

# 다중범위 기후정보를 활용한 태국의 농업-수자원 리스크 평가 (I)

정유란 응용사업팀, 명복순 기후예측팀

오지현 기후연구팀, 이진영 사업기획팀

조재필, 박경원 응용사업팀

## 발간사

4차 산업혁명 시대를 맞이하기 위한 새로운 차원의 콘텐츠 개발과 기술의 상용화가 산업계, 학계 등 많은 분야에서 매우 빠른 속도로 전개되었습니다. 자율주행 자동차나 농업 트랙터, 알파고에서부터 인공지능 제초 로봇과 의사 왓슨, 빅데이터-클라우드 기반의 작물생육 관리서비스 기술개발 등 정보통신 과학기술과 결합된 융복합 산업이 빠르게 성장하고 있습니다. 그리고 그 중심에는 융합이 있습니다. 이와 같이 4차 산업혁명을 위한 융합 산업 및 융합 연구의 개발 및 성장이 요구되고 있는 가운데, 본 센터는 기후정보와 기후예측기술 및 응용분야 융합 연구 사업의 선구적인 위치에 있어 왔습니다.

본 연구보고서 “다중범위 기후정보를 활용한 태국의 농업-수자원 리스크 평가”는 기상학, 수문기후학, 통계학, 원격탐사, 수문 및 농학 등 5개 이상의 학제간 융합 연구를 통해 관측기후에서부터 계절예측기후 및 미래 기후변화 전망까지 다양한 시간 규모의 기후 변동성과 기후변화 정보를 가뭄예측, 수자원 및 농업생산성 예측, 활용 및 평가 기술 개발에 적용하고 이상기후 리스크를 분석 및 평가함으로써, 관련 연구자뿐만 아니라 실무자 및 관리자에게 이상기후 리스크에 대한 의사결정 및 정책 제안에 필요한 정보를 제공하고자 하는 목적에서 수행되었습니다. 특히 본 연구는 연구노트를 통해, 5개 이상의 학제가 융합된 연구를 수행하면서 어려웠던 점 및 문제 해결 방안 등을 제시하고 분야간 원활한 소통과 짜임새 있는 연구 활동을 통해 완성해 낸 결과라는 점에서 더욱 의의를 갖습니다.

본 연구보고서가 발간되기까지는 많은 분들의 도움이 있었습니다. 무엇보다도

연구의 기획 단계에서 아낌없는 조언과 격려를 해 주신 한국농어촌공사 박태선 국제협력센터장과 현지 연구 지역의 정보를 제공해 준 김경목 과장, 연구의 질적 향상을 위해 자문해 주신 부산대학교 강정은 교수에게도 깊은 감사를 표하는 바입니다. 또한 보고서의 수준을 제고하도록 좋은 논평을 해 주신 익명의 검토자들과 태국 협력기관과 연구가 순조롭게 진행될 수 있도록 다방면으로 도와준 대외협력실의 Christianne Miko Aikins 사원, 그리고 본 연구보고서를 총괄 집필한 본원의 정유란 박사와 명복순 박사, 오지현 박사, 이진영 박사, 조재필 박사, 박경원 박사에게도 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구보고서가 밑거름이 되어 향후 관련 융합 연구들이 지속되고 부족한 부분들을 계속 채워나가길 바랍니다.

2018년 3월  
APEC 기후센터  
원장 정 홍 상

## ABSTRACT

본 연구의 목적은 APCC에서 생산된 다양한 시간 규모(주, 월, 계절, 기후변화)의 최신 기후 예측정보를 상세화하여 태국 북동부 랍타콩 소유역의 가뭄 및 수자원, 작물 생산성의 예측력 향상을 평가하고, 이를 바탕으로 다양한 시간 규모에 적합한 가뭄 리스크 평가 및 관리 프레임워크를 개발하는 것이다.

여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation; BSISO)이 태국 연강수량의 경년 변동성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 우기 시작일과 밀접한 관계가 있음이 증명되었다. 또한 다중 모델을 활용하여 우기 시작을 4주 전에 예측할 수 있는 가능성을 보였는데, APCC에서 현재 실시간으로 제공하고 있는 다중모델 기반 BSISO 지수(특히 BSISO 1의 위상 5, BSISO 2의 위상 4) 예측 정보를 태국의 우기 시작일 예측에 활용할 수 있을 것으로 보인다. 태국의 몬순 시작일, 북동부 지역의 4월 또는 5월 강수량, 6월의 가뭄지수 등이 ENSO(El Niño-Southern Oscillation) 및 관련 기후인자들(예, NINO3.4, Pacific Decadal Oscillation, Southern Oscillation Index, Indian Ocean Basin Wide, Western NINO, Tropical North Pacific 등)과 밀접한 관계를 보인는데, 이러한 인자들은 주로 필리핀 주변의 고기압성 흐름에 영향을 끼침으로 인해 태국의 강수량에 영향을 준다. 그러나 태국에서 7, 8월에 ENSO 관련 인자들의 연관성이 현저히 줄어들었는데 주변의 해양, 대륙의 영향과 함께 태풍의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 보인다. 또한 6월 강수량과 우기 시작일을 예측하는 회귀 모형(해수면 온도 기반)을 개발하였는데, 6월 강수량의 경우 해양의 영향이 급격히 감소하는 시기이기 때문에 좋은 성능을 보이지는 못했지만, 우기 시작일 예측 회귀모형은 BSISO 지수 예

측 기반의 우기 시작일 예측에 참고 자료로 이용될 수 있는 가능성이 보였다.

기후분야에서 생산 제공되는 기후정보들은 농업 및 수자원 등의 응용분야에서 활용하기 위해서는 기후 정보들에 대한 시공간적인 상세화 절차가 필요하다. 본 연구에서는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 계절내 예측 정보는 공간 상세화가, APCC의 11개 개별 예측모형 자료들과 기후변화 시나리오 자료로서 29개 GCMs(Global Climate Models) 자료에는 시공간 상세화가 필요하여 통계적 방법(예, Simple Bias Correction or Non-parametric Quantile Mapping 등)이 적용되었다. 관측소별로 편의보정된 계절내 예측 상세화 자료의 예측성은 ECMWF 자료의 특성상 예측 자료별로 개별 관측소에 대하여 평가되었다. 기온은 강수보다 좋은 예측성을 보였고 주단위로 고려된 선행예측기간이 증가됨에 따라서 예측성이 감소하는 전형적인 결과를 보였다. 계절예측 자료의 상세화는 예측성 향상을 목적으로 4가지(Moving Window Regression, MWR; Simple Bias Correction, SBC; Climate Index Regression, CIR; Observation-based Moving Window Regression, MWR-Obs)을 적용했다. 강수량의 경우 통계적인 방법인 MWR 방법에 의한 예측인자가 다수 선정된 반면, 기온의 경우에는 역학적 모형 기반 편의보정이 고려된 SBC 방법에 의한 예측성이 높게 나타났다. 전체적으로 관측기반의 통계적 방법인 CIR 및 MWR-Obs 방법의 경우에는 예측인자가 하나도 선정되지 않았다. 강수의 경우 3월 및 6월의 경우 모든 선행예측기간에 대해 선정된 예측모형이 없는 것으로 나타났다. 상세 기후변화 시나리오 자료의 예측성은 극한기후지수의 재현성 평가 및 MME 산정을 위한 가중치 결정, GCM 개수 등에 따른 불확실성 범위 등으로 평가했다.

가뭄감시를 위해 대상지역의 두 관측지점의 관측자료 및 위성강우로부터 유효가뭄지수(Effective Drought Index, EDI)를 산정, 대상지역에 있는 댐의 과거 시공간적인 가뭄 사상(예, 저수량 등)과 비교한 결과, 두 관측지점의 EDI가 댐의 과거

가뭄 사상을 비교적 잘 반영하고 있음을 확인하였다. 가뭄예측은 기계학습 기반의 미계측 지역에 대한 Standardized Precipitation Index(SPI) 예측과 계절예측 기반의 EDI 예측의 두 방법론으로 수행되었다. 기계학습 기반의 미계측 지역 가뭄 예측의 경우 SPI3를 목표변수로, 편의보정된 기후모델을 사용한 경우와 기계학습 모델인 극랜덤트리(ERT), 아다부스트(Adaboost)를 적용한 경우의 성능을 비교하였는데, 가뭄 정확도에 있어 10월에 대해 편의보정된 기후모델을 이용한 경우만이 유의미한 결과를 생산하였고, 특히 S2S 예측 자료가 예측선행시간 1개월에서 매우 높은 정확도를 보였다. 가뭄 카테고리의 평균절대오차(MAE)에서 6월 SPI3 예측의 경우 선행예측기간 1-2개월에서 편의보정된 기후모델들이 더 우수한 결과를 보였으며 예측선행시간 3개월의 경우에는 ERT 모델의 성능이 우수하였다. 그러나 10월 SPI3 예측의 경우에는 편의보정된 기후모델이 선행예측기간 1-3개월에서 더 작은 오차를 보여, 10월 SPI3 예측에서 계절내 예측 정보가 가뭄예측에 있어서 유용하게 쓰일 수 있는 가능성을 보였다. 이는 기계학습 모델과 계절내 예측 자료의 활용, 그리고 적절한 기후모델의 조합을 통해 대상 지역의 가뭄 예측력을 높일 수 있음을 시사한다. 또한 기후변화에 의한 가뭄영향을 평가하였는데, 가뭄 지속기간(duration)의 경우 짧은 지속기간을 갖는 가뭄이 미래에 발생 빈도가 증가하는 경향을 보였으며, 가뭄심도(intensity)는 기후변화 시나리오의 과거기간(Historical)과 비교하여 보통 가뭄의 경우 빈도가 감소하는 경향을 보였으나 극심한 가뭄의 경우는 발생 빈도가 증가하는 경향을 보였다.

수문 모델링은 월단위 댐 유입량 관측자료를 이용하여 SWAT 모형을 보정한 후 관측자료를 이용하여 모의된 장기 유입량을 관측 유입량으로 설정하고 계절예측 자료로부터 모의된 유입량을 비교함으로써 SWAT 모델링의 불확실성을 제거한 후 계절예측 자료의 활용성을 평가하였다. SWAT 모형은 관측  $R^2$ 가 0.8 이상으로 유입량을 잘 재현하였다. 농업 모델링에서는 상세화된 계절내예측 및 계절예측 기후 정보 혹은 두 개의 다른 계절규모 예측 기후정보가 결합된 예측 기후정보로부터

태국의 기후변화에 따른 벼 잠재수량의 변화를 작물모형(CERES-Rice)으로부터 평가했다. 주요 재배기간인 5월부터 10월, 특히 2015년의 5월부터 10월 동안 상세화된 계절예측 기온과 강수 정보에 따른 벼의 잠재수량의 예측력을 평가한 결과, 선행예측기간이 짧아질수록(예, 6개월에서 1개월) 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과 높은 상관관을 보였고 그 경향도 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 선행예측 시점이 5월인 ECMWF의 상세 예측 강수와 선행예측기간별 계절예측 강수를 결합한 예측 기후정보에 따라 벼 잠재수량의 예측성을 평가한 결과, 계절예측 정보에 의한 것보다 예측성이 좋지 않은 것으로 나타났는데, 상세 ECMWF와 계절예측 기후 정보에 대한 주요 시기별 비교 및 분석이 필요할 뿐만 아니라 이 두 정보의 적절한 결합 방법 개발이 필요하다. 또한 우기가 지연될 경우 파종시기 이동에 따른 벼 잠재수량의 상대적 변화가 큰 것으로 나타났는데, 앞서 기후분야에서 언급되었듯이 BSISO 지수와 ENSO 관련 지수를 이용한 우기 시작일 예측 모형으로부터 우기 시작일 예측 정보가 생산되면 작물모형(CERES-Rice)을 구동하여 적정 수준의 벼 잠재수량 확보가 가능한 파종시기 등에 대한 정보 생산이 가능할 것으로 보이며, 이로부터 파종시기 이동 등에 대한 의사결정 정보 제공이 가능할 것으로 예상된다.

APCC에서 생산된 다양한 시간 규모의 최신 기후 정보(BSISO, 계절예측)를 다양한 응용분야의 기술(상세화, 가뭄예측 및 농업-수자원 모델링)과 결합하여 활용했을 때 태국의 가뭄 및 수자원, 벼 생산성 예측력을 향상시킬 수 있었으며, 가뭄 리스크 평가 및 관리를 위한 의사결정 정보 생산이 가능함을 확인했다. 이와 같이 분야별 전문 지식과 기술의 융합을 바탕으로 실질적인 태국의 농업-수자원 가뭄 리스크 평가 및 관리 프레임워크 개발이 가능할 것으로 판단된다.

# 목 차

1. 서언	1
2. 자료	3
2.1 대상 구역	3
2.2 자료 목록	3
2.2.1 전국 자료	3
2.2.2 지역 자료	5
2.2.3 연구에서 적용 혹은 사용한 응용 모형	6
3. 방법	8
3.1 계절내/계절예측 기후정보	9
3.1.1 계절내 기후 자료 데이터베이스화 및 활용	9
3.1.2 여름철 계절내 진동 영향 분석	9
3.1.3 계절 및 몬순 변동성과 주요 인자	10
3.2 상세화 방법	10
3.2.1 계절내예측 기후자료의 상세화	10
3.2.2 계절예측 기후자료의 상세화	11
3.2.3 미래 기후변화 시나리오의 상세화	13

3.3 가뭄감시, 예측 및 기후변화 영향평가-----	15
3.3.1 가뭄 메커니즘 분석-----	15
3.3.2 가뭄감시를 위한 위성강우 자료 전처리-----	15
3.3.2.1 자료 수집-----	15
3.3.2.2 PERSIAN- CDR 자료 전처리-----	16
3.3.2.3 GPM IMERG 자료 전처리-----	17
3.3.3 기계학습 기반 미계측 지역 가뭄예측을 위한 자료 전처리-----	19
3.3.3.1 관측 기상 자료-----	19
3.3.3.2 지표면 온도 자료-----	19
3.3.3.3 식생지수 자료-----	20
3.3.3.4 위성 강우 자료-----	20
3.3.3.5 예측기후 자료-----	20
3.3.3.6 대규모 기후 지수자료의 전처리-----	21
3.3.3.7 기타 보조 자료의 전처리-----	21
3.3.4 기후정보 활용을 위한 EDI 연계 모듈 개발-----	21
3.3.5 관측 및 위성강우 기반 가뭄감시-----	22
3.3.5.1 EDI 산정-----	22
3.3.6 기계학습 기반 미계측 지역 가뭄예측-----	28
3.3.6.1 기계학습 모델-----	28
3.3.6.2 기계학습 모델의 성능 비교-----	29
3.3.7 계절예측 기반 가뭄예측-----	30
3.3.8 기후변화에 따른 가뭄영향 평가-----	32
3.4 수자원 및 농업 모델링-----	33
3.4.1 수자원 모델링-----	33
3.4.1.1 담유입량 모의를 위한 관측자료 수집 및 Global 데이터베이스 구축-----	33
3.4.1.2 기후정보 활용 SWAT 연계 모듈 개발-----	36

3.4.1.3 계절예측 자료를 이용한 댐유입량 평가-----	37
3.4.2 농업 모델링-----	38
3.4.2.1 대상 작물 및 벼 생육모형 선정-----	38
3.4.2.2 벼 생육모형 시뮬레이션을 위한 입력 데이터베이스 수집-----	39
3.4.2.3 관측 기후 기반의 벼 생육모형 시뮬레이션-----	42
3.4.2.4 상세화된 계절내 및 계절예측 기반의 벼 생육모형 시뮬레이션-----	43
<b>4. 결과 및 고찰-----</b>	<b>46</b>
4.1 기후정보-----	46
4.1.1 태국의 기후-----	46
4.1.2 계절내 강우 특성-----	47
4.1.3 BSISO 지수 기반 태국 우기 시작 예측-----	53
4.1.4 ECMWF 계절내 예측 검증-----	64
4.1.5 강수량 및 가뭄지수의 계절 변동성에 영향을 미치는 주요 기후인자-----	67
4.1.6 ENSO와 태국 강수량 변동성-----	71
4.1.7 계절 정보를 활용한 문순 시작일 예측 모델-----	75
4.1.8 계절예측 기후정보를 활용한 6월 강수량 예측 모델-----	77
4.2 다중범위 기후정보 상세화-----	80
4.2.1 ECMWF(S2S) 상세화-----	80
4.2.2 계절예측 자료의 상세화-----	83
4.2.3 기후변화 시나리오 상세화-----	91
4.2.3.1 원시 GCM 평가를 통한 Worst GCM 제거-----	91
4.2.3.2 극한기후변화지수의 과거재현성 및 미래예측도 평가-----	92
4.2.3.3 공간 재현성 평가-----	94

4.2.3.4 GCM별 가중치 결정 및 MME 계산-----	95
4.2.3.5 GCM 개수에 따른 불확실성 범위 평가-----	96
4.3 가뭄감시, 예측 및 기후변화 영향평가-----	98
4.3.1 관측자료 기반 EDI를 이용한 가뭄 감시-----	98
4.3.2 위성강우 기반 EDI를 이용한 가뭄감시-----	101
4.3.3 기계학습 기반 미계측 지역 SPI 가뭄예측-----	105
4.3.3.1 기후예측 모델 성능 비교-----	105
4.3.3.2 기계학습 모델 매개변수 최적화 및 우수 모델 선정-----	108
4.3.3.3 최종 평가-----	109
4.3.4 계절예측 기반 가뭄예측-----	112
4.3.5 가뭄발생에 대한 기후변화 영향 평가-----	114
4.4 수자원 및 농업모델링-----	116
4.4.1 기후정보를 활용한 수문 모델링-----	116
4.4.1.1 관측 기후자료 기반의 댐 유입량-----	116
4.4.1.2 예측자료 기반의 댐 유입량 평가-----	117
4.4.2 농업 모델링-----	117
4.4.2.1 벼 생육모형 입력자료 구축-----	117
4.4.2.2 관측 기후 기반의 벼 잠재수량 반응-----	119
4.4.2.3 상세화된 계절예측 기후 정보를 활용한 벼 잠재수량 예측-----	121
4.4.2.4 상세화된 계절내예측 기후 정보를 활용한 벼 잠재수량 예측-----	127
4.5 기후 및 가뭄예측 정보와 응용 분야의 융합-----	130
4.5.1 개요-----	130
4.5.2 몬순예측 정보 기반의 벼 파종시기 예측-----	132

5. 결론 및 향후 계획-----	134
5.1 계절내예측 기후정보의 활용-----	134
5.2 계절예측 기후정보의 활용-----	134
5.3 상세화 방법의 개선-----	135
5.4 예측 기후정보의 가뭄예측에 활용-----	136
5.5 예측 기후정보의 댐 유입량 및 저수율 예측성 및 수문모형에 활용-----	137
5.6 예측 기후정보의 작물 잠재수량 예측성 및 농업모형에 활용-----	137
<b>Ⅰ 종합 결론-----</b>	<b>140</b>
<b>Ⅰ REFERENCES-----</b>	<b>141</b>
<b>Ⅰ 부록: 연구노트-----</b>	<b>144</b>

## 1. 서언

2012년 융합연구를 시작한 이후, APCC는 기후정보가 응용분야에서 폭넓게 활용될 수 있도록 상세화 기법과 가뭄 예측 기술을 개발해 왔다. 이렇게 개발된 상세화 기법을 사용자에게 제공하는 서비스화를 진행함과 동시에, 과학적 근거를 통해 도출된 불확실성을 비롯하여 기후예측을 기반한 다양한 정보가 리스크 관리를 위한 의사결정에 어떻게 활용될 수 있는지에 대한 연구 수행이 필요하다.

태국은 쌀 생산 1위 국가로서 이모작이 가능하며, 몬순 기간(5월-10월)의 강수량을 다목적 댐 및 저수지에 저장하여 건기(11월-4월)에 생활·공업·농업등의 용수를 공급하고 있다. 그러나 2011년 몬순 기간의 홍수, 2012-2013 건기의 물 부족, 특히 2014-2015년 심각한 가뭄을 겪은 바 있다. 홍수 및 물 부족에 의한 쌀 생산성 감소는 농가 수익의 감소로 이어졌고, 쌀이 아닌 다른 작물로의 전환 등 영농활동 및 농업환경에 적지 않은 변화가 빈번해졌다. 따라서 이수 및 치수 목적의 리스크 관리를 위한 의사결정에 예측자료 활용의 중요성이 높아졌다.

선행 연구에 따르면 여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)이 태국의 강수량에 많은 영향을 미치며(Kripalani et al., 1995), APCC 다중모델 앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)의 계절 예측성이 태국을 포함한 열대 지역에서 중위도 지역에 비해 더 높게 나타나기 때문에(Min et al., 2017), 이러한 기후 정보의 예측/생산 기술이 리스크 관리에 효과적으로 쓰일 수 있을 것으로 보인다.

특히 수자원과 농업분야에서 계절내 기후 예측 정보의 활용이 중요시되고 있지만(White et al., 2017), 아직까지 그 활용 사례가 극히 드문 가운데, 이러한 계절내 예측 정보와 계절 예측정보가 적절히 융합되면 농업-수자원의 예측성을 높일 가능성이 있다. 따라서 태국에 대한 APCC의 기후 예측 기술 및 정보를 활용하여 태국의 수자원 및 농업 환경변화에 대한 리스크 평가, 영농정책 및 의사결정에 반영 가능성을 제시할 필요가 있다.

본 연구의 궁극적인 목적은 기상학, 농업-수문학, 수문기후학, 지리정보학, 통계학의 긴밀한 학제간 융합 연구를 통해 다양한 시간 규모의 기후 변동성과 기후변화로 정의될 수 있는 다중범위 기후정보를 활용하여 태국의 수자원 및 농업에서 가뭄 리스크에 대한

의사결정에 활용할 수 있는 가뭄 리스크 관리 프레임워크(risk management framework)를 개발하는 것인데, 리스크 관리 프레임워크 개발을 위해 먼저 가뭄 리스크 평가(risk assessment)가 선행되어야 한다.

본 연구 사업의 1차년에는 APCC에서 이미 개발된 상세화 기법과 기후 예측기술을 통해서 생산 및 상세화된 예측 기후정보를 가뭄예측, 수자원 및 농업 모형에 적용하여 태국의 다양한 시간 규모의 기후변화(예, 계절내 기후에서부터 미래 기후변화까지)에 따른 가뭄, 수자원 및 작물 생산 예측력을 평가하는 것으로 1차년의 연구 내용은 다음과 같다.

센터의 BSISO 예측 기술과 계절 예측 기후정보로부터 태국 각 지역의 강수에 미치는 영향과 메커니즘 및 관련 주요 인자들을 파악함으로써 우기 시작일 예측 정보와 가뭄 영향 인자 정보 등을 응용분야에서 활용할 수 있도록 전달한다. 또한 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 계절내 예측 자료와 APCC의 계절 예측 자료를 센터에서 예측성 향상을 위해 개발한 상세화 방법들(예, Simple Bias Correction, SBC; Moving Window Regression; MWR 등)에 의해 수문 및 농업모형에서 활용할 수 있는 시공간 규모로 상세화하고, 상세화된 예측 기후자료의 데이터베이스 체계를 구축한다.

이와 같이 상세화 및 구축된 계절내 및 계절예측 기후자료를 수문모형(예, SWAT 등) 혹은 작물모형(예, CERES-Rice 등)에 적용하여 농업 용수 예측, 혹은 벼 잠재수량 예측을 얼마나 향상시켰으며, 이러한 계절내 및 계절예측 기후자료를 응용하여 적정한 또는 그 이상의 벼 생산성을 가져올 수 있는 영농활동(예, 우기 시작 예측 정보가 주어졌을 때 파종시기 이동 혹은 관개일정 조정 등)을 제안하는 등의 의사결정 지원에 활용할 수 있는 지에 대한 활용 가능성과 그 신뢰 수준을 평가한다. 또한 위성자료와 지상관측 자료를 이용하여 가뭄 모니터링 가능성을 평가하고, 가뭄예측 모형에 계절내 및 계절예측 기후정보를 적용해서 가뭄예측 정보가 얼마나 향상되었는지와 역시 그 활용 가능성에 대해 진단한다. 또한 상세 미래 기후변화 시나리오 자료로부터 미래 가뭄발생 빈도(frequency) 및 기간(duration), 심도(intensity) 등에 대해 전망한다.

## 2. 자료

### 2.1 대상 구역

람타콩(Lam Takhong) 소유역은 태국의 북동부 지역에서 매남문 중권역(Mae Nam Mun basin)에 위치한 곳으로 상류 지역에는 람타콩 댐을 가지고 있는 독립적인 소유역이다(그림 2.1A). 람타콩 소유역에서 주요 재배작물은 벼이며 대부분이 천수답이다. 전체 농업 지역(115,195 ha)의 17-18%(26,707 ha)가 람타콩 댐으로부터 관개 가능하다. 또한 람타콩 소유역에는 태국 기상청의 기상관측소 1개가 있는데, 이 관측소(Nakhonrachasima station, TH431201)는 관개 지역의 하류에 위치해 있다(그림 2.1B).

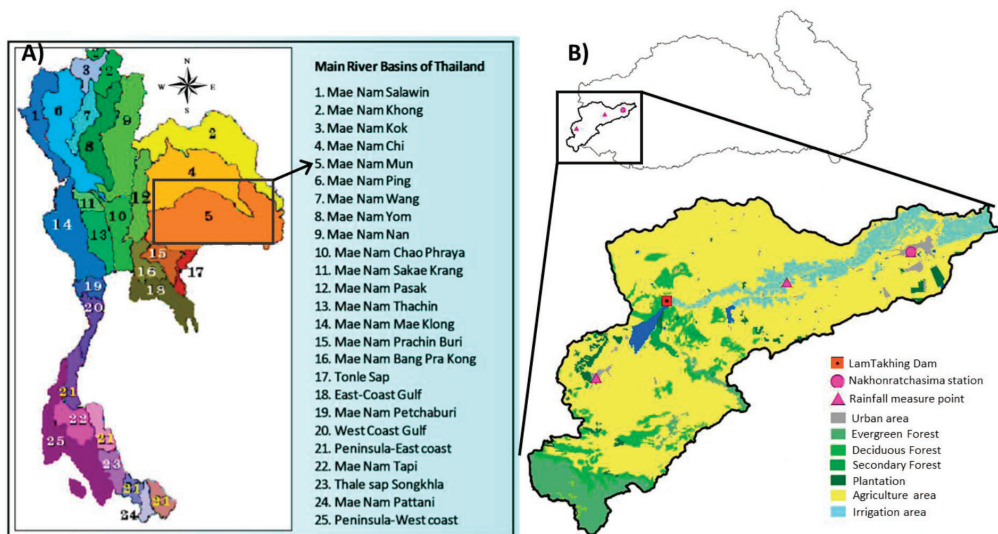


그림 2.1. 대상 구역의 지리적 위치와 지표 이용도 및 대상 구역에 포함된 2개(Nakhonrachasima and PakChong Agromet)의 기상 관측 지점.

### 2.2 자료 목록

#### 2.2.1 전구 자료

전구 자료의 대부분은 공개된 것으로 수집이 용이하다. 수집된 전구 예측 기후변수는

4 | 다중범위 기후정보를 활용한 태국의 농업-수자원 리스크 평가 (I)

온도, 바람, 강수, 일사량, 상대습도, 해수면 온도, 상향장파복사 등이며, 그외 위성으로 부터 수집될 수 있는 토양수분, 운량(구름) 및 일조시간, 식생지수, 증발산 등이 있다(표 2.1). 또한 이들 전구 자료의 공간 해상도는 최소 0.25° x 0.25° 에서 최대 1° x 1° 까지로 비교적 저해상도이다.

표 2.1. 본 연구에서 사용한 전구 자료의 종류와 출처 정보

Variables	Data Source			
	Satellite	Station	Reanal./Assimil.	Climate Model
Temperature	MODIS	GHCN, ISD	NCEP/NCAR R2 NCEP CFSR APHRODITE	ECMWF S2S forecast APCC seasonal forecast
Wind			NCEP/NCAR R2 NCEP CFSR	ECMWF S2S forecast APCC seasonal forecast
Precipitation	TRMM, GPM	GHCN, ISD	NCEP/NCAR R2 APHRODITE	ECMWF S2S forecast APCC seasonal forecast
Geopotential Height Sea-level pressure			NCEP/NCAR R2 NCEP CFSR	ECMWF S2S forecast APCC seasonal forecast
Solar Radiation			NCEP/NCAR R2 NCEP CFSR	ECMWF
Relative Humidity			NCEP/NCAR R2 NCEP CFSR	ECMWF
Soil moisture	AMSR-E, AMSR2, SMOS, SMAP			
Cloud fraction or sunshine duration	MODIS			
Vegetation indices (NDVI, EVI)	MODIS			
Evapotranspiration	MODIS ET (Mu <i>et al.</i> , 2007; Mu <i>et al.</i> , 2011), BESS ET (Jiang <i>et al.</i> , 2016)			
Sea surface temperature			NOAA Extended Version 4	
Outgoing Longwave Radiation			NOAA monthly interpolated	

### 2.2.2 지역 자료

본 연구에서 지역 자료란 연구 대상 지역에서 수집되는 자료들로서 국지적이고 지역적인 특성을 가지는 자료들로서, 대부분 응용분야의 모델링에서 필요한 입력자료들이다(표 2.2). 관측 저수율, 관측 유량, 관측 관개량 등은 수문모형에서 필요한 자료들이며 작물 재배환경 정보(예, 시비일정 및 시비량, 관개일정 및 관개량, 파종시기 등), 관측 생물계절 정보(예, 개화시기, 성숙시기 등), 관측 수량 등은 농업모형의 필수 입력정보들이다. 그외 대상 지역의 고도 및 토양, 토지이용 정보 등이 필요하다. 또한 대상 지역에 분포한 국지기상 관측자료는 매우 중요한 필수 요소인데, 랍타콩 소유역을 포함하는 북동부 지역의 22개 관측소의 기상자료를 태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)으로부터 수집했다(표 2.3).

표 2.2. 응용분야 모형의 입력정보로서 본 연구에서 수집한 자료

Variables	Data Source	The case of no cooperation from local partner
Water Lever-Surface Area-Volume Table	RID	수문모형 변경
Daily water lever for each reservoir	RID	
Irrigation water amount for each irrigation districts, Inflow streamflow into reservoirs, Outflow from reservoir	RID	
Detailed DEM, soil, and land use maps for Thailand	RID	Global 자료 활용
Typical agricultural management (including irrigation water amount)	RID, DOA, MOAC	References (case study data)
Crop cultivar	RID, DOA, MOAC	References
Observed phenological information	RID, DOA, MOAC	References (case study data), FAO
Observed yield data	RID, DOA, MOAC, Agricultural Census of Thailand	FAO

표 2.3. 태국 북동부 지역의 TMD의 22개 기상 관측소의 지리학적 정보와 관측소 이름과 번호 정보

Station ID	Station name	Longitude	Latitude
TH352201	Nong Khai	102.73	17.87
TH353201	Loei	101.73	17.45
TH353301	Loei Agromet	101.73	17.40
TH354201	Udon Thani	102.80	17.38
TH356201	Sakon Nakhon	104.13	17.15
TH356301	Sakon Nakhon Agromet	104.06	17.13
TH357201	Nakhon Phanom	104.78	17.41
TH381201	Khon Kaen	102.79	16.46
TH381301	Tha Phra Agromet	102.82	16.33
TH383201	Mukdahan	104.73	16.54
TH387401	Kosum Phisai	103.07	16.25
TH403201	Chaiyaphum	102.03	15.80
TH405201	Roi Et	103.74	16.02
TH407301	Ubon Ratchathani Agromet	104.87	15.25
TH407501	Ubon Ratchathani	105.02	15.24
TH431201	Nakhon Ratchasima*	102.09	14.97
TH431301	Pak Chong Agromet#	101.33	14.64
TH431401	Chok Chai	102.17	14.72
TH432201	Surin	103.50	14.88
TH432301	Surin Agromet	103.45	14.88
TH432401	Tha Tum	103.68	15.32
TH436401	Nang Rong	102.80	14.58

\*: 램타콩(Lam Takhong) 댐 하류 관개지역에 위치한 TMD의 기상관측소로 본 연구에서 CERES-Rice 시뮬레이션 주요 기상관측지점임.

#: CERES-Rice 시뮬레이션 주요 기상관측지점은 아니지만, 램타콩 소유역 주변에서 TMD의 유일한 농업기상관측소임.

### 2.2.3 연구에서 적용 혹은 사용한 응용 모형

상류 유입량 이외 필요수량, 저수지 등을 고려할 수 있는 유역모형(Soil and Water Assesment Tool, SWAT)과 상류 유입량 산정모형(GR-4J) 등 수문 모델링에 필요한 모형들을 선정했다. 또한 가뭄 모델링을 위한 가뭄지수 예측모형들도 선정했다(표 2.4). 농업 모델링을 위한 모형으로는 전 세계적으로 가장 많은 사용자를 가지고 있고 연구 사례들이 많은 모형 위주로 선별했다. 또한 시공간적으로 해상도가 다른 예측 기후정보를 응용모형에 입력하기 위해서는 상세화가 필요한데 이미 여러 가지 상세화 모듈이 내

장된 APCC의 상세화 플랫폼이 이용되었다.

표 2.4. 본 연구에서 활용한 응용분야 모형 정보

Name	Description	Note
SWAT	상류유입량, 필요수량, 저수지 고려할 수 있는 유역모형으로서 전 세계적인 적용사례가 많아 향후 지역적 확장성이 좋음. 단점은 논에 대한 기작이 부족하며 저수율 모의가 잘 안됨	<a href="http://swat.tamu.edu/">http://swat.tamu.edu/</a>
GR-4J	상류유입량 산정을 위한 모형	<a href="http://hydromad.catchment.org/">http://hydromad.catchment.org/</a>
Decision Tree, Random Forest, Extremely Randomized Trees, Artificial Neural Networks, etc.	기름자수 예측을 위한 모형	
DSSAT package 4.6	가장 많은 사용자를 가진 작물모형으로 이 모형에는 동남아시아 쌀 품종에 대한 유전정보가 대부분 내장되어 있어 생물리학적 반응에 대한 신뢰도를 인정하고 사용이 가능할 것으로 판단됨.	Rice: CERES-Rice Others (i.e., Rainfed crop): CROPGRO
APSIM package	두 번째로 많은 사용자를 가진 작물모형으로 DSSAT 모의 결과와 비교/보완할 수 있음.	Rice: APSIM-Rice Others: APSIM-crop name
AIMS	계절예측 및 기후변화 시나리오 상세화를 위한 Stand-alone 플랫폼	APCC 프로젝트로 개발 예정 (개발이 늦어지는 경우 기개발된 R기반 Prototype 활용)

### 3. 방법

본 연구의 1차년도에는 기후 변동성에 따른 수자원 및 농업 분야에 미치는 영향을 가뭄 중심으로 평가하고, 2차년도에는 가뭄 리스크를 평가 프레임워크(risk assessment framework)를 구성하고 지표(potential indicators)를 개발하는 것에 중점을 두었다. 참여 연구원들의 학제간 전문성을 바탕으로 3개의 항목으로 구성되었는데, 첫 번째는 다양한 시간 규모(seamless)의 기후 변동성 분석과 예측성 평가이며, 두 번째는 가뭄과 수자원 및 농업분야의 영향 예측과 평가, 마지막으로 앞의 세 정보의 통합 활용을 통한 가뭄 리스크 평가 및 의사결정 지원 프레임워크 개발 및 적용의 내용으로 구성된다(그림 3.1).

3절에서는 대상 지역에 대한 다양한 시공간 범위의 예측 기후자료를 수집하고 기후 변동성 및 예측성 평가를 위한 자료 처리 및 상세화 방법, 데이터베이스 체계 구축에 대해 언급할 것이다. 또한 대상 지역 및 지점의 상세화된 계절내 및 계절예측 기후변화 정보에 따른 가뭄, 수자원 및 농업분야의 영향 예측과 평가를 위한 모형 시뮬레이션의 입력자료들의 작성에 대해 언급할 것이다.

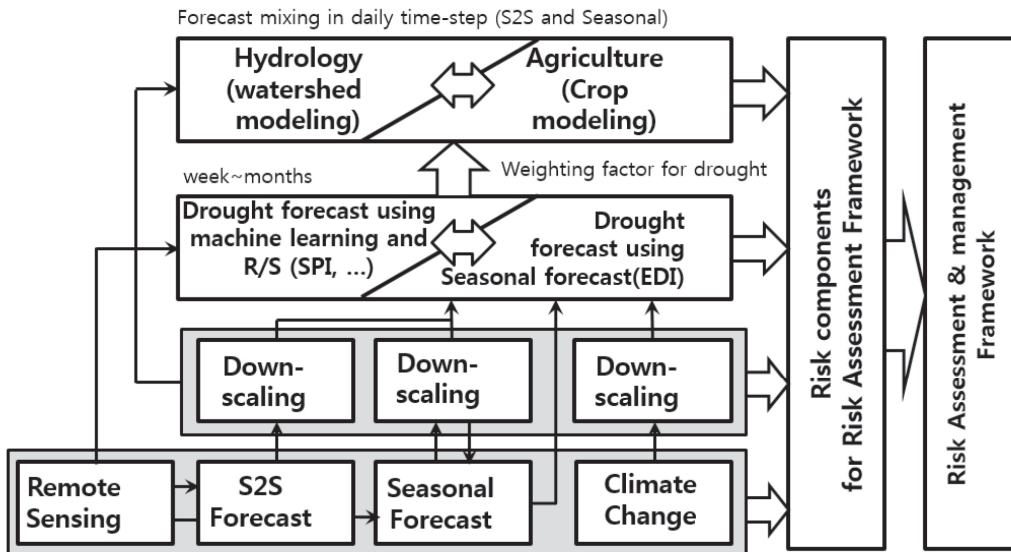


그림 3.1. 기후, 가뭄, 수자원, 농업 분야의 흐름과(본 연구에서 개발될) 최종 가뭄 리스크 평가 및 관리 프레임워크.

### 3.1 계절내/계절예측 기후정보

#### 3.1.1 계절내 기후 자료 데이터베이스화 및 활용

ECMWF가 S2S(Sub-Seasonal to Seasonal) project의 일환으로 생산하고 있는 S2S forecast 자료(Vitart et al., 2016)를 바탕으로 데이터베이스를 구축하는데, 먼저 1996-2015 기간에 대하여 5개의 앙상블 멤버가 매주 월요일에 향후 46일에 대해 생산한 hindcast와 forecast를 수집하여 가뭄-농업-수자원 모델링에서 사용할 수 있도록 하였다. 수집된 자료는 아래와 같다(표 3.1). 또한 농업-수자원 모델링에 사용되는 기후 예측 자료(온도, 강수)를 중심으로 태국 지역에 대한 S2S hindcast의 예측 능력을 평가하였다.

표 3.1. ECMWF에서 수집된 기후변수 목록

변수명	예측기간	앙상블 수	해상도
10m zonal wind	46일	11(hindcast)	240x121
10m meridional wind		51(forecast)	(1.5degree)
Precipitation			
Surface solar radiation downwards			
Surface net upward longwave flux			
Surface net thermal radiation			
Maximum temperature			
Minimum temperature			
Top net thermal radiation			

#### 3.1.2 여름철 계절내 진동 영향 분석

향후 APCC 계절내 진동 예측 정보의 활용이 가능하도록 BSISO 지수를 바탕으로 한 영향 연구로 진행했다. BSISO 1, 2 모드가 태국의 각 지역의 강수에 미치는 영향에 대해 분석하고 이와 관련한 메커니즘을 파악했으며, 이를 바탕으로 태국 우기 시작일 예측 방법을 구축했다.

### 3.1.3 계절 및 몬순 변동성과 주요 인자

선행 연구 결과와 강수량, 기온, 해면기압 등의 변수에 대한 EOF 분석을 통해 계절에 따른 기후 특성과 남북으로 확장된 지리적 환경에 의한 기후 특성을 이해하고 이 이해를 바탕으로 연구 대상 지역인 램타콩(Lam Takhong) 소유역을 포함하는 최적의 기후대를 선정했다.

램타콩 소유역을 포함하는 태국 지역의 강수 변동성과 그를 주도하는 인자들을 찾고 그에 대한 기상학적 근거를 밝히고자 한다. 주요 인자들로는 ENSO, SOI, IOD와 최근 중요한 이슈가 되고 있는 열대 서태평양과 대서양의 SST등을 포함한다. 이러한 결과를 통계적 다운스케일링 기법에 이용할 계획인데, 특히 CIR(Climate Index Regression), MWR(Moving Window Regression), MWR-Obs(Observation-based Moving Window Regression) 등의 상세화 모듈에서 찾아낸 주요 예측인자에 대한 역학적 근거를 테스트 하거나 모델 예측력이 현저히 부족한 기간의 경우, 메커니즘 기반 통계 모델을 개발하여 보완 할 수 있도록 한다. 또한 몬순 시작일과 기후 지수들과의 관계와 역학적 이해를 기반으로 몬순 시작일 예측모형을 개발한다.

## 3.2 상세화 방법

### 3.2.1 계절내예측 기후자료의 상세화

계절내 예측 자료는 ECMWF의 S2S 자료를 사용하였다. ECMWF 계절내 예측 자료는 매주 월요일과 목요일에 2회에 걸쳐 46일(총 6주)에 대하여 제공되고 있다. 공간 해상도는 1.5 degree(모델해상도: T639/319 L91)이며 Hindcast 및 Forecast 기간에 대해 각각 11개와 51개 앙상블 결과를 각각 제공하고 있다.

상세화에 사용된 자료는 ECMWF 데이터 포털(<https://www.ecmwf.int/>)에서 6 시간단위의 자료를 수집하여 일단위로 변환했으며 본 연구에서 수집된 변수는 표 3.1과 같다. 상세화를 위해서는 태국 지역에 대해 Clipping하여 사용하였으며 경도(가로) 및 위도(세로)에 대해 240 및 121 격자를 포함한다.

예측 자료의 상세화는 예측성 향상을 위한 통계적 방법을 사용하지 않고 역학 모형의 예측 결과를 관측 자료를 기준으로 편의(bias)만을 보정하여 농업 및 수문 모델링의 입력

으로 사용될 수 있도록 상세화 기법을 개발하였다.

### 3.2.2 계절예측 기후자료의 상세화

계절예측 자료의 상세화는 「유역규모 비점오염 관리 의사결정 지원을 위한 APCC 계절예측 정보 활용 방안 연구」(조재필, 2017)에 사용된 계절예측 자료 및 상세화 방법을 사용하였다. 계절예측 모듈의 경우, 표 3.2에서와 같이 예측 자료를 직접 사용하는 단순편의보정(Simple Bias Correction, SBC) 방법, 예측 자료를 간접적으로 사용하는 Moving Window Regression(MWR) 방법, 관측 자료 기반의 Climate Index Regression(CIR) 방법, 관측자료 기반의 Observation-based Moving Window Regression(MWR-Obs) 방법을 사용하였다. 그림 3.2는 본 연구에서 사용된 실시간 계절예측 시스템의 모식도를 보여 주며 표 3.3은 매일 현업적인 상세화가 가능한 개별 기후예측모형들을 보여준다.

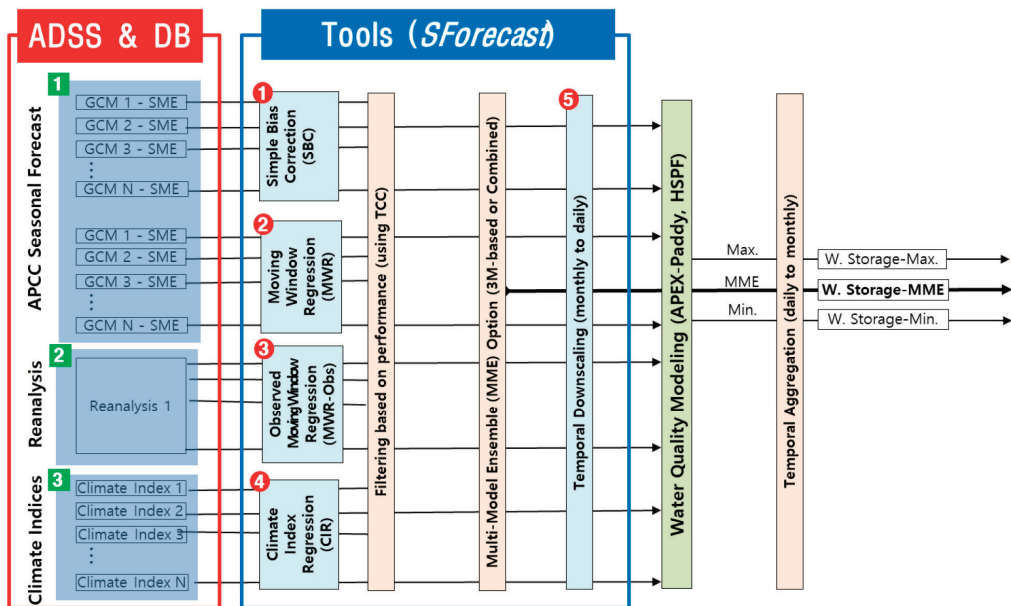


그림 3.2. 계절예측 상세화 시스템 모식도.

표 3.2. 계절예측 상세화에 적용된 상세화 모듈

Classification	SBC	MWR	CIR	MWR-Obs
사용 기후 정보	APCC 계절예측자료	APCC 계절예측자료	NOAA/APCC 기후지수	재분석자료(Reanalysis 1)
예측 대상 변수와 예측인자와의 관계	동일	다름	다름	다름
예측인자와 대상지역의 공간적 관계	동일	다름	다름	다름
예측인자와 예측대상 변수의 시간적 관계	동일	동일	다름 (자연시간)	다름 (자연시간)

표 3.3. APCC의 계절예측 상세화를 위한 개별 예측모형 특성

Model acronym	Institution(country)	Lead time (month)	Ensemble size
BCC	Beijing Climate Center (China)	3	8
CWB	Central Weather Bureau (Taipei)	3	10
HMC	Hydrometeorological Centre of Russia (Russia)	3	20
IRI_CA	International Research Institute for Climate and Society (USA)	3	24
APCC	APEC Climate Center (Korea)	6	10
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Italy)	6	9
MSC	Meteorological Service of Canada (Canada)	6	20
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)	6	9
NCEP	NCEP Climate Prediction Center (USA)	6	15
PNU	Pusan National University (Korea)	6	5
POAMA	Centre for Australian Weather and Climate Research /Bureau of Meteorology (Australia)	6	10

앞서 설명한 상세화 예측모듈들은 예측성 향상에 목적을 두고 있으며 EDI(Effective Drought Index)를 이용한 가뭄예측, 수문 및 농업 모델링 입력 자료로 활용하기 위해서는 월단위 자료를 일단위 자료로 변환하는 시간적 상세화 과정이 필요하다. 시간적 상세화 방법은 예측된 월 자료를 기반으로 과거 자료로부터 일 자료를 샘플링 하는 기존 연구와 동일한 방법을 사용하였다. 즉 대상지역에 대하여 예측된 2개 변수(강수 및 평균 온

도)를 기반으로 Mahalanobis distance(Mahalanobis, 1936)를 이용하여 과거 관측 자료로부터 계산된 공간평균 강수량 및 평균기온과 비교하여 가장 비슷한 특성을 가지는 연/월을 선정한 후 선정된 과거자료의 연/월로부터 대상 지역에 포함되어 있는 모든 관측점의 자료를 동시에 추출하여 일 자료를 생성하는 방법이다(조재필, 2015).

### 3.2.3 미래 기후변화 시나리오의 상세화

기후변화 시나리오 상세화는 IPCC 5차 평가보고서(AR5)를 위하여 세계기후연구프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)의 결합모델상호비교 사업(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)을 통해 제공된 전 지구 규모의 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathway) 시나리오 자료를 사용하였다. APCC에서는 Earth System Grid(<http://earthsystemgrid.org/home.htm>)라 불리는 분산시스템을 통해 수집한 전 지구 규모의 자료를 사용자 편의성을 위해 국가별로 Clipping을 한 후 APCC Data Service System(ADSS: <http://adss.apcc21.org/DataSet/CMIP5/cmip5.jsp>)를 통해 제공하고 있는 태국 자료를 사용하였다. 과거기간에 대한 Historical 자료에 더하여 미래 기간에 대한 코어 시나리오인 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 자료를 제공하고 있다. 불확실성 평가를 위해서 총 29개 GCM 자료에 대하여는 강수량, 최고기온, 최저기온 등 3개 기상변수를 제공하고 있는 반면에 농업분야의 증발산량 산정에 사용되는 6개 주요 변수(강수, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량)의 경우에는 10개 GCM 만이 해당 자료를 제공하고 있다.

편의보정을 위해서 Daily GCM 자료를 기반으로 개발된 비모수적분위사상법(Non-parametric Quantile Mapping Method)을 활용한 rSQM R-패키지(<https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html>)를 사용하였다(그림 3.3).

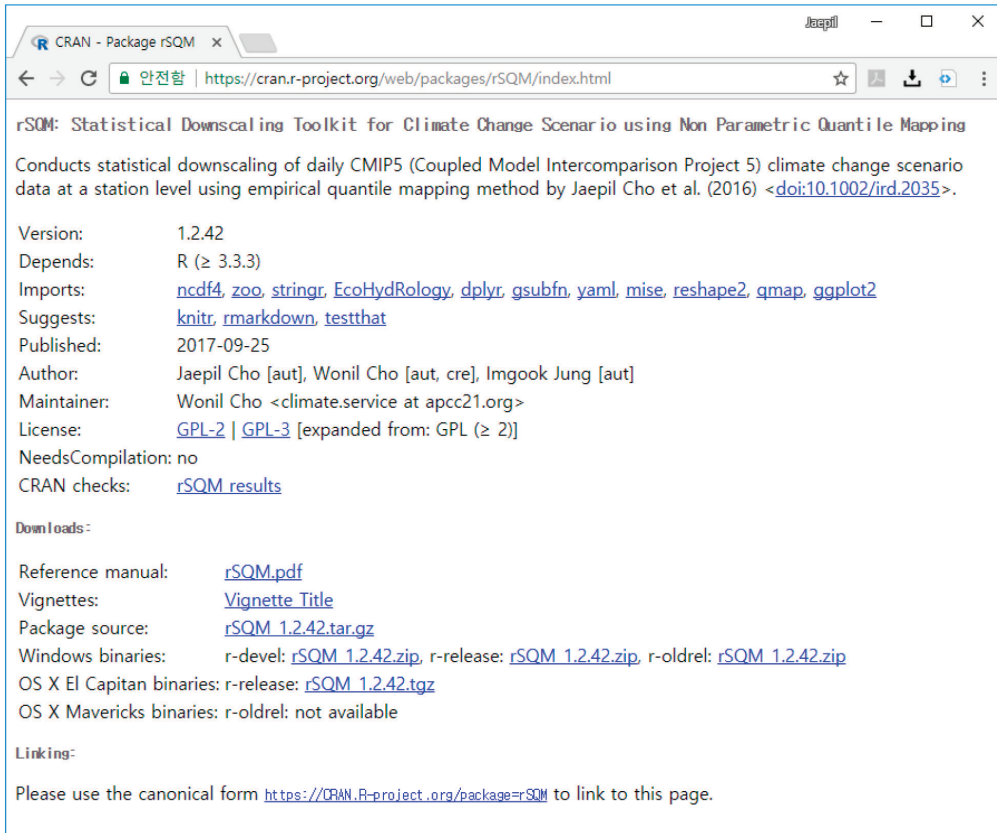


그림 3.3. rSQM 기후변화 상세화 패키지 설명.

상세화된 관측소별 자료는 과거 관측 자료와 비교를 통하여 기후변화 시나리오 자료들이 특정 목적에 중요하다고 판단되는 기후특성을 할 때 얼마나 잘 재현하는지를 살펴보는 과거 재현성(reproducibility) 평가를 수행하였다. 본 연구에서는 제시된 강우 특성 인자들 중에서 가뭄과 가장 밀접하다고 판단되는 최대무강우일수에 대한 과거 재현성 분석을 수행하였다. 지자체 기후변화 적응 세부시행계획 수립 지원을 위해 환경부에서 수행한 취약성 평가(국립환경과학원, 2012)에서는 연속적인 무강우일수의 최대값(days)을 건강(한파에 의한 건강 취약성), 산림(산불, 소나무 송이버섯, 산림 생산성, 가뭄에 의한 산림식생), 생태계(곤충, 국립공원), 물관리(이수, 수질 및 수생태) 분야에 활용할 수 있음을 제시하고 있다.

본 연구에서는 태국의 북동부 지역에 대하여 장기간(1976~2005)의 기상 관측 자료가 있는 22개 기상 관측소에 대하여 앞에서 언급한 강우 특성 인자를 분석하였다.

### 3.3 가뭄감시, 예측 및 기후변화 영향평가

#### 3.3.1 가뭄 메커니즘 분석

BSISO 각각의 모드의 경년 변동성과 계절 또는 몬순 강수의 경년 변동성으로 통계적 분석을 통하여 가뭄에 영향을 미치는 주요 변수와 영향 시기, 지연시간 등을 도출, 태국 지역을 대상으로 한 가뭄 모델링에 활용하도록 하였다.

#### 3.3.2 가뭄감시를 위한 위성강우 자료 전처리

##### 3.3.2.1 자료 수집

위성 강우는 정지궤도 적외센서를 기반으로 산출하는 방법과 수동/능동 마이크로파를 이용하여 강수를 산출하는 방법, 그리고 적외센서와 마이크로파를 결합하여 산출하는 방법이 있다. 가뭄 지수의 산정에는 WMO(World Meteorological Organization)에서 권고하는대로 최소 30년 이상의 강수자료를 이용하는데, 현재 각 기관에서 제공하고 있는 위성기반 강우자료는 다음 표 3.4와 같다. GPCP 자료는 일반적으로 가장 많이 사용되는 자료이며, 시간 공간 해상도는 월, 2.5°로 낮은편이며, 강수 목적으로 발사된 TRMM 위성 기반 3B42, CMORPH 자료는 시간 및 공간 해상도가 3시간, 30분 및 8km, 25km로 비교적 해상도 높은 자료를 제공한다. TRMM 위성이 발사되기 전과 후 일관된 위성 강우 자료를 제공하기 위하여 PERSIANN-CDR자료는 1983년부터 자료를 0.25°, 일자료 해상도로 제공하고 있다.

표 3.4. 각 기관에서 제공하는 위성기반 강우자료

자료	시간 해상도	공간해상도	기간	범위
GPCP	Monthly	2.5°	1979-present	90°S-90°N
TRMM 3B42	3 hourly	0.25°	1998-present	50°S-50°N
CMORPH	0.5 h	0.07°	2002-present	60°S-60°N
PERSIANN-CDR	Daily	0.25°	1983-present	60°S-60°N

### 3.3.2.2 PERSIAN- CDR 자료 전처리

30년 이상의 전지구 고해상도 강수 기후자료인 PERSIANN-CDR은 강수 관측을 목적으로 발사된 TRMM 위성 이전에 연속적인 기후자료로 강수량 자료를 사용하기 위하여 UCI(University of California, Irvine)의 CHRS(The Center for Hydrometeorology and Remote Sensing)센터에서 자료를 생성하여 제공한다. 현재 이 자료는 TRMM 위성의 3B42 자료와 같이 북위 60도에서 남위 60도까지 1983년 1월부터 2016년 12월 31일까지 자료를 제공하고 있으며, 기후자료를 이용하고자 하는 연구자에게 0.25° × 0.25° 일자료 간격의 해상도 높은 강우 자료를 제공한다. 자료는 GridSat-B1 정지궤도 적외선 센서 기반 이미지를 신경회로망(Neural Network) 방법을 통해 0.25° × 0.25° 시간당 강수량을 산출하고 월자료로 변환후 기후자료로 일관성을 유지하기 위하여 기후분야에 활용되는 GPCP 자료로 보간하여 통해 최종 일, 월, 년자료 0.25° × 0.25° 자료를 제공한다(그림 3.4, 그림 3.5). 1983년부터 2014년까지 자료를 수집 및 가공하여 자료를 이용하였다.

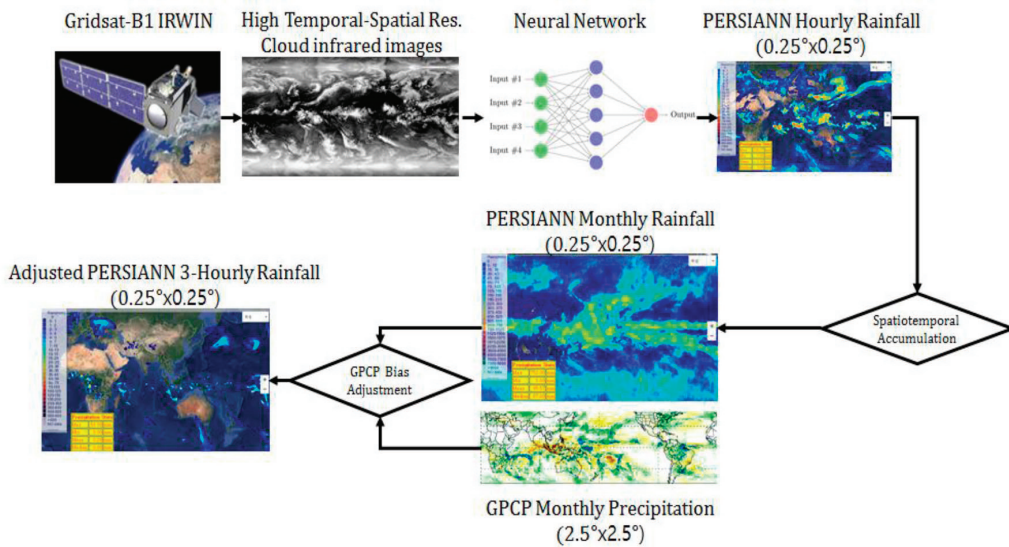


그림 3.4. PERSIANN-CDR 알고리즘 흐름도.

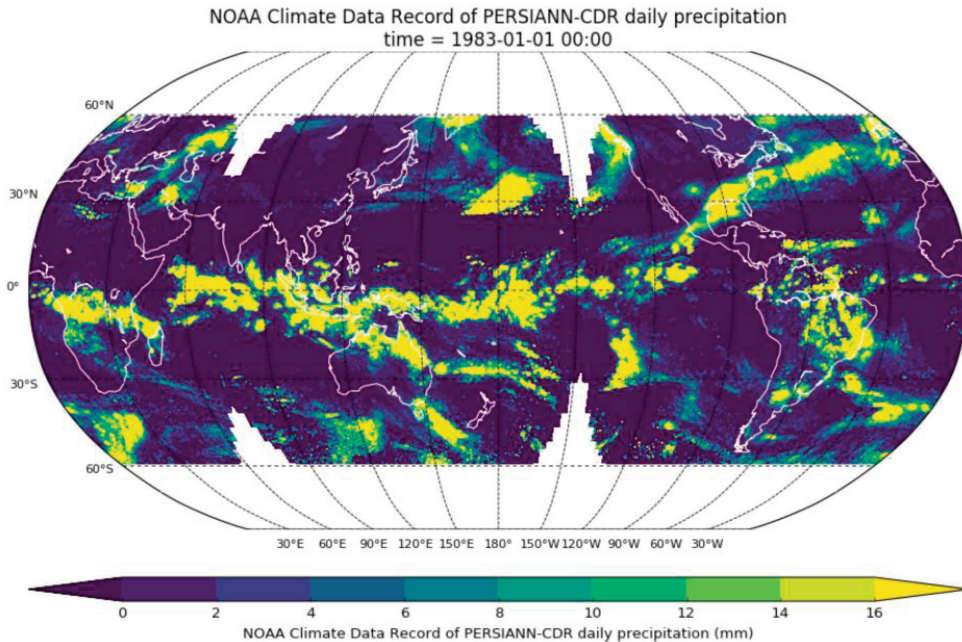


그림 3.5. 1983년 1월 1일 PERSIANN-CDR 전지구 일강수 자료.

### 3.3.2.3 GPM IMERG 자료 전처리

GPM IMERG(the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 위성 자료는 Level 3 자료로 GPM 단일 위성으로 만든 Level 3 격자 강수량과 구별되며, 이 자료는 GPM 코어위성 듀얼레이더(DPR), GPM 마이크로파이미저(GMI)와 마이크로파 센서를 탑재하고 강수량을 산출할 수 있는 모든 마이크로파 협력위성 및 적외(IR)채널을 탑재한 정지궤도 위성들의 강수량 값을 블렌딩하여 산출한 30분간 10km의 해상도 자료이다. 마이크로파 협력 위성들은 미국, 유럽, 인도, 프랑스, 일본 등 다양한 나라와 기관에서 운영하는 위성들로 이루어지며, 이들 기관에서 운영하는 센서와 위성에 대한 자세한 설명은 아래와 같다(표 3.5, 표 3.6).

표 3.5. GPM IMERG에 이용된 위성 목록

Sensor	Satellite	Management agency
SSMI	DMSP	DoD
SSMIS	DMSP	DoD
AMSR2	GCOM-W	JAXA
MADRAS	Megha-Tropiques	CNES/IRO
SAPHIR	Megha-Tropiques	CNES/IRO
MHS	NOAA	NOAA
AMSU-A	NOAA	NOAA
MHS	MetOp	EUMETSAT
AMSU-A	MetOp	EUMETSAT
ATMS	NPP	NASA
ATMS	JPSS	NOAA

GPM IMERG 자료를 산출하는 방법은 TRMM 위성에서 각각의 기관마다 Level 3을 만들어서 제공했던 NASA TRMM 3B42, NOAA CPC(Climat Prediction Center) CORMPH(NOAA CPC Morphing Technique), UC Irvine대학의 PERSIANN 자료들이 있었으나, 이번 GPM IMERG 자료는 각 기관의 역할을 분담하여 최종 격자화된 자료를 산출한다. NOAA CPC에서 CMORPH 칼만필터를 이용하여 마이크로파와 적외센서를 결합한 자료를 제공하며, UC Irvine 대학에서는 적외채널을 이용하여 산출한 강우강도 값을 제공한다. NASA GSFC에서 최종적으로 모든 강수량 자료를 결합하여 수집 제공하게 된다. 자료는 Table 2와 같이 관측 후 Latency 6시간 후 자료(Early run product), 18시간 후의 자료(Late run product)와 최종적으로 지상 관측자료와 보정한 4개월 후 자료(Final run product)를 생산하여 제공한다. 2014년부터 자료를 제공하고 있다.

표 3.6. GPM IMERG 산출물 목록

Resolution	Regions-Dates	Latency	Format
0.1°-30 minute	Gridded, 60N-60S March 2015 to present	6 hours (NRT/early run)	HDF5
0.1°-30 minute	Gridded, 60N-60S March 2015 to present	18 hours (NRT/late run)	HDF5
0.1°-30 minute	Gridded, 60N-60S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5/NETCDF
0.1°- Monthly	Gridded, 60N-60S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5

### 3.3.3 기계학습 기반 미계측 지역 가뭄예측을 위한 자료 전처리

#### 3.3.3.1 관측 기상 자료

태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)에서 제공한 1981-2016년의 강우 자료를 이용하였다. 30년의 장기간 자료가 존재하는 북동기후지역(Northeast Climate Division)의 22개 관측 지점에 대해 일별 강우 자료를 수집하였으며 이를 월별 강우로 전환하여 가뭄 지수인 Standardized Precipitation Index(SPI)를 3개월 시간 스케일로 산정하였다. 자료의 기간은 2016년까지이나, 2013년 중반 이후로는 대부분이 결측이다.

#### 3.3.3.2 지표면 온도 자료

지표면 온도는  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  공간해상도로 제공되는 미국 NASA의 Aqua 위성에 탑재된 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 센서의 월별 지표면온도 MYD11C3 자료를 이용하였다. 주간, 야간 지표면 온도를 도출하고 평균한 평균 온도 또한 기계학습 모델의 입력 변수로 활용하였다. 자료는 미국 NASA의 Earth Observing System Data and Information System(EOSDIS, <http://reverb.echo.nasa.gov>)에서 획득하였다.

### 3.3.3.3 식생지수 자료

식생지수는 지표면 온도와 마찬가지로 미국 NASA의 Aqua 위성에 탑재된 MODIS 센서의 표준 생산물인 MYD13C2 자료의 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)와 EVI(Enhanced Vegetation Index)를 이용하였다. 공간해상도는 지표면 온도와 같다.

### 3.3.3.4 위성 강우 자료

기계학습 기반에도 위성 강우 자료를 이용하였는데, PERSIANN-CDR, TRMM 3B42, 그리고 GPM IMERG 자료를 이용하였다. PERSIANN-CDR 자료는 60°S-60°N, 180°W-180°E의 범위에 대해 0.25° × 0.25°의 공간해상도로 1983년부터 수집하였으며(Ashouri et al., 2015), TRMM 자료는 미국 Goddard Earth Sciences Data and Information Service Center(GES DISC)에서 50°S-50°N, 180°W-180°E 범위에 대해 0.25° × 0.25° 공간해상도로 1998년부터 수집하였다. GPM Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM(IMERG) 자료는 2014년 4월부터 2015년 12월까지 90°S-90°N, 180°W-180°E 범위에 대해 0.1° × 0.1° 공간해상도로 NASA의 Precipitation Measurement Missions(PMM)에서 수집하였다.

기계학습 모델을 훈련하는데 미세측 지역의 가뭄 상태를 나타내주는 지표로 사용하기 위해 위성 강우 기반의 가뭄지수를 산정하였는데, 위성 강우 자료를 0.05° × 0.05° 해상도로 리샘플하여 확률분포함수 매개변수를 도출하고 SPI3(3개월 SPI)를 산정하였다.

모든 위성 자료는 북서기후지역을 포함하는 동일한 14.0°N-18.5°N, 100.5°E-106.0°E의 범위에 대해 0.05° × 0.05°의 공간해상도로 리샘플되었다.

### 3.3.3.5 예측기후 자료

계절 예측 자료로 APCC의 6개월 다중모델앙상블(MME; Multi-Model Ensemble) 및 1~6개월 예측을 생산하는 개별 모델 자료를 이용하였다. MME 자료는 SCM(Simple Composite Method) 방법을 통한 자료만을 이용하였다. 이용된 개별모델은 APCC(APEC

Climate Center), CMCC(Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici), MSC(Meteorological Service in Canada), NASA, NCEP(National Center for Environmental Prediction), PNU(Pusan National University), POAMA(Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia) 이다.

계절 내 예측 자료는 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 S2S(Seasonal to Subseasonal)의 hindcast 자료를 이용하였다.

모든 예측 자료는 북서기후지역을 포함하는 동일한  $14.0^{\circ}\text{N}$ - $18.5^{\circ}\text{N}$ ,  $100.5^{\circ}\text{E}$ - $106.0^{\circ}\text{E}$ 의 범위에 대해  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 의 공간해상도로 리샘플되었으며, 모델의 월별 값을 산정한 후 기준 기간에 대한 아노말리의 퍼센트 증감 비율(Percent Increment of Anomaly)을 구하여 위성 강우에서 도출한 기후값(Climatology)에 적용, 다시 위성 기반의 관측에 부합하는 월별 값으로 전환되었다(Quan et al., 2012).

### 3.3.3.6 대규모 기후 지수자료의 전처리

대규모 기후 지수 자료는 6월의 가뭄 예측을 위해서는 PDO, NINO34, SOI, EMI, IOBW, WNINO, TNA를 이용하였으며 10월의 가뭄 예측을 위해서는 WNINO를 이용하였다.

### 3.3.3.7 기타 보조 자료의 전처리

고도 자료는 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey)에서 획득한 대략  $1\text{km} \times 1\text{km}$  해상도의 Global 30 Arc-Second Elevation(GTOPO30) 자료를 이용하였다.

## 3.3.4 기후정보 활용을 위한 EDI 연계 모듈 개발

앞서 생산된 계절예측 및 기후변화 시나리오 상세화 자료를 이용하여 가뭄예측 및 가뭄의 미래 전망 분석을 수행하기 위해서는 많은 수의 모형 구동이 필요하다. 따라서 생산된 상세화 자료와 연동이 되어 EDI를 산정하고 예측성을 평가하는데 필요한 반복작업 수행을 위해 R 기반의 패키지(rDrought)를 개발하였으며 내부 함수별 기능은 표 3.7과 같다.

표 3.7. rDrought 패키지 주요 함수 및 기능

구분	함수명/기능
입출력, 유틸리티	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Update.NAMELIST: EDI 계산에 필요한 NAMELIST 파일 수정</li> <li>• Extract.EDI_IDF: 일단위 EDI 시계열에서 가뭄 시작시점, 종료시점, 최대 가뭄심도 등의 정보 추출</li> <li>• Create.EDI.Map.Data: 관측점 기반 내삽된 EDI 맵을 그리기 위해 대상 관측소별 EDI 값을 취합</li> <li>• Download.GIS.Data: EDI 맵 작성을 위해 필요한 국가별 mask 맵 및 boundary 맵 다운로드</li> <li>• Create.Interpolated.EDI.Map: 특정 날짜에서 관측소별 EDI 값을 내삽하여 EDI 맵 생산</li> </ul>
관측기반	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Create.Daily.EDI.Input.Observed: 관측자료로부터 일단위 EDI 계산을 위한 기상입력 자료 생산</li> <li>• Run.Daily.EDI.Observed: 관측자료 기반의 일단위 EDI 계산</li> <li>• Create.Monthly.EDI.Input.Observed: 관측자료로부터 월단위 EDI 계산을 위한 기상입력 자료 생산</li> <li>• Run.Monthly.EDI.Observed: 관측자료 기반의 월단위 EDI 계산</li> </ul>
기후변화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Create.Daily.EDI.Input.CChange: 다중모형(GCM) 기반의 상세 기후변화 시나리오 자료로부터 일단위 EDI 계산을 위한 기상 입력자료 생산</li> <li>• Run.Daily.EDI.cchange: 상세 기후변화 시나리오 자료를 이용한 일단위 EDI 계산</li> <li>• Extract.EDI.Duration.Intensity.CChange: 기후변화 시나리오에 따른 일단위 EDI 시계열로부터 지속 기간(duration) 및 최대 가뭄심도(intensity) 계산</li> <li>• EDI.Duration.Intensity.Graph: 계산된 지속기간 및 가뭄심도 자료를 이용하여 그래프 생산</li> </ul>
계절예측	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Create.Monthly.EDI.Input.SForecast: 지역평균 월단위 계절예측 자료를 이용하여 EDI 계산을 위한 기상 입력자료 생산</li> <li>• Run.Monthly.EDI.sforecast: 계절예측자료 기반의 월단위 EDI 계산</li> <li>• Summary.Monthly.EDI.SForecast: 계산된 관측 및 예측 기반 월단위 EDI 값으로부터 월 및 선행예측 기간 별 예측성 평가 결과 생산</li> </ul>

### 3.3.5 관측 및 위성강우 기반 가뭄감시

#### 3.3.5.1 EDI 산정

EDI(Effective Drought Index)는 Byun and Wilhite(1999)에 제안한 방법으로 지금까지 온 강우량에서 증발 및 유출 등으로 감소하고 남은 물을 계산한 유효수자원지수(AWRI)와 강수의 시간적 집중도를 함께 날짜의 평균치를 비교하여 계산한다.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i ((\sum_{m=1}^n P_m) / n) \tag{식 3.1}$$

이때,  $P_m$ 는 지정된 일부터  $m$ 일 전의 일 강수량,  $I$ 는 365일이며  $EP$ 는 지정된일부터 1년 동안의 누적 강수량이다.  $EP$ 의 30년 평균 강수량을 계산하여  $EP$ 의 편차(DEP)을 계산하고 물 부족이 평년으로 회복하기 위한 일 강수량( $PRN_j$ )을 식 3.2을 이용하여 산정한다.

$$PRN_j = DEP_j / \sum_{N=1}^j \left( \frac{1}{N} \right) \quad (\text{식 3.2})$$

이때  $j$ 는 강수 누적기간이다.

최종적으로 EDI는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$EDI_j = \frac{PRN_j}{ST(PRN_j)}; EDI_j = \frac{DEP_j}{ST(DEP_j)} \quad (\text{식 3.3})$$

EDI 가뭄지수는 정규화된 값으로 작은 값일수록 가뭄의 정도가 심함을 나타낸다. 정규화된 지수의 심도 분류는 표 3.8과 같다.

표 3.8. EDI 지수의 가뭄 심도 분류

구분	봄철	장마철	그 외 기간
보통 가뭄	-0.5	-1.0	-0.7
심한 가뭄	-1.0	-2.0	-1.5
극심한 가뭄	-2.0	-3.0	-2.5

그림 3.6은 기상학적 가뭄 평가를 위해 사용되는 대표적인 가뭄지수인 SPI와 EDI의 차이를 도식화한 개념도이다. 12개월을 기간으로 하여 동일한 강수량이 발생하되 과거 시점으로부터 현재시점까지 강수량이 증가하는 경우(Case I)와 반대로 강수량이 감소하는 경우(Case II) 강수발생 시점을 고려하지 않고 강수량의 단순합을 이용하는 SPI의 경우에는 동일한 가뭄지수 결과를 제공한다. 반면 현재 시점으로부터 먼 과거에 발생된 강우에 대해 적은 가중치를 부여하는 EDI의 경우에는 Case II가 Case I과 비교하여 심한 가뭄지수 결과를 제공한다.

EP(Effective Precipitation)

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[ \left( \sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right]$$

$$DEP = EP - MEP$$

$$EDI = DEP / ST(DEP)$$

Available water decrease as time goes on

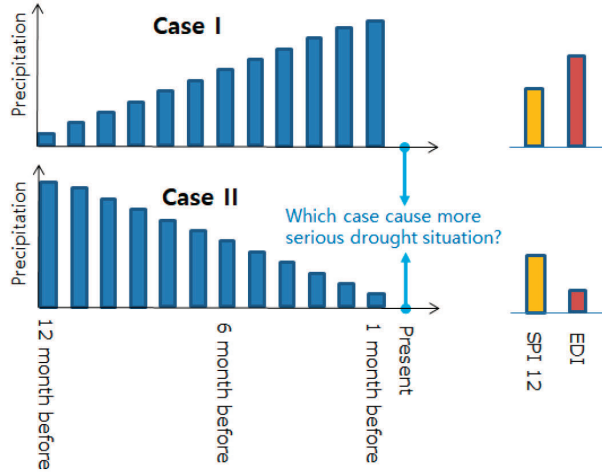
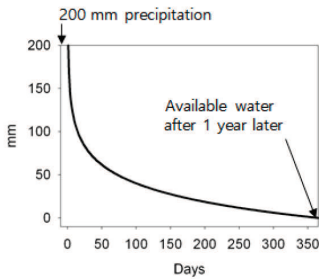
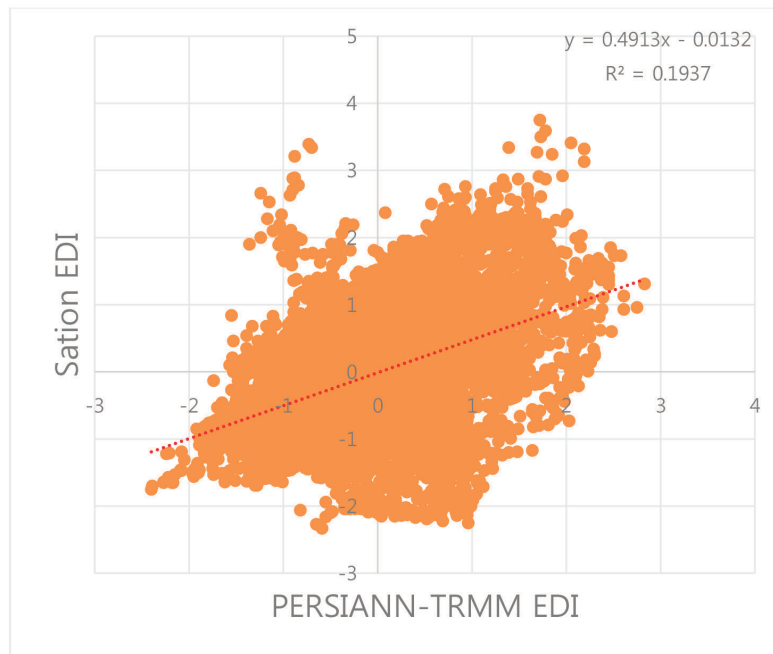


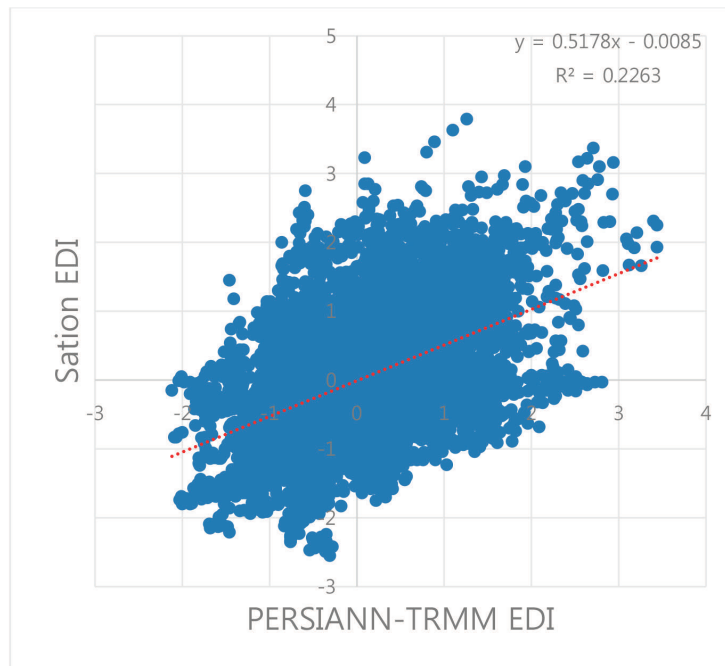
그림 3.6. 동일 강수량 및 상이한 강우패턴에 대한 EDI 및 SPI 산정 개념도.

EDI를 이용한 가뭄감시는 일단위 강수량을 이용하여 수집된 22개 관측소별로 일단위 EDI를 산정하였으며 동일한 날짜의 22개 관측소별 EDI 값을 공간적으로 내삽하여 북동부 지역의 EDI의 공간분포 맵을 생산하였다.

앞서 언급된 관측소 기반의 EDI의 공간분포는 실제 강수량의 분포를 기반으로 한 것이 아니기 때문에 고해상도 위성자료를 이용한 가뭄감시의 가능성을 평가하였다. 위성기반 EDI의 활용성을 알아보기 위하여 TMD의 Nakhon Ratchasima(TH431201)와 Pak Chong Agromet(TH431301) 기상 관측지점과 위치가 같은 두 개의 위성강우 자료 DB를 구축했다. 첫번째는 1983년부터 1997년까지는 PERSIANN-CDR 자료를 이용했고, 1998년부터 2007TRMM TMPA 자료를 연속적으로 구축했다. 두번째는 1998년부터 2007년도까지 TRMM TMPA 위성자료 단독으로 DB를 구축하여 지상관측자료 EDI와 비교 검증했다. 그림 3.7에서 보면 첫번째 구축한 위성자료 PERSIANN 및 TRMM 자료와 Nakhon Ratchaima와 Pak Chong Agromet 기상 관측자료의 EDI의 상관계수는 각각 0.49와 0.51, 결정계수( $R^2$ )는 각각 0.19와 0.22로 비교적 정확도가 낮았다.



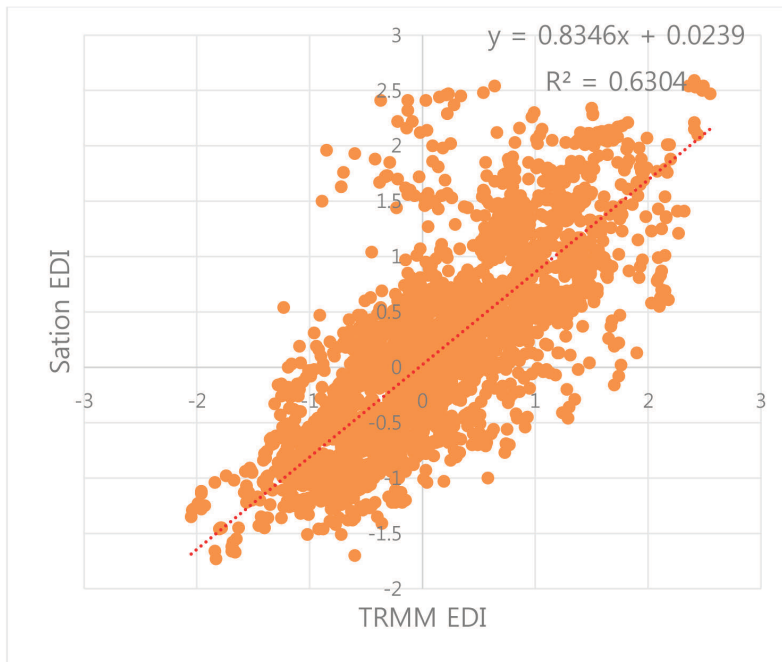
(a) Nakhon Rachasima



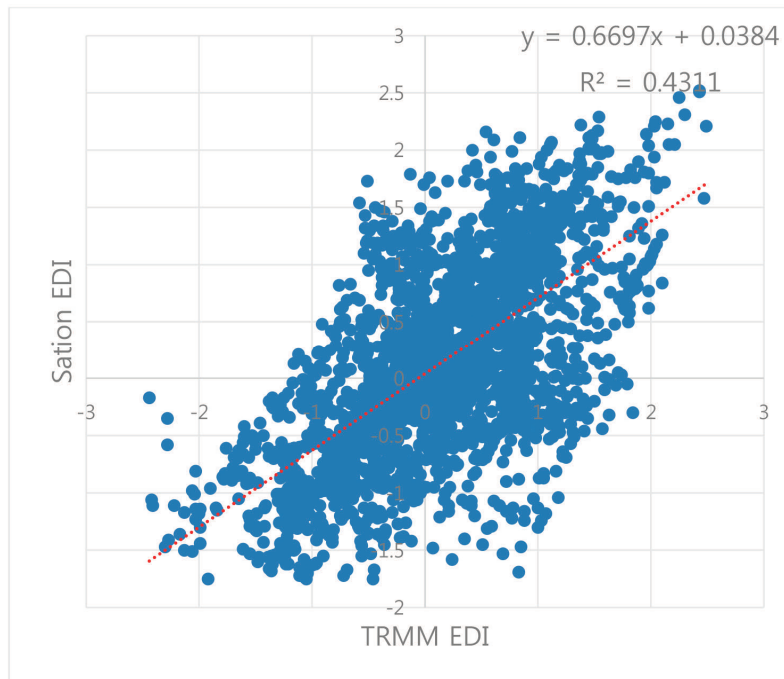
(b) Pak Chong

그림 3.7. (a) Nakhon Ratchasima와 (b) Pak Chong Agromet 기상 관측지점의 EDI 값과 PERSIANN 및 TRMM의 EDI 비교 결과.

TRMM TMPA(1998년-2007년)의 위성자료만으로 구축한 DB를 이용하여 EDI을 산출한 값과 Nakhon Ratchasima와 Pak Chong Agromet 기상 관측지점의 강우량으로 산출한 EDI을 검증해본 결과 Nakhon Ratchasima 지점의 상관계수와  $R^2$ 은 각각 0.83과 0.63으로 계산됐고, Pak Chong Agromet 지점의 상관계수와  $R^2$ 은 각각 0.66과 0.43으로 PERSIANN과 TRMM으로 구성된 DB의 EDI값보다 정확도가 크게 높았다(그림 3.8). 위성 최초로 Ku(14GHz)밴드의 핵심위성과 그외 라디오미터 위성으로 구성된 위성강우 자료들이 PERSIANN의 기본 정지궤도 위성기반 강우량보다 정확도가 높은 센서들이 탑재되어 관측된 결과값이 기인한다고 판단된다. 따라서 TRMM보다 더 정확한 DPR(Dual Precipitation Radar)센서를 탑재하고 10개에 이르는 보조위성으로 산출되는 GPM IMERG 데이터 값들을 EDI 산출에 이용한다면 준실시간 가뭄감시 시스템으로 충분히 미세측 지역인 태국에 이용가능할 것이다.



(a) Nakhon Ratchasima



(b) Pak Chong Agromet

그림 3.8. (a) Nakhon Ratchasima (b) Pak Chong Agromet 기상 관측지점에 대한 TRMM TMPA 위성자료의 EDI와 관측자료 EDI 비교 결과.

태국 지역의 가뭄 모니터링을 위해 수문 및 농업학적 인자 중에 중요한 강수량, 토양수분 등의 위성자료를 수집하여 데이터베이스화 한다. 강수량 자료는 광범위한 지역의 가뭄 감시를 위한 기초 자료로 일 단위의 PERSIANN(1978년-2015년) 자료와 TRMM 위성의 3시간 단위의 TMPA(1998년-2015년) 자료와 GPS 위성 IMERG(2014-현재) 자료를 수집하여 대상유역에 맞게 일 단위 정보로 변환하여 제공한다.

토양수분 자료는 MODIS 기반의 모델 결과값을 생산하고(1998년-2015년), L-band radiometer SMAP 위성자료를 기본 모니터링 자료로 활용한다. 또한 현재의 가뭄 모니터링 기반 자료의 AQUA MODIS 자료는 향후 GCOM-C1이 2017년에 발사되면 대체 될 것으로 보이며, 지속적인 가뭄 모니터링을 위해서 GCOM-C1의 MODIS 연계 기반 기술을 연구한다. 또한 Sentinel 고해상도 위성의 가뭄 모니터링 활용 방안을 연구한다.

### 3.3.6 기계학습 기반 미계측 지역 가뭄예측

#### 3.3.6.1 기계학습 모델

가뭄예측 모델로는 이진영(2015), 이진영(2016), Rhee and Im(2017)에서 가뭄예측을 위해 적용한 것과 같이 기계학습 모델을 활용하였다. 자기발전적인 전문가 시스템이 필요로 하는 규칙은 인간 전문가에 의해서 개발되거나, 인간이 제공한 훈련 자료를 이용하여 기계가 도출하게 되는데, 이러한 학습 과정의 컴퓨터 모델링을 기계학습이라고 한다(Jensen, 2005).

기계학습 모델 중 기존 연구(e.g., 이진영, 2015; 이진영, 2016)에서 우수한 성능을 보였으며 여러 임의의 과정을 통해 이상치나 노이즈에 안정적인 결과를 생산하는 것으로 알려진 극랜덤트리(ERT; Extremely Randomized Trees) 모델을 이용하였으며, 또한 여러 되풀이 과정을 통해 결과에 잘 반영되지 않은 훈련값들에 높은 가중치를 주어서 모델이 주어진 훈련 자료를 골고루 반영하도록 하는 아다부스트(Adaboost) 모델 또한 이용하였다.

ERT 모델과 Adaboost 모델은 여러 입력 변수와 목표 변수를 가지며, 훈련 자료로 주어진 '참값'을 이용하여 모델을 훈련한다. 본 연구에서는 미계측 지역에 대해서도 가뭄예측 값을 생산할 수 있는 가뭄예측 모델을 만들고자 하였는데 가뭄 상태의 지표로 주어지는 가뭄 지수 '참값'은 관측 지점 위치에만 존재하므로 지점 위치에 대한 값만을 이용하여 훈련하고 검증하였다. 구축된 모델에 대해서는 전체 지역에 대해 공간적으로 분포하는 가뭄 예측 값을 얻을 수 있다.

목표 변수로는 3개월 Standardized Precipitation Index(SPI)인 SPI3를 설정하였으며 관측 지점에 대해 관측 값으로부터 산정된 값을 이용하였다. SPI는 WMO가 권고한 가뭄지수로, 누적 강우량을 적합한 확률분포함수에 맞춘다음 정규분포로 전환하여 산정한다. 정규화되어 있으므로 시공간적으로 비교가 가능하다는 장점이 있다.

모델의 입력 변수로는 위성 자료에서 도출한 주간, 야간, 평균 지표면온도와 NDVI, EVI의 식생지수, 고도 값, 대규모 기후 지수들, 그리고 기후 예측자료에서 산정한 SPI3 값을 이용하였다. 일년 중 6월과 10월에 대해서만 모델을 구축하였으므로 각각에 대해 앞서 설명한 대규모 기후지수를 적용하였다. 기후예측 자료는 APCC MME 또는 각각의

개별 모델 결과를 이용하였는데, 3개월 SPI를 산정하기 위해 3개월 강우 누적 값을 구할 때 선행시간에 따라 관측 값이 사용되는 부분은 위성 강우에 기반한 강우량을, 예측 값이 사용되는 부분은 각 예측 모델 값이 적용된 강우량을 더하여 산정하였다. 모델을 훈련할 때는 위성강우에 기반하여 산정한 SPI3를 이용하고, 모델 평가시 기후예측 자료가 결합된 값을 사용하였다. ERT 모델 및 Adaboost 모델 모두 분류 모델 및 회귀 모델로 구축이 가능한데, 본 연구에서는 회귀 모델만을 구축하여 활용하였다.

### 3.3.6.2 기계학습 모델의 성능 비교

가뭃예측 정보는 가뭃이다 가뭃이 아니다의 이분화된 결과보다 가뭃인 경우 어떠한 심도를 가지는지에 대한 가뭃 카테고리 정보가 유용할 수 있다. 따라서 모델의 성능 평가 기준은 이진영(2015), 이진영(2016) 등에서 이용한 가뭃 카테고리에 대한 변형된 생산자 정확도를 가뭃 정확도로 정의하여 이용하였으며(식 3.4) 가뭃 카테고리에 대한 평균 절대오차(MAE; Mean Absolute Error) 또한 이용하였다(식 3.5).

$$\text{Drought Accuracy} = \frac{C_{ED} + C_{SD} + C_{MD}}{N_{ED} + N_{SD} + N_{MD}} \quad (\text{식 3.4})$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum |SPI3_{obs} - SPI3_{pred}|}{\text{Total Number of Samples}} \quad (\text{식 3.5})$$

여기서 ED는 Extreme Drought, SD는 Severe Drought, MD는 Moderate Drought으로 McKee et al.(1993)의 가뭃 카테고리 분류를 따르며, N은 실제로 각 카테고리에 속하는 샘플의 수이고 C는 그 중 그 카테고리로 맞게 분류된 샘플의 수이다.

본 연구의 가뭃예측 부분에서는 앞서 설명한 바와 같이 상세화된 계절 및 계절 내 예측 정보가 가뭃의 예측력을 향상시킬 수 있는지 평가하는 것을 목적으로 한다. 따라서 기계학습 모델을 구축하는 경우 입력 변수 중 SPI3 예측 값의 경우 각 계절 예측 값을 아노말리의 퍼센트 증감 비율만 적용하여 편의보정(Bias Correction)만 해서 적용한 경우, APCC MME를 관측 지점 위치에서 통계적 상세화한 경우의 9가지 경우를 비교하였다. 예측선행시간이 1개월인 경우는 계절 내 예측 S2S 자료 중 월말에 가깝게 생산되는 46일 간의 자료 중 다음 달에 해당하는 강우 예측 값을 월별 강우 예측 값으로 전환한 값도

포함하여 10가지 경우를 비교하였다.

위성 자료의 짧은 기간으로 인하여 2002년에서 2016년(실질적으로는 2013년)까지의 값을 이용하여 훈련 및 검증하였는데, 기간이 짧다 보니 가뭄 사상이 훈련과 검증 자료에 고루 포함되지 않을 수 있다는 단점이 존재하였다. 따라서 입력 및 목표 자료의 벡터를 2002년에서 2016년의 연도와 22개 관측 지점의 조합으로 구성하여 이를 임의로 10개의 그룹으로 나누었으며 이 중 7개의 그룹을 Leave-One-Out 교차 검증 방법을 이용하여 훈련하고 나머지 3개의 그룹을 이용하여 모델을 검증하였다. 기계학습 모델의 성능 평가를 위해 기계학습을 적용하지 않고 편의보정 및 통계적 상세화만 수행한 경우도 기계학습 결과와 비교하였다.

### 3.3.7 계절예측 기반 가뭄예측

EDI와 계절예측 자료를 이용한 가뭄예측은 사용된 예측자료의 시간규모에 따라서 2개의 상이한 결과 도출이 가능하다(그림 3.9). 우선 월단위 규모의 가뭄예측은 태국 북동부 지역에 대해 예측된 지역 평균 월단위 강수량 예측결과를 EDI 계산에 사용한다. 여기서 강수예측 자료가 월단위 자료이기 때문에 EDI 계산 또한 월단위 EDI 방법을 사용한다. 이 경우 공간적으로는 지역 평균 예측 강수량을 입력으로 사용하기 때문에 가뭄의 공간적 분포에 대한 정보를 제공하지 못하고 전체 지역에 대한 가뭄의 시간적 변동성 관련 정보를 제공하게 된다. 반면 일단위 규모 가뭄예측은 태국 북동부 지역의 22개 관측소에 대해 일단위로 상세화된 강수량 자료를 사용하기 때문에 계산에 있어서도 일단위 EDI 방법을 사용하고 특정일의 EDI 가뭄지수의 공간적 분포 관련 정보를 제공할 수 있으나, 과거관측 자료로부터 샘플링하여 사용하는 방법의 특성을 고려할 때, 특정일에서 보여주는 가뭄지수의 값과 공간적인 분포는 선택된 특정 과거 시점의 가뭄상황을 반영하기 때문에 예측결과의 활용에 있어서 주의를 요한다. 따라서 본 연구에서는 월단위 가뭄예측 결과를 활용하였다.

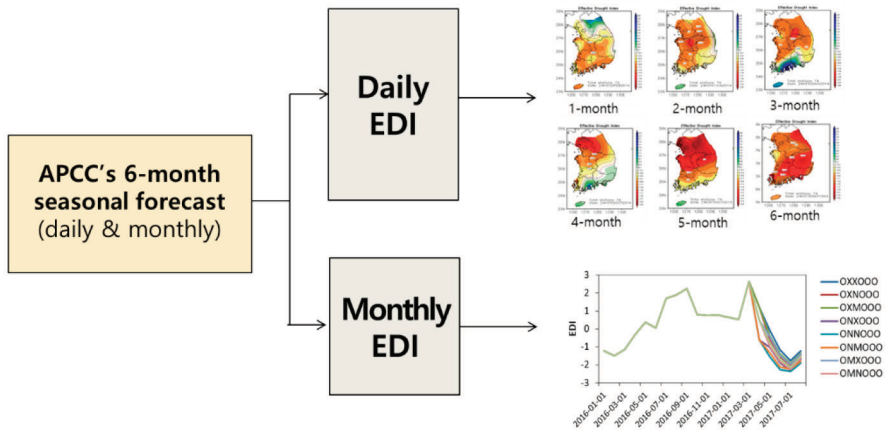


그림 3.9. EDI를 이용한 가뭄예측 모식도.

월단위 EDI 가뭄예측성 평가는 EDI 가뭄심도 분류 기준에서 평년 또는 습윤, 보통가뭄, 심한가뭄, 극심한가뭄의 4개 분류에 대하여 관측기후자료를 이용하여 계산된 가뭄심도분류와 월단위 계절예측 자료를 이용하여 계산된 가뭄심도분류를 월별 및 선행기간별로 비교하여 연속형 변수(Continuous variable)의 평가에 사용되는 식 3.6의 Temporal Correlation Coefficient(TCC) 및 범주형(Categorical variables) 변수 평가에 활용되는 다중 범주형 평가 지표들 중에서 표 3.9와 같은 예보분류표(Contingency table)에 대하여 식 3.7의 Heidke Skill Score(HSS)를 사용하였다.

표 3.9. 다중 범주형 평가를 위한 예보분류표

		예 측				
		F1	F2	F3	F4	소계
관 측	O1	$n(F1,O1)$	$n(F2,O1)$	...	$n(Fk,O1)$	$N(O1)$
	O2	$n(F1,O2)$	$n(F2,O2)$	...	$n(Fk,O2)$	$N(O2)$
	O3	...	...	...	...	...
	O4	$n(F1,Ok)$	$n(F2,Ok)$	...	$n(Fk,Ok)$	$N(Ok)$
	소계	$N(F1)$	$N(F2)$	...	$N(F4)$	$N$

$$TCC = \frac{\sum(F - \bar{F})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum(F - \bar{F})^2} \sqrt{\sum(O - \bar{O})^2}} \quad (\text{식 3.6})$$

$$HSS = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n(F_i, O_i) - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)}{1 - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^k N(F_i)N(O_i)} \quad (\text{식 3.7})$$

여기서, O = 관측값, F = 모의값,  $\bar{O}$  = 관측값의 평균,  $\bar{F}$  = 모의값의 평균, N = 총 모의 및 실측 횟수이다.

### 3.3.8 기후변화에 따른 가뭄영향 평가

기후변화에 따른 가뭄 영향 평가는 Daily EDI를 이용하여 그림 3.10과 같이 특정 가뭄 크기보다 심한 가뭄이 발생한 시점으로부터 종료되는 시점 사이의 기간인 가뭄 지속시간(Duration) 및 가뭄 발생 기간 중에서 가장 심했던 가뭄 강도(Intensity)의 변화를 과거 기간과 미래기간을 비교함으로써 가뭄의 지속시간 및 강도의 변화를 살펴 보았다.

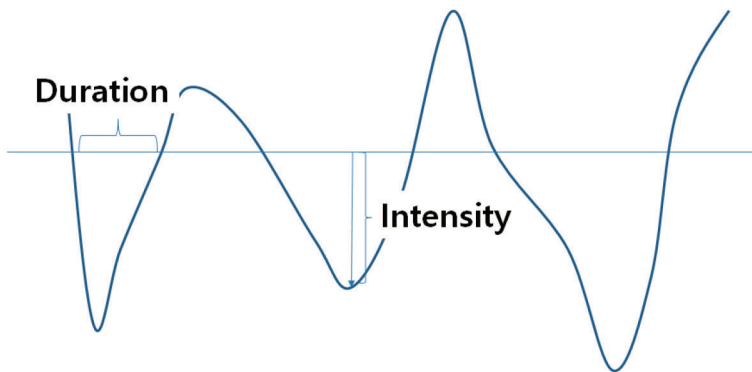


그림 3.10. 가뭄 지속시간 및 강도 개념도.

### 3.4 수자원 및 농업 모델링

#### 3.4.1 수자원 모델링

농업용수 관리를 위해 중요한 저수율 예측을 위해서는 댐 상류유입량, 수혜지구 필요수량이 우선 산정되어야 한다. 즉, 댐 상류유입량 모의를 위한 모형을 선정하여 관측유량 및 기상자료를 이용하여 모형을 검보정 한 후 계절예측 상세화를 통해 생산된 예측자료를 입력으로 하여 댐 상류 유입량을 예측하게 된다. 본 연구에서는 미국 농무성에서 개발한 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 사용하였다. 향후 APCC가 해외사업에서 고려해야 할 개도국의 많은 유역들이 미계측 유역이며 논을 포함한 농업이 주요 토지이용 형태임을 고려할 때 보편적으로 사용되는 HSPF와 SWAT 모형 중에서 모형의 검보정이 상대적으로 많이 필요하지 않으며 모형 입력으로 다양한 영농방법들을 고려할 수 있는 SWAT 모형을 선정하였다. 본 연구에서는 수혜지구에 대한 일단위 필요수량 산정 및 저수지 물수지 분석은 수행하지 않고 댐 유입량 분석만을 수행하였다(그림 3.11).

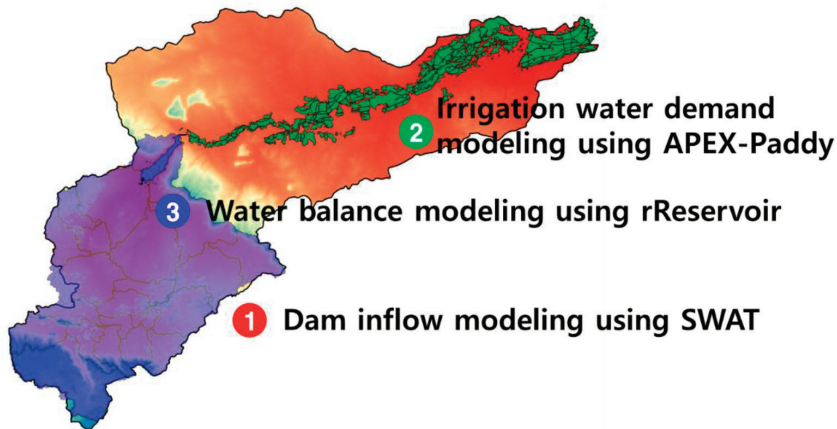


그림 3.11. 램타콩 유역에 적용한 수자원 모델링.

##### 3.4.1.1 댐유입량 모의를 위한 관측자료 수집 및 Global 데이터베이스 구축

SWAT 모형의 구동을 위해서는 지역에 대한 DEM, 토지이용도, 토양도가 필요하다. 태국의 RID를 통해 태국의 정밀 공간정보 획득이 어려움에 따라 대안으로 Global 데이터베이스를 구축하였다. 글로벌 데이터베이스는 향후 APCC에서 해외사업 수행 시 정밀

자료 획득이 어려운 상황에서 범용적으로 사용될 수 있는 장점이 있다.

DEM은 현재 두가지 해상도의 자료를 수집하였다. 250m 해상도의 경우는 전지구에 대한 자료이고 30m 해상도로 제공되는 Shuttle Radar Topography Mission(SRTM) 자료의 경우에는 필요시 USGS의 EarthExplorer(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)를 통해서 다운로드 받아 사용할 수 있다. 토지이용도는 United Nations University의 WaterBase 프로젝트를([http://www.waterbase.org/download\\_data.html](http://www.waterbase.org/download_data.html)) 통해 제공하는 400m 해상도의 토지이용도를 사용하였다. 토양도는 30 arc-second 해상도의 격자로 제공되는 Harmonized World Soil Database(HWSD)와 ArcGIS의 벡터 포맷으로 제공되는 Digital Soil Map of the World(DSMW) 자료를 수집하였다. 토양도의 경우에는 SWAT 모형입력 구축을 위해 속성 정보가 필요한데 속성정보는 ArcSWAT의 데이터베이스의 Usersoil 테이블에 관련 속성정보를 입력하여 구축하였다. 자료의 출처는 표 3.10에 제시하였다.

표 3.10. Global 데이터베이스 수집 리스트

데이터	출처
DEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resampled SRTM data to 250m resolutions for the entire globe <a href="https://hc.box.net/shared/1yidaheouv">https://hc.box.net/shared/1yidaheouv</a></li> <li>Shuttle Radar Topography Mission(SRTM) 30m resolution <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a></li> </ul>
Soil	<ul style="list-style-type: none"> <li>FAO Harmonized World Soil Database(HWSD): 30 arc-second raster database <a href="http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/">http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/</a></li> <li>Digital Soil Map of the World(DSMW): Vector Data <a href="http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116">http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116</a></li> </ul>
Landuse	<ul style="list-style-type: none"> <li>United Nations University: Originals at approximately 400 meter resolution <a href="http://www.waterbase.org/download_data.html">http://www.waterbase.org/download_data.html</a></li> </ul>
Country Administrative boundary	<ul style="list-style-type: none"> <li>DIVA-GIS <a href="http://www.diva-gis.org/gdata/">http://www.diva-gis.org/gdata/</a></li> </ul>

2는 다운로드한 글로벌 자료를 이용하여 태국의 람타콩 유역에 대한 DEM, 토지이용, 토양의 공간적인 분포를 보여준다.



그림 3.12. 램타콩 댐 유역에 대한 글로벌 데이터베이스로부터 추출한 DEM(좌), 토양도(중), 토지이용도(우).

램타콩 댐의 월단위 유입량, 방류량, 저류량 자료, 댐의 수위-내용적 곡선 등의 자료는 태국 왕립관개청(Royal Irrigation Department, RID)로부터 제공받은 자료를 사용하였다. 그림 3.13은 관측자료의 시계열 및 수위-내용적 곡선을 보여 준다.

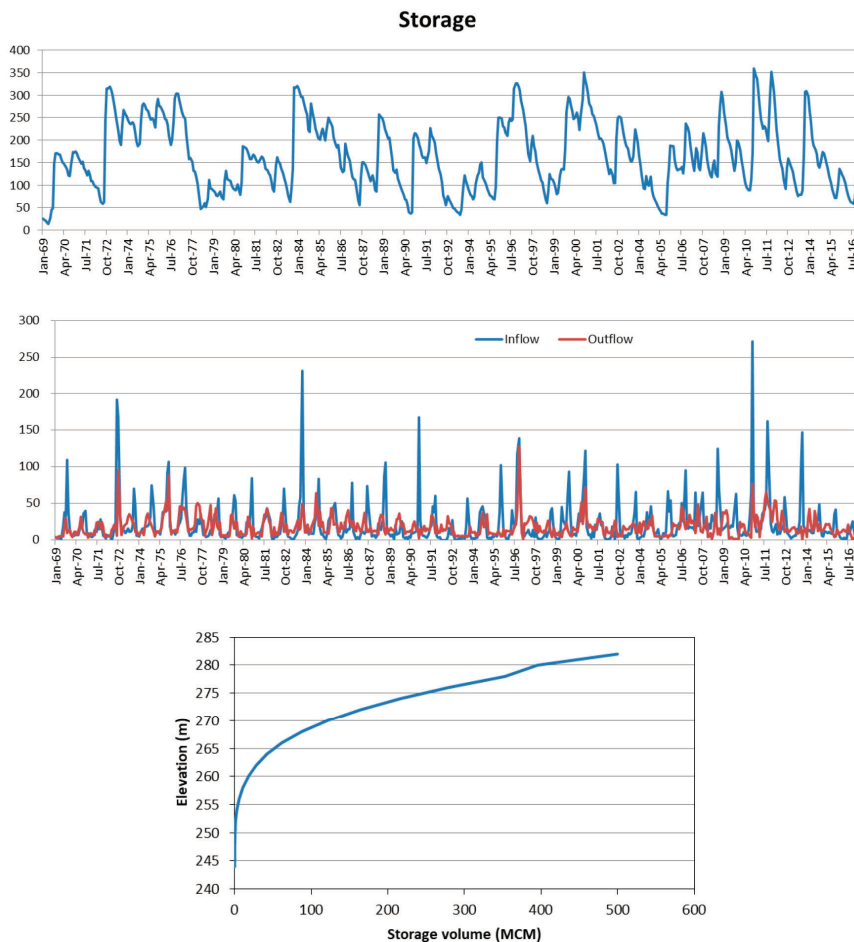


그림 3.13. 램타콩 댐의 저수량 변화(상), 유입량 및 방류량 변화(중), 수위에 따른 저류량(하).

### 3.4.1.2 기후정보 활용 SWAT 연계 모듈 개발

기후변화 시나리오 상세화 자료와 계절예측 상세화 자료를 이용하여 댐유입량 예측을 위한 SWAT 모형 구동을 위해서는 많은 수의 모형구동이 필요하다. 따라서 앞서 개발된 상세화 시스템을 통해 생산되는 자료를 이용하여 SWAT 모형을 구동하여 원하는 출구점의 모의 결과를 추출하는 반복 작업 수행을 위해서 R 기반의 패키지를 개발하였으며 패키지 내부 함수별 기능은 표 3.11과 같다.

표 3.11. rSWAT 패키지의 주요 함수 및 기능

구분	함수명/기능
입출력	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Swat.Write.Weather.Input.MultiStations: 관측, 기후변화, 계절예측 상세화 자료를 SWAT의 입력포맷으로 변경</li> <li>• Write.Cio.Input: CIO 입력 파일 수정(모의기간 설정 등)</li> <li>• Swat.Write.Rsv.Input: 저수지 입력파일 수정</li> <li>• Swat.Write.Mgt.Input: Management(영농방식) 입력파일 수정</li> <li>• Swat.Write.Resdayo.Input: 일단위 저수지 운영 입력자료 수정</li> <li>• Swat.Rch.Summary: 하천(Reach) 출력파일로부터 원하는 소유역, 변수(유량) 등 사용자 지정 결과 추출</li> <li>• Swat.Sub.Summary: 소유역(Subwatershed) 출력 파일로부터 사용자 지정 결과 추출</li> <li>• Swat.Hru.Summary: 수문반응단위(HRU) 출력 파일로부터 사용자 지정 결과 추출</li> <li>• Swat.Rsv.Summary: 저수지(Reservoir) 출력 파일로부터 사용자 지정 결과 추출</li> <li>• Swat.Calc.Error: 관측 유량자료 제공시 모의값과 비교를 통한 모의성능 결과 계산</li> <li>• Swat.Percent.Change.Parameter: 패키지를 이용한 모형의 보정 시 특정 입력파일의 변수의 값을 동일한 퍼센트지수로 변경</li> <li>• Swat.Fixed.Change.Parameter: 패키지를 이용한 모형의 보정 시 특정 입력파일의 변수의 값을 제공된 값으로 변경</li> <li>• Swat.Percent.Change.Soil.Parameter: 패키지를 이용한 모형의 보정 시 토양 입력파일의 변수의 값을 변경</li> <li>• Swat.Time.Series.Graph: 모의결과 템플릿에서 시계열 그래프 작성</li> <li>• Swat.Scatter.Plot.Graph: 모의결과 템플릿에서 분산형 그래프 작성</li> <li>• Swat.Summary.Graph.Table: 모의결과 템플릿에서 계산된 에러표, 시계열, 분산형 그래프를 통합하여 최종 PDF 생성</li> </ul>
관측기반	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Swat.Observation.Run: 관측 자료를 이용하여 SWAT 모형 구동</li> <li>• Swat.Observation.Rch.Analysis: 관측자료 기반의 SWAT모형 출력으로부터 사용자 지정 결과 추출</li> </ul>
기후변화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Swat.CChange.Run: 다중모형(GCM) 기반의 기후변화 시나리오 자료를 입력으로하여 SWAT 모형 구동</li> <li>• Swat.CChange.Rch.Analysis: 기후변화 시나리오 자료 기반의 SWAT 모형의 출력으로부터 사용자 지정 결과 추출</li> </ul>
계절예측	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Swat.SForecast.Run: 다중모형 기반의 계절예측 시나리오 자료를 입력으로하여 SWAT 모형 구동</li> <li>• Swat.SForecast.Rch.Analysis: 계절예측 자료 기반의 SWAT 모형 출력으로부터 사용자 지정 결과 추출</li> </ul>

### 3.4.1.3 계절예측 자료를 이용한 댐유입량 평가

예측성 평가를 위해서는 SWAT 모형의 매개변수 결정이 필요하다. 이후 결정된 매개변수를 고정시켜 놓고 계절예측 및 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 유입량 예측성 및 전망을 평가하게 된다. 따라서 모형의 보정을 위해 과거기간의 관측자료가 필요하며 본 연구에서는 RID에서 제공해 준 월단위 유입량 자료를 사용하였다.

계절예측 자료를 활용한 댐유입량 예측성 평가의 경우에는 예측유량과 RID로부터 수집한 월단위 관측유량과의 비교를 통해 예측성을 평가할 수 있다. 하지만 관측유입량이 실제 관측된 유량이라기 보다는 수위 변동에 따라 수위-내용적 곡선을 이용하여 추정된 값이기 때문에 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 SWAT 모형의 제한사항 및 관측자료의 불확실성을 고려할 때, 유입량 예측의 예측성 평가시 SWAT 모델링 자체의 불확실성을 제거하기 위해 관측 기상자료를 입력으로 도출된 유입량을 관측유량으로 가정하여 예측 기상자료를 입력으로 도출된 유입량과 비교함으로써 계절예측에 따른 유입량의 예측성을 평가하였다. 즉, 유입량 예측에 있어서 전체 불확실성이 강우 예측에 의한 불확실성과 SWAT 모델링에 의한 불확실성 중에서 어떤 과정에서 주로 기인하는지를 판단하기 위해서 모델링 방법을 고정시킨 후 기상입력자료만을 바꿔 예측성을 비교하는 것이 필요하다.

유입량 예측은 1983년 1월부터 2012년 12월까지 매달에 향후 6개월에 대하여 예측된 강수량을 이용하여 SWAT 모형을 구동하였다. 이때 SWAT 모형을 초기화하기 위하여 예측시점으로부터 과거 2년의 관측 기상자료에 향후 6개월에 대한 예측자료를 연결하여 모의하였다. 예측성 평가는 매월 독립적으로 예측된 유량결과로부터 월별, 선행시간별 예측결과를 추출하여 이에 상응하는 관측자료기반 유량값 사이의 Temporal Correlation Coefficient(TCC)값을 식3.6을 이용하여 평가하였다. 계절기후예측 상세화 결과가 강수량 기준으로 다중예측 결과가 있을 경우 중앙값(MME), 최저값(MIN), 최고값(MAX)의 3가지 경우로 제공하는 점을 고려할 때, 예측성은 MME 값을 기준으로 평가하였다.

### 3.4.2 농업 모델링

#### 3.4.2.1 대상 작물 및 벼 생육모형 선정

람타콩 소유역의 주요 재배작물은 벼이며, 주요 벼 품종은 일반적으로 우리에게 알려진 향기가 나는 찰스민 쌀로 KDML 105 품종과 찰진(glutinous) 쌀 품종으로 태국 농업청(Department of Agriculture, DOA)의 쌀 연구부(Rice Department, RD)에서 개량한 품종 RD6으로 선정했다(그림 3.14). 선정된 주요 이유 중 첫번째는 북동부 지역의 주요 벼 재배품종이라는 것과 두 번째 이유는 벼 생육모형을 모의하기 위해서는 이 품종들에 대한 유전모수 정보가 필요한데 이 품종들에 대한 유전모수 연구 결과가 이미 발표되어 있기 때문이다(Babel et al., 2011).

본 연구에서 활용할 벼 생육모형으로는 전 세계적으로 많은 사용자와 개발자, 많은 연구 결과를 가지고 있는 DSSAT package 4.5의 CERES-Rice(Hoogenboom, et al., 2010; Keating et al., 2003)를 선택했다. 사용자 및 개발자들이 많고 이미 많은 연구 사례로부터 이 모형의 정확성에 대한 신뢰가 어느 정도 인정되기 때문이다.

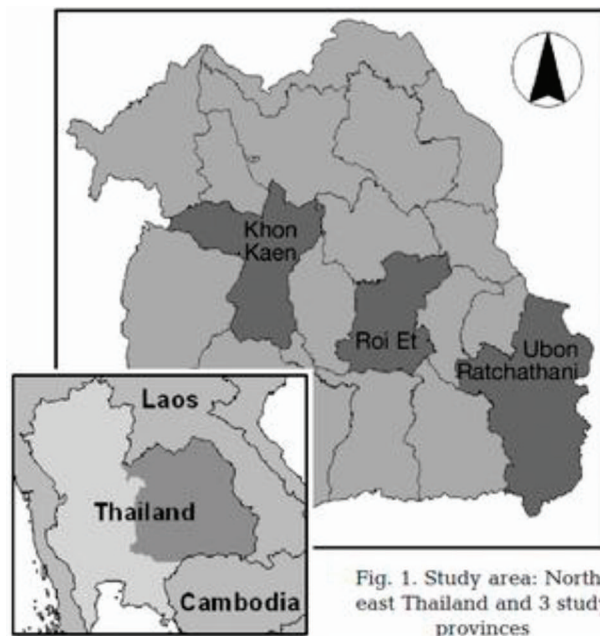


Fig. 1. Study area: North-east Thailand and 3 study provinces

그림 3.14. 벼의 유전모수가 작성된 지역(Babel et al., 2011).

### 3.4.2.2 벼 생육모형 시뮬레이션을 위한 입력 데이터베이스 수집

CERES-Rice 시뮬레이션을 위한 최소 데이터베이스로는 기상, 토양, 작물의 재배 및 작물의 유전정보 등이 필요하다. 표 3.12은 CERES-Rice 구동에 필요한 정보를 담고 있는 파일 정보들이다.

먼저, 기상 정보로는 관측 및 예측 기후 자료가 필요한데, 최소한의 기후 요소는 일별 최고 및 최저기온, 일별 적산 강수량과 일사량이다. 본 연구에서 람타콩 소유역을 포함한 북동부 지역의 22개 지점의 관측 기후자료는 TMD로부터 1983년 7월부터 2016년 12월까지 수집됐다(표 2.3). 22개 기상 관측지점 중 1개 관측지점(Nakhon Ratchasima, TH431201)이 람타콩 소유역의 람타콩 댐의 관개 지역에서 하루에 위치해 있다(그림 3.15). 추가적으로, 람타콩 소유역에는 포함되어 있지 않지만 람타콩 댐으로부터 약 150km 이내로 북서쪽에는 농업기상을 관측하는 Pak Chong Agromet(TH431301)이 있다. 본 연구에서 Pak Chong Agromet 지점이 람타콩 소유역에서 벗어나 있지만 Nakhon Rachasima(TH431301)의 관측기온 및 관측강수 비교시 참고 지점으로 활용했다. 그런데 수집된 북동부 지역 22개 지점의 관측기후 자료에는 결측 기간이 많았는데, 특히 2013년 이후에는 결측 기간이 2~3개월씩 길어서 최근 연구에 대한 분석이 어려웠다. 또한 관측 강수의 결측이 많았으며, 일사량의 경우는 일사량이 아닌 일조시수가 수집되었는데, 벼 생육모형을 구동하기 위해서는 일사량으로의 변환이 불가피 했다. 그래서 일조시수와 가조시수와의 관계를 이용해서 일사량으로 변환하는 많은 선례 연구 방법을 차용(Angstrom, 1924; Black et al., 1954)하여 관측 일별 일조시수로부터 일별 일사량을 변환해서 입력했다.

표 3.12. CERES-Rice 시뮬레이션에 필요한 최소 파일

File extension name	Description
.CUL	Genetic coefficient information
.WTH	Weather information
.SOL	Soil parameters information
.RIX	Experiment file for CERES-Rice

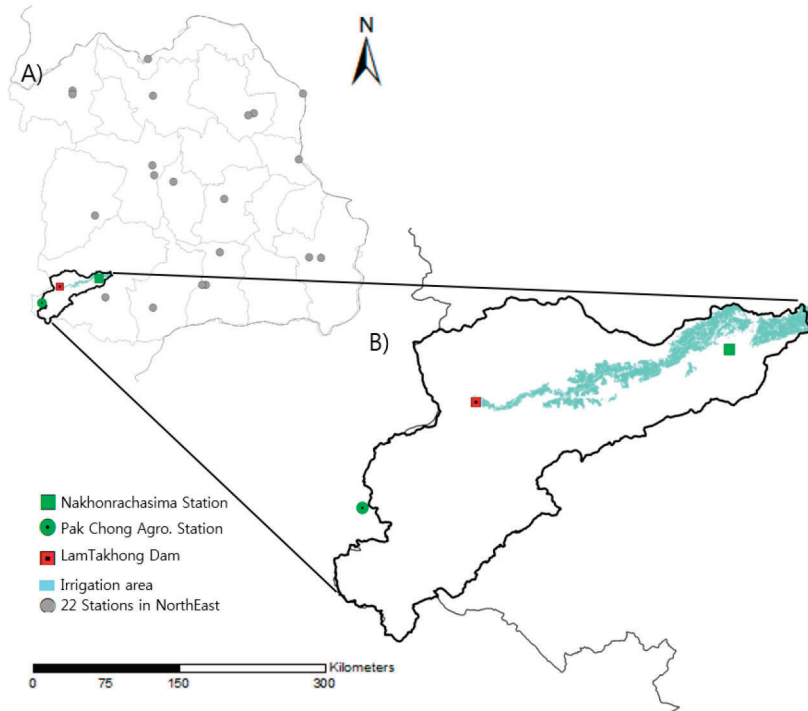


그림 3.15. 태국 북동부 지역의 22개 기상 관측지점과 램타콩 댐 램타콩 소유역 안의 비 관개지역(천수답)과 Nakhon Rachasima(TH431201) 기상 관측지점.

토양 정보로는 토성(soil texture)과 토층별(soil profile) 수분 및 유기물 함량 등의 정보가 필요하다. 본 연구에서는 Food Agriculture Organization(FAO)의 WISE dBASE로부터 Nakhon Rachsima 지점의 토양 정보를 추출해서 입력했다(그림 3.16).

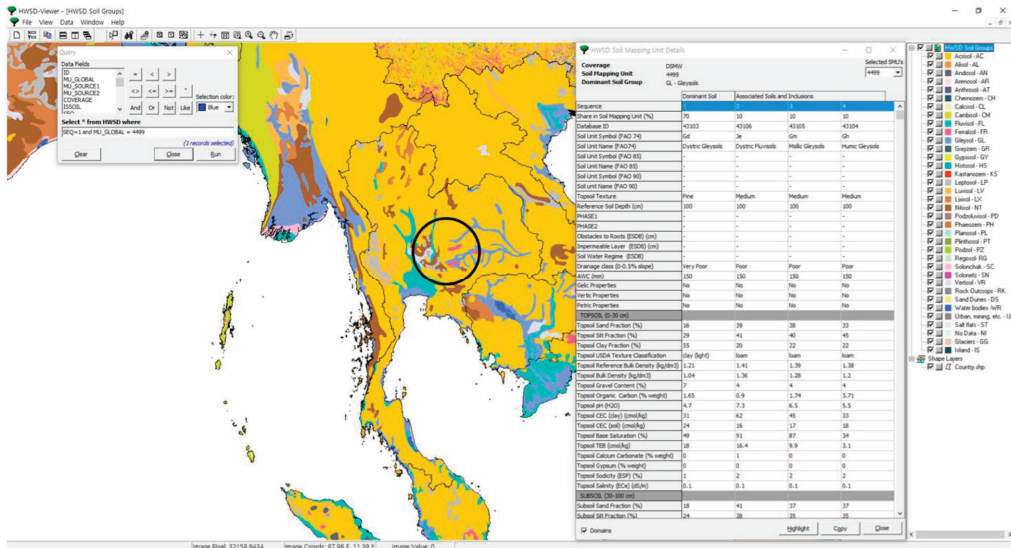


그림 3.16. FAO의 Harmonized World Soil dBase에서 태국의 북동부 지역 랍타콩 소유역의 토양 정보.

작물 재배 정보로는 재배 환경, 즉 휴복 및 파종밀도, 파종일, 파종 전 토양 관리 사항 및 경운과 시비 여부, 관개량과 관개일정 등의 정보가 필요하다. 벼, 즉 KDML 105와 RD6의 유전정보를 작성하기 위해서는 랍타콩 소유역의 벼 재배지역에서 수년 동안 이 품종들이 재배된 정보로써 앞서 언급한 정보 이외, 수년 동안의 관측 수량구성요소(수수, 수수당립수, 천립중 등)에 대한 정보들이 필요하다. 이러한 정보는 대상 지역과 대상 재배 작물에 대해 지역적 특성이 강하고 정밀한 정보이기 때문에 태국의 DOA 혹은 RD, 혹은 태국 농업 관련 기관으로부터 수집된 자료가 필요하다. 그러나 아직 DOA 혹은 RD로부터 대상 재배 작물인 벼의 품종과 관련된 관측 생육 자료의 수집이 지연되어 앞서 3.4.2.1절에서 언급한 바와 같이 Babel et al. (2011)에 의해 작성된 유전모수를 그대로 이용했으며, 작물 재배 환경 정보 및 파종시기는 RD의 보고서를 참고하여 작성하였다. 또한 FAO Statistics National dBASE로부터 태국 국가 전체의 1990년부터 2014년까지의 벼 생산량(수량 포함) 정보를 수집했으며, 태국 북동부 주(행정구역, province)의 전체 벼 생산량(수량 포함)은 2013년 태국 통계청의 농업 전체 통계 자료 (2013 Agriculture Census)에서 수집됐다.

### 3.4.2.3 관측 기후 기반의 벼 생육모형 시뮬레이션

람타콩 소유역의 하류 지역에 위치한 기상 관측지점(Nakhon Rachasima, TH431201)의 1984년 1월부터 2016년 12월까지의 관측 기후자료를 CERES-Rice의 입력 기상자료(.WTH)로 변환해서 CERES-Rice를 구동했는데, 벼에 대한 실제 관측 수량자료가 수집되지 않았기 때문에 기후정보 활용 및 예측성 분석 및 평가를 위해, 본 연구에서는 이것을 관측 기후 기반의 시뮬레이션이라고 명명해서 벼 수량에 대한 기준(base)이라고 가정했다. 북동부 지역에서 KDML 105와 RD6이 주요 재배기간(main growing season)는 몬순(monsoon)이 시작되는 5월부터 우기(wet season)가 시작되는 10월 중순까지이며, 주요 재배시기의 파종시기의 시작은 5월이다. TMD에 의하면 5월은 우기(wet season)가 시작되는 월이라고 볼 수 있는데, RD 보고서에 의하면 북동부 지역에서는 대부분 우기가 시작되는 5월에 파종하며, 파종이 지연되는 경우는 7월까지 늦어질 수 있다고 하였다. 두번째 재배기간(second growing season)은 10월 말부터 4월 건기가 끝나는 시기로 알려져 있다.

이와 같이 아열대 기후대를 가진 태국은 일년 내내 벼 재배가 가능한 즉, 이기작이 가능한 지역이다. 그래서 파종시기를 매일 가능하게 설정할 수 있는데, 본 연구에서는 북동부의 계절 정보에 따라 우기가 시작되는 5월에 파종시기를 시작으로 일주일 간격으로 1년 내내 파종하는 것으로 설정했다(표 3.13). 다만, 수집된 관측 기후자료에서 1983년 7월부터 12월까지의 관측 기후자료는 이용할 수 없기 때문에, 관측 기후 기반의 시뮬레이션 기간은 1984년 1월부터 2016년까지 설정했다.

또한 세계기상기구(World Meteorology Organization, WMO)의 ‘최근 30년 평년 기후’의 의미는 1981년 1월부터 2010년 12월까지 30년 동안의 관측 기후를 평균한 것이라고 정의되어 있다. 본 연구에서 수집된 TH431201의 관측 기후 자료가 1983년 7월부터 2년 6개월 동안의 관측 자료가 부족하지만, 1983년 7월부터 2010년 12월까지의 관측 기후를 평균하여 TH431201의 ‘최근 평년 기후’로 설정했다. 또한 TH431201의 평년 기후자료에 의한 CERES-Rice 구동을 최근 평년 기후 기반의 시뮬레이션이라고 명명했다.

표 3.13. CERES-Rice 시뮬레이션에서 설정한 전체 파종시기

Week	Month	Planting days	
		Days	Day of year
1~4	January	7, 14, 21, 28	7, 14, 21, 28
5~8	February	4, 11, 18, 25	34, 42, 49, 56
9~12	March	4, 11, 18, 25	63, 70, 77, 84
13~17	April	1, 8, 15, 23, 30	91, 98, 105, 112
18~21	May*	7, 14, 21, 28	126, 133, 140, 147
22~25	June	4, 11, 18, 25	154, 161, 168, 175
26~30	July	2, 9, 16, 23, 30	182, 189, 196, 203, 210
31~34	August	6, 13, 20, 27	217, 224, 231, 238
35~38	September	3, 10, 17, 24	245, 252, 259, 266
39~43	October	1, 8, 15, 22, 29	273, 280, 287, 294, 301
44~47	November	6, 13, 20, 27	308, 315, 322, 329
48~52	December	4, 11, 18, 25, 31	336, 350, 357, 364

\*: 본 연구에서 중점적으로 언급 및 분석된 파종시기

#### 3.4.2.4 상세화된 계절내 및 계절예측 기반의 벼 생육모형 시뮬레이션

3.2.2절에 의해 수집 및 공간 상세화된 일별 계절내예측 기후자료와 3.2.2절에서 월별 계절예측 기후자료의 상세화된 일별 계절예측 기후자료 역시 CERES-Rice의 WTH로 변환되었다. 이들 계절내 및 계절예측 기후자료에 의한 CERES-Rice 구동을 계절내 혹은 계절예측 기반의 시뮬레이션이라고 명명했다.

먼저, 계절내예측 기후자료는 3.1절과 3.2절에서 언급된 바와 같이 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 일별 계절내예측 기후자료인데, 수집된 ECMWF의 일별 계절내예측 기후자료의 공간 해상도는 약  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (약 100km x 100km)이상으로 작물 생육모형에서 바로 활용하기에 적합하지 않은 공간 해상도이다. 이러한 이유로 3.2.1절에서 ECMWF의 계절내예측 기후자료는 공간 상세화 기법에 의해 상세화되었는데, 올해(2017년)에는 기후요소 중 강수에 대한 공간 상세화 기법만 개발되어 있어서 강수에 대해서만 공간 상세화되었다. 즉, 공간적으로 상세화된 ECMWF의 일별 계절내예측 기후자료는 강수뿐이며 기온(일 최고 및 최저기온)은 아직 공간 상세화되지 않아서, 1차년 연구(2017년)의 계절내예측 기반 시뮬레이션에서 계절

내예측 기온자료의 활용 및 예측성은 평가하지 않았다.

또한 수집된 ECMWF의 일별 계절내예측 기후자료의 예측 시점은 2015년 5월 14일부터 7일 간격으로 9월 24일까지이다. 이때 과거기간은 1994년부터 2014년 동안 11개 기후모형에서 모의된 것이고, 2015년에 대한 예측은 51개 기후모형에서 모의된 것이다. 그래서 계절내예측 강수의 예측성을 확인하기 위해 예측 기간별로 공간 상세화된 ECMWF의 일별 계절내예측 강수 자료로 대체되도록 WTH를 작성한 후, 상세화된 일별 계절내예측 강수 정보에 따른 CERES-Rice로부터 벼의 잠재수량의 예측성을 진단했다(그림 3.18).

계절예측 기후의 경우는, 1984년부터 2016년까지 최소 1개월에서 최장 6개월 예측 선행기간(lead time)에 대한 APCC의 MME 월별 계절예측 자료는 3.2.2절의 계절예측 상세화 방법에 의해 일별로 상세화됐다. 계절예측 상세화 기법의 경우 이미 기온과 강수에 대한 시공간 상세화 기법이 개발됐기 때문에 APCC의 월별 계절예측 기후 정보는 일 최고 및 최저 기온과 강수에 대해 상세화됐다. 계절예측 기반 CERES-Rice 시뮬레이션에서도 Lead time 기간에 대해 계절예측 자료가 대체되도록 WTH가 작성됐다(그림 3.18과 그림 3.19). 역시 상세화된 일별 계절예측 기온과 강수에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량의 예측성을 평가했다.

전체 계절내 및 계절예측 기반의 시뮬레이션에서 파종시기 및 재배 환경 정보(휴복 및 밀도, 시비량) 등은 3.4.2.3절의 관측 기후 기반의 시뮬레이션에서 적용한 정보를 이용했다.

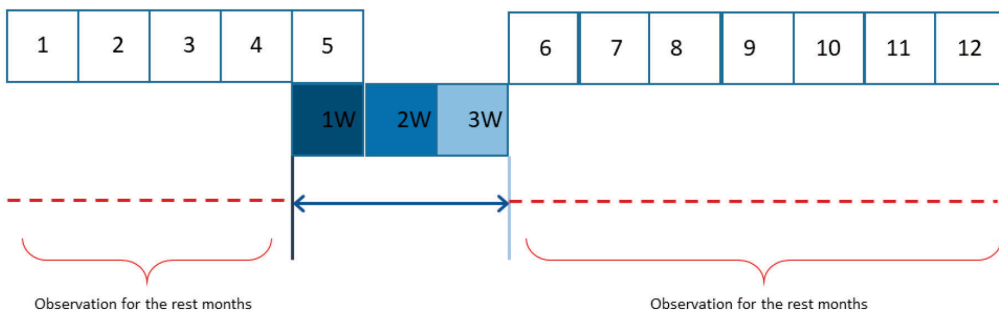


그림 3.17. 예측선행시점(1W, 2W etc)별 계절내예측 기후정보의 재단(tailoring) 개념(design). 1W는 예측선행시점 인 5월 14일, 2W는 예측선행시점 5월 21일, 3W는 예측선행시점 5월 28일을 의미함.

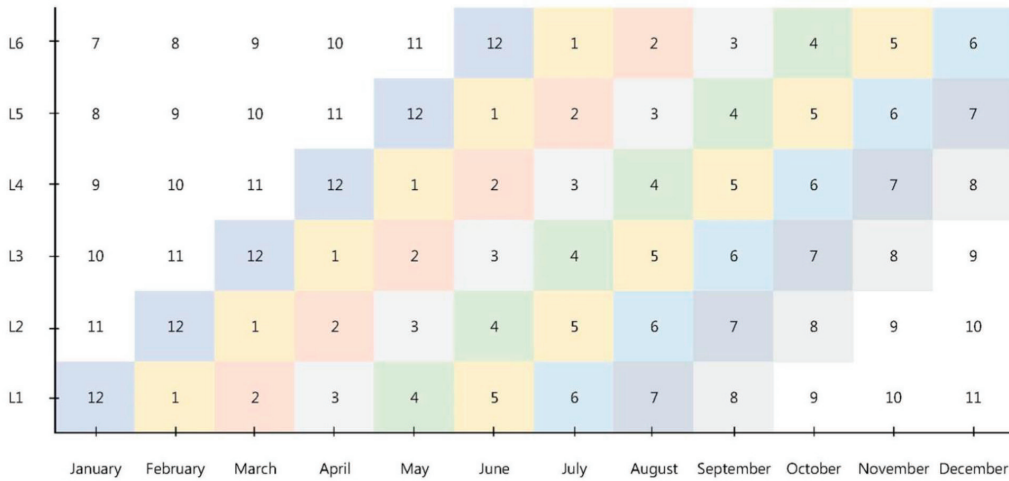


그림 3.18. 예측선행기간(lead time)별 월별 예측 시점(월). 1월의 계절예측 정보에 대한 최소 예측선행시점(L1)은 0전 월(month)인 12월에 생산되고, 1월의 계절예측 정보에 대한 최대 예측선행시점(L6)은 6개월 전인 7월에 생산됨을 표현함.

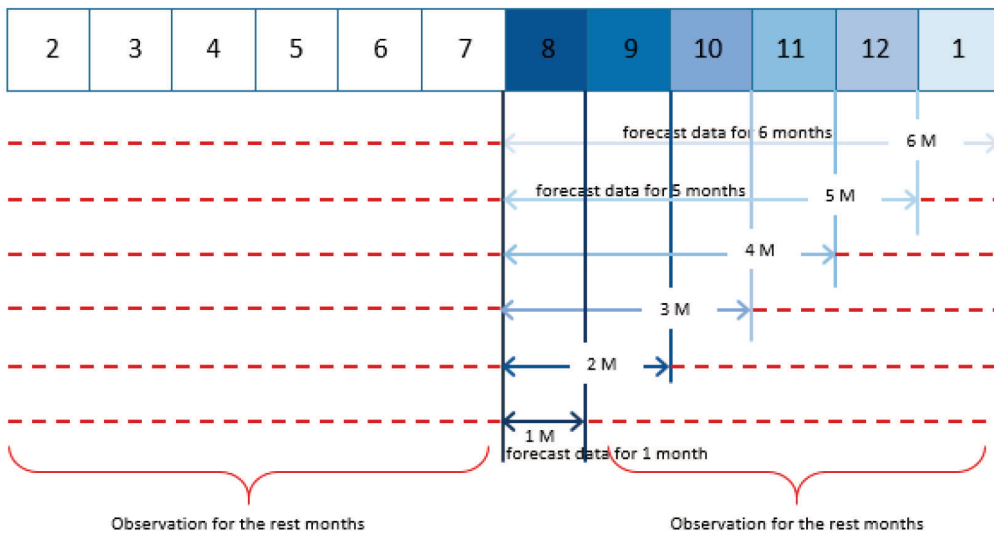


그림 3.19. 최소 예측선행기간 1개월(1M)에서부터 가장 예측선행기간 6개월(6M)별로 계절예측 기후정보의 재단 (tailoring) 개념(design). 즉, 계절예측 기후 기반 작물모형 시뮬레이션을 위한 입력 기후자료(예, WTH)의 재단방법을 표현함.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 기후정보

#### 4.1.1 태국의 기후

태국 기상청은 지리적 위치에 따라 태국을 크게 6개의 영역(북부, 북동부, 동부, 중부, 남서부, 남동부)으로 나누는데, 이들 지역간 계절 특성에 차이가 존재한다. 태국의 연강수량은 평균 약 1,200-1,600 mm이나 그림 4.1와 같이 지역적인 차이가 있다

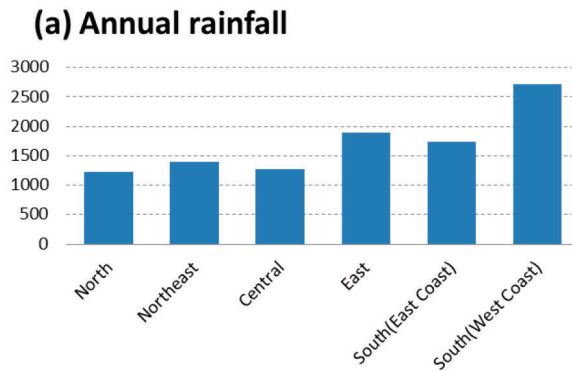


그림 4.1. 지역에 따른 1981-2010 연평균 강수량(TMD, 2017).

본 연구의 태국내 기후분석은 Mae Nam Khong, Mae Nam Chi, Mae Nam Mun 의 3개의 주 수문유역을 포함하는 고원 평원지대로서, 북동부 지역(NorthEastern)에 중점을 두어 수행하였다(그림 4.2a). EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석결과 북동부 지역은 강수량, 온도, 해면기압의 변동성에서 공간적으로 일관적인 특성을 보였기 때문에 태국에서 이용하던 기존의 기후대 구분을 사용하는데 무리가 없는 것으로 확인되었다.

그림 4.2b에서 나타나듯 북동부 지역은 기후학적으로 10-2월 기간의 건기, 3-4월 기간의 pre-monsoon, 5-9월의 몬순 기간을 거친다. 5월과 6월에는 인도양에 서풍이 강화되며 인도양으로부터 습한 공기가 유입되어 산사면에 많은 비를 뿌리는 southwest 몬순이 시작되며 7-9월에는 ITCZ의 북진과 태풍의 영향으로 많은 강수가 나타나게 된

다(그림 4.2b)(Zhang et al., 2002; Cook and Buckley 2009). 북동부 지역의 강수량은 경년 변동성과 함께 1976년 이후로 점차 증가하고 있는 추세인데(그림 4.2c), 1990년대 중반 이후로 강수량뿐 아니라 변동성 또한 증가하였다. 따라서 가뭄과 홍수에 대한 취약성도 증가하였다(Limsakul and Singhruck 2016).

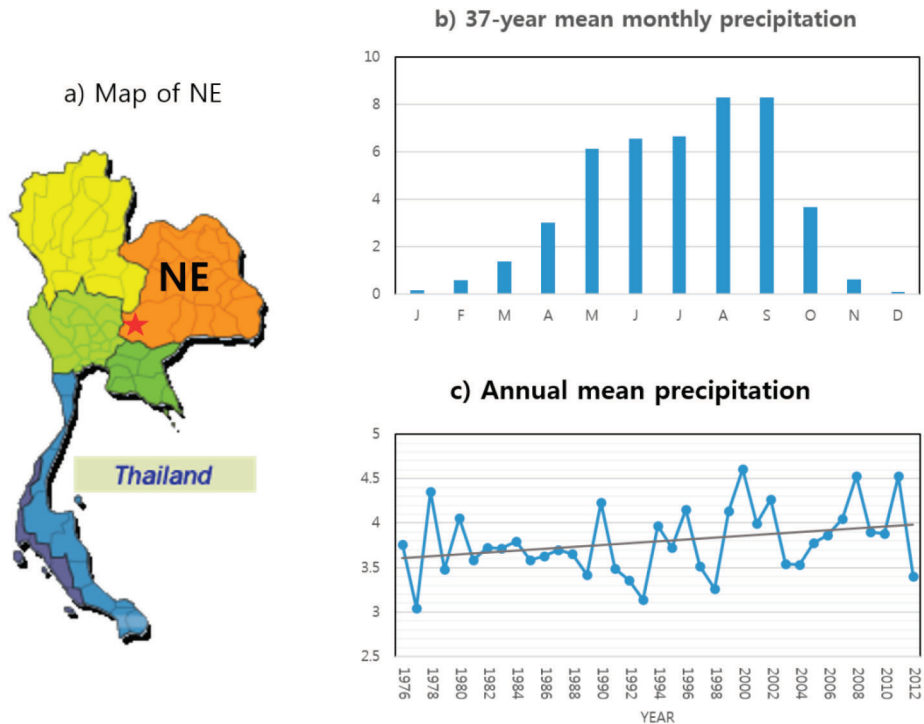


그림 4.2. a) Map of Northeastern Zone (NE) (orange color) of Thailand. Star indicates the location of Lam Takong. b) 37-year (1976–2012) mean monthly precipitation in NE. c) Time series of annual precipitation in NE. Scale of y-axis in b) and c) is mm/day.

#### 4.1.2 계절내 강우 특성

태국의 주요 쌀 생산지역인 북동부 지역에서 강수량은 중요한 자원 중의 하나로서 강수량의 변동성은 이 지역 주민들의 작물 생산 및 소득에 지대한 영향을 미치므로, 가용수자원의 효율적인 운영은 필수적이다.

여름철 강수의 계절내 변동성은 경년 변동성과 더불어 아시아 몬순 지역 우기 동안 강수의 특징을 결정짓는 주요한 변동성 중의 하나이다. 특히, BSISO(Boreal Summer

IntraSeasonal Oscillation)는 아시아 여름 몬순의 시작과 종료, 집중호우 발생 등과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Annamalai and Slingo, 2001). BSISO는 크게 10-20일, 30-60일 주기를 갖는 성분으로 나누어지는데, 각각에 해당하는 성분을 추출하기 위해 Lee et al. (2012)은 5월 1일부터 10월 31일 동안의 아시아 몬순 영역 내(10°S-40°N, 40°-160°E) 상향장파복사와 850 hPa의 동서바람장을 주성분 분석하여 얻어진 지수를 고안하였다. 이렇게 고안된 BSISO 지수는 어떠한 시간 필터링도 필요치 않기 때문에 실시간으로 적용하여 예측에도 활용될 수 있는 이점을 가지고 있다. 주성분 분석의 첫째, 둘째 모드를 바탕으로 한 BSISO1 지수는 30-60일 주기로 아시아 몬순 지역 내에서 동진하는 대류활동을 탐지하는데 사용될 수 있고, 주성분 분석의 셋째, 넷째 모드를 바탕으로 한 BSISO2 지수는 10-30일 주기를 가지고 북진/서북진하는 대류활동을 탐지하는데 사용된다.

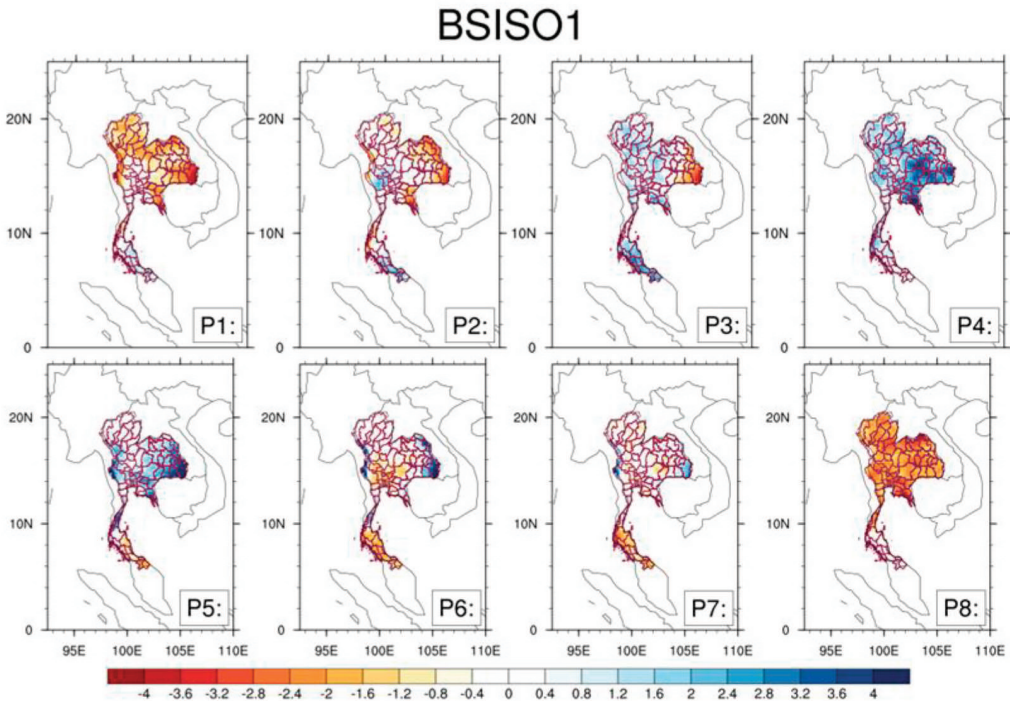


그림 4.3. BSISO1 지수를 이용한 5월부터 9월 태국 지역 APHRODITE 일강수 편차 합성분석장(1981-2007).

그림 4.3을 통해 태국 여름철 BSISO1에 의한 강수 생애 주기를 살펴볼 수 있다. 기후 값을 제거한 강수 편차를 합성 분석한 결과로서 지역별 강수량의 수평적 분포에는 다소 차이가 존재하나, 위상 4에 양의 강수 편차가 비교적 넓은 부분에 걸쳐 분포하는 반면, 위상 8의 경우 음의 강수 편차가 태국 전역을 지배하고 있다.

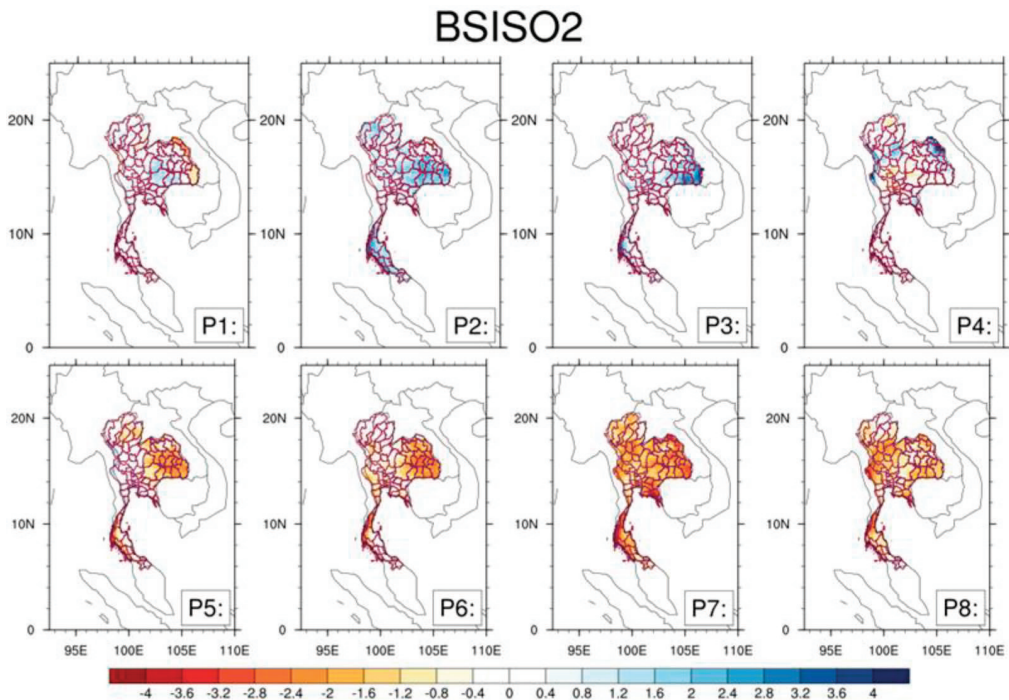


그림 4.4. 그림 1.3과 동일하나 BSISO2지수에 의한 합성장.

그림 4.4의 경우 BSISO2와 관련된 강수 편차 합성장을 나타내는데, 위상 1부터 4까지 양의 강수 편차가 태국 곳곳에 나타나는 반면에 위상 5-8에는 음의 강수 편차가 나타난다. 이러한 BSISO 각 모드의 위상에 따른 강수 합성장 분포의 발달과정을 이해하기 위하여 보다 넓은 지역에서의 하층 및 상층 대기 수평분포를 살펴 보았다(그림 4.5, 그림 4.6). 양의 강수 편차가 가장 넓게 분포하는 BSISO1의 위상4의 경우, 인도양 북부 벵갈 만과 아라비아해에 걸쳐 저기압성 순환이 하층에 존재하고 필리핀 북동쪽에 강한 고기압성 순환이 위치하고 있다. 벵갈만과 아라비아해에 걸쳐 분포하고 있는 저기압성 순환 가장자리를 따라 태국 지역에 대기 하층의 남서풍이 불면서 이를 통해 다량의 수증기가

태국 지역에 유입되게 된다. 이렇게 인도양 북부에 발달한 저기압은 점차 북동쪽으로 이동하여 위상 8에 이르러 필리핀해 북쪽에 위치한다.

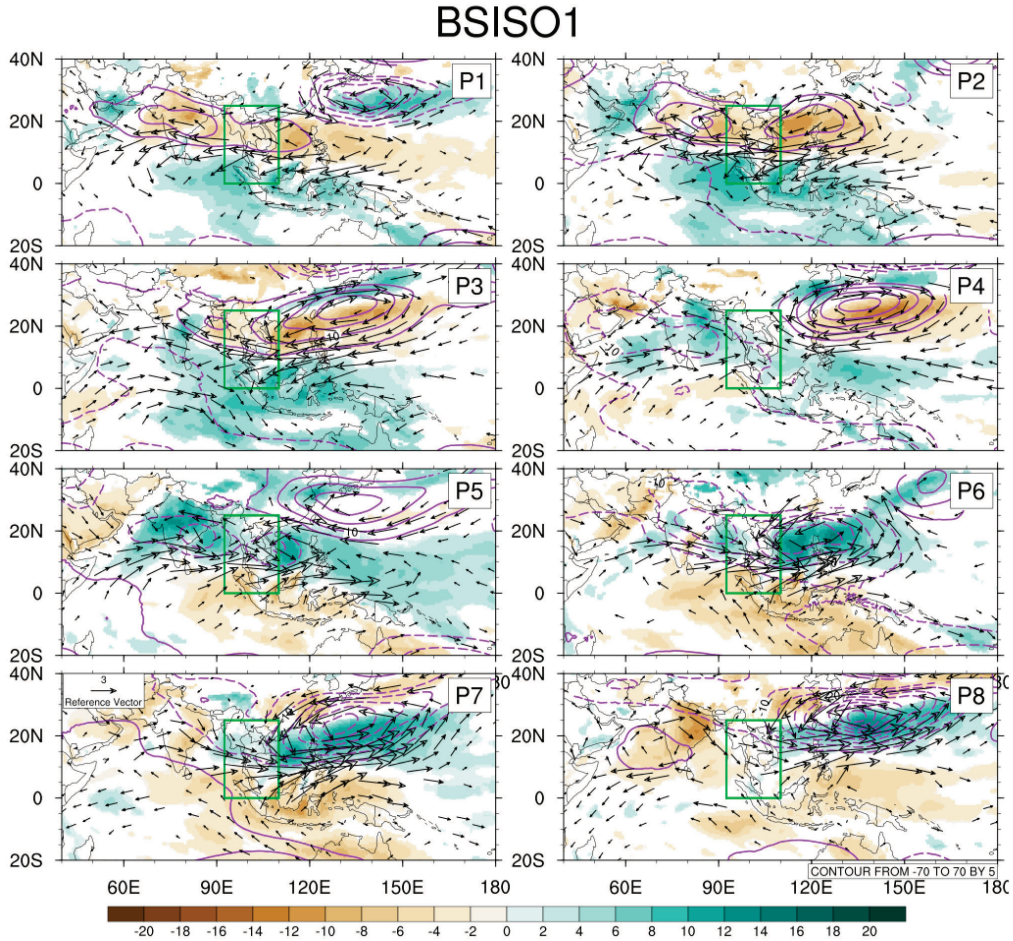


그림 4.5. BSISO1 위상에 따른 여름철 500 hPa 지위고도(m, 등치선), 850hPa 바람장(m/sec, 벡터), 그리고 200hPa 비습( $\times 10^4$  Kg/Kg, 채색) 편차 합성장. 5% 유의한 값만 표현. 녹색 상자는 태국 지역을 나타냄.

이 시기 태국에는 아라비아해 고기압성 순환의 가장자리에 위치한 육지로부터 불어오는 북서풍의 유입으로 수증기의 공급이 확연하게 줄어들게 된다.

반면에, 그림 4.6의 BSISO2 위상에 따른 대기순환장의 발달을 살펴보면, BSISO2의 위상 1에 남서-북동으로 기울어진 저기압성 순환이 인도양 북동쪽과 서태평양에 걸쳐 발달하여 위상의 증가와 함께 점차 북서진 하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인한 남서풍

에 의해 태국 지역의 양의 강수 편차가 증가하게 되는 것이다. 뒤따라 발생하는 하층 고기압성 순환에 의해 남서류의 유입이 중단되면서 위상 6-8의 시기에 태국 지역의 강수량이 감소하게 된다.

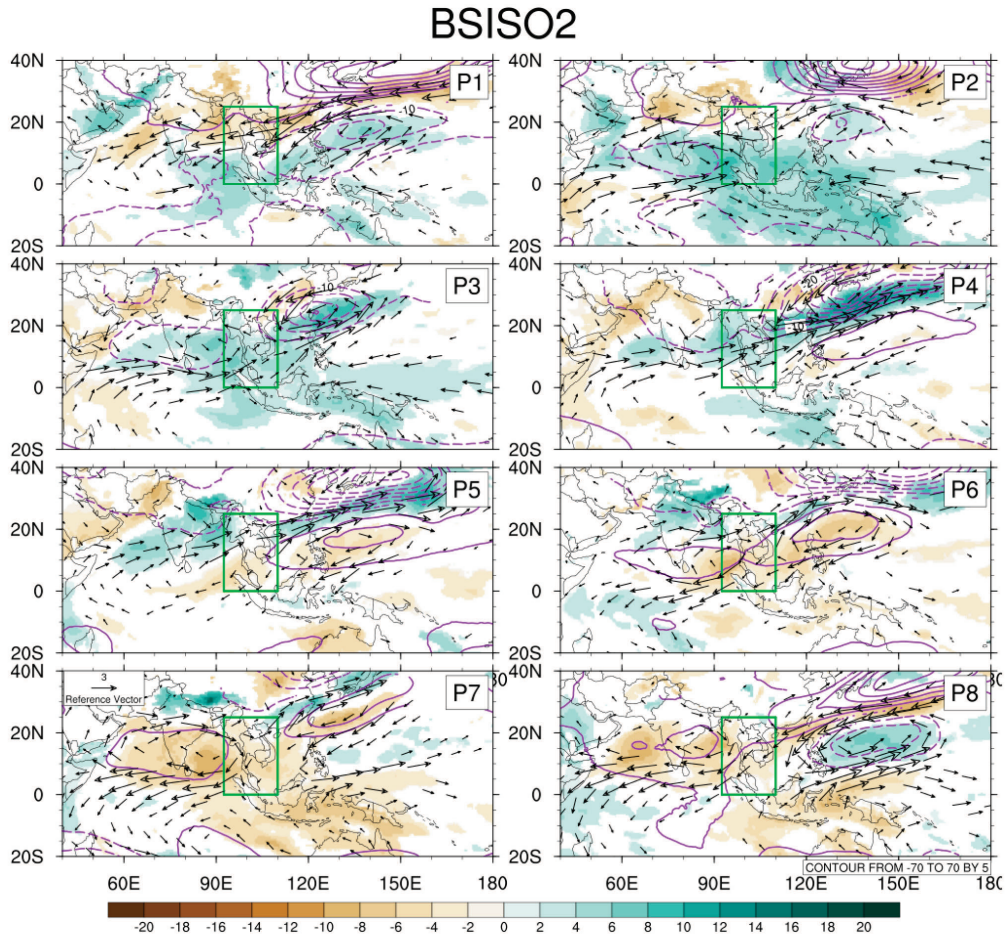


그림 4.6. 그림 2.5와 같으나 BSISO2에 의한 합성장.

그림 4.3과 그림 4.4에서 보인 BSISO 위상에 따른 태국 지역 강수 편차 합성장 결과를 태국 북동부 지역( $14.25^{\circ}\text{N}$ - $17.25^{\circ}\text{N}$ ,  $100.75^{\circ}\text{E}$ - $104.75^{\circ}\text{E}$ )에 대해 영역 평균하면 각각 그림 4.7과 그림 4.8과 같다. 태국 북동부의 경우, BSISO1의 위상 4의 시기에 강수 편차가 양의 최대값을 갖는 반면, BSISO2의 위상 2의 시기에 최대값을 갖는다.

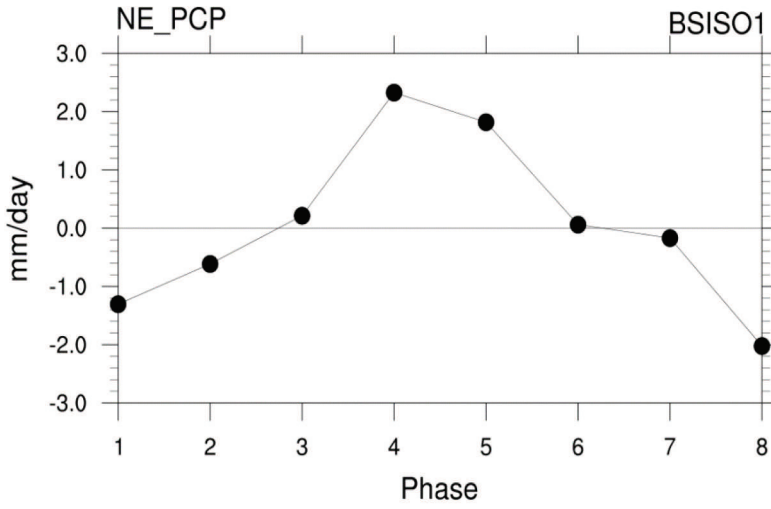


그림 4.7. BSISO1 위상에 따른 강수 편차 합성장의 태국 북동부지역 영역 평균.

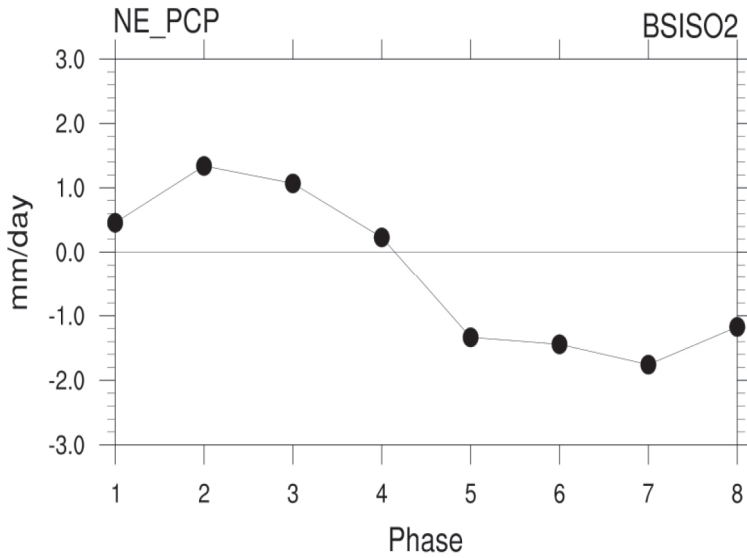


그림 4.8. 그림 3.7과 유사하나 BSISO2 지수와 관련되어 있음.

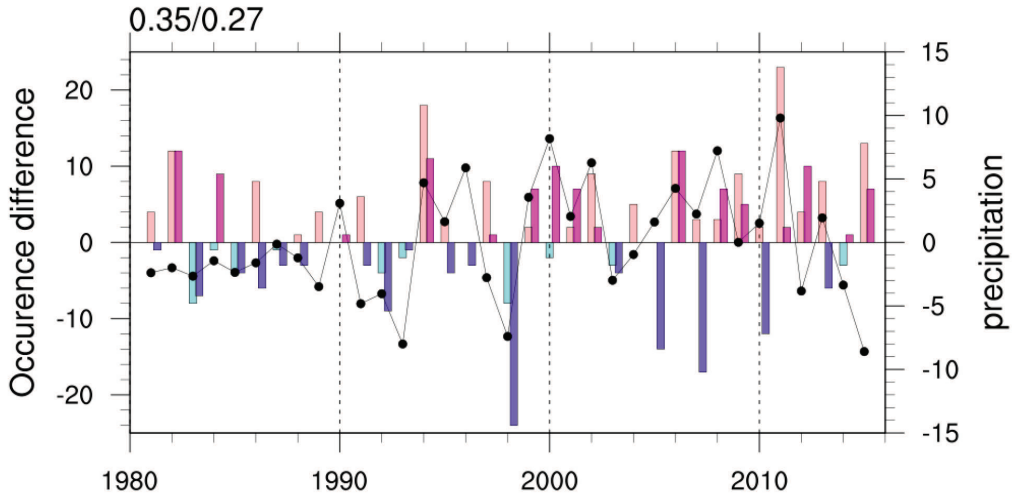


그림 4.9. 북동부 강수 시계열(A: 검정 실선) 및 최저 강우 발생 BSISO 위상 빈도수와 최고 강우 발생 BSISO 빈도수의 차(B: 막대그래프 연한색: BSISO1, 진한색: BSISO2). 좌측 상단은 A와 B 사이의 상관계수를 각각 나타냄.

그림 4.9는 태국 북동부 강수의 경년 변동성에 BSISO가 미치는 영향을 알아보기 위해 태국 북동부 지역에 대해 영역 평균된 강수 편차 시계열과 BSISO1(2) 최저 강우 발생 위상 빈도수에서 최대 강우 발생 위상 빈도수를 뺀 값을 함께 나타낸 것이다. 예를 들어, BSISO1의 경우 그림 4.9에서 양의 강수 편차가 최소값을 보인 위상이 8, 최대값을 보인 위상이 4였는데, 매년 우기(5월부터 10월) 각각의 위상이 1.5 이상의 강도를 가지고 발생한 날의 빈도수를 구한 후, 그 두 빈도수의 차이를 구한 것이다. 그 결과, BSISO1과 관련된 최대 강우 발생 위상 빈도수와 최소 강우 발생 위상 빈도수의 차이의 경우 0.35의 통계적으로 유의한 상관계수를 보이는 반면, BSISO2의 경우는 그 값이 0.27로 다소 작다. 이를 통해 태국 북동부 지역 강수의 경년 변동성에 BSISO가 어느 정도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

#### 4.1.3 BSISO 지수 기반 태국 우기 시작 예측

태국의 우기는 보통 5월에 시작하는데 북동부의 주요 재배시기가 5월로써 우기의 시작은 벼를 파종하는데 있어 매우 중요한 시기이다. 따라서 우기의 시작을 예측하는 것은 해당 년도의 농업 용수 관리에 큰 도움이 될 수 있다. Lee et al. (2013)은 BSISO 지수를 통해 아시아 몬순 시작 예측 가능성을 제시하며, 인도 몬순의 경우 총 28회의 경우

중 18회가, 남중국해 몬순의 경우 29회 중 19회가 BSISO2의 위상 2-4 시기에 발생한다고 기술하였다. 본 연구에서는 이러한 선행 연구의 결과를 바탕으로 태국 지역 우기의 시작 날짜를 예측하는 방법을 개발하고 적용해보고자 한다.

태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)는 다음 3가지 조건을 충족하는 일자를 우기의 시작으로 정의하고 있다.

- 상층에 동풍이 부는 시기
- 하층의 바람이 서풍 또는 남서풍으로 바뀌는 시기
- 5 mm 이상의 강수가 3일 이상 연속적으로 발생하고, 이 시기를 포함한 5일 동안 강수량의 총합이 25 mm 이상인 시기.

이러한 조건과 함께 표 4.1과 같이 1981부터 2015년까지의 우기 시작 날짜를 확보하였다. 표 4.2의 좌측 열과 같이 과거 35년간 태국의 우기는 평균 5월 14일에 시작하였으며 7일의 편차를 갖는다. 가장 빠리는 5월 5일에, 가장 늦게는 5월 27일에 우기가 시작한 경우도 있었다. 한편, TMD가 제공한 우기 시작 날짜는 2002년부터 2006년과 같이 그 날짜가 구체적으로 제시되어 있지 않는 한계를 가지고 있을뿐더러, 우기 시작 날짜를 정의하는데 있어서도 어느 영역의 바람장이나 강수량에 대해 조건을 적용해야 하는지가 명확하지 않다. 따라서 본 연구에서는 그림 4.10에서 보이는 것과 같이 태국 전체를 포함하는 영역(0-25°N, 92.5-110°E)에 대하여 상·하층 바람 및 강수를 평균한 후, TMD에서 사용하는 3가지 조건을 적용하여 우기 시작일을 재정의 하였다. 그림 4.10에서 검정색 역삼각형은 TMD에서 제공한 각 해의 우기 시작 날짜를 가리키고, 붉은색 역삼각형은 본 연구에서 재정의한 우기 시작 날짜를 가리킨다. 두 날짜간의 차이가 다소 존재하는 것을 확인할 수 있다.

표 4.1. TMD에서 제공한 우기 시작 날짜

Year	Onset date	Year	Onset date
1981	15-May	1999	7-May
1982	25-May	2000	15-May
1983	25-May	2001	11-May
1984	18-May	2002	Early of May
1985	7-May	2003	Early of May
1986	15-May	2004	Middle May
1987	26-May	2005	Middle May
1988	6-May	2006	The first week of May
1989	25-May	2007	5-May
1990	25-May	2008	10-May
1991	16-May	2009	9-May
1992	17-May	2010	21-May
1993	15-May	2011	6-May
1994	7-May	2012	5-May
1995	10-May	2013	18-May
1996	7-May	2014	27-May
1997	18-May	2015	22-May
1998	17-May		

이렇게 재정의된 우기 시작일의 대표적인 통계값을 표 4.2의 우측에 나타내었다. 본 연구에서 재정의된 우기 시작일은 TMD에서 제공한 우기 시작일보다 평균적으로 하루 정도 빠른 편이지만 35년 동안의 표준편차는 같다. 가장 빠른 우기 시작일과 가장 느린 우기 시작일에도 약간의 차이가 존재한다.

표 4.2. 1981-2015 태국 우기 시작일 통계값(좌: TMD 제공, 우: Modified)

	TMD	Modified
Mean	14	13
Standard deviation	7	7
Earliest/Latest	5/27	1/26
LowDec/HighDec	6/25	3/21

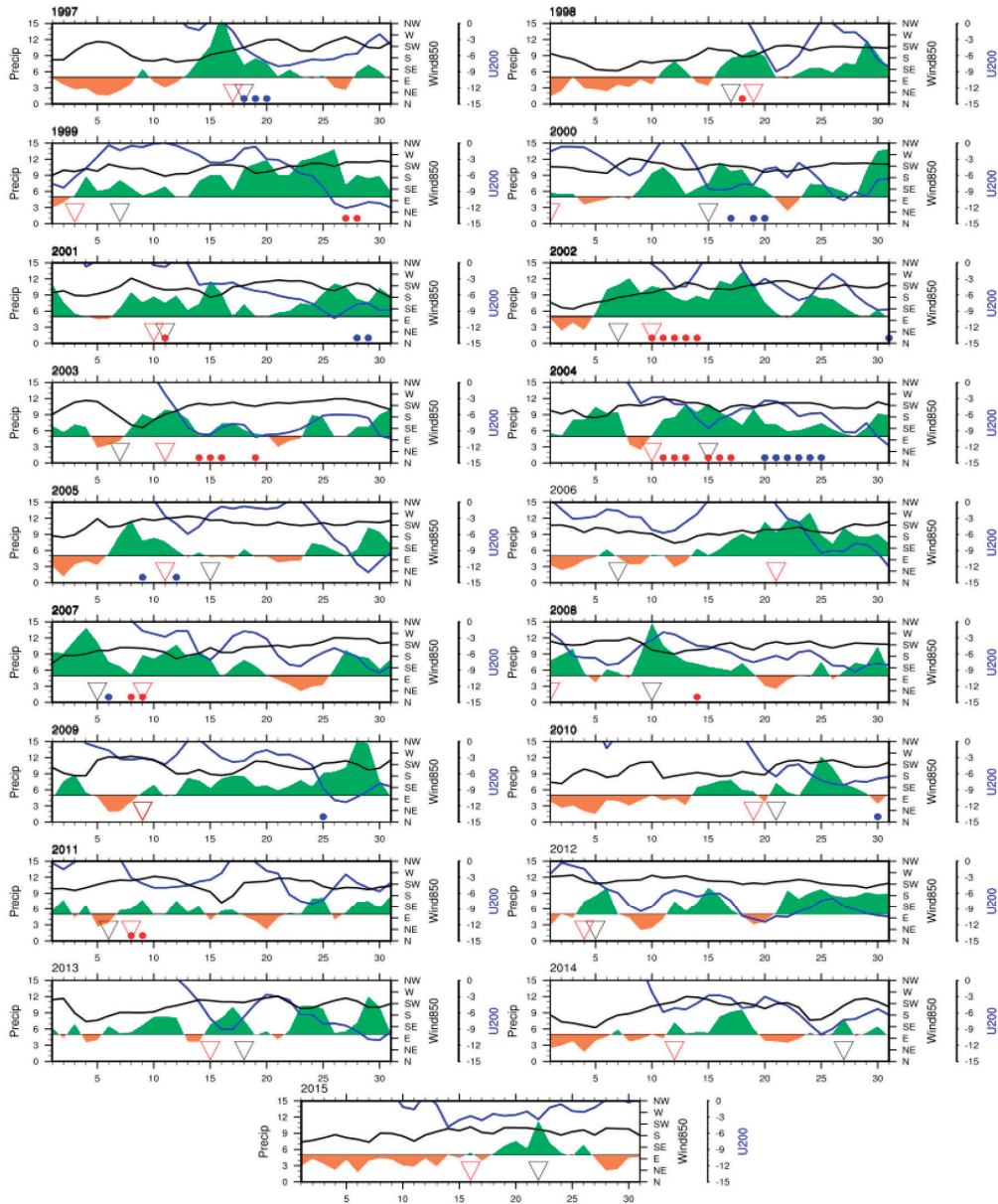


그림 4.10. 태국 영역 평균된 강수(채색 시계열), 200hPa 동서바람(파란 실선), 850hPa 바람방향(검정 실선). 검정 역삼각형: TMD 우기 날짜, 빨강 역삼각형: modified 우기 날짜, 빨강점: BSISO1 위상 5, 파란 점: BSISO2 위상 4에 해당하는 날짜. 2007 이전은 APHRODITE, 2008 이후는 GPCP 강수 자료 사용.

태국 우기 시작 정의를 BSISO 지수에 대한 상·하층 바람 및 강수의 합성장에 적용하여 태국 내 영역 평균된 강수 합성장의 결과가 최대값을 갖는 위상, 200hPa 동서 바람

의 방향이 서풍에서 동풍으로 바뀌는 위상(phase), 850hPa 바람 방향이 남서풍 계열을 보이는 위상을 살펴본 결과, BSISO1의 경우는 위상 5가, BSISO2의 경우는 위상 4가 위의 조건을 각각 만족하였다(그림 4.11). 그림 4.12의 상단의 강수 합성장의 경우 북동 지역(파랑)과 태국 전체(검정) 강수 평균 합성장을 비교하였는데, 영역 선정을 어떻게 하느냐에 따라 그 결과가 달라질 수 있음을 확인할 수 있었다. 추후 이와 관련한 보다 상세한 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

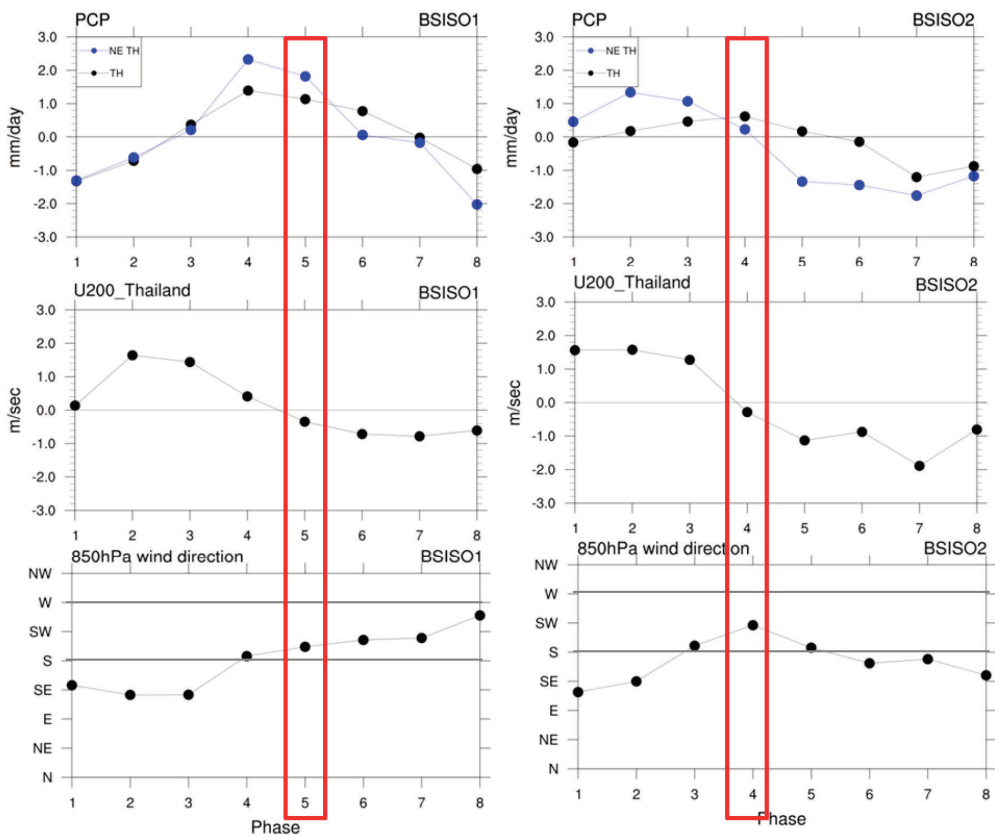


그림 4.11. BSISO 위상에 따라 태국 영역(0~25°N, 92.5~110°E) 평균된 강수(top), 200 hPa 동서바람(중앙), 그리고 850hPa 바람 방향(아래).

그림 4.11의 결과를 바탕으로 그림 4.10에 우기 시작 날짜와 함께 BSISO1의 위상 5와 BSISO2의 위상 4에 해당하며 각각의 지수의 크기가 1.5 이상을 갖는 날짜를 모두 함께 표시하였다. 실시간 현업 적용이 쉬울 수 있도록, 이들 날짜 중 가장 먼저 발생하는

날짜를 해당 년도의 우기 시작으로 선택하는 방법을 적용하였다. 그림 4.12의 빨간 점들이 BSISO 지수에 의해 선정된 우기 날짜를 나타내고 녹색 막대가 본 연구에서 새롭게 재정의 된 우기 날짜를 나타낸다. 1981년부터 2015년까지 모든 해의 우기 시작에 BSISO가 관여한다고 볼 수 없기 때문에 BSISO에 의해 우기 시작을 정의할 수 없는 해가 있다는 한계를 지니고 있지만, 표 4.3과 같이 BSISO에 의해 정해진 우기 날짜와 재정의된 우기 날짜 사이에는 유의미한 상관관계가 존재하므로 BSISO 지수에 의한 태국의 우기 시작 날짜 예측은 어느 정도 실효성이 있을 것으로 판단된다.

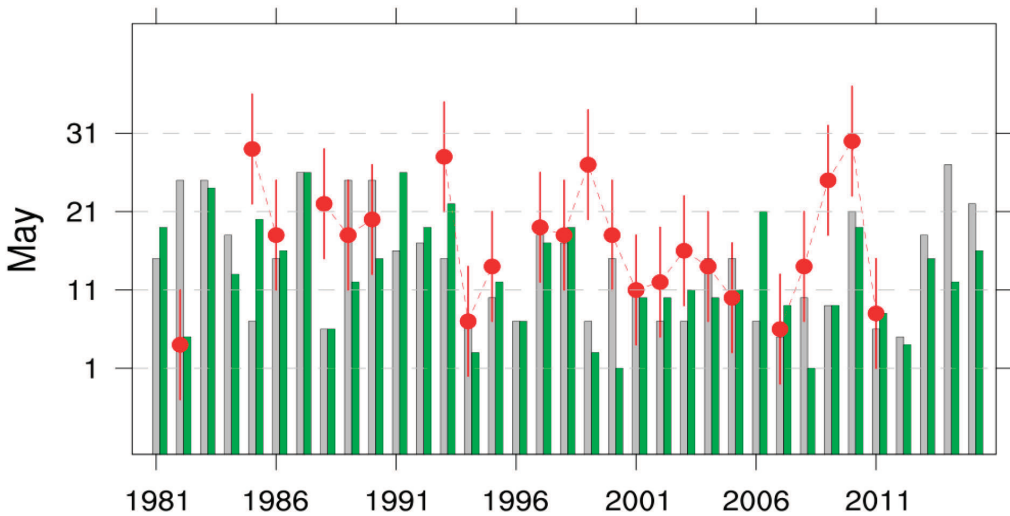


그림 4.12. TMD(회색막대), modified(녹색막대), BSISO(빨강) 우기 시작 날짜.

표 4.3. TMD 제공 우기 시작 날짜, Modified 우기 시작 날짜, BSISO에 의한 우기 시작 날짜 간의 상관계수 (\*는 5% 유의함을 의미)

	TMD	Modified	BSISO
TMD		0.45*	
Modified			0.46*
BSISO	0.08		

세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)는 2주에서 2달에 해당하는 계절내 규모의 예측성 향상을 도모하기 위해 2013년부터 S2S(Subseasonal to Seasonal) 예측 프로젝트를 수행해오고 있다. 지난 약 5년간의 주요성과로 11개의 기관

으로부터 계절내 예측자료를 바탕으로 한 데이터베이스 구축을 꿈꿀 수 있다. 본 연구에서는 WMO S2S 예측 프로젝트에서 제공하고 있는 예측 자료 중에 표 4.4에 기술되어 있는 6개의 모델로부터 생성된 과거 재현자료를 사용하여 BSISO 지수를 생산하였다. 기후학적으로 태국의 우기는 5월에 시작하므로, 우기 시작일로부터 4주 전에 해당하는 1999년부터 2010년 4월부터 5월의 매주 월요일에 생산된 자료를 이용하여 우기 시작일의 예측 기술을 평가하고자 한다.

표 4.4. 본 연구에 사용된 S2S 모델 및 예측정보

Model	Center	Time range	Resolution	Hindcast	Hindcast frequency	Ensemble member	Hindcast Length
CMA	China Meteorological Administration	d 0-60	T106L40	fix	Daily	4	1994-2014
ECMWF	European Centre for MediumRange Weather Forecasts	d 0-46	T639/319 L91	On the fly	2/week (Mon,Thu)	11	1999-2015
UKMO	Met Office	d 0-60	N216L85	On the fly	4/month (1,9,17,25)	3	1993-2015
BoM	Australian Bureau of Meteorology	d 0-62	T47L17	fix	6/month (1,6,11,16, 21,26)	33	1981-2013
ECCC	Environment and Climate Change Canada	d 0-32	0.45x0.45 L40	On the fly	Weekly (Thu)	4	1995-2014
NCEP	National Centers for Environmental Prediction	d 0-44	T126L64	fix	Daily	4	1999-2010

다변량 경험적 직교함수(Multivariate Empirical Orthogonal Function; MEOF)에 의해 도출된 계절내 진동 지수의 경우는 예측선행시간에 따라 아래의 두 식으로 예측 스킬을 주로 평가하게 된다(Lin et al., 2008).

$$ACC(\tau) = \frac{\sum_{t=1}^N [a_1(t)b_1(t) + a_2(t)b_2(t)]}{\left\{ \sum_{t=1}^N [a_1^2(t) + a_2^2(t)] \right\}^{0.5} \left\{ \sum_{t=1}^N [b_1^2(t) + b_2^2(t)] \right\}^{0.5}} \quad (\text{식 4. 1})$$

$$RMSE(\tau) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \{ [a_1(t) - b_1(t)]^2 + [a_2(t) - b_2(t)]^2 \}} \quad (\text{식 4.2})$$

위 식 4.1, 4.2에서  $a_1(t), a_2(t)$ ,는 관측 지수(BSISO1의 경우, PC1, PC2, BSISO2의 경우는 PC3, PC4),  $b_1(t), b_2(t)$ ,는 예측 시작일로부터  $t$ 일째의 지수를 각각 나타내며  $\tau$ 는 예측선행시간을,  $N$ 은 예측 개수를 각각 나타낸다.

편차 상관계수(ACC)는 주로 BSISO 지수의 위상 예측을 평가하고 평균제곱근오차(RMSE)의 경우 위상과 강도 둘 다를 고려한 평가 방법이다. 이 두 가지 방법을 표 4.4의 각각의 모델로부터 얻어진 BSISO 지수에 적용하여 그림 4.13과 같이 나타내었다. 상단은 ACC의 결과를, 하단은 RMSE의 결과를 예측선행시간에 따라 나타낸 것이다. 예측 시작일부터 1-7일을 week1(wk1), 8-14일을 week2(wk2) 등으로 표기하였다.

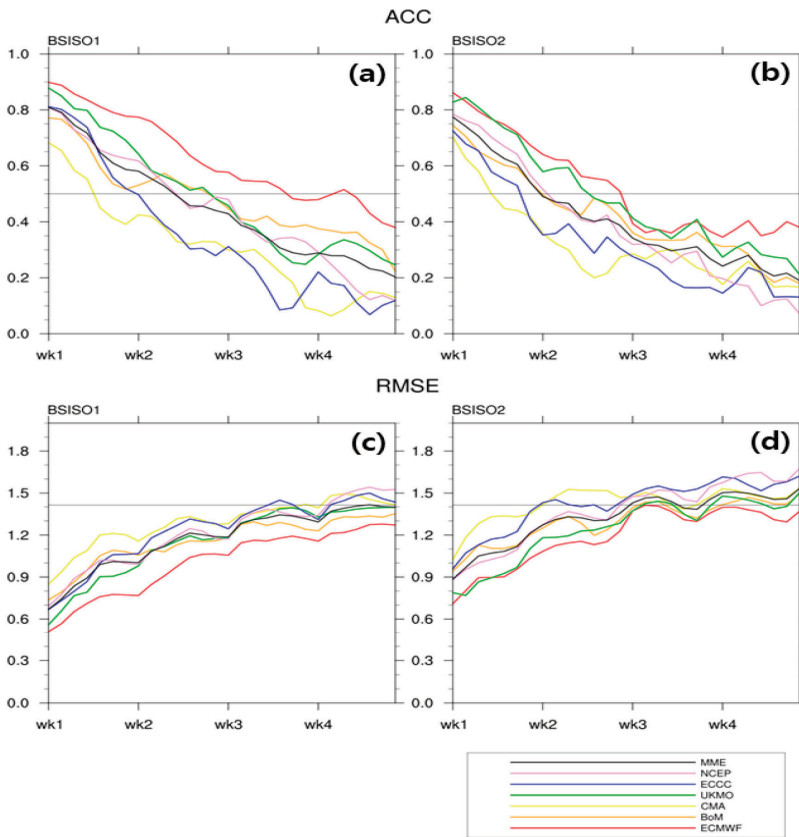


그림 4.13. 예측선행시간(주 별)에 따른 ACC(상단) 와 RMSE(하단). 수평선은 각각의 기준 값을 나타냄.

전반적으로 주기가 30-60일로 알려진 BSISO1이 주기가 10-30일인 BSISO2보다 예측 성능이 더 오래 유지된다. ACC의 경우 0.5를 기준으로 예측 스킬을 평가하게 되는데, 0.5를 기준으로 모델 간의 성능 차이가 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 예측 성능이 다른 다섯 개의 모델에 비해 월등히 우수한 것으로 나타나고 있다. 또한 0.5를 기준으로 여섯 개의 모델을 모두 평균한 결과(검정색)를 보면, BSISO1의 경우 약 10일(BSISO2의 경우 7일) 이후에 ACC가 0.5 이하로 떨어지는데 비해 ECMWF 경우 그 예측력이 21일(BSISO2의 경우 14일) 이상으로 유지되는 것으로 나타난다. RMSE 또한 예측선행 시간이 증가함에 따라 점점 증가하지만 그 증가 폭이 모델에 따라 서로 다른 것을 확인할 수 있으며 ECMWF의 예측선행시간에 따른 RMSE가 가장 작은 값을 보인다.

1999년부터 2010년 계절내예측 자료를 이용하여 생성된 BSISO 지수를 앞서 관측 BSISO 합성장 분석 결과를 바탕으로 태국 지역 우기 시작일 예측에 적용시켜 보았다. 앞서 태국 우기 시작일의 조건을 만족하는 위상은 BSISO1의 경우 위상 5, BSISO2의 경우 위상 4에 해당함과 동시에 지수의 크기가 1.5 이상이어야 했는데 예측 자료로부터 생성된 BSISO 지수들은 평균적으로 관측에 비해 그 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 BSISO 예측장의 경우 지수의 크기가 1.0 이상이면서 BSISO1과 BSISO2의 위상이 각각 5와 4에 해당하는 날짜를 관측 시작일로부터 4주 전부터 1주 전까지 매해 예측해보았다. 그림 4.14의 빨간 가로선이 각 해의 우기 시작 날짜를 가리키며 가로축은 주별 예측선행시간을 나타낸다. 붉은 색 기호는 매 예측선행시간마다 개별모형으로부터 예측된 우기 시작 날짜를 평균하여 나타낸 결과이다.

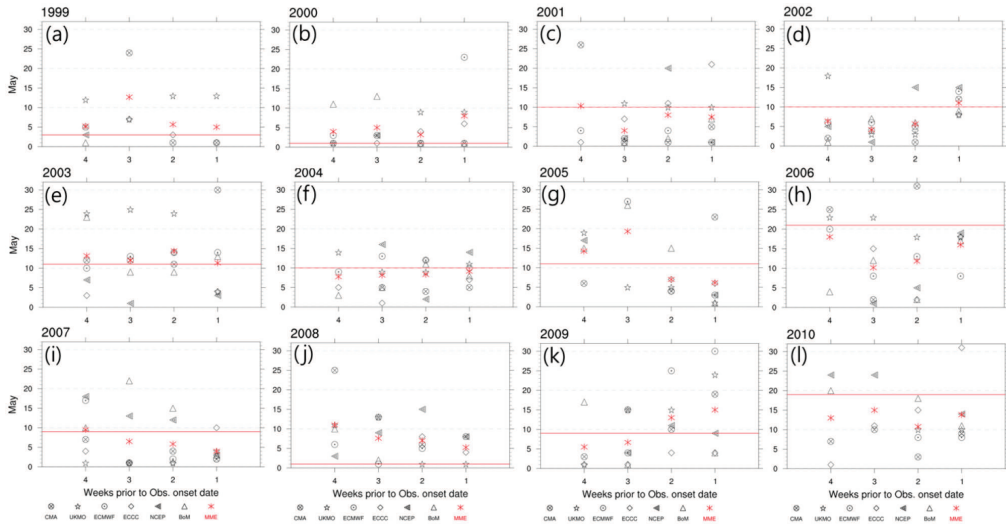


그림 4.14. 1999-2010 S2S 다중 모델 BSISO 지수에 의해 예측된 우기 시작 날짜. 붉은 가로선은 각 해의 관측 우기 시작 날짜.

2003년과 2004년을 살펴보면 예측 일자와 관측 일자의 차이가 매우 작은 반면, 2010년처럼 관측에 비해 우기 시작 날짜를 다소 일찍 예측하거나, 2008년처럼 다소 늦게 예측하는 해도 존재한다. 그림 4.15는 1999-2010년 동안 예측된 우기 시작 날짜와 관측 날짜의 RMSE를 기후 값을 바탕으로 한 예측 결과를 비교한 것이다. 기후 값은 1981년부터 2015년까지 우기 시작 날짜의 평균일로서 5월 13일에 해당한다. 기후 값을 바탕으로 우기 시작일을 예측했을 때 1999-2010년의 기간에 일주일 이상의 예측치의 차이가 발생하는 반면 다중 모델 BSISO 지수를 바탕으로 한 예측 일은 그 차이가 줄어들어 4주 전 예측 일과 관측의 차이가 4일 정도에 지나지 않는다.

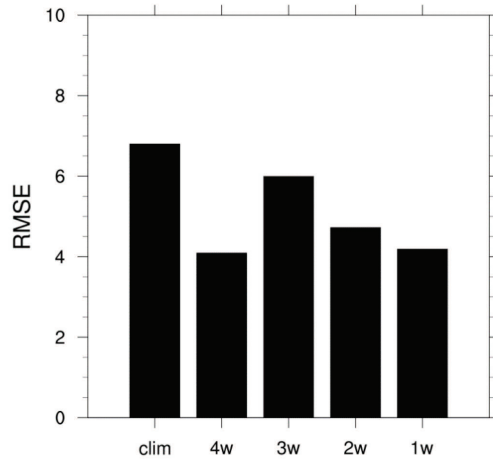


그림 4.15. clim, BSISO지수에 예측된 날씨와 관측 날씨와의 RMSE. Clim은 1981년부터 2015년 평균인 5월 13일과 관측 우기 시작 날짜의 RMSE에 해당.

그림 4.16은 각 해의 예측선행시간에 따른 예측 일자와 관측 일자의 차이를 보인 것으로 역시 기후 값을 바탕으로 한 예측과 비교하였을 때 4주 전에 그 예측치의 차이가 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있으나 3주 전 예측은 그렇지 못한 경향을 보인다.

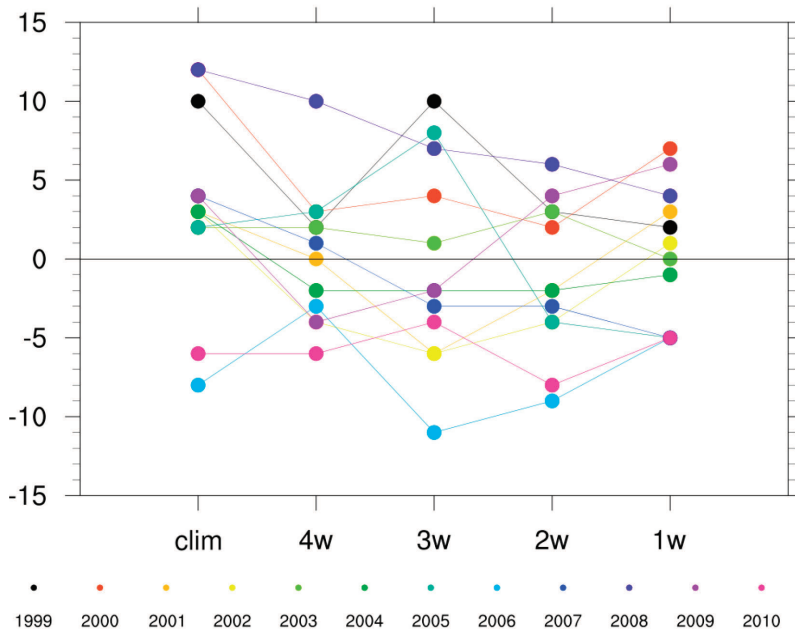


그림 4.16. 우기 시작일로부터 1-4주전 예측된 날씨와 실제 관측 날씨와의 차이.

#### 4.1.4 ECMWF 계절내 예측 검증

계절내예측 정보의 활용에 앞서 기온과 강수에 대한 예측성을 검증하였다. 예측 시작일로부터 46일간 생산되는 예측장을 주별 평균하여 기온의 경우 ERA-interm과, 강수의 경우는 TRMM 자료와 비교하였다. TRMM 관측자료의 경우, 1998년부터 존재하기 때문에 기온과 그 분석 기간에 다소 차이가 있다.

그림 4.17의 좌측은 주 별 예측선행시간에 따른 계절내 태국 기온 예측장의 격자 별 상관계수를 나타내고 있다. 기온의 경우 예측 시작일로부터 2주까지는 0.5의 상관계수를 보이지만 3주차부터 0.5 미만의 상관계수를 보인다. 그림 4.17의 좌측의 검정 실선은 1995년부터 2014년 각 해의 5월부터 9월에 예측된 주 별 2m 기온의 상관계수를 나타낸다. 해마다 예측 기술에 차이가 존재하며, 20년 평균을 하였을 때 예측 시작일로부터 약 15일 이후 상관 계수가 0.5 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다(굵은 검정색 실선). 또한 2015년 5월부터 9월에 예측된 값의 경우(푸른색 실선), 과거 20년 평균된 과거 재현자료의 성능과 거의 유사한 것을 알 수 있다.

강수의 경우 기온에 비해 그 예측 성능이 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있는데(그림 4.18), 예측일로부터 1주일 후 태국 전역에서 강수 예측성이 0.5 미만으로 감소한다. 그림 4.18의 우측에서도 역시 강수의 계절내 예측 성능의 경년 변동성을 확인할 수 있으며, 2015년 예측장의 경우 과거 재현자료의 평균값보다 그 예측 기술이 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다.

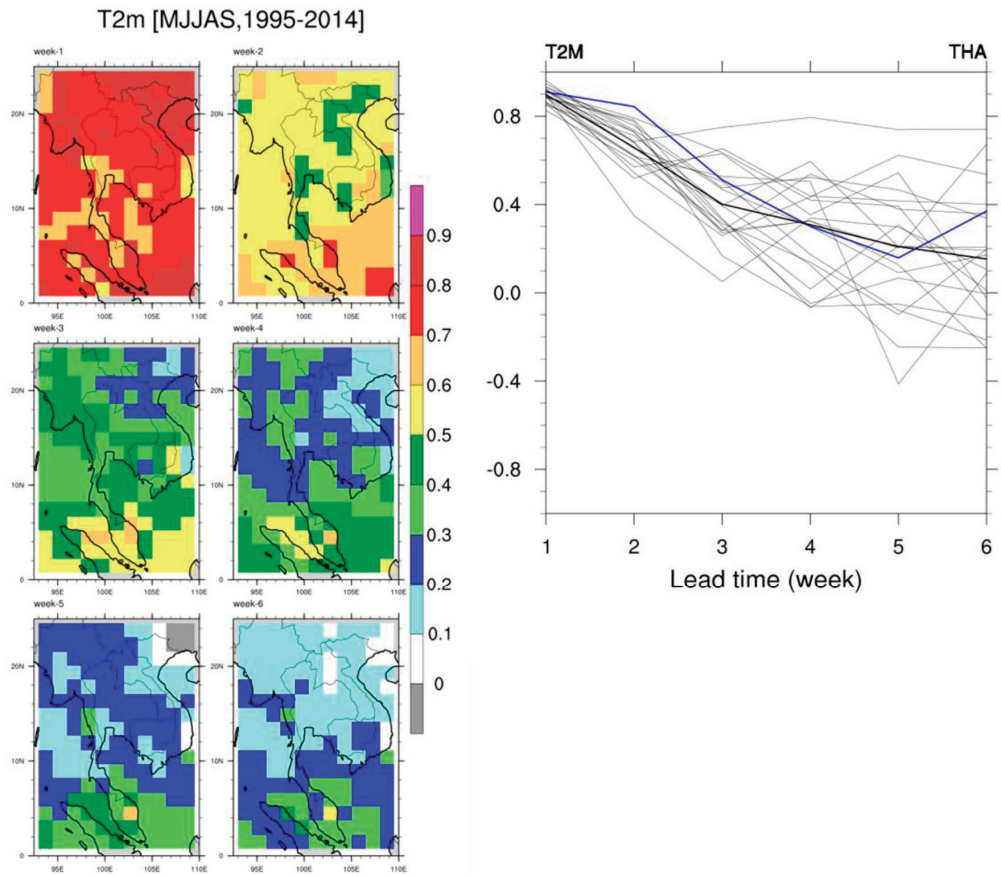


그림 4.17. (좌) 주별 예측선행시간에 따른 2m 기온의 ACC(MJJAS, 1999-2014) (우) 태국지역 영역 평균된 ACC (굵은 검정 실선을 20년 reforecast의 평균, 파란 실선은 2015년 MJJAS forecast의 ACC).

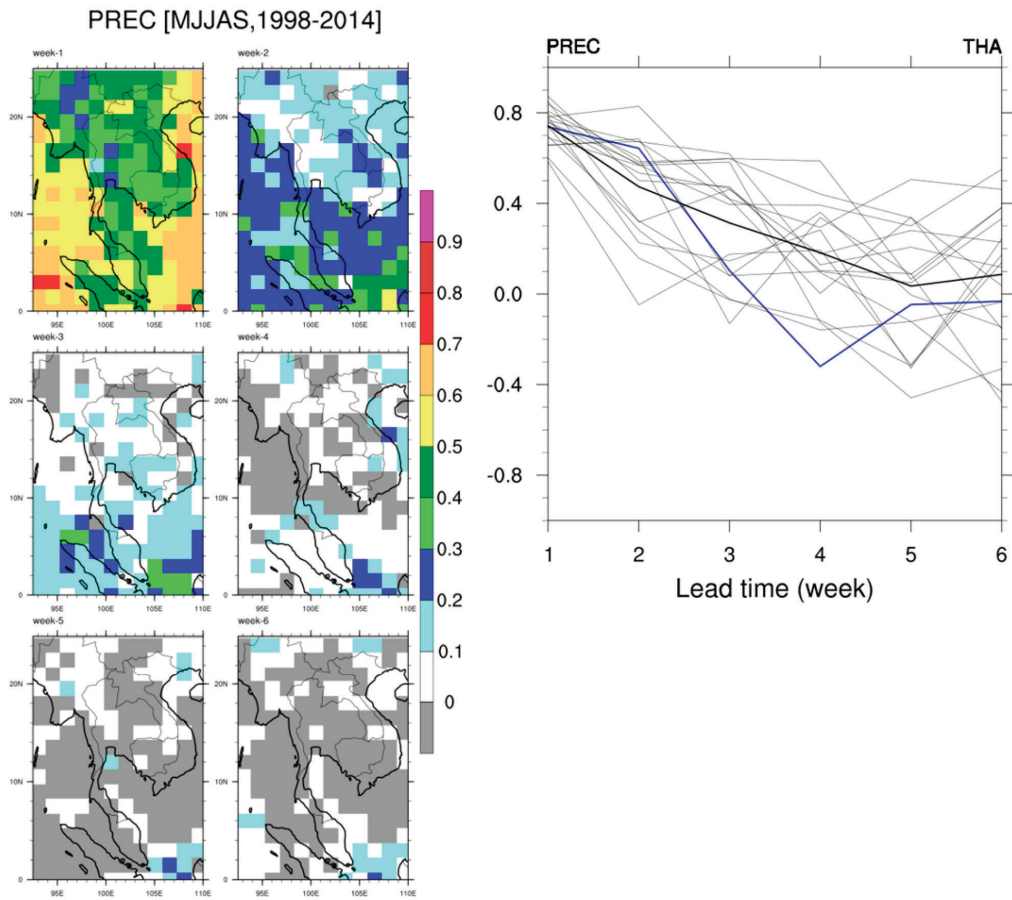


그림 4.18. 그림4.17과 같으나 강수에 대한 예측 기술 평가.

4.1.5 강수량 및 가뭄지수의 계절 변동성에 영향을 미치는 주요 기후인자

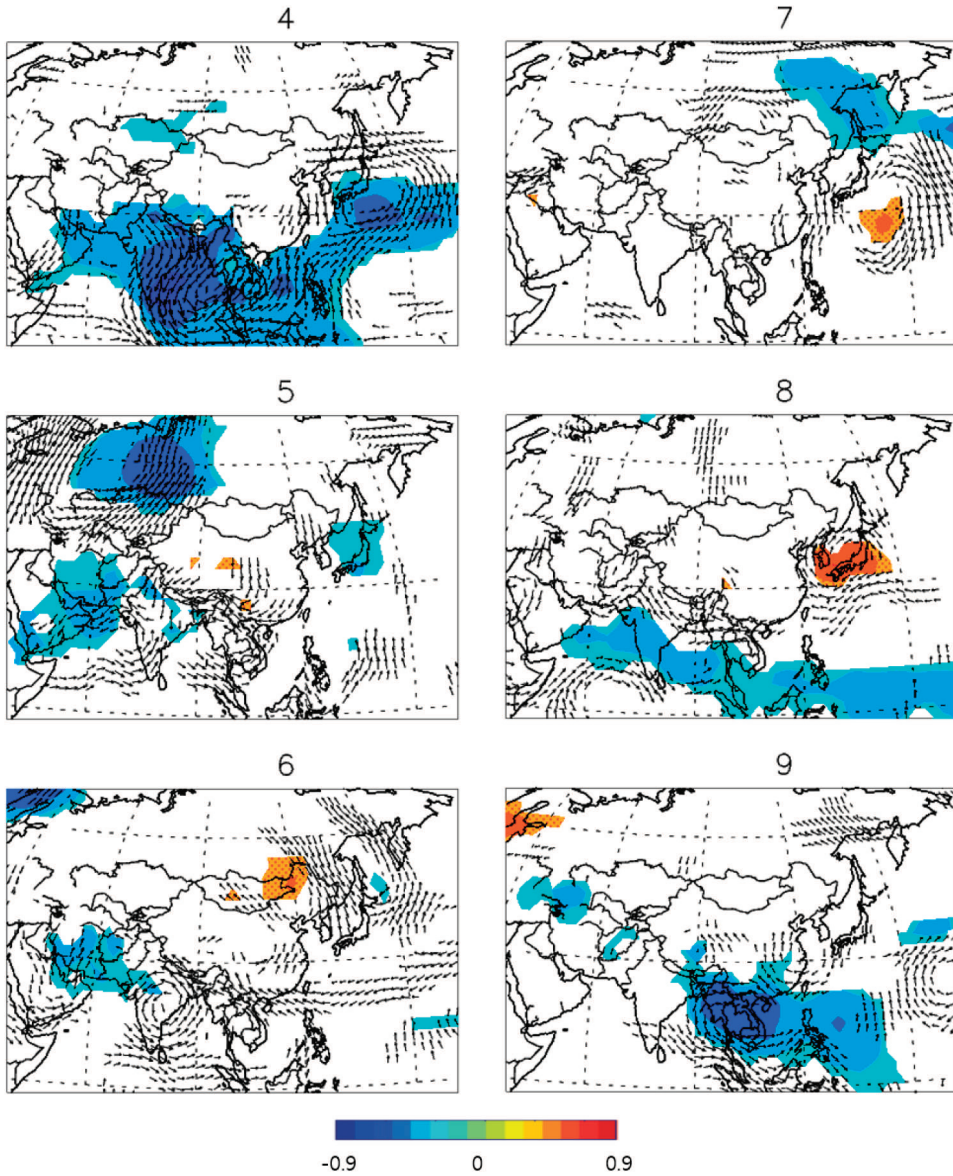


그림 4.19. 20년간(1995-2014)의 월강수량과 해면기압(유색 컨투어) 및 850 hPa 바람장(화살)과의 상관관계(4월-9월). 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계만 표시됨.

그림 4.19는 북동부 월별 강수량과 해면기압장과 바람장(850 hPa)의 동시 상관관계를 보여준다. 몬순 시작 시기인 4월과 5월에는 적도 부근 인도양에 서풍이 강화되고 인도차이나 반도 부근의 저기압이 강화될 때 태국의 강수량이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 인도양에 서풍이 빨리 발달했을 때 태국의 몬순이 일찍 시작한다는 기존의 연구결과와 일치하는 결과이다(Zhang et al., 2002). 6월, 7월, 8월에는 이러한 패턴이 약화되는데 태풍에 의한 강수가 또한 영향을 주기 때문이기도 하다(Singhrattna et al., 2005; 2012). 9월은 인도차이나 지역과 필리핀 주변에 저기압성 순환이 강화될 때 9월 강수가 증가함을 보여준다.

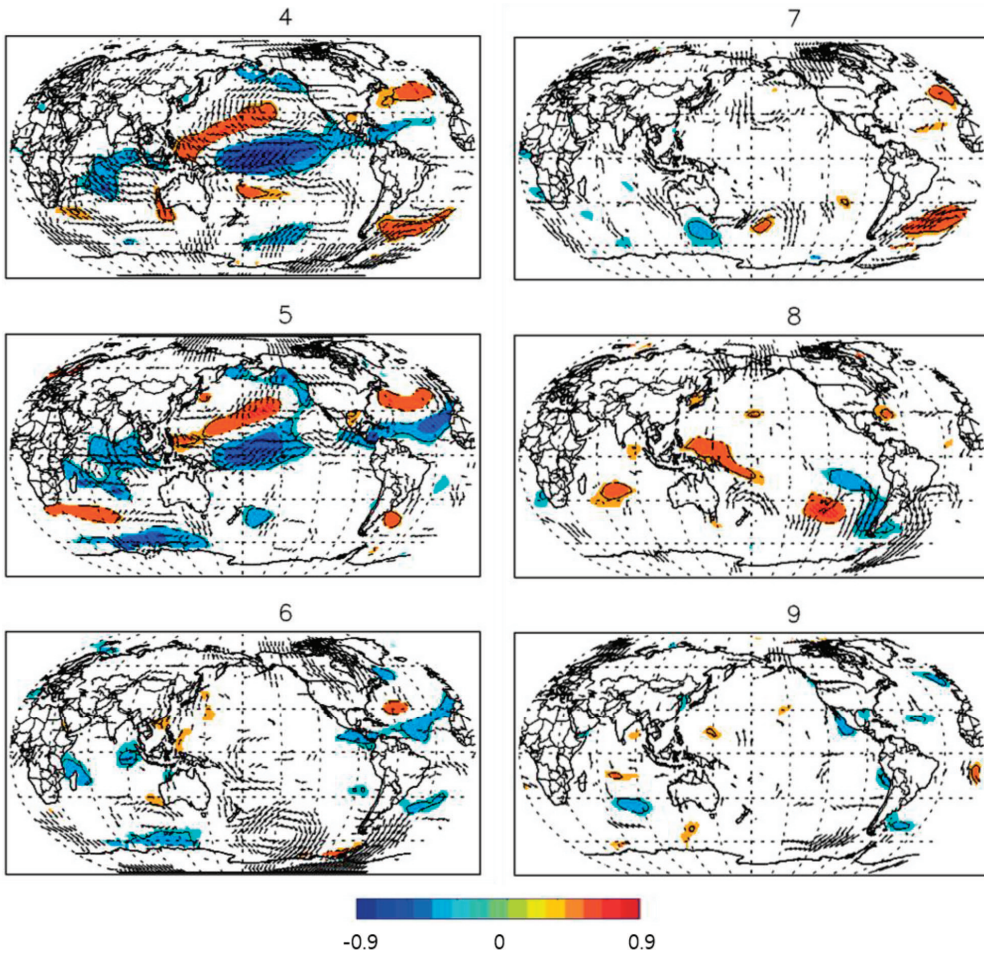


그림 4.20. 20년간(1995-2014)의 1달 선형 SST(채색 컨투어) 및 850 hPa 바람장(화살)과 월별 강수량과의 상관관계(4월~9월). 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계만 표시됨.

그림 4.20은 태국 북동부 지역의 월별 강수량과 SST와의 1개월 시간차(SST 리드) 상관관계를 나타낸다. 4월과 5월에는 열대 중태평양이 차가울수록, 서태평양이 따뜻할수록, 인도양이 차가울수록 북동부 지역의 강수량이 증가함을 시사하는데 이는 라니냐와 비슷한 해양 패턴이다. 6월에는 태평양과의 상관관계가 미미해지는 반면 4월과 5월에도 관찰되는 열대 대서양과의 연관성은 이전에 비해 약하지만 여전히 유의미하게 나타난다. 7-9월에는 SST의 영향이 극소화되는데 이 시기에는 국지적으로 작용하는 대륙과 해양의 온도차로 인한 강수와 태풍으로 인한 강수의 영향이 증가하기 때문이다(Singhrattna et al., 2012).

월별 강수량에 영향을 미치는 주요 기후인자들을 표 4.5에 나타내었다. 주요 기후인자 선정 기준은 강수량과의 lag(기후인자 선행 1~3개월까지)를 고려한 상관관계를 계산한 후 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 경우( $r > 0.435$  or  $r < -0.435$ )가 적어도 한번 이상 발견될 때 주요 인자로 선정하였다. Decadal change를 고려하기 위하여(Kwon et al., 2005; Ding et al., 2013; Chen and Zhou, 2014) 최근 20년(1993-2012)과 이전 20년(1976-1995)을 구분하여 계산하였다.

표 4.5. 태국 북동부(NE) 월별 강수량에 대한 주요 기후 인자. 1~3개월 선행(기후지수) 상관관계를 바탕으로 선정. 파란색과 빨간색은 각각 음의 상관관계, 양의 상관관계를 나타냄. 굵은 글씨와 일반 글씨는 각각 95%와 90%의 통계적 유의미성을 나타냄

	1993-2012(Recent 20 years)	1976-1995(First 20 years)
Apr	<b>PDO, NINO3.4, SOI, EMI, IOBW, WNINO,</b> CAR	<b>NINO3.4, SOI, WNINO, CAR</b>
May	<b>PDO, NINO3.4, SOI, EMI, IOBW, WNINO,</b> TNA	IOBW
Jun	<b>TNA</b>	PDO, IOD, TNA, CAR
Jul	N/A	<b>SOI, IOD</b>
Aug	<b>IOBW, WNINO</b>	<b>NINO3.4</b>
Sep	<b>SOI, CAR</b>	<b>PDO, SOI, EMI, WNINO, IOD</b>

\* 기후 지수는 Climate Prediction Center archives(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)로부터 얻은 월별 자료이며 약자는 다음과 같다.

PDO: Pacific Decadal Oscillation  
SOI: Southern Oscillation Index  
EMI: El Nino Modoki Index  
IOBW: Indian Ocean Basin Wide

WNINO: Western NINO  
CAR: Caribbean Index  
TNA: Tropical North Pacific  
IOD: Indian Ocean Dipole

최근 20년간 4월과 5월에는 ENSO와 관련된 변수들(e.g., NINO3.4, SOI, EMI,

PDO, IOBW, WNINO)이 주요 인자로 나타났다. 열대 태평양의 주 변동 모드인 엘니뇨/라니냐는 태평양뿐 아니라 시간차를 두고 인도양과 대서양에도 영향을 미치는데, 겨울철에 라니냐 또는 엘니뇨가 최고조에 달한 후 약 3~5개월 후에 같은 위상의 SST 편차가 인도양에(Yang et al., 2007), 5-7개월 후에 열대 대서양(Yoon et al., 2007; Zheng et al., 2011)에 나타나는 경향이 있다. 위의 변수들 중 이전 겨울철 12월-2월의 NINO3.4 지수에 대한 의존성을 제거한 후 상관관계를 구했을 때 여전히 상관관계가 유의미한 지수는 PDO(5월), EMI(4월, 5월), WNINO(8월) 이었다.

열대 대서양의 SST 변수인 TNA는 ENSO관련 변수들의 연관성이 낮아진 6월에도 주요인자로 선정되었는데 이는 ENSO의 영향이 5-7개월 후 대서양에서 나타나기 때문인데 4월 또는 5월의 TNA가 인도양과 서태평양의 대기에 영향을 미치기 때문이다(Rong et al., 2009; Hong et al., 2014; Li et al., 2015).

7월에는 주요 인자가 발견되지 않았고, 8월에는 태국의 주변 바다의 SST(IOBW, WNINO)가 여전히 중요하며 9월에는 SOI와 캐리비안해의 SST(CAR)가 높은 연관성을 가지고 있는 것으로 보인다.

최근 20년(1993-2012년)과 이전 20년(1975-1994)의 주요 인자를 비교해보면 월별로 상당한 차이가 있음을 확인할 수 있다; 첫째, PDO의 상관성이 최근 들어(4월, 5월) 증가하였고, 둘째, 5월에 ENSO관련 변수들(i.e., IOBW, WNINO, EMI)의 상관성이 최근 들어 증가하였고, 셋째, 이전 20년에는 ENSO와 관련된 인자들이 7월, 8월, 9월의 강수량에 많은 영향을 끼친 것으로 보이는데 최근 20년간의 부호와 반대인 경우가 종종 나타난다(e.g., 8월의 NINO3.4, 9월의 SOI와 EMI). 이러한 결과는 decade에 따라 주요 인자들이 변화하고 있음을 말하는데(Hong et al., 2014; Xiang and Wang, 2013), 이러한 변화들을 기상학적으로 면밀히 분석하고 이해해야 하며 이러한 이해를 바탕으로 예측력을 향상시킬 수 있음을 시사한다.

유사한 방법으로 6월의 SPI3 가뭄지수(4월-6월 강수량 기반)와의 상관성과 몬순 시작일(TMD의 우기 시작 날짜)과의 상관성도 살펴보았는데 월별 강수량과의 결과와 마찬가지로 ENSO 관련 지수들과 높은 상관성을 보이고 있다. 반면에 이전 20년(1976-1995년) 동안에는 NINO3.4와 SOI 변수만이 선정되었다.

#### 4.1.6 ENSO와 태국 강수량 변동성

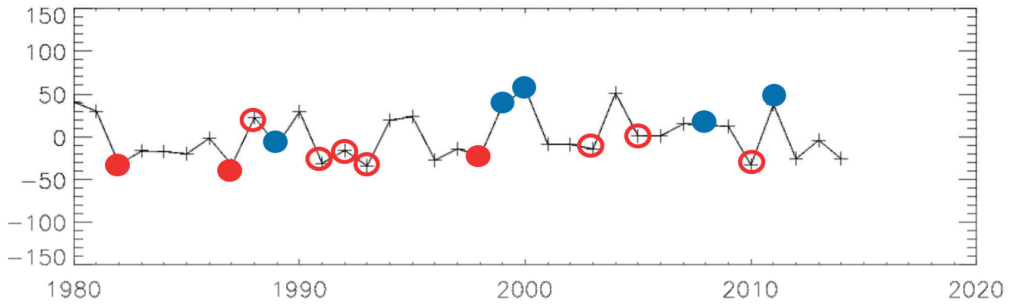
그림 4.21a는 5월-7월(MJJ) 평균 강수량이 엘니뇨에 감소하고 라니냐에 증가함을 보여주는데 EP(eastern Pacific) 엘니뇨에 비해 강수 억제 강도가 약하긴 하지만 CP(central Pacific) 엘니뇨에도 강수가 억제됨을 확인할 수 있다. 한편 이러한 경향성은 엘니뇨/라니냐 발달기보다는 쇠퇴기(그림 4.21a 와 b)에 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

일반적으로 태국의 강수량은 몬순 시작시기와 밀접한 관계가 있는데 몬순이 일찍(늦게) 시작할수록 몬순 기간이 길어져(짧아져) 강수량도 증가(감소)하게 된다(Cook and Buckley, 2009). 3월의 NINO3 지수와 5월의 SLP와 850 hPa 바람장의 상관관계(4.1.24)에서 보듯 엘니뇨가 태국 강수량 또는 몬순 시작일에 미치는 영향은 크게 아래와 같이 두 가지로 요약될 수 있다.

- 1) 엘니뇨 영향으로 인도양이 온난해질 때(양의 IOBW) 인도양에 저기압성 순환이 형성되어(Chowdary and Gnanaseelan, 2007) 따듯하고 습한 공기를 태국에 공급해 주는 남서풍이 인도차이나 반도까지 확장되지 못한다.
- 2) 서태평양의 냉각화로 인해 필리핀 주변에 고기압(e.g., Western North Pacific Subtropical High, WNPSH)이 확장하여 태국까지 영향을 미친다(Zhang et al., 2017).

따라서 엘니뇨 환경하에 몬순 시작일이 지연되고 그로 인해 강수량이 감소하게 되며 라니냐 환경하에선 반대의 상황이 지배적이어서 강수량이 증가하게 된다. ENSO와 관련된 주요 인자들(TNA, PDO, EMI, IOBW, WNINO) 또한 유사한 기작을 통해 태국 강수량에 영향을 준다. 이러한 태국 몬순 강수와 ENSO와의 연관성은 1980년대 이후에 강화되었다고 알려져 있다(Singhrattna et al., 2012).

a) MJJ precipitation in El Niña/La Niña decaying years



b) MJJ precipitation in El Niña/La Niña developing years

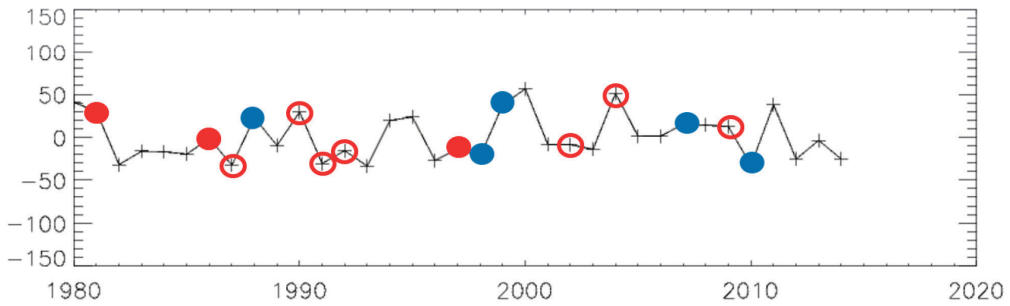


그림 4.21. 태국 북동부 지역의 5월-10월 평균 강수량 시계열과 엘니뇨/라니냐 해(색깔 원형으로 표시). (a)는 엘니뇨/라니냐 쇠퇴기, (b)는 엘니뇨/라니냐 발달기를 나타냄. 파란색 채색 원형은 라니냐해, 붉은색 채색 원형은 동태평양(EP) 엘니뇨, 붉은색 오픈 원형은 중태평양(CP) 엘니뇨를 나타냄.

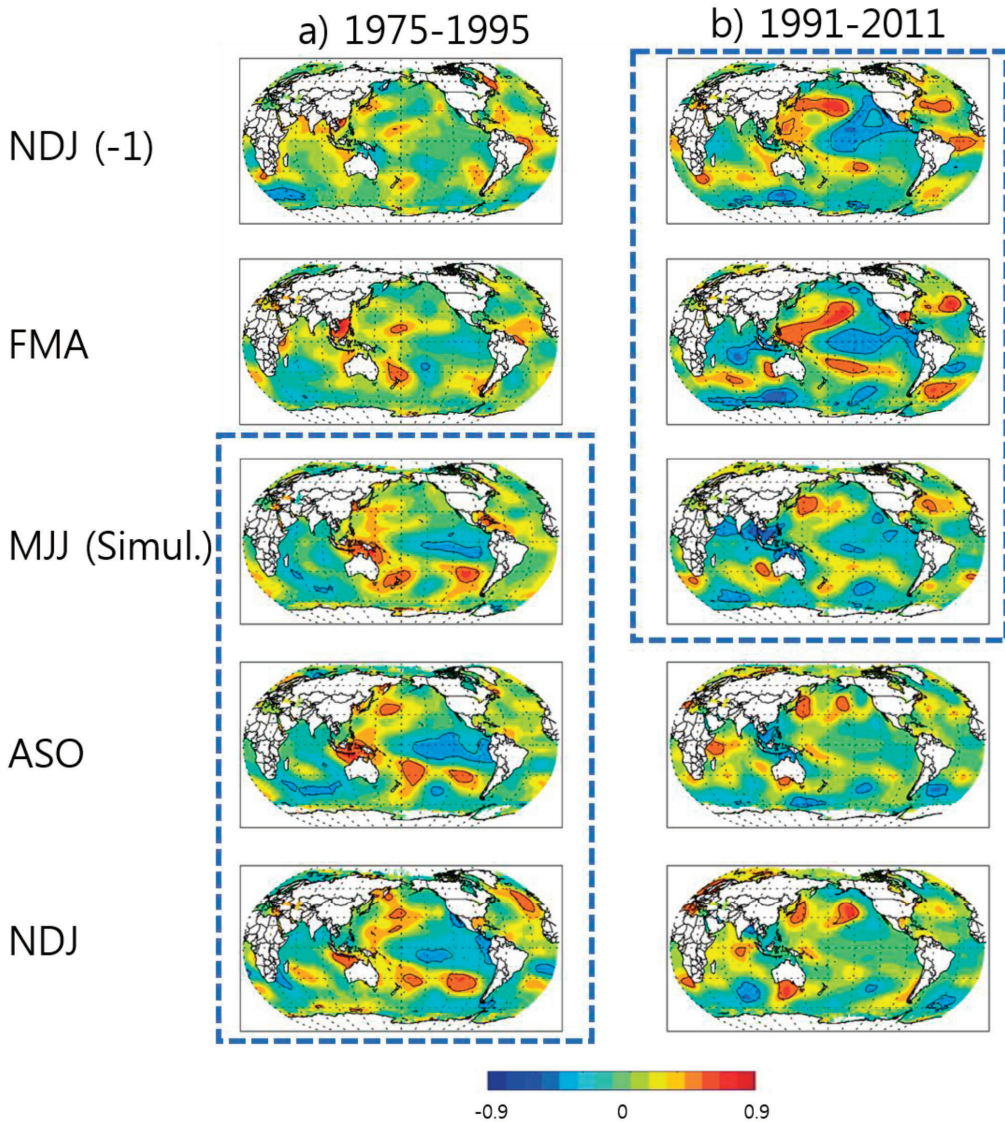


그림 4.22. (a) 1975-1995, (b) 1991-2011 기간의 5월-7월 평균강수량과 계절평균(NDJ, FMA, MJJ, ASO) 해수면 온도(SST)와의 상관관계. 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계를 나타내는 지역은 검은색 컨투어로 표시됨. NDJ(-1)은 5월-7월의 이전 겨울을 의미함.

MJJ의 강수 편차가 엘니뇨/라니냐의 발달기 보다는 쇠퇴기에 뚜렷이 나타나는 현상은 1990년대 이전보다 이후에 두드러지게 나타나는 것으로 보인다. 그림 4.22는 MJJ 평균 강수량과 이전 겨울(NDJ), 같은 해 봄(FMA), 여름(MJJ), 가을(ASO), 겨울(NDJ)의 SST와의 상관관계를 초반 20년(1975-1995년)과 후반 20년(1992-2012년)에 대해 보여주

고 있다. 그 결과 이전 21년 기간에는 전해의 겨울(NDJ)과 봄(FMA)철 열대 중태평양의 상관관계가 매우 낮으나 여름(MJJ), 가을(ASO)로 갈수록 열대 중태평양에 음의 관계와 서태평양의 양의 관계가 두드러진다. 그러나 최근 21년간에는 전해의 겨울(NDJ)과 봄(FMA)에 중태평양이 차가울수록, 서태평양이 더울수록 MJJ 강수량이 증가함을 보이는데 이는 엘니뇨/라니냐 쇠퇴기에 MJJ 강수량이 변화함을 의미한다.

겨울철 ENSO는 이듬해 봄(FMA)에도 열대 중동 태평양뿐 아니라 열대 서태평양, 북태평양, 인도양, 대서양에 영향을 미치는데 이전 20년에 비해 최근 20년에 이러한 영향이 더욱 강화된 것을 그림 4.23a 와 b에서 확인할 수 있다. 또한 이전 20년의 여름철(MJJ)에는 유의미한 겨울철 ENSO의 영향이 인도양과 대서양 일부에만 관찰되지만(그림 4.23c) 최근 20년에는 서태평양과 북태평양, 중동 태평양에서도 관찰되는 것으로 보아(그림 4.23d) 엘니뇨/라니냐 쇠퇴기에 ENSO의 영향이 더욱더 오랫동안 유지되어 태국의 몬순 강수에 영향을 미치는 것으로 추측된다(Zhang et al., 2017).

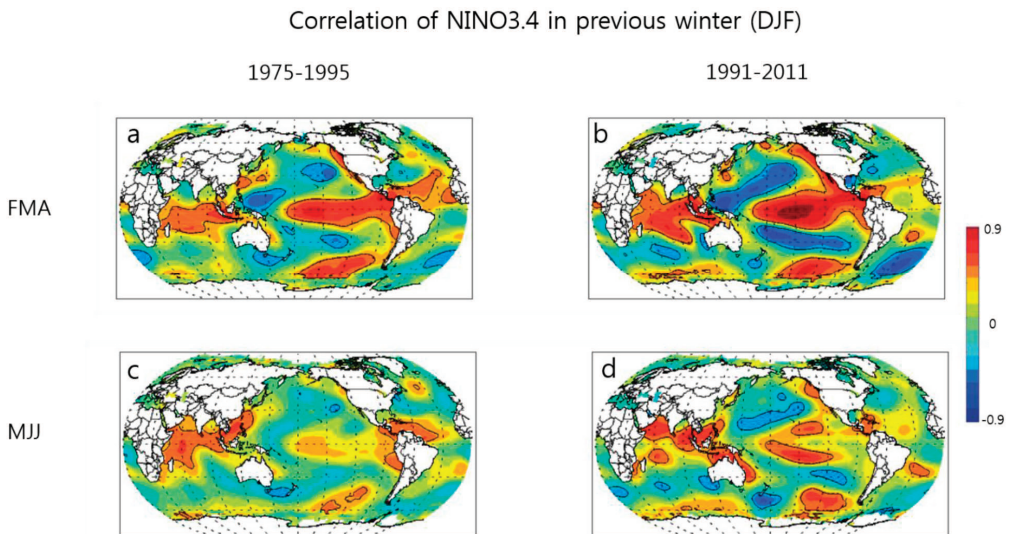


그림 4.23. 21년간(1975-1995) 이전 겨울철(DJF) NINO3.4 지수와 2월-4월 평균(a) 그리고 5월-7월 평균(c). (b) 와 (d)는 1991-2011 기간에 대한 결과임. 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계를 나타내는 지역은 검은색 컨투어로 표시됨.

이러한 결과들은 태국의 북동부 지역 몬순 초반 강수량 예측시에 신중히 고려되어야 할 것이다.

#### 4.1.7 계절 정보를 활용한 몬순 시작일 예측 모델

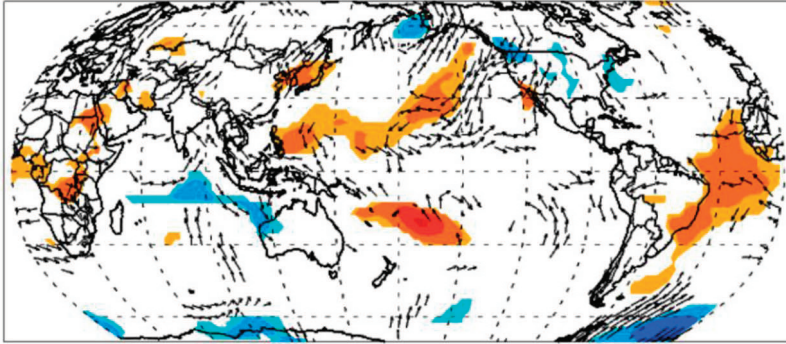
태국 기상청이 제공한 자료에 따르면 몬순 시작일은 5월 내에서 큰 변동성을 보이고 있다(그림 4.25). 인도차이나 반도의 몬순은 WNPSH가 동북쪽으로 북상하는 동시에 인도양으로부터 인도차이나 반도에 수증기를 공급하는 남서풍이 강화되어 인도차이나 반도에 도달함으로써 시작된다고 알려져 있다(Nguyen-Le et al., 2015). 그림 4.24a와 b는 3월의 NINO3 지수와 TNA 지수가 5월의 해면기압과 850 hPA 바람장에 미치는 영향을 각각 보여주고 있다. 두 지수 모두 인도차이나 반도와 필리핀 주변에 고기압성 흐름을 유도하므로 몬순 시작일을 지연시키는 것으로 보인다. 앞서 설명되었듯이 NINO3 지역에 엘니뇨성 흐름이 있을 때 서태평양은 상대적으로 차가워지고 그로 인해 WNPSH가 상대적으로 강해지며 인도양의 남서풍이 북동진을 억제하기 때문에 몬순 시작이 늦어지는 것으로 보이는데 이는 기존 연구결과와 일치한다(Singhrattna et al., 2005). NINO3.4 보다는 NINO3이 북동부의 강수량과 더 높은 상관성을 보였다.

대서양 해수면 온도가 동아시아 몬순에 미치는 영향은 아직 논란이 있지만 일반적으로 아래와 같은 세가지 기작이 제시되었다.

- 1) 열대 대서양이 따뜻할 때 상승기류가 형성되고 그 반대 급부로 하강기류가 열대 중태평양에 형성되어 서태평양에 동풍을 강화시켜 WPSH를 강화시킨다(Rong et al., 2010; Hong et al., 2014; Li et al., 2015).
- 2) 열대 대서양이 따뜻할 때 상승기류가 형성되고 반대급부로 하강기류가 열대 인도양에 형성되어 대류권 하층에 동풍 편차를 유발한다(Li et al., 2015).
- 3) 중위도 대서양이 차갑고 고위도 대서양이 따뜻할 때 파동형태의 원격상관이 30~70N 위도 지역에서 유라시아 쪽과 동아시아로 전파되거나(Wu et al., 2009; Yamaura and Tomita, 2011; Lee and Seo, 2013) 30~40N 위도 지역에서 circumglobal 원격 상관(CGT)을 유발한다(Ding and Wang, 2005).

그림 4.24b에서 중태평양의 지상고기압과 필리핀 부근의 고기압성 흐름이 유의미하게 나타나는 것으로 보아 TNA가 태국 몬순에 영향을 미치는 기작으로 위의 세가지 중 첫번째 기작이 주요하게 작용함을 추측할 수 있다.

a) Correlation of NINO3 in Mar with SLP and winds(850hPa)



b) Correlation of TNA in Mar with SLP and winds(850hPa)

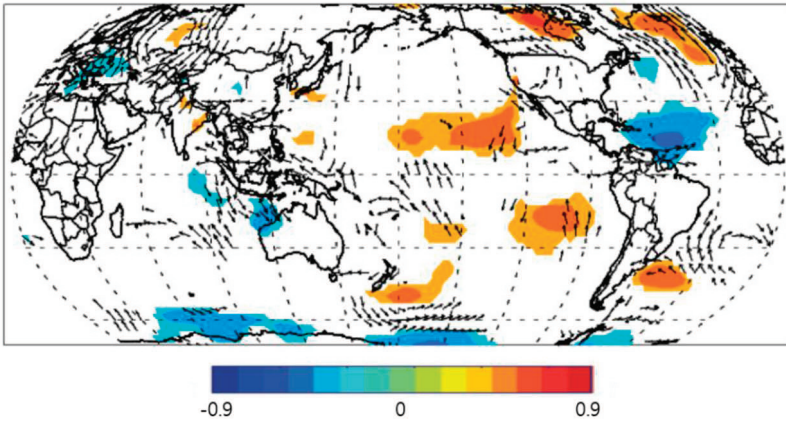


그림 4.24. 3월의 NINO3 지수와 5월의 해면기압(유색 컨투어)과 850 hPa 바람장(화살)의 상관관계(a). (b)는 3월의 TNA지수와와의 상관관계. 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계만 표시됨

NINO3와 TNA 지수를 이용하여 구축한 회귀 예측모델은 다음과 같다.

$$[\text{Onset\_date}] = -102.820 + 4.14501 * \text{NINO3\_Mar} + -4.45474 * \text{TNA\_Mar}^{\text{㉞}} \quad (\text{식 } 4.3)$$

NINO3\_Mar는 3월의 NINO3 지수를 의미하고 TNA\_Mar<sup>㉞</sup>는 3월 NINO3의 의존성을 제거한 3월의 TNA 지수를 의미한다. 관측된 몬순 시작일과 추정 몬순 시작일은 그림 4.25에 도시되었다. 1993-2012년의 20년동안 one-leave-out 테스트 결과 시계열 상관지수(TCC)는 0.43으로 나타났다. 예측모델 개발시에 4월 자료를 이용할 경우 예측성은 향상되지만(TCC=0.6) 현업에 사용될 경우 예측 선행시간이 너무 짧아지는 단점이 있기 때문에 3월의 SST 정보를 사용하였다. 본 모델을 이용하여 2013년부터 2017

년까지 5년을 예측하였는데 실제 몬순 시작일이 상당히 늦었던 2014년과 2015년에 모델은 평년보다 이른 몬순 시작일을 예측하였다. 강한 엘니뇨의 급격한 발달과는 달리 2014년과 2015년에는 엘니뇨 발달이 장시간 지연되며 결국 2015/16년 겨울 강한 엘니뇨가 발생하였다. 특히 2015년 봄의 경우 NINO3은 평균보다 높아 몬순 시작을 지연시키는 상황이었으나 TNA는 평균보다 낮아 몬순 시작을 앞당기는 상황에서 전자의 영향이 더 컸던 것을 보이며 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 반면 2016년과 2017년 몬순 시작일이 평년에 가까워지는 형태가 비교적 잘 예측되었으며 이러한 결과는 기후지수를 이용하여 태국 북동부 지역 몬순 시작일을 예측할 수 있는 가능성을 보여준다.

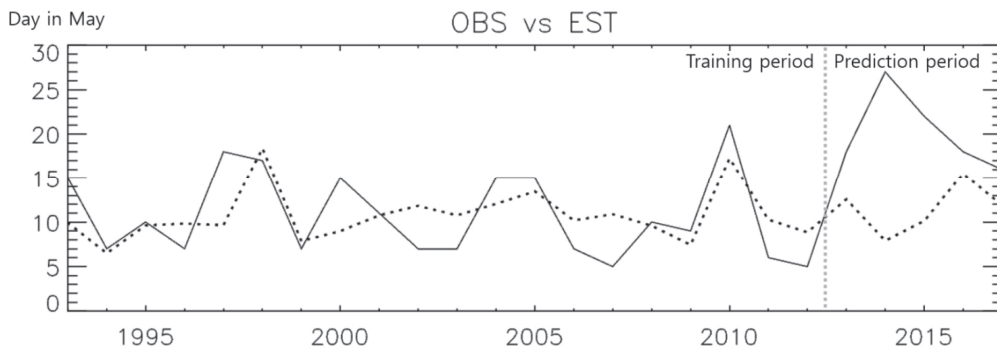


그림 4.25. 관측된 몬순 시작일(실선)과 모델 추정 몬순 시작일(점선).

#### 4.1.8 계절예측 기후정보를 활용한 6월 강수량 예측 모델

기존 역학적 예측모델에서 예측성이 현저히 떨어지는 6월 강수에 대해 역학분석 기반 통계모델을 구축하였을 때 예측력 향상을 가져올 수 있는지를 테스트해 보았다. 6월의 북동부지역의 강수량과 4월의 SST와의 상관관계(4.26)에 따르면 북동부 지역의 6월 강수량은 4월에 남중국해(SC 지역)가 따듯할수록, 중위도 북대서양(A지역)이 따듯할수록, 아열대 북대서양(B 인근 지역)이 차가울수록 증가하는 경향이 있음을 보여준다. 이러한 상관관계를 바탕으로 두개의 독립변수를 선정했는데 하나는 북대서양 A와 B의 해수면 온도차( $NA\_diff = A - B$ )이고 두번째는 남중국해 해수면 온도인 SC이다. 두 변수의 상관관계 지수는 0.32로서 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의미하지 않다. 각각의 변수에 대해 값이  $\pm 0.7 * \sigma$  (표준편차)보다 높거나 낮은 해에 대해 composite을 구성하고

(표 4.6) 그에 따른 SLP, 상층 지위고도, 바람장의 차이(= [positive composite mean] - [negative composite mean])를 살펴보았다.

Cor of Jun precip. with SST in Apr

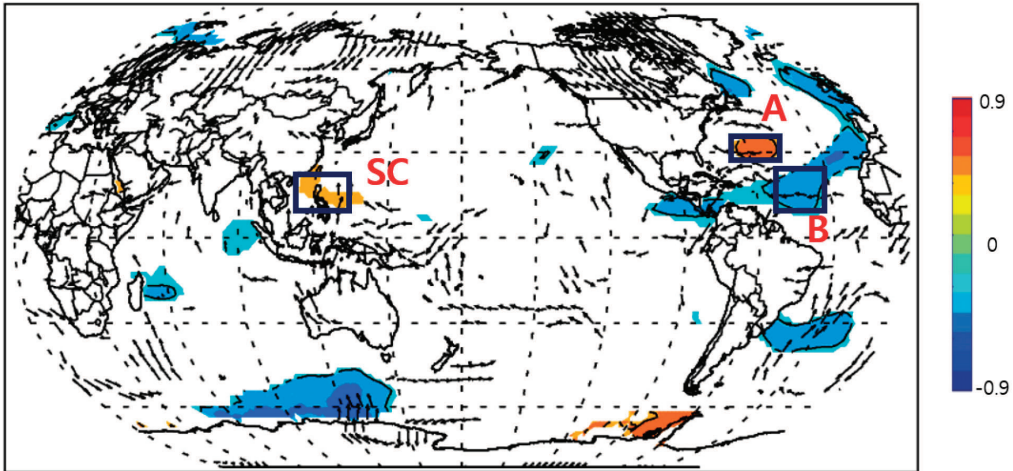


그림 4.26. 20년(1993-2012)기간 동안의 6월 강수량과 4월의 해수면온도(SST)와의 상관관계. 95%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계만 표시됨.

표 4.6. NA\_diff와 SC 자수의 positive and negative composite years

	NA_diff	SC
Positive composite year	1994, 2000, 2002, 2003	1999, 2000, 2001, 2012
Negative composite year	1997, 2005, 2006, 2007, 2010	1993, 1996, 2011

그림 4.27에 따르면 두 변수 모두 대서양에서 동아시아에 이르는 지역의 대기 변동성과 밀접하게 연관되어있는데 특히 상층 지위고도와 바람장 차이에서 확연히 나타난다(그림 4.27 b와 d). 양의 NA\_diff 값은 앞서 소개했듯이 1) 아열대/중위도 대서양에서 시작하여 유라시아를 거쳐 캄차카 반도까지 이어지는 파동 또는 블로킹과 같은 원격상관을 유발하고 2) 아열대 아프리카와 동남아시아에 저기압을 형성함이 확인된다(그림 4.27b). 또한 저층에서는 아프리카와 인도양 10~20N 지역에 서풍을 강화시킬 뿐 아니라 인도차이나 반도에 저기압성 순환을 유도하는데(그림 4.27a) 이러한 이유로 인해 태국 강수가 증가하는 것으로 보인다.

양의 SC 값은 상층에 남중국해 주변에 저기압을, 우리나라 북서쪽에 고기압을 유발하는 한편 위도 30N를 따라 남중국해에서 북부 아프리카에 이르는 파동 패턴(i.e., 고기압성 순환과 저기압성 순환의 연속적 배치)과 연관이 있는 것으로 보인다(그림 4.27d). 저층에서는 남중국해와 동중국해, 인도차이나 반도에 저기압을 유도하고 인도양과 동아시아 10~20N 지역에 서풍을 강화 시키는데(그림 4.27c) 이러한 영향 역시 북동부 지역의 강수량을 증가시킬 수 있다.

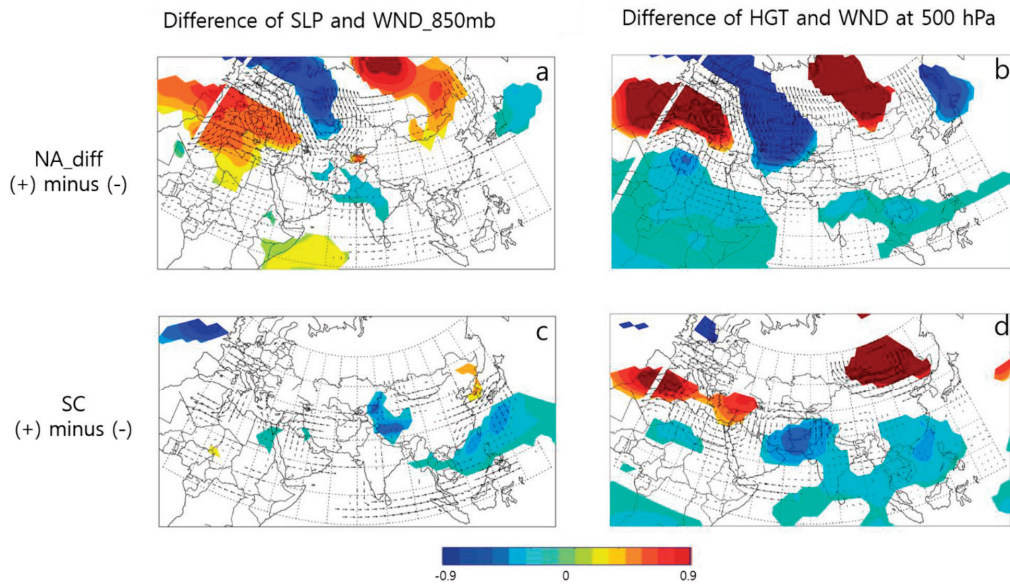


그림 4.27. NA\_diff에 대한 양의 composite 해와 음의 composite 해의 해면기압(유색 컨투어)과 850 hPa 바람장(화살)의 차이(a)와 500 hPa 지위고도(유색 컨투어)와 500 hPa 바람장(화살)의 차이(b). (c)와 (d)는 SC에 대한 양의 composite 해와 음의 composite 해의 차이. 85%의 신뢰도에서 통계적으로 유의미한 상관관계만 표시됨.

따라서 위의 두 변수를 이용하여 구축한 6월 강수량 회귀 예측모델은 다음과 같다.

$$[\text{Precipitation}] = -6.465 + 0.907623 * \text{NA\_diff\_Apr} + 0.956704 * \text{SC\_Apr} \quad (\text{식 4.4})$$

관측된 강수량과 추정 강수량은 그림 4.28에 도시되었다. 1993-2012년의 기간 동안 one-leave-out 교차검증 결과 시계열 상관지수(TCC)는 0.38로 나타났다. 본 모델을 이용하여 2013년부터 2015년까지 예측한 결과 2013년과 2015년의 강수 부족을 잘 모의하지는 못하였다. 예측 성능이 높지 않은 이유로는 첫째 6월은 강수와 SST의 연관

성이 4월이나 5월에 비해 낮은 시기이며, 둘째 태풍으로 인한 강수 또한 고려되지 않았고, 셋째 앞서 언급한 것처럼 엘니뇨 발달의 관점에서 특이했던 2013-2015년의 경우 예측력이 일시적으로 하락 할 수 있기 때문이다. 이를 보완하기 위해서 SST 이외의 대기, 해양 변수(e.g., OLR, SLP, 바람 등)를 추가로 분석하여 모델을 개선할 필요가 있다.

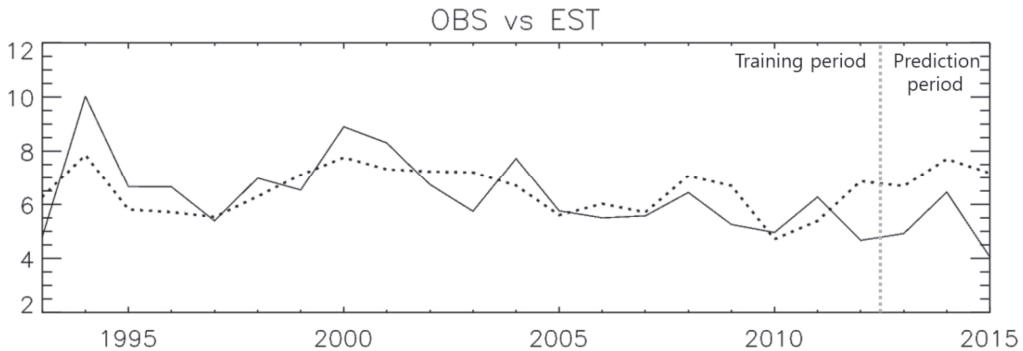


그림 4.28. 관측된 6월 강수량(실선, 단위는 mm/day)과 모델 추정 강수량(점선). 테스트 기간과 예측 기간이 세로 점선으로 나뉘어져 있음.

## 4.2 다중범위 기후정보 상세화

### 4.2.1 ECMWF(S2S) 상세화

ECMWF 계절내예측 자료의 예측성 평가는 2015/05/14 ~ 2015/09/24 사이의 20개 예측시점의 자료를 사용하여 람타콩 댐을 중심으로 상류에 위치하여 유입량에 영향을 미치는 Pak Chong Agromet(TH431301) 기상 관측지점과 람카타콩 댐 하류부에 위치하여 논에서의 필요수량 및 수확량에 미칠 수 있는 Nakhon Rachasima(TH431201) 기상 관측지점에 대하여 예측선행시점 및 1주일 단위 예측선행기간별 예측성을 Temporal Correlation Coefficient(TCC) 값을 이용하여 분석하였다(그림 4.29). 기온의 경우, 20개 예측시점에 대한 1주 예측선행시간과 2~6주 예측선행시간에 대한 TCC 값들을 이용하여 상관계수를 구하는 경우 1주-2주 사이에서는  $R^2$  값이 0.36으로 높은 값을 보이나 3주 이후의 경우에는 예측선행시간이 증가함에 따라서 기울기가 음의 값을 보이거나  $R^2$  값이 0에 가까운 값을 보인다. 이는 특정 예측선행시점의 예측성이 2주까지는 일관성 있게 유지되지만 그 이후의 예측선행기간에 대해서는 무작위적으로 결정되는 것임을

알 수 있다. 강수량의 경우에는 동일한 분석을 수행한 결과, 1주 예측선행에 의한 TCC 값들이 2주 이상 예측선행기간에 대한 TCC 값 사이에 어떠한 경향성도 보이지 않았다. 즉 특정 예측선행시점의 예측성의 높고 낮음이 역학적인 예측모형의 특성에 기인하기 보다는 우연에 의해 결정된다고 생각할 수 있다. 따라서 기온의 경우에는 예측선행시점 별 1주-2주 예측선행기간의 TCC값의 평균을 TH431201 및 TH431301 관측지점에 대해 비교하였으며, 강수량의 경우에는 1주 예측선행기간의 TCC 값을 이용하여 두 관측소의 예측선행시점별 예측성을 비교하였다(그림 4.30). 인접한 두 관측소의 예측선행시점별 예측 성능의 비교를 통한 공간적인 예측 성능의 비교에서도 기온의 경우는  $R^2$  값이 0.78로 높은 값을 보인 반면에 강수량의 경우  $R^2$  값이 0.22로 낮은 값을 보였다. 이는 기온의 경우 인접한 기상 관측지점에 대해서 비슷한 예측성이 보장되는 반면에 강수량의 경우에는 인접한 기상 관측지점 사이의 예측성도 예측성이 무작위적으로 결정될 수 있음을 보여 준다.

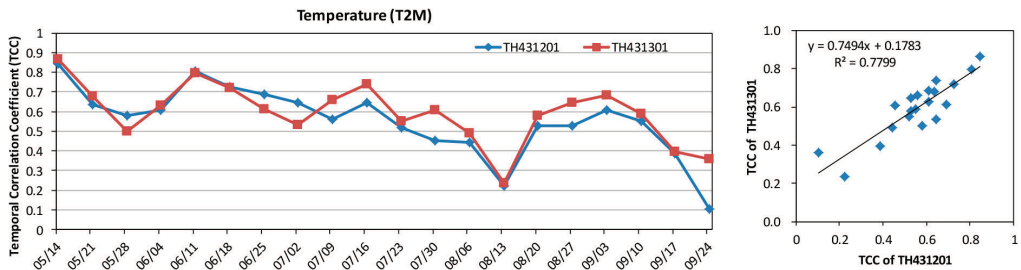


그림 4.29. 람타콩 소유역내 인접한 두 관측지점(Nakhon Rachasima; TH431201, Pak Chong Agromet; TH431301)의 예측선행시점별 예측성 비교(기온)

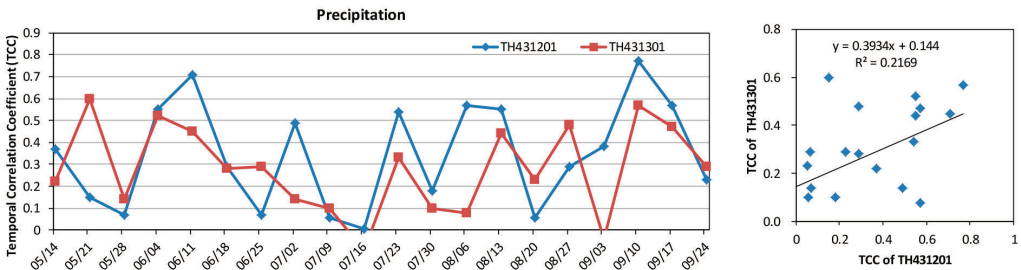


그림 4.30. 람타콩 소유역내 인접한 두 관측소지점(Nakhon Rachasima; TH431201, Pak Chong Agromet; TH431301)의 예측선행시점별 예측성 비교(강수량).

그림 4.31 및 표 4.7은 예측선행시간별 20개 예측시점의 평균 TCC 값의 변화를 보여 준다. 강수 및 기온 모두 예측선행기간이 증가함에 따라서 예측성이 감소하는 경향을 보였다.

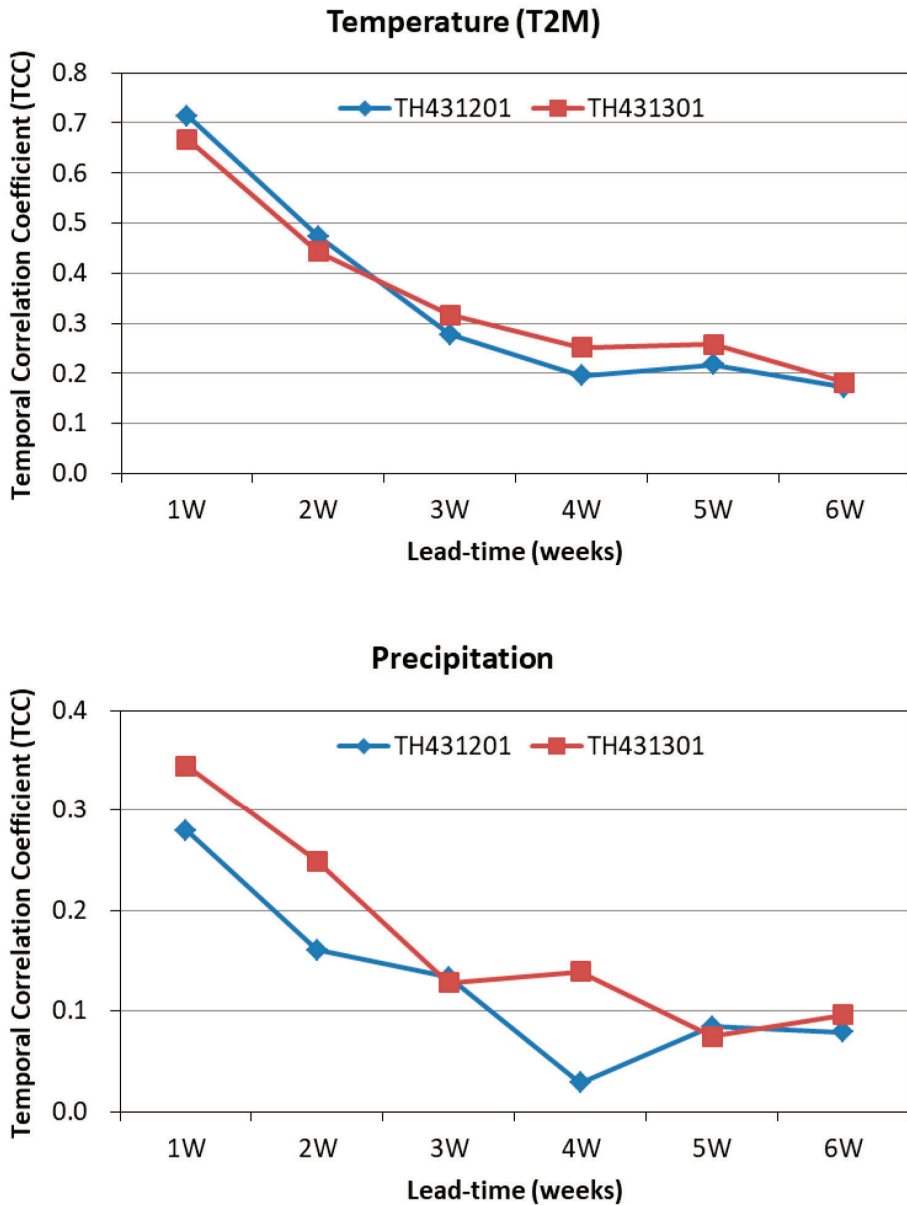


그림 4.31. 예측선행기간별 20개 예측시점의 평균 Temporal Correlation Coefficient(TCC) 비교: 기온(상), 강수량(하).

표 4.7. 계절내예측 상세화 자료의 예측선행기간별 예측성 비교(TCC)

Lead-time	Precipitation		Temperature	
	TH431201	TH431301	TH431201	TH431301
1W	0.28	0.34	0.71	0.67
2W	0.16	0.25	0.47	0.44
3W	0.13	0.13	0.28	0.32
4W	0.03	0.14	0.19	0.25
5W	0.08	0.07	0.22	0.26
6W	0.08	0.10	0.17	0.18

#### 4.2.2 계절예측 자료의 상세화

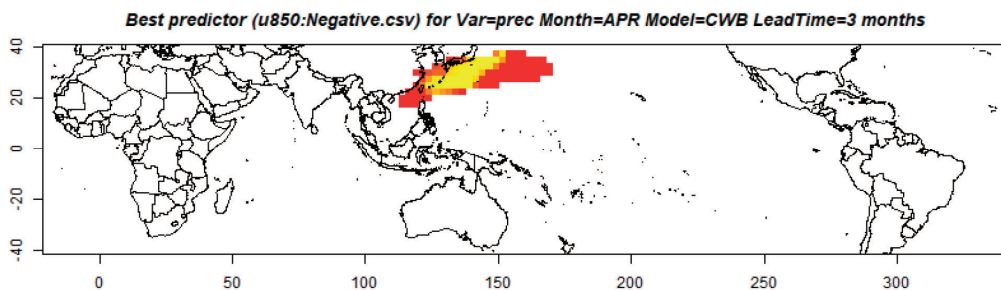
표 4.8은 월별 선정된 예측인자(예측모델) 결과를 보여준다. 전체적으로 강수와 비교하여 기온의 경우 예측모형들이 많이 선정되었다. 계절예측 상세화 모듈 중 통계적 방법에 의해 예측인자를 찾아 예측을 수행하는 MWR, MWR-Obs, CIR 방법 중에서 MWR-Obs 및 CIR 방법의 경우에는 예측인자가 하나도 선정되지 않았다. 표 4.8 중 붉은색이 MWR 방법에 의해 선정된 예측인자의 경우를 보여준다. 4월 강수량 예측에 11개로 가장 많은 예측인자가 선정되었고 5월, 7월, 8월에도 각각 1개, 1개, 2개의 예측인자가 선정되었다. 반면 기온에 대해서는 MWR 방법에 의한 예측인자가 하나도 선정되지 않았다. 이러한 결과가 나온 이유 중 하나는 강수에 영향을 주는 인자들이 특정한 시기(decade)에 따라서 변화하는 일명 decadal change 또는 climate shift의 영향일 수도 있을 것이라 생각된다.

표 4.8. 월별 선정 예측인자 리스트(괄호의 LT(lead time)는 예측선행기간을 의미하며 붉은색은 MWR방법에의해 선정된 예측인자임)

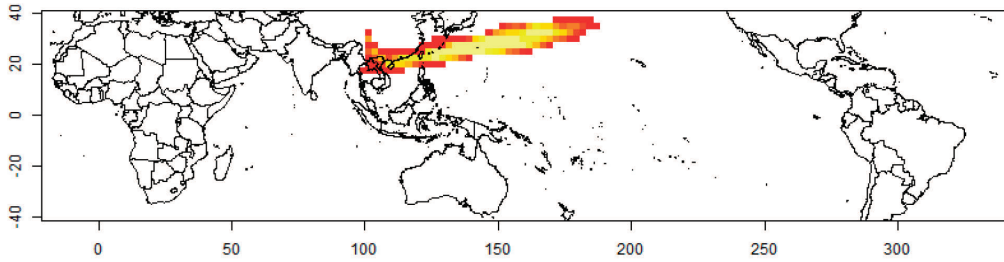
Month	Precipitation	Temperature
Jan	HMC(LT1), NASA(LT4), APCC(LT5), NASA(LT6)	CWB(LT2), PNU(LT4)
Feb	NASA(LT5)	CWB(LT1), NCEP(LT1), NCEP(LT2), APCC(LT3), NCEP(LT3), POAMA(LT3), PNU(LT4), POAMA(LT4), NASA(LT5), PNU(LT5), POAMA(LT5), NASA(LT6), NCEP(LT6), POAMA(LT6)
Mar		NCEP(LT2), NCEP(LT4), PNU(LT1), PNU(LT3), APCC(LT3), POAMA(LT3), POAMA(LT4), NCEP(LT5), NASA(LT3), NASA(LT4), POAMA(LT5), NASA(LT1), NASA(LT5), POAMA(LT2), POAMA(LT6), NASA(LT6), NCEP(LT1), PNU(LT2)
Apr	<b>HMC(LT2, u850), CWB(LT3, u850), APCC(LT3, t850), APCC(LT4, u200), MSC(LT4, slp), NASA(LT1, v200), NASA(LT4, u200), NCEP(LT2, v200), NCEP(LT3, slp), NCEP(LT4, t850), PNU(LT2, u850), NASA(LT6)</b>	HMC(LT1), HMC(LT2), APCC(LT3), NCEP(LT4), NCEP(LT3), PNU(LT3), APCC(LT2), APCC(LT5), POAMA(LT5), NASA(LT6), APCC(LT1), NCEP(LT1), PNU(LT1), NASA(LT1), NCEP(LT2), NASA(LT5), NASA(LT2), NASA(LT4)
May	<b>APCC(LT2, sst)</b> , PNU(LT1), MSC(LT2), MSC(LT4), MSC(LT5)	CWB(LT1), HMC(LT1), PNU(LT2), APCC(LT3), APCC(LT4), APCC(LT1), NASA(LT4), PNU(LT4), MSC(LT1), PNU(LT6), PNU(LT3), PNU(LT5), APCC(LT2), MSC(LT3), NCEP(LT3), NCEP(LT4), NCEP(LT5), POAMA(LT6), APCC(LT6), NCEP(LT6), NASA(LT3), PNU(LT1), MSC(LT2), NASA(LT5), NASA(LT6), NCEP(LT1), NASA(LT2), NCEP(LT2), MSC(LT4), NASA(LT1), MSC(LT5)
Jun		CWB(LT1), HMC(LT1), CWB(LT2), APCC(LT2), APCC(LT1), POAMA(LT4), PNU(LT6), NASA(LT5), APCC(LT3), PNU(LT2), MSC(LT4), APCC(LT6), NCEP(LT5), POAMA(LT1), MSC(LT5), APCC(LT5), APCC(LT4), MSC(LT3), MSC(LT2), NASA(LT1), MSC(LT6), NCEP(LT4), NASA(LT6), MSC(LT1), NASA(LT4), NASA(LT3), NCEP(LT6), NCEP(LT2), NCEP(LT3), NASA(LT2), NCEP(LT1)
Jul	<b>POAMA(LT5, v850)</b>	CWB(LT1), CWB(LT2), CWB(LT3), PNU(LT6), POAMA(LT5), PNU(LT1), APCC(LT3), PNU(LT4), APCC(LT4), NASA(LT6), NASA(LT2), APCC(LT5), POAMA(LT6), PNU(LT3), NASA(LT1), MSC(LT1), POAMA(LT4), NCEP(LT6), APCC(LT6), POAMA(LT1), APCC(LT1), NASA(LT3), NASA(LT5), MSC(LT6), PNU(LT5), PNU(LT2), APCC(LT2), MSC(LT2), NCEP(LT3), NCEP(LT2), POAMA(LT2), MSC(LT4), NCEP(LT1), NASA(LT4), NCEP(LT5), MSC(LT3), NCEP(LT4)

Month	Precipitation	Temperature
Aug	<b>CWB(LT2, t850), HMC(LT2, u850),</b> POAMA(LT3), MSC(LT6)	CWB(LT2), PNU(LT4), NASA(LT6), APCC(LT2), APCC(LT3), POAMA(LT1), NCEP(LT2), MSC(LT6), NASA(LT2), APCC(LT5), MSC(LT5), POAMA(LT2), PNU(LT1), MSC(LT3), NCEP(LT4), NCEP(LT6), NCEP(LT5), NASA(LT1), NCEP(LT1), APCC(LT1)
Sep	BCC(LT2)	APCC(LT6), POAMA(LT1), POAMA(LT2), POAMA(LT3), POAMA(LT4), APCC(LT2), PNU(LT5) POAMA(LT6) MSC(LT5), PNU(LT4), MSC(LT4), MSC(LT3), NCEP(LT4), NCEP(LT5), MSC(LT6), NASA(LT6), NASA(LT5), NASA(LT4), NCEP(LT6), NCEP(LT1), NCEP(LT2), NCEP(LT3), NASA(LT2), NASA(LT1), NASA(LT3)
Oct	MSC(LT4), APCC(LT4)	HMC(LT1), HMC(LT3), POAMA(LT6), NCEP(LT2), POAMA(LT4), NCEP(LT4), NASA(LT4), MSC(LT6), POAMA(LT5), APCC(LT3), NCEP(LT3), APCC(LT2), MSC(LT5), NCEP(LT6), NCEP(LT5), NASA(LT2), MSC(LT4)
Nov	NCEP(LT3), NCEP(LT4)	HMC(LT1), HMC(LT2), POAMA(LT5), POAMA(LT6), APCC(LT1), NCEP(LT3), APCC(LT2), NCEP(LT6), NCEP(LT4), NASA(LT2), NASA(LT3), PNU(LT1), NASA(LT4), NASA(LT1), NCEP(LT5), NASA(LT5), NCEP(LT1)
Dec	CWB(LT2), POAMA(LT3)	POAMA(LT3), NASA(LT1), NASA(LT3), POAMA(LT6), PNU(LT2), NASA(LT6), MSC(LT6), NASA(LT5), POAMA(LT1), PNU(LT3), NCEP(LT5), NASA(LT2), NCEP(LT6), NCEP(LT2), NASA(LT4), NCEP(LT4), APCC(LT3), NCEP(LT1)
Count	4	0

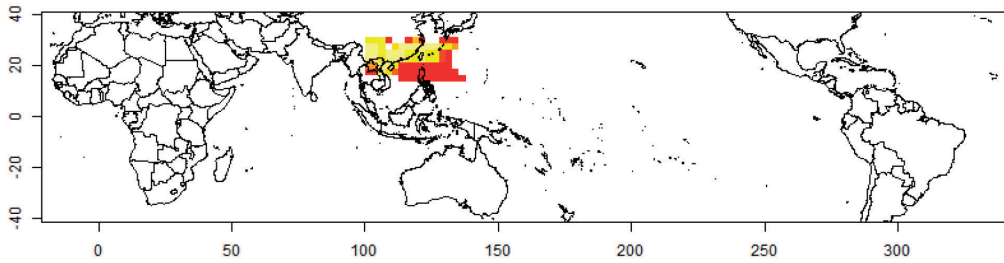
4월 강수량 예측을 위해 선정된 예측인자의 공간적 위치를 보면 그림 4.32와 같다.



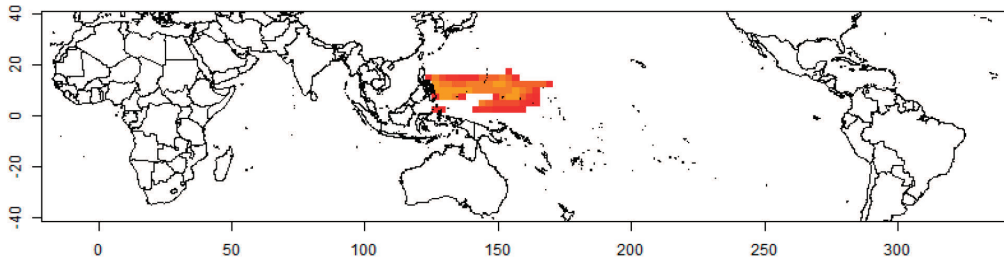
**Best predictor (u850:Negative.csv) for Var=prec Month=APR Model=HMC LeadTime=2 months**



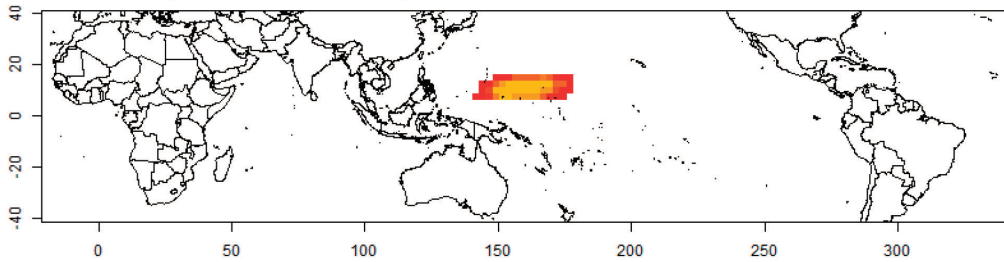
**Best predictor (u850:Negative.csv) for Var=prec Month=APR Model=PNU LeadTime=2 months**



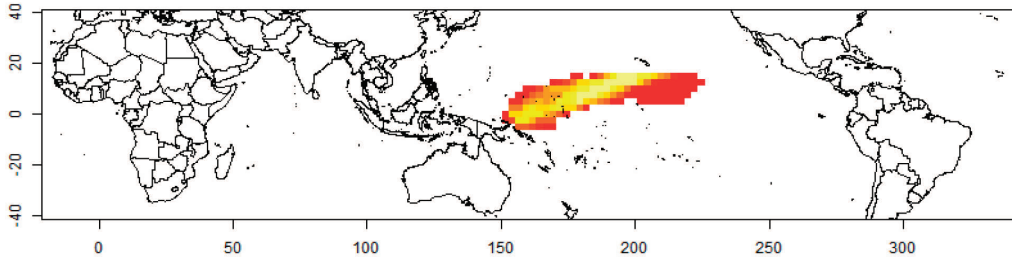
**Best predictor (sst:Positive.csv) for Var=prec Month=MAY Model=APCC LeadTime=2 months**



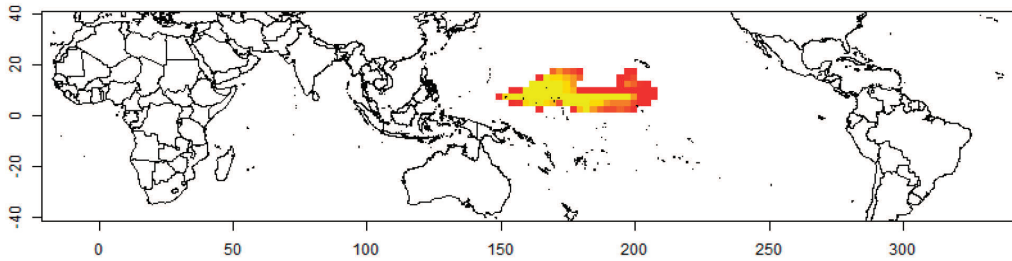
**Best predictor (t850:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=APCC LeadTime=3 months**



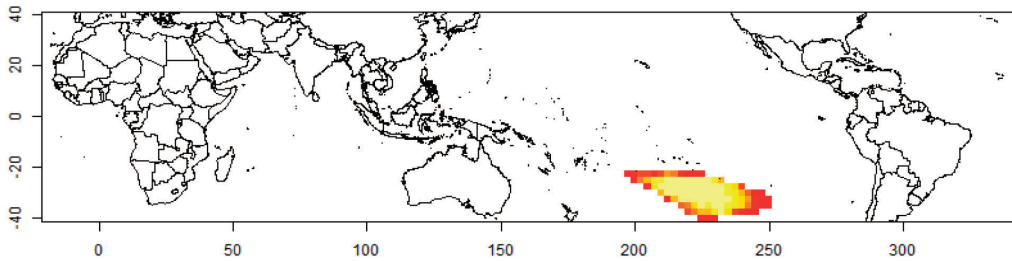
**Best predictor (u200:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=APCC LeadTime=4 months**



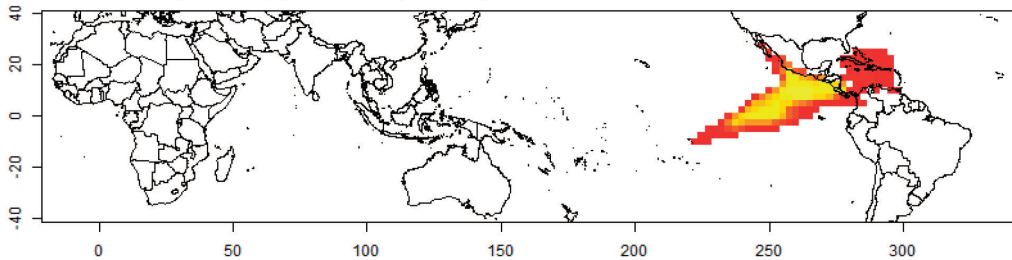
**Best predictor (v200:Negative.csv) for Var=prec Month=APR Model=NASA LeadTime=1 months**



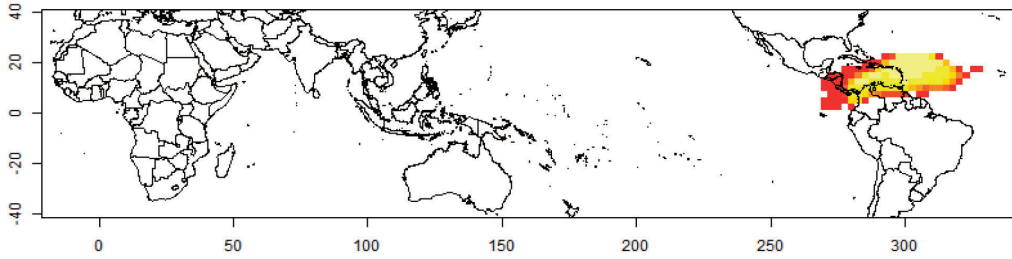
**Best predictor (t850:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=NCEP LeadTime=4 months**



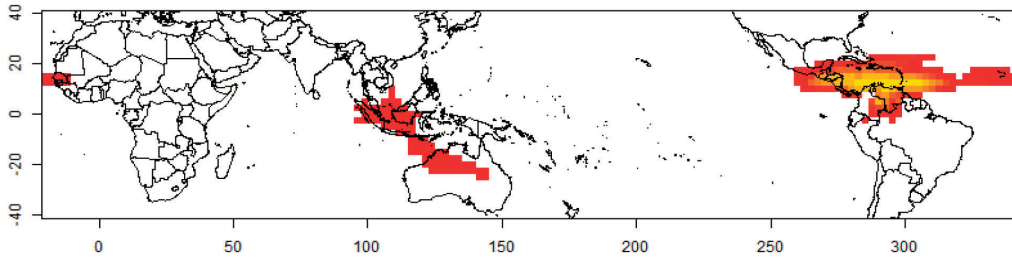
**Best predictor (slp:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=NCEP LeadTime=3 months**



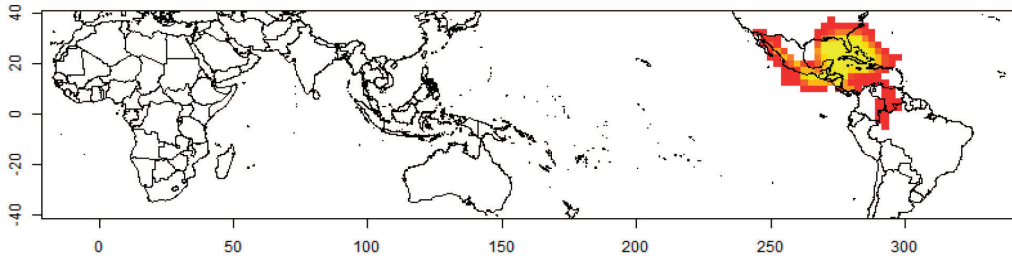
**Best predictor (v200:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=NCEP LeadTime=2 months**



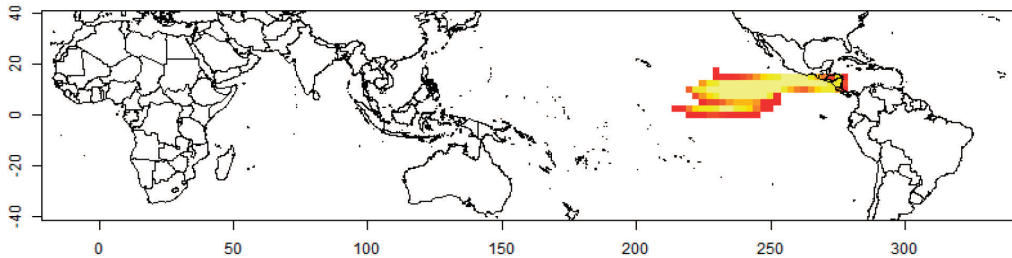
**Best predictor (u200:Negative.csv) for Var=prec Month=APR Model=NASA LeadTime=4 months**



**Best predictor (slp:Positive.csv) for Var=prec Month=APR Model=MSC LeadTime=4 months**



**Best predictor (u850:Negative.csv) for Var=prec Month=AUG Model=HMC LeadTime=2 months**



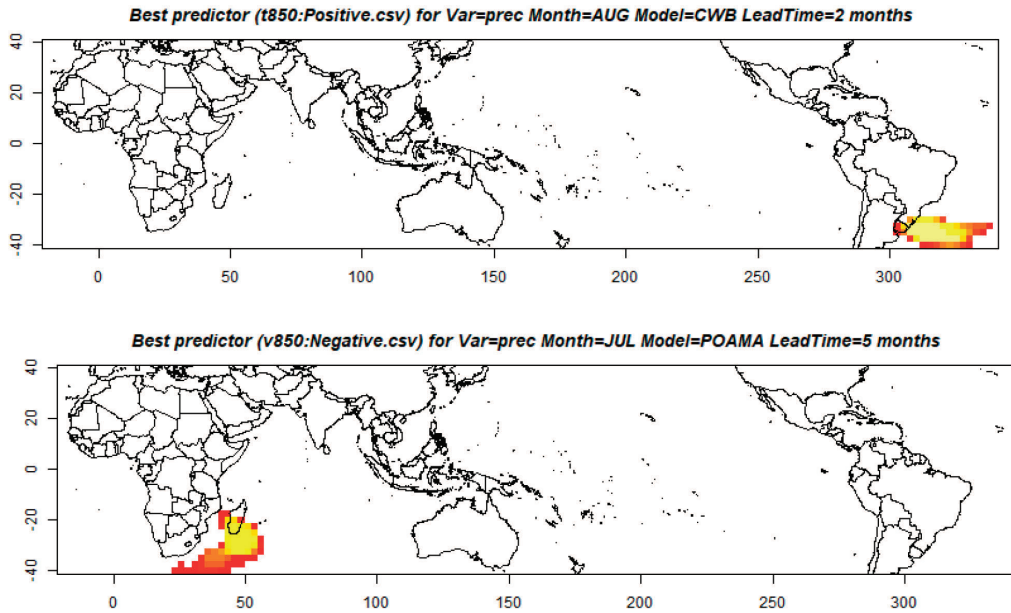
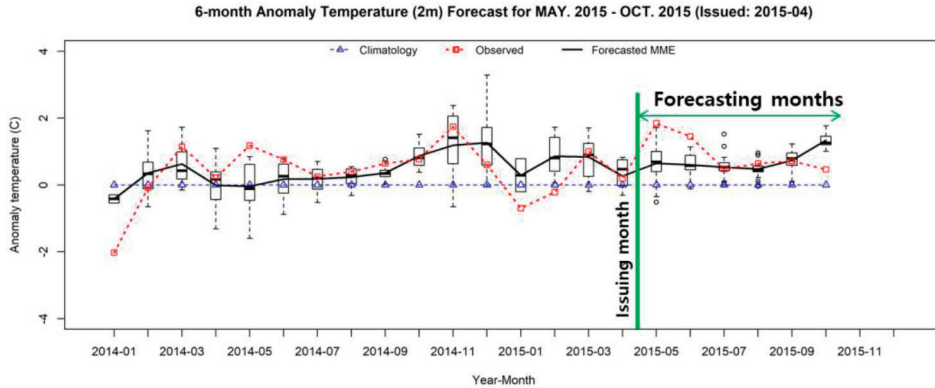


그림 4.32. MWR 방법 기반 선정 예측인자.

S2S의 예측기간(2015년 5월~2015년 11월)과 동일하게 계절예측을 수행한 경우는 그림 4.33과 같다. 즉 4월에 향후 6개월(5월~10월)에 대해 예측을 수행하였을 경우 기온의 경우 평년보다 관측기온이 높았던 상황을 예측모형이 잘 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 강수예측의 경우 5월에 평년대비 낮게 관측된 강수량을 잘 모의하지 못하고 있으며 6월 또한 평년대비 낮은 관측된 강수량을 보였으나 선정된 예측모형이 하나도 없었다. 또한 8월에 관측 강수량은 평년과 비슷한 경향을 보였으나 예측은 높게 예측하여 2015년 강수예측은 한계를 보였다. 선정된 모형들을 이용하여 월별 예측선행 시간별 예측 성능을 TCC로 나타내면 그림 4.33b의 좌측하단 테이블과 같다.

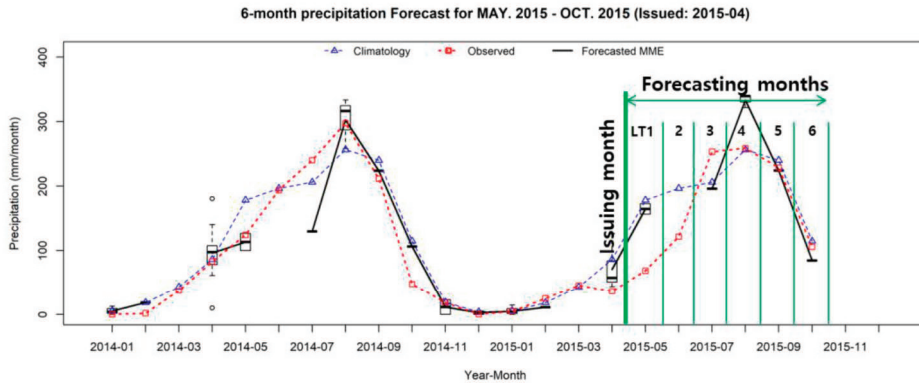


Monthly skill score for FEB. 1983 - DEC. 2015

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
LT1-TCC	0.51	0.54	0.55	0.62	0.71	0.68	0.67	0.59	0.71	0.58	0.65	0.61
LT1-HSS	0.15	0.14	0.22	0.32	0.27	0.54	0.41	0.17	0.22	0.23	0.32	0.45
LT2-TCC	0.51	0.53	0.53	0.6	0.68	0.64	0.66	0.54	0.7	0.57	0.61	0.6
LT2-HSS	0.15	0.09	0.27	0.41	0.27	0.49	0.45	0.17	0.21	0.23	0.32	0.45
LT3-TCC	0.35	0.55	0.5	0.57	0.67	0.63	0.64	0.53	0.69	0.55	0.57	0.6
LT3-HSS	-0.09	0.16	0.22	0.28	0.32	0.45	0.45	0.31	0.16	0.32	0.36	0.41
LT4-TCC	0.35	0.52	0.5	0.56	0.67	0.61	0.63	0.52	0.71	0.55	0.58	0.59
LT4-HSS	-0.09	0.11	0.25	0.32	0.41	0.4	0.45	0.26	0.12	0.36	0.32	0.41
LT5-TCC	-	0.52	0.51	0.55	0.69	0.59	0.61	0.54	0.69	0.56	0.55	0.55
LT5-HSS	-	0.16	0.16	0.3	0.5	0.45	0.32	0.31	0.12	0.41	0.32	0.36
LT6-TCC	-	0.42	0.53	0.48	0.74	0.63	0.58	0.49	0.67	0.52	0.46	0.55
LT6-HSS	-	0.11	0.11	0.18	0.48	0.44	0.23	0.18	0.12	0.39	0.23	0.32

Probability forecast for 2015

	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Low	4	0	0	0	0	0
Normal	12	16	10	6	10	0
High	84	84	90	94	90	100



Monthly skill score for JAN. 1983 - DEC. 2015

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
LT1-TCC	0.63	0.41	-	0.62	0.54	-	0.48	0.59	0.37	0.53	0.57	0.42
LT1-HSS	0.056	0.16	-	0.19	0.18	-	0.19	0.2	0.057	0.23	0.18	0.23
LT2-TCC	0.63	0.4	-	0.62	0.53	-	0.46	0.59	0.37	0.53	0.57	0.42
LT2-HSS	0.095	0.16	-	0.19	0.23	-	0.19	0.2	0.057	0.23	0.18	0.23
LT3-TCC	0.63	0.4	-	0.6	0.49	-	0.46	0.47	-	0.53	0.57	0.36
LT3-HSS	0.095	0.16	-	0.14	0.24	-	0.19	0.11	-	0.23	0.18	0.086
LT4-TCC	0.63	0.4	-	0.57	0.49	-	0.48	0.42	-	0.53	0.53	-
LT4-HSS	0.095	0.16	-	0.18	0.24	-	0.19	0.085	-	0.23	0.37	-
LT5-TCC	0.51	0.4	-	0.49	0.55	-	0.46	0.42	-	-	-	-
LT5-HSS	-0.076	0.16	-	0.32	0.25	-	0.19	0.085	-	-	-	-
LT6-TCC	0.38	-	-	0.49	-	-	-	0.42	-	-	-	-
LT6-HSS	0.012	-	-	0.32	-	-	-	0.085	-	-	-	-

No selected model

Probability forecast for 2015

	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
Low	0	NaN	0	0	0	100
Normal	100	NaN	100	0	100	0
High	0	NaN	0	100	0	0

그림 4.33. 2015년 5월~2015년 11월 예측기간에 대한 예측결과(a: 기온, b: 강수량).

### 4.2.3 기후변화 시나리오 상세화

SQM 방법을 이용하여 북동부 지역의 22개 기상 관측지점을 대상으로 생산된 기후변화 시나리오 상세화자료는 APCC Integrated Modeling Solution(AIMS)의 가이드라인에서 제시된 다음과 같은 분석들을 수행하였다. 1) 원시 GCM 평가를 통한 Worst GCM 제거, 2) 가뭄과 관련된 극한기후변화지수의 과거 재현성 및 미래 왜곡도 평가, 3) 강우 및 기온의 공간 재현성 평가, 4) GCM별 가중치 결정 및 MME 계산, 5) GCM 개수에 따른 불확실성 범위 평가를 포함한다.

#### 4.2.3.1 원시 GCM 평가를 통한 Worst GCM 제거

일반적으로 편의보정을 포함한 통계적 상세화 과정을 거치게 되면 GCM의 시공간적인 기후특성의 재현능력과 상관없이 관측자료의 특성과 비슷하게 수정이 된다. 따라서 본 절차는 편의보정 전의 GCM의 자료가 대상지역 기후의 공간적인 분포 및 계절적 변동성을 잘 재현하는지 평가함으로써 이후 절차에 적합하지 않은 GCM을 제거하는 것을 목적으로 한다. 그림 4.34은 공간상관계수(Partial Correlation Coefficient, PCC) 및 순단위 시간상관계수(Temporal Correlation Coefficient, TCC)를 이용하여 GCM별 순위를 강수 및 평균기온에 대해 구한 결과를 보여 준다. 본 연구에 사용된 총 29개 GCM 중에서 강수 변수에 대한 순위와 기온에 대한 순위가 동시에 높지 않은 11개 GCM(19~29번)은 이후 절차에 고려하지 않기로 결정하였다.

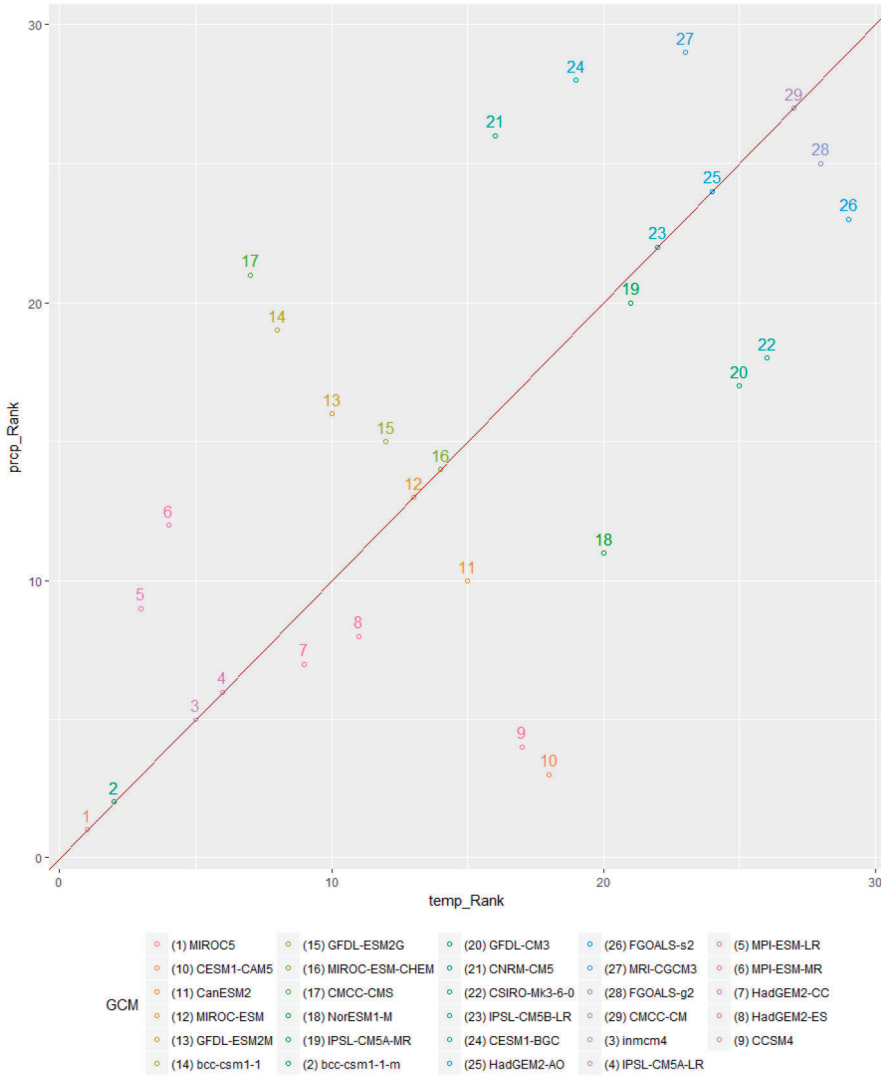


그림 4.34. 원시 GCM 평가에 따른 순위

#### 4.2.3.2 극한기후변화지수의 과거재현성 및 미래왜곡도 평가

가뭄과 가장 밀접하다고 판단되는 연강수량(Annual total precipitation amount) 및 최대무강우일수(Consecutive Dry Day, CDD) 극한기후변화지수를 이용하여 동일한 과거기간(1976~2005)에 대하여 관측자료로부터 도출된 중앙값 및 변동폭을 상세화된 GCM 자료가 얼마나 잘 재현하는지를 평가하는 것을 목적으로 한다. 미래기간에 대

해서는 재현성 평가 대신에 원시 GCM에서 과거기간(Historical)을 기준으로 미래기간에 대하여 전망된 변화율이 상세화 과정을 거치면서도 동일하게 유지되는지를 평가하였다. 그림 4.35은 태국 북동부 지역의 22개 관측지점을 모두 고려할 때 연강수량의 중앙값은 관측과 비교하여 다소 작게 모의하는 경향을 보인 반면에 CDD 값은 관측과 비교하여 다소 높은 값을 보였다. 미래 전망에 대한 왜곡 정도를 살펴보면 연강수량의 경우 RCP4.5 및 8.5 시나리오 모두 근미래에서 먼미래로 갈수록 전망치의 왜곡이 심해지는 경향을 보였다. CDD의 경우는 RCP8.5 시나리오의 먼미래 경우를 제외하고 전망치의 왜곡이 미소한 경향을 보였다.

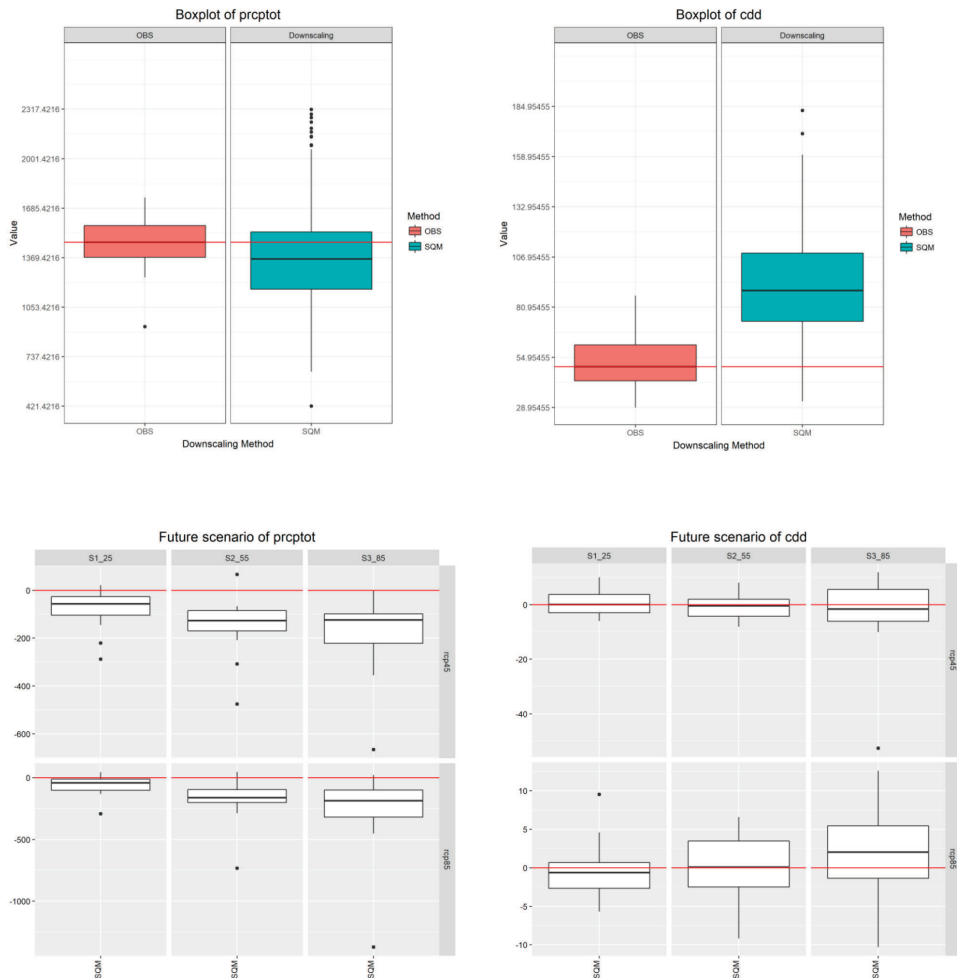
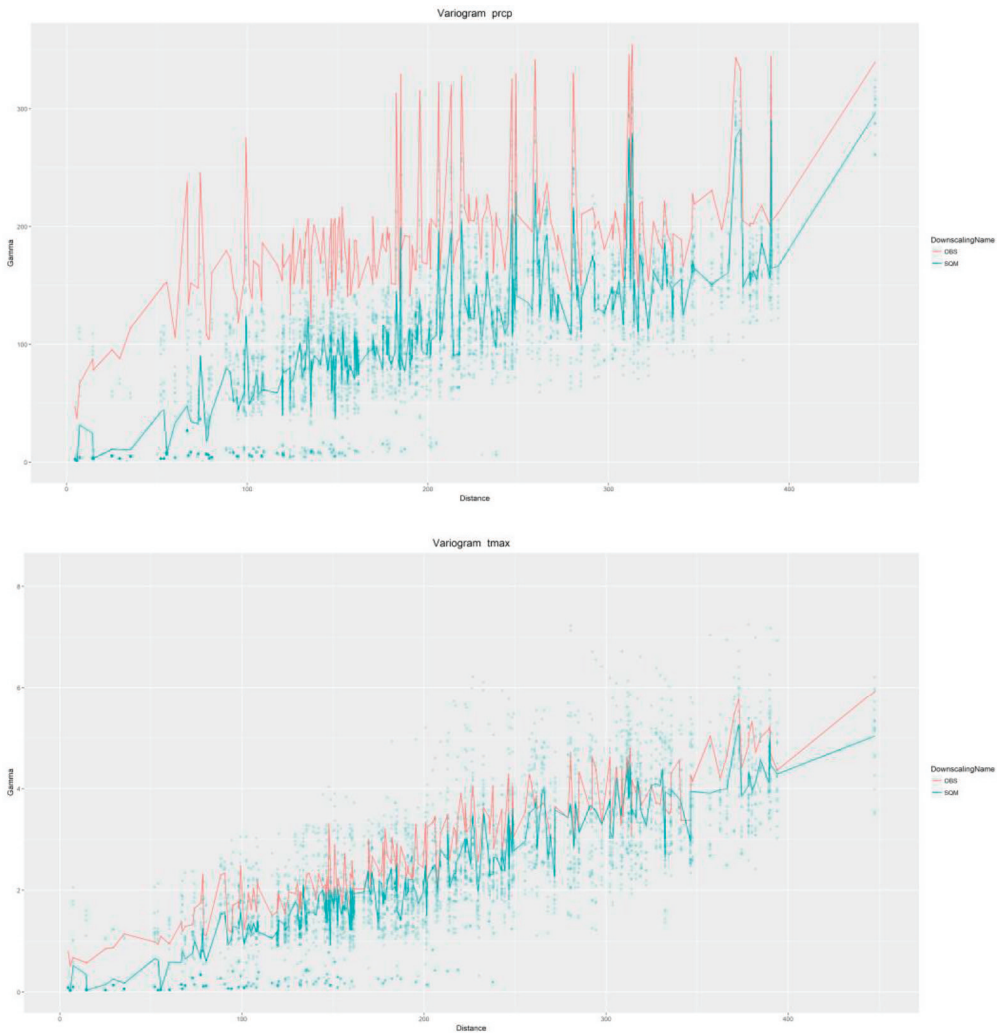


그림 4.35. 극한기후지수의 과거재현성 평가(상) 및 미래 전망왜곡도 평가(하)(좌: 연강수량, 우: 최대무강우일수).

### 4.2.3.3 공간 재현성 평가

태국 북동부 지역의 22개 기상 관측지점 사이에 발생하는 강수 및 기온의 공간적 상관성 분석결과는 그림 4.36에 제시되어 있다. 관측자료의 경우 강수, 최고온도, 최저온도 모두 관측소간의 거리가 증가됨에 따라서 상관성이 약해지는 경향을 보이고 있다. 다만 동일한 과거기간에 대해 상세화된 기후변화 시나리오 자료의 경우 최고온도 및 최저기온의 경우 관측자료의 경향을 비슷하게 재현하고 있는 반면에 강수량의 경우에는 관측자료보다 상관성이 높게 나타내는 경향을 보였다.



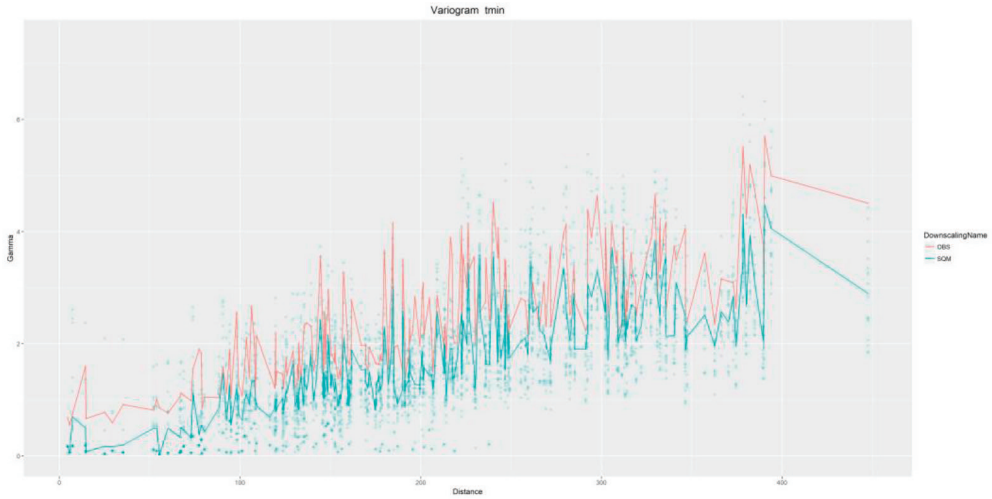


그림 4.36. 공간상관성 평가 결과(상: 강수량, 중: 최고기온, 하: 최저기온).

#### 4.2.3.4 GCM별 가중치 결정 및 MME 계산

GCM별 가중치는 우선 1) 관측자료와 GCM 상세 전망자료 사이의 30년 순별 평균값의 비교를 통해 계산되는 오차의 크기, 2) 30년 자료로부터 발생하는 관측자료 및 GCM 상세자료의 변동성의 차이로부터 발생하는 오차의 크기, 3) 사용자의 목적에 맞게 선택된 극한기후변화지수의 관측자료와 GCM 상세자료의 분포 적합성 관점의 오차를 모두 고려하여 0에서 1사이의 값으로 표준화한 후 총 오차(0으로부터의 거리)를 계산하였다. 그림 4.37은 계산된 거리가 가장 적은 GCM으로부터 큰 GCM까지 역거리가중법을 이용하여 계산된 GCM별 가중치를 보여 준다.

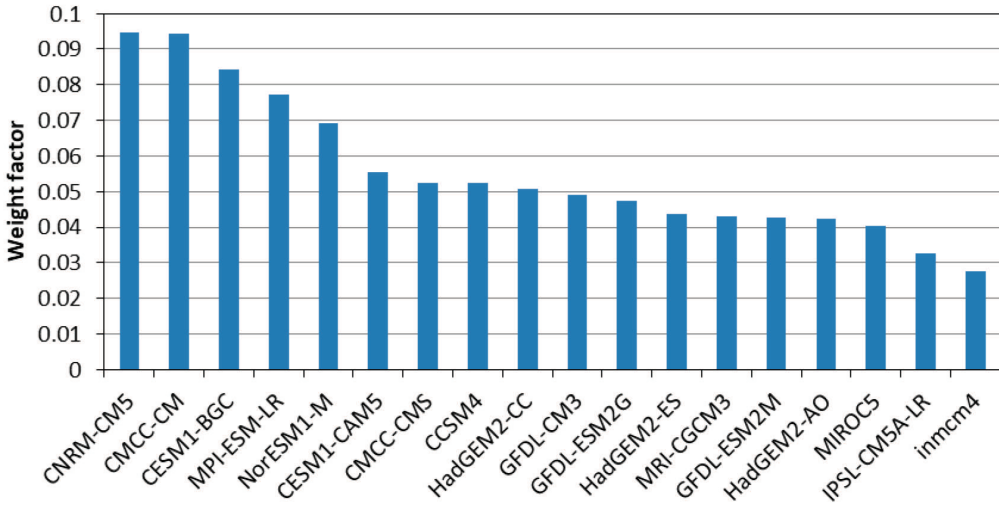


그림 4.37. MME 산정을 위한 GCM별 가중치.

#### 4.2.3.5 GCM 개수에 따른 불확실성 범위 평가

앞서 가뭄에 가장 밀접한 CDD를 고려한 GCM의 순위를 고려하여 가장 재현성이 좋은 GCM(CNRM-CM5)으로부터 순차적으로 GCM을 하나씩 증가시켜 갔을 때 전체 18개 GCM들에 의해 발생할 수 있는 최소값과 최대값의 차이를 전체 불확실성 범위로 간주하고 고려되는 GCM의 수가 증가됨에 따라서 계산되는 범위의 전체 범위에 대한 비율을 고려하였다. 그림 4.38은 RCP 시나리오 및 미래 기간 별 GCM 개수의 증가에 따라 설명되어지는 불확실성 범위에 대한 결과를 보여 주고 있다. 즉 RCP4.5 시나리오의 경우에는 18개 GCM 중에서 13개 GCM을 사용하는 경우 대상 기간에 상관없이 전체 불확실성의 80%까지 설명할 수 있는 반면에, RCP8.5 시나리오의 경우에는 17개 GCM을 사용하여야 기간에 상관없이 전체 불확실성의 80%를 설명할 수 있음을 보여 주고 있다. 대상변수는 사용자가 선택한 CDD 값과 기본적으로 고려되는 연강수량, 1일 최대강수량을 모두 고려한 변동성이며 CDD만을 고려한 불확실성 정보는 그림 4.39에 나타나 있다.

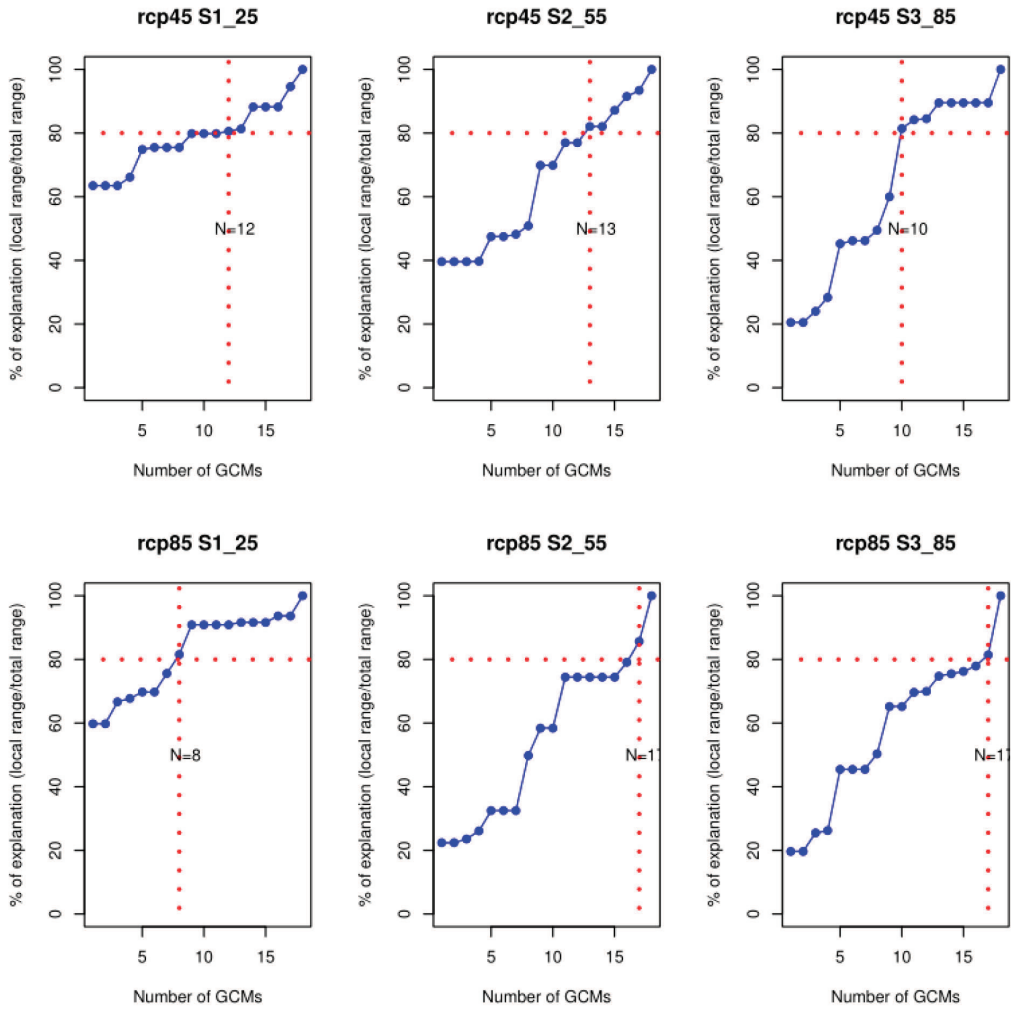


그림 4.38. GCM 개수의 증가에 따른 Overall 불확실성 설명력.



않은 특성을 보이고 있다.

EDI가 람타콩 소유역의 가뭄 상태를 잘 재현하는지를 보기 위해서 댐 상류의 Pak Chong Agromet 지점에서의 일단위 EDI를 월단위로 평균한 값과 태국 왕립관개청 (Royal Irrigation Department, RID)로부터 받은 저수지의 저류량과의 관계를 살펴 보았다. 댐 저류량은 상류 유역의 강수에 의한 유입량 및 인위적인 물관리에 의해서도 영향을 받기 때문에 일대일로 비교할 수는 없지만 가뭄이 발생하는 해에는 댐의 저류량이 감소할 가능성이 높기 때문에 어느 정도의 상관성을 기대할 수 있다. 그림 4.41(상)은 월평균 EDI와 저류량의 비교를 위한 시계열 자료로서 일단위 EDI를 통해 언급한 1983년, 1997~1998년, 2004~2005년에 지연시간을 가지고 비슷한 경향성을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 4.41(하)는 월평균 EDI와 댐 저수량과의 상관관계를 보여주는 그래프로 R<sup>2</sup>값이 0.29의 값을 보였다.

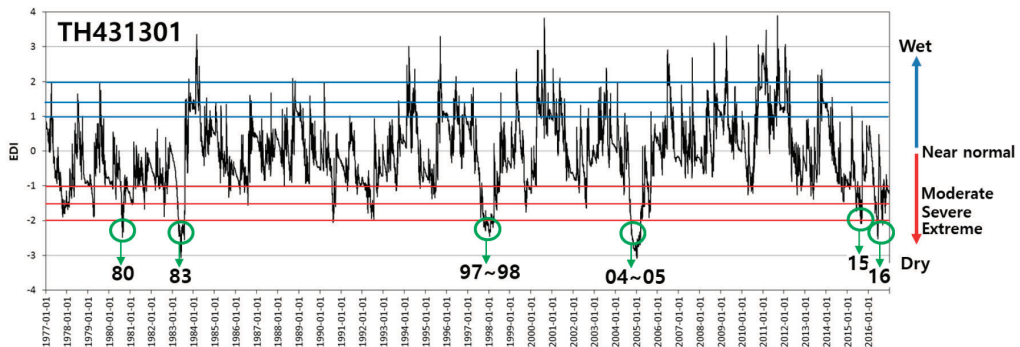


그림 4.40. Pak Chong Agromet 지점의 일단위 관측 자료를 이용한 EDI.

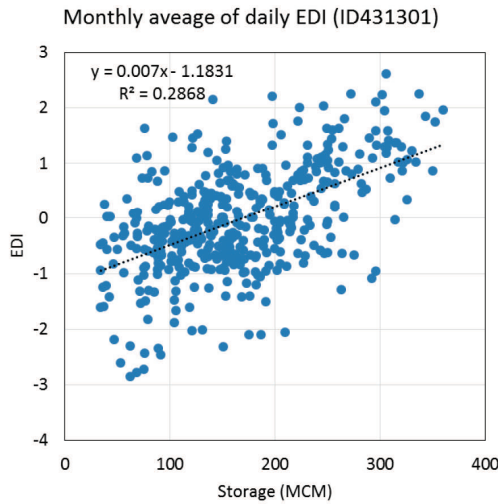
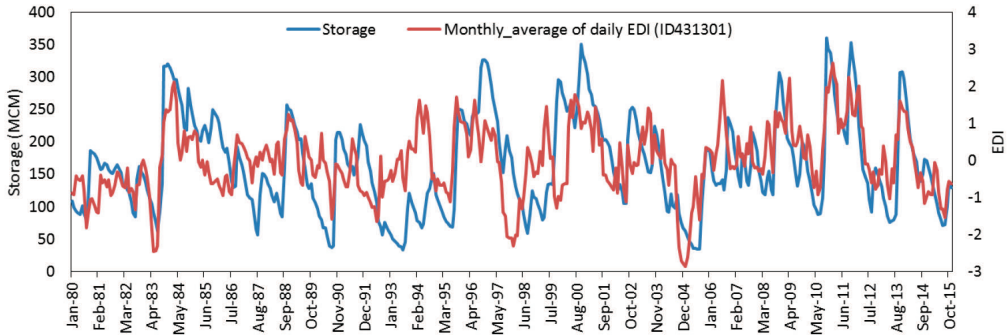


그림 4.41. 태국 북동부 지역의 월단위 EDI와 람타콩 댐 저류량 시계열(상) 및 산점도(하).

본 연구에서는 태국 북동부 지역 내에 위치한 기상 관측지점별로 실시간 자료가 수집된다는 가정하에 공간적인 가뭄의 분포를 파악하기 위해서 관측소의 EDI를 내삽하는 방법을 이용하여 가뭄지도를 생성할 수 있는 R-기반 패키지를 개발하였고 그림 4.42는 2015년 4월 20일로부터 2016년 6월 20일까지의 1개월 간격으로 계산된 EDI 지도를 보여 주고 있다.

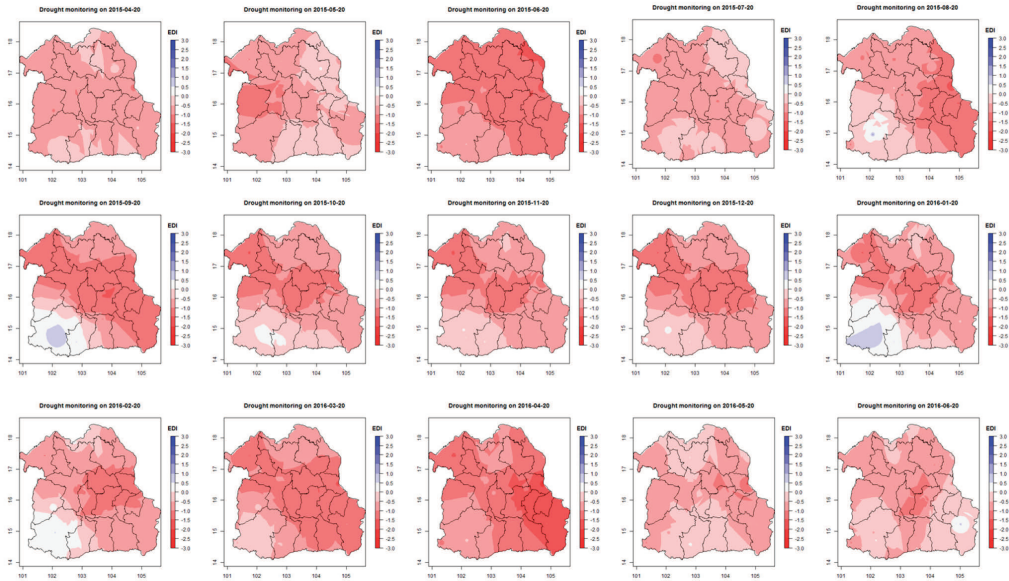


그림 4.42. 2015년 4월 20일로부터 2016년 6월 20일까지의 1개월 간격으로 계산된 EDI.

### 4.3.2 위성강우 기반 EDI를 이용한 가뭄감시

앞 절에서 관측자료를 이용하여 EDI를 산정하는 경우 여러 지점별 가뭄 상태 평가를 통해 시공간적인 가뭄감시가 가능하다. 그런데 공간적으로 분포된 위성자료를 이용하는 경우 통계적인 내삽이 아닌 보다 정밀한 공간 분포된 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 따라서 위성강우를 이용하여 EDI를 산정하여 살펴보았다.

위성강우 기반 EDI를 평가하기 위해 TMD의 두개의 지상 기상 관측지점(Nakhon Ratchasima, TH431201; Pak Chong Agromet, TH431301)의 관측자료를 이용하였으며(그림 4.43), 이 지점의 위성강우를 추출하여 연 위성 시계열 자료를 산출하였다(그림 4.44). Nakhon Ratchasima와 Pak Chong Agromet 지점의 연강수는 크게 차이가 없으나 상대적으로 강수가 적었던 해는 Pak Chang Agromet 지점이 Nakhon Ratchasima 지점의 강수보다 비교적 적게 내렸음을 알 수 있었다.

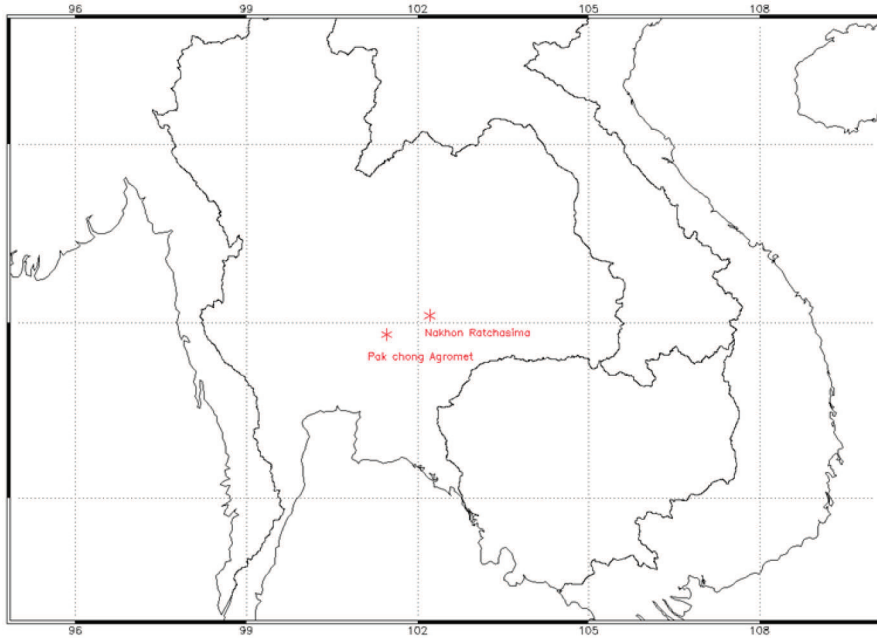


그림 4.43. Nakhon Ratchasima(TH431201) 및 Pak Chong Agromet(TH431301) 지상 기상 관측지점.

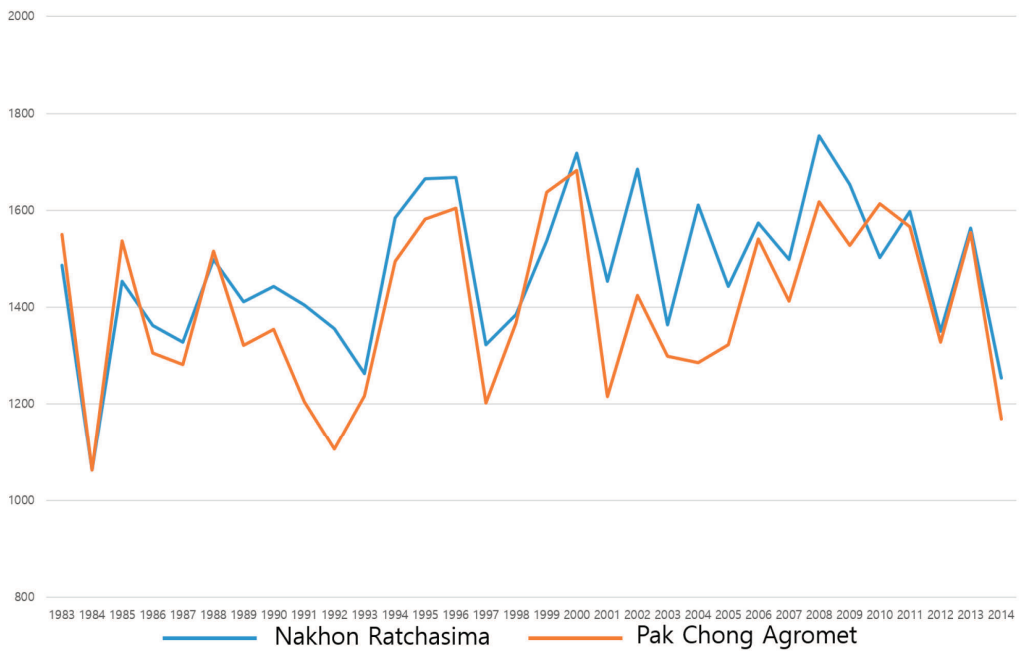


그림 4.44. Nakhon Ratchasima와 Pak chong Agromet 지점의 위성강우 기반 연강수량 시계열 자료.

1985년부터 2007년까지 9년 동안의 관측과 위성, 두 지점의 연강수 시계열 자료의 상관관계와 결정계수( $R^2$ )를 비교한 결과, Pak chong Agromet 지점의 경우, 상관계수는 0.478,  $R^2$ 는 0.267로 나타났으며(그림 4.45, 그림 4.46), Nakhon Ratchasima의 경우, 상관계수는 0.236,  $R^2$ 는 0.17로 비교적 낮은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다(그림 4.47,그림 4.48). 한국의 용담댐 시범유역에서 위성강우 기반의 가뭄감시와 지상 관측자료 기반의 가뭄감시의 상관성이 0.814,  $R^2$ 는 0.662로 비교적 높은 상관관계를 나타냈던 결과와는 다르게 태국 북동부 지역에서의 상관관계가 낮은 이유는 한국에서 비교는 TRMM 3B42 자료를 1998년부터 사용하였으나, 태국의 경우 사용된 자료는 PERSIANN-CDR 위성 강우로만 데이터를 활용했기 때문에 결과값이 상이하게 나온 것으로 판단된다. 따라서 향후, 태국 가뭄의 진단 및 평가의 활용성을 알아보기 위해서는 1998년부터는 TRMM 3B42 자료를 적용하여 비교 분석한 결과를 도출해야 할 것이다.

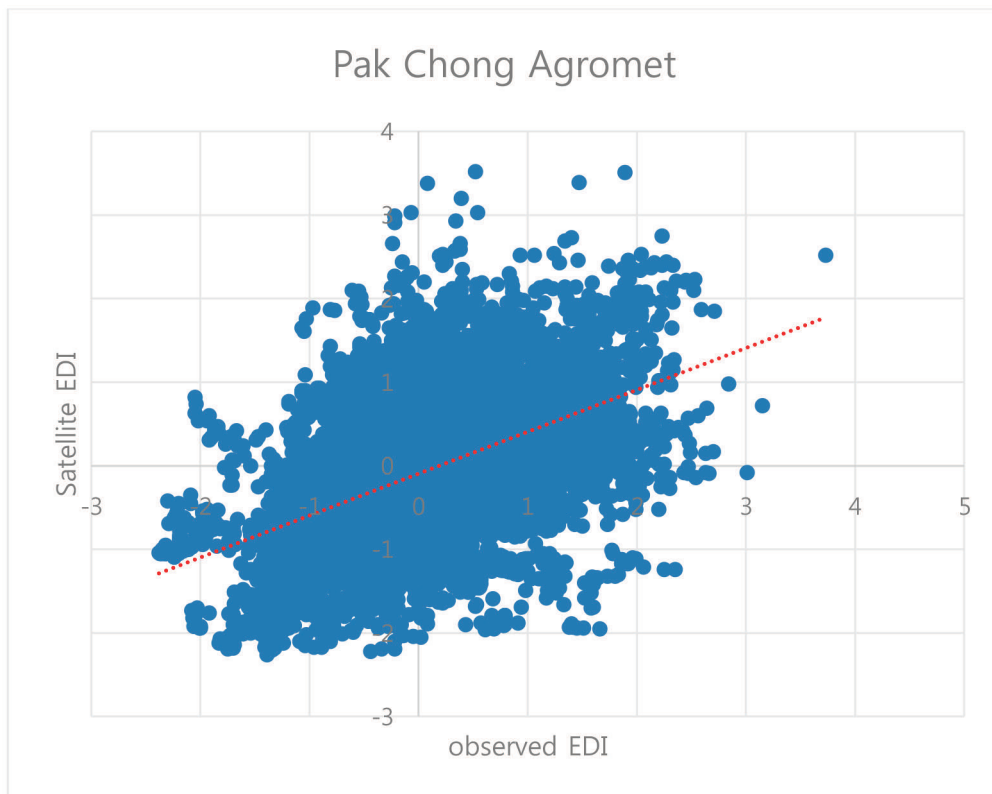


그림 4.45. Pak Chong Agromet 지점의 관측자료 기반과 위성강우 기반의 EDI 비교 산점도.

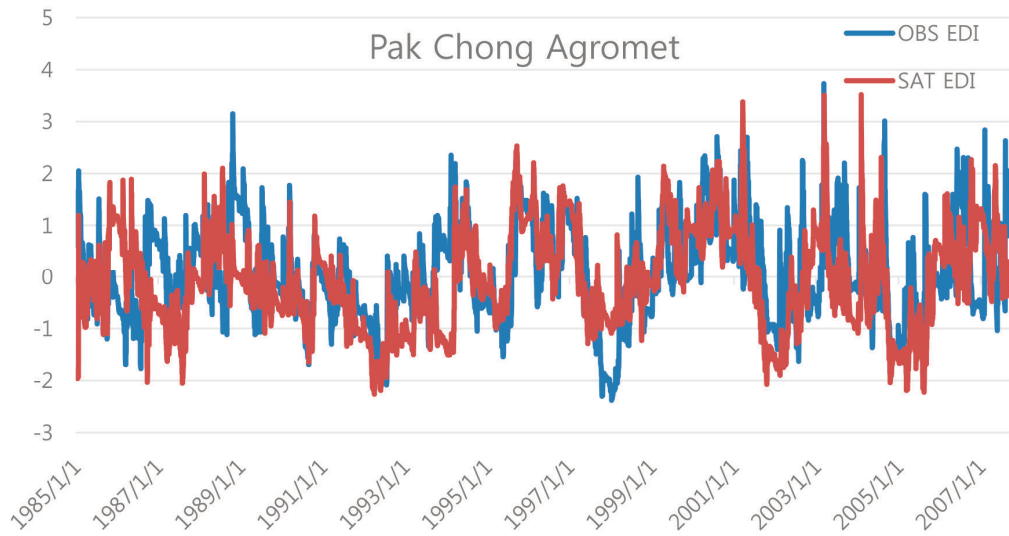


그림 4.46. Pak Chong Agromet 지점 위성 강우 기반 EDI 시계열 비교.

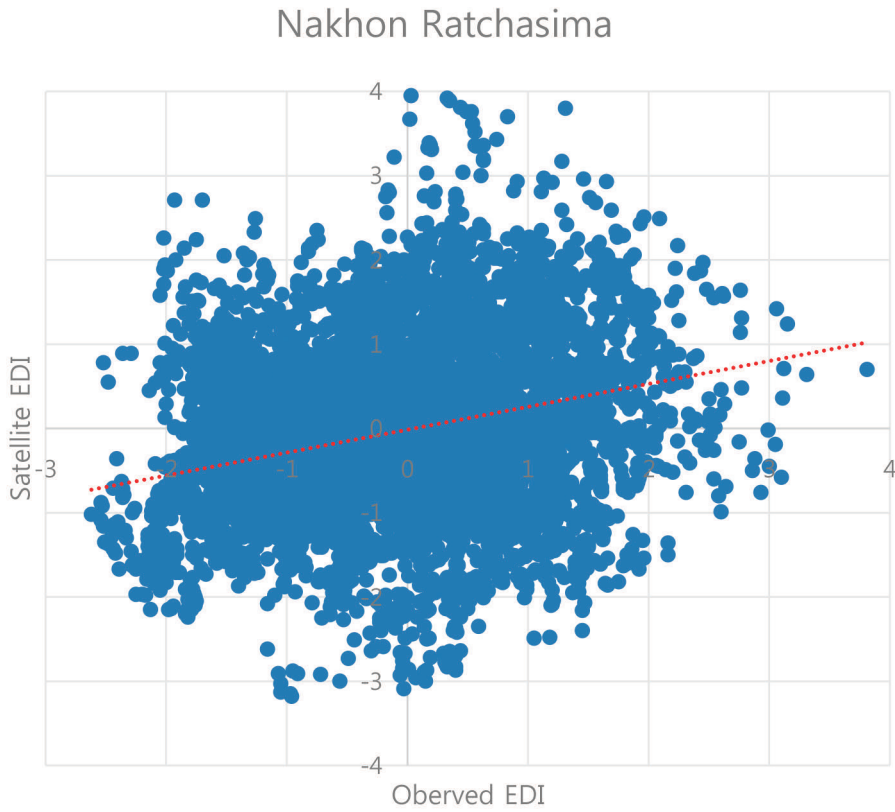


그림 4.47. Nakhon Ratchasima 지점의 관측자료 기반과 위성강우 기반의 EDI 비교 산점도.

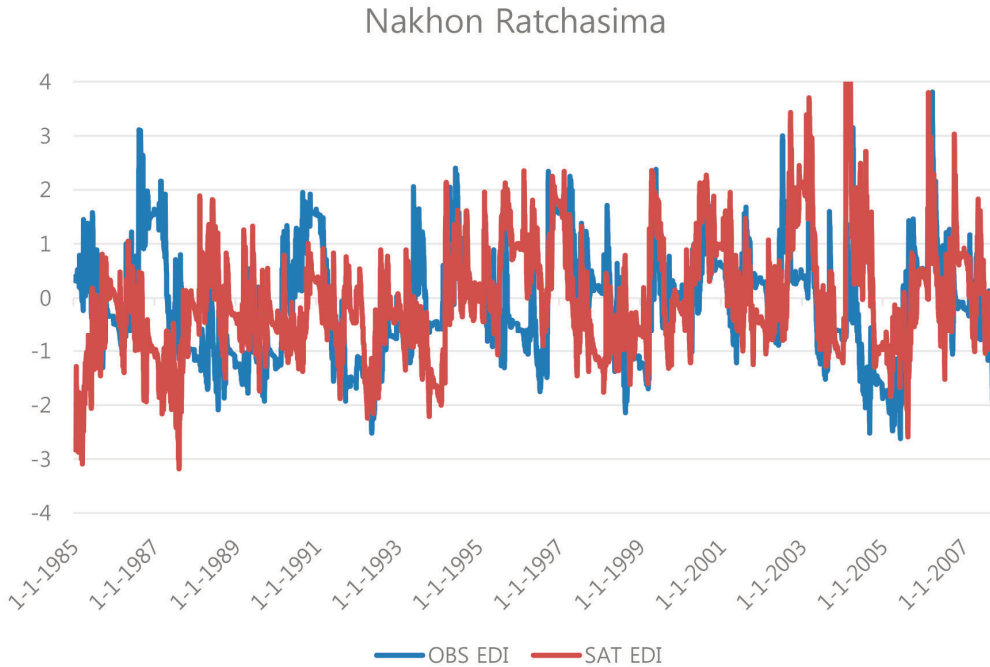


그림 4.48. Nakhon Ratchasima 지점 위성 강우 EDI 시계열 비교.

### 4.3.3 기계학습 기반 미계측 지역 SPI 가뭄예측

#### 4.3.3.1 기후예측 모델 성능 비교

기계학습 모델을 적용하지 않고 기후모델 예측자료에 편의보정만을 하거나, MME에 통계적 상세화를 한 경우, 그리고 계절내 예측 자료에 편의보정한 경우의 총 10가지 경우에 대해 가뭄 정확도와 가뭄 카테고리의 MAE를 비교하여 각 기후모델의 성능을 평가하였다(FCST\_ONLY; 그림 4.49와 그림 4.50). 계절내 예측의 경우는 예측선행시간 1개월인 경우에만 평가하였다.

앞서 설명한 바와 같이 SPI3의 경우 3개월의 강우 누적량을 이용하는데, 이 3개월의 기간이 예측선행시간에 따라 관측 부분과 예측 부분으로 나뉘게 된다. 관측 부분은 위성 강우에 기반한 강우량을 적용하였고, 예측 부분은 예측된 강우량을 적용하였다. SPI3 산정 시에는 위성 강우에 기반한 강우량을 통해 미리 산정해 놓은 확률분포함수 매개변수를 이용하였다.

6월의 SPI3 예측에 대해서는 가뭄 정확도 면에서는 PNU, MSC, 통계적 상세화된 MME 인 MME\_DOWNSCALED 등 몇몇 모델만이 작은 정확도 값을 보였으며 나머지 경우는 모두 0의 값을 가졌다. 특히 예측선행기간 2-3개월의 경우는 MME\_DOWNSCALED만이 0이 아닌 값을 생산하였다(그림 4.49). MAE의 경우 선행예측기간 1-2개월에서는 PNU 모델의 오차가 가장 작았는데, 예측선행기간 3개월에서는 오히려 다른 모델보다 오차가 컸으며 이때는 MME\_DOWNSCALED, MSC 모델의 오차가 상대적으로 작았다(그림 4.50).

10월의 SPI3 예측의 경우에는 가뭄 정확도의 경우 예측선행기간 1개월의 경우 계절내 예측(S2S)이 압도적으로 높은 0.86의 값을 보였으며 PNU 모델도 0.43의 비교적 높은 정확도를 보였다. 2~3개월의 예측선행기간에 대해서는 NCEP, MSC 모델이 각각 0.2, 0.5의 정확도를 보였지만 나머지 모델은 모두 0의 값을 생산했다(그림 4.51). MAE에 대해서는 6월과 비교하였을 때 비교적 작은 오차를 보였는데, 이 경우도 예측선행기간 1개월에서 S2S의 오차가 0.2로 매우 작았고 PNU 모델도 0.3으로 상대적으로 작은 오차를 보였다(그림 4.52).

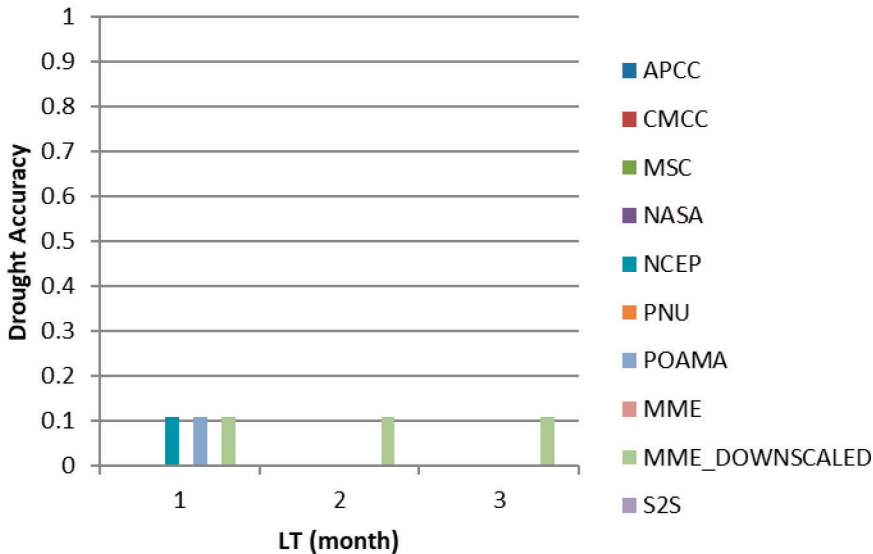


그림 4.49. 6월 FCST\_ONLY의 가뭄 정확도.

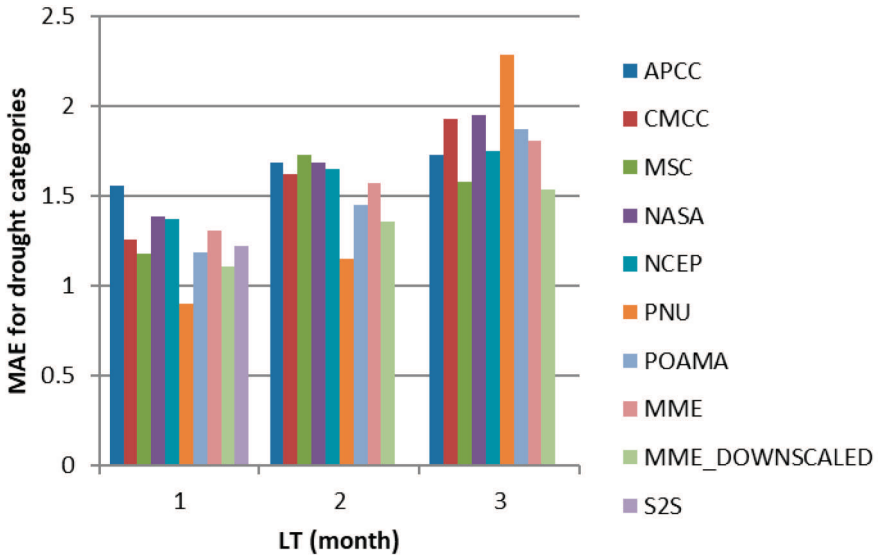


그림 4.50. 6월 FCST\_ONLY의 가뭄 카테고리 MAE.

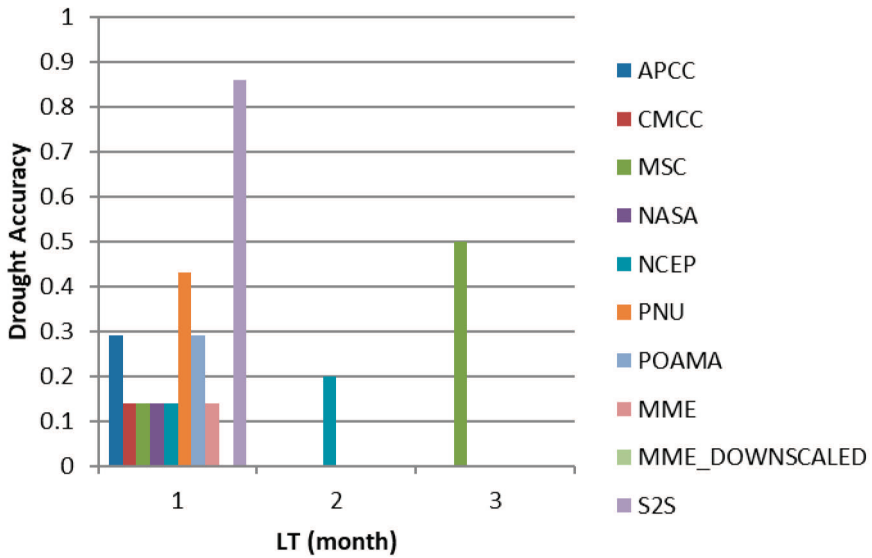


그림 4.51. 10월 FCST\_ONLY의 가뭄 정확도.

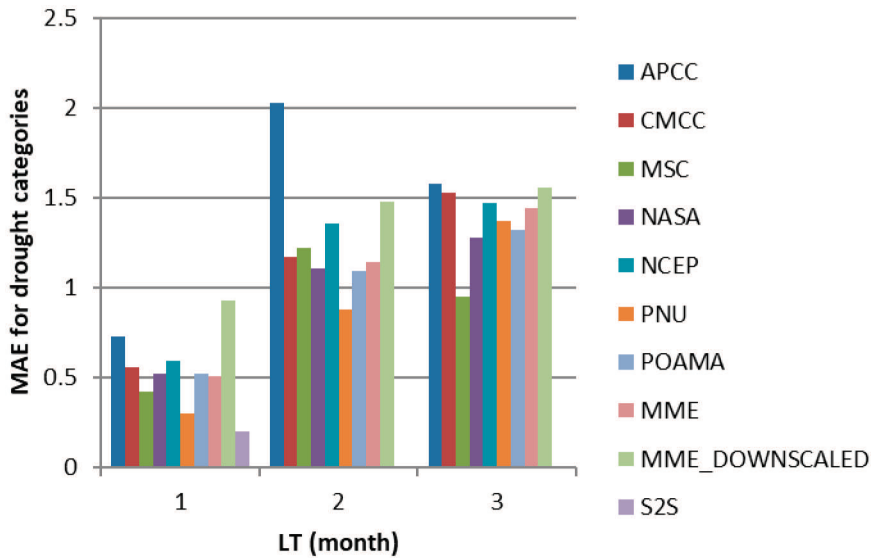


그림 4.52. 10월 FCST\_ONLY의 가뭄 카테고리 MAE.

#### 4.3.3.2 기계학습 모델 매개변수 최적화 및 우수 모델 선정

기계학습 모델을 훈련시키는 경우 다양한 내부 매개변수를 최적화할 수 있다. ERT 모델의 경우 트리의 개수와 트리를 성장시키는 정도, 그리고 Adaboost 모델의 경우 트리의 개수를 각각의 모델에 대해 최적화하였다. 또한 앞서 설명한 Leave-One-Out 교차 검증을 통해 여러 예측 모델 중 우수 모델을 선정하였는데, 이 경우 가뭄 정확도를 기준으로 이용하였다. 기계학습을 이용하는 경우에 MME\_DOWNSCALED를 포함시키지 않았는데, 이는 통계적 상세화가 관측 자료가 존재하는 관측 지점 이치에 대해서만 가능하므로 미계측 지역에 대해 가뭄예측 값을 생산하려고 하는 기계학습 가뭄예측 모델에 적합하지 않기 때문이다. 선정된 모델은 다음 표에 나타나 있다(표 4.9).

앞절에서 기후예측 모델 간 성능 비교의 경우 가장 우수한 결과를 보인 모델과는 사뭇 다른 결과가 나타났다(표 4.9). 기계학습 모델의 최종 평가 시에는 여기에서 선정된 기후 모델과 결합된 경우만을 이용하여 앞서 기계학습을 이용하지 않은 경우와 비교하였다.

표 4.9. 6월과 10월의 예측선행시간별 가장 우수한 결과를 생산한 기후모델

Month	Method	LT = 1	LT = 2	LT = 3
June	ERT	APCC	CMCC	APCC
	Adaboost	POAMA	CMCC	MME
October	ERT	NASA	APCC	PNU
	Adaboost	PNU	APCC	APCC

#### 4.3.3.3 최종 평가

기계학습 결과와, 기계학습을 통하지 않고 편의보정된 기후예측 모델 값을 이용한 경우 중 MME\_DOWNSCALED를 제외한 경우에 대해 모델 성능을 최종적으로 평가하여 비교하였다.

가뭄 정확도에 있어서 6월의 경우 큰 차이없이 일부 모델만이 작은 값을 나타냈으므로 비교에 큰 의미가 없었다(그림 4.53). 10월의 경우에는 오로지 FCST\_ONLY의 경우만이 0이 아닌 값을 생산하였으며 특히 예측선행시간 1개월에서 S2S가 매우 높은 정확도를 보였다(그림 4.54).

가뭄 카테고리의 MAE를 살펴보면 6월의 경우에는 예측선행시간 1-2개월의 경우에는 FCST\_ONLY가 우수한 성능을 보였는데 예측선행시간 3개월의 경우에는 ERT 모델의 성능이 우수하였다(그림 4.55). 그러나 10월 가뭄예측의 경우에는 FCST\_ONLY가 예측선행시간 1~3개월에서 더 작은 오차를 보였다(그림 4.56).

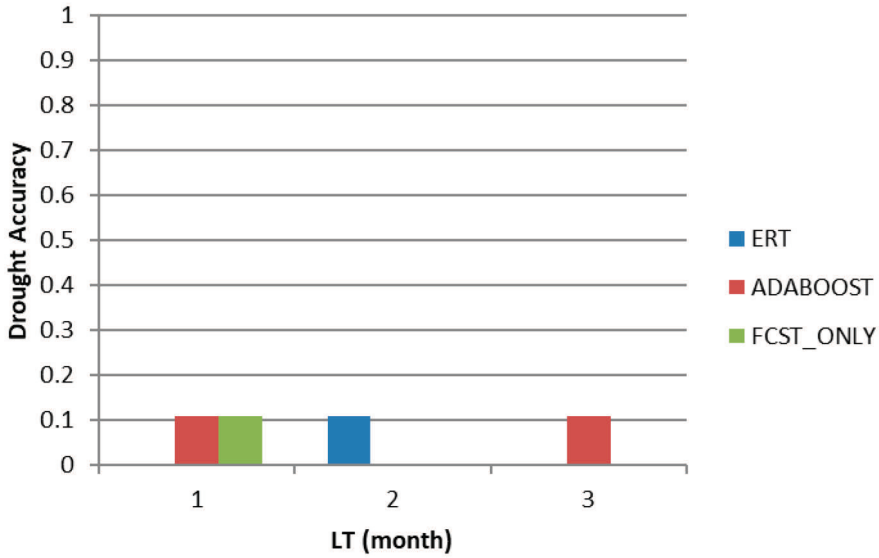


그림 4.53. 6월 기계학습 모델 및 FCST\_ONLY의 가뭄 정확도.

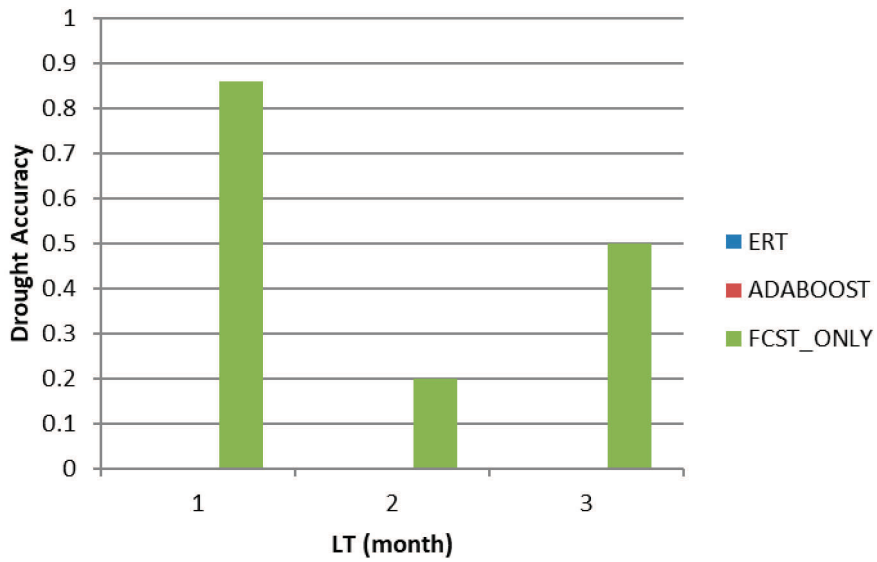


그림 4.54. 10월 기계학습 모델 및 FCST\_ONLY의 가뭄 정확도.

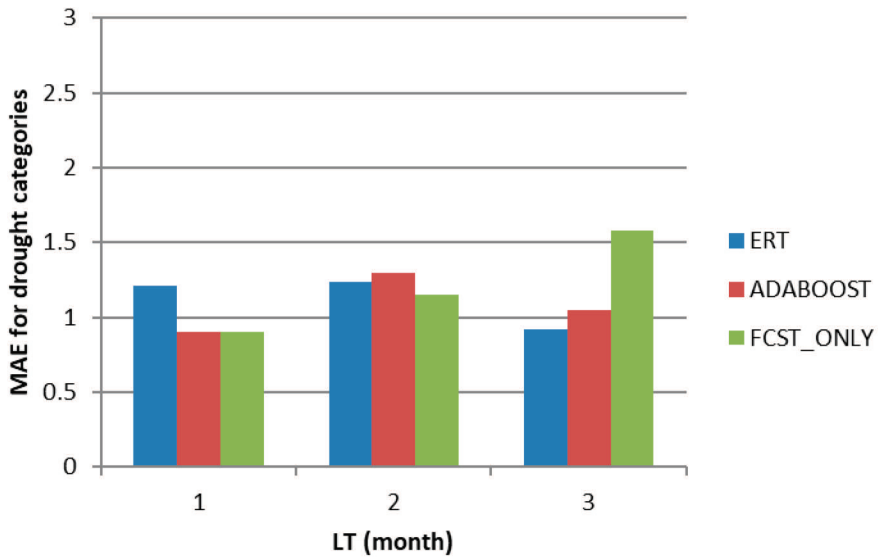


그림 4.55. 6월 기계학습 모델 및 FCST\_ONLY의 가뭄 카테고리 MAE.

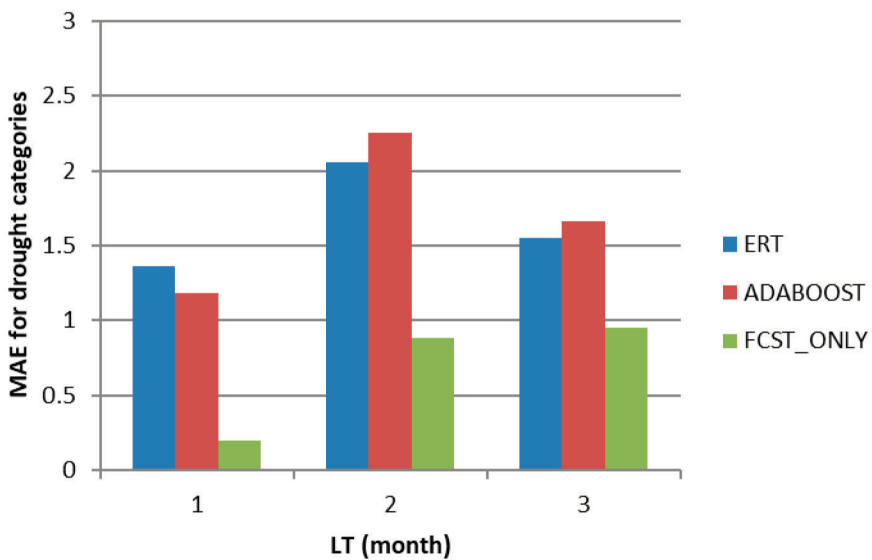


그림 4.56. 10월 기계학습 모델 및 FCST\_ONLY의 가뭄 카테고리 MAE.

기계학습을 이용한 경우와 그렇지 않은 경우 각각의 예측선행시간에 대해 사용된 모델과 결과를 표로 나타내면 다음과 같다(표 4.10).

표 4.10. 6월 및 10월의 예측선행시간별 선정된 우수 기후모델의 가뭄 정확도 및 가뭄 카테고리 MAE

Month	Measure	LT(month)	ERT		Adaboost		FCST_ONLY	
June	MAE	1	1.21	APCC	0.9	POAMA	0.9	PNU
		2	1.24	CMCC	1.3	CMCC	1.15	PNU
		3	0.92	APCC	1.05	MME	1.58	MSC
	Drought Accuracy	1	0	APCC	0.11	POAMA	0.11	NCEP, POAMA
		2	0.11	CMCC	0	CMCC	0	
		3	0	APCC	0.11	MME	0	
October	MAE	1	1.36	NASA	1.18	PNU	0.2	S2S
		2	2.06	APCC	2.25	APCC	0.88	PNU
		3	1.55	PNU	1.66	APCC	0.95	MSC
	Drought Accuracy	1	0	NASA	0	PNU	0.86	S2S
		2	0	APCC	0	APCC	0.2	NCEP
		3	0	PNU	0	APCC	0.5	MSC

#### 4.3.4 계절예측 기반 가뭄예측

월단위 EDI를 이용한 가뭄예측은 태국 북동부 지역에 위치한 22개 기상 관측지점별 예측성 평가가 아니라 계절기후 예측이 적용된 북동부 지역 전체에 대한 평균적인 가뭄에 대한 평가이다. 그림 4.57은 22개 관측지점에 대하여 공간적으로 평균한 월단위 관측 강수량을 이용하여 계절예측 자료가 수집되기 시작한 1983년부터 2012년까지의 30년 기간을 기준기간(Calibration period)으로 고려하여 계산된 월단위 EDI 값을 보여준다.

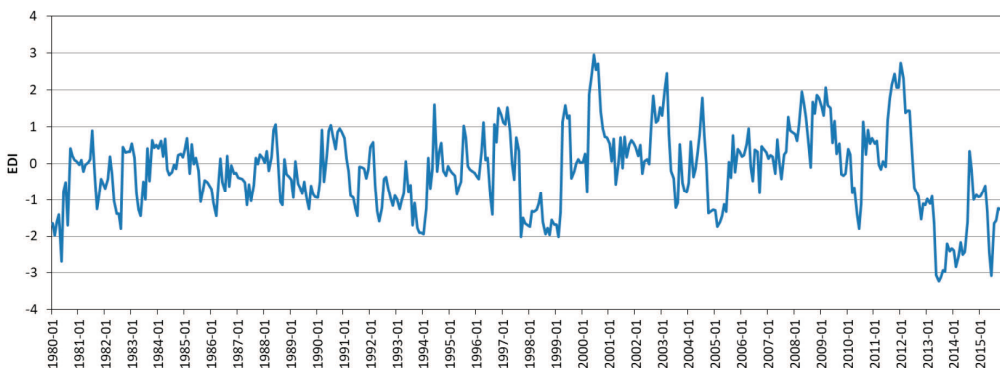


그림 4.57. 태국 북동부 지역의 평균 월단위 관측 강수량을 이용한 월단위 EDI 결과.

그림 4.58은 계절예측 강수량을 이용하여 예측한 월단위 EDI와 관측기반 월단위 EDI를 4가지 범주(습윤, 보통가뭄, 심한가뭄, 극심한가뭄)로 구분한 후 Heidke Skill Score(HSS)를 이용하여 월 및 예측선행기간별로 예측성을 평가한 결과를 보여준다. 4월, 5월, 7월, 8월의 경우에는 1개월 예측선행기간인 경우에도 HSS 값이 0.5보다 낮은 값을 보였다. 또한 전반적으로 예측선행기간이 증가함에 따라서 예측성이 감소하는 경향을 보였다. 반면 그림 4.59는 연속형 변수에 사용 가능한 TCC를 이용한 평가 결과이다. 모든 월 및 예측선행기간에 대하여 TCC 값이 0.4이상의 값을 보였고 HSS와 마찬가지로 전체적으로 예측선행기간이 증가함에 따라서 예측성이 감소하는 결과를 보였다.

Month	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5	LT6
Jan	0.79	0.72	0.69	0.49	0.44	0.27
Feb	0.57	0.57	0.64	0.64	0.34	0.38
Mar	0.61	0.33	0.42	0.55	0.42	0.38
Apr	0.16	0.32	0.42	0.27	0.48	0.38
May	0.35	0.47	0.36	0.43	0.29	0.10
Jun	0.75	0.41	0.29	0.29	0.25	0.20
Jul	0.39	0.42	0.12	0.12	0.06	0.19
Aug	0.24	0.33	0.56	0.16	0.12	-0.06
Sep	0.59	0.22	0.23	0.38	0.23	0.17
Oct	0.50	0.56	0.42	0.42	0.44	0.20
Nov	1.00	0.53	0.33	0.29	0.38	0.35
Dec	1.00	0.92	0.50	0.38	0.33	0.43

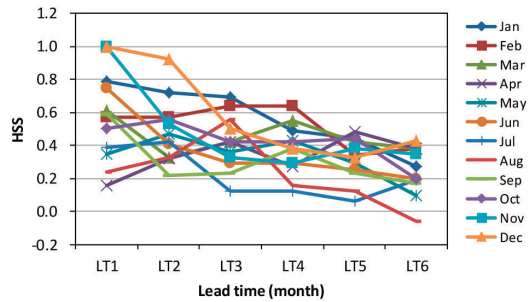


그림 4.58. 태국 북동부 지역의 HSS를 이용한 월단위 EDI 예측 성능.

Month	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5	LT6
Jan	0.99	0.99	0.98	0.83	0.69	0.57
Feb	0.93	0.93	0.92	0.91	0.78	0.65
Mar	0.81	0.76	0.77	0.77	0.75	0.68
Apr	0.82	0.83	0.81	0.69	0.64	0.63
May	0.83	0.71	0.65	0.66	0.61	0.55
Jun	0.90	0.74	0.61	0.58	0.58	0.56
Jul	0.82	0.74	0.64	0.58	0.59	0.51
Aug	0.76	0.66	0.54	0.49	0.42	0.43
Sep	0.70	0.60	0.59	0.44	0.49	0.43
Oct	0.79	0.66	0.52	0.46	0.45	0.53
Nov	0.97	0.83	0.71	0.61	0.45	0.43
Dec	0.99	0.98	0.83	0.72	0.60	0.47

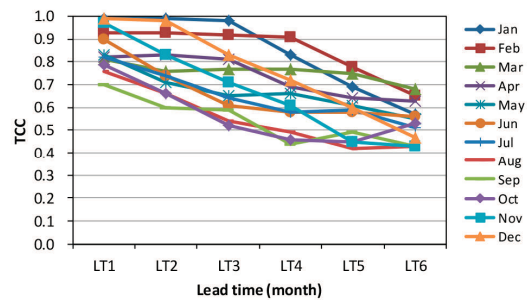


그림 4.59. 태국 북동부 지역의 TCC를 이용한 월단위 EDI 예측 성능.

#### 4.3.5 가뭄발생에 대한 기후변화 영향 평가

그림 4.60은 랍타콩댐 상류 구역의 Pak Chong Agromet(TH431301) 관측지점에서 일단위 EDI를 이용하여 가뭄이 시작된 시점에서 종료된 시점까지를 의미하는 가뭄기간(Duration) 및 가뭄기간 중 가장 심했던 시점의 심도(Intensity)를 3개의 미래기간(S1: 2010~2039, S2: 2040~2069, S3: 2070~2099)동안에 과거기간(Historical)과 비교한 결과를 보여 준다.

가뭄기간은 전체적으로 짧은 지속시간을 갖는 가뭄의 경우 과거기간(Historical) 기간과 비교하여 발생빈도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면 미래기간 동안의 최대 가뭄 심도는 과거기간과 비교하여 약한 심도의 가뭄의 경우 빈도가 감소하는 경향을 보였으나 가뭄의 심도가 센 가뭄에 대해서는 발생빈도가 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 경향은 랍타콩댐 하류부에 위치해 있는 TH431201 관측지점에서도 비슷한 결과를 보였다.

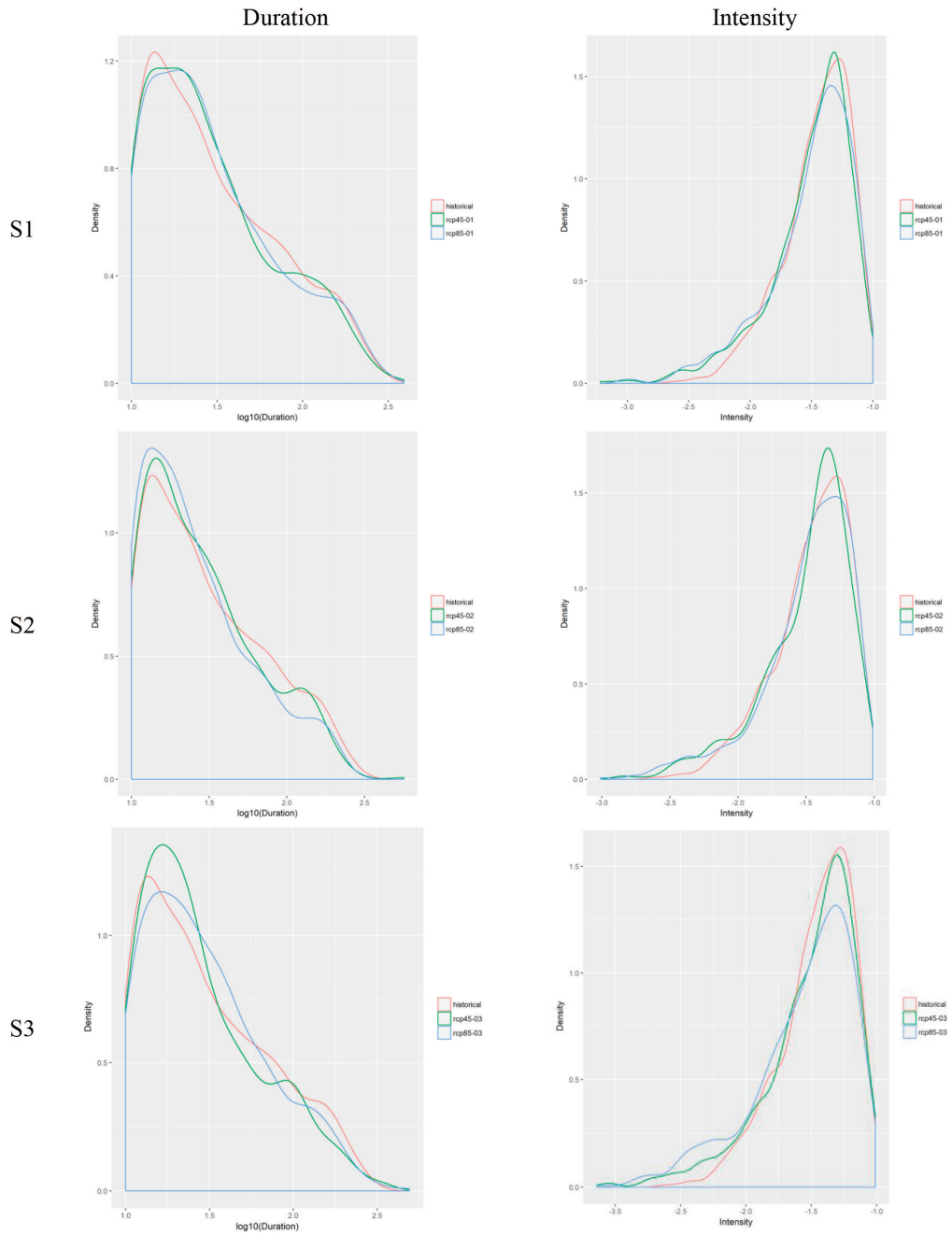


그림 4.60. 미래기간에 대한 가뭄지속기간(좌) 및 최대 가뭄심도(우) 변화

## 4.4 수자원 및 농업모델링

### 4.4.1 기후정보를 활용한 수문 모델링

#### 4.4.1.1 관측 기후자료 기반의 댐 유입량

과거기간에 대한 모형의 성능을 평가하기 위해서는 랍타콩 댐 상류유역에 위치해 있는 Pak Chong Agromet(TH431301) 지점의 강수량 자료의 결측치가 없는 2005년~2012년의 기간을 사용하였으나, 예측 유입량의 예측성 평가를 위한 기준으로는 1983년~2012년의 기간을 사용하였다.

그림 4.61은 rSWAT 패키지를 이용하여 생산된 과거기간에 대한 모형이 모의 결과를 보여주고 있다. R<sup>2</sup>값은 0.8246 만족스러운 결과를 보였지만 2010년 우기 동안에 모의 유량이 관측유량과 비교하여 적게 모의하였다.

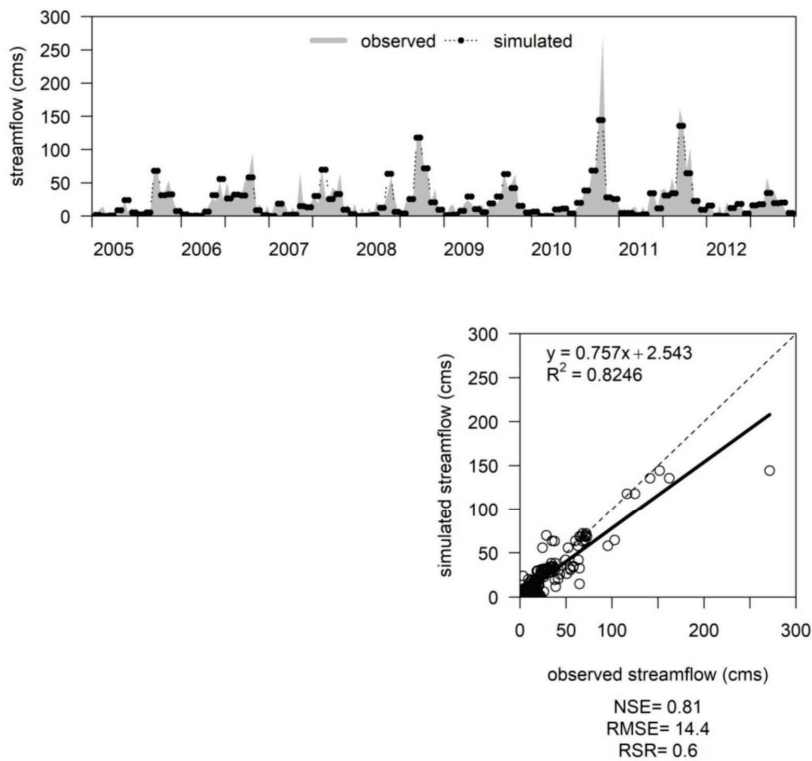


그림 4.61. SWAT모형을 이용한 랍타콩 댐 유입량 모의 결과(R패키지 출력).

#### 4.4.1.2 예측자료 기반의 댐 유입량 평가

람타콩 댐 인근 관측지점(Pak Chong Agromet, TH431301)의 관측자료를 일단위로 상세화한 후 SWAT 모델의 입력으로 적용한 결과를 관측 기상자료를 입력으로 적용하여 도출된 결과와의 비교를 통한 월별 및 예측선행기간별 예측성 평가 결과는 그림 4.62에 나타나 있다. Temporal Correlation Coefficient(TCC)가 10월의 경우 0.26으로 가장 높은 결과를 보여 전체적으로 예측성이 없는 것으로 나타났다. 이는 앞서 제시된 강수량 예측 및 가뭄 예측이 북동부 지역에 대해 월단위 예측성을 보여 준 반면, SWAT 모델링을 이용한 유입량 예측은 특정 지점(TH431301)에 대하여 일단위로 상세화된 자료를 기반으로하여 도출된 결과이다. 따라서 월단위 지역 평균에 대해서도 강수량의 지역적 분포가 다르게 발생할 수 있기 때문에 전반적으로 낮은 예측성을 보여주는 것으로 판단된다.

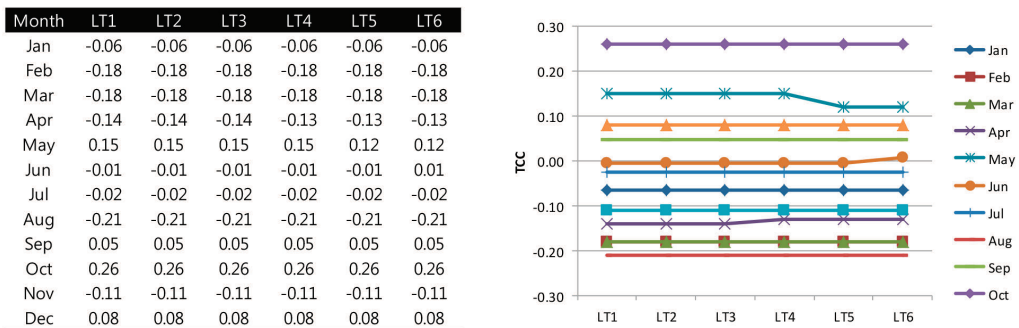


그림 4.62. 월별 선행예측 기간 별 예측성 평가 결과

### 4.4.2 농업 모델링

#### 4.4.2.1 벼 생육모형 입력자료 구축

그림 4.63은 람타콩 소유역(Lam Takhong small bsain)에서 벼 생육모형인 CERES-Rice 시뮬레이션을 위해 구축한 자료들의 구성을 나타낸 것이다. 또한 표 4.12는 CERES-Rice 구동에 필요한 벼 품종 KDML 105와 RD6의 유전정보이다. 3.4.2절에서 언급한 바와 같이 이 품종의 유전정보는 람타콩 소유역 하류 지역의 벼 재배 지역에서 수년 동안 동일 품종에 대해 재배된 관측 수량구성요소에 의해 보정(calibration) 및

검증(validation)되어야 하지만, 관측 자료의 수집이 지연되어 수집된 보고서 및 선례 연구(Babel et al., 2011)에서 추정 및 보정된 유전정보와 일반적인 재배 환경 정보를 그대로 차용했다(표 4.13).

1983년 7월부터 2016년 12월까지 태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)로부터 수집된 Nakhon Ratchasima(TH431201) 지점의 관측 기후자료는 WTH 형태로 변환되어 CERES-Rice 구동 폴더(Weather)에 저장했다(그림 4.63).

토양 정보의 경우, 3.4.2절에서 언급한 것과 같이 Food Agriculture Organization(FAO)의 WISE dBASE에서 TH431201 지점의 토성(soil texture) 및 토층별(soil profile) 수분 및 유기물 함량 등의 정보를 추출하여 SOL 파일을 작성했다(그림 4.64). 1984년부터 2014년까지 FAOSAT의 태국 국가 전체의 벼 생산량 정보는 CERES-Rice에서 추정된 잠재수량과 비교하는데 활용하기 위해 엑셀 형태로 정리됐다.

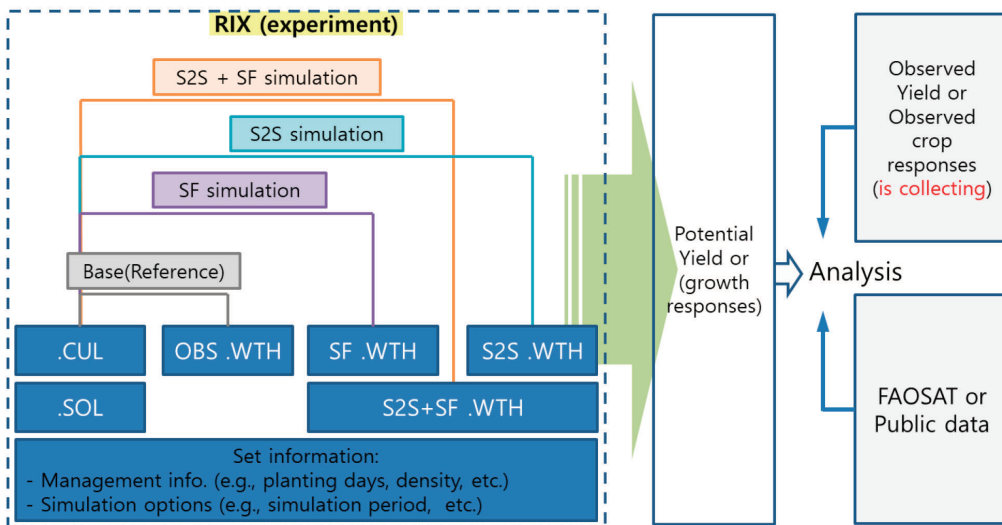


그림 4.63. 벼 생육모형 시뮬레이션을 위해 구축한 자료들의 구성.

표 4.11. KDML 105와 RD6의 유전정보(자료 출처: Babel et al., 2011)

Rice cultivar	Genetic coefficients							
	P1	P2	P2R	P2O	G1	G2	G3	G4
KDML105	502.30	386.50	1233.00	12.70	45.70	0.027	1	0.95
RD6	550.30	386.50	1243.00	12.80	48.70	0.028	1	0.95

표 4.12. CERES-Rice에 입력된 재배 환경 정보(자료 출처: the report of Rice Department)

General management information				
Plant population (plants m <sup>-2</sup> )	Planting method	Planting distribution	Row spacing (cm)	Planting depth (cm)
27	Transplant	Hill	25	2.5

```

@SITE          COUNTRY      LAT      LONG  SCS Family
-99            Thailand    13.000  100.000 Chromic Luvisol (LVx)
@ SCOM  SALB  SLU1  SLDR  SLRO  SLNF  SLPF  SMHB  SMPX  SMKE
G  0.13  9.28  0.40  83.00  1.00  1.00  SA001 SA001 SA001
@ SLB  SLMH  SLLL  SDUL  SSAT  SRGF  SSKS  SBDM  SLOC  SLCL  SLSI  SLCF  SLNI  SLHW  SLHB  SCEC  SADC
24  A  0.144  0.309  0.469  0.79  1.24  1.27  2.15  16.00  25.00  -99.0  0.14  5.80  -99.0  11.50  -99.0
46  BA  0.053  0.188  0.441  0.50  6.76  1.40  1.01  21.00  28.00  -99.0  0.09  5.10  -99.0  8.80  -99.0
75  Bw1  0.167  0.294  0.446  0.30  1.00  1.42  0.53  30.00  31.00  -99.0  0.07  5.20  -99.0  8.90  -99.0
120 Bw2  0.212  0.320  0.473  0.14  0.86  1.35  0.50  46.00  28.00  -99.0  -99.0  5.40  -99.0  12.40  -99.0
@ SLB  SLPX  SLPT  SLPO  CAC03  SLAL  SLFE  SLMN  SLBS  SLPA  SLPB  SLKE  SLMG  SLNA  SLSU  SLEC  SLCA
24  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.7  2.1  -99.0  -99.0  -99.0  6.2
46  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.8  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.4  1.2  -99.0  -99.0  -99.0  2.4
75  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.7  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.6  1.4  -99.0  -99.0  -99.0  3.3
120 -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.3  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  -99.0  0.7  2.3  -99.0  -99.0  -99.0  5.9

```

그림 4.64. CERES-Rice의 .SOL dBASE로 구축된 Nakhon Ratchasima(TH431201) 지점의 토양 정보(자료 출처: FAO WISE dBASE의 태국 토양 정보).

#### 4.4.2.2 관측 기후 기반의 벼 잠재수량 반응

앞서 언급한 것과 같이 태국 북동부 지역의 주요 재배 벼 품종(KDML 105와 RD6)의 유전모수(genetic parameter)에 대한 검증 결과는 태국 농업청(Department of Agriculture, DOA)과 벼 연구 기관(Rice Department, RD)로부터 관측 자료가 수집된 후에 보정 및 검증을 통해서 언급될 수 있을 것이다. 그러나 본 연구의 1차년에서 관측 수량구성요소 자료가 수집되기 전까지는 CERES-Rice에서 관측 기후에 의해 모의된 벼의 잠재수량을 기준 수량(base yield)으로 설정했다.

그림 4.65는 1984년부터 2016년까지 주요 재배기간(main growing season, 5월~10월)에서 몬순이 시작되는 5월의 중순을 파종시기(5월 14일)로 설정하고 TH431201 지점의 1984년부터 2016년까지의 관측 기후 자료로 CERES-Rice를 구동한 결과이다.

또한 FAOSAT의 태국 국가 전체의 쌀 수량(yield) 정보와 태국의 2013년 농업 통계에서 북동부 주(행정구역, province)에 대한 쌀 수량, 그리고 선례 연구(Babel et al., 2011)에서 언급된 북동부 일부 지역의 쌀 수량 정보들과 비교했다. 1980년대 초반에서 1990년 후반까지 FAOSAT의 쌀 수량(그림 4.65의 검정선)이 2000년 이후 보다 적은 이유 중에는 FAOSAT의 쌀 수량 정보에는 재배 기술의 차이 등이 반영된 것이다. 그러나 CERES-Rice 구동에 사용된 KDML 105와 RD6의 유전모수는 2000년대 재배 자료로부터 추정된 것이기 때문에 비교 자체에는 의미가 없다. 그럼에도 불구하고, 비교한 이유는 CERES-Rice에서 관측 기후 기반으로 추정된 잠재수량(base yield라고 가정)과 공개된 자료들 간의 차이가 어느 정도인지에 대한 정보가 필요하기 때문이다.

CERES-Rice 구동 결과, 관측 기후 자료 기반의 벼 예측 잠재수량(base yield)은 FAOSAT나 태국 농업 통계 및 선례 연구에서 수집된 수량보다 과대 추정되었다. 또한 FAOSAT의 쌀 수량의 연변화의 경향(trend)과도 달랐는데, 이것은 당연한 것이다. 왜냐하면 FAOSAT는 국가 단위의 데이터 정보로써 극한 기후에 의한 생산량 감소 등의 요인이 희석되는 경향이 있고, 앞서 언급한 바와 같이 재배 기술 등에 의한 변화가 반영되어 있기 때문에 직접적인 비교에 주의해야한다. 그럼에도 불구하고, 비교한 것은 앞서 언급한 바와 같이 작물모형에서 추정된 관측 기후 기반의 벼 잠재수량이 공개 자료와 얼마큼의 차이가 있는지에 대한 인지가 필요했기 때문이다.

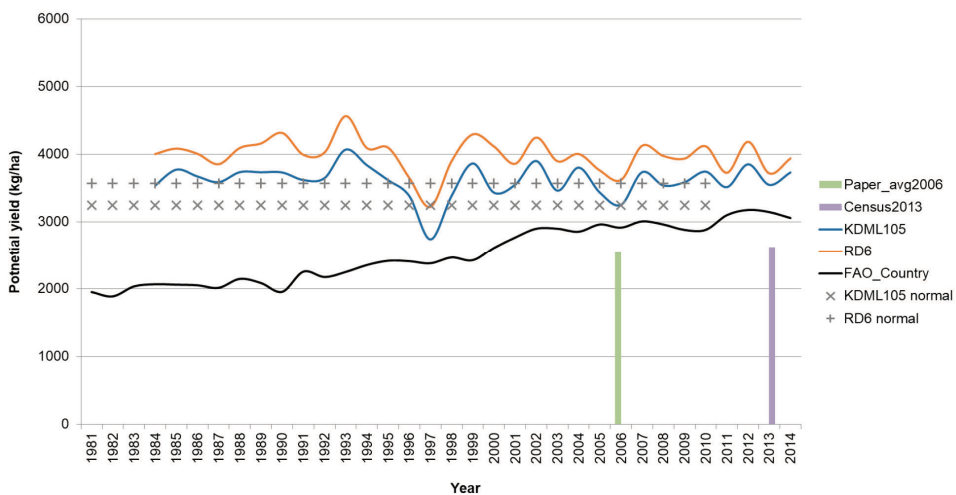


그림 4.65. CERES-Rice에서 추정된 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과 농업 통계 및 FAOSAT 등과 같은 공개 정보와 비교.

#### 4.4.2.3 상세화된 계절예측 기후 정보를 활용한 벼 잠재수량 예측

이 절은 기후뿐만 아니라 상세화 기법, 더 나아가서 컴퓨팅 기술 및 응용 통계와 농업 분야와의 결합을 통해 생산해 낼 수 있는 다차원적이고 부가적인 정보에 대한 예비 결과이다.

APCC의 다중모델앙상블(Multi-Model Ensemble, MME) 기법에 의해 예측된 월별 계절예측 기후정보는 3.2절에서 언급한 바와 같이 조재필(2017)에 의해 개발된 MWR 및 CIR 등의 방법으로 상세화되었다. 이 절에서는 이와 같이 APCC에서 예측된 월별 계절예측 기후 정보를 APCC에서 개발한 상세화 기법에 의해 시공적으로 상세화하고, CERES-Rice의 입력 기후정보로 변환 및 입력해서, APCC의 상세화된 계절예측 기후 정보에 따른 CERES-Rice에서의 벼 잠재수량 예측성을 진단했다.

상세화된 계절예측 기후 자료는 1983년부터 2016년까지 예측선행기간(lead time)별로 작성되었는데 lead time별 예측선행기간 동안 예측 기후 자료에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량 예측력을 평가하기 위해서는 주요 재배기간이 예측 기간 안에 들어오도록 예측 기후 자료를 재단(tailoring)했으며, 주요 재배기간이 이동될 수 있도록 파종시기를 설정했다(그림 3.17-18과 3.19와 그림 4.66). 또한 본 연구에서는 한 해에 52주가 있는 것을 고려하여 매주 파종한다고 가정해서, 매해 1월 7일부터 7일 간격으로 파종시기를 설정하고 CERES-Rice를 구동했다. 이렇게 설정한 이유는 추후 계절예측 기후 정보를 계절내예측 기후 정보와 재단 및 결합하여 비교하기 위해서이다.

		early 초 상순	mid 중 중순	late 말 하순							
1 year	52 treatments 즉, 52 weeks interval: 7days	TN1	TN2	TN3	TN4	~~~~	TN49	TN50	TN51	TN52	
		1st week 7	2nd week 14	3rd week 21	28	~~~~	4	18	25	31	
		January				December					
		L1	L1	L1	L1				L1	L1	
		L2	L2	L2	L2				L2	L2	
		L3	L3	L3	L3	~~~~	~~~~	~~~~	L3	L3	
		L4	L4	L4	L4				L4	L4	
		L5	L5	L5	L5				L5	L5	
		L6	L6	L6	L6				L6	L6	

leadtime	6
weeks	52
	312
max/mme/min	3
(above/normal?/below)	936
max-tx	
max-t n	
max-pr	
max-tx+t n	
max-tx+pr	
max-tn +pr	
max-tx+tn+pr	7
	21
	6,552

그림 4.66. 주요 재배시기가 계절예측의 선행예측기간(lead time; L1에서 L6)별로 예측 기간과 잘 배치되어 재배기간이 선행예측기간에 포함되게 하기 위한 파종시기 설계.

또한 상세화된 계절예측의 기후 요소가 일 최고기온과 일 최저기온, 일 적산 강수이며 또한 이들 기후 요소의 구분이 평년보다 높을 때(above normal), 평년일 때(normal), 평년보다 낮을 때(below normal)로 구분되어 있기 때문에 각각의 구분에 따라 상세화된 계절예측 기후정보에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량 예측력을 평가해야 했기 때문에 그 조합수가 상당히 많았다. 총 6,552개의 CERES-Rice 구동 파일을 통해 벼 잠재수량을 예측한 결과, 예측선행기간별 계절예측 기온 정보에 따른 벼 잠재수량의 예측력은 매우 우수했다. 또한 평년보다 높음, 평년, 평년보다 낮음에 상관없이 계절예측 기온 자료에 대한 CERES-Rice의 벼 잠재수량의 예측력은 전반적으로 우수하게 평가되었다. 즉, 계절예측 기온 자료의 경우 예측선행기간별로 예측된 벼 잠재수량은 관측 기후 기반의 벼 잠재수량(base yield)과 큰 차이가 없었으며 그 경향도 크게 다르지 않고 높은 상관성을 보였다.

그러나, 예측선행기간별 계절예측 강수 정보에 따른 벼의 예측 잠재수량은 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과 큰 차이를 보였으며 예측선행기간이 멀어질수록, 즉 증가할수록

그 차이는 더 증가했다(그림 4.67). 그런데, 이것은 계절예측 강수 정보만으로 예측 시물레이션을 한 경우로써 기온 정보는 관측이고 강수만 계절예측 기후 정보일 때의 결과이다. 예측선행기간별 계절예측 강수 자료에 의한 벼 잠재수량과 관측 기후 자료에 의한 벼 잠재수량과의 전체 평균 상관관계는 0.20로 나타나서 계절예측 강수 정보에 대한 CERES-Rice 벼 잠재수량의 예측성은 낮은 것으로 평가됐다. 물론 3.2.2절에서 강수 기후요소에 대한 상세화 후 관측 자료와 상관관계는 예측선행기간이 증가할수록 감소한다고 하였지만, 계절예측 강수 정보의 예측성이 낮은 원인이 예측선행기간별 계절예측 정보 자체의 예측성 때문인지 상세화 때문인지는 추후 더 살펴봐야 할 것 같다. 왜냐면, 계절예측 기반의 시물레이션이지만, 수량구성요소의 가장 영향을 미치는 기온과 일사량 정보가 관측 자료로 입력되었음에도 불구하고 계절예측 강수 정보에 대한 벼 잠재수량의 예측성이 낮았기 때문에, 추후 주요 재배기간 예를 들면, 등숙기간 동안의 상세화 전 후의 계절예측 기후 자료들과 관측 기후자료들을 주요 기간별로 면밀히 분석할 필요가 있다.



그림 4.67. 계절예측 예측선행기간별로, 그리고 계절예측 강수 정보만으로 예측된 벼의 잠재수량과 관측 기후 기반의 잠재수량 비교.

그림 4.68은 3개 기후 요소, 일 최고기온 및 일 최저기온, 일 적산 강수에 대해 모든 계절예측 기후정보로 작성된 입력 기상자료(WTH)로 시물레이션 한 경우이다. 즉 상세

화된 계절예측 일 최고 기온과 일 최저기온, 그리고 상세화된 계절예측 일 강수 자료가 입력된 WTH로써 관측 값으로는 일사량뿐이다. 이 경우의 결과에서, 계절예측 기후 기반의 벼 잠재수량과 관측 기후 기반의 잠재수량과의 상관관계는 0.26으로 계절예측 강수 자료만의 벼 잠재수량의 상관관계보다 약간 높아졌다. 이 경우 일사량을 제외하고 3개 기후 요소가 모두 예측 기후 자료가 입력된 결과임에도 불구하고 앞서 1개의 예측 강수 자료만으로 평가된 것보다 상관성이 높아졌기 때문에 주요 기간별로 상세화 전후의 예측 기후 자료와 관측 기후에 대한 비교분석이 시급하다. 왜냐면, 주요 재배시기에 대해 상세화 전후의 계절예측 기온이 관측 기온과 다른 경향을 보였다면 그것이 이러한 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 강수의 경우도 마찬가지이다.

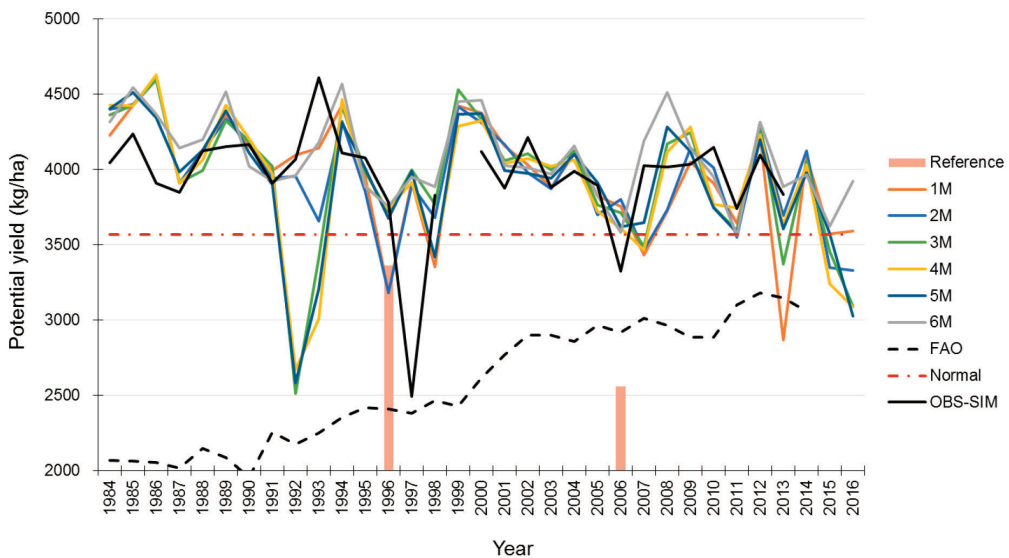


그림 4.68. 계절예측 예측선행기간별, 그리고 3개 기후 요소(일 최고 및 최저기온, 강수)에 대해 모두 계절예측 기후 자료에 의해 구동된 결과.

상세화 기법에서 기온과 강수의 경우 SBC 및 MWR 방법에 의한 예측 인자들이 어느 정도 선정되는 것으로 나타났다(표 4.8). 특히 기온에 대한 예측 인자들은 비교적 많이 선정되어 예측력이 크게 나쁘지 않는 것으로 평가됐다. 그러나 강수의 경우, 4월에 가장 많은 예측 인자가 선정되었고, 6월에 대한 예측 인자는 전혀 나타나지 않았을 뿐만 아니라, 예측선행기간이 길어질수록 크게 예측력이 감소한다는 결과가 도출되었기 때문에(그

림 4.33의 b), 이렇게 계절예측에서 강수 기후 요소에 대한 낮은 예측력이 계절예측 기후 기반의 벼 잠재수량이 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과의 낮은 상관에 영향을 주었는지는 대한 분석도 필요하다.

그럼에도 불구하고, 강수 기후 자료만 결합된 경우든 3개 계절예측 기후 정보(일 최고 및 최저기온, 강수)가 결합된 경우든, CERES-Rice에서 관측 기후 기반의 벼 잠재수량을 기준으로 간주할 경우, 계절예측 기후 정보에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량 예측성은 크게 나쁘지 않았다. 다만, 일 최고 및 일 최저 기온과 강수의 3개 계절예측 기후 정보가 모두 결합되었을 경우, 1992-1993년과 1997-1998년과 같이 극한 기후가 기록된 해(예, 엘리뇨 해)에 대한 계절예측 기후 정보에 의한 예측 벼 잠재수량과 관측 기후 기반의 벼 예측 잠재수량이 반대로 나타났다(그림 4.67). 앞서 언급 바와 같이, 주요 시기별로 상세화 전후의 계절예측 기후자료와 관측 기후 자료를 자세하게 살펴볼 필요가 있는데, 이들 4개 해(1992-1993년과 1997-1998년)에 대해서만 일별로 상세하게 분석해 볼 필요가 있다. 예를 들면, 1997-1998년 2년의 생육 기간 동안 혹은 재배기간별로 관측 기후와 상세화 전 후의 계절예측 기후를 비교해 볼 필요가 있다.

계절내예측 시뮬레이션과 비교하기 위해 2015년의 경우만 살펴봤다. 특히, 주요 재배기간인 5월부터 9월 동안의 상세화된 계절예측 기온과 강수 정보로부터 예측된 벼 잠재수량과 2015년 관측 기후 기반의 잠재수량(base yield)을 비교했다(그림 4.69와 그림 4.70). 예측선행기간 1개월의 예측 벼 잠재수량은 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과 0.92의 높은 상관을 보였고 그 경향도 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났는데, 앞서 언급한 바와 같이(예측 기후정보에 의한 예측 벼 잠재수량과 관측 기후 기반의 벼 잠재수량 사이에서) 비교적 우수한 상관이 나타난 이유가 계절예측 기후 정보의 우수한 예측력 혹은 상세화 방법 때문인지 아니면 관측 자료(일사량은 관측 정보가 입력되어 있음)가 영향을 미친 것인지, 여러 가지 불확실한 정보를 정량적으로 분석할 수 있는 체계적인 분석 방법의 개발도 시급하다.

그럼에도 불구하고 2015년 주요 재배기간인 5월부터 7월 동안의 경우, 센터에서 개발한 상세화 방법에 의해 상세화된 일별 계절예측 기후 정보에 따른 벼의 잠재수량 예측력의 신뢰 수준은 예측 시점 1개월 전일 때는 2015년 관측 기후 기반의 벼 잠재수량(base yield)과의 상관관계가 0.89로, 6개월 전일 때는 0.77 정도는 될 것으로 추정된다.

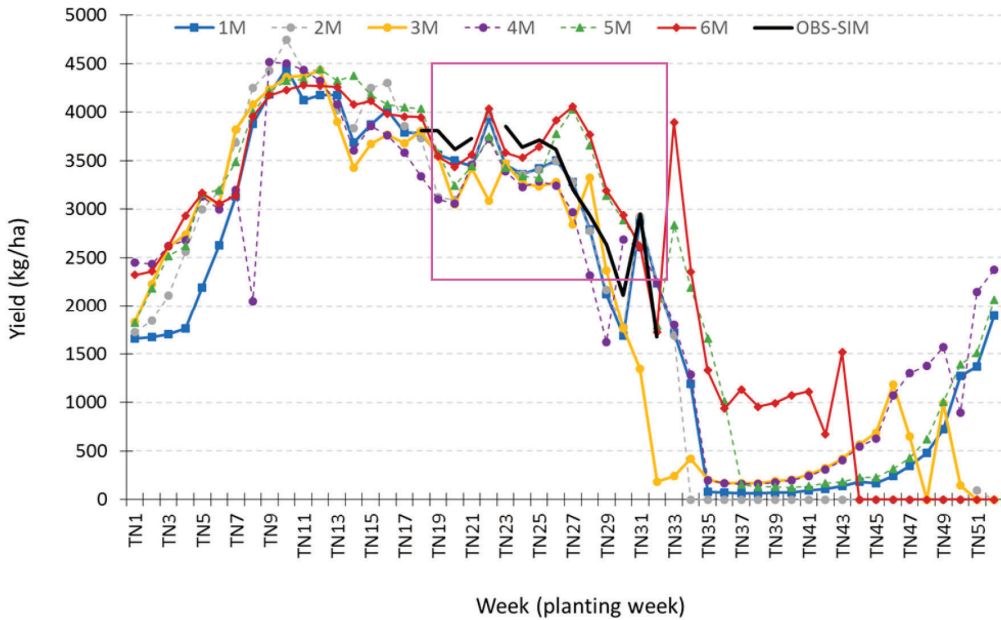


그림 4.69. 예측선행기간별 2015년 계절예측 기후 기반의 CERES-Rice 벼 예측 잠재수량과 2015년 관측 기후 기반의 벼 잠재수량(base yield) 비교. 이 그림에서 관측 기후 기반의 벼 잠재수량은 OBS-SIM으로 표현됨.

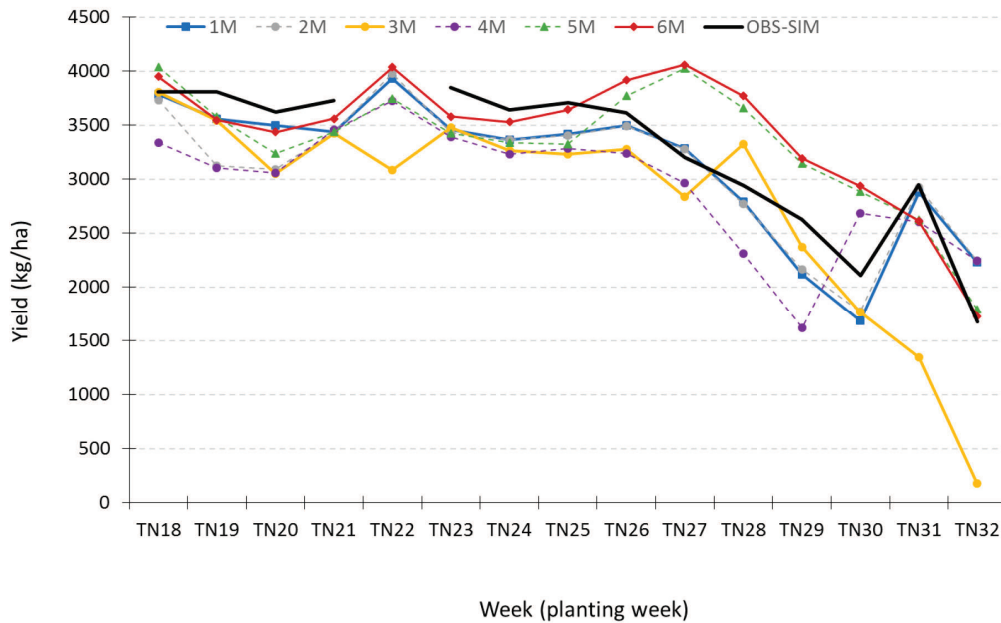


그림 4.70. 2015년에 대해 예측선행기간별 계절예측 기후 기반의 CERES-Rice 벼 예측 잠재수량과 2015년 관측 기후 기반의 벼 잠재수량 비교에 대해 주요 재배기간 중 5월부터 7월까지 약 2개월 동안만 확대함.

## 4.4.2.4 상세화된 계절내예측 기후 정보를 활용한 벼 잠재수량 예측

이 절 역시 4.5.2.3절과 같이 계절예측 기후, 상세화 기법 및 여러 분야(예, 컴퓨팅 기술 및 응용 통계 등)가 농업 분야와 결합하여 생산된 다차원적이고 부가적인 정보의 예측 결과를 향상시키기 위해 수행한 연구의 예비 결과이다.

3.4.2.4절에서 언급한 바와 같이 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 예측 기후 정보는 이미 시간 범위가 일별로써 농업모형에서 요구하는 일별 시간 범위를 충족하고 있기 때문에 이용하기 비교적 용이하다. 그러나 ECMWF의 공간 해상도는 여전히 농업모형에서 바로 이용하기에는 부적합하게 낮은 해상도이다. 그래서 3.2절에서 언급된 센터에서 개발된 상세화 기법을 통해 상세화된 선행 예측시점이 2015년 5월 14일인 일별 ECMWF 강수 예측 자료를 CERES-Rice에 입력하여 계절내예측 강수 자료에 따른 벼의 잠재수량의 예측성을 평가했다.

평가 결과, 과거기간 동안 예측선행시점별, 예를 들면 1994년부터 2014년 동안 5월 14일에 대해 11개 기후모형에서 예측 및 상세화된 ECMWF 강수에 대한 CERES-Rice의 벼 잠재수량 예측성은 모형별뿐만 아니라 과거기간에 대해서도 비교적 우수한 것으로 평가됐다(그림 4.71과 그림 4.72).

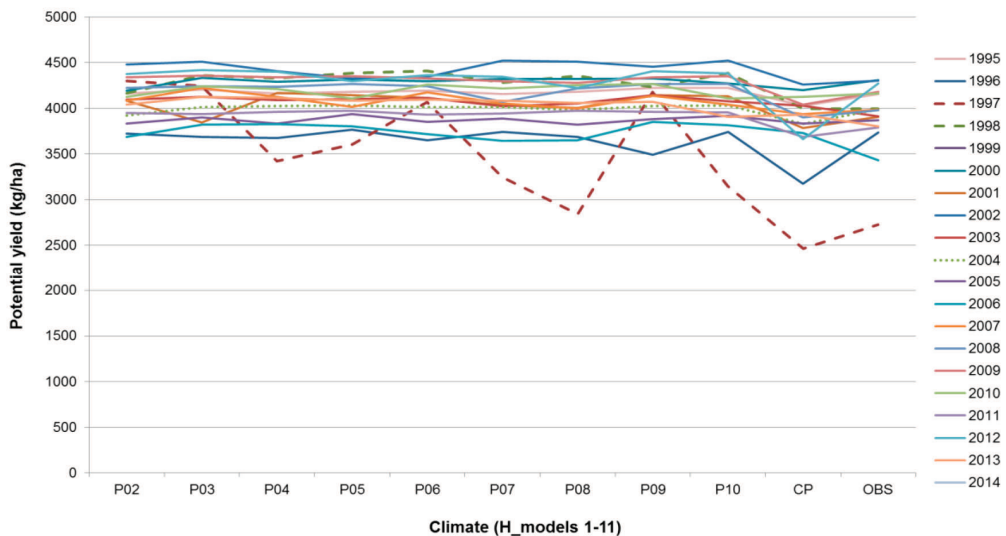


그림 4.71. 과거기간(1994-2014) 동안 예측선행시점 5월 14일에 11개 기후모형의 상세화된 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 강수 자료에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량을 연도별로 비교.

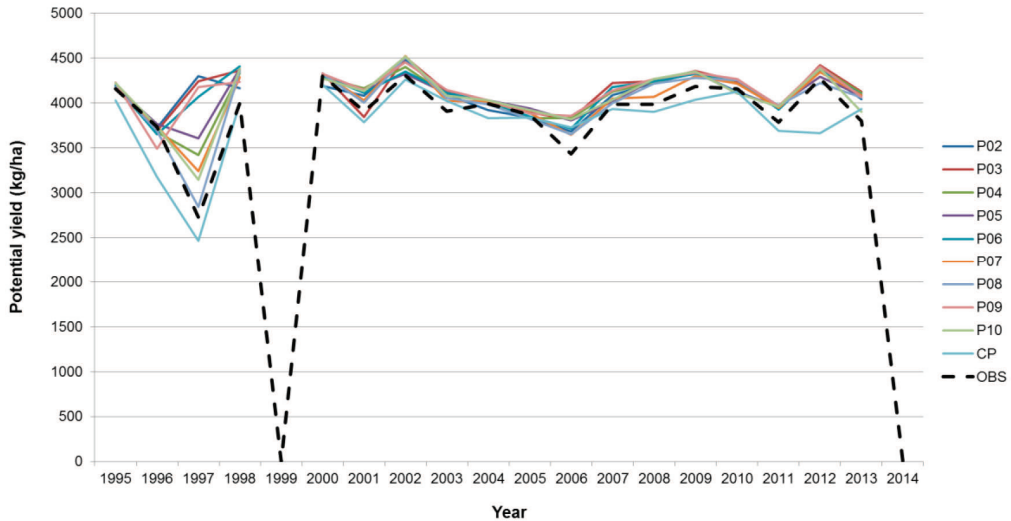


그림 4.72. 과거기간(1994-2014) 동안 예측선행시점 5월 14일에 11개 기후모형의 상세화된 ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 강수 자료에 따른 CERES-Rice의 벼 잠재수량을 모형별(11개)로 비교

또한 같은 예측선행시점(5월 14일)에 대한 2015년 ECMWF의 강수 자료에 대한 벼 잠재수량 예측성은 계절예측 강수 자료에 의한 벼의 잠재수량 예측성보다 향상되는 것으로 나타났다(그림 4.73). 그러나 이것은 예상된 결과인데, 이유는 3.4.2.4절의 그림 3.17에서 설명한 것과 같이 CERES-Rice 입력 기후자료(WTH)가 예측선행시점인 5월 14일부터 약 40일간만 ECMWF 예측 강수 자료가 입력되게 재단되었고, 40일을 제외한 다른 기간에 대해서는 관측 기후 자료가 입력되어 CERES-Rice가 구동되도록 재단되었기 때문에 당연히 관측 기후 자료가 벼 잠재수량에 영향을 미쳤을 것이다. 그래서 2018년 연구 내용에서 상세화된 ECMWF 예측 자료의 경우, 예측선행시점을 5월 14일도 중요하지만, 개화시기나 등숙기간이 예측선행시점에 포함되는 ECMWF 예측 자료를 각각 입력해서 그 시기의 ECMWF 예측 자료가 주요 시기별 벼 잠재수량 예측에 어떻게 영향을 미쳤는가에 대해 분석할 예정이다. 또한 2015년 관측 기후 기반의 잠재수량에 대한 상세화전 후의 계절내예측 기후의 벼 잠재수량의 상대적 변화를 계산했다(그림 4.74). 특이사항은 관측 기후 기반의 잠재수량에 대해 상세화된 계절내예측 기후의 잠재수량의 상대적 변화가 상세화 기법에 의해 상세화되지 않은 계절내예측 기후의 잠재수량의 상대적 차이보다 더 큰 것으로 나타났다.

그림 4.75는 예측선행시점 2015년 5월 14일에 대해 상세화된 ECMWF 예측 자료와 2015년 5월에 대한 예측선행기간별(L1에서 L6까지) 상세화된 계절예측 기후 정보의 결합에 따른 벼의 잠재수량의 예측성 평가 결과이다. 상세화된 계절내예측과 계절예측 기후 자료 결합 기반의 벼 잠재수량 예측성이 계절예측 기후 기반의 벼 잠재수량보다 좋을 것으로 예상했지만 전혀 반대의 결과로 예측성이 더 낮았다.

원인을 분석하기 위해 2018년 연구 내용에서 앞서 언급한 바와 같이 먼저, 주요 시기 별로 입력된 모든 예측 기후 자료와 관측 기후 자료가 비교 및 분석될 것이다. 또한 현실적으로 계절내예측 기후 자료의 활용을 높이기 위해서는 계절내예측 기후 자료의 예측선행시점과 주요 생육시기와의 관계가 고려된 CERES-Rice 시뮬레이션의 시점 등에 대한 가이드라인 등 설정할 것이다. 예를 들면, 5월 파종시기에 대한 예측성을 평가할 경우, 계절내예측 기후 자료의 예측선행시점은 4월, 개화시기 혹은 등숙기에 대한 계절내예측과 계절예측 기후 자료의 예측선행시점은 각각 6월과 7월 혹은 8월로 작물모형 시뮬레이션 시점에 대한 평가와 가이드라인을 설정하는 것이다.

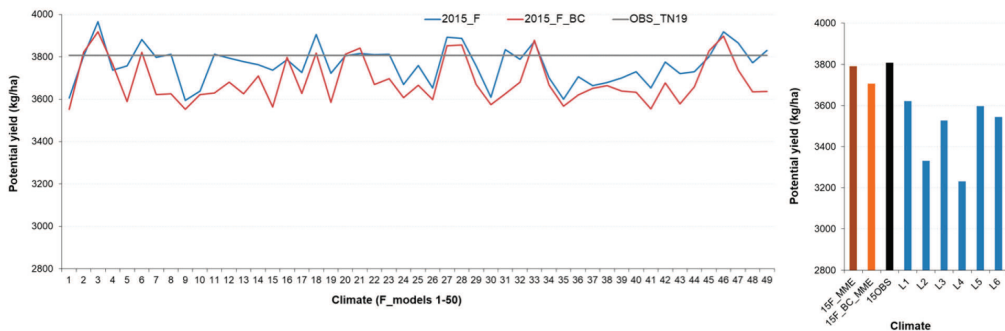


그림 4.73. 예측선행시점 2015년 5월 14일에 대해 상세화되지 않은 계절내예측 기후 자료와 상세화된 계절내예측 기후 자료의 CERES-Rice의 벼 예측 잠재수량과 2015년 5월에 대한 예측예측기간별(L1에서 L6) 계절예측 기후 자료에서 예측된 잠재수량과 비교.

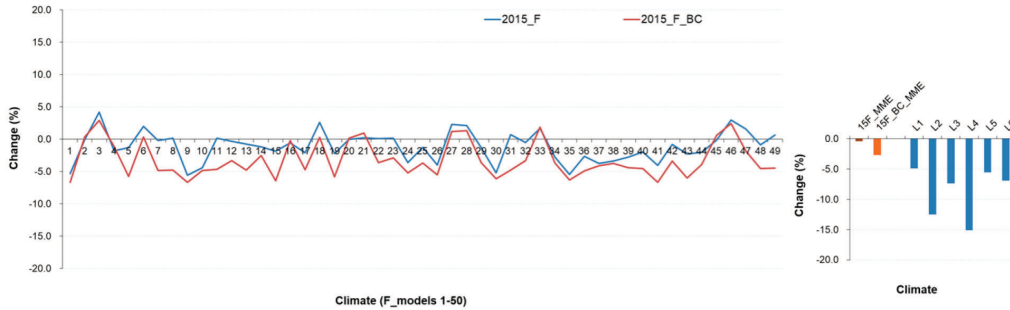


그림 4.74. 2015년 5월 14일의 관측 기후 기반의 잠재수량에 대한 동일 시점에서 상세화 전과 후의 ECMWF 예측 기후 자료의 CERES-Rice의 벼 예측 잠재수량의 상대적 변화를 비교. 또한 2015년 5월에 대한 예측선행 기간별(L1에서 L6) 계절예측 기후 자료에 대한 상대적 변화도 비교.

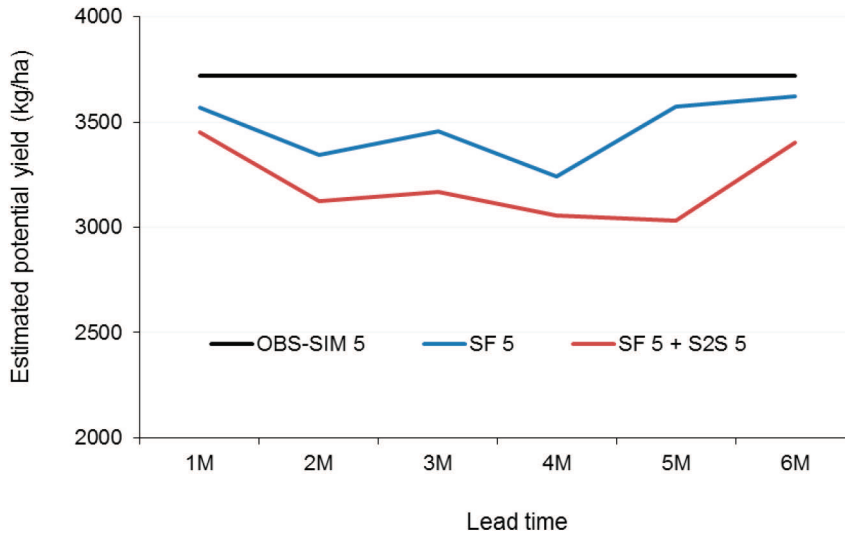


그림 4.75. 예측선행시점 2015년 5월 14일에 대해 상세화된 ECMWF 예측자료와 2015년 예측선행기간별(Lead time: 1M, 2M, 3M, 4M, 5M, and 6M) 상세화된 계절예측 기후 자료 결합 기반의 벼 잠재수량과 계절예측 기반의 벼 잠재수량 비교. 본문에서 'L1에서 L6까지'는 그림 4.7에서 '1M에서 6M'과 같은 의미임.

## 4.5 기후 및 가뭄예측 정보와 응용 분야의 융합

### 4.5.1 개요

본 연구는 다학제간 연구로써 각각의 학제와 학제 상호간의 연관성이 복잡하게 구성되어 있다. 그림 4.76은 다양하고 복잡하게 연계된 참여 연구원들의 학제간 전문성을 바탕으로 그 역할과 협력 사항들을 나타낸 모식도이다. 기후 연구에서는, 태국내 강수량의

계절내 및 계절 변동성에 중요한 인자(BSISO, ENSO, IOD 등)를 기상/기후학적으로 분석(가뭄 메커니즘 분석과 CIR 검증 포함)하고, 계절내예측 자료(예, ECMWF)와 APCC의 계절예측 자료의 예측성을 평가하여 그 결과들이 통계적 상세화 과정의 정확도를 높이며 가뭄-수자원-농업 모델링을 위한 입력자료가 된다. 통계적 상세화 개발 연구에서는, 계절내 및 계절예측 정보에 대한 편의보정을 포함한 4가지의 다양한 방법들(SBC, CIR, MWR, MWR-Obs)에 의해 상세화된 예측 기후 자료가 수자원과 농업 모델링에 제공된다. 또한 태국의 미래 가뭄-수자원 위험 평가를 위해 기후변화 시나리오의 장기추세와 극한기후에 대한 현상(signal)이 유지된 상세 기후변화 시나리오 자료가 제공될 것이며 그에 대한 가뭄-수자원의 미래 변동성 평가도 수행된다. 가뭄예측 연구에서는, 가뭄 모니터링을 위한 자료(위성기반)가 수집되고 데이터베이스화되어 가뭄예측 모델링에 제공된다. 또한 태국의 가뭄 메커니즘 분석 결과와 위성기반의 가뭄 모니터링 정보를 기계학습모델에 적용하여 가뭄지수 예측모델을 개발 및 평가하고 가뭄 예측성이 우수한 기후 예측 모델의 정보(예를 들어, 가뭄 가중치)를 농업-수자원 모델링에 제공한다. 수자원 및 농업 연구에서는, 향상된 상세 예측 기후 정보와 가뭄 정보로부터 물수지 평가와 저수율 예측 성능을 높일 수 있는 수자원 모델링을 개발하여 최종수혜기관(예, Royal Irrigation Department, RID)의 용수관리 의사결정에 활용될 수 있는 물관리 정보를 생산한다. 마찬가지로 향상된 가뭄 정보와 상세화된 예측 기후 정보가 입력된 농업 모델링을 통해 작물 생산량 예측력을 향상시키고 영농정책 의사결정에 반영될 수 있는 농업환경변화 정보 등이 생산된다.

이러한 참여 연구원들의 역할과 책임으로부터 생성된 연구 결과물을 극한기후가 발생한 상황(예, 1997-1998년, 2004-2005년, 혹은 2014-2015년의 가뭄 상황 등)에 반영하여 상세화된 예측 기후 자료로부터 수자원 및 농업 모형의 예측력 향상 여부를 평가하고자한다(그림 4.76).

## Drought Risk Assessment Framework

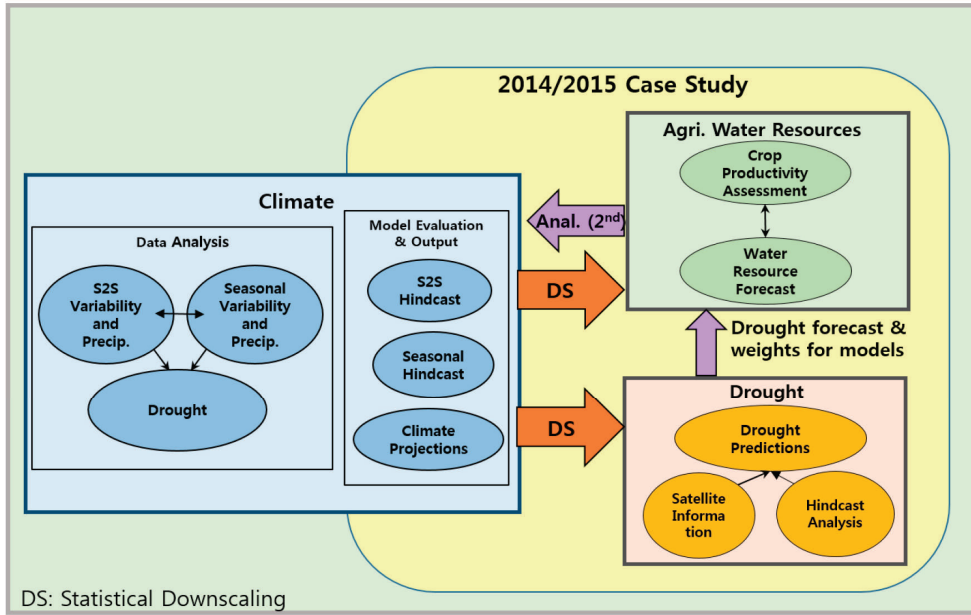


그림 4.76. 본 연구에서 가뭄 위험 평가 프레임워크 개발을 위한 다학제간 관계도

### 4.5.2 몬순예측 정보 기반의 벼 파종시기 예측

이 절에서는 기후와 응용 분야, 특히 농업 분야와의 결합을 통해 생산할 수 있는 다차원 정보(예, 3차원, 4차원 등)에 대한 예비 결과이다. 태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD)로부터 1971년에서 2016년까지 태국의 우기(rainy season 혹은 wet season)가 시작된 날짜 정보가 수집됐다(4.1.3절의 표 4.1). 대체로 우기가 시작된 평균일은 5월 13일로 분석됐다(4.1.3절의 표 4.2). 그래서 평균 우기 시작일인 해(year)보다 늦은 우기 시작일의 해 혹은 빠른 우기 시작일의 해 등으로 분류한 후, CERES-Rice에서 1984년부터 2016년 동안 매해 3개의 파종시기(5월 1일, 8일, 그리고 24일)에 따라 잠재수량을 모의한 후, 기준 파종시기(traditional planting day; 5월 14일)의 잠재수량과의 차이를 분석하고 비교했다(그림 4.77). 그 결과, 뚜렷하게 유의성이 나타나지 않았지만, 우기가 늦게 온 해에 기준 파종시기(5월 14일)보다 빨리 파종하게 되면 기준 파종시기의 잠재수량 수준만큼 도달하는 것으로 나타났다. 그러나 우기가 늦게 온 해에 기준 파종시기보다도 더 늦게 파종하게 되면 기준 파종시기의 잠재수량 수준에 도달하지 못했다. 또한 우기가 일찍 시작된 해의 경우, 기준 파종시기보다 빨리 파종하면 기준 파종시기의

잠재수량 수준보다 더 많은 수준으로 잠재수량이 증가할 수 있는 것으로 예측되었다. 반면 늦게 파종한 경우에는 기준 파종시기의 잠재수량과 큰 차이가 없는 것으로 예측되어서 우기가 일찍 시작할 경우 파종시기의 지연은 크게 위협하지 않거나 영향을 크게 미치지 않을 것으로 분석됐다. 즉, 우기가 늦게 시작하는 것은 파종시기 이동에 따른 잠재수량 변화에 영향을 미치지만 우기가 일찍 시작되는 것은 파종시기 이동에 따른 잠재수량 변화에 영향을 크게 영향을 미치지 않는다고 해석할 수 있다.

몬순 예측의 정확성, 즉 우기가 시작되는 날짜에 대한 예측 정보를 정확하게 전달받을 수 있다면, (몬순 예측 정보에 따라) CERES-Rice를 구동하여 적정 수준의 벼 잠재수량 확보가 가능한(적정) 파종시기들에 대한 예측 정보의 생산이 가능하고, 이로부터 영농활동(예, 파종시기 이동에 대한 결정)에 대한 의사결정 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 APCC의 여름철 계절내 진동(Boreal Summer IntraSeasonal Oscillation, BSISO) 예측 기술이 지속적으로 향상되어가고 있는데, BSISO가 태국 몬순에 미치는 영향을 분석한 결과, BSISO 1의 위상(phase) 5가 태국 몬순 발생시기와 높은 상관을 보였다(4.1.3절의 그림 4.10-11과 표 4.3). 따라서 APCC의 BSISO 예측 기술로부터 생산된 태국 몬순 예측 정보(우기 시작일)를 CERES-Rice와 결합하여 벼 생육 반응 및 잠재수량 예측 과정(시스템) 등을 개발할 수 있을 것이다.

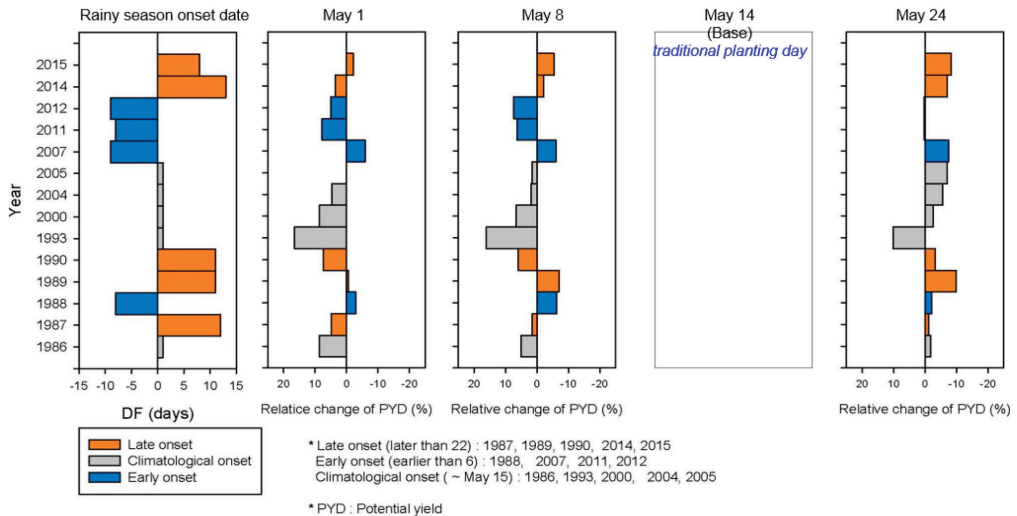


그림 4.77. 태국에서 관측된 평균 우기 시작일(5월 14일)이 파종시기였을 때의 CERES-Rice 벼 잠재수량을 기준 잠재수량(Base, traditional planting day)이라고 가정했을 때, 각각 3개의 파종시기 변화(기준 파종일보다 단축(5월 1일과 8일)과 기준 파종일보다 지연(5월 24일)에 따른 잠재수량의 상대적 변화를 비교.

## 5. 결론 및 향후 계획

### 5.1 계절내예측 기후정보의 활용

본 연구에서는 여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)이 태국 강수에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 태국 우기 시작일을 예측하는 방법을 제안하고 평가하였다. BSISO는 태국 연강수량의 경년변동성에 영향을 미칠 뿐 아니라, 우기 시작일과도 밀접한 관련이 있다. 다중 모델을 활용한 우기 시작을 4주 전에 예측할 수 있는 가능성을 보였다. 이는 대부분의 농업 용지가 천수답으로 이루어진 태국의 농업 용수 관리의 효율성을 증대시키는데 기여할 수 있다. 다중모델로부터 생산해 낸 BSISO 지수를 바탕으로 한 우기 시작일 예측은 우기 시작일을 결정하는데 있어 주관성이 다소 개입되는 점, 예측 테스트 기간이 짧은 점 등 향후 더 개선되어야 할 점들이 몇몇 있으나, 태국 뿐만 아니라 주변 인접국에도 손쉽게 적용할 수 있다는 강점을 지니고 있기도 하다. 또한 이러한 방법론을 바탕으로 APCC에서 현재 실시간으로 제공하고 있는 다중모델 기반 BSISO 지수 예측 정보를 우기 시작 예측에 활용할 수 있다.

또한 현재 계절내 예측 모델 중 가장 좋은 스킬을 보이고 있는 ECMWF 자료의 데이터 베이스를 구축하고 그 성능을 태국 지역을 중심으로 평가하여 다양한 분야에서 활용할 수 있도록 하였다. 기존 다중모델에 기반한 계절예측이 가지고 있는 시간 해상도의 한계를 극복할 수 있을 뿐 아니라, 일 최고/최저 기온 및 일사량과 같은 다양한 변수를 생산해 내고 있기 때문에 그 활용 범위가 크다 할 수 있겠다. 차년도에 이 예측 자료를 활용한 연구가 보다 더 구체적으로 진행될 계획이다.

### 5.2 계절예측 기후정보의 활용

태국의 계절 변동성 연구 결과, 태국 지역의 몬순 시작일, 북동부 지역의 4월 또는 5월 강수량, 6월의 가뭄지수(SPI3)가 ENSO와 관련된 기후인자들(예, NINO3.4, PDO, SOI, EMI, IOBW, WNINO, TNA 등)과 밀접한 관계를 보였다. 엘니뇨의 다양성과 관련하여, 높은 EMI 지수와의 상관성에서도 보이듯이 EP 엘니뇨뿐 아니라 CP 엘니뇨에도 강수량 감소가 나타났다. 7, 8월에는 ENSO 관련 인자들의 연관성이 현격히 줄어들었다.

데 주변의 해양, 대륙의 영향과 함께 태풍의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 보인다.

ENSO와 관련한 변수들은 주로 필리핀 주변의 고기압성 흐름(예, WNPSH)에 영향을 끼침으로 태국의 강수량에 영향을 준다. WNPSH가 인도차이나 반도까지 확장(축소)하는 경우 강화된(약화된) 고기압의 직접적인 영향뿐 아니라 이로 인해 인도양에서의 따듯하고 습한 공기의 유입이 감소(증가)되어 태국 또는 북동부 지역의 강수량을 감소(증가)시키는 역할을 한다.

Decadal change를 살펴본 결과, 몬순 초기(예, MJJ)에 ENSO 관련 기후인자들의 중요성이 최근 20년(1993-2012)에 두드러지게 나타났다. 이는 ENSO와의 연관성이 최근 들어 증가하였다는 기존의 결과와 일치하는데 흥미로운 사실은 최근 20년 동안 엘니뇨(라니냐)의 발달기가 아닌 쇠퇴기의 4월과 5월에 북동부 지역의 강수량이 감소(증가)하는 경향이 두드러지게 관찰 되었다는 점이다. 태국 강수량과 ENSO 관련 인자들의 높은 관련성은 부분적으로 열대 중태평양, 인도양, 서태평양, 대서양의 SST 상관관계가 (시간차이가 있을지라도) 이전 기간에 비해 최근 강화되면서 5월에서 6월까지도 지속되기 때문인 것으로 보인다. 계절예측 자료 및 가뭄 예측 모델 테스트 결과 강수/가뭄 예측성이 몬순 후반(8-10월)보다 초반(4-6월)에 낮게 나타났는데(섹션 4.2.2 와 4.3.3) 이러한 ENSO의 영향은 몬순 초반 강수/가뭄 예측성을 향상 시킬수 있는 가능성을 제시한다.

이러한 결과를 바탕으로 SST 기반의 TMD 몬순 시작일과 6월 강수량을 예측하는 회귀 모형을 개발하였는데, 6월 강수량의 경우 해양의 영향이 급격히 감소하는 시기이기 때문에 좋은 성능을 보이지는 못하였으나, 몬순 시작일의 경우 다른 모델과 함께 참고 자료로 이용될 수 있는 가능성을 보였다.

### 5.3 상세화 방법의 개선

계절내예측 상세화 방법은 강수량 및 평균기온에 대해서만 고려되었다. 따라서 향후 농업분야의 작물모델링에 필요한 일사량을 포함한 주요 변수들을 고려할 수 있도록 개선이 필요하다. 계절예측 상세화의 경우에는 특정 월 및 선행예측기간 조건에서 어떠한 예측인자도 선정되지 않는 경우, Climatology를 사용하게 되어 있으나 향후 MME 값을 사용할 수 있도록 개선이 필요하다. 또한 9개월 선행예측기간을 갖고 있는 NMME와

같은 외부 기관에서 제공하는 계절예측자료를 활용할 수 있도록 개선하여 예측기간을 저 장기적으로 고려하는 것도 필요할 것이다.

## 5.4 예측 기후정보의 가뭄예측에 활용

다중범위 기후정보의 경우 관측 자료는 가뭄감시를 위해, 기후변화 시나리오는 가뭄발생에 미치는 장기적인 기후변화의 영향 평가 수행을 위해 활용하였다.

계절예측 및 계절내예측 정보 활용의 경우 기계학습 기반의 미세측 지역 가뭄예측과 계절예측 기반의 가뭄예측을 통해 수행하였는데, 기계학습 기반의 미세측 지역 가뭄예측의 경우 SPI3를 목표 변수로 편의보정된 기후모델을 사용한 경우와 기계학습 모델인 극랜덤트리(ERT), 아다부스트(Adaboost) 모델을 사용한 경우의 성능을 비교하였다.

결과를 요약하면 가뭄 정확도에 있어 6월 SPI3 예측의 경우 일부 모델 만이 작은 값을 보여 비교에 큰 의미가 없었다. 10월은 편의보정된 기후모델을 이용한 경우만이 유의미한 결과를 생산하였으며 특히 S2S 예측 자료가 예측선행기간 1개월에서 매우 높은 정확도를 보였다. 가뭄 카테고리의 평균절대오차(MAE)의 경우에는 6월의 경우에는 예측선행기간 1-2개월에서 편의보정된 기후모델들이 더 우수한 결과를 보였는데 예측선행기간 3개월의 경우에는 ERT 모델의 성능이 우수하였다. 그러나 10월 예측의 경우에는 편의보정된 기후모델이 예측선행기간 1-3개월에서 더 작은 오차를 보였다.

기계학습의 활용이 그렇지 않은 경우에 비하여 우수한 결과를 보이지는 못하였으나 단일 기후모델을 활용하는 경우 예측하고자 하는 시점이나 예측선행기간에 대해 어떤 모델이 우수한 결과를 내는지에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 후속 연구에서는 이러한 우수 기후모델에 대한 정보를 제공하여 상세화에 반영하거나 이에 따라 향상된 상세화 예측 기후정보에 따라 수자원 및 농업 생산 예측력이 기존 예측 기후정보에 의한 것보다 얼마나 향상되었는가에 대해 평가할 수 있을 것이다.

계절내예측 정보의 경우, 기계학습 기반 가뭄예측 모델을 구축하면서 편의보정한 계절내 예측정보를 선행시간 1개월인 경우에 대해 포함하여 평가하였는데, 이 경우가 10월 SPI3 예측의 경우 가장 우수한 결과를 생산하였다. 즉 계절내예측 정보가 가뭄예측에 있어서 유용하게 쓰일 수 있는 가능성을 보인다고 할 수 있다. 시간적인 제약으로 긴

기간에 대해 상세화된 자료를 생산하지 못하여 상세화된 S2S는 테스트하지 못하였지만, 후속 연구에서는 지점에 대해 가뭄예측을 하는 경우 상세화된 자료의 활용을 테스트하는 경우 개선된 결과를 기대할 수 있을 것이다.

### 5.5 예측 기후정보의 댐 유입량 및 저수율 예측성 및 수문모형에 활용

과거기간에 대한 모형의 성능을 평가하기 위해서는 람타콩 댐 상류 유역에 위치해 있는 Pak Chong Agromet(TH431301) 지점의 강수량 자료의 결측치가 없는 2005년~2012년의 기간을 사용한 유입량 모의는 0.7632의 다소 낮은  $R^2$  값을 보였다. 유입량 예측성 평가에서는 TH431301의 일단위로 상세화된 예측 기후자료를 SWAT 모형에 적용한 결과를 관측 기상자료로부터 도출된 결과와 비교하였다. 예측성 평가 결과, 가장 높은 Temporal Correlation Coefficient(TCC)는 0.26으로 10월에 가장 높은 결과를 보여 전체적으로 예측성이 없는 결과를 보였다. 이는 북동부 지역에 대한 월단위 강수량 예측결과를 특정 지점에 대한 일단위 자료로 상세화하는 과정에서 발생하는 불확실성에서 기인되는 것으로 보이는데, 이러한 불확실성 요인을 줄일 수 있는 방법을 모색한다면 예측성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

### 5.6 예측 기후정보의 작물 잠재수량 예측성 및 농업모형에 활용

본 연구에서 농업 모델링은 센터에서 개발된 상세화 방법에 의해 상세화된 계절내예측 및 계절예측 기후정보로부터 태국의 계절 기후변화에 따른 벼 잠재수량의 변화를 평가했을 뿐만 아니라 예측 기후 정보에 따른 벼 잠재수량 예측성을 분석하여 예측 기후 정보의 농업모형 활용 가능성을 평가했다.

계절예측 기후정보 활용의 경우, MWR 및 CIR 등의 상세화 방법에 의해 상세화된 기온(일 최고 및 일 최저)과 강수에 따른 벼의 잠재수량의 예측력을 평가한 결과, 기온만 활용했을 경우 예측 시점 1개월 시점이 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과 높은 상관(0.92)을 보였고 그 경향(trend)도 비교적 잘 모의하는 것으로 나타났다. 이것이 계절예측 기후정보의 우수한 예측력 때문인지 아니면 관측 일사 정보가 영향을 미친 것인지, 여러 가지 불확실한 정보에 대해서는 추가 분석이 필요하다. 그러나 강수와 3개 기후요

소(일 최고 및 일 최저기온, 강수)를 모두 활용했을 경우에는 예측시점 1개월에서도 관측 기후 기반의 벼 잠재수량과의 상관성이 0.20에서 0.26으로 예측성이 낮아 바로 활용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 이 경우에도 계절예측 자체의 예측성 때문인지 혹은 상세화 때문인지 불확실성 요인에 대한 분석이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

일별 계절내예측 기후정보(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 활용의 경우, 관측 기후 기반의 벼 잠재수량에 대해 상세화된 일별 ECMWF 강수 자료 자체에 따른 벼 예측 잠재수량은 계절예측 기온 및 강수 자료에 따른 벼 잠재수량보다 높은 상관성을 보였고 그 (관측 기후 기반의 벼 잠재수량의) 절대값에 가까워졌다. 그러나 상세화된 ECMWF와 계절예측 기후를 결합하여 예측한 벼 잠재수량의 예측성은 예상과 달리 높지 않았다. 원인 분석을 위해 2018년 연구 내용에서 관측 기후부터 상세화된 계절내 및 계절예측 기후 자료를 주요 시기별로 분석할 예정이다.

작물모형(예, CERES-Rice)에서 관측 기후 기반의 벼 잠재수량 예측력이 우수하다는 가정하에 계절내예측 및 계절예측 기후 정보의 농업모형 활용 가능성에 대한 전반적인 결론은 관측 기후 기반의 벼 잠재수량에 대해 센터에서 생산한 계절예측 기후 정보(센터에서 개발한 상세화 방법에 의해 상세화된 계절예측 기후 자료)에 따른 벼 잠재수량 예측 상관성이 낮지 않기 때문에 센터의 계절예측 기후 정보의 작물모형 활용이 충분히 가능할 것으로 판단된다.

또한 문순 예측 정보의 활용의 경우, 뚜렷하게 유의성이 나타나지 않았지만, 우기가 늦게 시작하는 것은 파종시기 이동에 따라 벼 잠재수량 변화에 미치지만, 우기가 일찍 시작되는 것은 파종시기 이동에 따른 벼 잠재수량 변화에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 분석됐다. 그래서 문순 예측의 정확성, 즉 우기가 시작되는 날짜에 대한 예측 정보를 정확하게 전달받을 수 있다면, (문순 예측 정보에 따라) CERES-Rice를 구동하여 적정 수준의 벼 잠재수량 확보가 가능한(적정) 파종시기들에 대한 정보 생산이 가능하고, 이로부터 영농활동(예, 파종시기 이동에 대한 결정)에 대한 의사결정 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 APCC의 여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO) 예측 기술이 지속적으로 향상되고 있는데, BSISO가 태국 문순에 미치는 영향을 분석한 결과, BSISO 1의 Phase 5와 태국 문순 발생시기와 상관성이 높게 나타났다. 또한

기후 지수를 이용한 몬순 시작일 예측도 가능성을 보였다. 따라서 APCC의 BSISO 예측 기술 및 기후 지수로부터 생산된 태국 몬순 예측 정보를 CERES-Rice와 결합하여 벼 생육 반응 및 잠재수량 예측 과정(시스템) 등을 개발하여 태국의 계절 기후변화에 따른 농업분야 위험성 평가 프레임 워크 개발에 기여할 수 있을 것이다.

## 종합 결론

본 연구의 1차년의 궁극적인 목적은 관측뿐만 아니라 계절 내 및 계절예측 기후부터 미래 기후변화까지 다중범위의 기후정보를 각각의 응용분야(예, 수문기상, 수문, 농업 등)에서 활용할 수 있는 신뢰 수준으로 예측 기후정보를 제공함은 물론 각각의 응용 분야에서, 특히 가뭄예측 및 수자원과 농업분야의 예측력을 향상시킴으로 수자원 및 농업의 의사결정에 활용할 수 있는지를 평가하는 것이었다.

APCC에서 생산된 기후 예측정보를 APCC에서 개발한 상세화 방법으로 지역화 하여 응용분야에서 활용할 수 있도록 하였는데, 그 결과 상세화된 계절예측 기후정보를 입력 자료로 사용하는 다양한 응용분야의 모델링(가뭄, 수문, 농업)을 구축하고 테스트 할 수 있었다. 모델 테스트 결과에 따르면 APCC에서 개발된 다양한 시간 규모의 최신 기후 정보(BSISO, 기후예측, 상세화, 위성자료, 가뭄 모델)를 적절히 이용했을 때 태국의 가뭄, 수자원, 작물 생산성의 예측력을 증가시킬 수 있는 가능성을 확인하였다. 특히 태국 북동부 랏타콩 소유역에서 상세화된 APCC의 계절예측 기온정보는 어느 정도 좋은 성능을 보였고, 계절예측 강수정보에서도 3월과 6월을 제외하고는 비교적 만족할 만한 성능을 보였다. 이에 더하여 새롭게 시도된 계절내예측 기후정보의 유용성에 관하여는 다양한 활용 가능성을 보였는데 그 예로 첫째, 태국의 단기(주~1개월 이내) 강수와 가뭄 예측력의 증가, 둘째 몬순 시작일의 예측 가능성, 셋째 계절예측에서 제공하지 못하는 일단위 기후 정보 제공을 통한 벼 생산량 예측의 향상 등이다. 이러한 결과는 저자들이 아는 한, 아직까지 시도된 사례가 없는 계절내예측 기후정보의 가뭄, 수자원, 농업분야에의 활용 가능성을 제시한 연구라는 점에서 시사하는 바가 크다.

이렇듯 APCC에서 개발된 다양한 최신 기후 정보(BSISO, 기후예측, 상세화, 위성자료)를 적절히 이용했을 때 태국의 가뭄, 수자원, 작물 생산성 예측력을 증가시킬 수 있는 것으로 나타났으며 이는 기후, 농업, 수문, 지리정보 등의 다양한 전문 지식의 융합을 통해서 가능했다. 이러한 융합 기술을 바탕으로 태국의 수문 및 농업 관계자들과의 친밀한 협업을 통해 2차년에는 실질적인 영농정책 및 의사결정에 반영될 수 있는 태국 가뭄 리스크 평가 지표와 프레임워크를 개발할 예정이다.

## REFERENCES

- Ångström A. 1924: Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50. 121–126.
- Annamalai, H. and Slingo, J.M., 2001: Active/break cycles: diagnosis of the intraseasonal variability of the Asian summer monsoon. *Climate Dynamics*, 18(1), pp.85–102.
- Ashouri, H., K.-L. Hsu, S. Sorooshian, D. K. Braithwaite, K. R. Knapp, L. D. Cecil, B. R. Nelson, and O. P. Prat. 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, doi: 10.1175/BAMS-D-13-00068.1.
- Black, J. N., C. W. Bonython, and J. A. Prescott, 1954: Solar radiation and the duration of sunshine. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80. 231–235. doi:10.1002/qj.49708034411
- Chowdary, J. S., & Gnanaseelan, C., 2007: Basin-wide warming of the Indian Ocean during El Niño and Indian Ocean dipole years. *International Journal of Climatology*, 27(11), 1421–1438.
- Cook, B. I., & Buckley, B. M., 2009: Objective determination of monsoon season onset, withdrawal, and length. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D23).
- Ding, Q., and B. Wang, 2005: Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer. *J. Climate*, 18, 3483–3505.
- Ding, H., Greatbatch, R. J., Latif, M., Park, W., & Gerdes, R., 2013: Hindcast of the 1976/77 and 1998/99 climate shifts in the Pacific. *Journal of Climate*, 26(19), 7650–7661.
- Hong, C. C., Lee, M. Y., Hsu, H. H., Lin, N. H., & Tsuang, B. J., 2015: Tropical SST forcing on the anomalous WNP subtropical high during July–August 2010 and the record-high SST in the tropical Atlantic. *Climate dynamics*, 45(3–4), 633–650.
- Hoogenboom, G., J. W. Jones, P. W. Wilkens, C. H. Porter, K. J. Boote, L. A. Hunt, U. Singh, J. L. Lizaso, J. W. White, O. Uryasev, F. S. Royce, R. Ogoshi, A. J. Gijssman, G. Y. Tsuji, and J. Koo, 2010: Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CDROM], University of Hawaii, Honolulu.
- Jensen (2005). *Remote Sensing of Environment*. Pearson Publisher, 608p.
- Keating, B. A., P. S. Carberry, G. L. Hammer, M. E. Probert, M. J. Robertson, Others, 2003: An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation, *European journal of agronomy* 18(3), 267–288.

- Kwon, M., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16709, doi:10.1029/2005GL023026.
- Lee, J.Y., Wang, B., Wheeler, M.C., Fu, X., Waliser, D.E. and Kang, I.S., 2013. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Climate Dynamics*, 40(1-2), pp.493-509.
- Lee, S. E., and Seo, K. H., 2013: The development of a statistical forecast model for Changma. *Weather and Forecasting*, 28(6), 1304-1321.
- Limsakul, A., & Singhruck, P., 2016: Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand. *Atmospheric Research*, 169, 301-317.
- Lin, H., Brunet, G. and Derome, J., 2008. Forecast skill of the Madden-Julian oscillation in two Canadian atmospheric models. *Monthly Weather Review*, 136(11), pp.4130-4149.
- Li, X., Xie, S. P., Gille, S. T., & Yoo, C., 2016: Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades. *Nature Climate Change*, 6(3), 275-279.
- 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.
- Mukand S. Babel<sup>1</sup>, Anshul Agarwal, Dillip Kumar Swain, Srikantha Herath, 2011: Evaluation of climate change impacts and adaptation measures for rice cultivation in Northeast Thailand. *Climate Research*, 46. doi: 10.3354/cr00978
- Nguyen-Le, D., Matsumoto, J., & Ngo-Duc, T., 2015: Onset of the rainy seasons in the eastern Indochina Peninsula. *Journal of Climate*, 28(14), 5645-5666.
- Quan, X.-W., Hoering, M.P., Lyon, B., Kumar, A., Bell, M.A., Tippett, M.K., Wang, H., 2012. Prospects for dynamical prediction of meteorological drought. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51, 1238-1252.
- Rhee, J., and J. Im. 2017. Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology* 237: 105-122.
- Rong, X., Zhang, R., & Li, T., 2010: Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship. *Chinese Science Bulletin*, 55(22), 2458-2468.
- Singhrattna, N., Babel, M. S., & Perret, S. R., 2012: Hydroclimate variability and long-lead forecasting of rainfall over Thailand by large-scale atmospheric variables. *Hydrological sciences journal*, 57(1), 26-41.

- Singhrratna, N., Rajagopalan, B., Kumar, K. K., & Clark, M., 2005: Interannual and interdecadal variability of Thailand summer monsoon season. *Journal of Climate*, 18(11), 1697–1708.
- Vitart, F., Ardilouze, C., Bonet, A., Brookshaw, A., Chen, M., Codorean, C., Déqué, M., Ferranti, L., Fucile, E., Fuentes, M. and Hendon, H., 2017. The Subseasonal to Seasonal(S2S) Prediction Project Database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), pp.163–173.
- Wang, B., J. Liu, J. Yang, T. Zhou, and Z. Wu, 2009: Distinct principal modes of early and late summer rainfall anomalies in East Asia. *J. Climate*, 22, 3864–3875.
- Yamaura, Y., and Y. Tomita, 2011: Spatiotemporal differences in the interannual variability of baiu frontal activity in June. *Int. J. Climatol.*, 31, 57–71.
- Yang, J., Q. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02708, doi:10.1029/2006GL028571.
- Xiang, B., & Wang, B., 2013: Mechanisms for the advanced Asian summer monsoon onset since the mid-to-late 1990s. *Journal of Climate*, 26(6), 1993–2009.
- Yoon, J. H., and N. Zeng, 2010: An Atlantic influence on Amazon rainfall. *Clim. Dyn.* 34, 249–264.
- Zhang, R., Min, Q., and Su, J., 2017: Impact of El Niño on atmospheric circulations over East Asia and rainfall in China: Role of the anomalous western North Pacific anticyclone. *Science China Earth Sciences*, 1–9.
- Zhang, Y., Li, T., Wang, B., and Wu, G., 2002: Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: Climatology and interannual variations. *Journal of Climate*, 15(22), 3206–3221.
- Zheng, X. T., Xie, S. P., and Liu, Q., 2011: Response of the Indian Ocean basin mode and its capacitor effect to global warming. *Journal of Climate*, 24(23), 6146–6164.
- 이진영(2015). 위성 및 장기예측자료의 기계학습을 통한 가뭄예측. APEC기후센터 연구보고서 2015-16. 129 p. ISBN 979-11-5698-113-8.
- 이진영(2016). 원격탐사 및 기후자료를 이용한 아태지역 가뭄예측모델 개발: 인도네시아를 중심으로. APEC기후센터 연구보고서 2016-26. 94 p. ISBN 979-11-5698-177-0.
- 조재필(2015). 계절예측 정보를 활용한 통합 수문·수질 장기예측 기술 개발. APEC기후센터 연구보고서 2015-13. 207p.
- 조재필(2017). 유역규모 비점오염 관리 의사결정 지원을 위한 APCC 계절예측 정보 활용 방안 연구. APEC 기후센터 연구보고서 2016-21. 84p.

## 부록: 연구노트

### 1. 태국 국제협력 연구사업 착수

#### 1.1 연구사업 착수 전 준비 과정

- 연구사업 계획서 혹은 제안서 완성
- 잠정 협력 기관 모색 및 사전 조사:
  - 태국 정부 기관 이외의 기관, 예를 들면 FAO 혹은 한국 기관(예, KOPIA, KOICA) 등을 통해 태국내 기관들간의 관계 이해 및 연락처 수집
- 잠정 협력 기관 연락 및 미팅 요청 및 수락:
  - 정부 기관: 태국 왕립관개청(Royal Irrigation Department, RID), 태국 농업청(Department of Agriculture, DOA), 태국 기상청(Thai Meteorological Department, TMD) 등의 실무자 및 관리자와 연락
  - 연구소 및 대학: 농업 수자원 정보 연구소(Hydro and Agriculture Information Institute, HAI), Kasasart University 등의 실무자와 연락
- 기관 방문과 실무자 및 관리자(예, 고위급 간부)과의 미팅:
  - APCC 및 연구사업 소개, 관심 교환
  - 연구 수행을 위한 현지 자료 가용 여부 확인
  - 실무자(예, focal point 혹은 key contact person) 선정
  - 협력에 필요한 주요 일정과 과정 논의 및 결정(예, MOU, LOA/LOI etc)
  - 자료 확보 및 활용을 위한 후속 협력 조치

#### 1.2 협력 기관에 대한 조사와 이해

프로젝트가 먼저 개발된 후에 협력 기관을 찾았기 때문에 이로 인한 어려움이 다수

존재했다. 방문 가능한 협력 기관들을 우선적으로 목록화 한 후 연락을 취했으나, 전화를 받지 않거나 답신이 오지 않는 경우가 빈번하였다. 비영어권 국가에 따른 의사소통에 어려움이 다소 존재하였으며, 적합한 협력 기관들을 모색하고 미팅을 요청하는데 최소 2~3주, 최대 4주에서 8주까지 소요되었다. 현지 관계자에 따르면 대부분의 태국 기관에서는 미팅을 요청하고 수락하는 데 최소 3~4주가 소요된다.

### 1.2.1 협력 기관 정보 구축

- 정부 혹은 민간 연구기관 및 대학 등의 분류 및 목록화
- 각 기관의 관리자 및 실무자 정보 및 연락망 구축

### 1.2.2 협력 초기에 필요한 서류

- Letter of Collaboration/Intent:
  - 협력(대상) 기관과의 미팅 및 협력에 대한 APCC의 관심을 공식적으로 문서화하여 제공하는 사전 작업이 필요. 이러한 문서는 미팅을 요청하는 서신과 미팅 후 협력에 대한 관심 표명 문서로 나눌 수 있음. 본 연구사업에서는 미팅을 요청하는 서신을 준비하였음.
- 연구 제안서 혹은 계획서(독자 중심의 제안서)
- Fact Sheet:
  - 1장 분량의 연구사업 설명서로서, 연구 계획서보다 더 간략하고, 연구내용을 쉽고 명료하게 전달할 수 있어야 함. 특히 연구사업을 통해서 얻을 수 있는 주요 결과를 중심으로 설명함.
- 연구사업명(두음문자):
  - 연구 사업을 잘 표현할 수 있는 영어 연구 사업명의 두음문자(acronym)로 구성하여 작성. 본 연구 사업의 영어 두음문자는 Cli-WARA(Climatic Information-based Water and Agriculture Risk Assessment)임.

- 수행기관 및 연구사업 소개 발표 파일 APCC와 Cli-WARA를 소개하는 발표 파일
  - APCC와 연구 사업의 work plan과 road map 및 연구사업 구성원 등 소개
- 자료 설명 및 요청 서류 혹은 MOU 요청 서류 등

### 1.2.3 연구사업 발대식(Kick-off meeting)의 성공 요인

- 연구 계획서보다 간단하고 기억하기 쉬운 Fact Sheet의 이용이 방문한 협력 기관의 미팅 참석자들이 연구 사업을 이해하는데 효과적이었음.
- FAO 직원 또는 태국 왕립관개청(RID)에 파견된 한국 농어촌공사(KRC) 직원(RID와 KRC는 MOU로부터 협력 관계에 있음)을 통해 태국 정부 기관들 사이의 이해관계와 태국 정부 또는 태국 공무원의 특성에 대한 정보를 부분적으로 미리 습득한 것이 도움되었음.
- APCC training program에 대한 소개와 설명은 현지 미팅 참석자들에게 APCC와 연구 사업에 대해 좋은 인상을 심어주었음.

### 1.2.4 문제점 및 보완 내용

- 연구사업 내용이 미팅 전 이미 개발되어 현지 수요자들의 필요 또는 의견을 반영하는데 한계가 있음.
- 따라서 첫 번째 미팅에서는 현지 수요자들의 필요를 경청하면서 관계를 만들어 나가고 그들의 지원을 이끌어 내는데 중점을 두는 것이 바람직함. 특히, 고위 관리자들은 연구 사업의 세부 사항(예, 연구 방법 및 재료 등)에 대해 관심이 상대적으로 적는데, 때론 이런 세부 사항에 대한 관심 부족이 연구 사업에 대한 혼란(예, 연구사업 지연 등)을 초래할 수 있음.
- 발표 자료를 준비할 때, 방문 대상 및 협력 기관의 특성과 미팅 참석자들의 분야 및 배경을 고려하여 참석자 및 독자 중심으로 이해하고 알기 쉽게 준비하도록 함.
- APCC 소개나 연구사업 전체에 대한 발표는 10분 이내로 진행하는 것을 권장. 특히, 연구 사업의 방법보다는 연구 사업의 결과와 그에 따른 긍정적인 영향(협력 기관이

- 연구 사업을 통해 얻을 수 있는 이익 등)에 초점을 맞출 필요가 있음.
- 태국내 기관들 사이의 관계는 생각보다 더 복잡했고 어떤 기관은 자신들이 key coordinating agency가 되고 싶어했음.
  - 연구사업 수행 대상 지역을 미리 선정하고 방문했으나, 연구사업 지역으로서의 부적합성과 가용 자료 부재 등의 이유로 인해 대상 지역의 변경이 제안되었음. 결국 태국 협력 기관들의 의견을 반영하여 대상 지역을 변경했음(태국 남서쪽 브란브리 지역 → 북동부 랏타콩 유역). 이는 연구사업 계획 단계에서 협력 대상국의 지역 전문가들(예, national researchers)의 조언 및 협력의 중요성을 반증함.
  - 한편, 태국 농업청(DOA)는 기후변화에 따른 병해충 방제에 많은 관심을 보였음. 이러한 현지 수요 정보(수요자 의견이 반영된 정보들)는 추후 다른 연구 사업의 개발에 도움이 될 것임.
  - 공교롭게도 미팅 후 후속 조치에 대한 응답이 원활하게 이루어지지 않았음. 이는 연구 사업비 측면에서 방문한 현지 기관에 실익이 없거나 연구 내용 측면에서 협력 기관들의 필요나 의견이 반영될 여지가 적다는 것을 그들이 인지했기 때문인 것으로 추측됨. 특히, DOA의 경우는 다른 정부(특히 왕립) 기관과 APCC와의 관계를 확인하고자 메일을 보내왔는데 태국내 기관들 사이의 복잡한 관계 때문인 것으로 추측됨. 따라서 해외 연구 사업을 개발할 때(특히 태국 지역), 정보 수집이 용이하지 않더라도 목표(대상) 기관들 사이의 복잡한 관계에 대한 정보를 수집한 후 그에 대한 대처 방안 마련이 요구됨.
  - 태국 왕립관개청(RID)의 경우 한국 농어촌공사(KRC)와 협력 관계를 이미 구축한 상태이기 때문에, 태국 연구 사업의 최종 협력 기관으로 key coordinating agency에 대한 의지를 더 적극적으로 표명한 DOA가 선정되었음.

### 1.3 미래 유사 연구사업 착수를 위한 제안

필요한 자료를 확보하고 협력하는 것뿐만 아니라 더욱 실질적으로 연구 사업을 계획하고 지속 가능한 결과물을 도출할 수 있기 위해서는 지역의 필요를 바탕으로 한 연구사업 발굴이 필수적이다. 본 연구 사업의 계획 수요자 중심이 아니라 공급자 중심이 되어 지역

협력 기관들의 필요를 충분히 반영하지 못했고 그로 인해 그들로부터 충분한 지원을 받지 못하는 한계에 봉착했다. APCC 내부적으로 연구사업 발굴에 충분한 시간과 자원을 지원 받지 못하는 현재의 시스템 안에서는 비슷한 문제가 계속적으로 발생할 가능성이 높다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 다음과 같은 제안들 제시하는 바이다:

- 적절한 연구 사업의 주제와 목적에 따른 이해 당사자, 수혜자, 잠재 협력(목표) 기관 조사 및 발굴:
  - 연구사업 대상 지역에 대한 사전 지식 또는 경험이 있는 기관으로부터 도움을 받는 것도 바람직함.
- 협력(목표) 기관과의 연락망 구축을 통해 고위 관리자와의 미팅을 요청하고 고위 관리자로부터 미팅 개최 및 참석에 대해 수락 받기:
  - 고위 관리로부터 협력에 대한 관심을 표명하는 서신을 받은 후 미팅 개최를 제안함.
- 고위 관리자와 introductory 미팅:
  - 연구 사업에 대한 설명에 앞서 APCC를 소개하고 서로의 관심과 필요를 충분히 나누는 것이 더 중요함.
  - 서로의 합의가 이루어진 후에 필요한 자료를 확인하고 연구사업 수행을 위한 자료(정보)지원 등과 관련 한 행정 절차(예, 실무자 선정 등)를 논의해야 함.
- 지역과 협력(목표) 기관의 필요를 기반으로 하는 연구사업을 함께 발전시키기:
  - 협력 기관과 주변 기관들과의 관계에 대한 정보 수집이 가능하다면 수집하여 협력 기관들과의 관계에도 주의를 기울이는 것이 중요함.
  - 또한, 기관 간의 갈등을 피하기 위해 협력 기관을 확실히 결정하고, 각자(APCC와 협력 기관 간)의 역할을 분명히 할 필요가 있음.
  - 또한, 기억하기 쉬운 연구사업명(두음문자, acronym 등)을 만드는 것을 권장함.

- 실무자와의 긴밀한 관계 구축:

- 협력 기관의 실무자의 적극적인 관심과 참여를 유도하여 필요한 자료를 확보하는 것이 매우 중요함.

### 1.3.1 수행 내용 및 일정

주요 수행 내용	수행 기간	착수 전 필요 (준비) 시간
연구 사업의 주요 주제와 목표를 결정(범위 설정)하고 대상 국가 및 잠재 협력(목표) 기관에 대한 사전 조사	2 months	8 - 6 months
잠재 협력 기관과의 초기 연락	6 weeks	7 - 6 months
협력 기관의 고위 관리자와 초기 미팅	-	6 months
실무 관계자, focal point와 데이터 나눔, 연구사업 디자인 및 개발에 관한 두 번째 미팅	4 months	6 - 2 months
협력 기관의 최종 수락	2-6 months	6 - 1 months
연구사업 착수	-	0 months

- 특히, 미팅 제안은 6주 전에, 최소 4주 전에 요청하는 것을 권장

- MOU를 협의하고 체결하는데 3~6 개월(최대 1년) 소요되기 때문에, 이를 위한 충분한 시간과 조사가 필요

### 1.3.2 APCC 내의 구조적 장애와 극복

APCC의 내부적인 구조와 연구비(펀딩) 분배 등의 제약으로 인해 다음과 같은 장애가 존재하고 있다.

- 1) 프로젝트 기획 단계에서 국외 출장이 제한되어 대상국/대상 기관의 필요에 대한 정보를 사전에 충분히 수집할 수 없음.
- 2) 프로젝트를 개발하는데 충분한 시간이 주어지지 않음.

이러한 상황에서 연구사업 제안서를 준비할 때 다음과 같은 요소들을 주의 깊게 다루어야 한다.

- 연구사업 배경과 정당성(예, 기초적 과학적 혹은 연구적 요소보다는 사회 경제적, 즉 연구사업 결과로 취할 수 있는 문화적 혹은 사회 과학적 영향 등에 초점을 맞추는 것이 필요)
- 구체적인 연구 사업의 목표(goals)와 전략적 목적들(objectives)
- 연구 사업의 세부 수행 내용 및 일정, 특히 구체적인 road map 제시
- 잠재 및 실제 협력 기관 및 수혜자에 대한 명시
- 연구 사업의 관리 및 지속 가능성(예, 후속 연구사업 확대 및 예산(펀딩) 확보 등)
- 연구 사업의 평가 방안

## 2. APCC Cli-WARA 연구 사업을 통해 바라본 융합 연구

본 연구는 기후, 위성, 가뭄, 농업, 수자원의 전문가들이 모여 구성된 다학제간 연구로서 각각의 학제와 학제 상호간의 연관성이 복잡하게 구성되어 있다. 이러한 다학제간 융합 연구를 수행하면서 연구의 효율성을 높이고 더 나은 결과물을 산출하기 위해서는 서로의 분야에 대한 이해가 필수적이며 원활한 의견 교환 및 토의 또한 중요하게 여겨진다. 이러한 관점에서 Cli-WARA 연구 사업팀은 융합 연구를 촉진 시키기 위해 두 가지 방법을 고안했는데 첫째, 여러 차례의 정기 미팅을 통한 원활한 의사 소통 및 의견 교환과 둘째, 세미나 학습을 통한 서로의 분야에 대한 이해도 향상이다. 이러한 노력들이 융합 연구 수행에 어떻게 영향을 주었는지에 관한 설문조사 결과와 수행 교훈 등을 기술했다.

### 2.1 정기적인 행정 및 연구 미팅의 분리 및 활성화

연구 책임자의 주관으로 3주마다 정기 미팅을 수행했으며 미팅에서 논의된 사항들은 다음과 같다.

- 1) 프로젝트 진행 상황 점검,
- 2) 자료에 대한 논의(확보 여부, 자료의 질, 모형 입출력 자료 등),

- 3) 구성원간의 논의가 필요한 부분에 대한 상의(예, 외부 자문 필요 여부 등),
- 4) 연구 수행 중 발견된 문제점과 해결 방안 등에 대한 토의,
- 5) 연구 결과 공유 등

정기 미팅은 일반적으로 2시간 정도 소요되었는데, 행정뿐만 아니라 연구 내용까지 논의되었기 때문에 늘 시간이 부족했다. 그래서, 프로젝트의 행정적인 일이 아닌 세부적인 연구 내용, 특히 모든 구성원이 아니라 일부 구성원만이 관련된 주제가 논의 될 경우에는 이해 당사자들만 별도로 미팅을 갖는 것이 효율적으로 여겨진다.

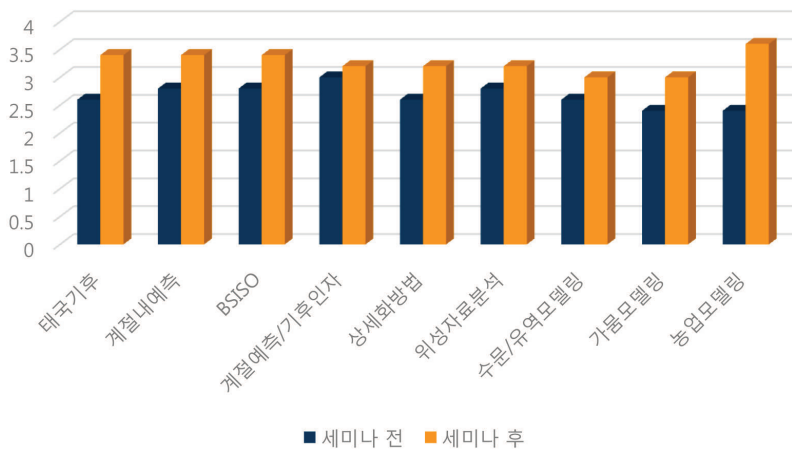
## 2.2 세미나 학습을 통한 분야간 이해도 향상

아래 표는 구성원들의 전문 분야를 소개하고 융합 연구의 가능성을 토론하기 위한 세미나의 개최 날짜와 주제를 보여준다. 처음 7개의 세미나는 각 구성원의 전문 분야에 초점이 맞춰져 있고, 마지막 2개의 세미나는 본 프로젝트의 결과물을 공유하는데 초점이 맞춰져 있다. 즉, 이 연구 사업에서 상반기에는 각 분야에 대한 이해에 초점이 맞춰져 있었다면, 하반기에는 두 개 혹은 세 개 이상의 분야가 결합되었을 때의 결과 공유를 통해 어떻게 결합할 것인가에 대해 초점을 맞췄다. 그러나 본 연구 사업의 궁극적인 목표인 융합 연구를 위해 각각의 전문 분야를 이해하고, 융합 연구를 구체적으로 계획하고 수행하기에는 2017년의 1년이라는 시간이 매우 부족했다.

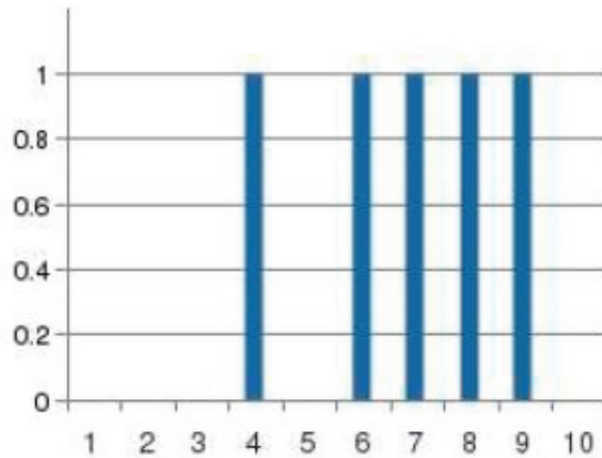
Date	Seminar Speaker	Title	비고
2/3	음형일	Statistical downscaling	연구사업 상반기
2/20	명복순	Climate and its variability in Thailand, relations with ITCZ, ENSO, IOD, & SOI indices	
3/16	오지현	계절내 진동이 태국에 미치는 영향 및 예측성의 이해	
5/22	정유란	Agriculture: Crop Model Simulation	
5/29	박경원	위성강우 자료 처리 및 검증	
6/5	이진영	장기후예측과 위성자료를 이용한 미계측 지역의 기상학적 기온예측: For the Northeastern Climate Zone of Thailand	
6/5	조재필	Utilization of Multi-range Climate Information for Risk Assessment on Agriculture-Water Resources in Thailand	
9/22	명복순	상세화 과정에서 강수 예측력이 현저히 떨어지는 6월 강수의 통계모델 개발	연구사업 하반기
10/13	정유란	상세화 계절기후 예측정보를 이용한 벼 수확량 예측력 테스트	

세미나 학습을 통한 분야간 이해도 증진에 대한 설문 결과는 아래와 같다. 9개 분야의 이해도에 대한 답변으로 매우 부족함, 부족함, 평균, 평균 이상의 네 가지가 단계가 있었고 그에 따른 점수를 각 1점, 2점, 3점, 4점을 부여하였다. 그런 다음 응답자들의 답변의 평균 점수를 4점 만점으로 표시하고 세미나 전 후로 계산하였다.

세미나 전 후 이해도 변화



위의 막대 그래프에서 나타나듯이 융합 세미나를 통해 타 분야에 대한 이해도가 전반적으로 증가하였음을 확인할 수 있다. 특히 태국 기후, 계절내 예측, BSISO에 대한 이해도의 향상이 눈에 띄는 반면 계절예측/기후인자에 대한 이해도의 향상은 높지 않았는데 이는 기존에 구성원들의 계절예측/기후인자에 대한 이해도가 기본적으로 높았기 때문이라 사료된다. 응용 분야에서는 상세화 방법과 가뭄모델링, 농업모델링의 이해도 향상이 두드러졌다. 특히, 상반기 내부 세미나 만족도는 아래 표에서 보이는 바와 같이 대부분의 구성원들이 평균 이상(5점 이상)의 만족도를 보였다.



이러한 타분야에 대한 지식 습득은,

- 1) 자신의 연구 분야의 방향 설정에 도움
- 2) 응용 모델 입출력 자료의 다변화 및 각각의 변수(예, 모델의 입력 기후변수 혹은 모델 구동 후 출력 변수들)의 특성 파악에 도움
- 3) 모델 구동과 예측력 평가 방법 및 이해에 도움

등의 효과를 가져온 것으로 보인다.

한편 이러한 세미나 학습이 기초 지식이 부족한 분야로의 입문에는 도움이 되었지만 실질적인 융합 연구의 발전으로 나아가기까지는 충분하지 않다는 지적이 있었다. 실질적으로 약 2시간의 세미나는 각 분야에 대한 전반적 지식을 습득하는데 도움은 되었지만, 습득된 타 분야에 대한 지식과 본인의 전문 분야를 결합하여 만들어낼 수 있는 새로운 차원의 것들을 같이 고민하고 만들어 내기에는 부족하였다. 하지만 이러한 노력들이 점차 쌓여감으로써 차후 향상된 결과를 얻을 수 있으리라 짐작된다.

## 2.3 수행 교훈

### 1) 미팅 시간 및 의사 소통의 부족

팀원들 개별 일정 때문에 미팅 및 세미나 날짜를 잡기가 쉽지 않았다. 미팅이 성사

되더라도 늘 시간이 부족하였는데, 전체적인 회의 안건뿐 아니라 몇몇의 관련자들간의 논의가 필요한 사항들도 종종 함께 논의되었기 때문이다.

세미나 시간에 대해 위에서도 언급했듯이 상반기 세미나는 각자의 분야에 대한 소개에 집중이 되었는데 시간적 여유가 된다면 각 분야별로 2~3번의 추가 세미나를 통해 실질적인 융합 연구에의 모색까지 나아갈 수 있다면 좋을 것으로 생각된다.

## 2) 자료 입수 지연

연구 대상지역, 특히 램타콩에 대한 기본 자료가 수집되지 않은 상황에서 본 연구 사업이 시작되었는데 자료의 수집이 원활하지 않았다. 가장 필수적인 태국 기상 자료 조차도 연구사업 착수 후, 4개월만인 4월 말에서야 확보할 수 있었다. 그 계기도 팀원 중 일부가 타 프로젝트(한아세안 프로젝트)와 관련하여 태국 기상청을 방문했을 때 인편으로 기후 자료를 확보 할 수 있었다. 그나마 확보한 기후 자료도 연구 사업에 필수적인 2013년 이후의 기후 자료의 결측과 에러가 많아 쓰기 곤란한 상태였고, 이메일을 통해 태국 기상청(TMD)에 자료 결측에 대한 질문을 해도 답신이 오지 않았다. 그 외의 농업 및 수문 관련 자료는 MOU가 체결되지 않아 아직 확보되지 못한 상태이다. 앞서 1.3에서 언급한 바와 같이, 차후 연구사업 개발 시 자료 확보를 우선적으로 고려해야 하며, 자료 확보 실패를 대비한 대처 방안 마련도 필요하다는 교훈을 준다.

## 3) 자료 공유 및 생산

컨텐츠 측면에서 융합을 고민하기에 앞서 기본적으로 자료를 공유하고 생산하는데 많은 시간과 노력이 필요했다. 융합 연구는 두 분야 이상의 전문가들이 만나서 협업을 통해 새로운 창조물을 만들어 가는 과정이겠지만, 이를 위해서 필요한 절차들(자료 공유 및 생산에 대한 각 분야간 이해)이 우선적으로 수행되어야 한다. 즉, 원본 자료의 기본 검증과 각 분야에서 어떻게 정리하고 가공할 것인지에 대한 논의뿐만 아니라 두 분야의 모형 구동, 혹은 분석(또는 가공) 후의 정보를 다시 입력자료로 이용할 경우 그에 대한 서로의 충분한 이해와 논의 등이 선행되어야 했다. 이러한 과정도 융합 연구의 요소로 이해할 수 있기 때문에 충분한 시간을 가지고 협업하는 여유도 필요할 것으로 보인다.

## 2.4 융합 연구사업 성과를 증진시키기 위한 제안

- 1) 여러 분야의 융합이 한꺼번에 이루어진 대형 융합 연구 사업인 만큼 예상치 못했던 문제들로 인해 많은 시행착오를 겪었다. 이를 해결하기 위해서는 상호 관련성이 높은 분야들부터(예, 농업과 계절 및 계절내 예측, 수자원과 계절 예측, 농업 수자원과 가뭄, 농업과 수문 등) 우선적으로 융합되면서 더 큰 규모로 발전시키켜 나가는 것이 좋을 듯하다.
- 2) 충분한 준비 시간을 가지고 프로젝트를 계획하고 수행해야 한다. 자료도 확보되지 않고 태국의 협력 기관도 선정되지 않은 상태에서 프로젝트를 추진하여 부담감과 피로감이 높았다. 따라서, 프로젝트 개발 및 준비 기간 동안 수요자의 필요를 면밀히 조사하고 반영하여 만족도가 높고 지속성이 있는 결과물을 생산해 내야 할 것이다.
- 3) 연구 사업의 원활한 진행을 위한 적시 적절한 협조와 지원이 필요하다는 결론과 교훈을 얻었다. 본 연구사업처럼 대형 과제에 속하는 사업에서는 사전에 정해진 참여율에 실제 상응하는 정도의 시간을 프로젝트 업무에 할애하는 등의 구성원들의 적극적인 노력과 협조가 뒷받침된다면 효율적인 프로젝트의 수행이 가능할 것이다. 특히 사업 단계별 수행 목표와 이에 따른 Timeline이 촘촘하게 서로 얽혀 있는 상황에서 특정 한 부분의 임무 완수가 지연될 경우, 다음 단계의 원활한 수행에 문제가 초래될 수 있음을 경험하였다. 이러한 상황을 방지하기 위해서는 센터 차원의 지원(예를 들면, 다른 과제로 인한 과도한 업무 분장 조정)과 사업 착수 전 구성원들간의 논의를 통한 대책 마련이 필수적일 것으로 생각된다.
- 4) 세미나 준비시 청취자의 필요를 고려하여 효율을 높일 수 있다. 실례로 본 연구과제 수행 중 세미나 준비 시 어떤 주제에 관해 궁금한 점이나 알고 싶은 점을 미리 조사하여 그에 따라 세미나 강연자가 준비할 수 있도록 구성하였다. 이러한 노력들은 구성원들이 세미나 시간 중에 융합을 더 깊이 고민해 볼 수 있는 기회를 제공하며 세미나의 효율을 높일 수 있다.

## 【연구자】

정유란 선임연구원

명복순 선임연구원

오지현 선임연구원

이진영 선임연구원

조재필 선임연구원

박경원 선임연구원

연구보고서 2017-14

## 다중범위 기후정보를 활용한 태국의 농업-수자원 리스크 평가 (I)

I S B N 979-11-5698-204-3

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.