

기후정보 Tailoring 기술의 활용 방안 연구 (분야별 기후정보 활용 프레임워크 개발)

유태우, 신용희 융합기술팀

김광형 예측기술팀

발간사

최근 발표된 IPCC 특별 보고서에 따르면 기후변화에 의해 전지구적으로 기온과 수온의 상승이 가속화되고 있으며, 농업 및 생태 분야의 막대한 피해가 예상되고 있습니다. 또한 엘니뇨 등 기상이변에 의해 폭염 피해가 잦아지면서, 국가적으로도 단~장기 기후예측 자료를 활용하여 농수산업 및 생태 분야의 미래를 예측하고, 피해를 저감하고자 하는 시도가 지속되고 있습니다. 그러나, 기후자료 특성에 대한 이해 부족, 사용 목적에 따른 가공과 사용의 불편함 등으로 인해 실제 사용에는 어려움이 따릅니다.

APCC는 선도적인 기후 예측 자료의 생성과 활용 전문 기관으로서 예측의 신뢰성 향상 및 응용 분야의 활용성 촉진을 위해 노력해 왔습니다. 이 연구보고서 “기후 정보 Tailoring 기술의 활용 방안 연구”에서는 기후변화와 이상기후에 따라 이슈가 되고 있는 농업과 생태 분야에서 기후예측 자료가 사용된 문헌을 수집하여, 분야별로 기후자료가 어떤 형태로 사용되는지를 분석하였으며, APCC가 축적해온 기후예측 자료의 활용성을 극대화할 수 있는 가이드라인을 제시하고자 하였습니다. 기후변화로 야기되는 사회적 문제를 대비하기 위해서는 여러 분야의 체계적이고 융복합적인 접근이 필요합니다. 이를 위해 기후 예측 모델의 성능 개선, 지역별로 예측력이 좋은 기후자료의 선별, 기후자료 및 응용 예측 모델의 불확실성에 대한 고려, 적용 연구에 대한 체계적인 적용, 사용자의 접근성 개선 등이 필요할 것으로 사료됩니다.

이 연구보고서의 발간을 위해 수고하신 분들에게 감사드립니다. 심사위원으로서 보고서의 수준을 제고하도록 좋은 논평을 해주신 부경대학교 김백민 교수와

POSTECH 국종성 교수께 감사드립니다. 이 연구를 총괄하고 집필한 유태우, 신용희, 김광형 박사에게도 감사의 뜻을 전합니다. 이 연구를 바탕으로 향후 연구를 진행함에 있어 기후자료를 효율적으로 활용하고, 효과를 극대화할 수 있기를 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

Increases in air and water temperature are expected to occur globally due to climate change, and weather conditions such as heat and cold waves are increasing. Therefore, studies have been actively conducted to improve the results of agricultural and fisheries productivity and to model and predict biological distributions using short and long-term weather forecast data. However, it is not easy to carry out such research because of a lack of understanding of the characteristics and types of original or tailored climatic data and difficulties in data collection and processing according to its intended use. In this study, we collected literature that used climate prediction data for agricultural and ecological research and analyzed the usage, characteristics, and trends of climate data needed for each sector to create guidelines for the climate forecast data accumulated by and available from the APEC Climate Center. From the agricultural sector, 306 scientific studies were qualitatively analyzed for their use of climate and crop models and data processing methods used to predict crop yields. From the ecological sector, 1,160 documents were qualitatively analyzed for patterns regarding the use of marine ecology, aquaculture, and forest use data. To broaden the availability of climate data, it may be necessary to select specific climate datasets that have the best prediction power for specific regions, a low uncertainty, and are highly correlated with the survival of living organisms.

목 차

1. INTRODUCTION -----	1
2. DATA AND METHODOLOGY -----	3
2.1 검색 키워드 선정 -----	3
2.2 문헌 수집 및 분석 -----	5
3. RESEARCH RESULTS -----	7
3.1 기후자료 상세화 기법 -----	7
3.1.1 기후자료 상세화 관련 순차적 의사결정 -----	8
3.1.2 농업분야 상세화 기법 문헌 조사 -----	11
3.2 농업 분야 기후자료 활용 -----	12
3.3 생태 분야 기후자료 활용 -----	20
4. CONCLUDING REMARKS -----	33
■ REFERENCES -----	36
■ Appendix -----	40

1. INTRODUCTION

산업의 발전과 더불어 진행되고 있는 지구 온난화 현상에 따른 전세계 기후변화의 영향으로 농수산업 및 환경 분야에 있어서 많은 지역에서 미래 심각한 피해가 발생할 것으로 예상되고 있다. 농업분야에서는 모델링을 통해 미래 작물 생육 및 수확량을 전망하는 연구가 진행되고 있는데 다양한 형태의 예측 기상자료는 작물모형의 중요한 입력자료로 이용된다. 지금까지 경험해 보지 못한 기후조건 아래서 작물의 수확량이 어떻게 변화될 것인지에 대한 관심을 해결하기 위해 기후예측 모형과 과정 기반의 작물모형이 이용되고 있으며 이것을 바탕으로 기후변화 또는 이상기후 현상으로 인해 발생하는 피해를 최소화 하기 위한 다양한 적응 대책 수립에 대한 연구가 진행되고 있다. 나아가 예측 계절 기상자료 및 작물 예측 시스템은 기후변화에 대한 적응 수단을 제공하는데 기여할 수 있을 것이다. Challinor(2009)는 예측 모형을 이용해 적응 대책을 수립하기 위해서는 1) 적응 대책에 대한 예측의 타당성 2) 예측의 신뢰성 3) 적응 연구에 대한 전체적인 시스템 접근 방식 4) 이해 관계자의 참여 및 예측자료에 대한 접근성 5) 예측의 정확성 등에 대한 고려가 필요하다고 주장했다. 영농 규모가 큰 농업인 또는 영농법인에서는 작물의 파종 및 시비, 병해충 방제, 수확 시기와 같은 장기간에 걸친 영농활동에 대한 판단을 결정하는데 있어 계절 기상자료와 같은 장기 예측정보의 사용을 기대하고 있지만 아직 계절 예측 기술과 그 활용 방법에 대한 이해가 부족한 실정이다. 몇몇 농업 생산자 및 관련 산업 종사자들은 작물 및 관련 제품을 생산하는 과정에서 의사결정을 지원하는 방안으로 기후예측 정보에 대해 관심을 보여왔다. 하지만 예측정보를 활용한 의사결정 과정에서 일부 부정적인 효과를 경험한 생산자는 계절 기후 예측정보에 회의적인 반응을 보였다 (Frisvold and Murugesan 2012). 계절 기후 예측자료의 정확도가 높아지고 보다 상세한 정보가 제공된다면 농업 생산자 및 관련 산업 종사자들은 좀 더 적극적으로 계절 기후 예측자료의 활용에 대해 고민하게 될 것이다. 계절 기후 예측자료가 가지는 공간 스케일 또는 시간 스케일에 대한 한계성으로 인해 농업분야에 직접적인 이용보다 시·공간 상세화 방법을 통한 사용자 맞춤형 자료 생산을 위한 다양한 연구방법과 기술개발이 추진되고 있으며 최근 학제 간 연구를 통해 계절 기후 예측정보의 가치를 높이기 위한 농업인 의사 결정 시스템 개발과 함께 사회 과학과 기후 과학을 통합해 나가는 노력이 시도되고 있다

(Klemm and McPherson 2017).

생태계 또한 이상 기후 및 기후 변화에 의해 심각한 영향을 받고 있다. 호주의 경우 2016년 폭염에 의해 Great Barrier Reef 지역의 산호초의 mass bleaching(대규모 백화현상)이 발생하였으며, 백년 정도의 오래된 산호마저 폐사되었음이 보고되었다(Hughes et al. 2017). 가장 빠르게 서식지에 정착하고 자라는 산호 종의 경우에도 또 다른 환경 재해가 없다고 가정할 경우에도 복구까지 최소 15년 이상 걸릴 것으로 예상된다(Hughes et al. 2017). 또한 기후변화로 인해 장기적으로 해양 및 육상 생물의 개별 종들이 진화되어온 생존에 최적화된 온도 등의 환경 조건을 가진 다른 서식지로의 이동이 예상되었다(Poloczkanska et al. 2013; Molinos et al. 2016). RCP4.5와 RCP8.5의 기후변화 시나리오 모두에서 서태평양의 아시아 국가들의 수산자원의 이동이나 양의 변화 등으로 인해 막대한 피해가 예상되었다(Molinos et al. 2016). 올해 8월에 벌어진 영국과 프랑스 간의 scallop 분쟁(scallop이 수온에 따라 이동함에 따라 영국 어선들이 프랑스 해역을 침입하여 프랑스 어선과 분쟁이 벌어진 사건)이 앞으로도 아시아태평양 국가들 간에 빈번해질 것으로 예상된다.

기후변화로 인해 야기되는 각종 환경 및 사회적 문제들을 예측하고 대비하기 위해, 여러 분야의 과학적, 체계적 접근이 필요하나, 타 분야에 대한 이해와 가이드라인의 부족 등으로 인해 연구의 시작조차 쉽지 않다. 기후 자료를 이용한 농업/생태 분야의 연구에서 많은 경우, 기후예측 자료의 불확실성이나 기후예측 모델별 특징에 대한 고려나 언급이 없이 1~2개의 소수 기후모델의 예측 결과만으로 연구가 이루어져 불완전한 해석이 이루어지고, 결과의 신빙성의 의심된다. 타 분야와의 효율적인 융합 연구를 위해서는 기후 자료의 규모, 자료 처리, 모델링의 태생적인 불확실성, 타 분야 연구 방법론과의 연결 등이 쉽지 않은 점이 우선적으로 고려되어야 한다. 본 연구에서는 기후, 농업, 생태 세 분야 별로 기후자료들이 어떤 식으로 가공되고 이용되는지를 조사하고자 하였다. 이러한 조사 결과를 이용해 향후 APCC에서 생성되는 기후 자료들을 어떻게 가공하여 공개할지, 융복합 연구에 어떤 식으로 이용할지에 대한 가이드라인을 제공하고자 하였다.

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1 검색 키워드 선정

대표적인 온라인 문헌 검색 엔진인 Google Scholar를 이용하여 기후-응용 분야 연구 논문을 추출하였다. 농업분야에서는 Google Scholar 학술 문헌 검색 도구에 "climate change", "seasonal forecast", "agriculture", "yield", "impact", "adaptation", "downscaling"의 총 7개 검색 키워드를 이용해 문헌을 검색하였고 총 322개의 문헌이 검색 되었다. 그 중에서 16개 문헌에 대해 중복이 확인되어 이를 제거하였고 결과적으로 총 306개 문헌이 분석 작업에 활용되었다. 키워드의 선정은 농업분야에 있어 가장 큰 이슈인 "climate change"와 최근 응용분야에서 새롭게 주목을 받고 있는 "seasonal forecast"에 대해 이루어졌으며 글로벌 식량안보의 중요성을 고려해 작물 수확량(yield)에 대한 기후변화 영향(impact) 및 적응(adaptation) 그리고 지역규모 연구를 위한 시공간 상세화(downscaling)에 대해 선정하였다. Google Scholar 검색 도구에 "climate change" 만으로 검색을 한 결과 약 2,290,000개의 대량의 문헌이 검색되었고 "seasonal forecast" 만으로 검색을 한 결과 약 10,400개의 문헌이 검색되어 최근 학술 연구에서 기후변화에 대한 관심도가 얼마나 큰가에 대해 확인 할 수 있었다. 표 1은 Google Scholar 검색 도구에 이용된 7개 검색 키워드를 "climate change"부터 순차적으로 한 개씩 늘려나갔을 때 검색되는 문헌의 개수를 나타낸다. 최근 농업분야 연구에 있어 가장 큰 이슈는 첫 번째 키워드인 "climate change"이며 점차 아열대 기후대로 변해가는 한반도에서 지속적인 농업생산성을 유지해 나가기 위해 그 만큼 관련 연구를 적극적으로 추진해 나가야 할 것이다. 두 번째 키워드인 "seasonal forecast"는 기후변화로 인해 그 발생빈도와 강도가 점차 세지고 있는 이상기후 현상에 대해 농업분야의 관심이 점차 증가하고 있는 상황에서 중장기 계절 기후 예측정보의 중요성을 고려해 선정했다. 본 보고서에서는 APCC에서 매월 생산 제공되고 있는 계절 기후 예측정보에 대한 활용성 확대를 목적으로 세계 각지에서 농업 생산성 분야에 활용되고 있는 계절 기후 예측정보에 대한 정성적 분석실시를 위해 121편의 Journal paper 중에서 계절 기후 예측정보와 관련된 논문을 추출하였다. 계절 기후 예측정보를 활용한 농업 생산성 관련 논

문은 121편 중 23편 이었으며 그 중에서도 실제 계절 기후 예측자료 및 작물모형을 이용해 작물 수확량 예측에 관해 기술된 논문은 17편이었다.

표 1. (농업 분야) Google Scholar를 통해 검색된 keyword 별 문헌의 개수 분석 결과

Search words	Number of literatures
climate change	2,290,000
climate change, seasonal forecast	5,500
climate change, seasonal forecast, agriculture	2,520
climate change, seasonal forecast, agriculture, yield	1,310
climate change, seasonal forecast, agriculture, yield, impact	1,230
climate change, seasonal forecast, agriculture, yield, impact, adaptation	843
climate change, seasonal forecast, agriculture, yield, impact, adaptation, downscaling	322

생태 분야의 경우 다양한 시간 규모의 기후 데이터를 포함하기 위해 ‘seasonal’, ‘decadal’, ‘climate change’ 중 하나의 키워드가 제목에 들어가도록 하였다. 넓은 분야의 생태 연구를 조사하기 위해 ‘ecosystem’이 본문에 들어가는 문헌을 조사하였으나, 수만~수십만 개의 문헌이 검색되어, 기후변화 때문에 야기되는 주요 이슈인 ‘aquaculture’, ‘species distribution’, ‘invasion’ 중 하나가 추가적으로 반드시 본문에 들어가도록 하였다(Bell et al. 2011; Poloczanska et al. 2013; Molinos et al. 2016). 또한 일반적인 생태 연구의 경우 수km² 단위 해상도의 기후데이터가 필요하기 때문에 본문에 ‘downscaling’ 기술에 대한 언급이 있는 문헌만을 대상으로 하고자 하였다. 검색되는 문헌 개수가 많을 경우, Google에 의해 로봇으로 인식되어 결과를 받아올 수 있는 문제가 있고, 또한 결과 분석의 효율성을 위해 키워드 조합당 400개 이하의 문헌만이 검색되도록 하였다. 이 결과 총 1,482개의 중복되지 않은 문헌이 검색되었다(표 2).

표 2. 생태 분야의 선정된 키워드 조합과 검색된 문헌 개수

Title에 필수 포함	본문 포함 키워드	검색된 논문 개수
climate change	prediction, ecosystem, downscaling, species distribution	365
climate change	prediction, ecosystem, downscaling, invasion	194
climate change	forecast, ecosystem, downscaling, species distribution	277
climate change	forecast, ecosystem, downscaling, invasion	198
climate change	prediction, aquaculture, downscaling	280
climate change	forecast, aquaculture, downscaling	229
seasonal forecast	ecosystem, downscaling	4
seasonal prediction	ecosystem, downscaling	15
seasonal forecast	aquaculture, downscaling	1
seasonal prediction	aquaculture, downscaling	0
decadal	forecast, ecosystem, downscaling	28
decadal	prediction, ecosystem, downscaling	48
decadal	forecast, aquaculture, downscaling	5
decadal	prediction, aquaculture, downscaling	9

2.2 문헌 수집 및 분석

위의 키워드들의 조합을 통해 검색된 논문들을 RCurl(Lang 2007)과 XML(Lang and Team 2012)의 두 R 패키지를 이용하여 제목, 연도 등의 데이터를 다운로드 받았다. 1,482개의 문헌 중 중복이 제거된 1,160개의 논문의 제목과 wordcloud R 패키지(Fellows 2012)를 이용해 분야별 word cloud 및 단어별 빈도수 그래프를 만들었다(그림 7, 8). Word cloud의 경우, 5번 이상 검출된 단어만을 사용하였다. 문헌의 편찬 연도 정보를 이용해 연도별 문헌 개수의 히스토그램 또한 생성되었다(그림 8).

개별 문헌을 분석해 access가 불가능하거나, 논문이 아닌 책 등의 문헌이거나, 리뷰 논문이거나, 비슷한 내용의 논문인 경우를 제외하고, 남은 논문들로부터 사용된 기후 정보와 생물의 종류 등을 추출하였다(그림 1, 표 5, 표 6). 또한 작물모형을 이용한 농업분야 기후변화 영향평가와 연관된 키워드에서 선택된 101개 문헌에서 사용된 상세화 기법을 분석하여 그래프로 나타내었다(그림 1).

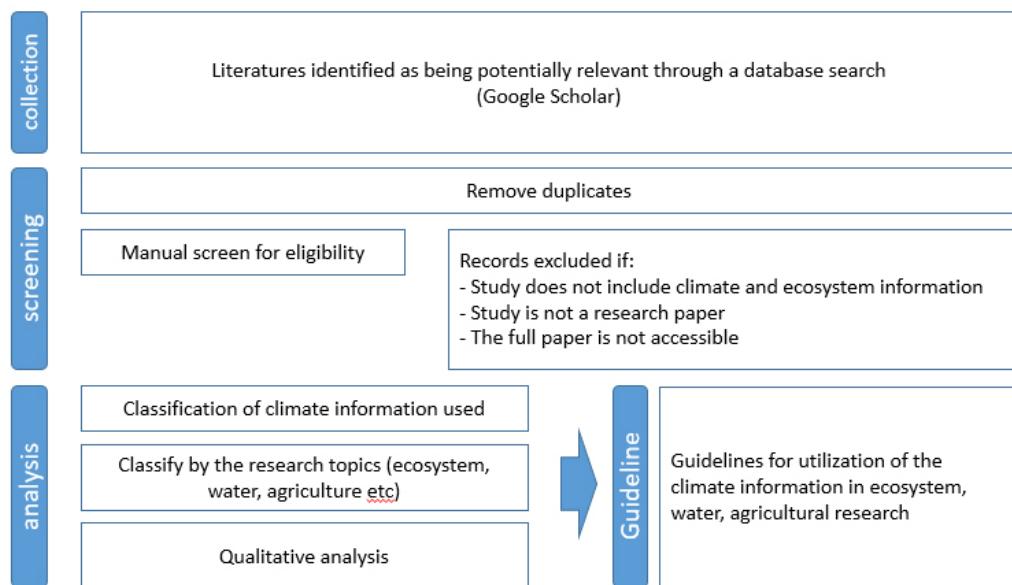


그림 1. 기후 정보 활용 가이드라인 작성을 위한 문헌 검색 및 정보 추출 과정.

3. RESEARCH RESULTS

3.1 기후자료 상세화 기법

기후변화 영향평가 및 적응전략 수립을 위해서는 배출시나리오들을 기반으로 전지구기후모델(Global Climate Model, GCM)이 생산한 수많은 변수들(바람, 기온, 습도, 일사량 등 시나리오에 의해 발생하는 다양한 기상 변수)을 입력값으로 각 분야별 영향모델(작물모델, 생태모델, 수자원모델 등)을 구동한 결과값을 활용하는 것이 가능하다. 하지만 배출(emission) 시나리오별로 GCM에서 생산된 많은 기후전망 자료들은 기후변화에 대한 정보를 제공하나 시간적 해상도(temporal resolution)(월단위)나 공간적 해상도(spatial resolution)(100km~350km)가 매우 커서 이를 지역이나 필드단위로 적용해야 하는 생태시스템 또는 농업, 수자원과 같은 응용분야에 직접적으로 적용하기에는 시공간적 해상도 불일치에 따른 결과의 신뢰도가 떨어지는 어려움이 있다. 따라서 GCM이 제공하는 다양한 기후정보들을 최종 수요자가 원하는 시공간적 해상도에 맞추기 위해서는 이를 상세화(downscaling)하는 단계가 필요하다. 상세화 기법은 크게 역학적 상세화와 통계적 상세화로 나눌 수가 있는데, 각 상세화 기법에 대한 설명은 Appendix I을 참고하면 된다.

그림 2와 같이 기후자료를 상세화하여 각 영향모델에 사용하는 일련의 과정에서는 사용자에게 모두 3단계의 의사결정을 요구한다. 첫 번째 의사결정 단계(Decision Point I)에서는 GCM 기후자료를 그대로 사용할 지, 상세화 단계를 거칠지에 대한 의사결정을 요구한다. 일단 상세화가 결정되고 나면 두 번째 의사결정 단계(Decision Point II)에 이르는데, 여기서는 사용자의 연구주제, 영향모델이 필요로 하는 기후자료의 공간적 규모와 필요로 하는 기후변수, 상세화를 위한 전산이나 기술 역량 등을 바탕으로 역학적 또는 통계적 상세화 기법을 선택하기를 요구한다. 일단 통계적 상세화가 결정되고 난 후 세 번째 의사결정 단계(Decision Point III)에서는 또다시 사용자의 연구주제, 영향모델이 필요로 하는 기후자료의 시공간적 규모와 필요로 하는 기후변수, 상세화를 위한 기술 역량 등을 바탕으로 적합한 통계적 상세화 기법을 선택하게 된다. 본 연구에서는 아래와 같이 각각의 의사결정 단계에서 사용자의 의사결정을 돕기 위해 고려해야 할 사항들을 순차적으로 짚어 보았다.

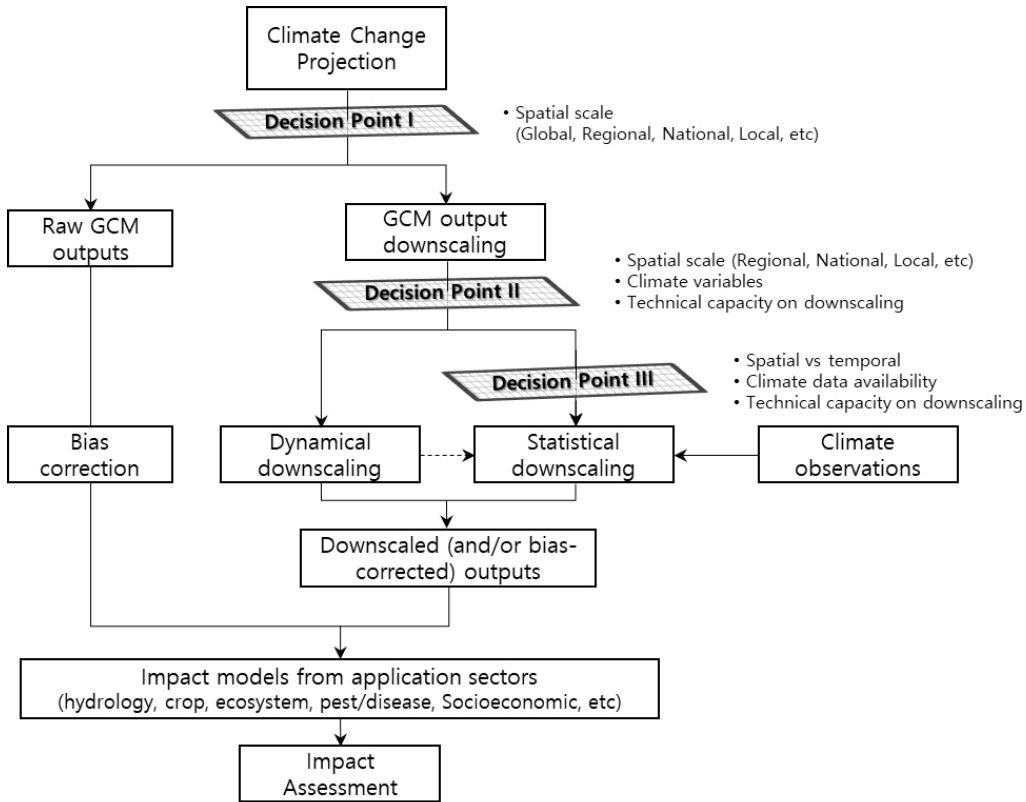


그림 2. 기후변화 영향평가 연구에서 다양한 상세화 기법을 활용해 기후 시나리오 자료를 이용하는 연구 방법의 흐름

3.1.1 기후자료 상세화 관련 순차적 의사결정

(1) Decision Point I

사용자의 연구주제를 바탕으로 GCM 기후자료가 가지고 있는 공간적 규모를 그대로 사용할 지 아니면 좀더 상세화된 기후자료를 생산하기 위해 상세화 단계를 거칠 지에 대한 의사결정이 필요하다. 이 때 사용자들은 다음과 같은 사항들을 고려할 필요가 있다.

- 기후자료의 상세화를 통해 사용자의 연구주제에 부가 가치(added value)가 더해질 수 있는지를 고려해야 한다. 예를 들어, 상세화를 통해 대상 지형상의 기후 특성을 최대한 반영할 수 있는 상세화된 기후자료를 얻는 것이 가능하지만, 상세화 과정에서 새로운 불확실성이 더해지거나 원래 GCM이 가지고 있는 기후변화 신호를 변형시켜 전혀 새로운 기후자료를 만들 가능성 또한 염두에 두어야 한다.

- 넓은 영역에 대한 기후변화 지시자(indicator)를 활용하거나 전지구를 대상으로 대륙별 영향분석 또는 예비분석을 하는 경우, 영향모델의 다른 입력자료의 공간적 규모가 GCM의 그것과 유사한 경우, 사막지역과 같이 지형적인 영향이 거의 존재하지 않는 지역의 경우, 또는 GCM이 가지고 있는 기후변화 신호를 그대로 사용해야 하는 경우에는 GCM 기후자료를 그대로 활용해야 할 필요가 있다.
- 상세화 과정에 요구되는 전산과 기술 역량 필요성에 의해 극히 일부 GCM 기후자료만 활용이 가능한 경우에는, 이로 인해서 잃는 것과 얻는 것의 균형점을 찾아야 한다. 예를 들어, 일부 GCM 만을 사용함으로써, 최종 연구결과에서 가능한 기후변화의 신호 또는 불확실성 범위를 충분히 대표할 수 없는 경우가 있기 때문에 사용자의 충분한 고려가 필요하다.

(2) Decision Point II

두 번째 의사결정 단계(Decision Point II)에서는 상세화를 위해 사용자의 연구주제, 영향모델이 필요로 하는 기후자료의 공간적 규모와 필요로 하는 기후변수, 상세화에 필요한 전산이나 기술 역량 등을 바탕으로 적합한 상세화 기법을 선택하게 된다.

- 사용자의 연구주제가 고해상도의 공간적 규모(약 20km 미만)의 기후자료를 필요로 하는 대부분의 경우, 사용자는 통계적 상세화 기법을 선택할 필요가 있다.
- 사용자의 연구주제가 약 20~50km의 공간적 규모를 필요로 하는 경우, 먼저 대상 지역에 지역기후모델(Regional Climate Model, RCM)을 이용한 역학적 상세화 기후자료가 존재하는지를 우선 확인한다(e.g. CORDEX). 기존 RCM 기반 상세화된 자료가 없는 경우, 사용자의 기술적, 전산적 역량 및 가용한 시간이 새롭게 RCM을 이용해서 기후자료를 역학적으로 상세화하는 것이 가능한지를 다시 한번 판단한다(Appendix I 참조). 상대적으로 높은 기술적, 전산적 역량과 긴 시간을 요구하는 역학적 상세화 기법이 불가능한 경우 통계적 상세화 기법을 선택할 필요가 있다.
- RCM은 GCM보다 작은 공간적 규모(약 20~50km)에서 발생하는 대기와 지표면의 물리적 과정을 모의하여 지형학적 기후 특성(극한 현상 포함)을 반영하며, 과거 관측자료의 존재 유무에 제약 받지 않고 미래 기후자료를 상세화하는 것이 가능하다.

다. 사용자는 이러한 역학적 상세화 기법이 가지는 특성이 사용자의 연구주제를 충족하는지 판단해야 한다.

- 기존 RCM 기반 상세화 기후자료가 존재하거나 새로운 역학적 상세화 기법 활용이 가능한 경우라도 역학적 상세화 기법이 가진 한계로 인해서 통계적 상세화 기법을 선택해야 하는 경우도 있다. 예를 들어, RCM 기반 상세화 기후자료는 경계조건을 제공하는 GCM의 시스템적인 편이(bias)를 여전히 가지고 있기 때문에 이를 보정해줘야 한다. 또한 역학적 상세화에는 많은 기술적, 전산적 역량이 요구되기 때문에 제한된 숫자의 RCM-GCM 조합만이 존재하는 경우가 대부분이다. 즉 제한된 GCM 기후자료의 사용으로 인해 기후변화 신호의 가능한 범위 혹은 불확실성 정도를 대표하지 못하는 경우가 발생한다.

(3) Decision Point III

통계적 상세화 기법은 변화 인자(change factor or delta method)와 같이 선형관계를 이용하는 아주 간단한 방법부터 여러 통계적 상세화 및 편이 보정 방법을 함께 사용하는 복합적인 방법에 이르기까지 아주 다양한 방법이 존재한다. 이로 인해 사용자의 연구주제에 적합한 통계적 상세화 기법을 선택하는데 상당한 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 특정 연구주제에 적합한 상세화 기법을 특정하는 것이 거의 불가능하기 때문에, 다양한 상세화 기법을 모두 사용하여 적합한 방법을 선택하는 것이 최선이다. 다시 말해, 사용자의 연구주제, 영향모델이 필요로 하는 기후자료의 시공간적 규모와 필요로 하는 기후변수, 상세화를 위한 기술 역량 등에 따라 적합한 상세화 기법이 결정되어야 한다.

- 통계적 상세화 기법은 크게 선형관계, 기상패턴, 기상발생기를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. Appendix I에 명시된 각 방법들이 가지고 있는 장점과 단점을 바탕으로 사용자의 연구주제에 적합한 방법을 선택할 필요가 있다.
- 통계적 상세화 기법 자체만으로 기후자료가 가지고 있는 편이를 보정하는 것이 가능하기도 하지만, 그것이 불가능한 경우 통계적 상세화 기법과 편이보정을 함께 사용하는 복합적인 방법(SDSM: statistical downscaling model, BCCA: bias-corrected constructed analogues, BCSD: bias-corrected spatial disaggregation 등)을 사용할 필요가 있다.

- 사용자의 연구주제가 기후변수 간 상관성 또는 지점 간 공간적 상관성을 고려해야 하는 경우 통계적 상세화 기법을 신중하게 선택해야 하는데, BCCA나 BCSD와 같은 복합적 방법 또는 변수 간 그리고 공간적 상관성을 고려한 기상발생기를 사용하여 한다(Schneider와 Brown, 2013; Wilks, 2012).

3.1.2 농업분야 상세화 기법 문헌 조사

앞서 알아본 바와 같이 다양한 기후자료 상세화 기법이 존재하지만 사용자의 기후변화 영향평가 연구주제에 따라 적합한 상세화 기법을 선택하여 사용할 필요가 있다. 각 상세화 기법 특성에 따라 적합한 분야와 함께 유의해야 하는 제한사항들이 존재하지만 이를 실제로 직접 분석하고 평가하기에는 대부분의 경우 주어진 시간 및 제한된 기술적, 전산적 역량으로 인해 어려운 것이 사실이다. 따라서 기존 기후변화 영향평가 연구에서 관련 분야 연구자들이 어떤 상세화 기법을 주로 사용하고 있는지를 조사하여 이를 바탕으로 사용자에게 맞는 상세화 기법을 고려하는 것이 한 방안이 될 수 있다. 본 연구에서는 최근 3년간(2016-2018) 출판된 논문 중 작물모형을 활용하여 기후변화 영향을 평가한 연구결과들을 조사하여 기존 White 등(2011)의 1910-2010년 간 작물모형 활용 기후변화 영향평가 방법론 조사 자료에서 상세화 기법 만을 추출하여 그래프로 나타내 비교하였다(그림 3). 2010년 이전 연구에서는 간단한 변화 인자(change factor)와 기상발생기를 사용한 상세화 기법들이 주로 사용되었던 반면, 최근 3년여간에는 변화 인자나 기상발생기 뿐만 아니라 RCM 기반 역학적 상세화 기법이 급격히 증가했으며 기타 상세화 기법 및 복합적인 방법을 활용한 상세화가 증가하였다. 이는 CORDEX와 같은 역학적 상세화 프로젝트들이 완료가 됨에 따라 지역 별 가용한 RCM 상세화 기후자료가 늘어났고, 기존 단순한 방법에서 벗어나 좀더 다양하고 복잡한 상세화 기법이 사용되는 영향으로 보인다. 기상발생기 역시 기존에 비해 공간적 또는 변수간 상관성을 고려한 기상발생기가 시도되고 있으며, 다른 상세화 기법과 복합적으로 활용되는 경우가 점차 증가하고 있음을 알 수 있었다.

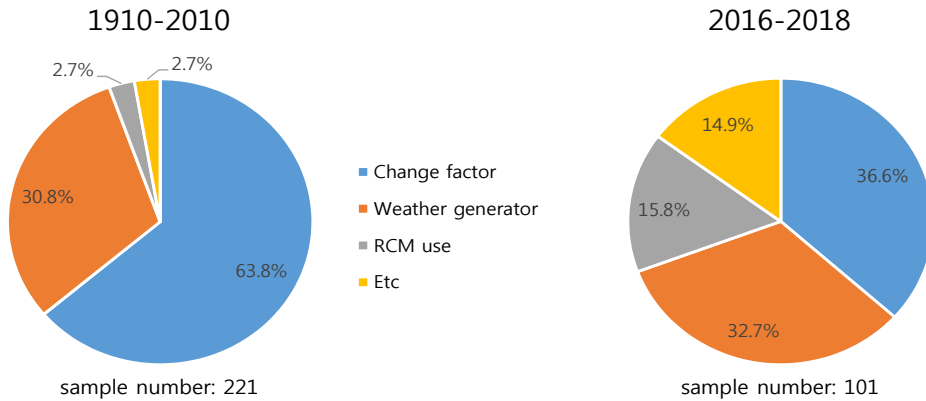


그림 3. 작물모형 활용 기후변화 영향평가에서 사용된 상세화 기법의 변천 (2010년 이전 → 2016-2018년).

3.2 농업 분야 기후자료 활용

계절 기후 예측정보는 작물을 재배하는 과정에서 관개 및 병해충 방제 시기 등과 같은 영농 관리 계획을 개선하거나 시준 시작 전에 예상 기상 상황에 적합한 작물 종류 및 품종을 선택하는데 있어 중요한 정보로 이용된다. 농업 생산자들은 안정적인 작물 생산을 위해 기온과 강수량 같은 직접적인 기상변수와 습도, 생육도일, 토양수분 또는 증발 손실과 같은 기타 기상변수들에 대한 계절 기후 예측정보를 요구한다. 기상변수는 농업 생산 활동에 있어 생육 단계별 영농활동 결정에 중요한 정보를 제공하게 되는데 표 3은 각각의 기상변수가 어떤 영농활동에 정보를 줄 수 있는지에 대해 설명하고 있다. 예를 들어 파종 및 이앙 시기 결정에 영향을 미치는 기상변수로는 기온, 강수량, 토양수분 상태, 토양온도 그리고 생육도일이 있고 관개 시기 결정에 영향을 미치는 기상변수로는 강수량, 토양수분 상태 그리고 서리(논의 경우 관개를 해줌으로 인해 서리 피해를 방지할 수 있음) 등이 있다(Frisvold and Murugesan 2012). 이와 같이 영농활동을 결정하는데 있어 기상변수가 중요한 정보를 제공하고 있기 때문에 이들 기상변수에 대한 예측정보의 활용성은 크다고 할 수 있다. Schneider and Wiener(2009)는 농업 생산자와 수자원 관리자를 대상으로 한 설문 조사를 통해 계절 기후 예측정보에 요구되는 사항을 다음의 9가지로 정리했다: 1) 장기 계획 수립을 위한 최대 1년치 예측 자료 생산; 2) 농업생산 경쟁 지역에 대한 예측; 3) 이상기상 현상에 대한 경고; 4) 예측자료의 정확성 및 신뢰성에 대한

설명; 5) 현재-작년-평년 형식의 비교자료 제공; 6) 이 지역에서 자주 발생하는 날씨 패턴; 7) 예측 및 경고에 대한 지역규모 정보 제공; 8) 산불관련 의사결정 지원 정보 제공; 9) 토양수분 및 상대습도에 대한 관측 및 예측.

영농활동을 결정하는데 있어 다양한 기상변수에 대한 정보도 중요하지만 기상변수의 선행 예측 기간이 얼마나 되는지에 따라 미리 영농활동에 대해 결정할 수 있을 것이다. 표 4는 예측자료의 선행 기간(5-일 예측, 5-주 예측, 5-개월 예측 그리고 5-년 예측)에 따라 고려할 수 있는 영농활동의 결정에 대해 설명하고 있다(Hudson 1972). 선행 예측 기간이 5-일인 자료는 작물의 파종 및 관개, 수확, 병해충 방제 등 대체적으로 상세한 영농활동에 대해 활용 가능하며, 5-주 선행 예측자료는 순차적 파종 시기, 단기 저장용 수확, 물 스트레스 여부에 따른 관개 결정, 서리 피해를 줄이기 위한 파종 날짜 결정, 병해충 발생을 고려한 농약 방제 결정 등 작물에 미치는 피해나 영향을 줄이기 위한 결정에 활용 가능하다. 선행 예측 기간이 5-개월인 자료는 소득 작물 재배 결정, 수자원 관리, 인력 채용 및 재배 일정 결정, 작물 품종 선택, 수확량 예측을 통한 적정 재배면적 결정 등 1년 농사 전반에 대한 결정에 활용 가능하며, 5-년 선행 예측자료는 기상 및 기후변화에 기초한 작물 선정 계획, 농업용 장비 투자 계획, 국가 농업 정책 결정 등 장기 계획 수립에 활용 가능하다.

표 3. 기상 정보를 통해 결정할 수 있는 영농활동 사례

기상정보	농업결정
기온	파종, 수확, 낙엽, 병해충 방제
강수	파종, 수확, 시비, 병해충 방제, 관개
토양수분	파종, 수확, 시비, 이앙, 관개, 생육 모니터링, 스트레스 측정
토양온도	파종, 해충 월동, 이앙, 시비
서리	해충 월동, 작물 보호, 관개(작물 피해 방지)
생육도일	파종, 관개, 해충 관리
상대습도	수확, 수분, 병해충 방제, 건조 상태, 작물 스트레스
풍속	수확, 수분, 병해충 방제, 가지치기, 먼지 및 약제 표류
풍향	재배지역 냉기 또는 온기 이류, 먼지 및 약제 표류

Source: (Frisvold and Murugesan 2012)

표 4. 선행 예측기간에 따라 고려할 수 있는 영농활동 및 계획

시간범위	농업 고려 사항
5-일 예측	• 씨앗 파종 깊이 • 작물 파종 여부 • 관개 여부 결정 • 작물 수확 여부 결정 • 병해충 방제 계획 • 작물 서리 방지 • 제초제 효율 증대 • 악천후로 인한 인공수분 보충 결정
5-주 예측	• 지속적 수확을 위한 작물의 순차적 파종 시기 연장 • 단기 저장을 위한 작물 수확 • 물 스트레스 여부에 따른 관개 결정 • 서리 피해 민감 작물에 대한 파종 날짜 결정 • 병해충의 작물 영향에 따른 농약 살포 결정
5-월 예측	• 계절 기온에 따른 소득 작물 재배 결정 • 부족한 수자원 관리 • 필요 인력 채용 및 재배 일정 결정 • 계절 예측에 기초한 작물 품종 선택 • 목표 작물 생산량에 대한 재배면적 추정
5-년 예측	• 기상 및 기후 변화에 기초한 작물 선택 및 대체 작물 선정 장기 계획 • 농업용 특수 장비에 대한 장기 투자 계획 • 한계 작물 지역에 대한 지원 및 개발에 관한 국가 정책 결정

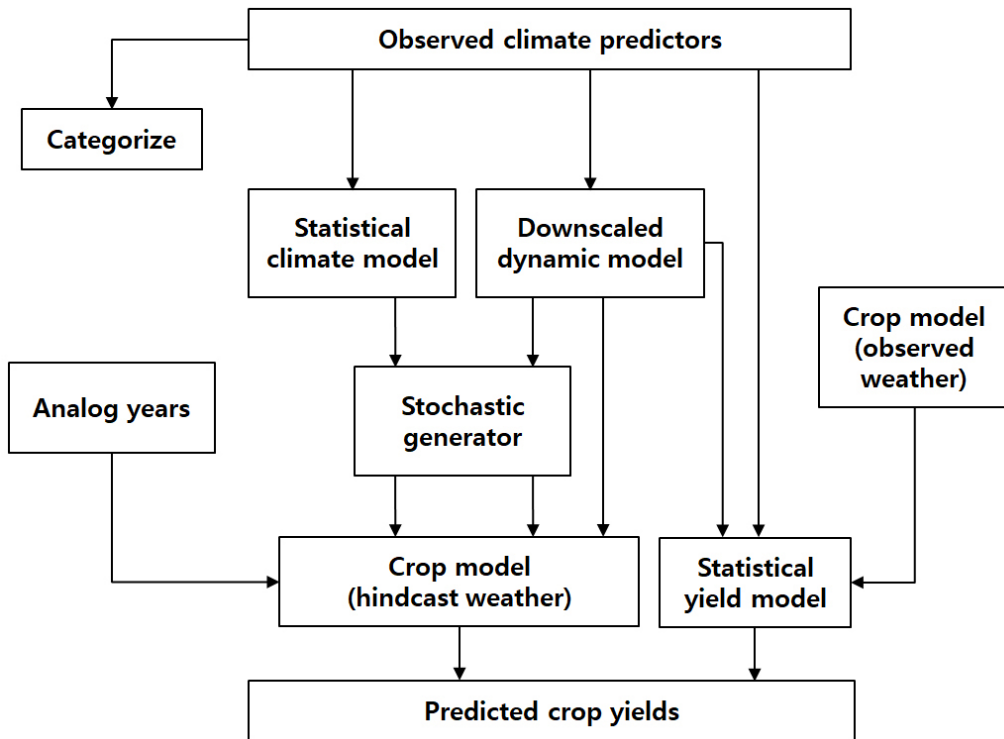
Source: Hudson (1972)

계절 기후 예측자료는 농업 생산성 및 작물 생육단계별 영농활동을 결정하는데 있어 매우 중요한 정보를 제공한다. 하지만 기후모형을 통해 생산된 계절 기후 예측을 농업분야에 직접 이용하는데 있어 시간 및 공간 규모에 대한 한계가 존재하며 이러한 시·공간적 한계를 극복하기 위해 다양한 상세화 방법들이 개발되어 왔다. 작물모형은 크게 통계적(statistical) 모형과 과정기반(process-based) 모형으로 구분된다. 통계적 작물모형은 월 단위 계절 기후 예측자료를 직접 이용해 수확량을 예측하는 경우가 많고 과정기반 작물모형은 일 단위 예측자료를 이용해야 하는 관계로 월 단위로 제공되는 계절 기후 예측자료를 일 단위로 시간 상세화 하는 과정이 필요하다.

표 5는 계절 기후 예측정보를 이용한 작물 수확량 예측 연구를 정리한 것으로 논문의 발행 연도순으로 정리했으며 논문 제목, 대상 작물, 대상 지역, 계절 기후 예측자료 기간, 기후모형, 적용된 기후자료 상세화 방법 그리고 수확량 예측에 이용된 작물모형에 대해

설명하고 있다. 분석에 최종 선정된 17편의 논문 중에서 최근 5년 안에 발표된 논문이 13편이었고 가장 최근인 2018년도에 발표된 논문이 8편으로 나타나 전 세계적으로 계절 기후 예측정보 활용 연구에 대한 관심이 증가하고 있는 것으로 분석되었다.

Hansen and Indeje(2004)는 농업분야 위험관리를 개선하는데 있어 계절 시간규모의 기후 예측자료가 기여할 것이라고 전망 했으며 기후모형과 작물모형 간에 존재하는 공간적 및 시간적 규모의 불일치에 대한 문제 해결이 우선 되어야 한다고 주장했다. 또한 기후모형을 통해 생산되는 계절 기후 예측자료를 작물모형(CERES-maize)에 적용하기 위해 Stochastic weather generator를 이용해 월 자료를 일별 시계열 자료로 변환하는 방법을 사용하였고 일부 기후 예측변수를 함수로 하는 통계적 작물모형을 개발해 캐냐에 대한 옥수수 수확량을 예측하는 기법을 소개했다. 그림 4는 과정기반 작물모형과 통계적 작물모형을 이용한 작물 수확량 예측에 적용되는 기후 예측자료에 대해 나타내고 있으며 과거 유사연도 선정, 확률론적 분해 방법을 이용한 일별 시계열 자료, 고해상도 지역 기후 모형(RCM)을 통해 생산되는 일별 시계열 자료, 관측 및 기후모형에서 제공되는 기후변수를 포함한다.



Source: (Hansen and Indeje 2004)

그림 4. 작물 수확량 예측에 이용되는 작물모형 입력 기상자료 생산 과정

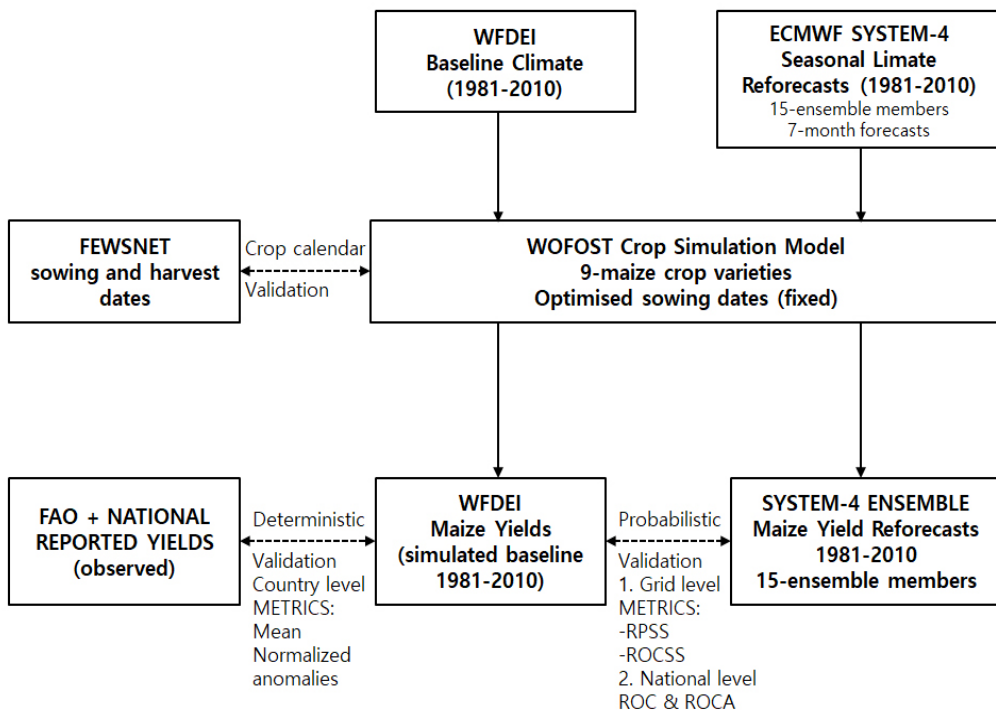
Challinor et al.(2005)는 직접 개발한 작물모형 GLAM(General Large-Area Model for annual crops)에 DEMETER(Development of a European Multimodel Ensemble system for seasonal to inTER-annual prediction) seasonal hindcast ensembles을 입력 기상자료로 이용해 인도 서부지역 땅콩 수확량에 대한 과거 기간 (1987-1998) 예측의 불확실성을 평가했다. DEMETER ensembles은 7개 GCMs(CNRM, CRFC, LODY, SCNR, SCWN, SMPI, UKMO)에 각 GCM 별로 9개 ensemble members가 적용된 총 63개 ensemble members로 구성되어 있으며 각 GCM은 REA40 재분석 자료를 기반으로 bias 보정이 실시되었다. Cantelaube and Terres(2005)는 DEMETER 프로젝트의 다중모형 앙상블 계절 기후 예측자료를 이용해 유럽지역 밀 수확량을 예측해 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF) 형태로 수확량 변이와 예측의 불확실성에 대한 정보를 제공했다. 기후 예측자료는 특이치 분

해 분석과 모형 출력을 이용해 월 평균값을 통계적으로 상세화 한 다음 Richardson WGEN 모형을 기반으로 하는 weather generator를 이용해 일별 시계열 자료로 재분배한다(Feddersen and Andersen 2005; Richardson 1981). 이렇게 제공되는 다중모형 앙상블 예측 결과는 단일 모형 보다 신뢰성 있는 확률 예보를 생산하는데 있어 낫다고 평가되고 있다.

Capa-Morocho et al.(2016)은 작물 수확량 예측 가능성을 개선하기 위해 계절 기후 예측자료와 작물 모형을 연결하는 방법을 개발하였다. 계절 기후 예측자료를 일 단위 기상 예측자료로 분해하는 방법으로 below normal, near normal, above normal의 강수 예측 확률을 기반으로 과거 기록을 샘플링하여 계절 기후를 예측하는 FResampler1(Forecast probability resampler, Ines 2013)와 조건부 확률 날씨 생성기인 predictWTD가 이용되었다. Canal et al.(2017)은 프랑스 겨울밀의 성장에 영향을 미치는 농업기상 변수를 예상하기 위해 계절 기상 예측자료에 의해 강제되는 작물모형의 성능을 실험했다. 실험에 이용된 계절 기후 예측자료는 ENSEMBLES 프로젝트에서 제공되는 5개 GCMs(ECMWF, INVG, Meteo-France, Met Office, MPI)의 seasonal hindcast 6개월 자료로 각 GCM은 9개 ensemble members를 갖고 있으며 bias 보정을 위해 SAFRAN 재분석 자료를 이용한 quantile mapping 방법이 적용되었다. Iizumi et al.(2018)은 APCC에서 제공되고 있는 계절 기후 예측자료를 JRA25(Japanese 25-year Reanalysis) 기반의 글로벌 작물 통계모형에 적용해 전 지구 쌀, 옥수수, 밀, 콩에 대한 수확량 손실을 hindcast 기간(1984-2010)에 대해 예측했다. 실험에 적용된 GCMs은 APCC, MSC-CANCM3, NCEP, NASA, PNU 모형으로 각각 10개, 10개, 20개, 11개, 5개의 ensemble members로 구성되며 3개월, 6개월 예측자료를 제공하고 있다. 글로벌 작물 달력을 이용한 수확 전 3개월 평균 기온과 강수량 예측자료를 각 격자별로 개발된 작물 통계모형에 적용해 수확량 변동을 예측하였다. Martins et al.(2018)은 브라질 반건조 지대에 대한 수확 30일 전 옥수수 수확량 예측을 위한 시기 적절하고 정확성이 높은 정보를 제공하기 위해 기상관측 및 120일의 예측 선행기간을 갖는 Eta RCM 계절 기후 예측자료를 입력 자료 이용하며 AquaCrop 작물 모형을 기반으로 하는 계절 작물 수확량 예측 시스템을 개발하고 그 예측 성능을 입증했다.

Ogut et al.(2018)은 계절 기후 예측정보의 예측 스کیل이 수확량 예측 스کیل에 전달되

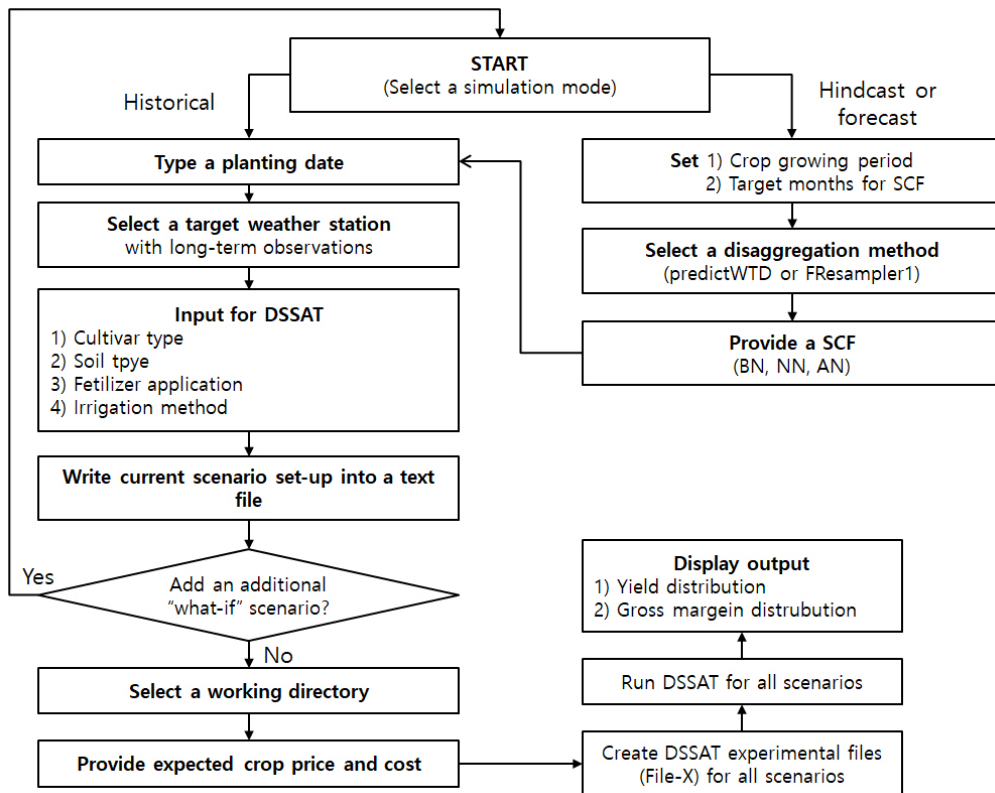
있는지에 대해 테스트하기 위해 아프리카 동부 지역의 옥수수 재배지역에 대한 수확량 예측을 실시했다. 여기서는 WFDEI(WATCH Forcing Data ERA-Interim)를 기반으로 bias 보정이 이루어진 ECMWF System-4의 7개월 선행 예측기간의 계절 기후 예측자료가 이용되었고 유용한 확률 예측 범위를 평가하기 위해 앙상블 평균, 경년 변동성, 평균 오차, RPSS(Rank Probability Skill Score) 분석 방법이 이용됐다. 그림 5는 WFDEI 기상 자료와 다중 앙상블 계절 기후 예측자료를 WOFOST 작물모형에 입력해 예측한 각각의 옥수수 수확량 예측 결과를 바탕으로 계절 기후 예측정보의 유용성을 검증하는 방법에 대해 나타내고 있다. 또한 FAO 및 정부 보고서를 통해 국가별로 공개되고 있는 관측 수확량 통계자료를 바탕으로 관측 기상자료 기반 수확량 시뮬레이션 결과에 대한 결정론적 방법의 검증과 계절 기후 예측정보 기반 수확량 예측 결과에 대한 확률론적 방법의 검증에 대해 소개한다.



Source: (Ogutu et al. 2018)

그림 5. 작물 모형을 이용한 계절 기후 예측정보 유용성 테스트 방법

Han et al.(2018)은 농업 의사결정 지원 도구인 SIMAGRI(Simulador de Agricultura)를 이용해 우루과이 지역 옥수수, 밀, 콩에 대한 수확량 예측 방법을 제안했다. SIMAGRI는 확률적 형식의 기후 예측정보를 과정기반 작물모형에 이용하기 위해 확률적 기후 예측 자료를 일별 시계열 자료로 시간적 상세화 해주는 도구인 FResampler1과 predictWTD를 적용했다. 그림 6은 과거 장기 관측자료와 확률적 계절 기후 예측자료를 활용해 작물 모형의 기상입력 값으로 활용하는 방법에 대해 나타내고 있으며 곡물 가격 정보 및 농업 생산에 대한 전략적 의사결정을 지원할 수 있도록 설계되었다.



Source: (Han et al. 2018)

그림 6. SIMAGURI 농업의사 결정 도구에 대한 내부 기후자료 상세화 및 작물 모델링

계절 기후 예측정보를 활용하는 작물 수확량 예측 방법에 있어 대부분의 관련 문헌에 서는 월 단위 예측자료를 일별 시계열 자료로 변환(시간적 상세화)하는 기법 적용을 통해

과정기반 작물모형의 기상 입력자료로 활용되고 있는 것으로 나타났다. 특히 stochastic disaggregation 방법을 통해 월 단위 예측자료를 일 단위 기상자료로 재생산하는 사례가 많았다. 고해상도의 계절 기후 모형의 결과 값이 직접적으로 이용되기도 하지만 예측 자료에 대한 신뢰성 및 정확성에 대한 문제가 발생하고 있어 예측의 불확실성에 대한 평가를 통해 농업분야 적용에 신중함을 기해야 할 것으로 판단된다. 예측성에 대한 사용자의 불안감은 영농활동을 결정하는데 있어 주저하게 만들며 소개된 문헌을 통해 알 수 있듯이 실제 수확량 예측에 이용되기 보다는 과거기간에 대한 수확량 예측을 재현하는데 그치고 있다. 하지만 농업분야에 대한 계절 기후 예측정보의 활용 빈도는 최근 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며 다양한 기후모형에 대한 컴퓨팅 능력 향상과 더불어 Big-data 및 AI 기술 등을 활용하는 연구가 분야를 막론하고 폭넓게 적용되고 있어 향후 계절 기후 예측자료의 활용 가능성 또한 확대될 것으로 판단된다.

3.3 생태 분야 기후자료 활용

기후예측 자료의 경우 다양한 시간규모를 포함시키기 위해 ‘seasonal’, ‘decadal’, ‘climate change’ 중 하나를 검색어 조합에 포함시키도록 하였다. 기후 자료의 경우, 예측 결과의 해상도가 수백 km 단위로 크기 때문에 타 분야에 효율적으로 적용하기 위해서는 반드시 상세화(downscaling) 과정이 필요하다. 따라서 문헌 내에 ‘downscaling’ 단어가 들어가도록 하였다. 생태 분야의 경우 ‘ecosystem’ 뿐 아니라, 식량 산업과 연관이 크며 늘어나는 인구수의 단백질 수요를 충족시키기에 가장 적합할 것으로 평가되는 ‘aquaculture’ 또한 문헌의 내용이 포함되도록 하였다(Bell et al. 2011). 또한 생태 분야에서 주요 연구 대상인 종 분포 예측 방법인 ‘species distribution modelling’, 외래종 유입과 관련해서 연구가 활발해질 것으로 기대되는 ‘invasion’도 검색어에 포함시키도록 하였다. 또한 ‘climate change’나 ‘seasonal’ 등의 단어를 제목에 넣을 경우, 수만 개의 문헌이 검색되어(예: climate change, ecosystem, downscaling 조합의 경우 약 1.8만 개 결과), 적절한 추후 분석을 위해, 기후 키워드 중 시간 관련 단어들(climate change, decadal, seasonal)을 제목에 포함시키도록 하였다. 또한 수백 개 이상의 논문의 제목 등의 데이터를 Google Scholar로부터 web scraping 방법으로 가져와야 하는데, 백

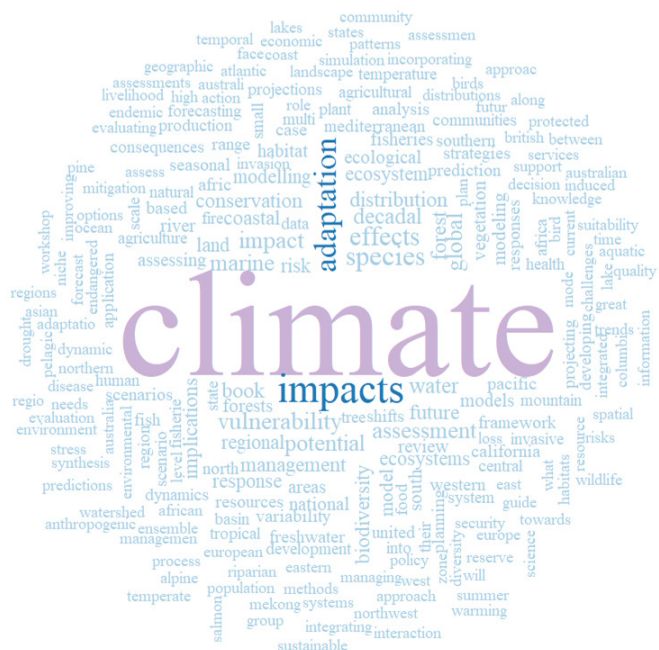


그림 7. 워드클라우드 (위: 농업, 아래: 생태)

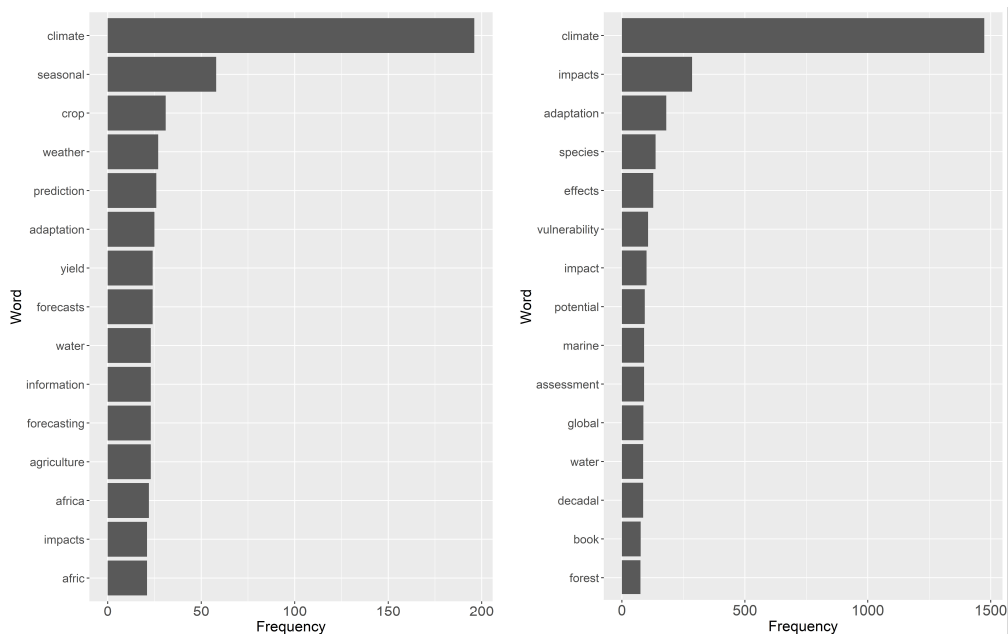


그림 8. 단어 빈도 히스토그램(좌: 농업, 우: 생태)

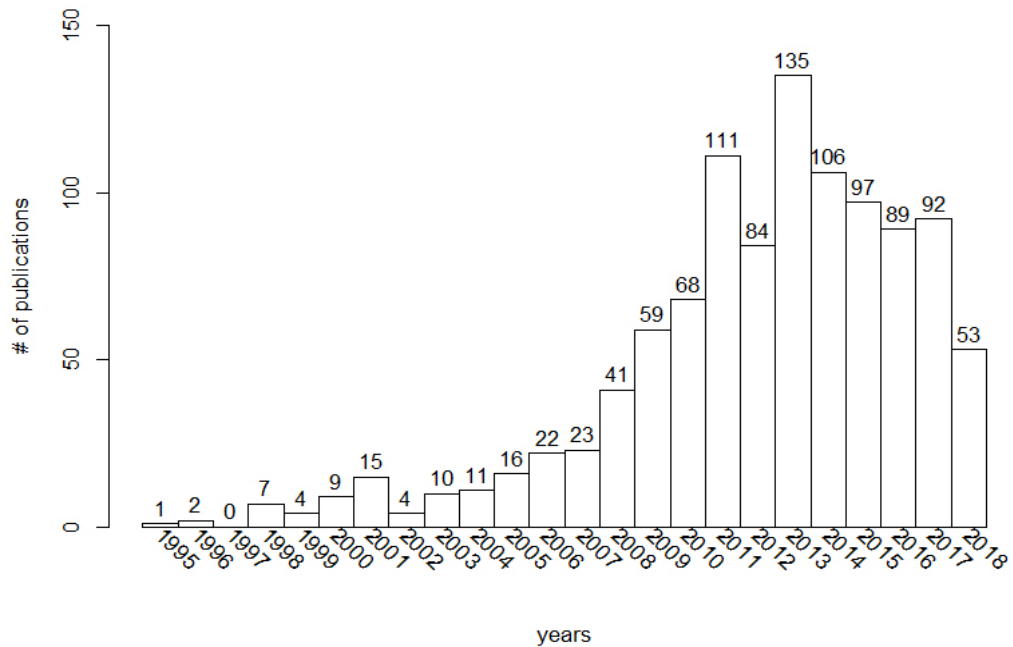
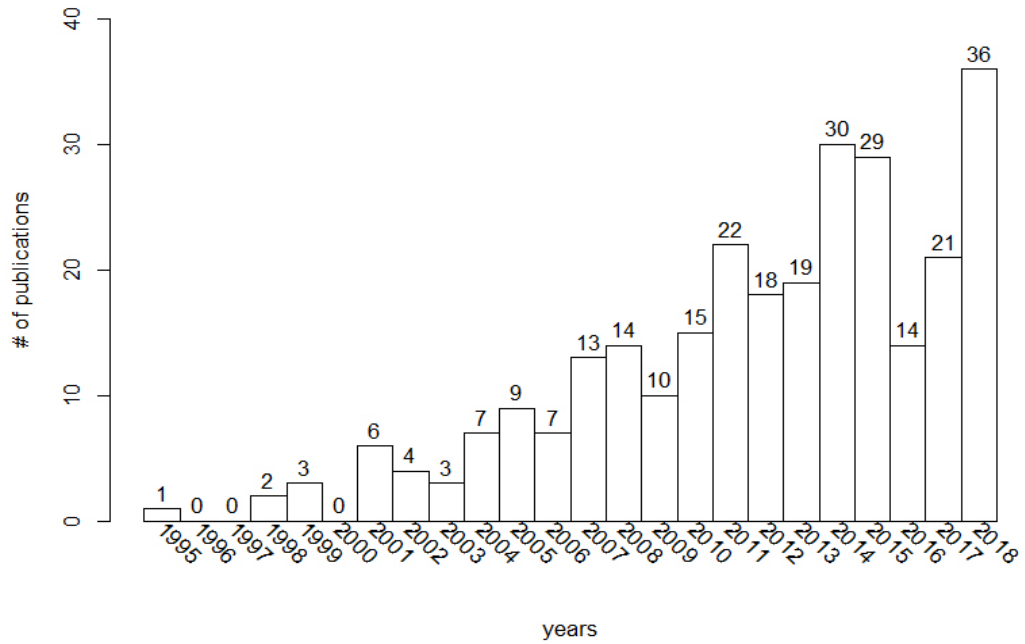


그림 9. 연도별 논문 개수(위: 농업, 아래: 생태)

개별 논문의 분석을 통해 기후자료가 어떻게 각 분야에서 이용되는지 알아보고자 하였다. 위의 문헌 리스트로부터 보고서, 책, 리뷰 등을 제외하고, 논문 접근이 가능한 문헌을 대상으로 사용된 기후 자료를 추출하고자 하였다. 생태 분야의 경우 WorldClim (<http://www.worldclim.org/>)에서 약 1 km² 단위의 상세화된 과거 및 기후변화 자료를 제공하기 때문에 많은 논문에서 WorldClim 자료를 이용하였다. 이러한 논문들의 경우 다양한 기후예측 자료 사용 현황을 파악을 위한 본 연구의 주제와 맞지 않기 때문에 대부분 제외하였고, 기후예측 자료가 충실히 기술된 논문만을 대상으로 정성적 분석을 진행하였다(표 6).

표 5. 계절 기후 예측자료를 이용한 작물 수확량 예측 관련 연구에 대한 문헌 정리

<i>Title</i>	Organism	Region	Time scale	Climate models	Downscaling methods	Crop models	Ref.
<i>Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya</i>							
2004	Maize	Kenya	Hindcast (1961–1999)	ECHAM	Stochastic disaggregation	CERES-maize Statistical yield model	(Hansen and Indeje 2004)
<i>Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles</i>							
2005	Groundnut	India	Hindcast (1987–1998) 6 months	CNRM, CRFC, LODY, SCNR, SCVN, SMPI, UKMO		GLAM	(Challinor et al. 2005)
<i>Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe</i>							
2005	Wheat	Europe	1995–1998	DEMETER	WGEN	JRC crop model	(Cantelaube and Terres 2005)
<i>Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso</i>							
2008	Sorghum	West Africa	2004–2005	ECHAM	PC1 Stochastic disaggregation	Sorghum	(Mshra et al. 2008)
<i>Linking weather generators and crop models for assessment of climate forecast outcomes</i>							
2010	Maize	Argentina	1931–2001	IRI Net Assessments	SWG weather generator	CERES-maize	(Apipattanavis et al. 2010)
<i>Development of a rice yield prediction system over Bhubaneswar, India: combination of extended range forecast and CERES-rice model</i>							
2015	Rice	India	1983–2007	ERFS	Stochastic disaggregation	CERES-rice	(Ghosh et al. 2015)
<i>Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models</i>							
2016	Maize Wheat	Spain	1960–2010	IRI Net Assessments	FResampler1 predictWTD	CERES-maize CERES-wheat	(Capa-Morochó et al. 2016)
<i>A coupled human-natural system to assess the operational value of weather and climate services for agriculture</i>							
2017	Tomato Maize Soybean Rice	Milan, Italy	Hindcast (1960–2005) 7 months ~ 10 years	ECMWF NCEP CanSIPS	LARS weather generator	AquaCrop	(Li et al. 2017)

Title		Pub. year	Organism	Region	Time scale	Climate models	Downscaling methods	Crop models	Ref.
<i>Anticipation of the winter wheat growth based on seasonal weather forecasts over France</i>									
2017	Winter wheat	France	Hindcast (1981~2005) 6 months	ENSEMBLES project (ECMWF, INVG, Meteo-France, Met Office, MPI)	Quantile mapping	PANORAMIX	(Canal et al. 2017)		
<i>Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble</i>									
2018	Rice Maize Wheat Soybean	Global	Hindcast (1984~2010) 3 months 6 months	APCC, MSC-CANCM3, NCEP, NASA, PNU	Statistical yield model		(Iizumi et al. 2018)		
<i>Improving drought management in the Brazilian semi-arid through crop forecasting</i>									
2018	Maize	Brazil	2001~2010 120 days	Eta RCM	AquaCrop		(Martins et al. 2018)		
<i>Land-surface initialisation improves seasonal climate prediction skill for maize yield forecast</i>									
2018	Maize	Europe	1981~2010	INIT CLIM	Statistical crop model		(Caglar et al. 2018)		
<i>Performance of the MARS-crop yield forecasting system for the European Union: Assessing accuracy, in-season, and year-to-year improvements from 1993 to 2015</i>									
2018	Wheat Maize Rapeseed Sunflower Potato Sugar beet	Europe	1993~2015 10 days	10-day ECMWF forecast	WOFOST		(Van der Velde and Nisini 2018)		
<i>Predicting optimum crop designs using crop models and seasonal climate forecasts</i>									
2018	Sorghum	Australia	Hindcast (1981~2015) 3 months	POAMA-2	Downscaled to station level	APSIM			(Rodriguez et al. 2018)

Title							
Pub. year	Organism	Region	Time scale	Climate models	Downscaling methods	Crop models	Ref.
Probabilistic maize yield prediction over East Africa using dynamic ensemble seasonal climate forecasts							
2018	Maize	East Africa	Hindcast (1981–2010) 7 months	ECMWF System-4	WFDEI	WOFOST	(Ogutu et al. 2018)
Seasonal climate forecasts provide more definitive and accurate crop yield predictions							
2018	Wheat	Australia	Hindcast (1981–2015) 6 months	POAMA	Downscaled to station level	APSIM	(Brown et al. 2018)
SIMAGRI: An agro-climate decision support tool							
2018	Maize Wheat Soybean	Uruguay		IRI Net Assessment	FResampler1 predictWTD	CERES-maize CERES-wheat CROPGRO-soybean	(Han et al. 2018)

표 6. 기후예측 자료를 이용한 생태 관련 연구에 대한 문헌 정리

Title					Ref.
Pub. year	Organism	Region	Time scale	Climate models	Climate variable
<i>A geographic mosaic of Climate change impacts on terrestrial vegetation: which areas are most at risk?</i>					
2015	Tree	The San Francisco Bay Area, USA	Climate change (~2100)	92 climate models of the CMIP3 and CMIP5 data	winter minimum temperature; summer maximum temperature; mean annual precipitation
<i>A Review of Climate Change Model Predictions and Scenario Selection for impacts on Asian Aquaculture</i>					
2009	fish	Asia	Climate change (~2100)	three climate models(HadCM3, CSIRO and CCMA) from the WORLDCLIM and IPCC Distribution Center	rainfall , temperature
<i>Effects of Climate change on the distribution of indigenous species in oceanic islands (Azores)</i>					
2016	bryophytes, vascular plants, arthropods	Azores, Portugal	Climate change (~2100)	RCP8.5 data from CIELO	temperature, rainfall, relative humidity and solar radiation
<i>Impacts of sea level rise and Climate change on coastal plant species in the central California coast</i>					
2015	rare coastal plant species	California, USA	Climate change (~2100)	PCM and GFDL	temperature
<i>Impacts of Climate change on the global invasion potential of the African clawed frog <i>Xenopus laevis</i></i>					
2016	frog	South Africa, North America, South America and Europe	Climate change (2070)	RCP scenario data from WorldClim	19 bioclimatic variables
<i>Invasive species and Climate change: a framework for predicting species distribution when data are scarce</i>					
2012	buffel grass	Australia	Climate change (2065-2075)	SRES scenario data from CSIRO Mk3.5 GCM	soil moisture, temperature, rainfall etc
<i>Predicting thermal stress for coral bleaching in the Great Barrier Reef using a coupled ocean atmosphere seasonal forecast model</i>					
2012	coral	Great Barrier Reef (Australia)	Seasonal forecast	POAMA	Sea surface temperature

(Spillman et al. 2013)

Title	Pub. year	Organism	Region	Time scale	Climate models	Climate variable	Ref.
Projecting range limits with coupled thermal tolerance-climate change models: an example based on gray snapper (<i>Lutjanus griseus</i>) along the US east coast							
2012	Gray Snapper	U.S. East Coast	Climate change (~2100)	SRES scenario from 14 GCMs (BCM2.0, CGCM3, CM3, Mk3.0, ECHO-G, FGOALS-g1.0, CM2.1, E R, CM3.0, CM4, MIROC3.2, CGCM2.3.2, CCSM3, HadCM3)	Temperature	(Hare et al. 2012b)	
The fate of threatened coastal dune habitats in Italy under Climate change scenarios							
2013	all coastal plant species in Italy	the entire Italian sandy coastline	Climate change (2050)	RCP scenario data from WorldClim	19 bioclimatic variables	(Prisoo et al. 2013)	
Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest US from 1980-2009 and implications for salmonid fishes							
2012	salmonid fishes	the northwest USA	historical data (1980-2009)	No specific info written	air temperature from U.S. Historical Climatology Network	(Isaak et al. 2012)	
Climate change may boost the invasion of the Asian needle ant							
2013	ant	world	Climate change (2020, 2050 and 2080)	SRES scenario data from three GCM models (CCCMA-GCM2, CSIRO-Mk2, HCCPR-HADCM3)	4 of the 19 bioclimatic variables that were not collinear (pair-wise rPearson (0.75).	(Bertelsmeier et al. 2013)	
Climate-change induced tropicalisation of marine communities in Western Australia							
2012	Marine communities	Western Australia	Climate change (~2100)	SRES scenario data from WorldClim	Bioclimate variables	(Cheung et al. 2012)	
Cusk (<i>Brosme brosme</i>) and Climate change: assessing the threat to a candidate marine fish species under the US Endangered Species Act							
2012	Cusk	USA	Climate change (2060-2100)	SRES scenario data from 8 Atmosphere-Ocean Global Circulation Models (BCCR CM1, BCCR CM1, MPI ECHAM5, IAP FGOALS, GFDL 2.0, GFDL 2.1, UKMet HadCM3, MIROC Med)	Bottom temperature	(Hare et al. 2012a)	

Title				
Pub. year	Organism	Region	Time scale	Climate models
Multi-model ensemble projections of Climate change effects on global marine biodiversity				
2014	802 marine fish and invertebrates	world	Climate change (1991–2059)	RCP scenario data from GFDL ESM2.1
Predicting the Impact of Climate Change on Cheat Grass (<i>Bromus tectorum</i>) Invasibility for Northern Utah: A GIS and Remote Sensing Approach				
2011	Cheat grass	Utah, USA	Climate change (2099)	CCSM–3
Climate variable				
Ref.				
bathymetry; sea surface temperature (SST); seabed temperature (SBT); salinity; ice; primary productivity; and distance to coast.				
(Jones and Cheung 2014)				
Temperature, Precipitation, elevation, vegetation index, slope curvature etc				
(Rivera et al. 2011)				

생태 분야의 경우, 많은 연구들이 호주, 미국, 유럽 국가들에 있는 주요 생물자원을 대상으로 이루어졌다. 호주 대보초(Great Barrier Reef)의 경우 세계에서 가장 큰 산호초 지대로 관광 뿐 아니라, 수많은 해양 생물들의 서식지로 유명하다. 그러나 대부분의 해양생물이 체온 조절 능력이 거의 없는 변온 생물이고, 먹이 찾기 및 생식 등의 일반적인 활동을 불가능하게 하는 한계 온도(thermal optima) 근처의 기후환경에 살고 있기 때문에 폭염 등에 의해 대규모로 쉽게 파괴된다(Hughes et al. 2017). 복구 또한 쉽지 않기 때문에, 기후예측 자료를 이용한 산호 및 산호초 생물들의 분포, 양 예측을 통한 대책 마련을 위해 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 호주의 경우 Seasonal forecast model(Predictive Ocean Atmosphere Model for Australia; POAMA) 자료를 이용한 조기 경보(early warning) 시스템을 갖추고 있다. 이를 이용해 Coral Hotspot과 Degree Heating Weeks(DHW)의 두 가지 bleaching 예측 index가 널리 쓰인다(Spillman et al. 2013; Hughes et al. 2017). Coral Hotspot은 특정 지역에서의 온도 스트레스의 강도를 측정하는 방법으로 월별 평균 해수면(Sea surface temperature; SST) 온도와 비교해 특정 온도 이상의 SST 예측값을 나타내고, DHW는 +1 °C 이상의 온도 스트레스가 얼마나 오래 지속되는지를 나타낸다. 이 기후 지표들은 엘니뇨 등에 의한 산호초 대규모 폐사와 아주 밀접한 상관관계에 있음이 보고되었다(Hughes et al. 2017). 산호는 전세계적으로 열대 및 아열대 지역에 널리 분포하며, 기후변화에 가장 크게 악영향을 받는 민감 종이다. 인도네시아 근처의 coral triangle 지역 뿐 아니라, 쿠로시오 난류를 따라 북상하는 여러 산호 종들 때문에 동북아시아에서도 많은 연구가 행해지고 있다. Coral 등 생태계의 큰 축을 담당하는 생물을 대상으로 seasonal forecasting을 바탕으로 한 early warning 및 decadal forecasting과 기후변화 시나리오를 이용한 장기적인 분포 예측 연구가 이루어져야 한다.

대구(cusk), 연어(salmon), 물통돔(Gray Snapper) 등 북대서양 국가들의 주요 식량자원을 대상으로 한 연구도 활발히 이루어졌다(Isaak et al. 2012; Hare et al. 2012a,b). 이들 논문의 경우, 과거의 강과 바다의 바닥 온도 기록 및 여러 개의 General Circulation Models과 세 개의 SRES scenario의 평균 예측 온도를 바탕으로 2060년 이후의 분포를 예측하는 방법이 사용되었다.

전지구적 혹은 서호주 지역에 분포하는 대규모 생물 집단을 대상으로 서식지 이동

(range shift), 열대화(tropicalisation) 등을 예측한 연구도 있었다(Cheung et al. 2012; Jones and Cheung 2014). 두 가지 RCP 시나리오(RCP2.6과 RCP8.5)의 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory's Earth System Model 자료를 0.5×0.5 도 단위까지 상세화한 자료를 바탕으로 수심(bathymetry), 해수면온도(SST), 해저온도(seabed temperature), 염도(salinity), 빙하(ice), 해변으로부터의 거리 등을 이용해 AquaMaps, Maxent, Dynamic Bioclimate Envelope Model 등 여러 종 분포 모델링 방법의 앙상블 방법을 이용해 예측하였다.

나무의 경우 이동성이 적고, 수명이 길며, 다른 생물들의 서식환경을 제공하는 중요한 역할을 하기 때문에 서식지의 기후변화에 의해 상당한 영향을 받고 연구가 활발히 이루어 진다. 또한 국가별로 중요한 고유종(indigenous species)의 경우 생물자원으로도 활용 가능하기 때문에 다목적 연구 가치가 커서 연구 역량을 집중할 필요도 있다. 포르투갈의 도서 지역에 서식하는 선태류(bryophytes), 유관속 식물(vascular plants), 절지 동물 등 여러 생물을 대상으로 2100년에 기후변화에 의해 어떤 분포를 이룰지에 대한 연구가 진행되었었다(Ferreira et al. 2016). 이 연구에서는 RCP8.5 시나리오를 바탕으로 Regional Climate Model(Clima Insular à Escala Local: CIELO)로부터 온도, 강수량, 상대 습도, 일사량(solar radiation) 등의 기후 자료로부터 Bioclim, MaxEnt, Support Vector Machine 등의 14개 생물분포모델링 방법의 앙상블을 이용해 고유종의 분포를 예측하였다. 샌프란시스코 베이 지역의 경우 어느 위치가 가장 기후변화에 취약할지 파악하기 위해 270×270 m 단위까지 상세화된 PRISM 자료 및 Bias-Correction Spatial Disaggregation algorithm을 이용해 800×800 m까지 상세화된 CMIP5 자료로부터 겨울 최저 온도, 여름 최고 온도, 연평균 강수량 등의 자료를 이용하여 2100년 무렵의 나무 분포를 예측하였다. 2050년~2100년 무렵의 해수면 침식과 기후변화에 의한 식생 영향을 파악하기 위해 캘리포니아와 이탈리아의 전체 연안 식물 집단을 대상으로 한 연구들도 진행되었었다(Garner et al. 2015; Prisco et al. 2013).

이 외에도 사회적으로 이슈가 되는 외래종(invasive foreign species)의 미래 분포를 예측하고자, cheat grass, buffel grass, 손톱개구리, 개미 등의 서식지 모델링 또한 여러 SRES, RCP와 원격탐지(remote sensing), 강수량, 온도, 고도 등의 자료를 이용한 연구가 있었다(Ihlow et al. 2016; Martin et al. 2012; Bertelsmeier et al. 2013; Rivera et al. 2011).

4. CONCLUDING REMARKS

UN의 지속가능성장을 위한 목표에서 식량, 수자원, 생태는 많은 부분을 차지한다 (zero hunger, life below water, life on land, clean water and sanitation). 절대적인 인구수, 식량 자원 분포를 고려할 때 APEC 국가들에게 기후변화 대응은 시급한 해결거리이다. 기후 요인으로 인해 야기되는 각종 문제의 해결을 위해 여러 학문의 융복합적 접근이 필요하나, 기후자료의 복잡성, 불확실성, 자료 사용의 문제, 이해 부족 등으로 인해 사용이 제한적이다. 본 연구를 통해 기후자료가 기존 연구에서 분야별로 얼마나 어떻게 사용되는지를 조사하였다.

다양한 상세화 기법을 선택하고 활용함에 있어 고려해야 할 사항들을 기후변화 영향평가가 연구의 의사결정 단계를 중심으로 살펴보았다. 또한 상세화 기법에 대한 이해를 바탕으로 사용자의 연구주제에 적합한 상세화 기법을 선택할 수 있다는 판단 하에 상세화 기법을 크게 통계적(statistical) 상세화 기법과 역학적(dynamical) 상세화 기법으로 나누어 각 상세화 기법에서 널리 사용되는 방법들을 살펴보았다. 일반적으로 각각의 연구특성 등을 반영하여 각기 다른 상세화 기법을 적용하게 되는데, 실제로 많은 응용분야(농업, 수자원) 기후변화 영향평가 연구에서는 여전히 비교적 다루기 쉬운 상세화 기법을 적용하고 있다. 그럼에도 불구하고 최근 3년여간 작물모형 활용 기후변화 영향평가 연구들에서는 상세화 기법의 활용 트렌드가 점차 바뀌고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 분석한 바에 의하면 최근에는 기존 통계적 상세화 기법의 단독 사용으로 인한 문제점을 개선하기 위해 두 가지 이상의 기법들을 혼용해서 적용하는 방법(예: BCSD, BCCA 등)을 이용하거나 개선된 방법들의 사용이 점차 증가하고 있었다. 또한 최근 RCM을 사용한 역학적 상세화가 증가함에 따라 RCM 기후자료를 활용하는 경우도 증가하였다. 물론 대부분의 경우 RCM 기후자료를 추가로 편이 보정하여 사용하고 있었다. 결과적으로 다양한 응용분야에서 기후변화 영향평가를 수행할 때 이러한 다양한 상세화 기법에 대한 부가 가치를 확인하고 여러 방법 간 비교평가를 통해 연구주제에 가장 적합한 상세화 기법을 확인하는 플랫폼이 개발될 필요가 있다. 이를 통해 상세화를 통해 더해지는 불확실성을 최대한 정량하고 최소화하는 노력이 필요하다.

농업분야 영농활동에 대한 의사결정을 지원하는 방법 중에서 농업인들이 실제 현장에

적용해 보기를 희망하는 것 중에 우선은 향후 기상 현상에 대한 예측정보일 것이다. 단기적으로는 내일의 날씨가 어떨 것인가에 대한 예측에서 장기적으로는 10년뒤 또는 20년 뒤의 기후가 어떻게 변할 것인가에 대한 예측 정보가 제공된다면 지속 가능한 작물 생산을 통해 농가 경제적 안정성 확보와 나아가 국제적 식량안보 문제 해결에 큰 도움이 될 것이라 믿어 의심치 않는다. 하지만 현재의 기상-기후 예측 기술 수준에서는 선행 예측기간이 길면 길수록 그에 따른 정확성이 떨어져 영농 활동에 대한 어떠한 결정을 내리는데 있어 리스크가 발생하게 된다. 농업 생산성 분야에서 계절 기후 예측정보가 갖는 중요성을 고려할 때 신뢰성 있는 예측자료의 생산을 위해 학제간 융합연구에 대한 필요성이 강조되는 이유이기도 하다. 기후모형이 갖는 한계와 작물모형이 갖는 한계에 대한 분석이 이루어지고 서로 다른 특성의 모형을 연결하는 과학적이고 합리적인 방법이 개발된다면 계절 기후 예측자료에 대한 농업분야 활용 가능성은 실제 영농 활동에 까지 확대 될 것이다. 본 연구를 통해 농업분야에서 활용되고 있는 계절 기후 예측정보에 대한 특성과 작물 수확량 예측을 위해 필요한 맞춤형 예측자료에 대한 생산 기술들이 소개되었다. 과정기반 작물모형은 일별 시계열 기상자료를 요구하고 있어 다양한 상세화 기법 적용을 통해 맞춤형 입력자료를 생산하며 통계기반 작물모형은 계절 기후 예측정보의 일부 기후변수를 함수로 이용해 과거 수확량 관측자료를 기반으로 수확량을 예측한다. 작물 수확량의 예측성을 높이기 위해서는 일별 시계열 자료에 대한 신뢰성이 확보되어야 할 것이며 기후 예측자료 이용의 편리성을 중요시한다면 통계모형에 대한 Big-data 및 AI 기술 적용을 통해 신뢰성을 확보해 나가야 할 것이다.

생태 분야 연구에서는 WorldClim에서 상세화된 다양한 기후변화 시나리오 자료를 제공하기 때문에 많은 연구들이 이 자료를 이용하거나 특정 연구소의 모델링 결과를 이용하였다. 대부분의 경우에 한 두가지 모델링 결과로부터 2~4개의 기후변화 시나리오 자료를 써서 미래의 연구 결과를 예측하였다. 해양 생태 연구의 경우 주로 sea surface temperature만을 사용했고, 육상 생태 연구의 경우 일사량, 토양 수분, 위성자료, 고도 등 더 다양한 자료를 사용하는 양상을 보였다. 본 조사를 진행하며 기후 정보를 추출하려 하였으나 많은 문헌의 경우 사용된 기후정보, 특히 상세화 방법을 충실히 작성하지 않았다. 향후 기후예측 자료를 사용함에 있어 사용된 기후예측 정보, 상세화 방법, 여러 기후 예측 모델링 결과에 대한 불확실성 평가 등이 충실히 이루어져야 할 것으로 보인다. 또한

태생적인 모델링의 변이를 줄이기 위해 앙상블 결과를 이용하는 것이 권장된다.

기후예측 정보 활용을 늘리기 위해, 지역별/생물 종별로 특화된 가공된 기후 자료를 제공할 필요가 있다. Climate velocity 등 해양 생물 등과 밀접한 연관이 있음이 알려진 가공된 기후자료를 제공함으로써 기후 변이에 민감한 지역을 파악해야 할 것으로 보인다. Degree heating week, coral hotspot 등 야생/양식 생물의 생존과 밀접한 연관이 있는 자료를 seasonal forecasting 자료 등을 가공해 기후변화에 민감할 것으로 예상되는 주요 지역별로 제공할 필요가 있다. 또한 생물 종/집단 별로 온도 등 기후 요인에 의해 스트레스를 받는 정도가 다르기 때문에 지역별 주요 생물자원의 기후민감도를 고려한 연구를 진행해 특화된 기후지표를 개발할 필요가 있다. 최근 연구에 따르면 다른 시기보다 생물의 발생 시기의 몇 주~개월이 생물 집단의 개체수 유지나 기능 유지에 훨씬 중요함이 알려져있고 온도 상승에 의해 계절학(phenology) 또한 바뀔 수 있다. 보다 정밀한 연구를 위해 단순 기후 정보를 이용한 서식지 모델링 예측 뿐 아니라 population dynamics까지 고려한 연구를 수행하여 사례연구를 제공함으로써 기후 정보의 올바른 사용 방법을 전파할 필요가 있다.

향후 관련 분야 연구를 추진할 때, 기후 자료를 어떻게 이용할지에 대한 가이드라인으로 작용할 수 있을 것이다. 기후예측 자료의 활용성을 늘리기 위해 기후자료의 접근성과 사용 편의성을 늘리고, 각 분야별 응용 프로그램과 통합할 수 있는 일원화된 프로그램의 개발하며, 사용되는 변형된 기후 자료(예: degree heating week) 등의 새로운 climate indicator를 제공할 필요성이 제기된다.

REFERENCES

- Ackerly, D. D., W. K. Cornwell, S. B. Weiss, L. E. Flint, and A. L. Flint, 2015: A geographic mosaic of climate change impacts on terrestrial vegetation: which areas are most at risk? *PLoS one*, **10**, e0130629.
- Apipattanavis, S., F. Bert, G. Podestá, and B. Rajagopalan, 2010: Linking weather generators and crop models for assessment of climate forecast outcomes. *Agricultural and forest meteorology*, **150**, 166-174.
- Bell, J. D., J. E. Johnson, and A. J. Hobday, 2011: *Vulnerability of tropical Pacific fisheries and aquaculture to climate change*. SPC FAME Digital Library.
- Bertelsmeier, C., B. Guénard, and F. Courchamp, 2013: Climate change may boost the invasion of the Asian needle ant. *PLoS One*, **8**, e75438.
- Brown, J. N., Z. Hochman, D. Holzworth, and H. Horan, 2018: Seasonal climate forecasts provide more definitive and accurate crop yield predictions. *Agricultural and Forest Meteorology*, **260-261**, 247-254, doi:10.1016/j.agrformet.2018.06.001.
- Canal, N., O. Deudon, X. Le Bris, P. Gate, G. Pigeon, M. Regimbeau, and J.-C. Calvet, 2017: Anticipation of the winter wheat growth based on seasonal weather forecasts over France. *Meteorological Applications*, **24**, 432-443.
- Cantelaube, P., and J.-M. Terres, 2005: Seasonal weather forecasts for crop yield modelling in Europe. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, **57**, 476-487.
- Capa-Morocho, M., A. V. Ines, W. E. Baethgen, B. Rodríguez-Fonseca, E. Han, and M. Ruiz-Ramos, 2016: Crop yield outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting seasonal climate forecasts with crop simulation models. *Agricultural systems*, **149**, 75-87.
- Ceglar, A., A. Toreti, C. Prodhomme, M. Zampieri, M. Turco, and F. J. Doblas-Reyes, 2018: Land-surface initialisation improves seasonal climate prediction skill for maize yield forecast. *Scientific Reports*, **8**, 1322, doi:10.1038/s41598-018-19586-6.
- Challinor, A., 2009: Towards the development of adaptation options using climate and crop yield forecasting at seasonal to multi-decadal timescales. *Environmental Science & Policy*, **12**, 453-465.
- Challinor, A. J., J. M. Slingo, T. R. Wheeler, and F. J. Doblas-Reyes, 2005: Probabilistic simulations of crop yield over western India using the DEMETER seasonal hindcast ensembles. *Tellus A*, **57**, 498-512, doi:10.1111/j.1600-0870.2005.00126.x.

- Cheung, W. W., and Coauthors, 2012: Climate-change induced tropicalisation of marine communities in Western Australia. *Marine and Freshwater Research*, **63**, 415-427.
- Fedderson, H., and U. Andersen, 2005: A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions. *Tellus A*, **57**, 398-408, doi:10.1111/j.1600-0870.2005.00102.x.
- Fellows, I., 2012: wordcloud: Word clouds. *R package version*, **2**, 109.
- Ferreira, M. T., P. Cardoso, P. A. Borges, R. Gabriel, E. B. de Azevedo, F. Reis, M. B. Araújo, and R. B. Elias, 2016: Effects of climate change on the distribution of indigenous species in oceanic islands (Azores). *Climatic Change*, **138**, 603-615.
- Frisvold, G. B., and A. Murugesan, 2012: Use of Weather Information for Agricultural Decision Making. *Wea. Climate Soc.*, **5**, 55-69, doi:10.1175/WCAS-D-12-00022.1.
- Garner, K. L., and Coauthors, 2015: Impacts of sea level rise and climate change on coastal plant species in the central California coast. *PeerJ*, **3**, e958.
- Ghosh, K., A. Singh, U. C. Mohanty, N. Acharya, R. K. Pal, K. K. Singh, and S. Pasupalak, 2015: Development of a rice yield prediction system over Bhubaneswar, India: combination of extended range forecast and CERES-rice model. *Meteorological Applications*, **22**, 525-533.
- Han, E., W. E. Baethgen, A. V. Ines, F. Mer, J. S. Souza, M. Berterretche, G. Atunex, and C. Barreira, 2018: SIMAGRI: An agro-climate decision support tool. *Computers and Electronics in Agriculture*,.
- Hansen, J. W., and M. Indeje, 2004: Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest meteorology*, **125**, 143-157.
- Hare, J. A., and Coauthors, 2012a: Cusk (*Brosme brosme*) and climate change: assessing the threat to a candidate marine fish species under the US Endangered Species Act. *ICES Journal of Marine Science*, **69**, 1753-1768.
- , M. J. Wuenschel, and M. E. Kimball, 2012b: Projecting range limits with coupled thermal tolerance-climate change models: an example based on gray snapper (*Lutjanus griseus*) along the US east coast. *PLoS One*, **7**, e52294.
- Hughes, T. P., and Coauthors, 2017: Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*, **543**, 373.
- Ihlow, F., and Coauthors, 2016: Impacts of climate change on the global invasion potential of the African clawed frog *Xenopus laevis*. *PLoS One*, **11**, e0154869.

- Izumii, T., Y. Shin, W. Kim, M. Kim, and J. Choi, 2018: Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble. *Climate Services*, doi:10.1016/j.cliser.2018.06.003. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405880717301346>.
- Isaak, D. J., S. Wollrab, D. Horan, and G. Chandler, 2012: Climate change effects on stream and river temperatures across the northwest US from 1980–2009 and implications for salmonid fishes. *Climatic Change*, **113**, 499–524.
- Jones, M. C., and W. W. Cheung, 2014: Multi-model ensemble projections of climate change effects on global marine biodiversity. *ICES Journal of Marine Science*, **72**, 741–752.
- Klemm, T., and R. A. McPherson, 2017: The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers. *Agricultural and forest meteorology*, **232**, 384–399.
- Lang, D. T., 2007: R as a Web Client—the RCurl package. *Journal of Statistical Software*, —, and C. Team, 2012: XML: Tools for parsing and generating XML within R and S-Plus. *R package version*, 3–9.
- Li, Y., M. Giuliani, and A. Castelletti, 2017: A coupled human–natural system to assess the operational value of weather and climate services for agriculture. *Hydrology and Earth System Sciences*, **21**, 4693–4709.
- Martin, T. G., H. Murphy, and A. Liedloff, 2012: Invasive species and climate change: a framework for predicting species distribution when data are scarce. *Canberra: Available: <http://www.csiro.au/resources/CAF-working-papers>. CSIRO Climate Adaptation Flagship Working Paper*.
- Martins, M. A., and Coauthors, 2018: Improving drought management in the Brazilian semiarid through crop forecasting. *Agricultural Systems*, **160**, 21–30.
- Mishra, A., J. W. Hansen, M. Dingkuhn, C. Baron, S. B. Traoré, O. Ndiaye, and M. N. Ward, 2008: Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso. *Agricultural and forest meteorology*, **148**, 1798–1814.
- Molinos, J. G., and Coauthors, 2016: Climate velocity and the future global redistribution of marine biodiversity. *Nature Climate Change*, **6**, 83.
- Ogotu, G. E. O., W. H. P. Franssen, I. Supit, P. Omondi, and R. W. A. Hutjes, 2018: Probabilistic maize yield prediction over East Africa using dynamic ensemble seasonal climate forecasts. *Agricultural and Forest Meteorology*, **250–251**, 243–261, doi:10.1016/j.agrformet.2017.12.256.

- Poloczanska, E. S., and Coauthors, 2013: Global imprint of climate change on marine life. *Nature Climate Change*, **3**, 919.
- Prisco, I., M. Carboni, and A. T. Acosta, 2013: The fate of threatened coastal dune habitats in Italy under climate change scenarios. *PLoS One*, **8**, e68850.
- Richardson, C. W., 1981: Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Resources Research*, **17**, 182–190, doi:10.1029/WR017i001p00182.
- Rivera, S., N. E. West, A. J. Hernandez, and R. D. Ramsey, 2011: Predicting the Impact of Climate Change on Cheat Grass (*Bromus tectorum*) Invasibility for Northern Utah: A GIS and Remote Sensing Approach. *Natural Resources and Environmental Issues*, **17**, 13.
- Rodriguez, D., P. de Voil, D. Hudson, J. N. Brown, P. Hayman, H. Marrou, and H. Meinke, 2018: Predicting optimum crop designs using crop models and seasonal climate forecasts. *Scientific Reports*, **8**, 2231, doi:10.1038/s41598-018-20628-2.
- Schneider, J. M., and J. D. Wiener, 2009: Progress toward filling the weather and climate forecast needs of agricultural and natural resource management. *Journal of Soil and Water Conservation*, **64**, 100A–106A, doi:10.2489/jswc.64.3.100A.
- Spillman, C. M., O. Alves, and D. A. Hudson, 2013: Predicting thermal stress for coral bleaching in the Great Barrier Reef using a coupled ocean-atmosphere seasonal forecast model. *International Journal of Climatology*, **33**, 1001–1014.
- Van der Velde, M., and L. Nisini, 2018: Performance of the MARS-crop yield forecasting system for the European Union: Assessing accuracy, in-season, and year-to-year improvements from 1993 to 2015. *Agricultural Systems*.
- White, M. P., F. D. Hilario, M. R. G. de Guzman, and M. T. A. Cinco, 2009: A Review of Climate Change Model Predictions and Scenario Selection for impacts on Asian Aquaculture.

Appendix

상세화 기법 비교

현재 기후변화 연구는 전세계적으로 매우 활발하게 진행되고 있으며, 국내 경우 1990년대 중반부터 시작되어 정부 중심으로 다수의 기후변화 영향평가 프로젝트가 추진되어 왔다. 선행 연구들에서는 특정 국가 또는 지역에 대하여 기후변화 영향평가를 수행하기 위해 다양한 GCM 산출물들을 적용하였다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이 GCM의 격(grid)간격이 크기 때문에 많은 격자점(grid point)이 대상 국가나 지역에 속하지 못하게 된다. 예를 들어, 러시아 INM_CM3.0의 경우에는 격자간격이 매우 커서 우리나라에 4개의 격자점만이 포함이 되며, 대부분의 GCM이 100km 이상의 격자간격을 가지므로 10개 이내 격자점만이 우리나라에 포함된다(이재경 2014). 따라서 우리나라 전역뿐만 아니라 지역을 대상으로 기후변화 관련 연구를 수행하기 위해서는 상세화 기법의 적용이 반드시 필요한 상황이다. 이와 같이 상세화 기법의 가장 큰 목적은 해상도가 낮은 기후정보(large-scaled climate information)들을 연구자 혹은 최종사용자(end-user)가 원하는 지역, 시간, 조건 등에 맞도록 국지 기후정보(local climate information)로 시간적·공간적 해상도를 세분화시켜주는 것이다.

상세화 기법은 크게 통계적(statistical) 상세화 기법과 역학적(dynamical) 상세화 기법으로 나누어진다. 과거부터 현재까지 통계적 상세화 기법에 대한 연구는 매우 활발하게 이루어지고 있으며, 최근에는 컴퓨팅 관련 기술의 발전으로 역학적 상세화 기법에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다.

통계적 상세화의 기본 개념은 과거 혹은 현재 대규모 기후 변수 또는 예측인자(predictor)와 지역이나 국지 변수 혹은 예측량(predictand)을 연결시키는 통계모델을 구성함으로써 지역 또는 국지 기후정보를 만들어 내는 과정이다(IPCC, 2002). 역학적 상세화 기법이 공간적 상세화의 제약(일반적으로 20~50km)이 있는 반면, 통계적 상세화 기법은 관측자료가 가용하다면 특정 지점(specific site)까지 기후정보 상세화가 가능하다(USAID, 2014). 하지만 통계적 방법은 대규모 기후상태와 지역 또는 국지 지형특성에 의하여 제약을 받을 수 있으며, 현재 통계적 상관성이 미래까지 지속되는 단점이 있다. 통계적 상세화 기법의 대표적인 방법들을 살펴보면, 전이함수를 사용하는 기법(transfer

function technique)을 이용한 연구, 기상패턴에 기반을 둔 기법(weather pattern-based technique)을 이용한 연구, 일기발생기를 이용한 기법(weather generator technique)을 이용한 연구 등이 있다.

역학적 상세화 기법은 GCM과 동일한 구조를 가지고 있으나 특정 지역에 대하여 고해상도 자료를 생산하는 물리적인 기후모델을 이용한다. 즉, GCM과 병행하여 지역 기후모델인 중규모의 기상모델을 중규모모델(nested model)으로 사용하는 방법으로서, 역학적 상세화 기법은 고분해능을 가진 RCM(Regional Climate Model)을 가동하기 위하여 초기조건, 시간에 따라 변하는 측면 기상조건, 지표 경계조건을 사용한다(IPCC, 2002). 역학적 상세화 기법은 RCM을 수행하기 위한 많은 자원과 시간이 필요하며, 특히 GCM과 연계해야하므로 기후모델에 대한 전문성이 필요하다. 표 1은 통계적 상세화 기법과 역학적 상세화 기법의 특성을 설명하고 있다.

표 1. 역학적 상세화 기법과 통계적 상세화 기법 특징 비교

	역학적 상세화 기법	통계적 상세화 기법
산출물	• 20~50km 공간해상도 정보 • 관측자료 필요 없음 • 일단위 시계열 자료 • 극한사상에 대한 시나리오	• 다양한 공간해상도 정보 • 일단위 시계열(일부 기법) • 극한사상에 대한 시나리오(일부 기법) • 관측자료 통계특성을 가진 시나리오
제약점	• 고성능 계산 자원과 전문가 필요 • 대용량의 입력자료 필요 • 신뢰성(정확성)이 높은 모의능력을 가진 GCM 필요	• 중/소 성능 계산 자원 • 중/소용량의 입력자료 필요 • 충분한 양의 관측자료 필요 • 신뢰성(정확성)이 높은 모의능력을 가진 GCM 필요
장점	• 물리적인 관계 기반 • 작은 GCM 격자크기에서 발생하는 대기과 지표면과 정 모의 • 과거 관측자료에 제약받지 않음 • 기후변화 불확실성 분석을 위해 RCM 양상별 모의 가능	• 저비용으로 다양한 배출시나리오와 많은 GCM 결합 모의 가능 • 다양한 목적을 위해 간단한 기법부터 정교한 기법까지 유연하게 적용 가능 • 다른 연구까지 혹은 전지구와 소규모 지역까지 동일한 기법 적용 가능 • 관측자료를 기반으로 미래 기후전망 • GCM 산출물을 이용하여 지점규모까지의 기후정보 제공 가능
단점	• 고비용 소요 • RCM 한계상 한 두 개의 배출시나리오/GCM 모의 가능 • 전지구에 대하여 모든 지역을 대상으로 RCM 모의 불가능 • RCM 산출물에 대하여 또 다른 상세화 기법 적용이 필요하거나 오차보정 필요 • 상세화된 결과는 RCM 제약조건과 GCM 오차의 영향을 받음	• 고품질의 장기 관측자료 필요 • 대규모와 국지적 통계특성 관계가 미래에도 이어짐 • 간단한 기법들은 일단위 해상도만 제공 가능
활용성	• 국가나 지역규모의 기후변화 영향평가 수행가능 • 국가기관에서 미래 기후변화 적응전략 계획 수립에 정보 제공 • 다양한 지역적 정보를 활용한 기후변화 영향평가 가능	• Weather generator 기법은 농작물 생산, 수자원, 기타 자연자원을 위한 모의 및 관리에 적용 가능 • Delta/change factor 기법은 기후변화 적응전략 계획 수립에 적용 가능

1. 통계적 상세화 기법

통계적 상세화 기법은 과거 대규모 대기상태의 조건 등과 국지적 기후특성의 통계적 (혹은 경험적) 관계를 모델로 구성하는 것으로부터 출발한다. 이렇게 구성된 통계적 모델은 GCM에 의해 전망된 미래 대규모 기후 조건이나 변수(예측인자, predictors)를 이용하여 국지 기후 정보나 변수들(예측량, predictands)들을 생산한다. 다시 언급하면, GCM 모의결과인 예측변수들이 통계적 상세화 기법의 입력자료로 들어가 원하는 시간적·지역적 기후변수들을 산출하게 된다.

이러한 통계적 상세화 기법을 이용하여 효과적이고 정확성이 높은 산출물을 얻기 위해서는 세 가지 가정이 존재한다. 첫째, 대규모 기후 변수와 국지 기후 변수 사이의 통계적 관계는 시간에 불변하며 상호 간에 유의한 물리적 관계를 가지고 있다는 가정이다(IPCC, 2002). 이는 정상성 가정(stationary assumption)을 의미하며, 두 변수의 통계적 특성은 미래의 기후조건에서도 유지된다. 둘째, 대규모 기후 변수는 기후변화의 특성을 포함한다는 가정이다. 즉, 대규모 기후 변수들은 미래 발생하는 어떠한 변화들을 나타낸다는 의미이다. 셋째, GCM은 미래 대규모 기후 변수들을 정확하게 모의한다는 가정이다. 과거 관측 변수들을 잘 모의하는 GCM들은 미래 기후변화에 의한 영향들도 잘 모의하며, 미래 변화 모의결과는 GCM 모델에 의한 산출물이라는 의미이다.

통계적 상세화 기법은 앞서 언급한 바와 같이 크게 세 가지로 선형관계를 이용하는 방법, 기상패턴을 이용하는 방법, 기상발생기를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.

1.1 선형관계를 이용하는 방법

첫 번째로 선형관계를 이용하는 방법(linear method)이다. 이 방법은 대규모 기후 변수와 국지 기후 변수사이의 선형관계를 이용한다(Dibike and Coulibaly 2005; Hay et al. 2000; USAID 2014; Wilby and Wigley 1997). 선형방법은 적용이 간편하고 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이나 모델의 매개변수에 매우 민감하기 때문에 대규모 기후 변수의 선택이 중요하다. 특히 대규모 기후 변수와 국지 기후 변수가 정규분포(normal distribution)를 따라야 하기 때문에 이를 위한 보정방법이 추가적으로 필요할

수 있다. 예를 들어, 일단위 강수의 경우 정규분포를 거의 따르지 않기 때문에 선형방법을 적용하는데 한계점이 존재한다. 선형방법을 이용하는 통계적 상세화 기법을 살펴보면 다음과 같다.

(1) Delta method

이 방법은 가장 간단한 통계적 상세화 기법 중 하나이다. 이 방법의 개념은 미래와 현재 모의 기후의 비율인 '변화인자(change factor)'를 현재 국지 기후 변수에 곱함으로써, 미래 국지 기후 변수를 얻는 방법이다. 이 방법의 단점은 GCM 격자점 안에 위치한 모든 지역에는 동일한 변화인자를 적용함으로써 미래에 국지적으로 기후가 다소 다를 수 있는 점은 반영할 수 없다는 것이다.

(2) 선형회귀방법

단순(simple) 선형회귀를 사용하는 방법은 하나의 대규모 기후 변수와 하나의 국지 기후 변수의 선형적인 관계를 모델로 구성함에 있어서 매우 널리 사용된다. 한번 모델이 만들어지면, GCM 모의 결과를 입력자료로 하여 미래 국지 기후 변수를 산출한다. 다른 방법으로 하나의 변수가 아닌 다수의 변수를 이용하고자 하는 경우, 다중(multiple) 선형 회귀방법이 이용된다. 이 방법은 선형회귀에 사용되는 모든 변수들은 정규분포를 따라야 한다는 가정에 근거한다.

(3) 시공간적 방법들

시간과 공간적 상세화가 동시에 가능한 대표적인 시공간적(spatiotemporal) 방법들로 Canonical Correlation Analysis(CCA)와 Singular Value Decomposition(SVD)가 있다. 두 방법은 시간에 따른 대규모 기후 변수와 국지 기후 변수의 관계에 따라 상세화를 수행한 후, 두 변수의 공간적인 관계에 따라 상세화를 한다. 공간적인 패턴을 결정함에 있어서 CCA 방법은 시간적 상관관계를 최대화하는 반면, SVD 방법은 공분산을 최대화한다(Wilks 1995). 이 방법들은 대규모 기후 변수와 국지 기후 변수 모두 정규분포를

따라야하며, 방법에서 사용된 공분산이 두 변수간의 인과관계를 명확하게 설명하지 못하는 물리적인 한계점이 존재한다.

1.2 기상패턴을 이용하는 방법

기상패턴(weather pattern)을 이용한 방법은 일반적으로 대기 순환이 비슷한 지역끼리 기상자료를 묶어 기상패턴을 생성하고, 이 기상패턴을 큰 지역규모와 작은 지역규모의 기후 상관성을 이용하여 큰 지역규모에서 작은 지역규모로 기상패턴을 축소화하면서 상세화를 수행한다(Boe and Terray 2008). 이 방법의 가장 큰 제약조건은 기상패턴에 의해 생성된 강수가 GCM 강수 시나리오의 전망과 항상 일치하지는 않는다는 점이다. 또한 이 방법에서는 지역규모에 대한 편차보정효과는 있으나 특정지점에 대한 효과를 보기는 힘든 단점이 있다. 또한 선형방법보다 상대적으로 큰 계산능력이 요구된다. 기상패턴을 이용하는 통계적 상세화 기법을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 아날로그 방법

아날로그(analog) 방법은 가장 간단한 기상패턴을 이용하는 상세화 기법이다. 이 방법의 기본 개념은 GCM에 의해 모의되는 대규모 기후 변수의 패턴을 과거 관측 변수와 비교하고 가장 유사한 패턴을 선택하는 방법이다. 이 방법은 적절한 유사한 기후패턴을 찾기 위해서는 충분한 과거 관측자료가 필요하다(Zorita and von Storch, 1999). 이 방법의 장점은 대규모/국지 기후 변수가 정규분포의 적합여부에 상관없이 적용이 가능하며, 예를 들어 정규분포를 따르지 않는 일단위 강수 상세화에도 적합하다. 하지만 아날로그 방법은 과거 관측자료에 기반을 두기 때문에 관측자료의 범위를 넘어가는 강수량은 산출하지 못하는 단점이 존재한다.

(2) 군집분석

군집분석(cluster analysis)은 모집단 또는 범주에 대한 사전정보가 없는 경우에 주어

진 자료들 사이의 거리(distance) 또는 유사성(similarity)을 이용하여 전체를 몇 개의 집단으로 그룹화(grouping)하는 방법이며(Wilks 1995), 크게 비계층적(nonhierarchical) 방법과 계층적(hierarchical) 방법으로 나눌 수 있다. 또한 K-평균(means) 군집분석 또한 널리 사용되는 군집방법이다. 군집분석은 그룹의 수 혹은 그룹 구조에 대한 가정이 없으며, 오직 자료들 사이의 거리나 유사성에 의해 그룹을 형성하고, 형성된 그룹의 특성을 파악하여 그룹들 사이의 관계를 분석하는 방법이다. 미래 국지 기후 변수를 산출하기 위해 우선 GCM에서 모의된 대규모 기후 변수와 과거 관측 대규모 변수와 비교한다. 그 다음 미래 대규모 기후 변수값을 하나의 군집으로 분류하고 이 군집과 관련된 임의의 과거 관측값을 국지 기후 변수값으로 결정하는 방법이다(Benestad 2008).

(3) 인공신경망

인공신경망(Artificial Neural Network, 이하 ANN)이란 인간의 두뇌에서 행하여지는 패턴인식 등을 학습할 때 일어난 연산과정을 모방하여 고안된 것으로, 여러 요소 등을 상호 연결시켜 병렬 계산이 가능하게 하고 패턴인식 등의 수행을 가능하게 해주는 방법이다. 이와 같이 ANN에서 입력자료로부터 출력자료를 얻기 위해 연결된 과정들은 단계 비선형 함수(stepwise nonlinear function)로 구성이 된다(Benestad 2008). ANN 모델 구성은 다층(multi-layer) 인공신경망 구조를 널리 이용하며, 일반적으로 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)로 구성된 3계층 신경망이 이용된다.

ANN은 과거 관측자료를 이용하여 학습(learning)을 시켜야 하며 이를 통하여 각 층 끼리 연결되는 가중치가 결정된다. 적절하게 학습된 ANN에 입력자료로 대규모 기후 변수값들을 대입하면 국지 기후 변수값들을 얻을 수 있다. ANN의 큰 장점은 비선형 모델이므로 기존 선형방법이 가지는 여러 가정의 한계점을 극복할 수 있다. 하지만 ANN을 이용하여 고품질의 국지 기후 변수값을 얻기 위해서는 장기간 좋은 품질 관측값을 이용하여 학습시켜야 하는 단점이 존재한다. 또한 ANN는 은닉층에서 발생하는 과정을 물리적으로 설명하기 어려운 블랙박스(black box) 모델이라는 한계를 지닌다.

1.3 기상발생기를 이용하는 방법

기상발생기(weather generator)를 이용하는 방법(Wilby and Wigley 1997; Dibike and Coulibaly 2005)은 강수의 확률분포와 연쇄 상관성을 이용하여 일기를 발생시키는 방법을 주로 이용하며, 관측된 기상요소의 재생산이 가능하다는 장점이 있다. 이 방법은 일반적으로 시간적 상세화에 많이 적용된다. 예를 들어 연 혹은 월단위 강수량과 관계가 있는 일단위로 발생하는 기상변수(강수, 최대/최소 기온, 습도 등)를 발생시키는데 적용될 수 있다. 이러한 일단위 자료들은 GCM에서 생산하는데 한계점이 있을 뿐만 아니라 국지적으로 발생하는 다양한 기후변화 영향평가를 수행하는데 있어 매우 중요하고 필요한 자료이다. 하지만 기상발생기를 이용하는 방법은 예상치 못한 극치 강수발생이나 기온변화를 모의하기가 어렵다는 단점이 있다. 기상발생기를 이용하는 상세화 기법은 다음과 같다.

(1) Long Ashton Research Station Weather Generator

Long Ashton Research Station Weather Generator(이하 LARS-WG)는 Racsko et al.(1991)이 한 지점에서 일단위 기상 변수의 시계열을 모의하기 위해 개발한 기상발생기이다. LARS-WG의 강수발생 모의는 강수일과 무강수일, 또는 강수의 연속성과 분포 특성에 기초한다. 강수일과 무강수일의 발생분포는 Markov chain 1차 방정식을 이용하며, 강수일에 대한 강수량의 분포는 경험적(empirical) 분포를 이용한다. 또한 LARS-WG에는 일별 최저/최고 온도와 복사량에 대한 분포도 구하게 되며, 이는 강수일 및 무강수일과 관련된다. 최종적으로 앞서 구한 여러 기상 변수들의 분포들을 조합하여 강수/무강수일 기간, 평균 온도, 복사량의 변화 등을 산출한다.

(2) MarkSim GCM

MarkSim GCM은 GCM 전망을 기반으로 전지구 어떤 지역(혹은 지점)에 대해서도 일단위 국지 기후 변수를 산출가능한 기상발생기이다(CCAFS 2011). MarkSim GCM은 먼저 delta method를 이용하여 공간적 상세화를 수행하고, 그 다음 전지구적으로 수천 지점 이상의 관측 변수값을 이용하여 비슷한 패턴끼리 군집분석을 수행하고 마지막으로

아날로그 방법과 동일하게 GCM에 의해 모의되는 대규모 기후 변수의 패턴을 과거 관측 변수와 비교하고 가장 유사한 패턴을 선택한다. MarkSim GCM의 단점은 미래 기후 변수값이 현재 관측값 이상의 다른 값들을 산출하지 못한다는 점이다.

표 2. 통계적 상세화 기법 별 장단점

방법	장점	단점
선형방법 (공간적 상세화)	• 상대적으로 바로 적용 가능 • 대규모 기후 변수들의 전 기간에 대하여 적용 가능	• 대규모/국지 기후 변수의 정규화(normality) 필요 • 정규분포를 따르지 않으면 적용 불가 • 극한사상에는 적합하지 않음
기상패턴 (시공간 상세화)	• 물리적인 설명 가능 • 변수의 분포에 상관없이 적용 가능	• 상대적으로 추가적인 처리과정 필요 • 대용량의 자료와 이를 처리할 수 있는 계산능력 필요 • 과거 관측자료 범위 이외의 자료 산출은 불가능
기상발생기 (시공간 상세화)	• 강수/무강수기간에 대한 모의가능 • 기후변화 불확실성 분석을 위한 많은 시계열 자료 생산 가능 • 고품질 자료 생산 가능	• 모델구성에 있어서 고품질 자료 필요 • 몇 기상발생기 모델만이 다변량변수간의 간섭정도 파악 가능 • 여러 시계열 자료의 생산이 필요하며, 이를 통계적 후처리할 수 있는 과정 필요

1.4 복합적인 방법

앞서 살펴본 대표적인 통계적 상세화 기법의 단점을 극복하기 위해 최근에는 여러 기법을 복합적으로 사용하는 연구들이 많이 시도되고 있으며, 몇 가지 방법들을 소개하면 다음과 같다.

(1) Bias-Corrected Spatial Disaggregation (BCSD)

Bias-Corrected Spatial Disaggregation(이하 BCSD)는 수문분야와 같이 일부 공간적 상관성을 필요로 하는 영향모델에 적합하도록 대규모 기후모델의 산출변수들을 시간적·공간적으로 상세화하기 위해 개발된 방법이다(Wood et al. 2002). BCSD는 두 과정으로 수행이 되는데 첫 번째는 과거 기준기간(baseline)의 자료를 이용하여 오차를 보정하는 과정이다. 이 과정에서는 월단위 자료를 이용하며, 오차보정을 위해 quantile mapping 방법을 이용한다. 다음으로 delta method를 이용하여 시공간적으로 분해하는 과정을 수행한다. 우선 월단위 대규모 기후 변수들을 공간적으로 분해하고 다음으로 과거 관측자료를 기반으로 하여 일단위로 분해하는 과정을 거친다.

(2) Statistical Downscaling Model

Statistical Downscaling Model(이하 SDSM)은 대규모/국지 기후 변수간의 다중회귀분석 모델을 구성하는 방법이다. 과거 기준기간동안 관측자료 및 National Centers for Environmental Prediction(NCEP) 재분석(reanalysis) 자료와 GCM으로부터 모의된 대규모 기후 변수를 기반으로 일단위 국지 기후 변수값들을 산출한다. SDSM의 장점은 모델을 무료로 배포(<http://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/>) 받아 사용할 수 있으며, 다양한 국지 기후 변수에 적용이 가능하다. 또한 많은 시계열 자료 생산이 가능하므로 기후변화 불확실성 분석에 용이하며, 국지 기후특성을 매우 잘 반영할 수 있다. 하지만 GCM이 가지고 있는 오차가 그대로 유지되며, 일단위로 변환된 GCM 변수값들만 사용이 가능하다. 추가적으로 기후 변수들간의 상관분석, 회귀식모델의 매개변수 추정과 이를 이용한 미래 국지 기후 변수값들의 생성, 다양한 시계열 자료 생성 등이 가능하다.

(3) Bias-Corrected Constructed Analogues (BCCA)

Constructed Analogue(이하 CA) 방법은 관측값과 국지 기후 변수와의 관계를 이용하여 대규모 기후 변수를 국지 기후 변수로 상세화하는 방법이다(Maurer and Hidalgo 2008). BCSD와 CA 방법을 비교하면, BCSD는 월단위 기후 변수를 다루며 CA 방법은 일단위 기후 변수에 초점을 맞추고 있다. 또한 BCSD는 오차보정을 위해 특정값을 사용하나 CA 방법은 평균적인 경향을 반영한다. Bias-Corrected Constructed Analogues(BCCA)는 CA 방법에 BCSD의 오차보정기법을 조합한 방법이다(Maurer and Hidalgo 2008; Maurer et al. 2010). BCCA에서는 월별 일단위 기후 변수와 관측값의 누가분포함수(cumulative distribution function)를 quantile mapping을 이용하여 보정하게 되며, 이후 CA 방법과 동일한 과정을 거치게 된다. 장기 자료는 일단위 기후 변수로 상세화한 자료를 합하여 장기 자료로 사용하며, 대륙 규모의 넓은 지역 자료도 국지크기 자료를 합하여 사용하게 된다.

2. 역학적 상세화 기법

역학적 상세화 기법은 GCM 모의 결과를 국지기후모델(Regional Circulation Model, RCM)에 입력자료로 하여 국지 기후를 모의하는 기법이다. 다시 말하면, 역학적 상세화 기법은 GCM을 기반으로 RCM을 중규모모델(nest model)로 사용하는 방법이며, 시간에 따라 변하는 초기조건과 모델 측면 기상조건 그리고 지표면 경계조건을 사용한다(IPCC 2002). RCM의 구조나 수행은 GCM과 동일하나 GCM보다 고해상도 자료를 산출하며 보다 국지 기후 특성을 잘 모의한다는 특성이 있다.

GCM은 여러 과정을 통하여 대기 요소들의 변화에 따른 전지구의 기후순환을 모의하나 성긴(coarse) 해상도로 인한 제약이 있으나 RCM은 20~50km의 고해상도로 국지적으로 발생하는 기상변화를 보다 현실적으로 모의가 가능하다. 지금까지 역학적 상세화 기법은 RCM 모의결과가 GCM 모의에 되먹임(feedback)되지 않는 일방적인 단방향 형태로만 수행되었다. 대규모 강제력과 RCM에 대한 전지구 순환의 반응을 모의하기 위하여 GCM을 사용하며, 이는 물리적 관계를 기반으로 하여 해양대기순환모델(Oceanic General Circulation Model, 이하 OGCM) 격자 규모 강제력을 설명하고, 보다 자세하게 대기순환과 기후변수들을 모의할 때 품질을 증대시키기 위한 것이다.

RCM을 이용하는 역학적 상세화 기법은 상대적으로 국지적인 지표면 정보를 더 잘 반영할 수 있으며, 해당 지역에 대하여 고해상도의 기후 변수 산출이 가능하다. 또한 과거 기간부터 미래 전망까지 수십 년 모의가 가능하며, 지역규모로 작용하는 기후 되먹임 작용의 모의가 가능하다. 최근 RCM들은 수문, 해양, 에어로졸 등의 다른 기후과정 모델들과 결합하여 모의하기도 한다. 하지만 RCM을 모의하기 위해서는 고성능의 계산능력이 필요하며, 그만큼의 시간도 소요된다. 또한 보다 상세한 기후 변수값을 산출하기 위해서는 보다 정확하고 많은 입력정보가 필요하게 되며, 보다 복잡한 물리적인 과정이 필요하다. RCM도 해당 지역의 평균적인 기후 변수의 변화는 모의가 가능하나 대류성 강수(convective precipitation)를 정확하게 모의하기에는 아직까지 한계가 존재한다(Im et al. 2010). 이는 대부분의 RCM의 공통적인 한계점이며, 통계적인 오차보정을 통하여 어느 정도 관측값에 가깝도록 모의정확성을 향상시킬 수 있다(Brown et al. 2008).

RCM의 초기 및 경계조건들은 GCM 모의결과로부터 이어지기 때문에 RCM 모의결과는 GCM의 정확성에 많이 의존될 수 밖에 없다 즉, GCM 오차가 RCM까지 이어진다는 의미이기도 하다. 추가적으로 최소 10km 이상인 RCM의 해상도는 아직 수자원, 농업, 임업, 도시방재 등에 적용되기에는 여전히 성긴 해상도이다. 따라서 이를 실제적으로 타 분야에 적용하기 위해서는 보다 고해상도 자료가 필요하며, 이를 위해 통계적 상세화 기법이 추가적으로 적용되어야 한다. 한국 기상청에서도 한반도에 대해 HadGEM3-RA를 통해 역학적으로 상세화된 12.5km 자료를 통계적 방법을 적용하여 1km 해상도의 정보를 생산하였다.

RCM은 내부적으로 구성하고 있는 역학적 기법들과 물리적인 모수화들이 다르기 때문에 동일한 GCM 모의결과를 기반으로 수행하더라도 전혀 다른 결과를 얻을 수 있다. 통계적 상세화 기법으로 추가적인 상세화를 수행하더라도 이 결과도 RCM 상세화 결과에 의존하기 때문에 주의하여야 한다. 따라서 통계적 상세화 기법과 마찬가지로 역학적 상세화 기법이 물리적 기반이라고는 하나 RCM 모델마다 다른 결과들을 나타내는데, 이는 기후전망의 불확실성을 증가시키는 하나의 요인으로 작용할 수 있다.

3. 참고문헌

- 이재경 (2014). *수자원분야 기후변화 영향평가를 위한 시나리오 선정과 불확실성 정량화*. 박사학위, 서울대학교.
- Benestad, R.E. (2008). *Empirical-Statistical Downscaling*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore
- Boe, J., and Terray, L. (2008). "A weather type approach to analysing winter precipitation in France: 20th century trends and role of anthropogenic forcing." *Journal of Climate*, Vol. 21, No. 13, pp. 3118-3133.
- Brown, C., Greene, A.M., Block, P., and Giannini, A. (2008). *Review of downscaling methodologies for Africa climate applications*. IRI Technical Report 08-05: IRI Downscaling Report, International Research Institute for Climate and Society, Columbia University.
- CCAFS. (2011). *MarkSim GCM: generating plausible weather data for future climates. Using Climate Scenarios and Analogues for Designing Adaptation Strategies in Agriculture*. Kathmandu, Nepal.
- Dibike, Y.B., and Coulibaly, P. (2005). "Hydrologic impact of climate change in the saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models." *Journal of Hydrology*, Vol. 307(1-4), pp. 145-163.
- Hay, L.E., Wilby, R.L., and Leavesley, G.H. (2000). "A comparison of delta change and downscaling GCM scenarios for three mountainous basins in the United States." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 36, No. 2, pp. 387-397.
- Im, E.S., Jung, I.W., Chang, H., Bae, D.H., and Kwon, W.T. (2010). "Hydroclimatological response to dynamically downscaled climate change simulations for Korean basins", *Climatic Change*, Vol. 100, No. 3, pp. 485-508.
- IPCC (2002). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptations, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Maurer, E.P., and Hidalgo, H.G. (2008). "Utility of daily vs. monthly large-scale climate data: an intercomparison of two statistical downscaling methods." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 12, pp. 551-563.
- Maurer, E.P., Hidalgo, H.G., Das, T., Dettinger, M.D., and Cayan, D.R. (2010). "The utility

- of daily large-scale climate data in the assessment of climate change impacts on daily streamflow in California.” *Hydrology and Earth System and Science*, Vol. 14, pp. 1125–1138.
- Racsko, P., Szeidl, L., and Semenov, M. (1991). “A serial approach to local stochastic weather models.” *Ecological Modelling*, Vol. 57, pp. 27–41.
- USAID (2014). *A review of downscaling methods for climate change projections*. Tetra Tech ARD.
- Wilby, R.L., and Wigley, T.M.L. (1997). “Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations.” *Progress in Physical Geography*, Vol. 21, No. 4, pp. 530–548.
- Wilks, D.S. (1995). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. San Diego, CA, Elsevier.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., and Lettenmaier, D.P. (2002). “Long range experimental hydrologic forecasting for the Eastern U.S.” *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. D20, pp. 4429.
- Zorita, E., and von Storch, H. (1999). “The analog method as a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods.” *Journal of Climate*, Vol. 12, No. 8, pp. 2474–2489.

【연구자】

유태우 선임연구원

신용희 선임연구원

김광형 선임연구원

연구보고서 2018-12

**기후정보 Tailoring 기술의 활용 방안 연구
(분야별 기후정보 활용 프레임워크 개발)**

I S B N 979-11-5698-244-9

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

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