국가 표준기후변화 시나리오와 ETCCDI지수를 이용한 한반도의 미래 극한사상변화 전망

The Future of Extreme Climate Change in the Korean Peninsula Using National Standard Climate Change Scenarios and the ETCCDI Index

정세진* · 박종렬** · 양동민*** · 김병식****

Jeung, Sejin*, Park, Jongyul**, Yang, Dongmin***, and Kim, Byungsik****

Abstract

The purpose of this study was to predict the effects of climate change on extreme climate in the Korean Peninsula. The CCAW's 13 national standard climate change scenarios, which have undergone SDQDM bias correction provided by the Korea Meteorological Administration, were used, and the capability to simulate climate change scenarios was reviewed based on the reference period. Future extreme climate was then predicted using the WMO's ETCCDI index. The Mann-Kendall tau was also used to forecast changes in the extreme indices related to precipitation and temperature on the Korean Peninsula. The analysis results showed that the WSDI index is expected to have a 54% spatial variability in the temperature-related index during the current period, and the TXx index is expected to have the largest spatial variability between regions at 121%. In terms of rainfall indices, the spatial variation of the r95p index was 59% in the current period, the spatial variation of the PRCP index was 42% under the RCP 4.5 scenario, and the spatial variation of the CDD index was 59%. As a result of checking the spatial distribution, both temperature and precipitation related indices showed a large increase in the central region of the Korean Peninsula, and in the future period, they showed the largest increase at the north coast of North Korea and the south coast of South Korea. In other words, the CWD index, which means the number of days of continuous wetting, tended to increase in the Gyeongsang-do and Jeolla-do regions and decrease in Chungcheong and North Korea. In addition, the DTR index, which means day crossing, is expected to increase across the Korean Peninsula.

Key words : National Climate Change Scenarios, Extreme Thoughts, Mann Kendall Tau

요 지

본 논문의 목적은 기후변화가 한반도에서의 극한기후에 미치는 영향을 전망하고자한다. 먼저, 기상청에서 제공하고 있는 SDQDM 편의보정을 거친 CCAW의 국가 표준기후변화 시나리오 13종을 이용하였으며, 참조기간을 기준으로 기후변화 시나리오의 모의 능력을 검토하였다. 이어 미래의 극한기후변화를 전망하기위해 WMO의 ETCCDI 지수를 이용하여 미래 극한기후를 전망하였다. 또한 Mann Kendall tau를 이용하여 한반도의 강수와 기온관련 극한지수 변화를 전망하였다. 분석 결과를 기온관련 지수에서 Current 기간일 때 WSDI지수가 공간적 변동성이 54%로 예상되며, TXx지수가 지역간의 공간적 변동성이 121%로 가장 클 것이라 예상된다. 강우관련 지수를 살펴보면 Current기간 일 때 r95p지수의 지역별 공간변동성이 59%로, RCP 4.5시나리오일 때 PRCP지수의 공간변동성이 42%로, CDD지수의 공간변동성이 최대 59%로 분석되었다. 공간분포를 확인해본 결과 기온과 강수관련 지수 모두 한반도 중부지역에서 큰 상승 경향을 보였고, 미래기간의 경우 북한의 서해안, 남한의 남해안 지역에서 가장 큰 증가경향을 보였다. 즉 일습윤지속일수를 의미하는 CWD지수는 경상도, 전라도 지역에서 증가 경향을 나타냈으며, 충청도와 북한전역에서 감소경향을 나타냈다. 또한 일교차를 의미하는 DTR지수는 한반도 전역에서 증가하는 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 국가 표준기후변화 시나리오, 극한기후, Mann Kendall Tau

*정회원, 노아에스앤씨(주) 공공사업부 과장(공학박사) (E-mail: climate@noaa.co.kr)

Member, Ph.D., Manager, Gov. & Public Business division, NOAA SNC Co.,Ltd.

**정회원, 노아에스앤씨(주) 공공사업부 차장(E-mail: jrpark82@noaa.co.kr)

Member, Deputy General Manager, Gov. & Public Business division, NOAA SNC Co.,Ltd.

***정회원, 노아에스앤씨(주) 대표(공학박사) (E-mail: ydm320@noaa.co.kr)

Member, Ph.D., CEO, NOAA SNC Co.,Ltd.

****교신저자, 정회원, 강원대학교 방재전문대학원 도시환경 · 재난관리전공 교수(Tel: +82-33-570-6819, Fax: +82-33-570-6819, E-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dep. of Urban Environment & Disaster Management, Kangwon National University

1. 서 론

지구온난화로 인한 기후변화는 대규모의 심각한 악영향을 미칠 것으로 예측됨에 따라 전 세계적으로 이슈가 되고 있다. 이러한 기후변화는 인간 삶의 기반 약화, 생태계의 악화, 수자원 및 식량문제, 해안 및 저지대의 위협, 산업 및 인간의 건강을 해치는 등 여러 부문에 광범위하게 영향을 미칠 것이다. 특히, 호우빈도의 증가, 홍수규모 및 빈도의 증가, 태풍강도의 증가 등으로 심각한 자연재해를 유발하게 될 것으로 예상된다. 일례로 지구의 평균기온은 지난 100년 동안 약 0.74 °C 상승하였고 우리나라의 경우 약 1.5 °C 정도 상승하였다. 또한 강수량의 경우 전지구적으로 약 2.3~3.6%가 증가하였다(IPCC, 2007).

기후변화는 기존에 겪지 못했던 극한사상 출현을 경고하며, 극한사상 변화 전망관련 연구는 상당히 오래전부터 진행되어져 왔다. 대표적인 연구사례를 살펴보면 다음과 같다. Kwon and Kim (2009)은 정상성 마코프연쇄모형을 이용하였는데, 천이확률과 확률분포 모수를 외부인자와 연동하여 비정상성을 구현, 강수 계열을 계절별로 모의하여 극한자료 분석을 실시하였다. Kim and Kim (2009)은 STARDEX (Statistical and Regional dynamical 축소 of EXtremes)와 B2기후변화시나리오를 이용하여 기후변화가 남한의 극한사상변화에 미치는 영향을 분석하였다. Kim et al. (2013)도 극한가뭄의 변화를 지역기후모형인 HadGEM3-RA 자료를 이용하여 전망하였고, 두 연구 모두 공통적으로 미래에 극한사상의 변화율이 크게 증가하는 것으로 전망하였다. Kang et al. (2014)은 World Meteorological Organization (WMO)에서 제시한 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)를 이용하여 강원도에서의 1990년 이전 이후의 극한사상변화를 분석하였다. 관측 및 기후변화시나리오 자료를 이용하여 극한강수 및 가뭄과 같은 극한기후를 평가하고 전망하기 위하여 분석목적과 대상에 따라 다양한 전망자료, 지표와 변수들을 선택하여 분석하고 있다. 연구에 따라 다양하게 적용된 자료와 지표들은 기후변화 영향평가 측면에서 진행되고 있지만 표준화라는 한계에 직면하고 있어서 최근에는 완벽한 접근법이 보다는 일관성 있는 접근법 확립을 위해서 표준화에 많은 노력을 기울이고 있다. 일관성을 갖추기 위해서는 자료와 분석의 표준화가 최우선 과제이다. 표준화를 확보하기 위한 가장 좋은 방법은 분석사례가 풍부하고 이론적 근거가 타당한 분석지표를 결정하여 이용하는 것이다. 유럽연합에서는 이미 이런 점을 인지하여, 극한기후를 평가하기 위하여 STARDEX를 제안하였고 WMO에서는 ETCCDI 지수를 제안하였다. 국외 연구에서는 연구지역에 따라 특징적인 지표를 제외하고 ETCCDI에서 제시한 지표를 사용하였다. 그 이유는 ETCCDI에서 제시한 지표를 바탕으로 지역특성에 맞게 사용할 수 있는 장점이 있다.

우리나라는 기후에 미치는 지형학적 영향이 매우 큰 편으

로 상세화가 필수적이다. 기존의 통계적 상세화는 현재와 미래 기후의 시공간적 분포가 동일하다는 가정을 포함하고 있어서 기후변화의 기본 가정에는 어긋나지만 과거 관측에 대한 편의보정이 가능하여 과거에 대한 정량적 비교가 가능하며, 고해상도 자료로 변환이 쉽다는 장점이 있다. 기후시스템의 변화를 고려하지 못하는 단점이 있어서 최근에는 역학적 및 통계적 상세화의 조합이 시도되고 있다(Cannon et al., 2015; Eum and Cannon, 2017). 최근 Eum and Cannon (2017)의 Quantile Delta Mapping (QDM)으로 기후모형의 장기추세를 보존하는(preserving) 방법을 제안하였다. 기후변화 영향평가에 대한 요구가 높아짐에 따라 기상, 대기, 대륙 및 빙하 등을 결합시킨 모형을 통해 생성된 기후변화 시나리오는 변동성이 매우 커 시나리오 간 불확실성이 고려되어야 한다. 이에 최근 여러 모형의 결과를 조합하여 기후변화 전망을 제시하는 Multi-Model Ensemble (MME)의 활용 사례가 늘고 있다(Räisänen and Palmer, 2001; Rajagopalan et al., 2002; Raftery et al., 2005). 이에 Korea Meteorological Administration (KMA)에서는 객관적인 인증절차에 따라 제시된 기준을 만족하는 국가 기후변화 표준 시나리오를 생산중이며, MME의 활용에 주목하여 단일시나리오를 활용할 경우 발생하는 기후변화시나리오의 불확실성 정보를 같은 기준으로 생산된 다양한 시나리오를 통해 미래 전망의 신뢰도를 확보하기 위함이다(국가 기후변화 표준 시나리오 기준 고시, 2018. 6. 11. 전부개정; KMA, 2018). 이에 다양한 기관에서 국가 기후변화 표준시나리오를 생산하고 있다.

이에 본 연구에서는 기후변화 대비 수자원 적응 기술 연구단(CCAW)에서 제시한 SDQDM 통계적 상세화를 적용한 13개 GCM 자료와 WMO에서 제시한 ETCCDI지수를 이용하여 한반도에서의 미래 극한기후변화를 전망하였다. 이 논문의 구성은 2장에서는 분석에 사용된 방법론과 자료에 대해 소개하고, 3장에서는 기후변화시나리오의 효용성을 검토, 4장에서는 기후변화시나리오에 따른 미래 극한지수 전망 결과를, 5장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 방법론 및 자료

2.1 방법론

2.1.1 개요

기후변화에 따른 미래 극한지수의 변화를 알아보기 위해 상세 기후변화시나리오와 기후변화 시나리오간 불확실성을 정량화하기 위해 MME가 요구된다. 이를 위해 우리나라 기상청의 국가 표준기후변화 시나리오중 CCAW에서 SDQDM 편의보정법을 적용한 13종의 GCMs 기후변화 시나리오를 사용하였다. 이렇게 구축된 기후변화시나리오의 참조기간 기후와 관측기후(강수량, 기온)을 비교하여 상세화된 기후변화 시나리오의 모의성능을 평가하였다. 이어서 RCP8.5

기후변화 시나리오를 이용하여 21세기 기후변화에 따른 한반도의 미래 극한사상변화를 전망하였다. 여기서 극한의 기후변화를 고려하기 위해 RCp8.5 기후변화시나리오를 이용하였다. Fig. 1에 본 연구의 연구흐름도를 도시하였다.

2.1.2 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

극한사상은 과거에는 발생하지 않았거나 아주 드물게 발생하던 기상현상들의 출현빈도가 증가하면서 나타나는 현상으로(Kim and Kim, 2009), 그 특성은 다음과 같이 설명할 수 있다. 통상 예측되지 않는 기상에 의해 이전에 관측되지 않은 정도의 큰 강우와 그로 인한 홍수 유출로 인명과 재산피해를 유발하는 홍수사상을 극한홍수 또는 이상홍수로 정의한다. 여기서 예측되지 않는 기상 중, 과거 30년동안 관측된 적이 없는 현상을 극한기상사상으로 설명한다. 한편, IPCC는 Third Assessment Report (TAR)에서 극한 기상 사상이란 특정기간을 벗어나 발생한 사상들 자체를 극한이라고 표현하였다. 강우에 대하여 예를 들어 설명하면, 이전의 강우 발생 시기를 벗어나 출현한 강우 사상 자체를 극한으로 표현하는 것이다. 이는 다른 해에 비하여 비가 많이 왔다는 양적인 부분만이 아니라 장마기간 이후에도 비가 왔다는 사실 즉, 기간적인 측면에서도 극한 기상사상을 해석할 수 있음을 의미한다(Kim et al., 2013). 또한 이러한 현상의 특징은 일반적으로 일정한 주기와 패턴에 따라 발생하지 않으므로 현재까지 수문분야에 적용되고 있는 연평균 강수량 및 기온의 자료에서 기후변화 특성과 요인들을 추출하기에 한계가 있다. 즉, 과거 발생한 강우와 기온 인자에서

극한 사상들을 추출하고 통계학적 기술을 적용하여 경향성을 분석하는 것이 보다 더 의미가 있을 것으로 판단하여 본 연구에 적용하고자 하였다.

시계열자료를 분석할 때 비정상성을 평가하는 것은 아주 중요하며, 비정상성은 강수량 및 기온의 증가로 인한 홍수 발생 및 가뭄 발생 빈도증가로 생각할 수도 있다. 하지만, 치수 및 재해 분야의 측면에서 볼 때, 평균값보다는 시간에 따라 변화하는 비정상성이 더욱 중요하다고 판단된다. 기후변화로 인한 미래 비정상성을 합리적으로 산정하기 위해서7는 통계학적으로 강수의 분포와 극치 사상의 경향성 분석이 선행되어야 한다. World Meteorological Organization (WMO)에서는 일 단위의 시계열 자료에 대한 극치사상의 정량화에 대한 중요성을 인식하고 극치 값의 분석과 관련한 가이드라인인 Guidelines on Analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation (WMO, 2009)을 제시하였다. WMO에서 제시한 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) 강수관련지수 11개, 기온관련지수 16개로 구성되어 있다(Table 1).

2.1.3 Mann Kendall 검정

Mann-Kendall 검정은 Mann (1945)에 의해 제안되었으며, Kendall (1975)의 추가적인 연구를 통해 개선되었다. 시계열 자료의 경향성 여부를 분석하기 위한 비모수적인 통계 기법으로 시계열 자료의 단조 경향(monotonic trend)을 분석하는데 유용하게 사용되어 지고 있다. Mann-Kendall검정의 귀무가설은 분석대상 시계열에 경향성이 존재하지 않는다는 것이며 검정 통계량 S를 정의하면 Eq. (1)과 같다(Mann, 1945; Kendall, 1975)

Fig. 1. Research Flow Chart

Table 1. Components of the ETCCDI Index

ID	Related variable	Description	Unit	ID	Related variable	Description	Unit
SU	TMAX	Summer day, TMAX >25℃	Day	DTR	TMAX & TMIN	Diurnal temperature range	℃
ID		Ice days, TMAX <0℃	Day	GSL		Growing season length	Day
TXn		Min TMAX	℃	CDD	PRCP	Consecutive dry days, PRCP <1mm	Day
TXx		Max TMAX	℃	CWD		Consecutive wet days, PRCP ≥ 1mm	Day
TX10p		Cool days, TMAX <10th percentile	%	PRCP		Annual al PRCP in wet days (daily PRCP ≥ 1mm)	mm
TX90p		Warm days, TMAX >90th percentile	Day	Rx1day		Max 1-day precipitation	mm
WSDI		Warm spell duration, TMAX >90th percentile	Day	Rx5day		Max 5-day precipitation	mm
FD	TMIN	Frost days TMIN <0℃	Day	R95p		Annual al PRCP when daily PRCP >95 percentile	mm
TR		Tropical nights, TMIN >20℃	Day	R99p		Annual al PRCP when daily PRCP >99 percentile	mm
TNn		Min TMIN	℃	SDII		Simple daily intensity index	mm/day
TNx		Max TMIN	℃	rnnmm		Annual count of days when PRCP≥ nnmm	Day
TN10p		Cool nights, TMIN <10th percentile	%	r10mm		Annual count of days when PRCP≥ 10mm	Day
TN90p		Warm nights, TMIN >90th percentile	%	r20mm		Annual count of days when PRCP≥ 20mm	Day
CSDI		Cold spell duration, TMIN <10th percentile	Day				

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

여기서, X_j : j 번째 data 값, n : data set의 크기

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

그리고 통계량의 분산은 Eq. (3)과 같다.

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

Mann-Kendall검정의 표준 검정 통계량과 단측 검정을 위한 P-value등은 Eqs. (4) 및 (5)와 같이 나타내어진다.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P &= 2(1 - \Phi(|z|)) \\ &= 2\left(1 - \frac{1}{2}\left(1 + \text{erf}\left(\frac{|z|}{\sqrt{2}}\right)\right)\right) \\ &= 1 - \text{erf}\left(\frac{|z|}{\sqrt{2}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

$\Phi(x)$: cumulative density function(cdf)
 $\text{erf}(x)$: error function

위의 식에서 Z 는 표준정규변량이며, S 는 전체 추정 통계치, $V(S)$ 는 S 에 대한 분산이다. P 는 표준 통계치로서 $P \leq \alpha$ 일 때, 귀무가설(H_0)을 기각하고 경향성이 있다는 가설을 수용한다. 여기서 α 는 검정에 대한 유의수준이며, 귀무가설(H_0)은 ‘경향성이 없다’이며 대립가설(H_1)은 ‘경향성이 있다’로 설정하였다. 95 % 이상을 신뢰구간으로 분석하고 전체 추정 통계치 S 의 값이 양일 때, 시간에 따른 증가추세를 의미하고 S 의 값이 음일 때, 감소추이를 의미한다.

2.2 자료

2.2.1 기후변화시나리오

기후변화 연구는 관측 자료를 바탕으로 하는 통계 추이분석과 미래기간에 대한 GCM을 활용한 미래기후 전망이 이루어

어지고 있는 추세이다. World Climate Research Programme (WCRP) 관리 하에서, Coupled Modeling Working Group (CMWG)은 Atmosphere-ocean general circulation models (AOGCMs)를 연구하기 위한 표준 실험 프로토콜로서 1995년 여러국가가 참여하여 Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)를 수립했다. CMIP는 기후 모델 진단, 검증, 상호 비교, 문서화 및 데이터 액세스를 지원하는 커뮤니티 기반 인프라를 제공하며, 다양한 연구자가 GCM을 체계적인 방식으로 분석할 수 있게 해줌으로써 모델 개선하였다. Program Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI)은 CMIP 데이터의 대부분을 관리하고, 미 교육부의 Biological

Modeling Center	Model	Institution
NSF-DOE-NCAR	CESM1 (BGC)	National Science Foundation, Department of Energy, National Center for Atmospheric Research
	GFDL-ESM2G	
NIMR/KMA	HadGEM2-AO	National Institute of Meteorological Research / Korea Meteorological Administration
NCC	NorESM1-M	Norwegian Climate Centre
MRI	MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute
MPI-M	HadGEM2-ES	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)
IPSL	IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre-Simon Laplace
	IPSL-CM5A-MR	
INM	INM-CM4	Institute for Numerical Mathematics
CNRM-CERFACS	CNRM-CM5	Centre National de Recherches Meteorologiques / Centre Europeen deRecherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique
CMCC	CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici
	CMCC-CMS	
CCCMA	CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis

Fig. 2. Weather Stations Used for the Analysis

2.2.2 관측 기후 자료

한반도는 S자로 동서가 좁고 남북으로 길어, 남북 직선거리만 약 1,013.2 km이다. 한반도에는 남한과 북한 두 나라가 공유하고 있으며, 총 면적은 약 227,943.05 km²이며 남한은 한반도 면적의 약 45%, 전체인구의 약 67%, 북한은 한반도 면적의 약 55%, 한반도 전체인구의 약 33%를 차지하고 있다. 한반도는 남한의 경우 1개 특별시, 6개 광역시, 8개 도, 1개 특별자치시, 1개 특별자치도, 북한의 경우 1개 직할시, 2개 특별시, 9개 도로 구성되어 있다. 한반도의 지형은 동쪽이 높고, 서쪽이 낮은 지형으로 산이 없는 지역은 김제와 철원 밖에 없다. Fig. 2는 분석에 사용된 한반도의 기상관측소 위치이다.

따라서, 한반도는 지형상의 영향으로 좁은 국토임에도 다양한 기후대가 나타난다. 3월에 기온이 상승하기 시작하고 8월에 가장 높고, 10월부터 기온이 하강한다. 특히, 겨울의 기온은 동위도상에서 히말라야 고지대를 제외하고 가장 낮다. 남한의 연평균 강수량은 약 1,347 mm이며, 북한의 경우 약 970 mm로 남한의 연평균 강수량의 약 72%에 불과하다. 연 평균기온의 경우, 남한은 약 14.1 °C 북한보다 4.8 °C 높다. Fig. 3은 한반도의 관측 연 강수량과 평균기온이며, 연 강수량의 경우 고지대인 강원도 태백산맥 인근과 강원도 북부지방과 중부지방이 많은데(Fig. 3(a)), 태백산맥과 강원도는 지형의 영향, 중부 지방은 서해안에서 유입되는 수증기의 영향이 크다. 연 평균기온은 태백산맥과 북한의 북서쪽 지역에서 낮다(Fig. 3(b)).

3. 기후변화시나리오 퍼포먼스

이 장에서는 13종의 GCMs 기후변화 시나리오 MME의

성능을 확인하고자 하였다. 이를 위해 각 모델 별 참조기간에 서의 80개 기상관측소의 월 강수량과 월 평균기온을 공간적으로 평균한 값을 Box plot으로 도시하였다.

3.1 연 특성

연 강수량에 대해 관측 값과 SDQDM 적용 전후에 대해 PDF를 비교하였다. 연 강수량은 평균에 대하여 대칭(bell-shaped)인 정규분포(normal distribution)에 잘 적합하고 있었고, 중앙치에 변수가 모여 있었다. 관측의 최빈값, 중앙값과 평균값이 모두 같은데, 상세화 적용 전(blue line in Fig. 4)과 적용 후(red line in Fig. 4)를 비교하면 상세화 적용 후에 관측의 평균(최빈, 중앙) 및 분산을 잘 따르고 있었다(Fig. 4). 연 평균기온도 마찬가지로 상세화 적용 전후에 대해 PDF를 비교한 결과, 기후모델은 일반적으로 기온에 대해 성능이 우수하므로 강수량과는 다르게 상세화 전의 기온도 관측과 유사하였다. 상세화 적용 후 관측 평균 등을 매우 잘 따르고 있었지만 분산은 다소 차이가 확인되었다(Fig. 5).

3.2 월 특성

앞에서 우리 참조기간에 대하여 연 강수량과 평균기온의 성능을 조사하여 그 활용성을 확인하였다. 하지만 한반도는 강수량과 기온의 월별 변동성이 매우 커, 이 절에서는 월 변동성을 검토하였다. Fig. 5(a)는 월 강수량에 대한 Box plot이며, 각각의 박스는 13종의 기후변화 시나리오 모델의 변동성, 청색 점선은 관측, 적색 실선은 MME 평균이다. 도시 결과, MME 평균은 관측과 매우 유사하였고, 강수량이 많은 7월과 8월에 변동성이 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 강수량과 마찬가지로 월 평균기온의 변동성을 확인하기 위해 MME의

Fig. 3. Annual Precipitation and Average Temperatures Over the Korean Peninsula (Jeung, 2019)

(a) Annual precipitation

(b) Annual average temperature

Fig. 4. Observation and Probability Density Functions of before/after SDQDM

(a) Monthly precipitation

(b) Monthly average temperature

Fig. 5. Variability for Monthly Time Series

Boxplot을 작성하였다. Fig. 5(b)는 월 평균기온에 대한 변동성 분석결과이며, 각 기후모델들의 변동성은 매월 비슷한 것을 확인하였다. 또한 MME 평균 값이 관측 값을 잘 모사하는 것을 확인하였다.

4. 기후변화에 따른 한반도의 극한사상 변화 전망

본 장에서는 남한의 65개 기상관측소 북한의 27개 기상관측소를 대상으로 RCP기후변화시나리오에 따른 한반도에서의 미래 극한사상변화를 전망하고, 그 공간적인 변화 양상을 파악하고자 한다. 이를 위해 먼저 기후변화에 따른 극한사상을 모의하기 위해 활용도가 높은 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)지수의 강우와 기온관련지수 27개를 대상으로 극한지수를 산정하였으며, ETCCDI지

수에 대한 양 또는 음의 추세를 식별하기 위해 비모수적인 Mann Kendall test를 사용하였다. Mann Kendall는 랭크 상관관계의 척도, 즉 각 양에 의해 순위가 매겨 질 때 데이터의 순서의 유사성(Gilbert, 1987)이다. 음의 연관성 및 양의 연관성의 범위는 -1 (-100%)에서 1 (100%)까지이며 Mann Kendall test는 수문자료 계열의 경년별로 감소 혹은 증가 경향이 있는가를 검사할 할 때 주로 사용하며, 선형회귀의 기울기는 최소 제곱 접근법으로 추정된 선형선의 급진성을 나타낸다. 또한 Mann Kendall를 이용하여 산정된 미래의 극한지수 경향을 확인하기 위해 분석기간을 분할하지 않고 전체기간(2011년~2100년)을 대상으로 하였다. Tables 3, 4는 기온과 강수관련 지수에 대한 Kendall tau를 %로 도시한 결과이다.

그 결과, 남한과 북한의 현재기후에 대한 각 지수별 차이를 살펴보면 최고기온 관련지수를 살펴보면 최고기온이 0 °C로

떨어진 날을 의미하는 id지수의 경우 북한은 약 29%, 남한은 약 57% 증가 경향을 보였다. 겨울철 영하일수를 의미하는 fd지수의 경우 북한은 약 87%, 남한은 약 67% 감소 경향을 보였으며 미래에는 영하일수가 감소하지만 겨울철 기온은 하강하는 것을 의미한다.

또한 여름철의 열대야를 의미하는 tr지수의 경우 북한은 약 90%, 남한은 약 135% 증가 경향을 나타내었다. 일교차를 의미하는 dtr지수는 미래로 갈수록 남한과 북한 모두 크게 증가할 것이라 전망되었다. 강우관련지수의 경우 무강우일수를 나타내는 cdd를 제외하고 모두 북한보다 남한이 더 높았으며, 연평균 강수량을 나타내는 prcp지수의 경우 북한은 약 30%, 남한은 약 21%가 증가할 것이라 전망되었다.

r95p지수의 경우 북한은 약 60%, 남한은 약 39% 증가 경향을 나타내었다. 강수량이 20 mm이상 발생 일수를 나타내는 r20 mm지수의 경우 북한은 약 13%, 남한은 약 20% 증가 경향을 나타내었다. 지속시간5일 강수량을 의미하는 rx5day 지수의 경우 북한은 약 26%, 남한은 약 14% 증가할 것이라 전망되었다.

또한 기후변화시나리오에 따른 미래 한반도에서의 극한 사상의 공간적 변화 양상을 확인하였다. Mann Kendall test의 결과물중 하나인 tau값을 이용하여 시간에 따른 각 지수의 상관관계를 분석하였고, 강우와 기온관련 지수 중 공간적인 변동성이 크게 나타내는 지수를 선택하여 공간분포도를 작성하여 한반도의 공간적 변동성을 확인하였다.

Table 3. Kendall's Analysis of Extremes Index to Temperature (Future period: 2011yr ~ 2100yr)

(UNIT: %)

	su	id	txn	txx	tx10p	tx90p	wsdi	fd	tr	tnn	tnx	tn10p	tn90p	csdi	dtr	gsl
Gangwon-do	47	-26	23	30	-49	54	16	-35	44	22	44	-53	61	-17	15	19
Gyeonggi-do	46	-23	21	27	-47	53	13	-36	43	24	45	-52	63	-16	18	19
Chungcheongbuk-do	49	-26	24	31	-56	56	19	-37	43	25	46	-55	62	-17	25	23
Chungcheongnam-do	50	-26	23	31	-56	55	19	-39	44	24	46	-56	63	-20	26	19
Seoul	45	-23	23	26	-46	52	13	-30	48	24	46	-52	63	-16	22	24
Incheon	46	-23	20	25	-46	52	13	-35	42	24	43	-52	63	-16	21	29
Busan	51	-27	27	28	-58	63	16	-32	42	25	46	-54	64	-17	20	19
Daegu	52	-25	26	37	-56	60	22	-32	43	27	48	-55	62	-16	9	13
Ulsan	56	-22	28	43	-55	63	19	-32	45	23	54	-55	60	-18	-3	16
Gwangju	58	-19	27	44	-56	63	21	-30	47	23	51	-55	60	-20	0	21
Daejeon	49	-28	25	28	-55	56	20	-37	40	27	46	-53	65	-15	30	18
Jeollanam-do	55	-23	27	38	-60	61	27	-34	46	23	48	-56	63	-19	14	17
Jeollabuk-do	52	-23	26	34	-57	61	21	-36	43	25	45	-54	64	-17	19	19
Gyeongsangnam-do	53	-21	26	34	-56	60	22	-36	42	27	49	-55	62	-16	10	19
Gyeongsangbuk-do	53	-26	27	28	-54	57	20	-34	43	24	47	-53	59	-15	9	21
Jeju	64	-21	31	48	-51	69	30	-33	53	30	59	-57	72	-17	16	32
Hamgyeongnam-do	38	-27	17	23	-45	42	12	-20	46	16	36	-51	53	-25	10	8
Hamgyeongbuk-do	39	-22	16	29	-42	52	16	-28	47	15	40	-49	57	-24	16	19
Ryanggang-do	34	-22	13	27	-37	44	11	-36	36	12	38	-46	51	-19	4	22
Pyeonganbuk-do	33	-27	7	26	-41	43	16	-22	47	17	31	-49	55	-16	-3	7
Pyeongannam-do	44	-29	12	28	-46	53	18	-31	44	18	30	-52	57	-18	9	11
Jagang-do	44	-30	9	29	-47	53	20	-22	46	17	27	-51	54	-19	2	7
Hwanghaebuk-do	30	-28	15	16	-47	25	8	-26	46	23	23	-48	58	-18	5	16
Hwanghaenam-do	42	-27	16	22	-49	40	14	-31	49	22	30	-52	59	-20	5	15
Nampo	47	-29	15	42	-49	49	19	-28	46	19	34	-51	59	-23	3	21
Pyeongyang	30	-28	13	15	-47	25	8	-29	46	22	25	-49	58	-18	3	12
Gaeseong	45	-34	18	25	-50	45	17	-37	51	24	32	-58	61	-19	13	21
Sinuiju	48	-28	10	32	-50	51	17	-24	49	21	29	-50	61	-19	7	14

Table 4. Kendall's Analysis of Extremes Index to Precipitation (Future period: 2011yr ~ 2100yr)

(UNIT: %)

	prcp	cdd	cwd	r95p	r99p	rx1day	rx5day	sdii	rnnmm	r10mm	r20mm
Gangwon-do	15	-3	-22	10	6	6	7	12	10	15	13
Gyeonggi-do	15	-10	-28	14	9	8	9	9	13	15	9
Chungcheongbuk-do	10	-7	-14	6	1	-1	-4	9	5	12	9
Chungcheongnam-do	11	-5	-24	8	2	-2	-5	9	7	9	10
Seoul	16	-14	22	17	8	8	11	8	14	12	9
Incheon	15	-15	-15	16	11	8	9	9	13	13	10
Busan	13	-18	15	9	5	5	1	13	-1	3	12
Daegu	11	-16	41	7	8	13	3	6	9	11	13
Ulsan	10	-14	38	11	6	10	4	9	6	2	1
Gwangju	11	-10	8	16	11	13	8	9	4	8	1
Daejeon	12	-5	-4	8	-3	-6	-8	9	5	11	13
Jeollanam-do	12	-14	0	11	8	9	8	13	0	7	9
Jeollabuk-do	11	-11	-1	9	4	2	0	12	2	7	12
Gyeongsangnam-do	14	-11	1	11	13	13	4	11	7	6	8
Gyeongsangbuk-do	12	-9	13	7	4	6	3	9	9	14	10
Jeju	18	-3	45	19	14	14	12	14	15	17	14
Hamgyeongnam-do	15	8	-15	15	12	11	8	14	5	9	10
Hamgyeongbuk-do	19	5	-48	14	9	6	12	14	8	14	15
Ryanggang-do	17	4	-65	14	10	7	9	13	10	19	15
Pyeongangbuk-do	17	3	-49	7	0	-3	2	9	17	16	17
Pyeongannam-do	16	1	-29	9	5	6	10	9	17	13	15
Jagang-do	16	-2	-56	11	4	7	15	9	16	14	13
Hwanghaebuk-do	19	2	-30	8	8	8	15	11	18	18	15
Hwanghaenam-do	16	-6	-15	11	9	10	9	10	17	15	12
Nampo	20	-1	47	16	14	15	5	13	17	10	13
Pyeongyang	20	1	-24	11	12	10	16	13	21	20	17
Gaeseong	12	-12	-57	9	8	9	6	10	11	11	8
Sinuiju	21	1	-40	15	18	18	9	15	15	16	19

본 연구에서는 지역별 공간변동성이 가장 큰 것으로 전망된 cwd지수와 dtr지수의 공간분포도를 작성하여 상세하게 살펴보고자 한다. Fig. 6은 cwd지수의 기간별 공간분포도이며, 결과를 살펴보면 Current 기간일 때 경기도, 충청도에서 가장 큰 경향을 보였고, 미래기간일 때 북한전역과, 강원도, 충청도 그리고 전라도 일부지역에서 큰 감소경향을 보였다. 또한 전라도 남쪽, 경상도에서 가장 크게 증가하는 것으로 전망되었다. Fig. 7은 dtr지수의 공간분포도를 나타낸 그림이다. 결과를 살펴보면 Current 기간일 때 북한 북주지역과 남쪽에서 상승경향을 보이고, 남한은 충청도, 전라도, 경상도에서 미래에 크게 상승하는 것으로 전망되었다. RCP8.5 기후변화시나리오에서 한반도 전역에서 상

승 경향을 보였다.

분석 결과를 종합하여 확인한 결과 미래 한반도에서의 극한강우 발생 빈도가 증가하고 그 규모도 커지는 것으로 전망된다. 특히 북한지역과 같이 무분별한 벌목 등으로 산림이 황폐화된 지역의 경우 홍수관련 자연재해에 취약해 질것임을 예상할 수 있다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 기상청에서 인정한 CCAW의 국가 표준기후변화시나리오 13종을 SDQDM 편의보정법을 이용한 상세화 된 기후변화 시나리오 자료를 사용하였다. 먼저 상세화

(a) Current(1986yr ~ 2005yr)

(b) Climate change(2011yr ~ 2100yr)

Fig. 6. Kendall Spatial Distribution of cwt Index

(a) Current(1986yr ~ 2005yr)

(b) Climate change(2011yr ~ 2100yr)

Fig. 7. Kendall Spatial Distribution of dtr Index

된 기후변화 시나리오 자료의 미래기후 적용 효용성을 확인하였고, ETCCDI지수를 이용하여 한반도의 강수와 기온관련 극한지수 변화를 전망하고자 하였다. 먼저 기후변화에 따른 극한사상을 모의하기 위해 활용도가 높은 Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)지수의 강우와 기온관련지수 27개를 산정하였다. 이어서 ETCCDI 지수에 대한 양 또는 음의 추세를 식별하기 위해 비모수적인 Mann Kendall tau test의 tau값을 이용하여 시간에 따른 각 지수의 상관관계를 분석하였고, 강우와 기온관련 지수 중 공간적인 변동성이 크게 나타내는 지수를 선택하여 공간분포도 작성을 통해 한반도의 공간적 변동성을 확인하였다.

분석 결과를 종합해보면 기온관련 지수에서 Current 기간 일 때 WSDI지수가 공간적 변동성이 54%로 예상되며, TXx 지수가 공간적 변동성이 121%로 가장 클 것이라 예상된다. 강우관련 지수를 살펴보면 Current기간 일 때 r95p지수의 지역별 공간변동성이 59%로, RCP 4.5시나리오일 때 PRCP 지수의 공간변동성이 42%로, CDD지수의 공간변동성이 최대 59%로 분석되었다. 공간분포를 확인해본 결과 기온과 강수관련 지수 모두 한반도 중부지역에서 큰 상승 경향을 보였고, 미래기간의 경우 북한의 서해안, 남한의 남해안 지역에서 가장 큰 증가경향을 보였다. 즉 일습윤지속일수를 의미하는 CWD지수는 경상도, 전라도 지역에서 증가 경향을

나타냈으며, 충청도와 북한전역에서 감소경향을 나타냈다. 또한 일교차를 의미하는 DTR지수는 한반도 전역에서 증가하는 것으로 전망되었다.

Jeung (2019)의 기후대 변화와 연계하여 분석해 보면 기후 변화로 인해 고온다습한 아열대 기후(Cfa)와 몬순의 영향을 받는 습한 대륙성 기후(Dfa)가 충청도, 전라도, 경상도에 걸쳐 증가하고, 극한지수의 일교차가 증가하는 것을 확인하였고, 미래 한반도에서의 극한강우 및 이상기온현상의 발생 빈도가 증가하고 그 규모도 클 것으로 전망되기 때문에 북한 지역의 경우 홍수 및 가뭄관련 자연재해에 취약해 질것임을 예상할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 극한재난대응기술사업의 연구비지원(2017-M OIS31-004)에 의해 수행되었습니다.

References

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, No. 17, pp. 6938-6959.

Eum, H.-I., and Cannon, A.J. (2017). 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*, Vol. 37, No. 8, pp. 3381-3397.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Van Nostrand Reinhold, New York. European Environment Agency.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jeung, S.J. (2019). *Impact assessments of climate and hydrological cycle changes in North Korea based on RCP climate change scenarios*. Ph.D. dissertation, Kangwon National University.

Kang, K.K., Lee, D.S., Hwang, S.H., and Kim, B.S. (2014). Analysis of extreme weather characteristics change in the Gangwon Province using ETCCDI indices.

J. Korea Water Resour. Assoc., Vol. 47, No. 12, pp. 1107-1119.

Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods* (4th ed.). London, UK: Charles Griffin.

Kim, B.K., and Kim, B.S. (2009). Analysis of impact climate change on extreme rainfall using B2 climate change scenario and extreme indices. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1B, pp. 23-33.

Kim, B.S., Sung, J.H., Lee, B.H., and Kim, D.J. (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.*, Vol. 13, No. 2, pp. 97-109.

Kwon, H.H., and Kim, B.S. (2009). Development of statistical downscaling model using nonstationary markov chain. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, Vol. 42, No. 3, pp. 213-225.

Mann, H.B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, Vol. 13, No. 3, pp. 245-259.

Korea Meteorological Administration (KMA). (2018). Notice of *National climate change standard scenario criteria* (June 11, 2018). Retrieved from http://www.kma.go.kr/notify/information/law_instruction_list.jsp?bid=lawinst&mode=view&num=484&page=6&field=&text=

Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., and Polakowski, M. (2005). Using bayesian model averaging to calibrate forecast ensemble. *Monthly Weather Review*, Vol. 133, No. 5, pp. 1155-1174.

Räisänen, J., and Palmer, T.N. (2001). A probability and decision-model analysis of a multi-model ensemble of climate change simulations. *Journal of Climate*, Vol. 14, No. 15, pp. 3212-3226.

Rajagopalan, B., Lall, U., and Zebiak, S.E. (2002). Categorical climate forecasts through regularization and optimal combination of multiple GCM ensembles. *Monthly Weather Review*, Vol. 130, No. 7, pp. 1792-1811.

World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*. Climate Data and monitoring, WCDMP-No.72.

Received	November 1, 2019
Revised	November 1, 2019
Accepted	November 11, 2019