

## RCP 기후변화시나리오를 이용한 극한지수 변화 전망

### Change Projection of Extreme Indices using RCP Climate Change Scenario

정 세 진\* / 성 장 현\*\* / 김 병 식\*\*\*

Jeung, Se-Jin / Sung, Jang Hyun / Kim, Byung-Sik

#### Abstract

The study uses a regional climate model to check future changes in extreme climate, to calculate extreme indexes presented by STARDEX, and to analyze the trends to predict the continuity and changes in the spatial distribution of extreme climate in the future. An analysis of extreme climate indices showed that they are likely to increase in the Seoul metropolitan area, in Gyeonggi-do, in Yongdong in Gangwon-do, and in the southern shore region of Korea. It is, however, forecasted to diminish in the central inland region. The analysis also showed that the average temperature in Korea will increase because of climate change. On the other hand, an analysis of extreme rainfall indexes showed that the trend of heavy rainfall threshold is 0.229 in Seogwipo, the greatest five-day rainfall is 5.692 in Seogwipo, and the longest dry period is 0.099 in Sokcho. Of extreme temperature indexes, the trend of Hotdays threshold is 0.777 in Incheon and the longest heat wave is 0.162 in Uljin. The Coldnight threshold is 0.075 in Inje and -0.193 in Tongyeong, according to the analysis.

**Keywords** : regional climate model, STARDEX, extreme indices, trend analysis

#### 요 지

본 논문에서는 미래 극한기후의 변화를 확인하고자 지역기후모형을 이용하여, STARDEX에서 제시한 극한지수를 계산하고 경향성 분석을 통해 미래 극한기후의 지속성과 공간적 분포의 변화양상을 파악하였다. 강수관련 극한지수를 분석한 결과, 수도권과 경기도, 강원도 영동지역, 남해안 지역에서 증가경향성이 확인되었고, 중부 내륙지역에서는 감소경향성이 전망되었다. 기온관련 극한지수를 분석한 결과 기후변화로 인해 미래 우리나라의 평균 기온이 현재보다 증가하는 것을 알 수 있었다. 강수관련 극한지수 중 집중호우 한계점은 경향성에 대한 기율기 값이 서귀포에서 0.229, 지속기간 5일 최대 강수량은 서귀포에서 5.692, 최대 건조지속기간은 속초에서 0.099로 확인되었다. 기온관련 극한지수 중 Hotdays 한계점의 경향성에 대한 기율기 값은 인천에서 0.777, 최대혹서기기간은 울진에서 0.162, Coldnight 한계점은 인제에서 0.075, 동결일수는 통영에서 -0.193으로 확인되었다.

**핵심용어** : 지역기후모델, STARDEX, 극한지수, 경향성분석

\* 국립강원대학교 도시·환경방재공학전공·석사과정 (e-mail: Climate@kangwon.ac.kr)

Department of Urban& Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

\*\* 국토교통부 영산강홍수통제소 시설연구사 (e-mail: jhsung1@korea.kr)

Transport and Maritime Affairs, Yeongsan Flood Control Office, Gwangju, Republic of Korea

\*\*\* 교신저자, 국립강원대학교 소방방재학부, 방재전문대학원 교수 (e-mail: hydrokbs@kangwon.ac.kr, Tel: 033-570-6819)

Corresponding Author, Department of Urban& Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University

## 1. 서 론

산업화와 도시화가 급속도로 진행됨에 따라 이산화탄소 배출량이 급격하게 증가하고, 이러한 이산화탄소의 증가는 지구온난화와 기후변화로 이어지고 있다. 일례로 지구의 평균기온은 지난 100년 동안 약 0.74°C 상승하였고 우리나라의 경우 약 1.5°C정도 상승하였다. 또한 강수량의 경우 전지구적으로 약 2.3~3.6%가 증가하였다(IPCC, AR4 (2007)).

기후변화로 인하여 기존에 겪지 못했던 극한사상 출현을 경고하며, 극한사상 변화 전망관련 연구는 상당히 오래전부터 진행되어져 왔다. 극한사상 변화 전망 연구에서는 공통적으로 전지구 기후변화 전망자료에 대해서 저해상도의 공간 분해능과 물리 과정의 단순화로 지역규모 또는 국지 규모의 기후 현상을 현실적으로 표현하지 못하는 한계점을 지적하고 있다. 따라서 대부분의 연구에서는 상세화(downscaling) 과정을 통한 기후변화 전망자료를 이용하여 기후변화로 인한 극한기후를 전망하고 있고, 대표적인 사례를 알아보면 다음과 같다. 통계적(statistical) 상세화를 이용한 연구사례로, Kwon et al. (2008)은 정상성 마코프연쇄 모형을 이용하였는데, 천이확률과 확률분포 모수를 외부인자와 연동하여 비정상성을 구현, 강수 계열을 계절별로 모의하여 극한자료 분석을 실시하였다. Kyung et al. (2009)은 K-NN(K-Nearest Neighbor)을 이용한 축소기법을 제안하고, 일 단위 강수를 발생시킨 후, 빈도해석을 실시함으로써 기후변화가 지점단위 일 강수량의 빈도에 미치는 영향을 평가하였고 평가 결과, 서울지점의 빈도별 강수량이 증가하리라 전망하였다. Sung et al. (2012)은 역학적(dynamic) 상세화를 거친 지역기후변화(regional climate change) 전망자료를 이용하여 미래 극한강수의 변화를 전망하였다. 마찬가지로 Kim et al. (2013)도 가뭄의 변화를 지역기후모형인 HadGEM3-RA 자료를 이용하여 전망하였고, 두 연구 모두 공통적으로 미래에 극한기후가 증가하리라 전망하였다.

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 영향평가와 관련하여 연구의 수준을 높이고 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 과

제인데 그 시작은 국가표준 기후시나리오 자료의 생산에서 출발하게 된다. 우리나라 기상청도 이에 발 맞춰 2012년에 새로운 패러다임에 맞는 RCP (Representative Concentration Pathways)에 기반한 국가표준 전지구(global) 기후변화시나리오(HadGEM2-AO) 및 지역기후변화시나리오(HadGEM3-RA)가 생산되었다. 이렇게 생산된 자료를 이용한 분석에서 표준화를 확보하기 위한 가장 좋은 방법은 분석사례가 풍부하고 이론적 근거가 타당한 분석지표를 결정하여 이용하는 것이다. 유럽연합에서는 이미 이런 점을 인지하여, 극한기후를 평가하기 위하여 STARDEX (STATistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes)를 제안하기도 하였다(European Union, 2005).

상술한 바와 같이 우리나라를 대상으로 한 극한기후 변화 전망에는 저해상도의 전지구 전망자료 보다는 지역기후변화시나리오가 필수적이다. 따라서 이 연구에서는 생산된 국가표준 지역기후변화시나리오를 대상으로 효용성이 입증된 STARDEX의 극한지수를 계산하여, 우리나라 미래 극한기후의 변화를 전망하였다. 특히, 21세기를 전반기, 중반기, 후반기로 구분하고, 각 지점별 강수와 기온의 극한지수 증감경향성을 조사하였다. 이 논문의 구성은 2장에서는 그간 진행되어온 극한지수 적용사례를 소개하고, 3장에서는 새로운 기후변화 전망자료로 계산한 극한지수 결과를, 4장에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 극한지수 적용사례

본 장에서는 극한지수와 관련된 국내 적용사례를 살펴 보았는데, 극한지수 중 STARDEX 지수와 그 외의 지수들로 구분하였다. STARDEX 사례는 Kim et al. (2008, 2009)과 Gyeonggi Research Institute (2009)의 지역평가지표, Seoul Development Institute (2011)에서 수행한 결과를, 그 외 지수는 Kim et al. (2011)의 ETCCDI 그리고 Lee et al. (2012)의 지수를 조사하여 정리하였다.

Kim et al. (2008)은 유럽연합의 STARDEX 프로젝트에서 제시한 강수관련 지수 6개, 기온관련 지수 4개 총 10개의 항목을 이용하여 우리나라의 과거부터 현재까지 기후특성을 평가하였고, 2009년에는 B2기후변화시나리오를 이용하여 미래 극한기후 사상을 전망하였다. 또한 Seoul Development Institute (2011)에서는 극한강수의 변화를 예측하기 위하여 과거 관측자료와 대기순환모형(General Circulation Model: GCM)시나리오 자료에 대하여 STARDEX 지수를 계산하였다. Gyeonggi Research Institute (2009)

에서는 최근 10년간(1999~2008) 경기지역의 AWS자료와 기상청에서 제공하고 있는 기후 예측모델을 대상으로 취약성 평가 지수를 계산하였다. 사용한 지역평가지표는 기후노출, 민감도와 적응능력으로 구분된다. 이 사례에서 제시한 기후변화 취약성 평가지표는 기후노출에서 9개, 민감도에서 11개, 적응능력에서 15개로 지역평가지표를 도출하여 미래 경기도에서의 기후변화 취약성을 평가하였다. Kim et al. (2011)은 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)에서 제시한 27개의 극한지수(ETCCDI, Expert Team on Climate Change Detection and Indices)를 검토하여 미래 우리나라의 극한기후를 평가하였다. 또한 Lee et al. (2012)은 지역기후모델 자료를 PRID (PRIsm based Downscaling estimation)모델을 이용하여 상세화하였고, 이 자료에 대하여 극한지수를 분석하였다. 사용된 극한지수는 강수관련(1일 최대강수량, 5일 최대 강수량) 2개 지수와 기온관련(서리일수, 여름일수, 결빙일수, 열대야, 식물성장기간, 폭염일수) 6개 지수였다.

Joh et al. (2012)은 강수량, 평균온도, 최고 및 최저온도 등과 같은 자료를 바탕으로 정량적 지표를 산정한 기존연구를 바탕으로 연도별 변화 및 지역적 격차를 분석시 고려해야 할 문제점을 제시하였다. 이 연구에서는 시공간 스케일에 대한 명확한 정의가 없어 연구의 목적에 따라 매우 상이한 정의를 내림에도 불구하고 극한기후라는 하나의 용어로 사용하는 것에 문제가 있다고 판단하였고, 극한기후에 관한 정량적인 연구를 위하여 다음과 같은 개선점을 제안하였다. 극한기후는 다양하게 정의되므로 이에 시공간 분석스케일에 따라 다른 결과가 도출될 수 있다. 또한 극한기후 지수 산정은 연구자의 주관도 개입될 수 있기 때문에 연구자들의 합의된 용어 정의가 우선 필

요하고, 지리적 특성과 기후변동성 등을 고려하여 연구 목적에 부합하는 지수의 선정이 필요하다는 것이었다.

본 연구에서는 지리적 특성과 기후변동성 등을 고려하였을 때 STARDEX에서 제시한 극한지수가 본 연구에 가장 적합하다고 판단하였는데 그 근거로 STARDEX 극한지수들은 특정 백분위수(percentile)에 해당하는 방식으로 산출하게 된다. 예를 들어 1년(365일)을 기준으로 하였을 때 이들의 일자료를 관측크기의 순서대로 오름차순 또는 내림차순으로 배열한 후, 상위 10번째에 해당하는 값을 취하게 된다. 따라서 대상 지역의 면적, 지형과 사회적 기반시설 구축 정도 등의 각 지역의 특성에 따라 상대적으로 그 값을 비교하고 평가할 수 있다. 또한 상대적으로 변하지 않는 기준을 제시하고 이를 지수화 하여 적용함으로써 객관성과 일관성을 유지할 수 있게 된다.

본 연구에서 적용된 STARDEX 극한지수는 Table 1과 같다. 강수관련 극한지수는 집중호우 한계점, 지속기간 5일 최대 강수량, 습윤일의 강우강도, 최대 건조 지속기간, 집중호우 한계점 이상 강우량 비율과 집중호우 한계점 이상 발생 빈도이고, 기온관련 극한지수는 Hotdays 한계점, Coldnight 한계점, 동결일수, 최대 혹서기 기간이다.

### 3. 적응결과

#### 3.1 현재 기후에서 RCP 자료의 모의 성능 비교

이 장에서는 현재 기후에서의 RCP (Representative Concentrations Pathways) 자료의 효용성을 확인하기 위하여 전국 57개 관측소의 관측자료와 새로운 지역기후변화시나리오인 HadGEM3-RA 자료를 기상청 관측지점으로 이중선형 내삽하고 극한지수를 계산하여 공간분포를 비교하였다(Fig. 2~11). 분석에 이용된 지점은 Fig. 1과 같다.

Table 1. List of Extreme Indices in Study (STARDEX, 2005)

Indices	Definition	Unit
Heavy rainfall threshold	90th percentile of rainy day amounts	mm/day
Greatest 5-days rainfall	Greatest 5-days total rainfall	mm
Average wetdays rainfall	simple daily intensity (rainfall per a rainday)	mm/hr
Longest dry period	Maximum number of consecutive dry days	days
Heavy rainfall proportion	% of total rainfall from, events >long-term 90th percentile	%
Heavy rainfall days	Number of events >long-term 90th percentile of raindays	%
Hotdays threshold	Tmax 90th percentile ( ) - the 10th hottest night per season	℃
Coldnight threshold	Tmax 10th percentile ( ) - the 10th coldest night per season	℃
Frost days	Number of frost days Tmin < 0℃	days
Longest heat wave	Heat wave duration (days)	days

우리나라 기후특성을 고려하여 강수관련 지수중 집중호우 한계점, 지속기간 5일 최대 강수량, 습윤일의 강우강도, 집중호우 한계점 이상 강우량 비율, 집중호우 한계점 이상 발생 빈도는 여름철(6월, 7월, 8월)의 자료를, 최대건조 지속기간은 가을과 관계되기 때문에 겨울철, 봄철 자료를, 기온관련 극한지수 중 Hotdays 한계점, 최대혹서기 기간은 여름철의 기온자료를, Coldnight 한계점과 동결일수는 겨울철 기온자료를 이용하였다. 강수관련 극한지수 중 집중호우 한계점의 경우 수도권 지역과 남해안 지역이

가장 큰 것으로 나타났고, 지속기간 5일 최대 강수량의 경우 수도권과 강원도 그리고 남해안 지역에서 가장 많이 나타났다. 습윤일의 강우강도는 수도권과 남해안 지역에서 가장 강하게, 최대건조 지속기간의 경우 경상남북도 지역이 가장 길게, 집중호우 한계점 이상 강수량 비율은 수도권과 강원도 영동지역 그리고 전라남도 지역에서 비교적 크게 확인되었다. 집중호우 한계점 이상 발생 빈도의 경우 강원도 지역이 가장 빈번하였다. 기온관련 극한지수중 Hotdays 한계점은 대관령 지역을 제외하고 전국적으로 높게 분석되었고, 최대 혹서기 기간은 강원도 영동지역과 경상남북도 해안지역에서 길게 분석되었다. Coldnight 한계점의 경우 전국 모두 비슷하게 나타났고 동결일수의 경우 중부 내륙지역과 전라남북도 지역이 길게 나타났다. RCP기후전망 현재자료와 관측자료를 비교한 결과 RCP 기후전망자료가 관측자료를 비교적 잘 따름을 확인하였다(Fig. 2~11). 두 자료가 나타내고 있는 공간분포를 보면 강수량의 경우 전반적으로 남해안 지역과 수도권에 집중되는 경향성을, 기온의 경우도 위도 및 해발고도가 높을수록 기온이 낮고 서해안보다 동해안의 기온이 높게 나타나는 등 위도, 지형, 해양 등의 영향을 비교적 잘 반영하고 있음을 확인하였다.

지수별 정량적인 크기를 알아보기 위하여 지역 평균값을 계산한 결과, 집중호우 한계점의 경우 관측은 59.13 mm/day, RCP 기후전망자료는 34.04 mm/day로 25.09 mm/day의 차이가 있었고, 지속기간 5일 최대 강수량은의 관측 213.51 mm, 전망자료는 170.36 mm로, 43.15 mm의 차이가 있었다. 습윤일의 강우강도는 관측 23.86 mm/hr, 전망자료 13.34 mm/hr로 10.52 mm/hr의 차이가, 최대건조 지속

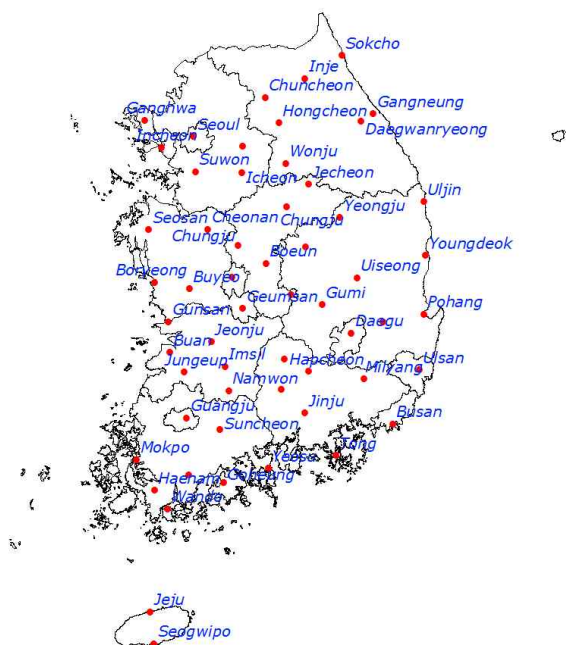


Fig. 1. Locations of the Weather Stations Used in this Study

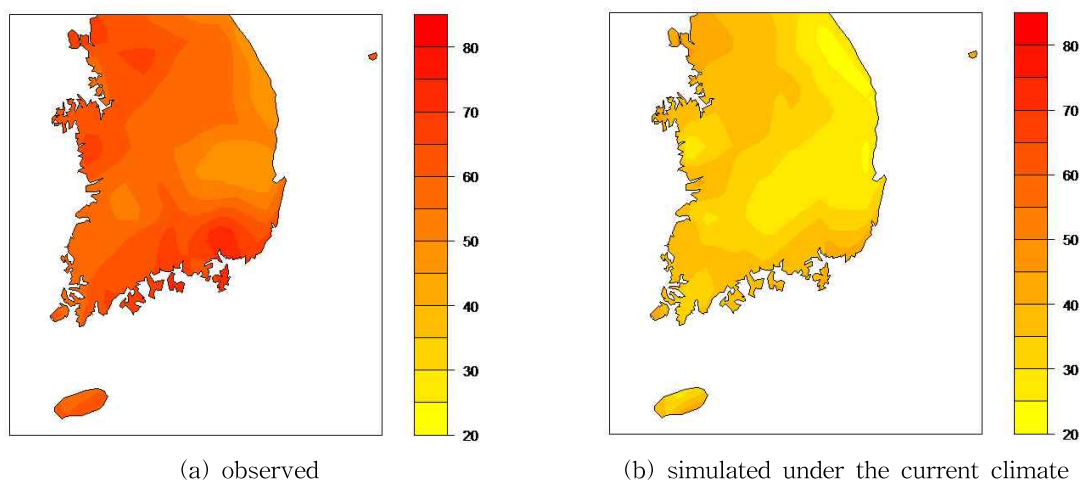


Fig. 2. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Heavy rainfall threshold)

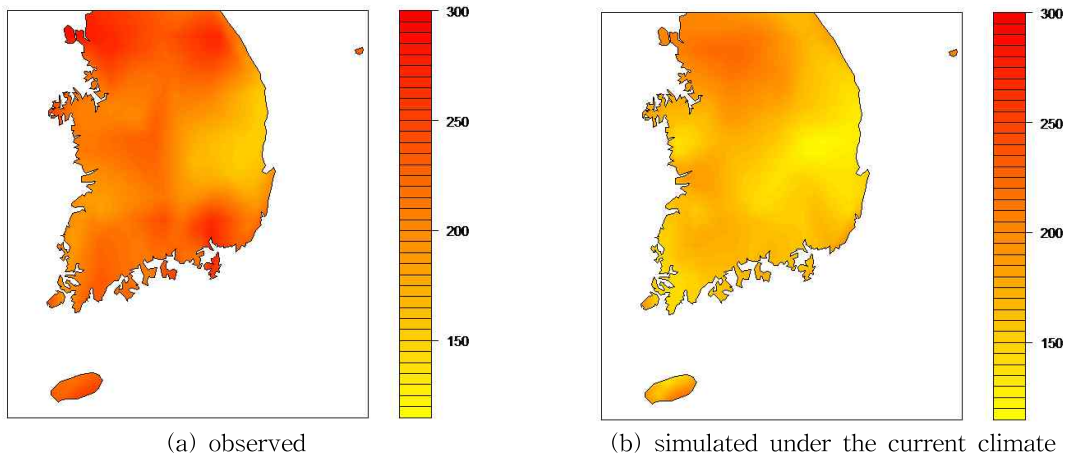


Fig. 3. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Greatest 5-days rainfall)

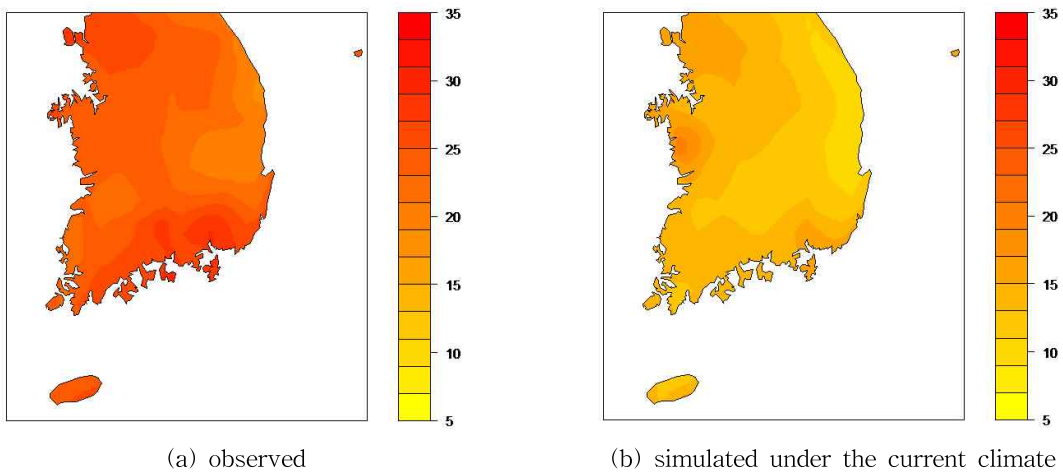


Fig. 4. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Average wetdays rainfall)

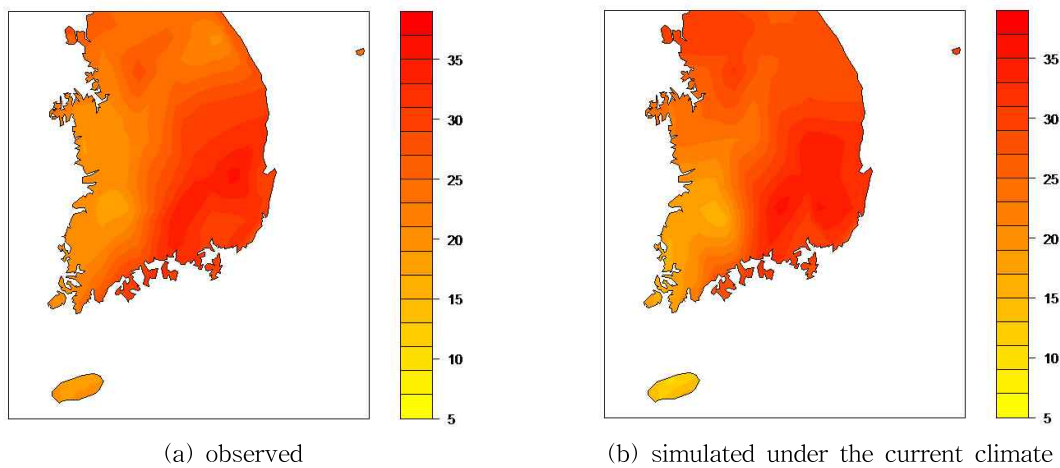


Fig. 5. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Longest dry period)

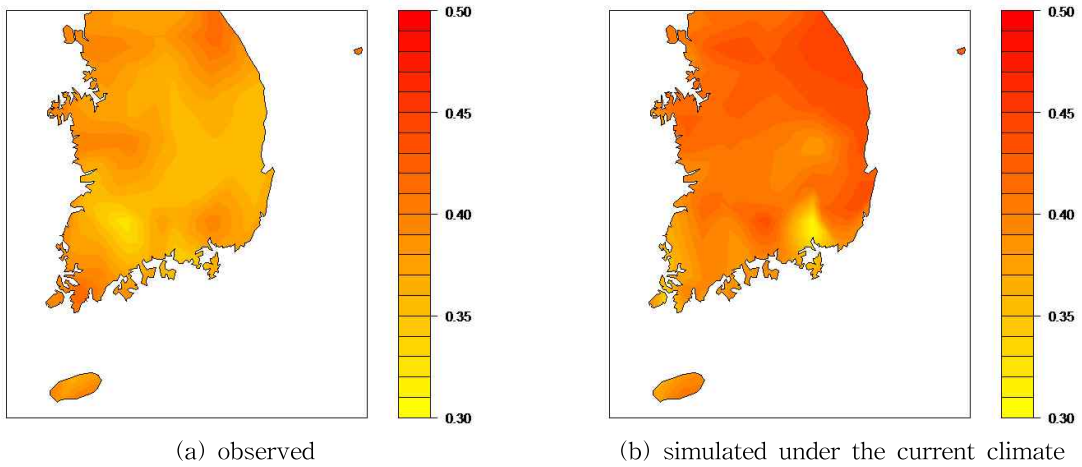


Fig. 6. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Heavy rainfall proportion)

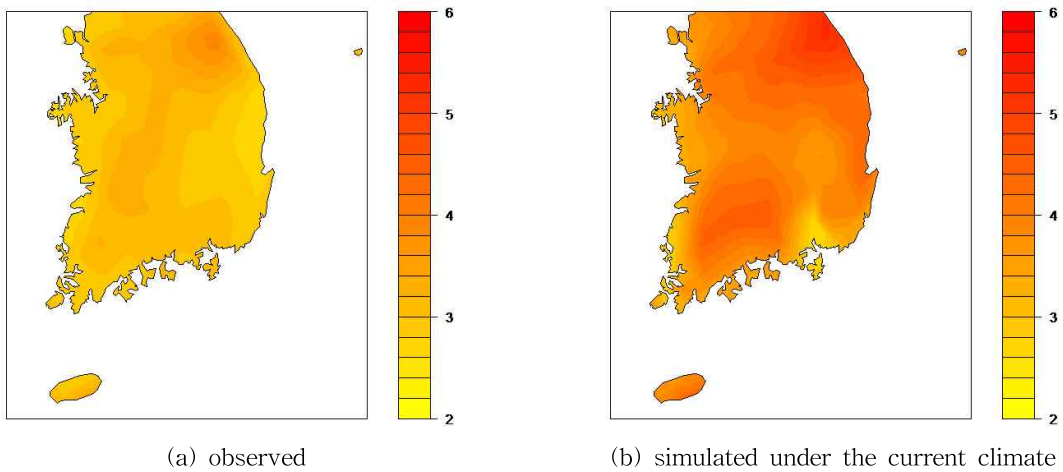


Fig. 7. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Heavy rainfall days)

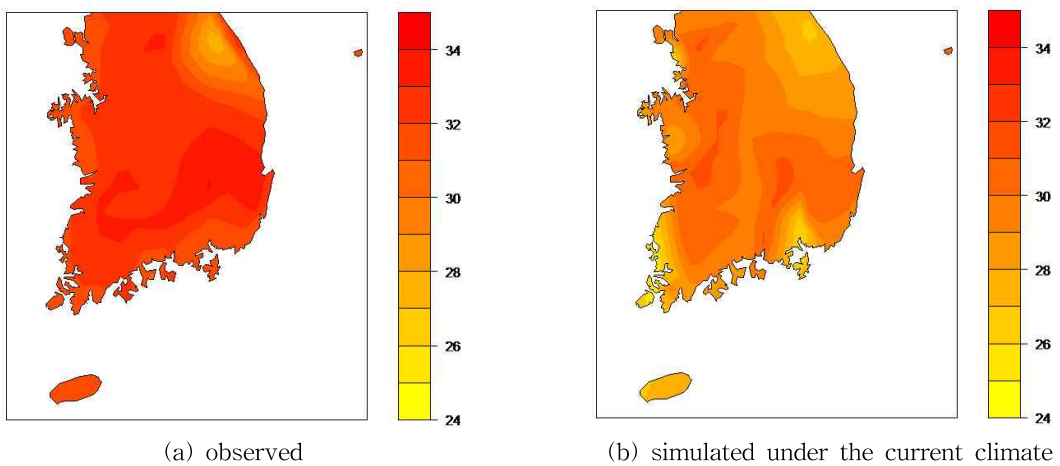


Fig. 8. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Hotdays threshold)

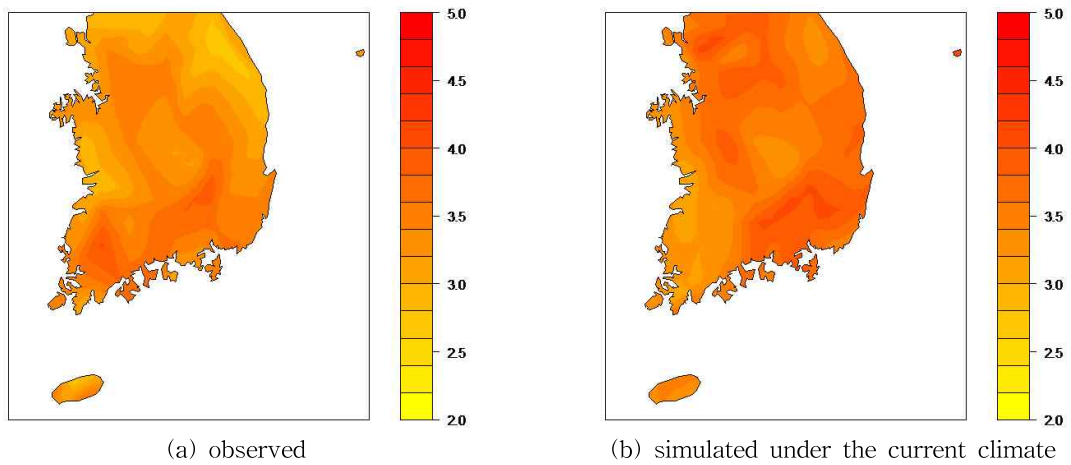


Fig. 9. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Longest heat wave)

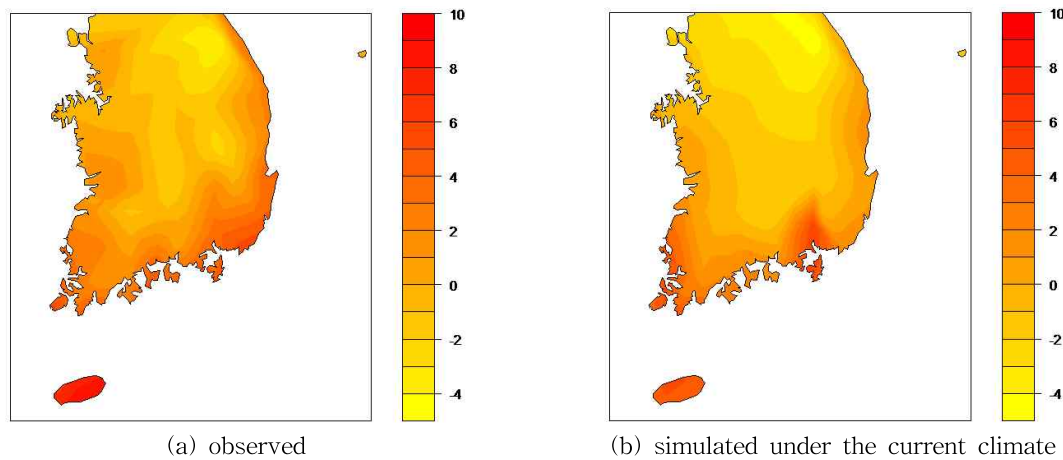


Fig. 10. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Coldnight threshold)

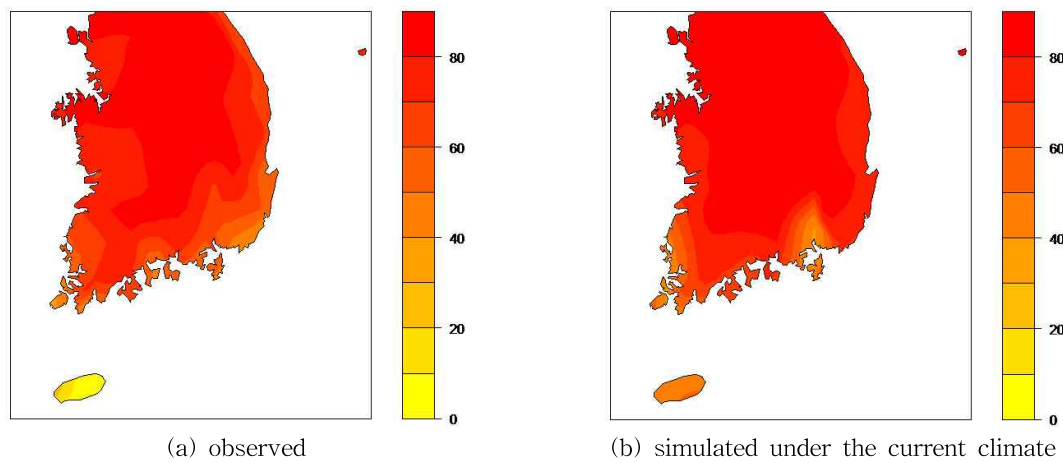


Fig. 11. Spatial Distribution of Extreme Indices of Observed and Simulated under the Current Climate (Frost days)

시간은 관측 25.85 days, 전망자료 26.39 days로 0.54 days의 차이가 있었다. 기온관련 극한지수중 Hotdays 한계점의 경우 관측 32.22℃, 전망자료는 29.45℃로 2.77℃의 차이가, Coldnight 한계점은 관측 0.93℃, 전망자료 -0.34℃로 7.23℃의 차이가 확인되었다(Table 2).

### 3.2 지점 평균된 기후지수 경향성 분석

RCP8.5 시나리오를 근거하여 미래를 3개의 기간(Future1: 2011~2040, Future2: 2041~2070, Future3: 2071~2100)으로 구분하여 미래 극한지수 계산하였고 미래 각 기간별 연별, 극한지수를 지점평균하여 각 기간에 대하여 비교분석 하였다. 여기서 RCP8.5 시나리오란 온실가스 저감 없이 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우로 IPCC 4차 평가보고서의 SRES(Special Report on Emissions Scenarios) 배출 시나리오 중 A2와 유사하다.

집중호우 한계점은 21세기 중반에 가장 컸으며, 전반기보다 후반기가 더 커지리라 전망되었다. 지속기간 5일 최대 강수량, 습윤일의 강우강도, 집중호우 한계점 이상 강우량비율, 집중호우 한계점 이상 발생 빈도는 중반기에서 가장 크게 전망되었고, 미래로 갈수록 지점평균이 증가하고 있었다. 최대건조 지속기간의 경우 후반기로 갈수록 증가하는 경향성을 보였다. 이는 짧은 기간 동안 많은 양의 강수가 내리면서, 강수가 발생하지 않을 때는 오랜기간 동안 강수가 없는 상태를 의미한다. 즉 미래로 갈수록 기후의 양극화가 심해짐을 의미한다(Fig. 12).

기온관련 극한지수 분석결과 여름철의 Hotdays 한계점과 최대혹서기기간은 전반기에서 후반기로 갈수록 경향성이 뚜렷하게 확인되었고, 여름철의 폭염 발생 빈도는 현재보다 잦아지리라 전망되었다. 또한 겨울철의 Coldnight

한계점과 동결일수를 확인해 본 결과 Coldnight 한계점과 동결일수는 미래로 갈수록 증감 경향성이 확인해지는데 이는 기온의 상승과 관련이 깊다. 기온관련 극한지수 4개를 분석한 결과 기후변화로 인하여 미래 우리나라의 평균, 최고 및 최저기온이 현재보다 상승하리라 전망되었다(Fig. 13).

### 3.3 극한지수 경향성 증감 분포도

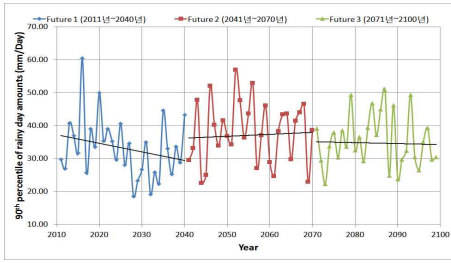
이 장에서는 기후변화시나리오 자료를 이용하여 우리나라의 시간에 대한 극한지수 기온기 변화를 알아보았다. 기온기 값이 0보다 크면 시간에 따라 증가경향성을, 0보다 작으면 시간에 따라 감소경향성을 의미한다. Fig. 14는 강수와 기온관련 극한지수의 지점별 경향성의 증감분포를 나타낸 것으로 증가와 감소에 따라 화살표 크기를 달리하였고, 상·하에 따라 증가, 감소로 표현하였다.

강수관련 극한지수의 경우 집중호우 한계점은 수도권, 강원도 영동, 남해안, 제주도 지역에서 경향성이 증가하리라 전망되었지만, 강원도 영서지역, 중부 내륙지역에서는 경향성이 감소하는 것으로 전망되었다. 지속기간 5일 최대 강수량의 경우 수도권, 충청남북도, 전라남북도와 경상남도에서 경향성이 증가하리라 전망되었고, 강원도 영서지역과 경상북도 내륙지역에서는 경향성이 감소하는 것으로 전망되었다. 습윤일의 강우강도는 수도권, 강원도 영동, 경상도 동해안 그리고 남해안 지역에서 경향성이 증가, 강원도 영서지역과 중부 내륙지역에서 감소하는 것으로 전망되었다. 최대 건조지속기간의 경우 수도권과 중부 내륙지역에서 경향성이 크게 증가하고, 강원도 영동지역과 서해안 지역에서 경향성이 감소하는 것으로 전망되었다. 집중호우 한계점이상 강수량 비율과 집중호우 한계점

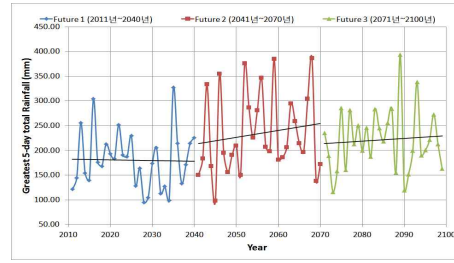
Table 2. Extreme Indices Difference between Observed and Simulated under the Current Climate

Indices	Observed	Simulated	Obs.-sim.
Heavy rainfall threshold (mm/day)	59.13	34.04	25.09
Greatest 5-days rainfall (mm)	213.51	170.36	43.15
Average wetdays rainfall (mm/hr)	23.86	13.34	10.52
Longest dry period (days)	25.85	26.39	0.54
Heavy rainfall proportion (%)	0.37	0.41	0.04
Heavy rainfall days (%)	3.03	3.99	0.96
Hotdays threshold (℃)	32.22	29.45	2.77
Longest heat wave (days)	3.31	3.59	1.27
Coldnight threshold (℃)	0.93	-0.34	7.23
Frost days (days)	71.28	78.51	0.28

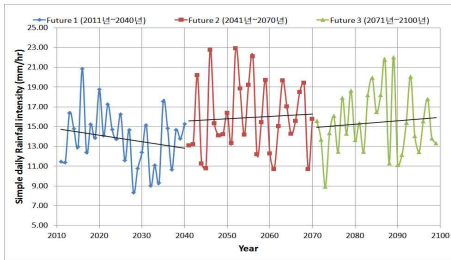




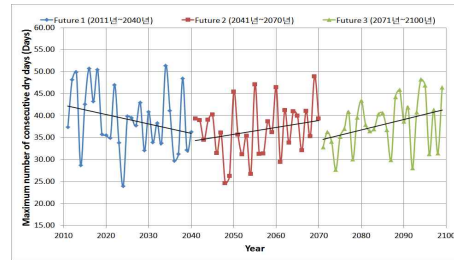
(a) Heavy rainfall threshold-JJA



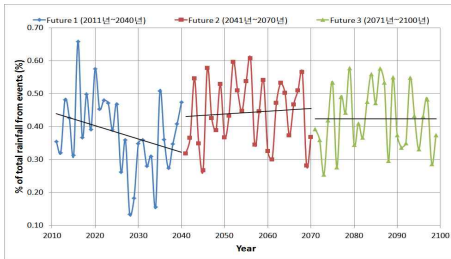
(b) Greatest 5-days rainfall-JJA



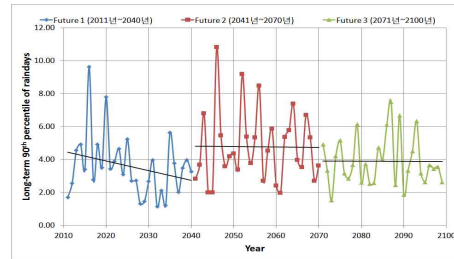
(c) Average wetdays rainfall-JJA



(d) Longest dry period-JJA

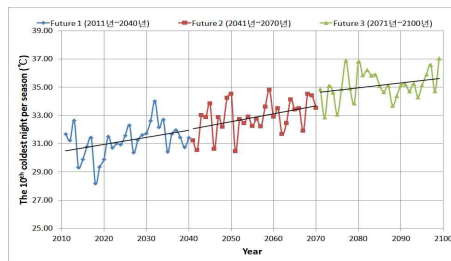


(e) Heavy rainfall proportion-JJA

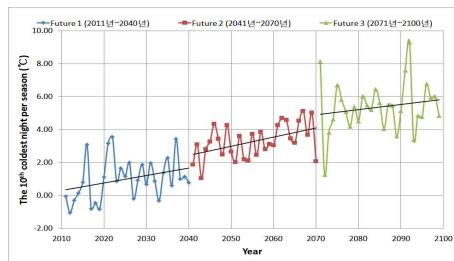


(f) Heavy rainfall days-JJA

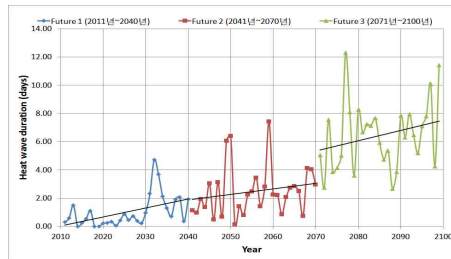
Fig. 12. Precipitation Extreme Indices Trend of Future1 (2011~2040), Future2 (2041~2070), Future3 (2071~2100)



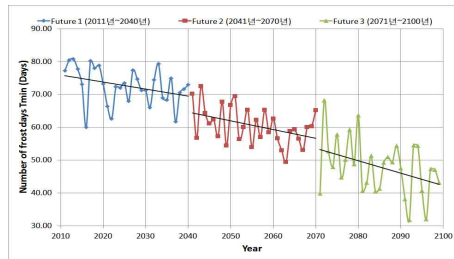
(g) Hotdays threshold-JJA



(h) Longest heat wave-JJA

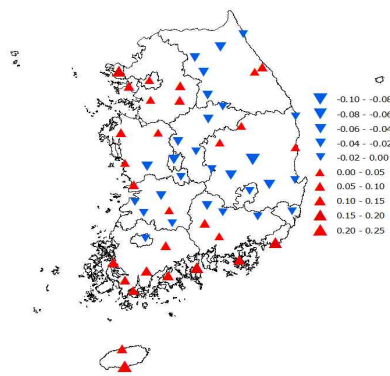


(i) Coldnight threshold-DJF

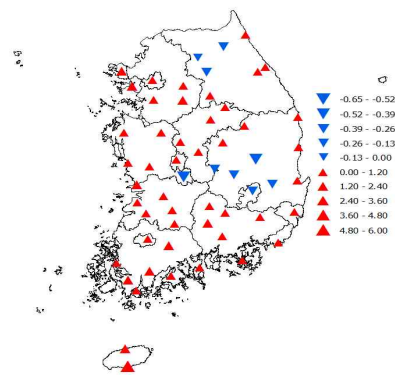


(j) Frost days-DJF

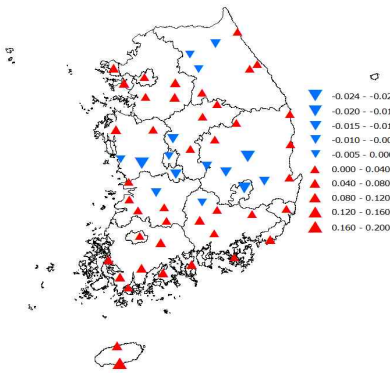
Fig. 13. Temperature Extreme Indices Trend of Future1 (2011~2040), Future2 (2041~2070), Future3 (2071~2100)



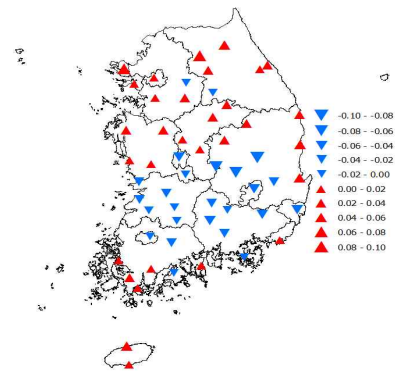
(a) Heavy rainfall threshold-JJA



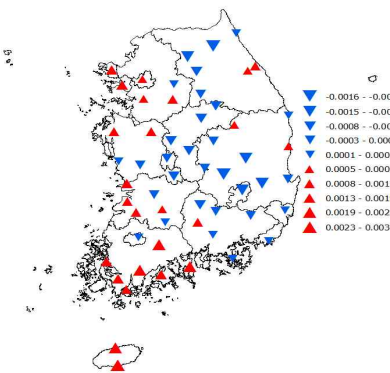
(b) Greatest 5-days rainfall-JJA



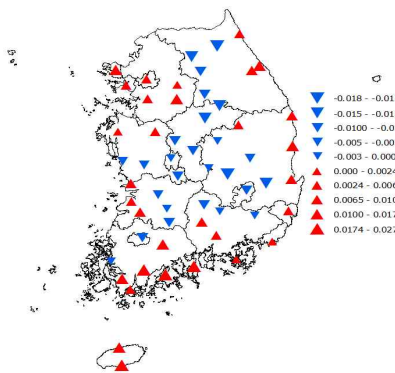
(c) Average wetdays rainfall-JJA



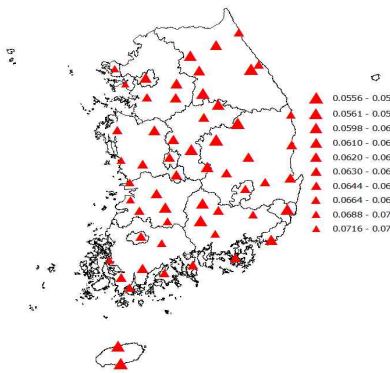
(d) Longest dry period-JJA



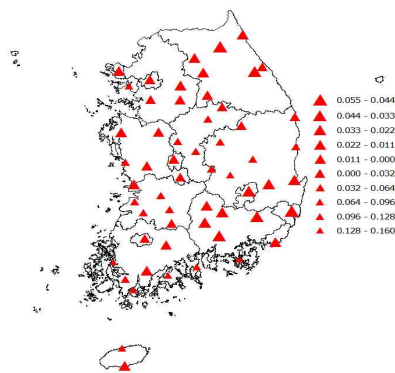
(e) Heavy rainfall proportion-JJA



(f) Heavy rainfall days-JJA



(g) Hotdays threshold-JJA



(h) Longest heat wave-JJA

Fig. 14. Spatial Distribution of Trend

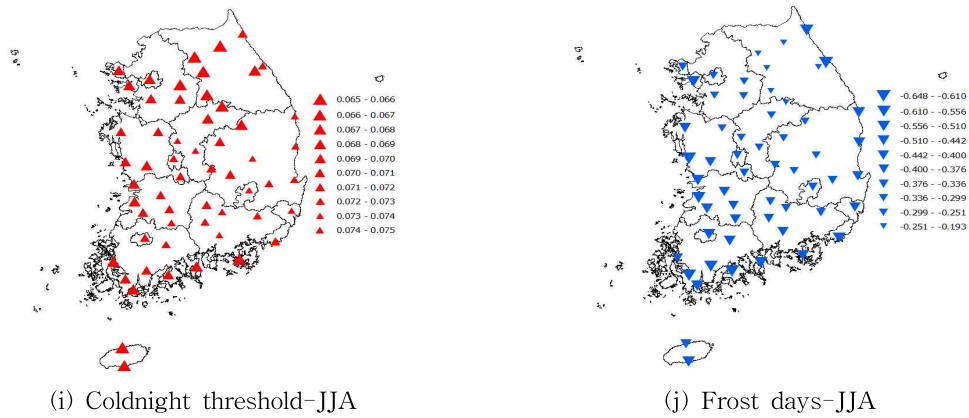


Fig. 14. Spatial Distribution of Trend (continued)

Table. 3 Spatially Averaged, Maximum and Minimum of Trend

Indices	Min.	Max.	Mean
Heavy rainfall threshold (mm/day)	-0.065 (Uiseong)	0.229 (Seogwipo)	0.026
Greatest 5-days rainfall (mm)	-0.463 (Uiseong)	5.692 (Seogwipo)	0.696
Average wetdays rainfall (mm/hr)	-0.024 (Uiseong)	0.168 (Seogwipo)	0.024
Longest dry period (days)	-0.125 (Uiseong)	0.099 (Sokcho)	0.029
Heavy rainfall proportion (%)	-0.002 (Inje)	0.004 (Seogwipo)	0.001
Heavy rainfall days (%)	-0.018 (Inje)	0.027 (Seogwipo)	0.003
Hotdays threshold (°C)	-0.056 (Daegwanyeong)	0.077 (Incheon)	0.064
Longest heat wave (days)	-0.055 (ChunCheon)	0.162 (Uljin)	0.087
Coldnight threshold (°C)	-0.060 (Haenam)	0.075 (Inje)	0.070
Frost days (days)	-0.648 (Ulsan)	-0.193 (Tongyeong)	-0.399

이상 발생 빈도의 경우 수도권, 강원도 영동, 남해안 지역에서 경향성이 증가하지만, 경상북도 내륙지역과 영서지역에서는 경향성이 감소하리라 전망되었다. 기온관련 극한지수를 확인한 결과 Hotdays 한계점의 경우 우리나라 전 지역의 경향성이 증가하는 것으로 전망되었고 특히, 강원도와 중부 내륙지역에서 비교적 더 크게 증가하였다. 최대 혹서기 기간은 경기도, 강원도, 경상남도 지역에서의 경향성이 가장 크게 증가 하는 것으로 전망되었다. Coldnight 한계점의 경우 전체적으로 경향성이 증가하는데 경기도와 강원도 그리고 남해안 지역에서 경향성이 비교적 더 크게 증가하는 것으로 전망되었다. 동결일수의 경우 우리나라 전체적으로 경향성이 감소하고 있고 특히, 강원도 영동지역과 남해안 지역에서 비교적 더 크게 감소하는 것으로 전망되었다(Fig. 14).

Table 3은 경향성에 대하여 미래 남한지역 평균과 지

점 최소, 최대를 보여주고 있다. 강수관련 극한지수 중 집중호우 한계점, 지속기간 5일 최대 강수량, 습윤일의 강우강도의 최소 감소경향성은 의성에서, 최대 증가경향성은 서귀포에서 확인되었다. 최대건조 지속기간의 최소 감소 경향성은 의성에서, 최대 증가경향성은 속초에서 확인되었다. 집중호우 한계점 이상 강수량 비율과 집중호우 한계점 이상 발생 빈도의 최소 감소경향성은 인제에서, 최대 증가경향성은 서귀포에서 나타났다. 기온관련 극한지수 중 Hotdays 한계점의 최소 증가경향성은 대관령에서, 최대 증가경향성은 인천에서 확인되었다. 최대혹서기기간의 최소 증가경향성은 춘천에서, 최대 증가경향성은 울진에서 확인되었다. Coldnight 한계점의 최소 증가경향성은 해남에서, 최대 증가경향성은 인제에서 확인되었다. 동결일수의 최소 감소경향성은 울산에서, 최대 감소경향성은 통영에서 확인되었다.

#### 4. 결론 및 향후연구

이 연구에서는 지역기후변화시나리오와 STARDEX 극한지수를 이용하여 우리나라의 강수와 기온관련 극한지수 변화를 전망하고자 하였다. 이를 위해 12.5km의 고해상도 지역기후모델인 HadGEM3-RA에서 생산된 강수와 기온자료를 이용하여 10개의 극한지수를 계산하고 현재(1981~2005) 대비 21세기 말(2070~2100)의 극한지수의 공간분포와 지점별 증감을 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

미래 극한지수 변화 전망 이전에 RCP 기후전망자료의 모의 수준을 확인하기 위하여 관측자료와 비교하였다. 비교한 결과 공간적 분포는 물론 정량적 크기도 관측을 잘 따르고 있음을 확인하였다. 최대건조 지속기간은 0.54 days 의 차이를 보였고, 집중호우 한계점 이상 강우량 비율의 경우 0.04%의 차이가, 동결일수의 경우 0.28 days의 차이를 보였다. 이러한 사실에 근거하여 볼 때 RCP 기후전망자료는 미래 극한지수를 전망하는데 타당성이 있음을 확신하였다.

강수관련 극한지수 전망 결과, 21세기 말에 수도권과 남부해안을 중심으로 경향성이 증가할 것으로 분석되었다. 전망된 극한지수를 시간에 대한 기온기 변화를 확인한 결과 수도권 그리고 강원도 영동지역, 남해안 지역에서 증가경향성이 확인하였고, 중부 내륙지역에서는 감소하리라 전망되었다. Sung et al. (2012b)의 선행연구에 따르면 HadGEM-RA RCP4.5 및 8.5의 기후변화 자료로 남한지역의 극한강수의 변화를 전망하였다. 연구결과, 수도권과 남부해안 지역을 중심으로 증가할 것으로 전망하였고 본 연구의 결과도 수도권, 강원도 영동지역, 남해안 지역에서 증가경향성이 확인되어 선행연구 결과와 잘 일치하고 있음을 확인하였다. 이렇듯 수도권과 남해안 지역의 극한강수 규모와 빈도증가의 원인으로 Chang and Kwon (2007)은 대규모 대기 순환(large-scale atmospheric circulation) 패턴과 해수면 온도(sea surface temperature) 상승 사이의 연관성에 기인한 것으로 보았다(Sung et al., 2012a).

기온 관련 극한지수의 경우 Hotdays 한계점과 최대혹서기기간의 증가경향성이 확인되고 Coldnight 한계점은 증가경향성이, 동결일수는 감소경향성이 확인되었다. 이는 최저, 최고, 평균 기온의 상승으로 인한 결과이다. Lee et al. (2012)은 일 최고기온의 평균값(TX95)과 일 최저기온 평균값(TN5)이 전 지역에서 모두 상승한다고 전망하였고, 여름일과 열대야는 두 배 이상 증가될 것으로 전망하였다. 본 연구의 결과인 Hotdays 한계점과, Coldnight

한계점은 Lee et al. (2012)의 TX95와 TN5지수와 유사한 지수로 Lee et al. (2012)의 결과와 마찬가지로 기온의 상승경향성으로 인하여 여름철에는 최고기온이 더 상승하여 더운 날이 증가하며 겨울철에도 기온이 상승하여 동결일수가 현재에 비해 줄어드는 것으로 전망되었다. 더 나아가 미래 남한에서는 겨울철 평균기온 상승으로 인한 증발산량이 증가되어 겨울철 및 봄철의 가뭄발생 가능성이 현재보다 커지리라 예상된다.

이 연구는 새로운 패러다임에 맞게 생산된 지역기후변화 전망자료와 선행연구에서 효용성이 입증된 STARDEX 극한지수를 이용하여 미래 극한기후 변화를 전망하였는데 의의가 있다. 연구결과 새롭게 생산된 지역기후변화 시나리오가 예상되는 기후변화로 인한 비정상성을 잘 묘사하고 있음을 확인하였다. 미래에 극한강수의 규모의 빈도의 증가로 홍수위험도의 변화가 예상됨으로 비정상성을 고려한 설계 등이 요구되며, 이수기 때에는 기온상승으로 인한 증발산량의 증가로 가뭄 또는 갈수가 예상되므로 현재보다 더 효율적이고 체계적인 수자원관리가 요구될 것이다. 또한 기온의 상승으로 한반도의 기후대가 변화될 가능성이 있고, 기후변화 적응속도 보다 기후대 이동속도가 더 빠르다면 생물다양성 등이 감소될 우려도 있으므로 이에 대한 고민도 필요한 시점이다.

#### References

- Chang, H., and Kwon, W.-T. (2007). "Spatial variation of summer precipitation trends in South Korea" 1973-2005. *Environ. Res. Lett.*, doi: 10.1088/1748-9326/2/4/045012, p. 9
- European Union. (2005). "STARDEX, STAtistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions." <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>
- Gyeonggi Research Institute. (2009). A Study on vulnerability to Climate Change in Gyeonggi-do.
- 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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Joh, C.H., Lee, S.H., and Jang, D.H. (2012). "Extreme

- Climate Indices Appropriate for Climate Studies in Korea” *Korean Meteorological Society Journal (Climate)*, KMS, Vol. 7, No. 2, pp. 136-145.
- Kim, B.K., and Kim, B.S. (2009). “Analysis of impact Climate Change on Extreme Rainfall Using B2 Climate Change Scenario and Extreme Indices” *Korea Society of Civil Engineers Journal*, KSCE, Vol. 29, No. 1B, pp. 23-33.
- Kim, B.K., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2008). “On the Change of Extreme Weather event using Extreme Indices” *Korea Society of Civil Engineers Journal*, KSCE, Vol. 28, No. 1B, pp. 41-53.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2013). “Assessment of Drought Severity over South Korea using Standardized Precipitation Evapo-transpiration Index (SPEI)” *Korea Water Resources Association Journal*, KWRA, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900.
- Kim, B.S., Yoon, Y.H., and Lee, H.D. (2011). “Analysis of Changes in extreme weather events Using Extreme Indices” *Environmental Engineering Research*, Vol. 16, No. 3, pp. 175-183.
- Kim, S.J. (2011). *Impact of Climate Change on Water Resources and Ecological Habitat in A River Basin*. Doctoral degree dissertation, Inha University
- Kwon, H.H., Kim, B.S., Kim, B.K., and Yoon, S.Y. (2008). “Analysis on Spatio-Temporal Change of Extreme Rainfall Under Climate Change”
- Kyoung, M.S., Kim, H.S., and Kim, B.S. (2009). “Climate Change Effect on Daily Precipitation Frequency in Korea.” *Korea Water Resources Association Journal*, KWRA, pp. 129-133.
- Lee, D.H., Kim, M.G., Kim, S., Kim, Y.H., Han, M.S., and Lee, W.S. (2012). “Climate Extreme Indices using on the High Resolution Climate Change Scenario in South Korea.” *Korean Meteorological Society Journal (Climate)*, KMS, pp. 119- 120.
- Lee, K.M., Baek, H.J., Park, S.H., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2012). “Future Projection of Changes in Extreme Temperatures using High Resolution Regional Climate Change Scenario in the Republic of Korea.” *The Korean Geographical Society Journal*, KGS, Vol. 47, No. 2, pp. 208-225.
- Seoul Development Institute. (2011). *A Study on Establishment of Disaster Paradigm Against Extreme Weather*.
- Sung, J.H., Kang, H.S., Park, S.H., Cho, C.H., Bae, D.H., and Kim, Y.O. (2012b). “Projection of Extreme Precipitation at the end of 21st Century over South Korea based on Representative Concentration Pathways (RCP)” *Korean Meteorological Society Journal (atmosphere)*, KMS, Vol. 22, No. 2, pp. 221-231.
- Sung, J.H., Kim, B.S., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2012a). “Non-stationary Frequency Analysis for Extreme Precipitation based on Representative Concentration Pathways (RCP) Climate Change Scenarios.” *Korean Society of Hazard Mitigating Journal*, KSHM, Vol. 12, No. 2, pp. 231-244.

논문번호: 13-057	접수: 2013.07.03
수정일자: 2013.09.16/09.30	심사완료: 2013.09.30