

유효가뭄지수(EDI)를 이용한 한반도 미래 가뭄 특성 전망

곽용석* · 조재필** · 정임국** · 김도우* · 장상민**†

*국립재난안전연구원, **APEC 기후센터, 응용사업본부

Projection of Future Changes in Drought Characteristics in Korea Peninsula Using Effective Drought Index

Gwak, Yongseok*, Cho, Jaepil**, Jung, Imgook**,

Kim, Dowoo** and Jang, Sangmin**†

*National Disaster Management Research Institute, Ulsan, Korea

**Dept. of Climate Application, APEC Climate Center, Busan, Korea

ABSTRACT

This study implemented the prediction of drought properties (number of drought events, intensity, duration) using the user-oriented systematical procedures of downscaling climate change scenarios based the multiple global climate models (GCMs), AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) program. The drought properties were defined and estimated with Effective Drought Index (EDI). The optimal 10 models among 29 GCMs were selected, by the estimation of the spatial and temporal reproducibility about the five climate change indices related with precipitation. In addition, Simple Quantile Mapping (SQM) as the downscaling technique is much better in describing the observed precipitation events than Spatial Disaggregation Quantile Delta Mapping (SDQDM). Even though the procedure was systematically applied, there are still limitations in describing the observed spatial precipitation properties well due to the offset of spatial variability in multi-model ensemble (MME) analysis. As a result, the farther into the future, the duration and the number of drought generation will be decreased, while the intensity of drought will be increased. Regionally, the drought at the central regions of the Korean Peninsula is expected to be mitigated, while that at the southern regions are expected to be severe.

Key words: Drought, EDI, Climate Change, AIMS, Downscaling

1. 서 론

최근 파리협정의 통한 기후변화와 관련하여 자연재해에 대한 적응의 중요성이 강조되고 있다. 우리나라에서 발생하는 자연재해 중, 2000년대 들어서 가뭄이 전국 또는 지역적으로 매년 발생하고 있다. 특히, 충남지역은 2015년부터 강수가 평년에 비해 지속적으로 적게 발생하여, 2017년 6월에 보령댐의 수위가 역대 최저로 낮아지는 등 가뭄이 심화되는 현상이 관측되었다. 2017년 7월에 충북지역인 청주시에서는 집중호우로 인해 홍수가 발생하여 막대한 인명·재산 피해를 발생시키는 등 지역 간 강수편차로 인해 가뭄과 홍수가 동시에 나타나기도 하였다.

가뭄은 홍수와는 달리 진행속도가 느리고, 쉽게 인지하기 어려운 특성을 가지고 있기 때문에 대책을 수립하고 이행하는 것이 쉽지 않다. 가뭄에 효과적으로 대응 및 관리하기 위해서는 가뭄특성을 정량화하고 이를 예측(전망)하는 것이 중요하다. 기존의 가뭄 전망 관련 선행 연구들은 Special Report on Emissions Scenarios (SRES) 기후변화 시나리오 자료를 사용하거나 (Kim et al. 2011; Lee & Kim 2013; Park et al. 2013), 최신의 Representative Concentration Pathway (RCP) 시나리오 자료를 사용하더라도 기상청에서 제공하는 단일모형 결과를 사용한 경우 (Kim et al. 2013; Kwak et al. 2016)가 대부분이다. 또한 기상학적 가뭄지수의 주요 변수인 강수량의 경우, 기후모형의 선택에 따른 불확실성이

†Corresponding author: smjang@apcc21.org

Received February 26, 2018 / Revised March 14, 2018 / Accepted March 22, 2018

기온에 비해 매우 크며, 또한 한반도 지역에서는 여름철 기간에 대한 강수 전망의 불확실성이 큰 것으로 알려져 있다 (Cho 2013). 이와 같이 기후모형의 선택에 따라서 강수의 미래 전망의 불확실성이 높은 경우 특정 모형만을 사용하는 경우 전망된 결과를 신뢰하기 어렵다. 즉 미래 기간에 대한 가뭄의 기간 및 심도의 증감 및 공간적인 가뭄 특성의 분포가 선정된 기후모형의 특성에 따라서 전혀 다른 결과를 보여 줄 수 있음을 의미한다.

한반도에 대해 5개 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)을 이용한 미래 SPI 변화 연구에서 극한가뭄의 경우 RCM에 따라 명확한 차이가 있음을 보여주었다 (Kim et al. 2016). 이와 같이 사용된 기후모형 종류에 따라 상반된 미래 가뭄 전망 결과가 발생하는 경우 가뭄대책 수립을 위한 의사결정은 매우 어려워 질 수밖에 없다. RCP 시나리오의 다중 기후모형을 기반으로 한 영향 평가 관련 연구가 다양한 분야에서 수행되었지만 (Yoon et al. 2014; Cho et al. 2015; Chung et al. 2015; Nam et al. 2015; Yoon & Cho 2015; Cho et al. 2016; Kim & Cho 2016), 기후변화에 따른 한반도 가뭄전망 또한 기후모형 선정에 따른 불확실성이 크기 때문에 RCP 시나리오의 다중모형을 사용한 앙상블기법(Multi-Model Ensemble, MME)을 적용하여 결과의 불확실성을 최소화하려는 연구가 최근에 수행되고 있다 (Rhee & Cho 2016). 기존 연구에서는 미래 가뭄 전망시 가뭄에 대한 정량적인 표현하기 위해 기상학적 가뭄 지수인 표준강수지수 (Standard Precipitation Index, SPI)가 주로 사용되었으며 (Kim et al. 2011; Lee and Kim 2013; Park et al. 2013; Kim et al. 2016; Park et al. 2016; Kwak et al. 2016; Rhee and Cho 2016) 온도의 영향을 고려한 표준강수 증발산지수 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)가 사용되기도 하였다 (Kim et al. 2012). SPI 및 SPEI 모두 사용하는 시간단위 (누적 개월수)에 따라 상이한 결과를 보이는데 대부분 3개월 또는 6개월의 시간단위를 사용하고 있다. 이 경우 SPI와 SPEI는 12개월 이상 지속되는 장기가뭄을 고려하기 위해서는 24개월의 시간단위를 사용해야 하지만, 이 경우 6개월 시간단위를 사용한 결과와 큰 차이를 보이게 된다. 반면 유효가뭄지수 (Effective Drought Index, EDI) (Byun and Wilhite 1999)는 12개월보다 장기의 가뭄이 발생하는 경우 산정기간을 늘려가며 계산하기 때문에 단기 및 장기가뭄을 재현하는데 있어서 일관된 결과를 보이는 것으로 알려져 있다 (Kim et al. 2009; Jain et al. 2015).

미래 가뭄 전망에 관한 여러 연구들이 상당히 수행되었음

에도 불구하고, 일관된 연구결과가 나오지 않는 이유는 강수 특성의 재현성, 선정된 기후모형 및 상세화 기법 및 가뭄지수 산정기법의 시간단위 선정에 따른 복합적 영향의 불확실성에 기인하고 볼 수 있다. 또한 분석 결과가 의사결정에 활용되기 위해서는 사용된 시나리오 자료 및 상세화 기법이 실제 과거기간에 발생한 가뭄의 시·공간적 재현성 관련 정보와 최종 전망 결과가 함께 제시되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 사용자 중심의 기후변화 영향평가를 위해 개발된 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) 프로그램을 이용하여 기후변화에 따른 한반도 미래 기간의 가뭄 특성 변화를 전망하고자 한다. AIMS는 다수의 기후모델들에 대한 평가, 상세화 기법, 그리고 과거 기후자료와의 비교 검토에 이르기까지 많은 자료와 복잡한 자료처리를 표준화 된 모듈시스템을 통해 사용자들에게 제공하기 때문에, 기후변화에 따른 기상·수문학적 영향평가를 쉽게 산정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구의 목표는 미래 전망의 불확실성을 줄이기 위해 AIMS에서 제공하는 29개 GCM (Global Climate Model, GCM) 모델에 대한 상세화 전후의 관측 자료와의 비교를 통한 재현성 평가 절차를 가뭄 관련 주요 기후특성을 고려하여 적용하여 가뭄 특성의 변화를 살펴보고자 한다. 가뭄특성 평가로, 유효가뭄지수 (EDI)를 이용하여 미래의 가뭄의 발생횟수, 지속기간, 그리고 강도가 과거에 비해 완화될 것인지, 심화될 것인지를 대해 시·공간적으로 평가하고자 한다.

2. 자 료

2.1 관측 및 기후변화 시나리오 자료

본 연구에서는 RCP 기후변화 시나리오 과거기간 (Historical)의 마지막 연도인 2005년을 기준으로 30년 (1997~2005) 기간에 대한 자료가 존재하는 한반도내의 기상청의 종관기상관측 시스템 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 중 Fig. 1과 같이 총 60개 지점의 기상자료들을 선정하였다.

한반도 지역의 기후변화에 따른 강수량 전망 자료는 APEC기후센터에서 국가 단위로 제공하고 있는 IPCC 제5차 평가보고서 (Fifth Assessment Report, AR5)에서 사용된 온실가스 대표농도경로 (Representative Concentration Pathways, RCP) 시나리오 자료를 사용하였다. 한반도 지역의 자료는 과거기간 (Historical) 및 미래기간의 경우 두 가지 시나리오 (RCP 4.5 및 RCP 8.5)에 대해 제공된 29개의 원시 GCM 자료를 사용하였다.

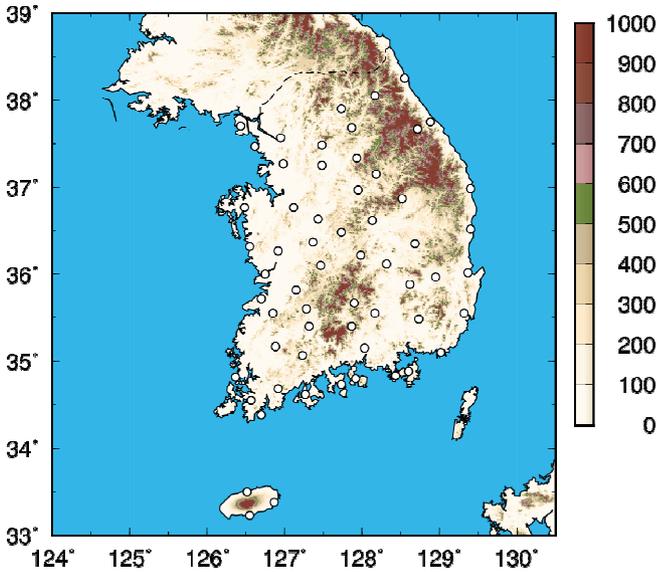


Fig. 1. The location of study area. Black circles show locations of ASOS (Automated Synoptic Observing System).

2.2 상세화 기법

상세화 (Downscaling)는 AIMS에서 제공하고 있는 simple quantile mapping (SQM) (Cho et al. 2018a)과 spatial disaggregation quantile delta mapping (SDQDM) (Eum and Cannon 2017) 기법을 60개 관측소에 적용한 후 가뭄과 관련된 기후특성을 잘 재현하는 기법을 최종적으로 선정하여 적용하였다. SQM 기법은 경험적 분위사상법 (empirical quantile mapping)을 통해 관측지점 및 기상변수별로 독립적으로 상세화를 수행한다. 또한 공간적으로는 특정 관측지점에 해당되는 GCM격자의 값을 바로 사용하며, 시간적으로는 월별로 일단위 관측자료와 원시 GCM의 값을 비모수적 경험적 분위사상을 이용하여 GCM자료에 포함되어 있는 GCM별 시스템 오차 (bias)를 보정하는 방법이다. 반면, SDQDM은 편의 보정과정을 수행하기 전에 주위의 GCM격자들의 값을 이용하여 공간보간 방법 중에 하나인 역거리 가중법 (Inverse Distance Weighted, IDW)을 이용하여 공간적으로 보간한 후, 자료의 분위사상별로 원시 GCM에서 과거기간을 기준으로 전망된 미래기간에 대한 변화를 유지시키며 편의보정을 하는 방법이다. 두 상세화 방법의 특징을 비교하면, SQM은 계산이 빠르다는 장점이 있는 반면, SDQDM은 평균뿐만 아니라 극값에 해당하는 범위 대해서도 원시 GCM에서 갖고 있는 장기추세의 왜곡

을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 상세화 기법의 선정은 Cho et al. (2018b)이 제시한 극한기후지수 (Climate Extreme Index)를 기반으로 하는 과거 재현성 및 미래 시그널 왜곡도 평가와 강수에 대한 공간 상관성 평가 방법 및 절차를 이용하였다.

2.3 유효가뭄지수(EDI)

가뭄의 정량적 특성을 평가하기 위해 SPI, SPEI, PDSI, Deciles (십분위수)와 같은 기상학적 가뭄지수들이 자주 활용된다. 이러한 가뭄지수들은 주 또는 월 단위로 어떤 특정 기간의 기상학적 평균에 대한 강우 부족에 대해서만 평가하고 있어, 가뭄 특징 중 지속성이나 연속성을 반영하지 못한다. 즉 기상·수문학적으로 어떤 특정기간에 같은 강수량이 발생하더라도 시간에 따른 강수의 집중분포가 다르다면 실제 체감되는 가뭄 심화정도가 달라지나, 기존 가뭄지수는 이를 반영하지 못한다. 본 연구에서는 Byun과 Wilhite (1999)가 제안한 일단위 EDI를 이용하여 가뭄특성을 평가하고자 한다. EDI는 식 (1)~(3)에서와 같이 강수로 인해 발생하는 가용 수자원으로부터 시간이 흐름에 따라서 늘어나는 유출 및 증발에 의한 손실을 고려하면서 일 년 이상의 기간 동안 누적하여 평년치와 비교하여 일별 가뭄정도를 계산할 수 있는 방법이다.

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

$$DEP = EP - MEP \tag{2}$$

$$EDI = DEP / ST(DEP) \tag{3}$$

여기서, Eq.(1)의 EP (Effective Precipitation)는 특정일로부터 365일 동안의 누적 유효강수량을 의미하며, P_m은 특정일로부터 m일전의 일강수량을 나타낸다. i는 강수량 합산 기간을 나타내며, 최소 365일 이상의 값을 가진다. Eq. (2)를 통해서 EP의 기후학적 평균 강수량 (Mean of Effective Precipitation, MEP)과 편차 값 (Deviation of Effective Precipitation, DEP)를 계산할 수 있으며, 이는 어떤 특정기간과 공간에서의 물 잉여와 부족을 의미한다. 이후 DEP의 표준편차 (ST)를 이용하여 EDI 값으로 표준화되어 산정된다. DEP가 음일 경우, 이 값은 평균보다 건조한 것을 의미하며, DEP가 음인 날이 지속될 경우, 강수량 합산과정에서 그 일수를 365일에 더하여 다시 계산한다. EDI 지수는

Table 1과 같이 음의 값일수록 가뭄이 강함을 의미한다.

Table 1. The drought criterion of EDI with the drought severity (Kim, 2009)

EDI Value	Category
2.00 or more	Extremely wet
1.50 to 1.99	Severely wet
1.00 to 1.49	Moderately wet
0 to 0.99	Mildly wet
0 to -0.99	Mildly drought
-1.00 to -1.49	Moderately drought
-1.50 to -1.99	Severe drought
-2 or less	Extreme drought

3. 기후변화에 따른 가뭄 영향 평가

3.1 GCM 및 상세화 기법 선정

EDI를 이용하여 기후변화에 따른 미래 가뭄 전망을 분석하기 위해서 편의보정 (Bias Correction) 이전의 29개 원시 GCM으로부터 순단위 시·공간적인 재현성 분석을 통해 적합하지 않은 GCM을 제외시킨 후, 사용자에게 의해 선정된 극한기후지수의 과거 재현성 및 강수의 관측지점 간의 공간상관성에 대한 재현성 평가 등을 통해 상세화 기법을 최종적으로 선정하게 된다. GCM 및 상세화 기법의 선정은 AIMS 교육을 위해 제공된 상세화 자료 및 분석 결과 (https://doi.org/10.8888/EPOPS_201711301YK)를 이용하였다.

원시 GCM 평가는 강수량만을 고려하였다. 시간적인 재현성은 원시 GCM의 값과 실제 관측값으로부터 순단위의 30년 평균을 계산한 후 Pearson상관계수 (Pearson Correlation Coefficient)를 관측소별로 계산한다. 이후 5% 유의수준에서 결정되는 상관계수의 임계값과의 비교를 통해서 전체 60개 관측소에서 몇 개의 관측소에서 임계값 보다 높은 상관계수를 보이는지를 의미하는 통과율을 계산하였다. 비슷하게 공간적 재현성은 순단위로 30년 평균을 계산한 후 60개 관측소에 의한 상관계수를 순별로 계산한 후 5% 유의수준에서 제시되는 상관계수의 임계값과 비교를 통해 전체 36개 순에서 몇 개의 순이 임계값 보다 높은 값을 보이는지를 의미하는 통과율을 계산하였다 (Cho et al., 2018b). 최종적인 GCM 선정은 시간적 통과율과 공간적 통과율의 합을 기준으로 순위를 계산하였다.

상세화 기법의 선정은 27개 극한기후변화지수 (Climate

Table 2. Lists of ETCCDI Climate Extreme Indices

ID	Description	Unit
CDD	Maximum number of consecutive days with daily PRCP < 1mm	Days
CWD	Maximum number of consecutive days with daily PRCP ≥ 1mm	Days
PRCPTOT	Annual total PRCP in wet days (daily PRCP ≥ 1mm)	mm
SDII	Annual precipitation divided by the number of wet days	mm/day
R10mm	Annual count of days when PRCP ≥ 10mm	Days

Extreme Indices) (Karl et al. 1999; Peterson et al. 2001) 중에서 가뭄 전망에 중요하다고 판단되는 연속 무강우 기간 (CDD) 및 연속 강우 기간 (CWD), 연 강수량 (PRCPTOT), 강우량이 10mm가 넘는 강수일수 (r10mm), 일 강수지수 (SDII) 등 5개 극한기후지수를 과거 재현성 분석 결과에 이용하였다 (Table 2).

과거 재현성 평가는 관측 자료의 중앙값과 다중 GCM의 중앙값으로 비교하였다.

공간 상관성 평가는 관측지점 사이의 거리에 따른 유사성을 나타내는 Variogram을 이용하였다. Variogram은 관측지점 사이의 거리와 값의 증가가 기후변수의 유사성이 감소할 의미하는 gamma 값을 사용하여 자료를 정리한 시각화된 그래프이다 (Cho et al, 2018b).

3.2 가뭄 특성의 과거 재현성 평가

가뭄의 특성을 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 가뭄의 지속기간 (Duration) 및 최대강도 (Max. Intensity)에 대하여 연간 가뭄 사상의 발생횟수 (Frequency)를 분석하였다. 가뭄의 지속기간은 일단위 EDI값이 -1.0 보다 작게 시작되는 날짜를 가뭄시작일로, -1.0 보다 커지는 날짜를 가뭄종료일로 하여 두 날짜 사이의 시간간격으로 산정하였다. 지속기간의 과거 재현성 평가에 있어서 지속기간이 30일 이상의 가뭄 사상을 고려하였다. 가뭄강도는 가뭄지속기간내의 EDI의 가장 최저값으로 평가하였으며 이와 같이 계산된 개별 가뭄사상이 일 년 중 발생하는 횟수를 계산하였다.

가뭄의 과거 재현성 평가는 기후변화지수와 마찬가지로 지속기간, 강도, 발생횟수에 대해 60개 관측소를 이용하여 30년 기간 동안의 관측 자료와 GCM의 평균값의 비교를 통해

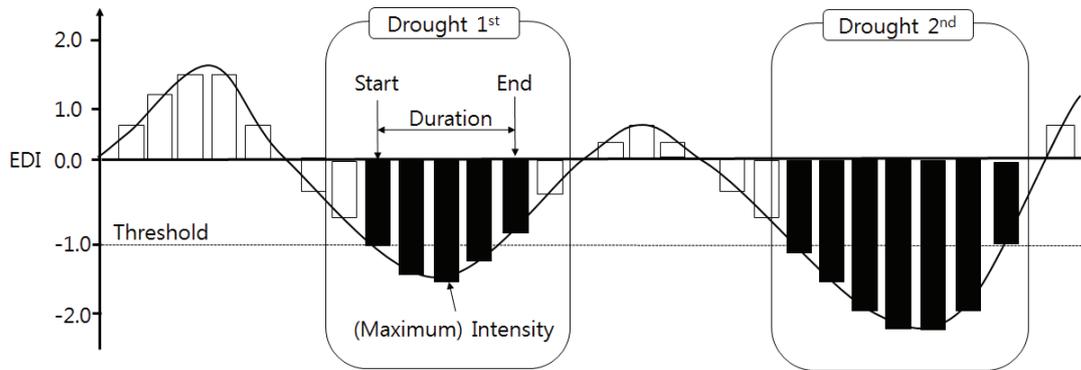


Fig. 2. The schematic concept of drought properties (Intensity, duration) with EDI time series.

평가하였다. 최대지속기간 및 최대강도의 경우에는 평균에 더하여 30년 기간 중에서 가장 큰 지속시간 및 가뭄강도를 별도로 비교하였다.

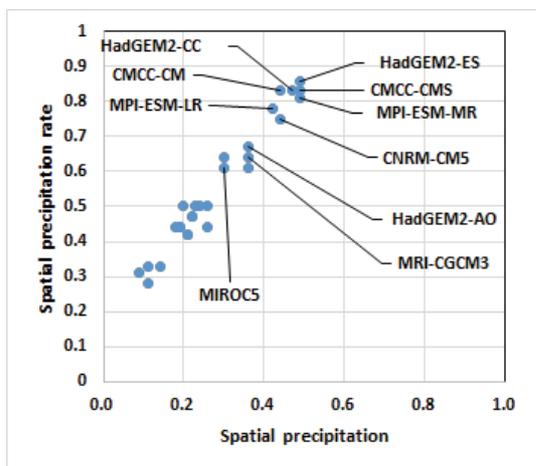
3.3 가뭄 특성의 미래 전망

가뭄 특성의 미래 기간에 대한 변화는 앞서 정의된 지속기간, 최대강도, 발생횟수를 과거 30년 (1976년~2005년)을 기준으로 하고 미래 기후변화에 대한 모의기간을 근미래 (S1: 2010년~2039년), 중간미래 (S2: 2040년~2079년), 먼 미래(S3: 2070년~2099년)로 구분하여 과거기간 대비 미래 기간 동안의 가뭄특성 변화를 분석하였다. 기준으로 사용된 자료는 실제 관측자료 값 대신에 다중 GCM으로부터 계산된 다중모형앙상블 (MME) 값을 사용하였다.

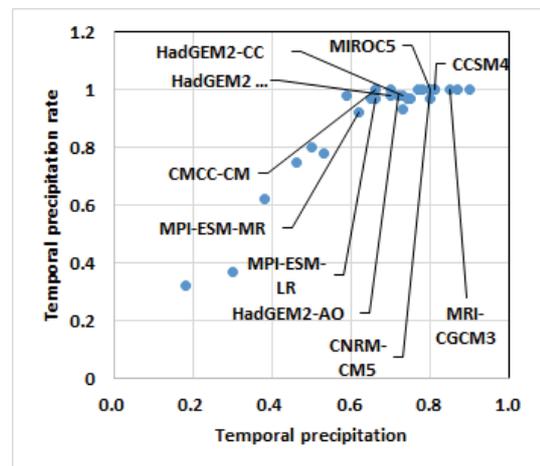
4. 결과 및 고찰

4.1 GCM 및 상세화 기법 선정

Fig. 3(a)은 공간적인 재현성 분석 결과이며 Fig. 3(b)은 시간 재현성 분석 결과를 보여 준다. 29개 원시 GCM의 총 60개의 관측소에서의 순단위 30년 평균 강수량을 이용해서 공간적 재현성 결과를 보여준다. 그림 좌측은 공간 재현성 결과를 보여주며, X축은 Pearson 상관계수 (Correlation Coefficient)의 평균값을 의미하며 Y축은 통과율을 의미한다. 공간적인 재현성 분석 결과는 상관계수의 평균값과 통과율 사이에 높은 상관성을 보이고 있다. 반면 Fig. 3(b)은 시간 재현성 분석 결과를 보여 준다. 재현성이 좋은 상위 GCM들에 있어서는 60개 관측소에 대한 통과율이 1에 근접한 결과를 보이고 있다. 이는 편의보정 전의 GCM들이



(a) Spatial analysis of precipitation



(b) Temporal analysis of precipitation

Fig. 3. The spatial (a) and temporal (b) distribution of Person's correlation coefficients and pass rate between observed precipitation data and those of the 29 GCMs, respectively.

Table 3. The 10 upper ranks of GCMs selected by the pearson correlation coefficients of spatial and temporal distribution to the monitoring data at ASOS 60 stations.

Rank	GCMs	Resolution (Degree)	Institution	Spatial		Temporal	
				Avg. CC	Pass rate	Avg. CC	Pass rate
1	HadGEM2-ES	1.875×1.250	Met Office Hadley Centre	0.49	0.86	0.70	0.98
2	CMCC-CM	0.750×0.748	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	0.44	0.83	0.66	1.00
3	HadGEM2-CC	1.875×1.250	Met Office Hadley Centre	0.47	0.83	0.73	0.98
4	CNRM-CM5	1.406×1.401	Centre National de Recherches Meteorologiques	0.44	0.75	0.80	1.00
5	MPI-ESM-LR	1.875×1.865	Max Planck Institute for Meteorology	0.42	0.78	0.66	0.97
6	MPI-ESM-MR	1.875×1.865	Max Planck Institute for Meteorology	0.49	0.81	0.62	0.92
7	HadGEM2-AO	1.875×1.250	Met Office Hadley Centre	0.36	0.67	0.72	0.98
8	MRI-CGCM3	1.125×1.122	Meteorological Research Institute	0.36	0.64	0.85	1.00
9	CMCC-CMS	1.875×1.865	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	0.49	0.83	0.50	0.80
10	MIROC5	1.406×1.401	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute and National Institute for Environmental Studies	0.30	0.61	0.80	1.00

실제 관측 자료와 비교할 때 공간적인 관점보다는 시간적인 관점에서 재현성이 좋음을 의미한다. 즉, 편의보정을 거치지 않은 GCM들이 관측 강수의 공간적 특징을 잘 표현하지 못하는 한계를 갖고 있음을 의미한다. Table 3은 원시 GCM 평가를 통해 선정된 상위 10개 GCM에 대한 설명과 시·공간적인 평균 Person 상관관계수 그리고 통과율 결과를 보여준다.

미래 가뭄 전망을 위해서는 목적에 적합한 상세화 기법을 선정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화지수의 과거 재현성 평가 및 공간 상관성의 재현성 평가를 고려하여 상세화 기법을 선정하였다.

Fig 4는 관측자료와 29개 GCM에 대해 SQM, SDQDM의 상세화 방법에 따라 5가지 강수관련 극한기후지수의 중앙값과 전체적인 범위를 보여주고 있다. 분석결과, 연속 무강우일수 (CDD)에 대해서는 SQM과 SDQDM 두 상세화 기법은 관측값과 유사한 것으로 나타났지만, 연속 강우일수 (CWD)에서는 SQM과 SDQDM 모두 관측값과는 다소 차이가 있었다. 하지만 나머지 총 강우량 (PRCPTOT), 10mm 이상의 강우일수 (r10mm), 일 강우강도 (SDII)에서는 SQM이 SDQDM보다 관측값을 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 또한 Fig 5은 강수에 대하여 60개 기상 관측소 사이의 관측 및 두 가지 상세화 방법에 의한 Variogram 결과를 보여 준다. Variogram분석에서도 SQM 방법이 관측에 의한 Variogram과 비슷한 경향을 보여 SDQDM보다 높은 공간상

관성의 재현성을 보였다. 이는 100km~300km 범위의 GCM 격자크기와 한반도의 공간적 크기를 고려할 때 SDQDM 기법은 주위 GCM 격자들의 값을 이용한 내삽 과정에서 한반도 주변의 GCM 격자 값들이 대부분의 관측소에 대하여 동일하게 사용되기 때문이다 (Cho et al., 2018b). 따라서 본 연구에서는 과거기간 관측 자료와 비교를 통한 재현성이 높은 SQM 상세화 기법을 선정하였다.

4.2 가뭄 특성의 과거 재현성 평가

기후변화 시나리오에 따른 가뭄 특성의 미래 전망 분석에 앞서, 가뭄지수의 특성에 대한 과거기간 관측값과의 비교를 기반으로 하는 재현성 평가를 통해 선정된 GCM들의 모의능력을 제시하였다. Fig 6은 앞서 선정된 10개 GCM에 대하여 강우 특성 관련 5개 기후변화지수의 재현성이 좋게 나타난 SQM 상세화 기법을 통해 생산된 일단위 상세 강수자료를 이용하여 총 60개 기상관측소에서 일단위 EDI를 계산한 후 이로부터 추출한 가뭄사상별 최대강도 및 가뭄사상별 지속기간에 대한 Boxplot 결과이다.

우선 가뭄 사상별 최대강도의 분포를 살펴보면 관측자료 기반의 최대강도(좌측)는 관측소에 따라서 사상별 최대강도의 30년 기간 중 최대값이 -3.0 보다 작은 극값을 보이며 관측소별 최대강도 범위가 서로 크게 다른 경향을 보이고 있다. 반면 10개 GCM에 따른 사상별 가뭄의 최대강도의 결과는 60개 관측소와 비슷한 경향을 보이고 있다.

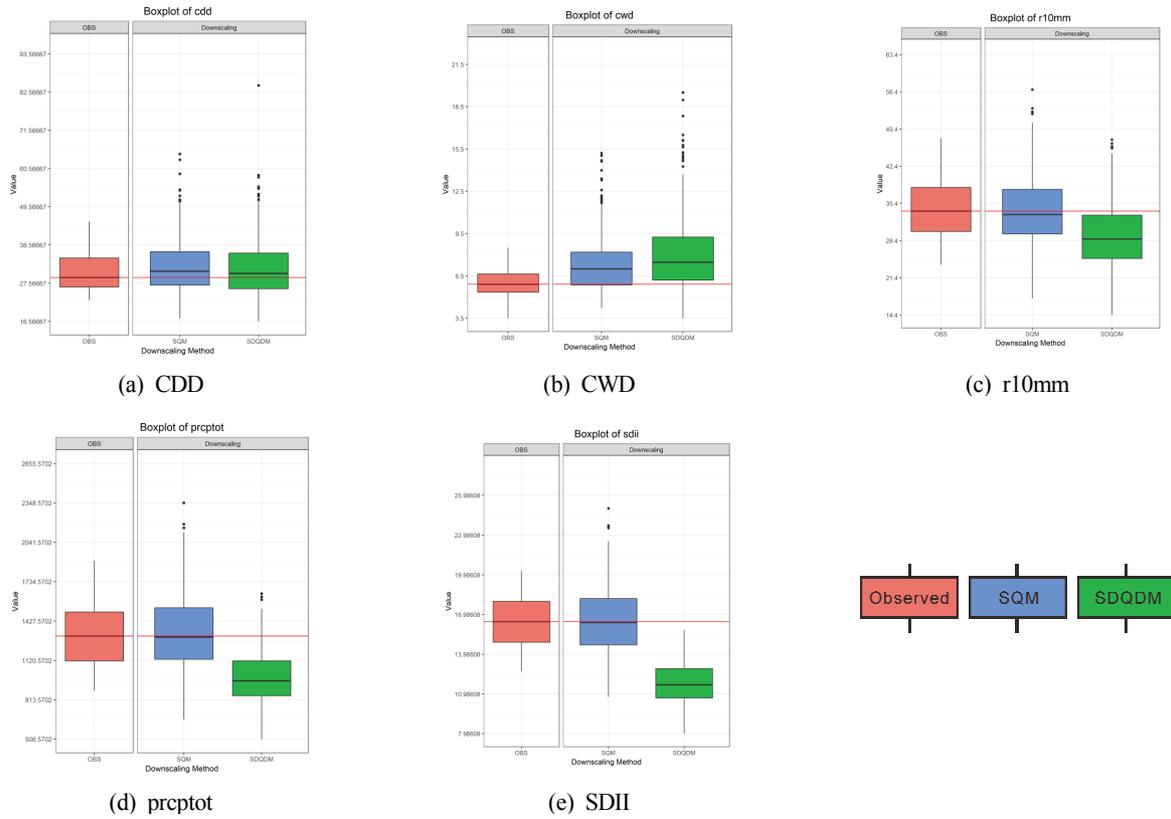


Fig. 4. The comparison of reproducibility between SQM and SDQDM downscaling techniques for the precipitation related climate indices.

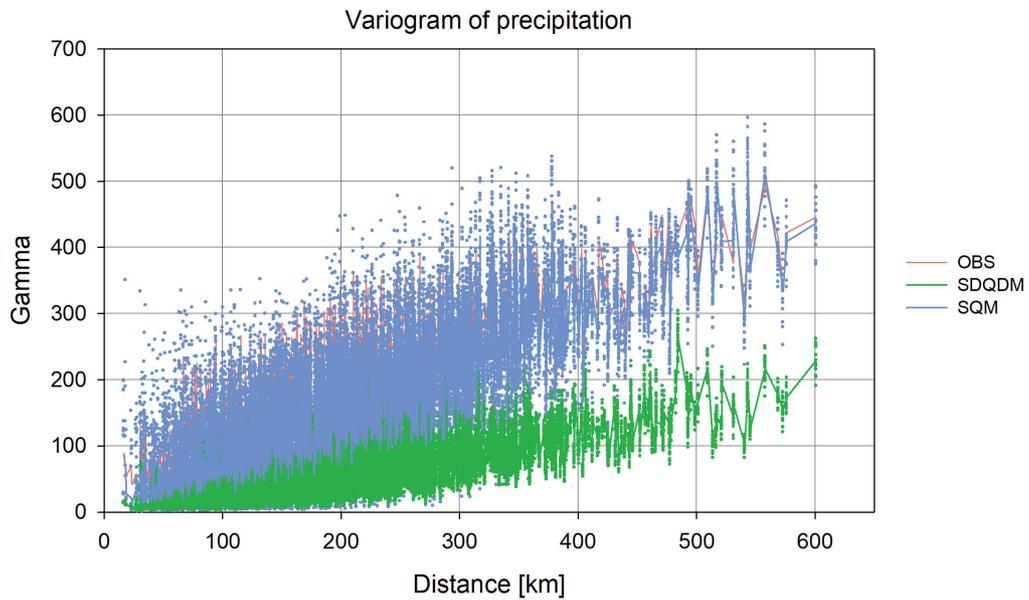


Fig. 5. Variogram of precipitation according to the observation and downscaling techniques(SQM, SDQDM).

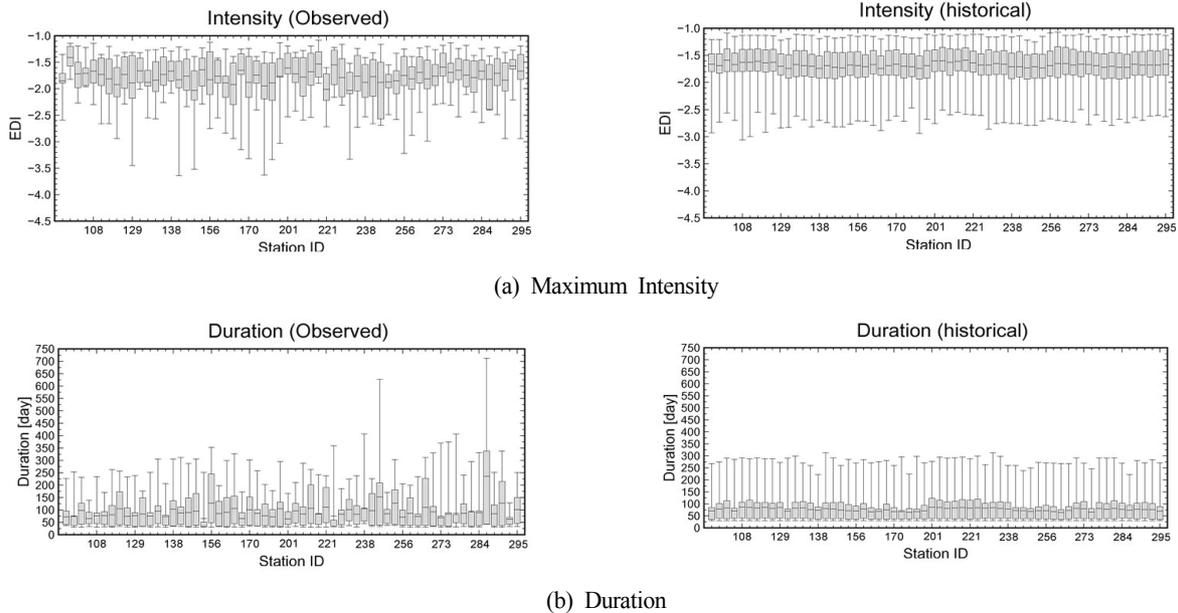


Fig. 6. The range of maximum drought intensity(a) and duration(b) at the 60 monitoring stations; the left side of figures is observed, the right side is historical.

가뭄 사상별 강우지속기간의 특성 또한 최대강도의 결과와 비슷한 경향을 보였다. 즉 관측기반 결과는 특정 관측소에서 단일 가뭄 사상의 지속기간이 700일을 넘는 기간이 존재하며 관측소별 상이한 경향을 보이는 반면 10개 GCM의 다중모형앙상블 (MME) 기반의 결과들은 최대값이 350일보다 작은 범위로 중앙값 또한 관측소별로 비슷한 경향을 보이고 있다.

이와 같은 결과를 이해하기 위해서는 일 단위 EDI 계산과 관련하여 원시 GCM 및 SQM에 의해 상세화된 강우 자료의 특성을 이해하는 것이 필요하다. 공간적 재현성 평가에서 가장 좋은 결과를 보인 HadGEM2-ES의 경우 60개 관측소의 평균 상관계수는 0.49이었고 통과율은 0.86의 결과를 보였다. 이는 GCM들의 저해상도 격자들을 기반으로 한 강수의 공간적 분포가 60개 관측소에 의한 관측의 공간적인 분포를 잘 재현하지 못하고 있음을 의미한다. 일반적으로 원시 GCM이 갖고 있는 시·공간적인 편이는 상세화 과정을 거쳐 보정이 가능하다. 예를 들어 원시 GCM이 관측자료와 비교하여 상반된 공간적인 분포 패턴을 보이더라도, 실제 관측 자료와의 비교를 통한 통계적 상세화 과정을 거쳐 평균 및 변동성 범위가 관측 자료의 공간적 패턴과 비슷하게 보정될 수 있다. 하지만, 일 단위 EDI를 이용한 가뭄 지속기간은 최대 무강우 일수 (CDD) 및 최대 연속 강우 일수 (CWD) 등과 같은 강수의 시간적 집

중 특성에 의해 영향을 받는다. 사용된 SQM 상세화 기법은 월 단위 평균과 변동성 범위 등은 보정 가능하지만 일 단위 원시 GCM의 특성에 따른 모의된 강우 발생의 시간적 순서에 대한 보정은 한계가 있다. 따라서 원시 GCM의 낮은 공간 재현성 결과와 SQM이 갖고 있는 일 단위 강우의 발생순서 및 유무에 대한 제한적인 보정특성을 고려할 때, MME 기반의 평균은 GCM간 상쇄 작용을 거쳐 변동성이 줄어들게 되며 결과적으로 모든 관측소에서 비슷한 결과를 보이게 된다. 이는 특정 관측소에서 관측된 가뭄 지속기간 및 최대강도의 특성이 GCM별로 상이하게 모의될 수 있기 때문이다. GCM 기반 결과가 관측 기반의 공간적 분포를 재현하기 위해서는 사용된 GCM들 중 다수가 특정 지점에서 발생하는 관측의 특성을 일관성 있게 모의할 수 있어야 한다.

Fig 7은 60개 관측소에 대해 관측자료 및 10개 GCM에 대하여 SQM으로 상세화한 자료를 이용하여 가뭄 사상별 최대강도의 평균, 가뭄 사상별 최대강도의 30년 최소값, 가뭄 사상별 지속기간의 평균, 가뭄 사상별 지속기간의 30년 최대값, 가뭄 사상의 발생 횟수의 공간적인 분포를 보여준다. 앞서 GCM들이 일관되게 관측자료 기반의 가뭄의 공간적인 특성을 재현하지 못하는 이유로 관측 기반의 결과 (좌측)들은 관측지점별로 차별성을 보이며 공간적인 분포 특성을 보이는 반면, 동일한 과거기간에 대한 다중 GCM의 결과는 GCM별

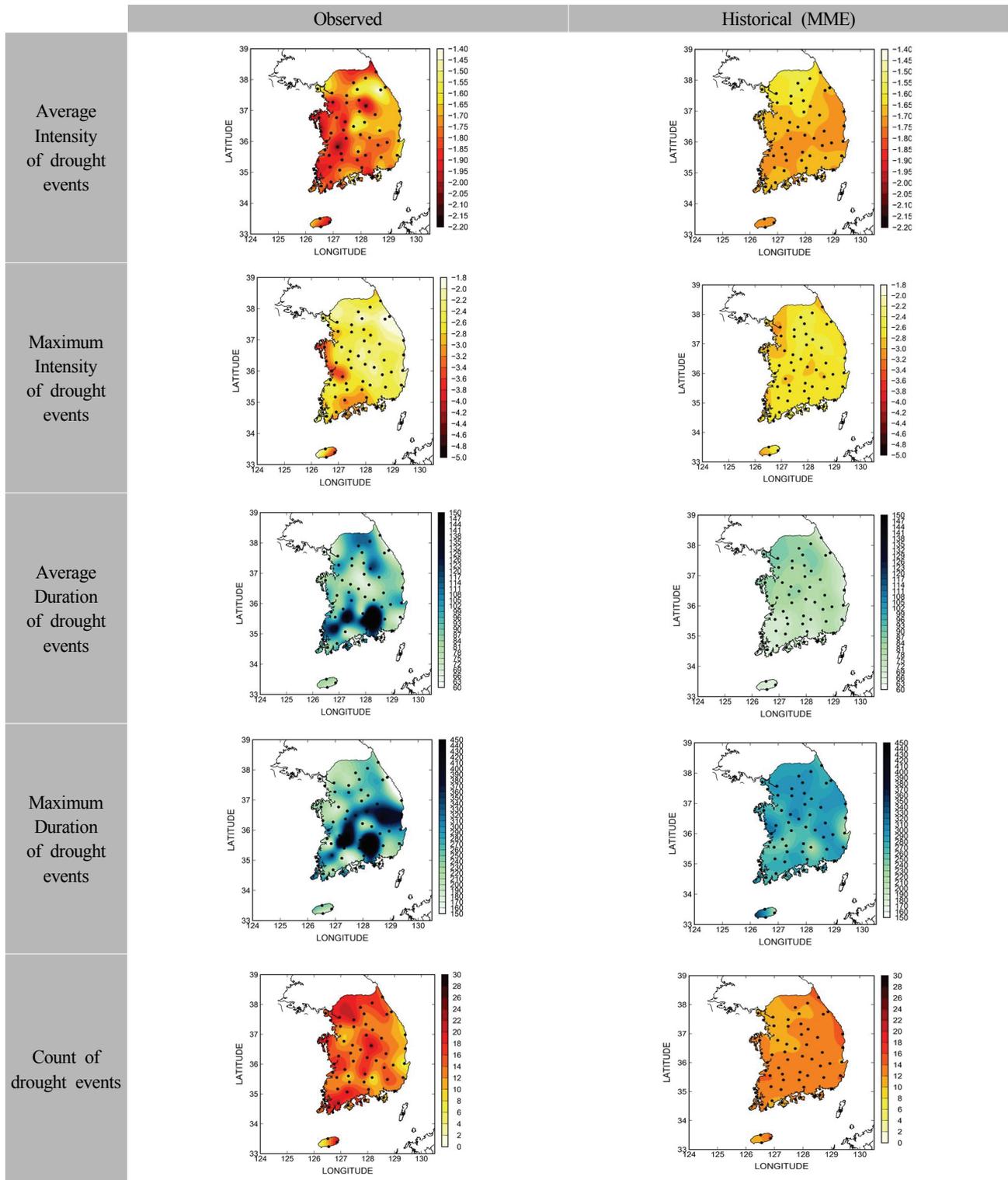


Fig. 7. The comparison between observed and historical drought properties such as average-maximum intensity, -duration, and the count of drought events.

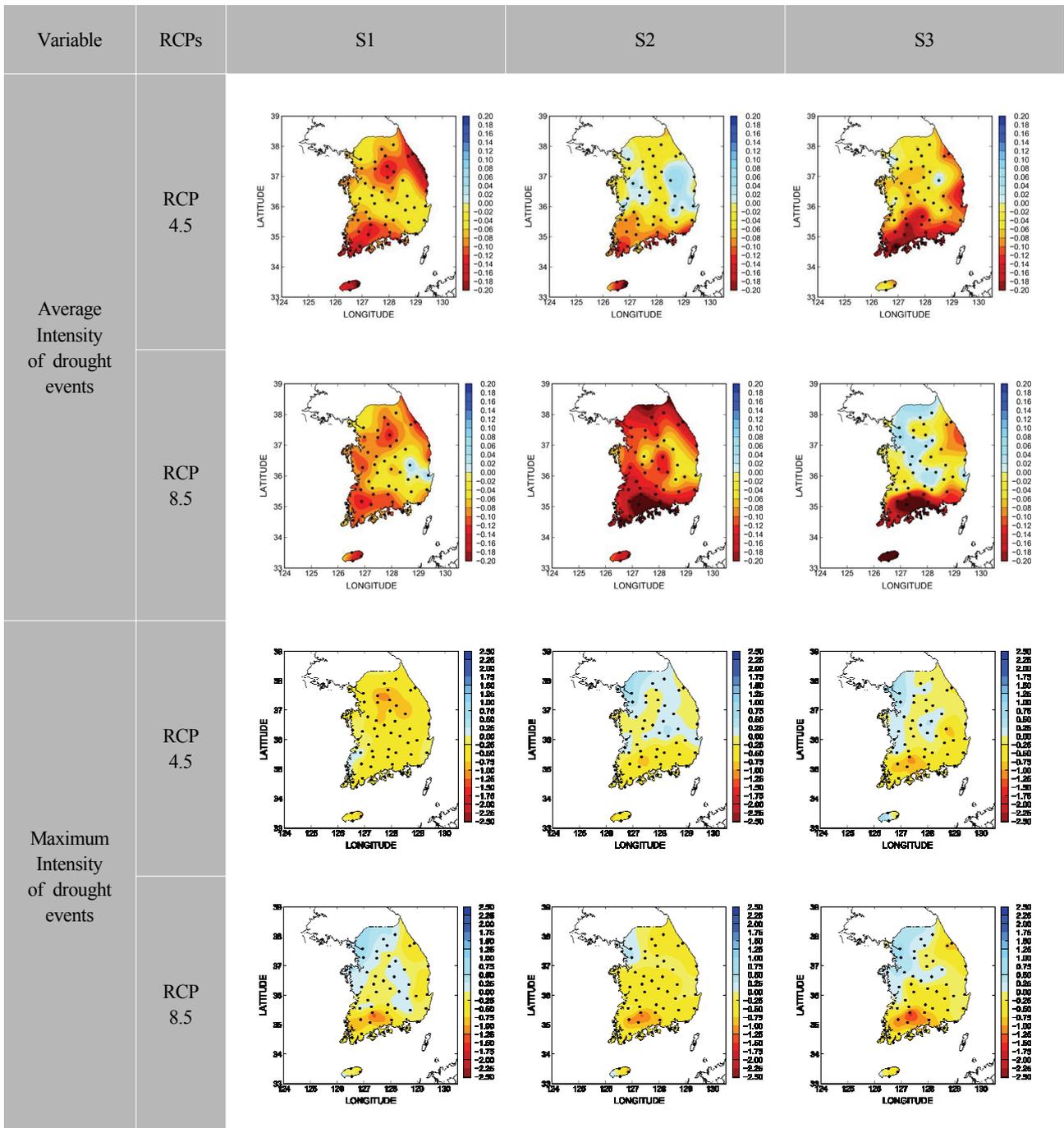


Fig. 8. The change of EDI's (average, maximum) intensity for S1, S2, S3 with the RCP 4.5, 8.5 scenarios compared to the past.

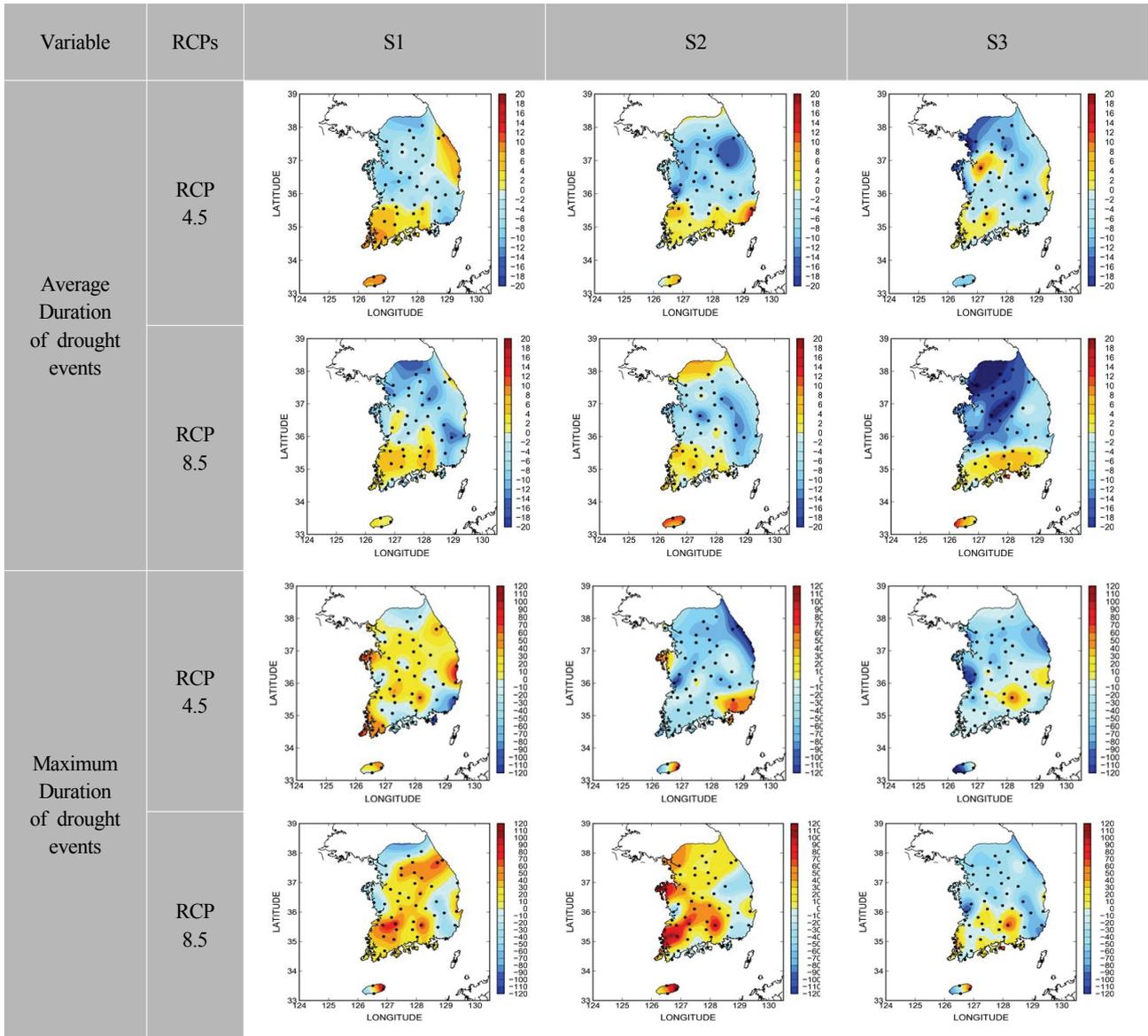


Fig. 9. The change of EDI's (average, maximum) duration for S1, S2, S3 with the RCP 4.5, 8.5 scenarios compared to the past.

지역적 변동성이 다중모형앙상블 과정에서 서로 상쇄되어 모든 지역에서 비슷한 경향을 보였다. 결과적으로, GCM들의 상세화를 통해 산정된 다중모형앙상블 (MME)기반 가뭄 특성의 공간적 분포와 실제 관측값의 공간적 분포는 서로 크게 다르게 나타났다. 하지만 GCM의 불확실성을 고려할 때 다중모형앙상블 (MME) 기반의 결과를 이용하는 것이 바람직하다. 이는 단일 GCM을 사용하는 경우 선택된 모형의 공간적 모의 특성에 따라서 가뭄특성의 공간적 분포

가 바뀔 수 있기 때문이다. 즉 제시된 결과는 10개 모형들 중에서 다수의 GCM들이 전망하는 증감에 대한 방향성으로서 의미를 갖으며 선택된 모형에 따라 상이한 결과를 보이는 단일 모형의 결과를 이용하는 것보다 비교하여 보다 신뢰할 수 있는 정보라 할 수 있다.

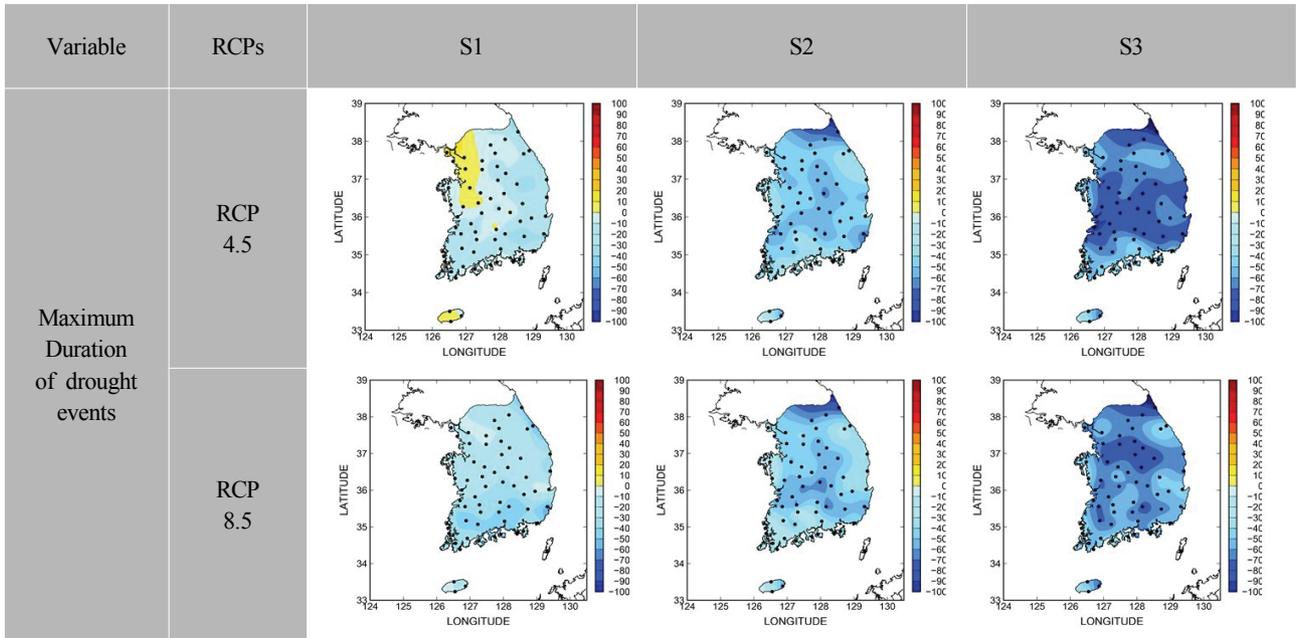


Fig. 10. The change of the number of EDI's occurrence for S1, S2, S3 with the RCP 4.5, 8.5 scenarios compared to the past.

4.3 가뭄 특성의 미래 전망

4.3.1 가뭄 사상별 최대강도의 전망

과거대비 미래기간 근 미래 (S1: 2010년~2039년), 중간 미래 (S2: 2040년~2069년), 먼 미래 (S3: 2070년~2099년)에 대해 RCP 시나리오 4.5, 8.5를 적용한 결과, EDI의 강도의 변화는 Fig. 8과 같다. EDI의 강도변화는 가뭄 사상들의 평균과 전체 가뭄 사상들 중 최소값에 해당되는 극한 강도에 대해 GCM의 과거기간 (Historical)을 기준으로 얼마나 증가 혹은 감소하는지를 다중모형앙상블 (MME)을 기반으로 보여주며, 붉은 색은 이전보다 EDI의 강도가 증가하며 파랑색은 감소하는 것을 의미한다. 평균 가뭄 강도의 변화는 RCP 4.5 시나리오에서 근 미래에서는 경기, 강원해안지역과 전남해안·제주도 지역에서 가뭄강도가 심화될 것으로 나타났으며, 중간 및 먼 미래 기간에서는 내륙지방보다는 남쪽 해안지역을 중심으로 가뭄이 심화될 것으로 나타났다. 반면 RCP 8.5시나리오에서는 전반적으로 남쪽 해안지역에서 RCP 4.5 시나리오의 경우보다 평균 가뭄 강도가 심화될 것으로 나타났다.

전체 기간 중 최대 가뭄 강도의 변화는 RCP 4.5 시나리오의 근 미래에서는 내륙지역을 중심으로 한반도 전체 지역에서 증가할 것으로 전망하고 있지만, 중간 및 먼 미래 기간에서는 서울·경기지역 외의 지역에서만 지속적으로

증가하는 것으로 나타났다. 반면, RCP 8.5시나리오에서는 서울·경기지역 외의 전남지역을 중심으로 최대 가뭄 강도가 증가하는 것으로 전망되고 있다. 따라서 기후변화가 점차 심화될 경우, 가뭄강도는 한반도 전역에서 점차 증가할 것으로 예상되나, 공간적으로는 서울·경기지역보다는 전남지역과 강원, 영남지역을 중심으로 가뭄 강도가 커질 것으로 예상된다.

4.3.2 가뭄 사상별 지속기간의 전망

과거 대비 미래기간 S1, S2, S3에 대해 RCP 시나리오 4.5, 8.5를 적용한 가뭄 지속기간의 변화는 Fig. 9와 같이 나타났다. EDI의 지속기간 변화는 가뭄 사상별 평균과 전체 가뭄 사상 중 최대 지속기간에 대해 GCM의 과거기간 (Historical)을 기준으로 하여 얼마나 증가 혹은 감소할지를 다중모형앙상블 (MME) 기반으로 보여주며, 붉은 색은 이전보다 가뭄 지속기간이 증가하며 파랑색은 감소하는 것을 의미한다. 가뭄의 평균 지속기간 변화는 RCP 4.5 시나리오의 경우 근 미래에서 전남 해안·제주도 지역과 강원일부지역에서 증가하며, 중간 및 먼 미래 기간에는 전남지역 및 남쪽 해안지역을 중심으로 증가할 것으로 전망되었다. 반면 RCP 8.5 시나리오 경우는 전반적으로 남쪽 해안지역을 중심으로 지속기간이 길어지며, 중부지방인 경우에는 오히려 지속기간이 짧아지는 경향을 보이고 있다. 전체 기간 중 발생할 수 있

는 가뭄의 최대 지속기간의 변화는 RCP 4.5 시나리오의 경우 근 미래에서는 내륙지역을 중심으로 한반도 전체지역에서 증가하고 중간 및 먼 미래 기간에는 부산, 대구의 일부지역에서만 증가하고 나머지 지역들에서는 감소하는 것으로 전망하였다. RCP 8.5 시나리오에서는 전남지역과 강원, 충청도를 중심으로 최대 지속기간이 증가하나 먼 미래에는 경남일부지역에서만 증가하는 것으로 전망되었다. 따라서 기후변화가 점차 심화될 경우, 가뭄지속기간은 전체적으로 점차 짧아질 것으로 예상되나, 전남지역과 남부해안지역을 중심으로 가뭄지속기간은 길어질 것으로 나타났다.

4.3.3 가뭄 발생횟수의 전망

과거 대비 미래기간별 RCP 시나리오 4.5 및 8.5 시나리오에 대한 가뭄 발생횟수의 변화는 Fig. 10과 같다. 붉은 색은 과거와 비교하여 가뭄 발생횟수가 증가하는 것을, 파랑색은 감소하는 것을 의미한다. RCP 4.5 시나리오에서 근미래에서는 경기일부지역에서만 소폭 증가하였으며, 이외지역들은 오히려 감소하였다. 중간·먼 미래에서는 한반도 전역의 가뭄 발생횟수는 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. RCP 8.5시나리오에서는 한반도 전역지역에 가뭄발생횟수가 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 IPCC의 제5차 한반도 기후변화에 따른 강수량 증가와 관련이 있을 것으로 판단된다(환경부·국립환경과학원, 2014).

4.4 고찰

가뭄전망 시나리오에 따른 가뭄특성인자인 강도, 지속기간, 발생횟수 변화를 살펴보면, 우리나라 기후가 온대기후에서 아열대기후특성으로 점차 변화하고 있는 것을 확인할 수 있다. 즉, 아열대 기후특성인 건기와 우기의 뚜렷한 구분은 건조기간이 길어진다는 것을 의미하며, 이는 가뭄강도의 증가로 이어진다. 하지만 가뭄발생횟수의 감소 및 장기적인 가뭄지속기간의 감소는 우리나라의 총 강수량 증가와 관련이 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 미래로 갈수록 강수량이 증가하여 가뭄의 발생빈도는 감소할 수 있으나 (Kim et al., 2011) 건조 지속기간의 증가 및 기온 상승으로 인한 증발산의 증가로 인해 가뭄의 심도가 증가될 수 있다는 (Kim et al., 2013) 한반도 대상의 선행 연구와 비슷한 결과이다. 최근 2017년 중부지역보다 남부지역의 강수량은 평년대비 약 50~60% 정도 밖에 되지 않아, 전남 및 경상도 지역의 물 부족 발생 가능성이 높아, 현재까지도 가뭄이 이어지고 있다. 이는 본

연구의 결과와 유사하며, 기후변화로 인한 지역적인 가뭄 발생과 밀접한 관계가 있다고 판단된다.

따라서 지역에 따른 물 잉여와 부족이 동시에 발생할 가능성이 높기 때문에 지역 간의 상호 물 공급 체계 시스템이 이뤄져야 향후 기후변화에 따라 효과적인 가뭄관리가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 이와 같은 결과는 현재 다양한 분야의 기후변화 영향 평가에 사용되고 있는 최신의 기후변화 시나리오 자료들이 가뭄의 강도, 지속기간, 발생횟수 등 가뭄 특성에 대한 과거 재현성이 부족한 상황에서 기후모형의 모의 값을 단순히 과거기간을 기준으로 미래기간의 전망 값과 비교함으로써 제시된 상대적인 차이로서의 한계를 인식하고 의사결정에 활용되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다중 기후모형 기반의 자료 획득 및 평가부터 상세화 기법 선정 및 적용까지 다양한 응용분야 활용 목적을 고려한 사용자 중심의 기후변화 영향평가를 위해 개발된 AIMS (APCC Integrated Modeling Solution) 프로그램을 이용하여 생산된 상세 기후변화 시나리오 자료를 기반으로 기후변화에 따른 한반도 미래 기간의 가뭄 특성 변화를 전망하였다.

제공된 29개 원시 GCM 중에서 60개의 관측소에서의 순단위 30년 평균 강수량을 이용한 시·공간적 재현성 평가를 통해 상위 10개의 GCM을 결정하였으며, 분석 결과 편의보정을 거치지 않은 원시 GCM들의 경우 관측 강수의 공간적 특징을 잘 표현하지 못하는 한계를 갖고 있음을 보여 주었다. 상세화 기법의 선정은 기후변화지수 중에서 가뭄 관련 강우 특성과 밀접한 관련이 있다고 판단되는 연속 무강우 기간 (CDD) 및 연속 강우 기간 (CWD), 연 강수량 (PRCPTOT), 강우량이 10mm가 넘는 강수일수 (r10mm), 일 강수지수 (SDII) 등 5개 지수에 대한 과거 재현성 평가와 강수의 관측 지점 간 상관성의 공간 재현성 평가를 통해 SQM 및 SDQDM 기법 중에서 재현성이 좋게 나타난 SQM 기법을 선정하였다.

가뭄의 강도, 지속기간, 발생횟수 등 특성에 대한 재현성 평가에서는 관측기반 결과는 관측 기반의 결과들은 관측지점별로 차별성의 보이며 공간적인 분포 특성을 보이는 반면, 동일한 과거기간에 대한 다중 GCM의 결과는 GCM별 지역적 변동성이 다중모형앙상블 과정에서 서로 상쇄되어 모든 지역에서 비슷한 경향을 보였다. 이는 원시 GCM의 낮은 공간

재현성 결과와 SQM이 갖고 있는 일단위 강우 발생순서 및 유무에 대한 보정에 있어서의 제한적인 특성에 기인하는 것으로 나타났다. 미래 기간에 대한 시나리오별 가뭄 전망을 가뭄특성인자인 강도, 지속기간, 발생횟수를 대상으로 분석한 결과, 전반적으로 가뭄의 발생횟수 및 지속기간은 총 강수량의 증가와 관련하여 감소하는 반면 가뭄의 강도는 증가하는 결과를 보였다. 지역적으로는 중부지방은 가뭄이 완화가 될 것으로 예상되는 반면, 전남지역 및 남해지역에서는 가뭄이 심화될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

사 사

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

REFERENCES

- Byun HR, Wilhite DA. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *J Clim* 12:2747-2756.
- Cho J, Cho W, Jung I. 2018a. rSQM: Statistical downscaling toolkit for climate change scenario using non parametric quantile mapping. [cited 2018 Feb 24]. Available from: <https://cran.r-project.org/web/packages/rSQM/index.html>
- Cho J, Jung I, Cho W, Hwang S. 2018b. User-centered climate change scenarios technique development and application of Korean peninsula. *J of Climate Change Research* 9(1):13-29
- Cho J, Hwang S, Go G, Kim KY, Kim J. 2015. Assessing the climate change impacts on agricultural reservoirs using the SWAT model and CMIP5 GCMs. *J Korean Soc Agric Eng* 57:1-12.
- Cho J, Oh C, Choi J, Cho Y. 2016. Climate change impacts on agricultural non-point source pollution with consideration of uncertainty in CMIP5. *Irrig Drain*. 65:209-220.
- Cho JP. 2013. Impact assessment of climate change for agricultural reservoirs considering uncertainty. *Research Report*, APEC climate Center, Busan, Republic of Korea.
- Chung U, Cho J, Lee EJ. 2015. Evaluation of agro-climatic index using multi-model ensemble downscaled climate prediction of CMIP5. *Korean J Agric For Meteorol* 17:108-125.
- Eum HI, Cannon AJ. 2017. Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble. *Int J Climatol* 37:3381-3397.
- Jain VK, Pandey RP, Jain MK, Byun HR. 2015. Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather Clim Extrem* 8:1-11.
- Karl TR, Nicholls N, Ghazi A. 1999. Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. In: *Weather Clim Extrem Springer*; pp. 3-7.
- Kim B, Sung JH, Lee BH, Kim DJ. 2013. Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP8.5 climate change scenario. *J Korean Soc Hazard Mitig* 13:97-109.
- Kim BS, Kwon HH, Kim HS. 2011. Impact assessment of climate change on drought risk. *J Wetl Res* 13.
- Kim BS, Sung JH, Kang HS, Cho CH. 2012. Assessment of drought severity over South Korea using standardized precipitation evapo-transpiration index (SPEI). *J Korea Water Resour Assoc in Korean with English abstract* 45:887-900.
- Kim DW, Byun HR, Choi KS. 2009. Evaluation, modification, and application of the effective drought Index to 200-Year drought climatology of Seoul, Korea. *J Hydrol* 378:1-12.
- Kim J, Kim S, Joo J. 2016. Analysis of drought characteristics depending on RCP scenarios at Korea. *J Korea Water Resour Assoc in Korean with english abstract* 49:293-303.
- Kim J, Kim S, Park M, Joo J. 2016. A comparison of drought prospection by future climate models. *J Korean Soc Hazard Mitig in Korean with English abstract* 16:463-472.

- Kim KH, Cho J. 2016. Predicting potential epidemics of rice diseases in Korea using multi-model ensembles for assessment of climate change impacts with uncertainty information. *Clim Change* 134:327-339.
- Kwak J, Kim S, Jung J, Singh VP, Lee DR, Kim HS. 2016. Assessment of meteorological drought in Korea under climate change. *Adv Meteorol* 2016.
- Lee JH, Kim CJ. 2013. A multimodel assessment of the climate change effect on the drought severity-duration-frequency relationship. *Hydrol Process* 27:2800-2813.
- Ministry of Environment, National Institute of Environmental Research, 2014, Korean climate change assessment report 2014.
- Nam WH, Hong EM, Choi JY, Cho J, Hayes MJ. 2015. Uncertainty characteristics in future prediction of agrometeorological indicators using a climatic water budget approach. *J Korean Soc Agric Eng* 57:1-13.
- Park BS, Lee JH, Kim CJ, Jang HW. 2013. Projection of future drought of Korea based on probabilistic approach using multi-model and multi climate change scenarios. *J Korean Soc Civ Eng* 33:1871-1885.
- Peterson T, Folland C, Gruza G, Hogg W, Mokssit A, Plummer N. 2001. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs. World Meteorological Organization Geneva.
- Rhee J, Cho J. 2016. Future changes in drought characteristics: regional analysis for South Korea under CMIP5 projections. *J Hydrometeorol* 17:437-451.
- Yoon SK, Cho JP. 2015. The Uncertainty of extreme rainfall in the near future and its frequency analysis over the Korean Peninsula using CMIP5 GCMs. *J Korea Water Resour Assoc* 48:817-830.
- Yoon SK, Cho JP, Moon YI. 2014. Non-parametric low-flow frequency analysis using RCPs scenario data: a case study of the Gwangdong storage reservoir, Korea. *J Korean Soc Civ Eng* 34:1125-1138.