



정 임 국
APEC기후센터 기후사업본부
/ 연구원
igjung@apcc21.org



음 형 일
Alberta Environment and
Parks, Environmental
Monitoring and Science
Division / Surface Water
Modeller
Hyung.Eum@gov.ab.ca



이 은 정
APEC기후센터 기후사업본부
/ 연구원
ejlee8885@apcc21.org



박 지 훈
APEC기후센터 기후사업본부
/ 선임연구원
gtjihoon@apcc21.org



조 재 필
APEC기후센터 기후사업본부
/ 서비스개발팀장
jpcho89@apcc21.org

기후변화 시나리오 자료의 불확실성 고려를 위한 대표 GCM 선정기법 개발

1. 서론

기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental panel of climate change, IPCC)의 5차 보고서는 과학적인 정보를 바탕으로 작성되었으며, 이는 기후모형들의 상호 비교를 목적으로 하는 CMIP5(The 5th phase of the coupled model intercomparison project)를 통해 제공된 전구기후모델(General Circulation Model, GCM)의 전망 결과를 사용하였다. GCM 모델링 결과는 온실가스 배출시나리오에 기반하여 기후변화를 물리적으로 해석한 자료로써 기후변화 관련 적응 정책 수립을 위해 활용 가능한 가장 과학적인 정보이다. 따라서 농업 및 수자원 등의 응용분야에서 GCM 결과를 이용한 기후변화에 따른 영향 및 취약성 평가 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 GCM 결과를 지역 단위의 응용분야에 실질적으로 활용하기 위해서는 상세화(downscaling) 절차가 반드시 필요하며, 상세화 전후의 결과에 대한 평가가 필요하다.

기후변화 관련 연구에 사용되는 전구기후모델은 지구시스템을 모사하는 과정에서 발생하는 역학적 모수화의 차이, 연직 및 수평 공간해상도의 차이 등으로 인해 기후변화를 모의하는 데 있어 모델 간 상이한 성능을 보인다. 이와 같은 이유로 기후변화 시나리오 자료의 불확실성을 고려하기 위해서는 특정 GCM을 사용하기보다 다중모형앙상블(Multi-Model Ensemble, MME)을 사용하는 것이 필요한 것으로 알려져 있다. 하지만 전체 GCM의 개수가 적지 않기 때문에 분야별 적용에 있어서 경우에 따라서는 모든 모델을 사용하여 분석하기에는 시간적으로 많은 제약이 생길 수 있다.

이 경우 일부 특정 모델을 선택하여 분석을 수행하는 것이 필요하며, 선택된 모델이 지역기후를 잘 묘사하는지에 대한 평가를 수행해야 한다.

따라서 본 연구는 과거 재현성과 미래 불확실성을 고려하여 지역 기후에 적합한 대표 GCM을 선정하는 기법 및 결과를 제시함으로써 수자원 분야를 포함한 부문별 연구자가 기후변화 영향 및 취약성 평가를 위해 적합한 GCM을 선정하여 활용하는 데 있어서 도움을 주고자 수행되었다.

2. CMIP5 기후변화 시나리오 상세화 및 대표 GCM 선정

수자원 분야에 활용하기 위한 상세화 자료 생산 및 대표 GCM 선정은 그림 1과 같이 세 단계를 거쳐 선정되었다. 첫 번째 단계에서는 불확실성을 고려하기 위해 다중 모형의 기후변화 시나리오 자료

를 수집하여 한반도 영역에 대하여 추출한 후 기상 관측소를 대상으로 상세화를 수행하였다. 두 번째 단계에서는 상세화 이전과 이후의 기후변화 시나리오 자료와 과거기간의 관측자료와 비교하여 기후의 다양한 특성을 얼마나 잘 재현하는지에 대한 분석을 통해 재현성이 나쁜 GCM들을 제외하였다. 세 번째 단계에서는 미래기간에 대해서 다중 모형이 갖는 전체 불확실성의 80% 이상을 설명할 수 있는 GCM의 개수와 순위를 결정하였다.

2.1 CMIP5 기후변화시나리오 수집 및 상세화 자료 생산

전지구기후모형(Global Climate Model, GCM)을 이용하여 생산된 미래 기후변화 전망의 불확실성을 고려하기 위해서는 다중모형앙상블(Multi-Model Ensemble) 기반의 접근이 필요하다. 본 연구에서는 CMIP5 모델의 다양한 시간 규모 중

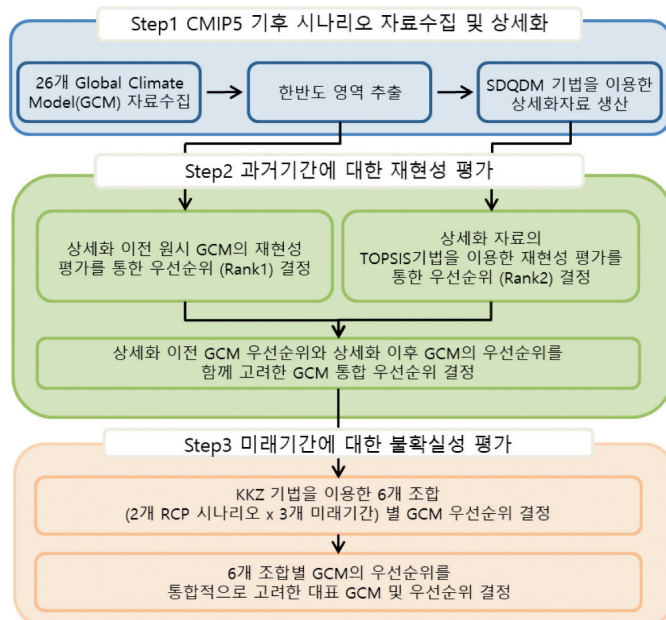


그림 1. 대표 GCM 선정을 위한 상세화 및 기후모델 평가 흐름도

일 단위(daily)의 26개 GCM 자료를 수집하여 사용하였다. 기후변화 시나리오 자료는 과거기간(historical)에 대한 모의 결과에 더하여 미래 기간에 대해 온실가스 농도를 고려하여 선정된 4가지의 Representative Concentration Pathways (RCPs) 시나리오 중에서 핵심 시나리오로 제시된 RCP4.5 및 RCP8.5 시나리오 자료를 수집하였다. 수집된 변수는 수자원 분석에 필수적인 강수량, 최저기온, 최고기온 등 3개 변수이며 수집된 모든 GCM 자료는 모형에 따라 다양한 공간해상도를 가지고 있다.

수집된 CMIP5 자료는 전 지구 규모의 자료로서 한반도 주변을 대상으로 하는 GCM의 과거 관측자료와 비교를 통한 재현성 평가와 기상청에서 제공하는 기상 관측소에 대한 상세화 자료를 생산하기 위해서 한반도 및 동아시아 주변 영역을 대상으로 자료를 추출하여 사용하였다.

추출된 한반도 영역의 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 기상 관측소에 대한 상세화 자료를 생산하였다. 다양한 상세화 기법들 중에서 Spatial Disaggregation and Quantile Delta Mapping(SDQDM, Eum et al., 2016) 기법을 선정하였다. SDQDM은 BCSD(Wood et al., 2004, Abatzoglou and Brown, 2012)와 QDM(Cannon et al., 2015)의 장점을 결합한 통계적 상세화 방법으로써 미래기간의 극값 구간에 대해서도 상세화 기법을 적용하기 이전 GCM이 갖고 있는 장기추세를 가장 잘 재현하는 것으로 평가되었다.

기후는 일반적으로 기상 현상의 장기적인 평균을 의미하며 보통 30년 이상을 사용한다. 국내의 경우 600개 이상의 자동기상관측(Automated

Weather Station, AWS) 자료가 있으나 대부분 2000년 이후부터 관측이 시작되어 관측기간이 짧고 다수의 관측소에서 많은 결측치를 포함하고 있다. 따라서 통계적 상세화에 필요한 관측자료로 국내 60개 ASOS(Automated Synoptic Observing System) 관측점을 대상으로 상세화를 실시하였다. 상세화 자료의 기간 설정은 CMIP5 모의 설계가 과거기간을 2005년까지로 고려하였기 때문에 2005년을 기준으로 30년 기간인 1976-2005년을 과거기간으로 사용한 반면, 미래기간은 근 미래, 중간미래, 먼 미래에 대하여 2011~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년으로 각각 30년의 기간을 설정하여 상세화 자료를 생산 분석하였다.

2.2 과거기간에 대한 GCM의 재현성 평가

통계적 상세화 방법은 역학적 상세화 방법과 비교하여 비용이 적게 들고 관측자료와 비교하여 기후 모형이 갖고 있는 계통오차(bias)를 쉽게 보정할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 이는 반대로 상세화된 자료만을 이용하여 과거 기후특성에 대한 GCM의 재현성을 평가하는 경우, 상세화 이전의 GCM이 대상 지역의 시공간적인 기후특성을 잘 반영하지 못하는 상황임에도 상세화 과정 중 편이보정(bias-correction)을 거쳐 이후 수행되는 분석에 사용될 수 있는 문제를 내포하고 있다. 예를 들어 한반도 지역 부근과 같이 몬순의 영향을 받는 지역에서는 모형마다 다른 몬순 특성의 재현성 평가가 필요하고 이는 최종적인 수자원 분야 평가 결과에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 편이보정 전과 후의 자료를 이용하여 과거 기간에 대한 GCM 자료 및 상세화 자료의 재현성 평가를 통해서 한반도 주변의 기후특성을 잘 반영하지 못하는 GCM을 이후 분석에서 제외하는 접근 방법을 선택하였다.

2.2.1 계통오차 보정 이전 GCM의 한반도 지역 재현성 평가

한반도 지역에 대한 기후모형 자체의 기후 모사력 비교 분석을 위해서는 기상관측소의 관측 자료를 사용하는 대신에 강수의 경우 GPCP 일 단위 자료를, 기온의 경우에는 NCEP/NCAR 일 단위 재분석 자료를 관측으로 사용하였으며, 기후모형 자료의 경우 사용된 재분석 자료의 공간해상도와 동일하게 맞추어 분석하기 위해 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (대략 250 km)의 공간해상도로 변환하여 사용하였다.

강수 및 최고기온, 최저기온에 대한 기후의 공간적 분포 특성(spatial climatology)과 연변동성(interannual variability)의 모사력을 각 모형별, 계절별로 평가함으로써 모의 특성을 살펴보았다. 또한 개별 GCM 모형 및 재분석 자료로부터 극한기후지수(Climate Extreme Indices)를 산출하여 각 모형별 극한기후의 재현성을 비교하였다. 또한, 한반도 강수 패턴은 동아시아 몬순의 영향을 많이 받으므로 동아시아 지역에 대한 과거기간 몬순의 재현성을 연간 주기(annual cycle)의 경험적 직교 함수(Empirical orthogonal function, EOF)의 1번째 모드로 평가하였다. 위와 같은 개별 재현성 평가 결과를 바탕으로 CMIP5 모형별 종합적인 평가를 위한 matrix를 구축하기 위해, 각 분석 결과로부터 공간 상관도(Pattern correlation coefficient, PCC)와 오차(Normalized root-mean-square error, NRMSE)를 모델별로 산정하여 점수를 부여하고 각 지수별로 부여된 점수를 모수 합산하고 이를 정규화 하였다.

2.2.2 상세화 자료의 재현성 평가

상세화된 다양한 기후 시나리오에 대한 정밀한 평가를 위해서는 다양한 정보를 제공할 수 있는 표준화된 평가체계가 필요하다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제안한 기후의 편차(climatological biases), 상관성(correlation), 변동성(variance), 극한사상(extremes), 연속성(persistence)와 같이 5개의 영역으로 구분한 평가체계(Hayhoe, 2010)와 더불어 NCPP(National Climate Predictions & Projections)의 진일보한 평가체계를 모두 고려하여 새로운 평가체계를 제시하였다. 즉, 시계열, 분포, 연속성, 극한사상, 그리고 공간상관성과 같이 5가지 평가기준으로 구성된 표준체계를 제시하였다. 제시된 5가지 기준별로 적합한 평가지표(indicator)를 선정한 후 강수, 최대 및 최저기온과 같이 기후변수 별로 적용하여 평가하였다. 사용된 평가지표는 WMO(World Meteorological Organization)에서 제시하고 있는 ETCCDI(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)라는 극한기후지수를 사용하였으며 각 지수별 설명을 제시하였다(Zhang et al., 2011). 제시된 27개 지수 중에서 총 24개의 지수가 사용되었으며 평가 시 지수별 값의 크기에 의한 영향을 최소화하기 위하여 표준화된 평균 및 분산을 이용하여 계산된 유클리디안 거리를 평가지표 산정에 사용하였다.

앞서 언급된 5가지 기준을 상세화 자료에 적용하여 GCM의 비교·평가를 위해 TOPSIS(Hwang, and Yoon, 1981)기법을 사용하였고 모형의 우선순위를 산정하였다(Eum et al, 2016). TOPSIS 기법은 다중항목을 고려하기 위한 의사결정 분석 기법으로써 정규화 된 평가 항목에 가중값을 곱

한 값을 대상으로 하여 설정된 best와 worst 해(solution)와 제시된 대안(alternative) 사이의 거리를 산정하여 대안들의 순위를 체계적으로 산정할 수 있는 방법론이다. 그러나 평가 항목별로 부여되는 가중값에 대한 참값이나 분포 등을 알 수 없기 때문에 가중값에 대한 불확실성을 고려해야만 한다. 따라서 가중값 설정에 따른 우선순위의 불확실성을 고려하기 위해 5가지 평가지표에 대한 20,000가지 가중값 조합을 생성하여 적용한 후 순위별 확률을 제시하였다. 즉, 상세화 자료의 재현성 평가는 기후특성을 5가지 항목으로 구분한 후 TOPSIS기법을 이용하여 항목별 가중값의 불확실성을 고려하여 26개 GCM에 대한 우선순위를 결정하였다.

2.2.3 통합 재현성 평가

앞서 수행된 원시 GCM 평가 및 상세화 자료에 대한 TOPSIS를 이용한 평가를 기반으로 종합적인 GCM 평가를 수행하였으며 재현성이 낮은 GCM들을 이후 분석에서 제외하였다. 종합적인 GCM의 선정은 원시 GCM의 한반도 및 동아시아 지역에 대한 재현성 평가를 통해 정규화 된 점수와 상세화 자료의 재현성 평가를 통해 정규화 된 점수를 이용하여 평가를 하였다. 본 연구에서는 종합적인 과거기간 재현성 평가를 통해 한반도 지역기후를 잘 설명하지 못하는 GCM들을 제외함으로써 최종적으로 26개 GCM 중에서 19개의 GCM을 선정 후 다음 단계의 미래기간 불확실성 평가에 활용하였다.

2.3. 미래기간 불확실성 평가 기법

GCM에서 제공하는 미래 기후변화 시나리오는 각 모형의 공간해상도와 대기 및 해양 모듈의 결합

에 따라 상이한 전망자료를 생산할 수 있다. 따라서 일반적으로 기후변화 연구에서는 이러한 시나리오 내 존재하는 불확실성을 고려해야 어느 하나의 시나리오에 편향되지 않은 분석이 가능하다. 이러한 GCM 선정에 따른 불확실성을 고려하기 위해 일반적으로 다양한 모형에 의해 생산된 전망자료를 기반으로 하는 앙상블 기법을 사용한다. 그러나 상세화된 모든 기후변화 시나리오 자료를 이후의 기후변화 영향평가에 포함하여 분석하는 것은 경우에 따라서 많은 계산시간과 노력이 요구될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 재현성이 낮은 GCM들을 제거하고 남은 19개 GCM에 대해서는 전반적으로 한반도 지역의 기후특성을 잘 모의하는 것으로 간주하였고, 제한된 개수의 GCM을 이용하는 경우에 전체 19개 GCM에 의해 설명될 수 있는 불확실성의 범위를 최소한의 GCM을 활용하여 재현하는 것을 목적으로 GCM의 우선순위를 산정하였다.

이를 위해서 본 연구에서는 군집분석 기법 중 하나인 KKZ 기법(Katsavounidis et al, 1994)을 활용하여 2가지 RCP 시나리오 및 3개 미래 기간에 의해서 발생하는 6가지 경우에 대하여 GCM의 우선순위를 결정하였다. KKZ기법은 먼저 모델의 앙상블 평균값과 가까운 값이라고 할 수 있는 중심에 있는 모델을 먼저 선택한다. 이는 불확실성을 고려하기 위해 도입된 앙상블 기반 접근이 여러 모델들의 평균적인 전망을 사용함으로써 편향된 특정 모델을 선택함으로써 발생할 수 있는 전망에 대한 불확실성을 줄이기 위함임을 반영한 결과다. 그 후 먼저 선택된 모델과 변동성 관점에서 가장 먼 모델을 두 번째로 선택한다. 세 번째 이후 모델의 선택은 3가지 과정을 통해 결정이 된다. 먼저 이전에 선택되었던 모델들과 남은 모든 모델의 거리를 산정한다. 그다음 이전에 선정된 모든 거리 중 최소 거

리를 각 모델에 할당한다. 마지막으로 이 최소 거리들 중 가장 큰 값을 가지는 모델을 선택한다. 결과적으로 앞서 선정된 모델들과의 변동성 관점에서 가장 멀리 떨어져 있는 모델을 선정함으로써 최소 3개 이상의 모델을 사용하더라도 전체 모델에 의해 제시되는 불확실성 범위를 가장 효율적으로 설명하게 된다.

하지만 결정된 우선순위는 RCP 시나리오 및 미래 기간에 의한 6개 경우에서 서로 다를 수 있는데, 이는 특정 조건에서 모형별로 기후변동성이 다르게 모의될 수 있기 때문이다. 결과적으로 어떤 미래 기간 및 RCP 시나리오를 선택하는가에 따라서 GCM의 우선순위가 다를 수 있다. 따라서 RCP 시나리오 및 미래 기간별 우선순위를 전체적으로 고려하여 종합 우선순위를 산정하였다. 이후 선정

된 종합적인 GCM의 순위에 따라서 GCM을 하나씩 증가시켜 나갈 때 ETCCDI 극한기후지수의 변동성을 어느 정도 표현할 수 있는지 분석하여 최종적으로 13개의 대표 GCM을 선정하였다. 즉, 이는 극한기후지수별로 전체 19개 GCM에 의한 불확실성 범위와 비교하여 최소 13개 GCM을 사용하는 경우에 발생하는 불확실성 범위의 비율을 상대 변화라 할 때, 이와 같은 상대 변화가 90% 이상이 되는 ETCCDI 지수의 개수가 전체 24개 중 80% 이상이 되는 시점을 의미한다. 이와 같이 미래 기간에 대한 다중 모델을 사용하는 경우 발생할 수 있는 불확실성의 범위를 고려하여 13개의 대표 시나리오를 산정하였다(표 1).

번호	RCP4.5 2020s	RCP4.5 2050s	RCP4.5 2080s	RCP8.5 2020s	RCP8.5 2050s	RCP8.5 2080s	통합
1	HadGEM2-AO	NorESM1-M	NorESM1-M	CESM1-BGC	NorESM1-M	MIROC5	INM-CM4
2	CMCC-CMS	CMCC-CMS	CMCC-CMS	MRI-CGCM3	INM-CM4	INM-CM4	HadGEM2-ES
3	HadGEM2-ES	INM-CM4	INM-CM4	HadGEM2-AO	GFDL-ESM2G	CanESM2	NorESM1-M
4	INM-CM4	HadGEM2-ES	HadGEM2-ES	GFDL-ESM2G	HadGEM2-ES	CNRM-CM5	MRI-CGCM3
5	GFDL-ESM2G	CNRM-CM5	MPI-ESM-MR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-MR	GFDL-ESM2G
6	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5A-LR	MRI-CGCM3	HadGEM2-ES	CMCC-CM	HadGEM2-ES	CNRM-CM5
7	CESM1-BGC	GFDL-ESM2G	IPSL-CM5A-LR	INM-CM4	CNRM-CM5	CMCC-CM	CESM1-BGC
8	MRI-CGCM3	MRI-CGCM3	CCSM4	MPI-ESM-LR	CCSM4	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-MR
9	CNRM-CM5	CCSM4	CMCC-CM	NorESM1-M	MRI-CGCM3	CESM1-BGC	CMCC-CMS
10	CanESM2	CESM1-BGC	CanESM2	MPI-ESM-MR	MIROC5	MRI-CGCM3	CMCC-CM
11	CESM1-CAM5	GFDL-ESM2M	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-LR	CanESM2	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-LR
12	CCSM4	CMCC-CM	GFDL-ESM2M	CMCC-CM	CESM1-BGC	NorESM1-M	CanESM2
13	CMCC-CM	MPI-ESM-MR	CESM1-BGC	CNRM-CM5	IPSL-CM5A-LR	HadGEM2-AO	HadGEM2-AO
14	MIROC5	IPSL-CM5A-MR	MIROC5	CanESM2	CMCC-CMS	GFDL-ESM2M	CCSM4
15	IPSL-CM5A-LR	CESM1-CAM5	GFDL-ESM2G	CMCC-CMS	MPI-ESM-LR	GFDL-ESM2G	MIROC5
16	MPI-ESM-LR	CanESM2	HadGEM2-AO	GFDL-ESM2M	CESM1-CAM5	MPI-ESM-MR	MPI-ESM-MR
17	NorESM1-M	MPI-ESM-LR	IPSL-CM5A-MR	MIROC5	GFDL-ESM2M	CMCC-CMS	MPI-ESM-LR
18	GFDL-ESM2M	MIROC5	MPI-ESM-LR	CCSM4	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	GFDL-ESM2M
19	MPI-ESM-MR	HadGEM2-AO	CESM1-CAM5	CESM1-CAM5	MPI-ESM-MR	CCSM4	CESM1-CAM5

표 1. 6가지 경우에 대한 GCM의 개별 우선순위 및 통합 우선순위 선정 결과

항목	내용	비고
초기조건	○ 국가 기후변화 표준 시나리오로 인증된 전지구 또는 지역 기후변화 시나리오 ○ IPCC에서 채택한 전지구 또는 지역 기후변화 시나리오	통계적 상세화에 사용되는 기초자료
공간영역	○ 한반도 또는 동아시아(한반도를 포함한 영역)	
재현·전망기간	○ 재현 : 최근 10년 이상 ○ 전망 : 미래 20년 이상	
산출변수	○ 대기(기온, 강수량) 또는 해양(표층수온, 해면고도) 필수변수 포함	CMIP에서 산출하는 변수

표 2. 통계적 상세화 기준

3. 표준 시나리오 인증 및 활용

국내 분야별 기후변화 적응 대책 수립을 위해서 기상청에서 제공한 HadGEM-AO 기반 단일 상세화 자료에 더하여 앞서 언급된 불확실성을 고려하기 위해 기상청에서는 ■기상법■제21조의 2항에 의거하여 『국가 기후변화 표준 시나리오의 인증』 제도를 2014년 이후 운영해 오고 있다. 최근에는 AR6에 대비하고 다양한 통계적 상세화 기법을 포함할 수 있도록 인증 기준을 개선하였다(표 2). 이를 통해 기후변화 적응 부문별 영향 및 취약성 평가의 일관성을 유지하고 기후변화 정책에 활용될 수 있도록 노력하고 있다. 따라서 본 연구를 통해 생산된 상세화 자료를 포함하여 향후 다양한 통계적 기법을 통해 생산되는 자료들의 경우 표준 시나리오 인증을 통해 여러 부문별 사용자들에게 활용될 있도록 하는 노력 또한 필요할 것이다. 이를 통해 최종적으로는 사용자가 목적에 적합한 상세화 자료를 선택하여 사용할 수 있도록 함으로써 보다 신뢰할 수 있는 기후변화 영향 및 취약성 평가에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론 및 고찰

CMIP5 자료는 26개 GCM에 대하여 RCP (representative concentration pathway) 2개 시나리오(RCP4.5 및 RCP8.5) 및 3개 기상변수(강수량, 최대 온도, 최저 온도)를 포함하는 자료를 구축하였다. 과거 재현성 평가를 위한 과거기간(Historical period)은 1976년부터 2005년까지의 30년 기간을 사용하였으며, 공간적으로는 한반도 및 동남아시아 영역을 추출하여 사용하였다. 상세화 방법은 통계적 상세화 방법 중 하나인 SDQDM(Spatial Disaggregation and Quantile Delta Mapping)을 이용하였다. 과거기간 재현성 상세화 이전 GCM의 과거 재현성 평가와 상세화 된 자료를 이용한 TOPSIS(technique for order of preference by similarity to ideal solution)기법을 기반으로 하는 평가를 통해 종합적인 과거 재현성 평가를 수행하여 19개 GCM을 선정하였다. 미래기간 불확실성 평가는 군집분석 기법인 KKZ(Katsavounidis approach)기법을 이용하여 RCP 시나리오 별 미래기간 3개 기간에 대해 평가를 실시하였다. 평가를 통해 6가지의 경우에 대해 미래 불확실성을 설명하기 위한 최소의 GCM개수를 각각 도출한 후, 이를 통합적으로 고려하여 전체 변동성의 80% 이상을 설명할 수 있는 13개 대표 GCM을 선정하였다.

최근에는 지역별 강수량의 편차가 커지고 있고, 침투 강우 패턴이 변화되고, 계절적 변동성이 커지는 것과 더불어 강수의 양적변화 또한 커지는 등의 이유로 안정적인 용수공급 기술의 개발이 필요하다. 본 연구의 결과는 국가 기후변화 표준 시나리오의 인증 제도를 통해 인증을 받는 것이 필요하며, 인증된 시나리오 자료는 기후변화에 따른 미래 용수 수요량 추정에 활용함으로써 다목적댐의 안정적인 용수공급 및 저수지 운영기술 분야에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

사사

본 연구는 APCC의 지원으로 수행되었음.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음
(과제번호 18AWMP-B083066-05).

참고문헌

1. 음형일, 신선희, 김옥연, 이은정, 이호진 (2016) 수자원의 기후변화 전망 활용을 위한 기후모델의 성능평가 및 상세화 연구동향 분석. CCAW기술보고서
2. 조재필, 박지훈, 이은정, 정임국 (2017) 수자원의 기후변화전망 활용을 위한 AR5 기후모델의 성능평가 및 상세 기후 및 수문 시나리오 생산기술 개발. CCAW 기술보고서
3. Abatzoglou, J.T., and Brown, T.J. (2012). "A comparison of statistical downscaling methods suited for wildfire applications." *International Journal of Climatology*, Vol. 32, No. 5, 772–780.
4. Cannon, A.J., Sobie, S.R., and Murdock, T.Q. (2015). "Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes?" *Journal of Climate*, Vol. 28, 6938–6959.
5. Eum, H.-I., and A. J. Cannon, 2016. Intercomparison of projected changes in climate extremes for south Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 Ensemble. *International Journal of Climatology* 37(8): 3381–3397.
6. Eum, H.-I., A. J. Cannon, T. Q. Murdock, 2016. Intercomparison of multiple statistical downscaling methods: multi-criteria model selection for south Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 31(3): 683–703.
7. Hayhoe, K. A., 2010. A standardized framework for evaluating the skill of regional climate downscaling techniques. Ph.D. diss., Champaign, Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
8. Hwang, S., K. Yoon, C. L., 1981. *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. New York: Springer-Verlag.
9. Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., and Lettenmaier, D.P. (2004) "Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs." *Climatic Change*, Vol. 62, 189–216.
10. Zhang, X., L. Alexander, G. C. Hegerl, P. Jones, A. K. Tank, T. C. Peterson, B. Trewin, and F. W. Zwiers, 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(6): 851–870.