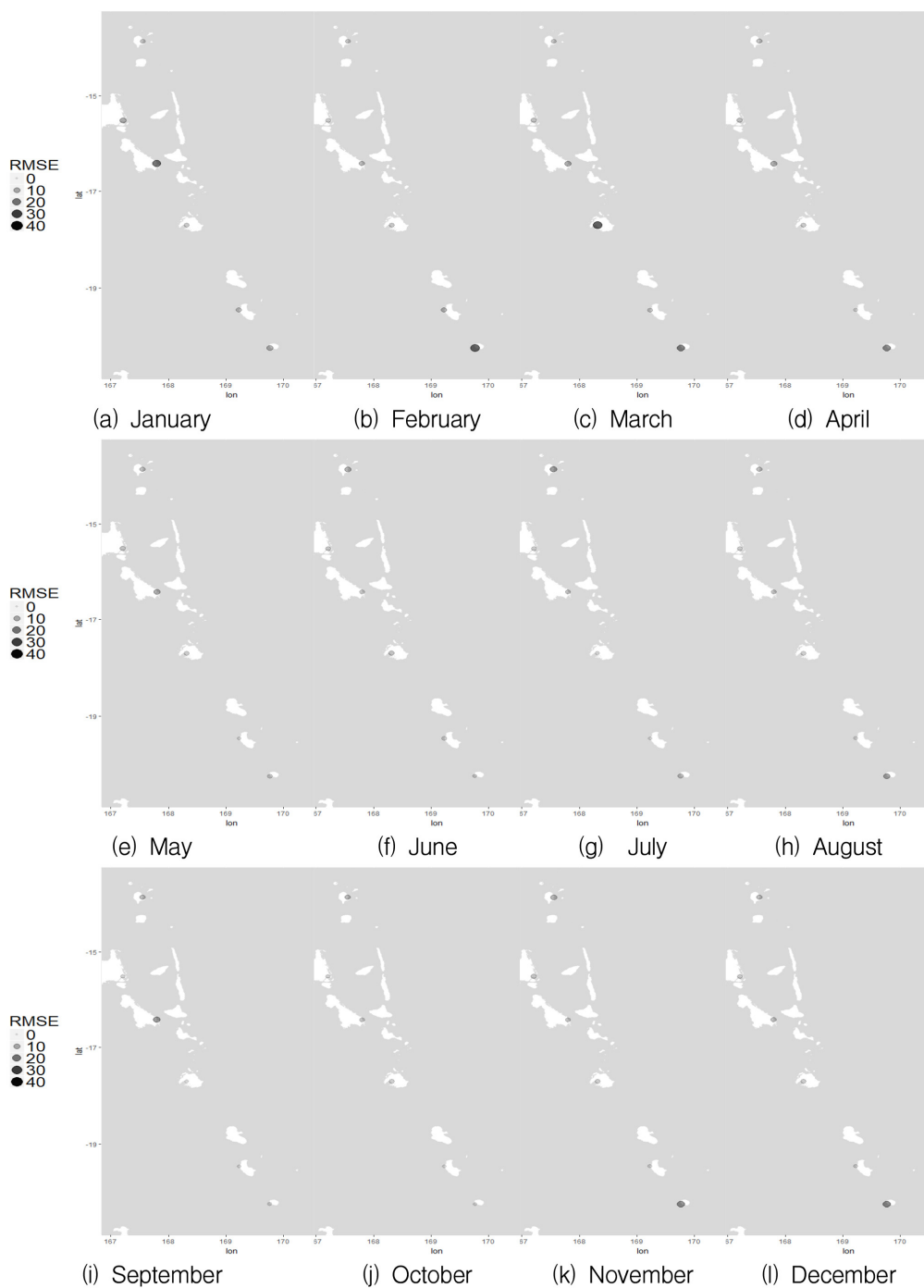


Figure 53. Monthly RMSE observation and BC_SRE(GRA-IDW) for 49 ASOS in Vanuatu

4.2.2 공간상세화한 위성자료

4.2.2.1 기후특성 분석

Figure 54는 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 20년 평균 연강수량을 상자 그림으로 보여주고 있다. 한반도의 관측자료, 원시위성자료 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료의 평균값은 각각 1346.3 mm, 1469.4 mm, 1410.0 mm으로 산정되었다. 바누아투의 관측자료, 원시위성자료 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료의 평균값은 각각 2556.7 mm, 1661.1 mm, 2488.6 mm으로 산정되었다.

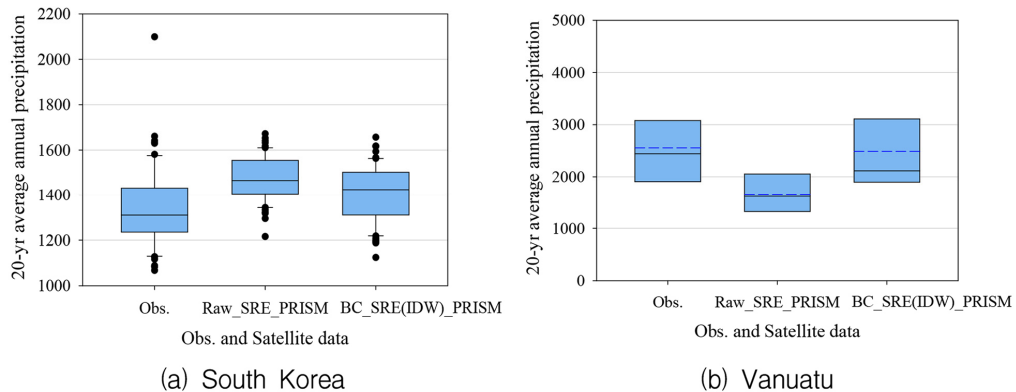


Figure 54. Box plot of 20-year average annual precipitation after applying PRISM for South Korea and Vanuatu

Figure 55는 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 20년 평균 월강수량을 상자 그림으로 보여주고 있다. 월별로 살펴보면 4, 6, 7, 8, 9월에 관측자료와 원시위성자료가 차이가 큰 것으로 나타났다. Figure 56은 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료에 대해 20년 평균 월강수량을 상자그림으로 보여주고 있다. 전체적으로 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다.

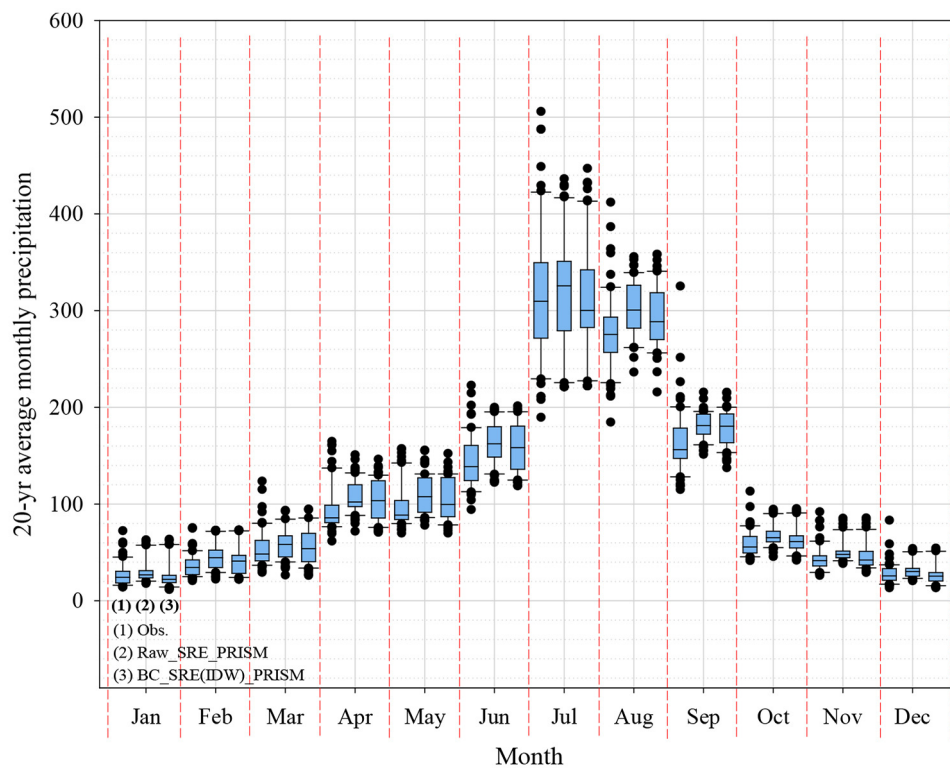


Figure 55. Box plot of 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for South Korea

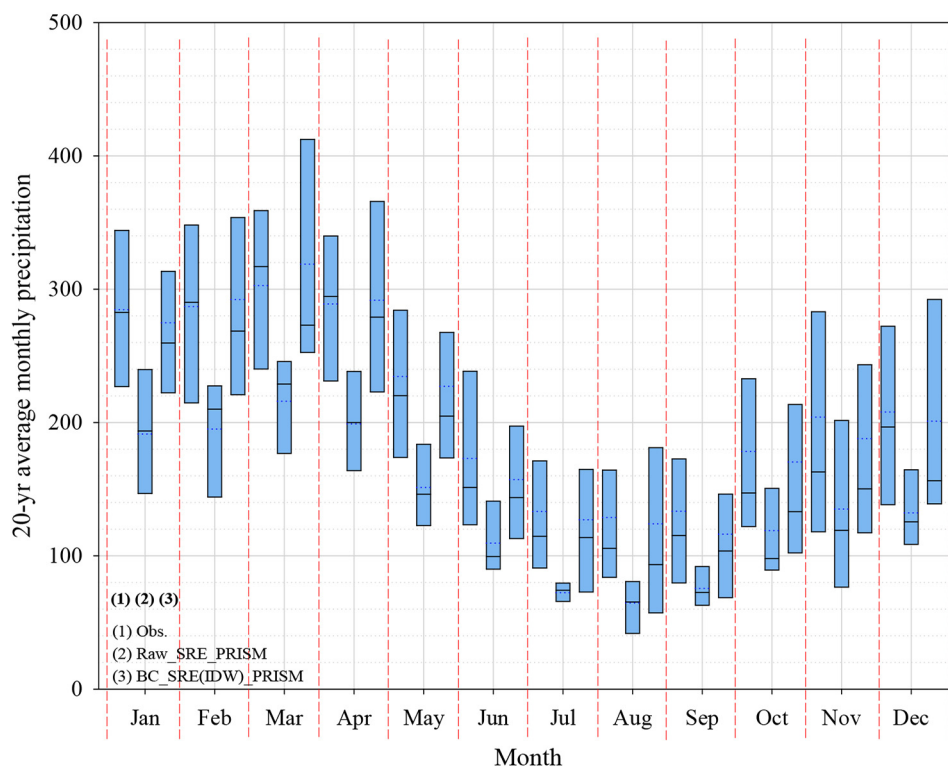


Figure 56. Box plot of 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for Vanuatu

Figure 57-Figure 58은 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 연강수량, 20년 평균 월강수량을 평균값과 함께 막대그래프로 나타내고 있다.

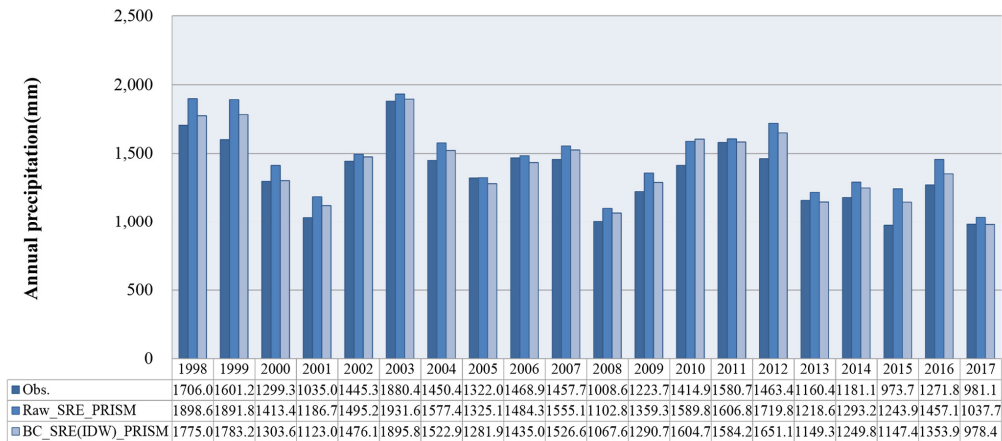


Figure 57. Annual precipitation after applying PRISM for South Korea

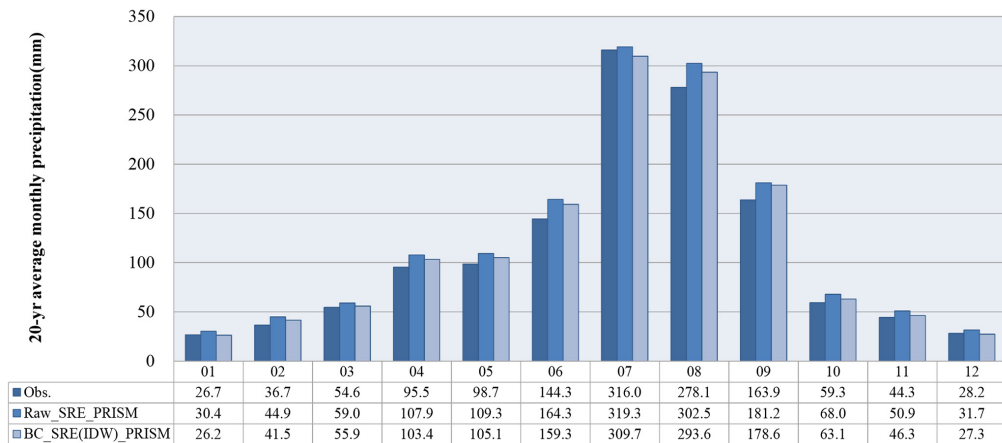


Figure 58. 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for South Korea

Figure 59-Figure 60은 바누아투를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 연강수량, 20년 평균 월강수량을 평균값과 함께 막대그래프로 나타내고 있다. 전체적으로 편의보정을 통해 개선된 것을 확인할 수 있다.

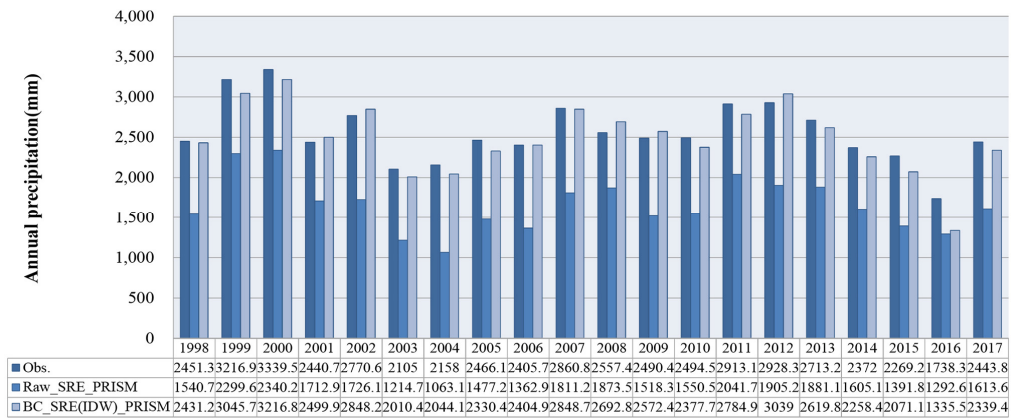


Figure 59. Annual precipitation after applying PRISM for Vanuatu

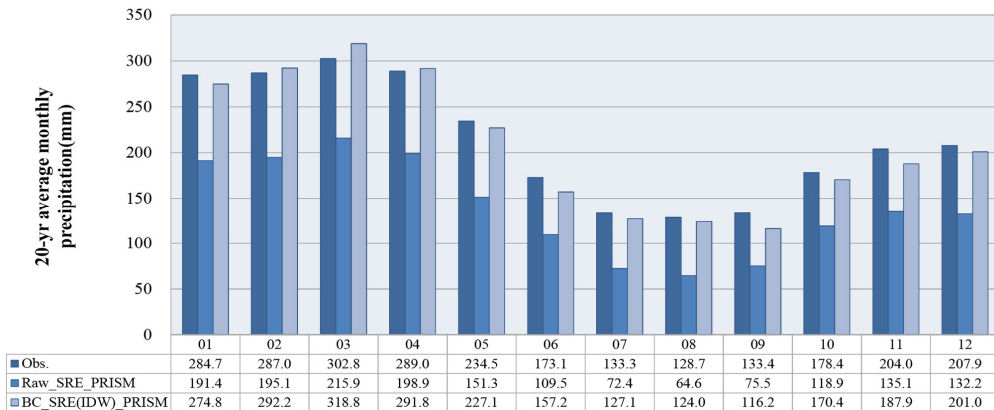


Figure 60. 20-year average monthly precipitation after applying PRISM for Vanuatu

4.2.2.2 기후지수 분석

Figure 61-Figure 62는 한반도와 바누아투를 대상으로 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 11개의 기후지수를 연도별로 분석한 결과를 상자그림으로 보여주고 있다. 빨간색 선은 관측자료의 평균값을 의미한다. 한반도의 경우는 CWD, Rx1day, Rx5day 지수가 관측자료와 위성자료가 비슷한 것으로 나타났다. R20mm, R80mm는 Raw_SRE_PRISM, BC_SRE(IDW)_PRISM 모두 관측자료 보다 크게 나타났다. 공간상세화를 수행하기 전에 비해 CWD 값이 관측자료와 일치하는 특징을 보였다. 바누아투의 경우는 전반적으로 Raw_SRE_PRISM이 관측자료와 차이가 크게 나타나는 특성을 보였으며 편의보정을 수행하면 SDII 제외한 나머지 기후지수는 관측자료와 비슷한 값을 보여주는 것으로 나타났다. 공간상세화를 수행하기 전에 비해 BC_SRE(IDW)_PRISM의 SDII 값이 보다 증가한 것으로 나타났다.

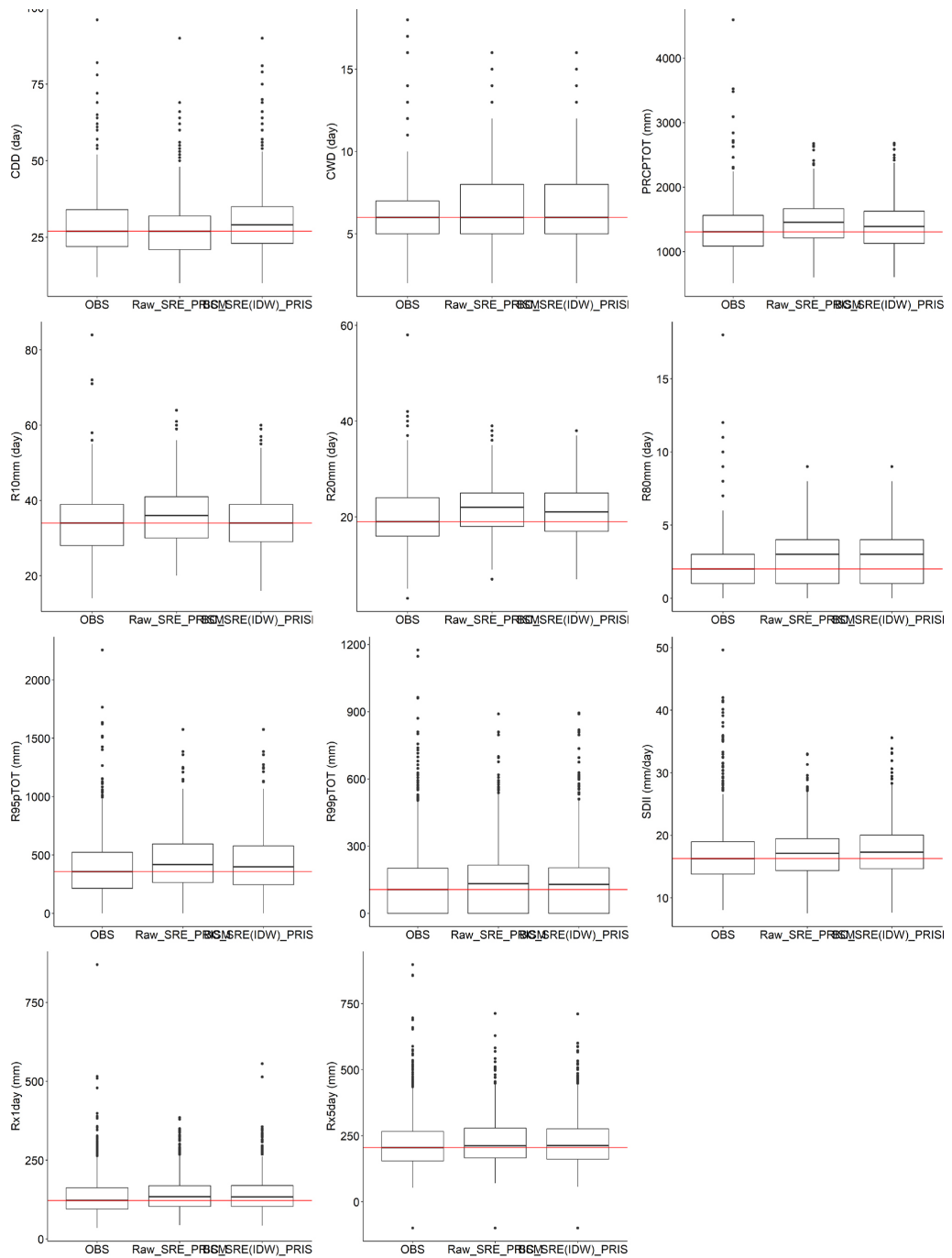


Figure 61. Box plot of 11 climate indices after applying PRISM for South Korea

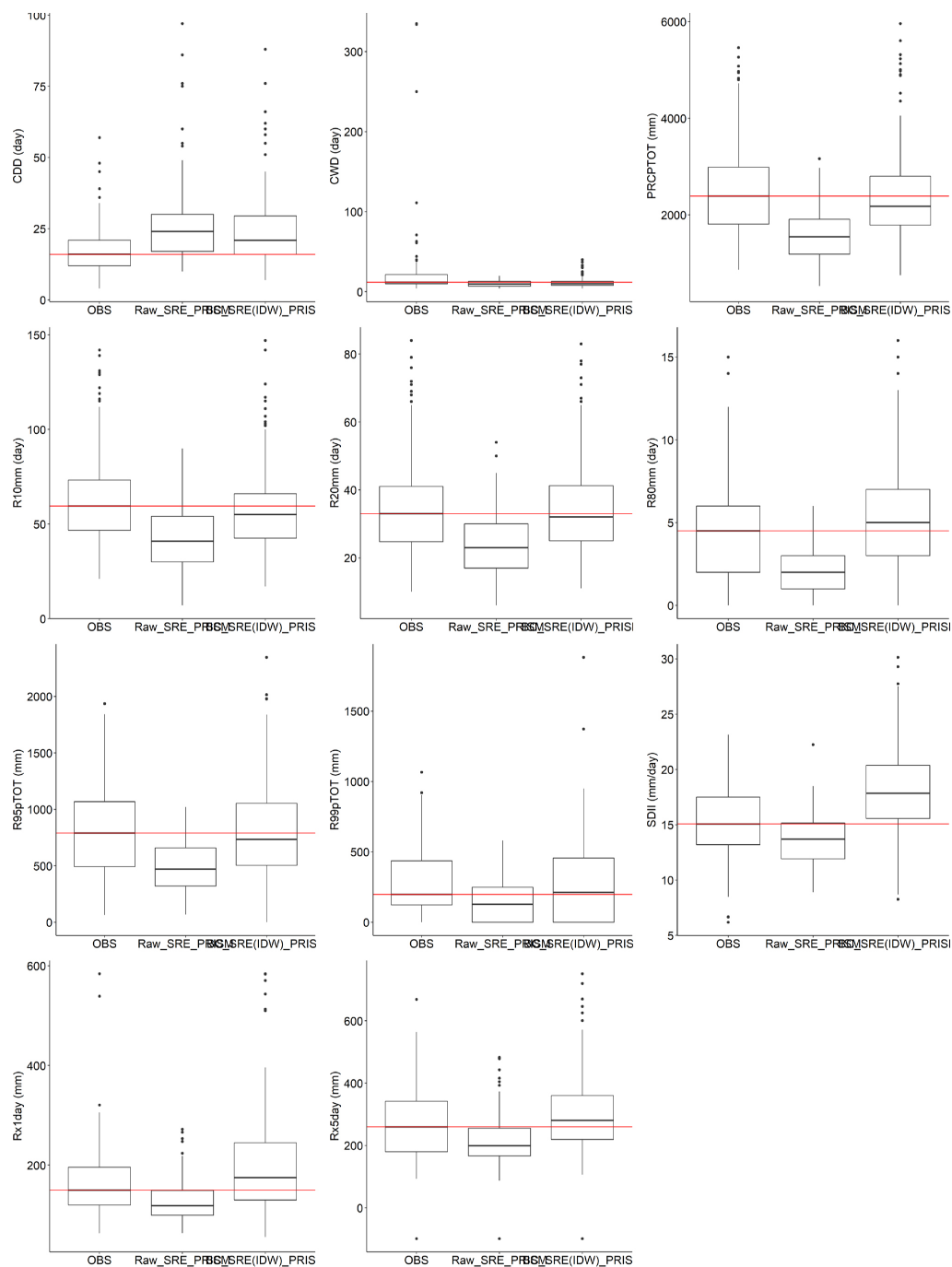


Figure 62. Box plot of 11 climate indices after applying PRISM for Vanuatu

4.2.2.3 공간 상관성 분석

Figure 63-Figure 64는 한반도와 바누아투를 대상으로 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 지점별 공간 상관성을 산정한 결과를 행렬로 보여주고 있다.

한반도의 경우는 일부 지점의 Raw_SRE_PRISM, BC_SRE(GRA-IDW)_PRISM의 공간 상관성이 관측자료의 공간 상관성과 차이가 발생하는 것으로 분석되었다. 이는 공간상세화를 수행하면서 일부 지점의 공간 상관성의 변동이 발생한 것으로 분석된다. 바누아투의 경우는 Raw_SRE_PRISM, BC_SRE(GRA-IDW)_PRISM의 전체적인 공간 상관성이 관측자료의 공간 상관성을 유사하게 나타나는 것으로 분석되었다. Raw_SRE_PRISM의 공간 상관성이 관측자료에 비해 강한 상관관계를 나타내었는데 편의보정을 통해 조금 감소한 것을 확인할 수 있다.

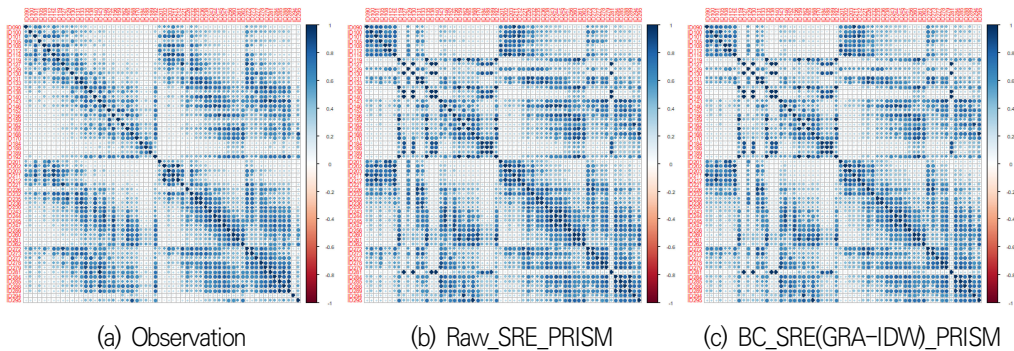


Figure 63. Spatial correlation matrix after applying PRISM for South Korea

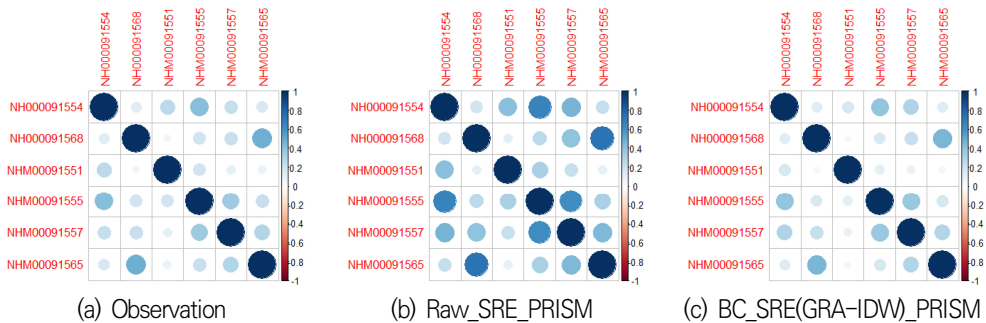


Figure 64. Spatial correlation matrix after applying PRISM for Vanuatu

Figure 65-Figure 66은 한반도와 바누아투를 대상으로 한반도를 대상으로 관측자료, 원시위성자료를 공간상세화한 자료, IDW 기법으로 편의보정한 위성자료를 공간상세화한 자료에 대해 베리오그램을 산정한 결과를 보여주고 있다. 한반도는 500 km를 초과하는 거리에서 차이가 발생하기는 하나 전반적으로 관측자료, Raw_SRE_PRISM, BC_SRE(IDW)_PRISM의 공간적 유사성이 높은 것으로 분석되었으며, 바누아투는 관측자료와 Raw_SRE_PRISM의 공간적 유사성이 낮으나 편의보정을 수행한 BC_SRE(IDW)_PRISM의 공간적 유사성이 높아진 것으로 분석되었다.

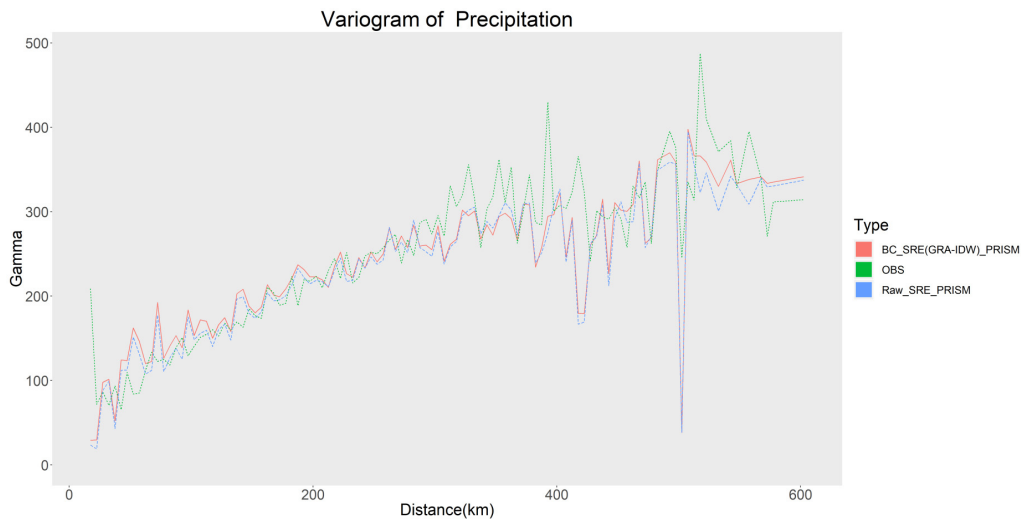


Figure 65. Variogram after applying PRISM for South Korea

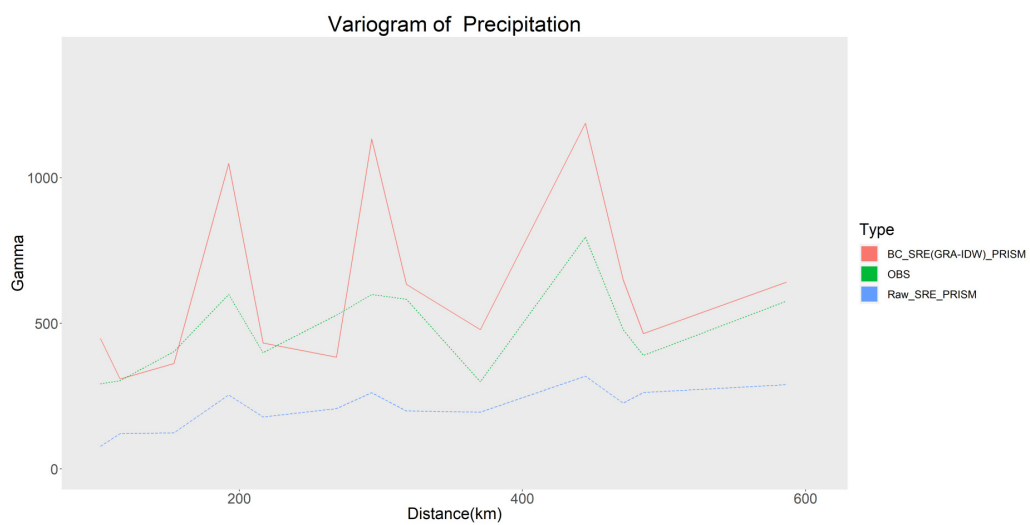


Figure 66. Variogram after applying PRISM for Vanuatu

5. 결론

본 연구에서는 아시아-태평양 지역에 신뢰성 높은 기후 자료를 제공하기 위해 위성영상 기반 고해상도 격자단위의 강수 자료를 사용자가 원하는 지역 및 포맷으로 제공하는 기후 관리 시스템을 개발하였다.

본 연구에서 개발한 기후 관리 시스템은 총 3가지의 위성자료(원시위성자료, 편의보정한 위성자료, 공간상세화한 위성자료)를 제공한다. 최종 위성자료의 공간해상도는 0.1° , 0.05° 이며, 시간해상도는 1 day이다. 한반도를 대상유역으로 선정하여 원시위성자료를 구축하고 편의보정 기법과 공간상세화 기법을 검증하였다. 한반도에서 검증한 기법을 바누아투에 적용하여 최종 위성자료를 생산하였다.

원시위성자료는 TRMM TMPA 3 시간 25 km의 시·공간 자료와 GPM IMERG 30분 10 km UTC자료를 1998년부터 2007년까지 한국시간 10 km 일강수자료로 구축하였다.

편의보정은 GRA-IDW, GRA-Kriging, QM 기법을 검토하여 본 연구에 적합한 알고리즘을 개발하고 이 중 최적의 결과를 보여주는 GRA-IDW 기법을 최종적으로 선정하였다. 공간상세화는 PRISM을 사용하여 수행하였다.

원시위성자료를 검증한 결과를 살펴보면 상관계수는 1998년부터 2017년까지 0.775로 비교적 정확도가 높게 나왔으며, TRMM TMPA, GPM IMERG 10 km 일강수량 상관계수값은 0.776, 0.753으로 크게 차이 나지 않았다. BIAS값은 원시위성자료 값이 지상관측자료보다 과대추정하는 것으로 나타났다. 모든 위성강우의 MAE, RMSE 값은 2.9490, 9.2840로 비교적 정확도가 높게 나왔다. MAE, RMSE값을 TRMM TMPA, GPM IMERG로 나누어서 보면 MAE가 3.0450, 2.5040, RMSE 9.5750, 7.7700로 GPM IMERG 자료가 TRMM TMPA보다 우수한 결과를 나타내었다. 이는 GPM 위성 센서의 시·공간해상도(30분, 10 km)가 TRMM TMPA(3시간, 25 km) 보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

편의보정 기법을 교차검증한 결과를 COR, RMSE를 기준으로 살펴보면 BC_SRE(IDW)와 BC_SRE(Kriging) 기법이 BC_SRE(QM) 기법보다 우수한 보정 결과를 보여주고 있다. MAE, NSE까지 검토한 결과 BC_SRE(IDW) 기법이 제일 우수한 보정 결과를 보여주

는 것으로 분석되어 최종적인 보정 기법을 BC_SRE(IDW)으로 선정하여 최종적으로 편의보정한 위성자료를 생산하였다.

공간상세화한 위성자료를 검증한 결과를 앞서 분석한 원시위성자료, 편의보정한 위성자료와 비교하면, 공간상세화를 수행하기 전보다 상관계수는 다소 작아지고, RMSE는 커지는 것으로 나타나 그 차이가 크지 않아 공간상세화한 위성자료를 응용분야에 직접 사용할 수 있을 것으로 분석된다.

본 연구를 통해 개발된 기법을 활용하면 미계측유역에 격자단위로 보정된 기후 관측자료를 제공할 수 있다. 또한 위성영상 기반 강수자료를 고해상도 격자화 자료 이외에 온도 자료를 위성, 재분석자료 및 관측자료를 블렌딩하여 고해상도 격자자료 생산이 추가될 수 있으며, 농업, 수자원 분야 활용을 위하여 위성기반 일사량, 최대온도, 최저온도를 격자화 하면 아시아-태평양 지역을 포함한 해외사업의 기초자료로, 이러한 기후정보 격자단위 자료상세화의 자료로 활용이 가능하다. 향후 본 연구에서 선정한 대상유역 이외에 기상관측소의 수가 희박하고 불균등하게 분포하고 있는 아시아-태평양 지역에 본 과업에서 개발한 시스템을 적용하여 신뢰성 있는 기후 자료를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

REFERENCES

- Baik, J.J., and Choi, M., 2016. Geospatial blending to improve spatial mapping of precipitation with high spatial resolution by merging satellite based and ground-based data. *Hydrological Processes* 30(6): 2789–2803.
- Cheema, M. J. M. and Bastiaanssen, W. G. M. 2012. Local calibration of remotely sensed rainfall from the TRMM satellite for different periods and spatial scales in the Indus Basin, *Int. J. Remote Sens.*, 33, 2603–2627, 2012
- Daly, C., Neilson, R.P., and Phillips, D.L. 1994. “A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain.” *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, No. 2, pp. 140–158.
- Dinku, Tufa, Paul Block, Jessica Sharoff, Kinfe Hailemariam, Daniel Osgood, John del Corral, Rémi Cousin and Madeleine C Thomson, 2014. Bridging critical gaps in climate services and applications in africa. *Earth Perspectives* 1:15.
- Duan, Z., and Bastiaanssen, WGM., 2013. First results from Version 7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure. *Remote Sensing of Environment* 131: 1–13.
- Hashino, T., Bradley, A. A., and Schwartz, S. S. 2007. Evaluation of bias-correction methods for ensemble streamflow volume forecasts, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 939–950, <https://doi.org/10.5194/hess-11-939-2007>
- Hsu, H. V. Gupta, X. Gao, and S. Sorooshian, 1999. Estimation of physical variables from multichannel remotely sensed imagery using a neural network: Application to rainfall estimation. *Water Resour. Res.*, 35, 1605–1618, doi:10.1029/1999WR900032.
- Hsu, K., X. Gao, S. Sorooshian, and H. V. Gupta, 1997. Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 36, 1176–1190, doi:10.1175/1520-0450(1997)036<1176:O.CO>2.0.CO;2.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, D.B. Wolff, 2007. The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. *J. Hydrometeorol.*, 8, 38–55
- Huffman, G.J., D.T. Bolvin, D. Braithwaite, K. Hsu, R. Joyce, P. Xie, 2014. GPM Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4.4. PPS, NASA/GSFC, 30 pp. <http://pmm.nasa.gov/sites/default/>

- files/document_files/IMERG_ATBD_V4.4.pdf
- Jia, S., Zhu, W., Lü, A., and Yan, T. 2011. "A statistical spatial downscaling algorithm of TRMM precipitation based on NDVI and DEM in the Qaidam Basin of China." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 12, pp. 3069–3079.
- Karl, T.R., N. Nicholls, and A. Ghazi, 1999: CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. *Climatic Change*, 42, 3–7.
- Laurent, L., Audois, P., Marie-Joseph, I., Becker, M., Seyler, F., 2013. Calibration of TRMM 3B42 with geographical differential analysis over North Amazonia. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) 2013 IEEE International*: 2234–2237.
- Peterson, T.C., and Coauthors: Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998–2001. WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, Geneva, Switzerland, 143pp.
- Sorooshian, S., K.-L. Hsu, X. Gao, H. V. Gupta, B. Imam, and D. Braithwaite, 2000. Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2035– 2046, doi:10.1175/1520-0477(2000)0812.3.CO;2.
- WMO, 1994. Guide to Hydrological Practices, Report, WMO WorldClim, 2018, <http://www.worldclim.org/bioclim>.
- Xue, Xianwu, Yang Hong, Ashutosh S. Limaye, Jonathan J. Gourley, George J. Huffman, Sadiq Ibrahim Khan, Chhimi Dorji, Sheng Chen, 2013. Statistical and hydrological evaluation of TRMM-based Multi-satellite Precipitation Analysis over the Wangchu Basin of Bhutan: Are the latest satellite precipitation products 3B42V7 ready for use in ungauged basins?. *Journal of Hydrology* 499: 91–99.

【연구자】

박경원 선임연구원

박지훈 선임연구원

정임국 연구원

조원일 연구원

연구보고서 2018-14

미계축유역 대상 위성영상 기반 기후 자료 관리 시스템 개발

I S B N 979-11-5698-246-3

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

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.