

연구논문

기후변화 취약성 지수 산출을 위한 한반도 관측 기후 특성 분석

남기표 · 강정언 · 김철희

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공
(2011년 10월 2일 접수, 2011년 12월 2일 승인)

Analysis of Climate Characteristics Observed over the Korean Peninsula for the Estimation of Climate Change Vulnerability Index

Nam, Ki-Pyo · Kang, Jeong-Eon · Kim, Cheol-Hee

Division of Earth Environmental System, Pusan National University
(Manuscript received 2 October 2011; accepted 2 December 2011)

Abstract

Climate vulnerability index is usually defined as a function of the climate exposure, sensitivity, and adaptive capacity, which requires adequate selection of proxy variables of each variable. We selected and used 9 proxy variables related to climate exposure in the literature, and diagnosed the adequacy of them for application in Korean peninsula. The selected proxy variables are: four variables from temperature, three from precipitation, one from wind speed, and one from relative humidity. We collected climate data over both previous year (1981~2010) and future climate scenario (A1B scenario of IPCC SERES) for 2020, 2050, and 2100. We introduced the spatial and temporal diagnostic statistical parameters, and evaluated both spatial and time variabilities in the relative scale. Of 9 proxy variables, effective humidity indicated the most sensitive to climate change temporally with the biggest spatial variability, implying a good proxy variable in diagnostics of climate change vulnerability in Korea. The second most sensitive variable is the frequency of strong wind speed with a decreasing trend, suggesting that it should be used carefully or may not be of broad utility as a proxy variable in Korea. The A1B scenario of future climate in 2020, 2050 and 2100 matches well with the extension of linear trend of observed variables during 1981~2010, indicating that, except for strong wind speed, the selected proxy variables can be effectively used in calculating the

vulnerability index for both past and future climate over Korea. Other local variabilities for the past and future climate in association with climate exposure variables are also discussed here.

Keywords : Climate change, Climate vulnerability index, Climate exposure, Proxy variables, Variabilities of climate variables

1. 서론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 4차 평가보고서(IPCC, 2007) 이후 기후변화 적응(Climate change adaptation)에 대한 국제적 관심과 노력이 최근 매우 강화되고 있다. 기후변화 영향평가 및 그 적응에 관한 이슈는 1990년 IPCC 제2 실무 그룹에서 기후변화에 따른 영향을 파악하는 연구에서 출발하여, 1995년 IPCC 제2차 평가보고서에서는 이미 기후변화에 따른 취약성(vulnerability) 개념이 도입되었고, 제3차, 제4차에 이르기까지 기후변화 취약성은 기후변화에 따른 영향과 그에 대한 적응을 연계하는 주요 개념으로 자리 잡았다. 기후변화 적응이란 지금 당장 온실기체의 배출량을 파격적으로 줄이더라도 기후변화의 완화 조치 전략이 실효성을 나타내기까지는 상당한 시간이 소요되므로 이에 대한 적응 조치가 상당기간 필연적으로 요구된다는 개념에 기초한다. 즉 이미 배출된 온실 기체로 인해 미래의 특정 시점까지는 기후 시스템의 변화가 필연적으로 발생할 것이며, 이에 대한 사회 및 경제적인 비용을 줄이기 위한 적응 전략의 수립은 한 국가 차원에서 매우 중요한 이슈가 된다. 제13차 UN 기후변화 협약 당사국 총회(COP13)에서 채택된 발리로드맵의 경우, 당사국들의 온실기체 배출 감축을 통한 기후변화의 완화뿐만 아니라, 기후변화 영향평가(assessment)와 기후변화 피해를 최소화하기 위한 기후변화 적응의 중요성을 공유하였다.

기후변화 적응을 위한 한 국가의 적응대책을 수립하기 위해서는 한 국가의 어디에서 얼마만큼 취약한지에 대한 기후변화 취약성 정보가 최우선적으로 필요하며, 지역별 취약한 정도를 상대적으로 비교하기 위하여 주어진 영역에서 취약성 지수(vulnerability index)를 산정하고 그 공간 분포 결

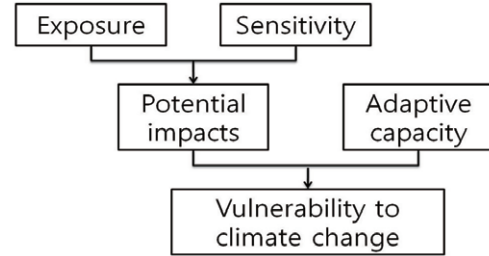


Fig. 1. Categorized variables required to identify the climate change vulnerability index defined by IPCC (2007).

과를 파악하는 것은 한 국가 내에서 기후변화 적응 대책의 우선순위를 위한 매우 중요한 과정이다. 기후변화 취약성 개념은 외부로부터 시스템에 가해지는 영향이 시스템의 대처 및 적응 능력에 얼마나 민감한가를 나타내는 것으로서, IPCC 보고서를 포함한 대체적인 국내외 연구 결과를 종합하면 Fig. 1에 나타난 것처럼 기후변화 민감도(Sensitivity), 기후노출(Climate change exposure), 그리고 적응 능력(Adaptive capacity)의 세 가지 인자로 구성된다(IPCC, 2007; UNDP, 2005; Moss *et al.*, 2001). 그러나 이들 세 인자들은 직접 산정할 수 있는 것이 아니므로 여러 대응 변수(proxy variables)로부터 간접적으로 추정하게 된다. 외국 주요 연구들에서도 대부분 이러한 취약성의 3가지 개념적 틀, 즉 민감도, 기후노출, 그리고 적응 능력에 대한 각 항목들의 대응 변수를 선정하여 함수로 표현하고, 이를 이용하여 취약성을 평가하는 것을 확인할 수 있다(Moss *et al.*, 2001; Wehbe *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2003).

국내 연구의 경우 한국환경정책·평가연구원(2008)은 해외문헌 및 기구에서 이미 제안된 기후변화 취약성 지표를 우리나라의 지역별 취약성 비교를 위해 적용하였으며, 최현아 외(2009)는 UNDP(2005)와 IPCC(2001)의 개념틀에 따라 한반도 수자원, 보건, 재난, 생태계 분야의 취약성을 평

가하였다. 배덕효 · 이문환(2010)은 우리나라 5대강 유역에 대하여 기후변화에 따른 홍수취약성을 평가하였고, 고재경(2011)은 경기도를 대상으로 기후변화에 대한 잠재적 영향과 적응능력을 기준으로 취약성의 유형과 특성을 분석하였다. 최근에는 기후변화에 따른 대기질 취약성(이재범 외, 2010), 전국 지자체단위 기후변화 부문별 취약성 평가를 위한 표준화 방법론 개발(유정아 외, 2011), 한반도 기후변화 적응을 위한 취약성 지수 산정방법(김철희 외, 2011)등 기후변화에 따른 취약성에 대한 많은 연구가 수행되어지고 있다. 특히 한국환경정책·평가연구원(2008)은 해외문헌 및 기구에서 제안된 기후변화 취약성 지표로 기후변화 적응의 개념을 고려한 취약성-탄력성 지수(Vulnerability-Resilience Index, VRI)를 산정한 바 있는데, 한반도의 경우 전 세계를 대상으로 한 것보다 그 변동의 폭이 매우 좁게 나타나 통계적으로 유의하다고 보기 어려워 우리나라 실정에 맞는 취약성 지표의 필요성을 지적하였다. 결국 기후변화 취약성 지수는 기후변화의 잠재적인 영향을 평가하기에 유용한 통합 도구이긴 하지만, 매우 복잡한 개념이라서 대응변수를 통해 간접적으로 추정할 수밖에 없기 때문에 관련 국내의 연구들이 매우 제한된 영역에서 진행되어 왔다.

본 연구에서는 우선 기후변화 적응을 위한 기초 연구로서, 취약성 지표 산정을 위한 요소 중에서 기후노출 대응변수의 선정과 그 타당성을 조사해 보고자 한다. 그리고 IPCC(2007) 혹은 UNDP(2005) 등의 취약성 지표 산출을 위한 구성 요소인 민감도, 기후노출, 그리고 적응 능력의 함수 중에서 우리 실정에 맞는 기후노출 대응변수를 조사하고 한반도에 효율적으로 적용 가능한 변수들을 진단해 보고자 한다. 우선 국내외적으로 수행된 기존 연구에서, 가장 일반적이고 많이 통용된 기후노출 대응변수들을 나열해 보고 이 중에서 대체로 타당하다고 판단되는 여러 기상 및 기후변수들을 선정하였다. 이를 위해 우선 국내외 기존 문헌 연구들의 결과를 수집하여 이를 토대로 취약성 지수 산출을 위해 사용되는

변수들을 선정하고 선정된 변수들이 국내 통계자료의 가용성에 근거하여 자료가 이용 가능한지를 조사한 후 최종 선정하여, 그 결과를 외국 주요 연구인 IPCC(2007), UNDP(2005) 등의 개념적 틀에 부합되는지를 파악하였다. 이후 한반도 과거 30년간의 자료를 수집하여 이들 기후노출 대응변수들이 한반도에서 시공간적으로 얼마나 변화되어 왔는지에 대한 민감도를 분석하여 한반도의 기후변화가 가장 효율적으로 반영된 변수들의 우선순위를 결정하였다. 나아가 선정된 변수가 IPCC의 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) 기후변화 시나리오에 따른 모델링 결과로부터, 본 연구에서 선정된 기후노출 대응변수의 한반도 기후변화에 따른 미래 100년 이후의 시간 및 공간적 변화를 살펴보았다. 이들 통해 선정된 기후노출 대응변수가 미래 기후변화에 따라 얼마나 민감하게 반응하는지를 검토하여 한반도 기후노출을 대변할 수 있는 변수로서의 효용성을 최종 검토하였다.

II. 분석 방법 및 자료

1. 분석 방법

기후노출 대응변수 선정은 선행연구인 한국환경정책·평가연구원(2008)에 의해 조사된 전문가 의견(experts' opinion)과 국내 통계자료의 가용성에 근거하여 최종 구성된 대응변수와, 경기개발연구원(2009)과 김은화(2010)에서 제시되었던 기후노출 대응변수를 참조하여 선정하였고, 외국 주요 연구인 IPCC(2007), UNDP(2005) 등의 개념적 틀과 이전 연구에서 사용된 기후노출 대응변수들(Moss *et al.*, 2001; Wehbe *et al.*, 2005; Cutter *et al.*, 2003)들을 조사하여, 기존 연구에서 두 번 이상 사용된 변수들의 목록을 작성하였다. 그 결과 본 연구에서 최종 선정한 기후노출 대응변수를 Table 1에 요약하였다. 선정된 변수들 중 연속적인 무강수일의 최대값은 24시간 동안 강수현상이 관측되지 않은 날을 무강수일로 정의하였고, 일 최고 기온은 일 24시간 자료 중 최고 기온을 연간 평균한 값으로 정

Table 1. List of climate variables and proxy variables of climate change exposure

Variable	Proxy variables of climate change exposure	
1) Temperature		
• Heat wave	Number of days with minimum temperature over 25 deg.	O †
	Daily maximum temperature	O
	Number of days with maximum temperature over 35 deg.	×
• Cold wave	Number of days with maximum temperature over 33 deg.	O
	Number of days with mean temperature of sub-zero deg.	O
	Number of days with average of below -5 deg.	×
	Number of days with average of below -10 deg.	×
2) Precipitation		
• Heavy rain	Number of days with daily precipitation over 80mm	O
	Maximum precipitation	O
• Drought	Maximum number of days of consecutive non-precipitation	O
3) Wind speed		
• Wind wave	Number of days with maximum wind speed exceeding 5m/s	×
	Number of days with maximum wind speed exceeding 10m/s	×
	Number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s	O
4) Relative humidity		
• Forest burning	Number of days with effective humidity under 35%	O

† (O) indicates variables used here, and (×) not used in this study

의하였다. 일 최대 강수량은 연중 일일 강수량이 최대인 날의 강수량으로 계산하였고, 실효습도는 우리나라 기상청에서 산불 등의 발생 가능성의 예보를 목적으로 수일 전부터 관측된 상대습도에 경과 시간에 따른 가중치를 주는 실효습도 산출 식($H_e = (1 - \gamma)(\gamma H_0 + \gamma^1 H_1 + \gamma^2 H_2 + \gamma^3 H_3 + \gamma^4 H_4)$)을 사용하였다. 여기서 r 은 0.7을, H_0 는 해당일의 상대습도, $H_1 \sim H_4$ 는 1에서 4일 전날의 상대습도를 나타낸다. Table 1에서 최종 선정된 지표들의 과거 30년간 시간적, 공간적 변화를 살펴보기 위하여 각 수집된 변수의 평균, 중간값(median), 그리고 5, 25, 75, 95퍼센타일(percentile; %ile)의 시간에 따른 선형 추세분석 결과와, 관측된 과거 30년과 미래 100년 이후의 기후 시나리오에 따른 공간분포를 살펴보았다.

각 기후변수들의 연평균값(annual mean)의 시간에 따른 선형화($y = a_1 x + b_1$) 추세는 아래와 같이 각 변수들을 표준화하여 계산한 시간변화 파라미터(T)를 정의하였으며, 아울러 공간 변동폭의 크기를 상대적으로 비교하기 위하여 고정된 시간에서의 각 관측 자료의 95%ile과 5%ile의 차이(d)를 구하여, 변수별 d 의 기후변화에 따른 선형 변화추세($y = a_2 x +$

b_2)로부터 공간편차 파라미터(S)를 아래와 같이 정의하였다.

$$T = \frac{a_1}{\sigma_{10year}}$$

$$S = \frac{a_2}{m_{30year}}$$

여기서 a_1 은 각 기후노출 대응변수들의 평균값(mean)의 연평균 변화 기울기를, b_1 은 절편, 그리고 σ_{10year} 는 본 연구에서 최초 10년(본 연구의 1981~1990년)간의 표준편차를, a_2 은 편차 $d(= f_{95\%ile} - f_{5\%ile})$ 의 연평균 변화 기울기를, b_2 은 그 절편, m_{30year} 는 본 연구기간(30년간)의 각 변수의 d 의 평균값이다. 여기서 $f_{95\%ile}$ 과 $f_{5\%ile}$ 은 고정된 시간에서 공간상의 관측소에서 기후노출 대응변수의 95%ile과 5%ile을 나타낸 관측소 자료를 각각 나타낸다. 따라서 시간변화 파라미터(T)는 기후변화가 상대적으로 적은 기간의 표준편차와 대비하여 최근 기후변화가 진행됨에 따라 얼마나 그 변화가 민감했느냐의 척도가 되며, 공간편차 파라미터(S)는 기후변화에 따른 한반도에서의 기후노출 대응변수의 지역별 격차를 알 수 있는 척도가 된다. 이 때 시간 변화 파라메

터(T)를 구하기 위한 표준화 과정시 최초 10년간(본 연구에서는 1981년~1990년)의 표준편차를 사용함으로써 분석 초기를 기후변화의 영향이 적은(혹은 없는) 기간으로 간주하고, 이를 기준으로 시간(기후 변화)에 따른 변화를 분석한다는 의미로 해석할 수 있다.

2. 사용된 자료

본 연구에서는 기후노출 대응변수 선정을 위하여 국내의 기존의 기후변화 적응 관련 문헌을 기초로 사용하였다. 또한 한반도에 적용 가능한 기후노출 대응변수를 점검하기 위하여, 최근 30년간(1981~2010년) 기상청 산하 61개 정규기상관측소 지점(Fig. 2)에서 관측한 기상 기후자료를 사용하였다. 각 관측 지점에서 관측된 기온, 강수, 풍속, 상대습도 등의 기본 기상 및 기후 변수들을 특별한 여과 없이 사용하거나, 수집된 각 변수들로부터 변수들을 계산한 자료를 사용하였다.

향후 100년의 미래기후 시나리오 자료는 국립환경과학원에서 개발한 CCGIS(Climate Change adaptation toolkit based on GIS)의 결과를 사용하였다. CCGIS 프로그램에는 2020년, 2050년, 2100년에 대하여 총 6개의 IPCC 기후변화 시나리오(SRES A2, A1B, A1T, A1FI, B1 및 B2 시나리

오) 결과가 구축되어 있으며, 본 연구에서는 이 자료들 중에서 A1B 시나리오의 기후변수 시계열 자료를 사용하였다. CCGIS 자료는 기상장과 대기질 및 대기환경 자료에 의해 산출되는데, 기상장은 전구 기후모델인 CCSM3(Community Climate System Model version 3) 결과를 다운스케일링(down-scaling)하고 이 자료를 지역기후모델(RCM: Regional Climate Model)인 MM5 중규모 기상모델의 입력 자료로 사용하여 최종 생산한 자료이다(국립환경과학원, 2008, 2009, 2010).

III. 결 과

1. 과거 30년간 기후노출 대응변수의 시공간 변화

본 연구에서는 과거 30년간 기후변화가 어느 정도 진행된 것으로 간주하여 그 특성을 해석하되, 최근으로 올수록 그 경향이 심화된 것으로 가정하여 기후노출 대응변수의 추이를 해석하였다. Fig. 3은 한반도 61개 관측소의 기후노출 대응변수의 시계열 값, 전체 관측소 평균값과 선형 회귀 분석 경향, 5%ile, 95%ile의 선형 회귀 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 강수 관련 기후노출 대응변수에 해당하는 연속적인 무강수일의 최대값(Fig. 3a), 일 최대 강수량(Fig. 3b), 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 3c)의 평균값의 경향은 시간에 따라 모두 증가하였음을 알 수 있다. 95%ile에서도 모두 증가하는 경향을 보였으나, 연속적인 무강수일의 최대값의 95%ile만 소폭 감소하였고, 지역 간 편차(d)도 시간에 따라 거의 변화가 없었다. 여기서 편차(d)는 여러 관측소에서 동 시간에 관측한 자료 중에서 95%ile과 5%ile의 차이를 말한다. 김연희 등(2010)은 한반도의 전체 강수량은 최근 35년간 증가하는 추세에 있으며, 우기(6~9월) 강수일수는 증가하고, 건기(10~이듬해 2월) 강수일수는 감소하는 경향이 있음을 보여, 강수 강도는 증가하고, 강수일수는 감소하는 경향임을 추정할 수 있다. 본 연구에서 과거 30년간 전국에서 건기의 강수일수 감소가 연속적인 무강수일의 최대값을 증가시킬

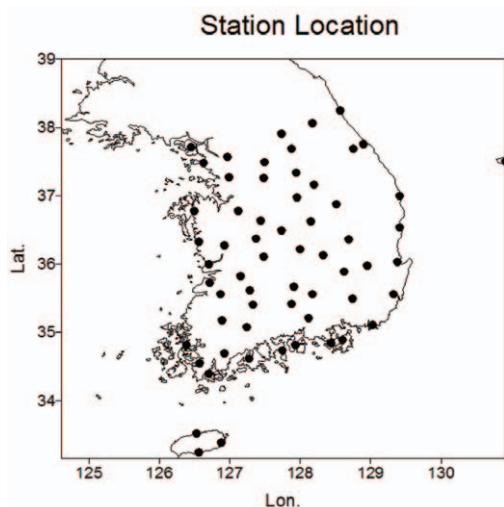


Fig. 2. Location of 61 observation stations used in this study.

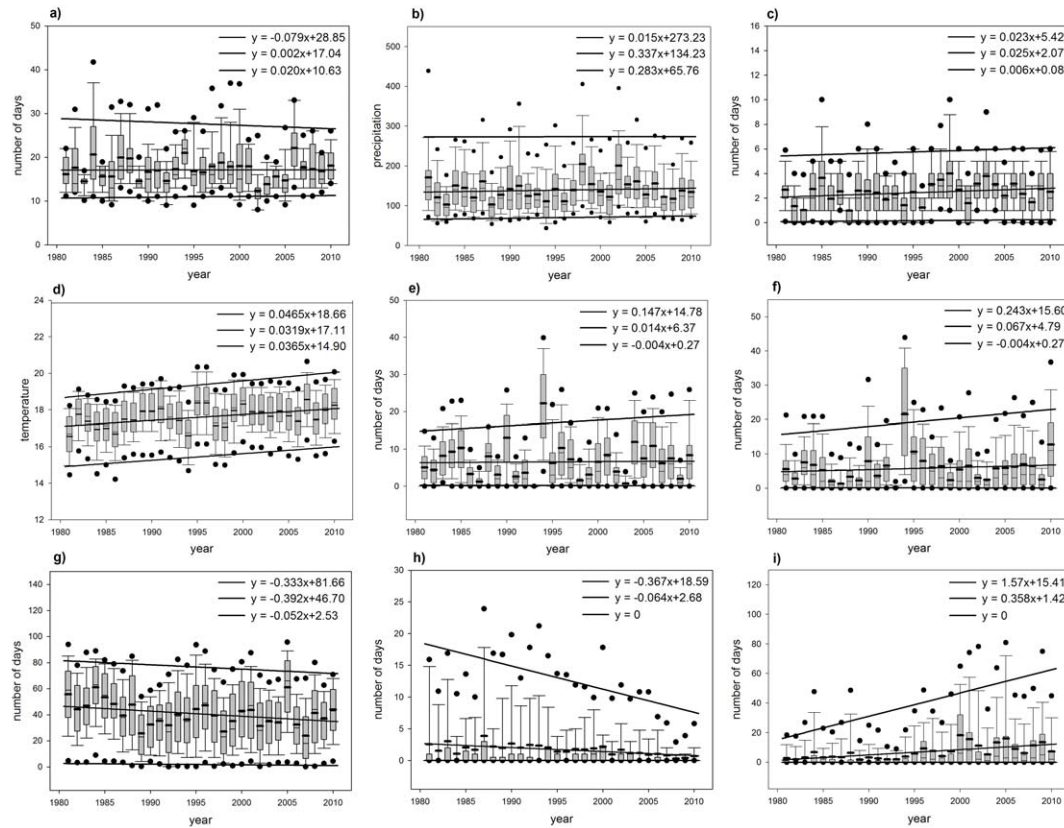


Fig. 3. Time variations of climate exposure proxy variables: a) maximum number of days of consecutive non-precipitation, b) daily maximum precipitation, c) number of days with daily precipitation over 80mm, d) daily maximum temperature, e) number of days with maximum temperature over 33 deg., f) number of days with minimum temperature over 25 deg., g) number of days with mean temperature of sub-zero deg., h) number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s and i) number of days with daily averaged effective humidity under 35%. Upper solid line, middle solid line and lower solid line indicate linear regressions of 75%ile, average and 5%ile, respectively.

것으로 예상하였으나, 본 연구 결과 평균값은 증가, 95%ile에서는 감소하여 일관되거나 뚜렷한 경향을 보이지는 않았다(Fig. 3a). 그러나 일 최대 강수량(Fig. 3b)과 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 3c)는 본 연구에서 30년간 각각 약 10.91mm, 약 0.75일 증가한 것으로 나타나, 한반도에서 매우 양호한 기후노출 대응변수가 될 수 있을 것으로 판단된다.

기온과 연관된 기후노출 대응변수는 그 시간 변화 경향이 대부분 상승하는 것으로 나타났다. 일 최고기온(Fig. 3d)은 평균, 5%ile, 95%ile 모두 그 선형 회귀 경향이 상승하였으며, 일 최고기온이 33℃

이상인 날의 횟수와 일 최저기온이 25℃ 이상인 날의 횟수(Fig. 3e, 3f)는 전체 평균값과 95%ile은 상승한 반면 5%ile은 오히려 감소 경향을 보여, 시간에 따라 지역별 편차가 커졌음을 알 수 있었다. 일 평균 영하일수(Fig. 3g)는 모두 뚜렷하게 감소하는 경향을 보였고, 특히 5%ile과 95%ile 모두 유사한 감소 폭을 보여, 시간에 따른 지역간 편차(d)는 거의 나타나지 않았다. 이전 연구에서는 지역적으로는 서울과 대구가 2.5℃/100년의 상대적으로 높은 상승률을 기록하였고, 한반도의 평균온도는 지속적으로 계속 상승하는 추세임을 보고한 바 있다(기상연구소, 2004).

Table 2. Time variational sensitivity of climate change exposure proxy variables

Climate exposure proxy variables	a_1	b_1	$\sigma_{10\text{year}}$	$ T \times 1000^\dagger$	rank
Maximum number of days of consecutive non-precipitation	2.3×10^{-3}	17.04	2.28	1.01	9
Maximum precipitation	3.4×10^{-1}	134.23	23.35	14.42	7
Number of days with daily precipitation over 80mm	2.5×10^{-2}	2.07	0.86	28.49	5
Daily maximum temperature	3.19×10^{-2}	17.11	0.51	62.5	3
Number of days with maximum temperature over 33 deg.	1.4×10^{-2}	6.37	3.75	3.79	8
Number of days with minimum temperature over 25 deg.	6.76×10^{-2}	4.79	2.43	27.41	6
Number of days with mean temperature of sub-zero deg.	-3.9×10^{-1}	46.70	10.65	36.79	4
Number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s	-6.4×10^{-2}	2.68	0.81	78.40	2
Number of days with effective humidity under 35%	3.65×10^{-1}	1.42	1.66	215.66	1*

$^\dagger |T| = |a_1/\sigma_{10\text{year}}|$

시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수(Fig. 3h)는 시간이 경과함에 따라 그 평균값은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 특히 95%ile의 변화는 시간에 따라 급격히 감소하는 경향을 보여 지역별 편차(d)가 매우 뚜렷하게 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 기존 연구 결과와 일치하는데, 류상범 등(2006)에 따르면 우리나라 대부분의 지역에서 도시화로 인해 관측소 주변에서 고층 건물 및 주변 장애물의 증가로 평균적인 풍속이 크게 감소하였음을 보고하였으나, 순간 최대 풍속은 최근 증가하였음을 지적한 바 있다(최익수·문일주, 2008). 따라서 극한 기후노출 대응변수로서 풍속의 극값과 강풍 발생 횟수는 순간최대풍속의 경향과 차이가 있음에 매우 주의할 필요가 있음을 확인하였다. 이러한 강풍 횟수의 감소경향은 기후적인 요소 외에도 도시화에 의한 효과, 지면 피복상태 등 복합적으로 영향을 받은 것으로 해석할 수 있다. 실효습도가 35% 이하인 날의 횟수(Fig. 3i)는 지역간 표준편차와 지점평균값의 추세가 모두 증가하는 경향을 보여, 한반도에서의 건조도가 매우 급격히 증가하였음을 알 수 있었고, 따라서 실효습도와 연관된 대응변수는 산림 혹은 생태계 분야에서 매우 유용하게 사용할 수 있는 기후노출 대응변수임을 확인할 수 있다.

이상의 9개의 기후노출 대응변수들의 과거 30년간의 상대적 변화량을 정량적으로 비교하기 위하여

앞 절에서 정의한 각 변수들의 시간에 따른 변화량을 표준화하여 시간변화 파라미터($T = a_1/\sigma_{10\text{year}}$)를 계산하였다(Table 2). 그 결과 기온 관련 변수 중, 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수의 민감도(시간에 따른 증가 또는 감소의 정도)가 상대적으로 낮게 나타났고, 반면 일 최고기온과 일평균 영하일수에서 민감도가 상대적으로 더 높게 나타났다. 실효습도가 35% 이하인 날의 횟수는 본 연구에서 기후변화에 제일 가장 민감한 변화율을 보여, 생태계, 산림, 식생 등 다양한 분야에서 기후노출 대응변수로 사용할 수 있음을 확인할 수 있다. 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수는 앞서 기술한 바와 같이 감소경향을 보였으나 그 변화율은 실효습도의 변화율보다는 낮지만 9개 변수 중 두 번째로 나타난 것이 주목할 만하였다.

Table 3은 기후변화가 지역편차에 미치는 영향의 크기를 알아보기 위해 지역간 편차(d)의 시간에 따른 변동을 비교할 수 있는 공간편차 파라미터(S)의 계산결과를 나타낸 것이다. 분석 결과 실효 습도 변수가 시간변동 파라미터(T)와 마찬가지로 공간편차 파라미터(S)가 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로는 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수로서 그 공간 분포가 빠르게 줄어드는 경향을 확인하였다. 이상의 두 변수를 제외하고는 기온과 관련된 기후노출 대응변수가 상대적으로 높은 S값을 보였다.

Table 3. Spatial variational sensitivity of climate change exposure proxy variables

Climate exposure proxy variables	a_2	m_{30year}	$ISI \times 10^\dagger$	rank
Maximum number of days of consecutive non-precipitation	-0.10	16.70	0.06	5
Maximum precipitation	-0.27	203.32	0.01	9
Number of days with daily precipitation over 80mm	0.02	5.60	0.03	7
Daily maximum temperature	0.01	3.92	0.05	8
Number of days with maximum temperature over 33 deg.	0.15	16.87	0.09	4
Number of days with minimum temperature over 25 deg.	0.24	19.30	0.13	3
Number of days with mean temperature of sub-zero deg.	-0.28	74.77	0.04	6
Number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s	-0.37	12.90	0.28	2
Number of days with effective humidity of under 35%	1.57	39.77	0.40	1*

† $ISI = |a_2/m_{30year}|$

반면 강수와 관련된 S값은 기온이나 습도, 풍속에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. 연속적인 무강수일의 최대값의 경우 S값의 순위는 9개 변수 중 5번째로 나타났고, 진영훈·박성천(2005)은 ENSO(El Niño-Southern Oscillation) 현상이 우리나라의 남부와 중부에 대해 각기 다른 양상의 영향을 미치고 있음을 보고하였는데, 엘니노와 라니냐의 상이한 영향은 연속적인 무강수일의 최대값의 지역간 연도별 표준편차에도 영향을 주어 기후변화에 따른 공간적 편차를 줄이는 것으로 판단된다.

분석기간 중 과거 30년의 기후노출 대응변수의 평균값의 공간분포를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 연속적인 무강수일의 최대값(Fig. 4a), 일 최대 강수량(Fig. 4b), 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 4c)가 지역별로 볼 때 모두 경남 지역에서 상대적으로 높게 나타나, 기후변화에 따른 무강수일(가뭄)과 강수 강도(집중호우)가 동시에 자주 발생하였음을 알 수 있다. 반면 일 최대 강수량(Fig. 4b)과 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 4c)는 경기도와 부산, 그리고 남해안 지역에서 높았고, 대구를 비롯한 경북지역은 상대적으로 낮아 지역별 다른 강수 특성을 보였다.

일 최고기온(Fig. 4d)과 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수(Fig. 4e)는 그 공간분포가 서로 유사하게 나타났는데, 남부지방(예를 들어 대구지역)에서 더 높은 경향을 보였다. 중부지역은 동서의 큰 차이를 보였는데, 이는 관측지점간 해발고도의 차

이가 일부 기여한 것으로 판단된다. 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수(Fig. 4e)와 열대야의 기준인 일 최저기온이 25℃ 이상인 날(Fig. 4f), 일평균 영하일수(Fig. 4g)는 전체적으로 유사한 경향을 보였고, 낮은 위도와 해양성 기후의 영향으로 남해안 부근과 제주도의 결과가 유사함을 보였다. 시간 최고 풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수(Fig. 4h)는 특히 대관령과 해안지역에서 높게 나타났고, 지역별로도 큰 차이를 보였다. 이는 대관령과 해안지역 모두 지리적·지형적 특성에 의해 상대적으로 다른 지역보다 산곡풍 등의 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다. 실효습도가 35% 이하인 날의 횟수는 동해안 일대와 대구 지역에서 높게 나타났고 서해 부근에서는 전체적으로 낮은 값을 나타내는데 이것은 산맥에 의한 편현상에 의해 낮은 습도에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 과거 30년간 지역별 기후노출 대응변수의 시간에 따른 변화율을 한반도 전체 평균 변화율과 비교하여 나타낸 그림이다. 그 결과 지역별 시간에 따른 변화율은 연속적인 무강수일의 최대값(Fig. 5a)의 경우 경기 지역에서 높게(증가), 동해안 지역에서는 낮게(감소) 나타났으며, 일 최대 강수량(Fig. 5b)과 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 5c)는 전남 지역에서 상대적으로 낮았다. 기온과 관련된 변수인 일 최고기온(Fig. 5d), 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수(Fig. 5e), 일 최저기온이 25℃ 이하인 날의 횟수(Fig. 5f)는 대구를 포함한 경남

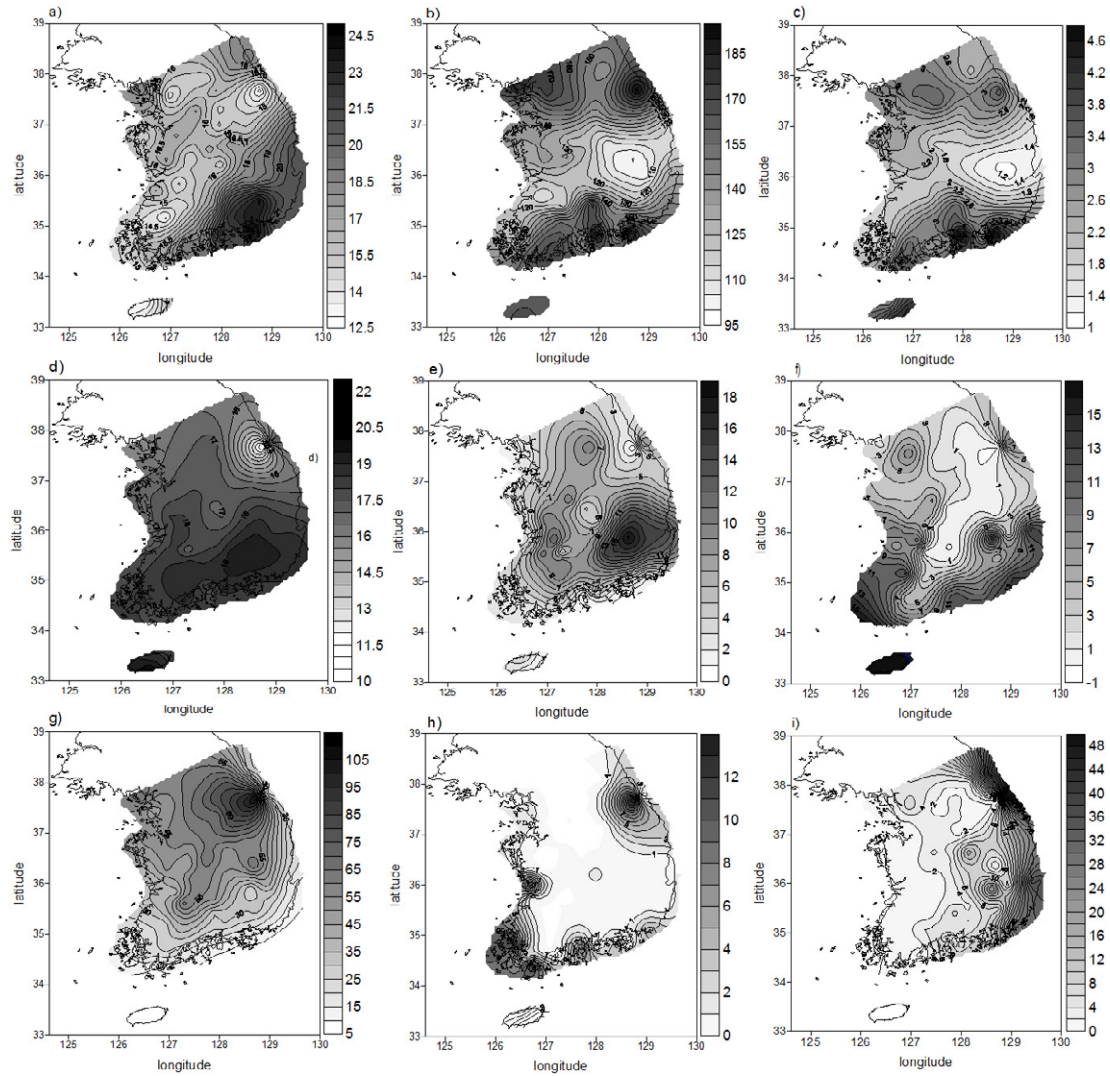


Fig. 4. Distribution of averaged climate exposure proxy variables observed during 1981-2010: a)maximum number of days of consecutive non-precipitation, b)daily maximum precipitation, c)number of days with daily precipitation over 80mm, d)daily maximum temperature, e) number of days with maximum temperature over 33 deg., f)number of days with minimum temperature over 25 deg., g)number of days with mean temperature of sub-zero deg., h)number of days with hourly maximum wind speed exceeding 14m/s and i)number of days with daily averaged effective humidity under 35%.

지역에서 높게, 그리고 일평균 영하일수(Fig. 5g)는 경남 지역에서 낮게 나타나, 경남 지역이 기온과 관련하여 상대적으로 민감한 것으로 나타났다. 그 외 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수(Fig. 5h)는 전남 지역에서 상대적으로 낮게, 실효습도가 35% 이하인 날의 횟수(Fig. 5i)는 동해안 지역에서 높은 값을 나타냈다.

2. 미래 100년간의 기후노출 대응변수의 시공간 분포

미래의 지역별 기후노출 대응변수를 예측하기 위해 국립환경과학원에서 개발한 기후·대기환경 통합시스템의 표출 시스템인 CCGIS의 결과를 이용하였다. 기후·대기환경 통합시스템은 전 지구규모의 기후모델인 CCSM3(Collins *et al*, 2006)와 대기화

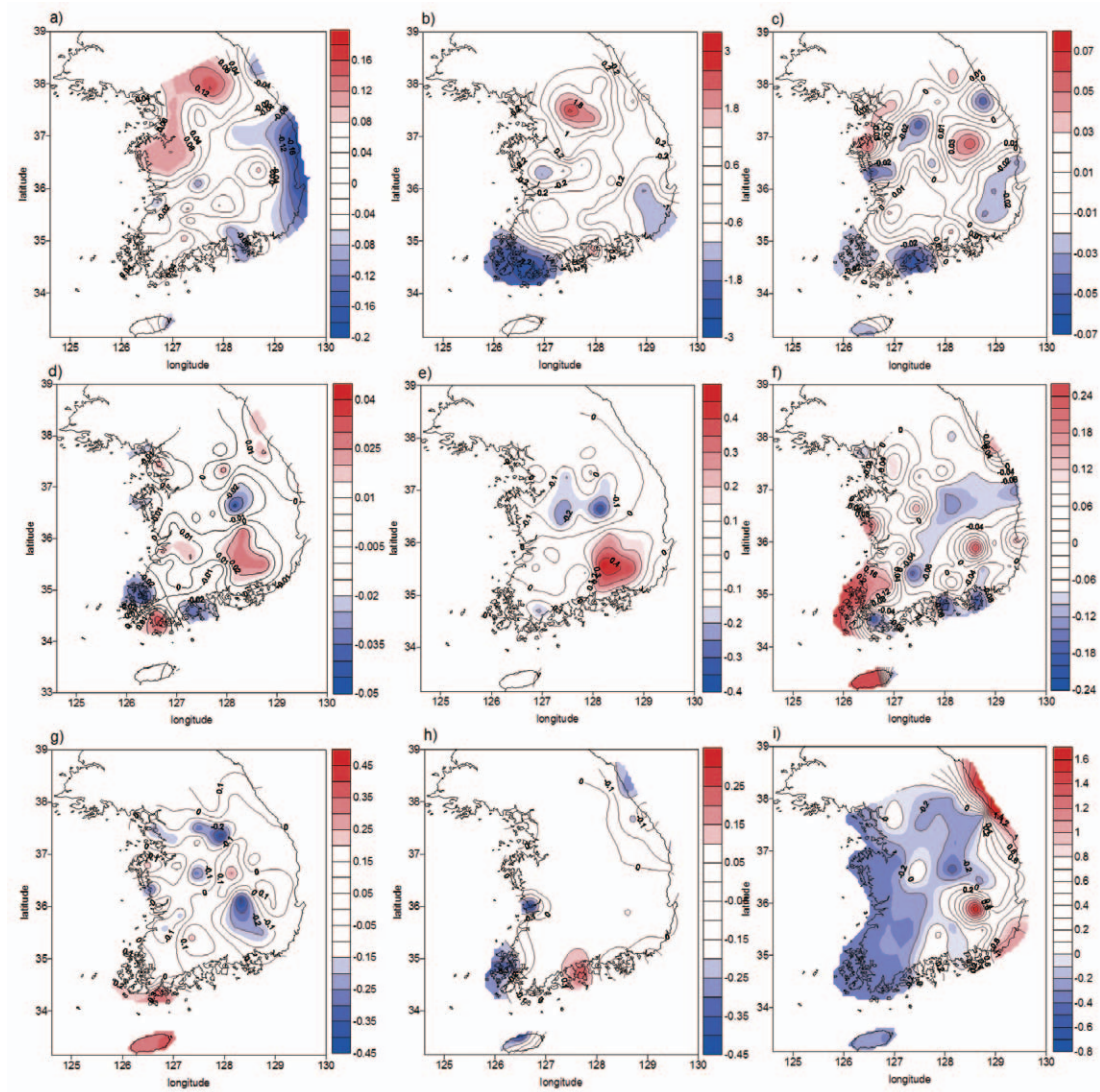


Fig. 5. The same as Fig. 4, except for the changing rates relative to averaged values.

학모델인 GEOS-Chem(Bey *et al.*, 2001), 지역규모의 기후예측을 수행하는 MM5(Grell *et al.*, 1995)와 지역규모 대기질 모델인 CMAQ(Byun and Ching, 1999; USEPA, 1999)으로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용된 미래 기후노출 대응변수는 전 지구규모의 기후 모델값을 규모 축소(down-scaling)하여 지역규모 모델의 입력 자료로 제공한 18km의 격자간격으로 생산된 값이다. IPCC에서 제공하는 6개의 배출량 시나리오(SRES) 중에서

A1B(A balanced emphasis on all energy sources) 시나리오의 기후노출 대응변수의 공간분포를 살펴보았다.

Fig. 6과 Table 4에 A1B 시나리오의 2020년, 2050년, 2100년의 산출값을 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 미래의 기후노출 대응변수 중 기온과 연관된 변수의 시간변화 경향과 지역간 편차(d) 모두 과거 30년의 시간변화 경향(Fig. 3)과 대체로 유사하게 나타났으나 그 변화율은 다르게 나타났

Table 4. Climate exposure proxy variables in 2020, 2050 and 2100 (A1B Scenario)

Climate exposure proxy variables	2020		2050		2100	
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation
Maximum of continuous non-precipitation days	10.29	1.60	9.64	1.18	11.04	1.58
Daily maximum precipitation	82.71	13.41	99.95	10.69	98.78	17.87
Number of days with precipitation over 80mm	0.79	0.51	1.20	0.44	1.34	0.63
Daily maximum temperature	15.57	1.42	17.24	1.34	17.72	1.36
Days with maximum temperature over 33 deg.	0.22	0.34	1.72	2.27	6.39	6.03
Days of minimum temperature over 25 deg.	1.24	2.08	9.31	9.81	15.08	12.89
Average of Sub-zero temperature days	52.71	24.20	31.37	18.42	30.05	18.04
Number of days with maximum wind speed exceeding 14m/s	3.52	5.86	3.19	5.22	4.24	6.07
Days with effective humidity of under 35% deg.	10.93	14.48	11.03	13.27	9.91	12.80

다. 예를 들어 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수와 일 최저기온이 25℃ 이상인 날의 횟수는 과거 30년의 소폭 증가하는 경향과는 달리 그 변화율이 매우 크게 나타났다.

그러나 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수와 실패습도가 35% 이하인 날의 횟수는 미래 기

후에서는 뚜렷한 변화 경향을 나타내지 않아 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횟수는 과거 30년 자료에서 나타났던 뚜렷한 감소경향(Fig. 3h)이 충분히 반영되어 미래에는 경향성이 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다. 실패습도의 변화 경향은 과거 관측 자료의 경향과 다르게 나타났는데, 전주기

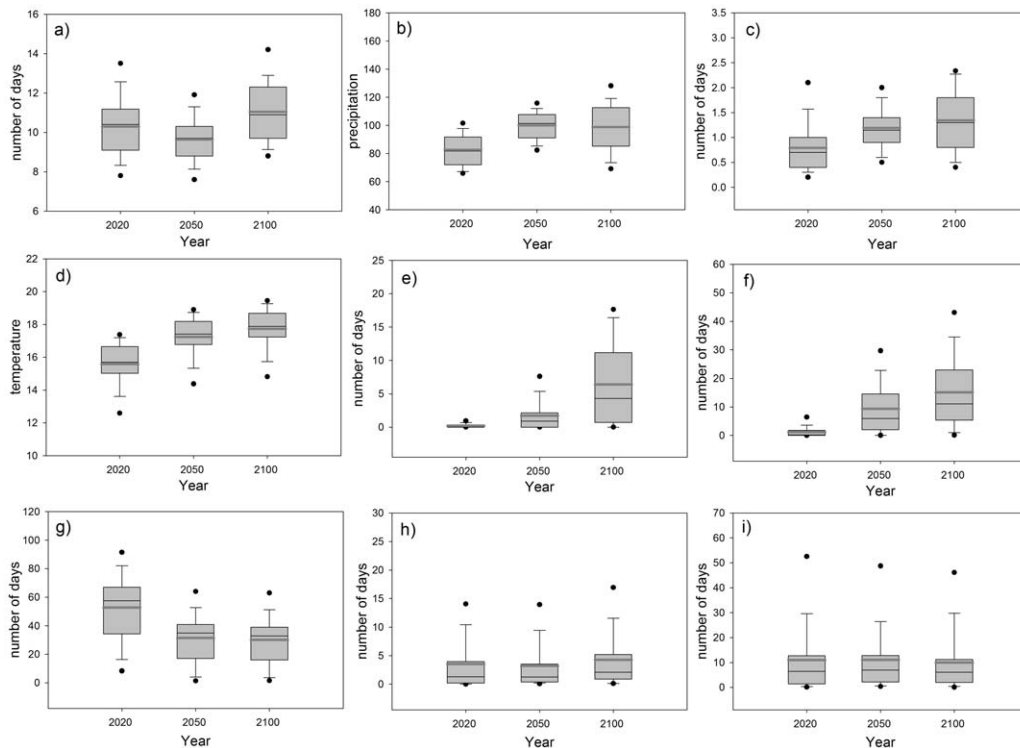


Fig. 6. Same as Fig. 3. except for CCGIS result of 2020, 2050 and 2100,

후모델에서 전 지구 온난화에 의한 기온증가-수증기증가-강수의 순환이 상대습도를 일정 이상 모의하지 못하는 결과에서 이해할 수 있다(Colman, 2004; Soden and Held, 2006; Wentz and Schabel, 2000; Trenberth *et al.*, 2005; Dai, 2006). 따라서 아열대 기후 등에 관한 여러 문헌 등을 토대로 실효습도와 연관된 미래 기후노출 변수에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 미래 2100년 A1B 시나리오에서의 기후노출 대응변수들의 공간분포를 나타낸 그림이다. 전체적으로 모든 기후노출 대응변수는 과거 30년과 비교해서 유사한 공간분포를 보였다. 예를 들어 연속적인 무강수일의 최대값(Fig. 7a)의 경우 경기 지

역(증가)과 동해안 지역(감소)에서 특히 그 변화경향이 심화된 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 5a에 제시한 회귀선의 기울기를 연장함으로써 그 경향을 확인할 수 있어, CCGIS가 이러한 지역별 증감 차이를 잘 모사하고 있는 것으로 볼 수 있다. 일 최대 강수량(Fig. 7b)과 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횟수(Fig. 7c) 또한 전남 지역에서 감소경향을 제외하고는 과거 30년의 기후노출 대응변수(Fig. 4b~c)와 유사함을 확인할 수 있었고, 전남 지역의 급격한 감소율은 회귀선 기울기 차이의 공간분포(Fig. 5b~c)에서도 확인할 수 있었다.

기온과 관련된 일 최고기온(Fig. 7d), 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횟수(Fig. 7e), 일 최저기온

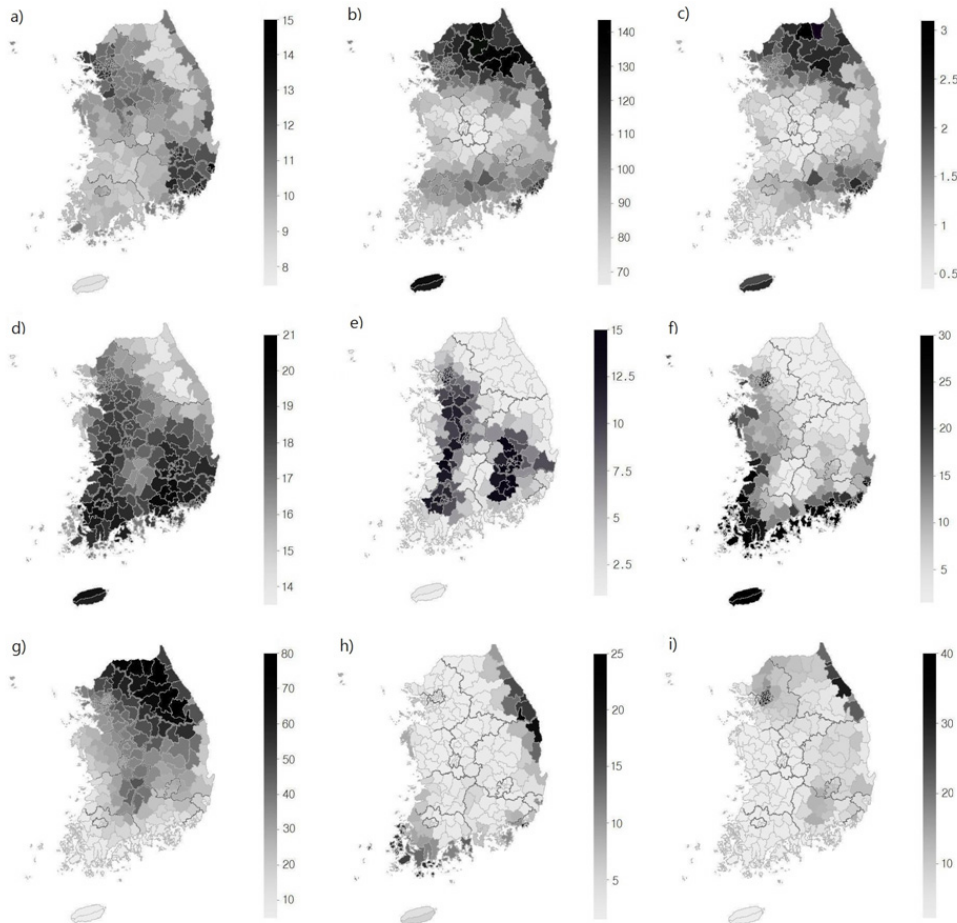


Fig. 7. Same as Fig. 4, except for CCGIS result of climate exposure proxy variables for A1B Scenario in the year 2100.

이 25℃ 이상인 날의 횡수(Fig. 7f), 일평균 영하일수(Fig. 7g) 또한 일부 지역을 제외하고는 전체적으로 지역간 분포를 잘 나타내는 경향을 보였다. 그러나 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횡수(Fig. 7h)와 실패습도가 35% 이하인 날의 횡수(Fig. 7i)는 앞에서 본 시계열 자료와 같이 지역간의 경향 차이를 뚜렷이 모의하지 못하였고 관측한 자료의 공간분포와 상이하여, 풍속과 연관된 기후노출 대응변수로 미래 기후의 취약성 지수를 산정할 때에는 특별한 주의가 필요함을 알 수 있다.

IV. 결론

본 연구는 기후변화 취약성 지수 산출을 위해 사용되는 기후변수들을 선정하여 과거 30년간(1981년부터 2010년) 한반도 내 61개 지상 기상 관측소에서 관측된 기후노출 대응변수의 시간적·공간적 특성을 분석하였고, 나아가 IPCC 기후변화 시나리오 중 A1B에 나타난 향후 100년간의 기후노출 대응변수의 시계열 자료를 분석하였다. 선정된 기후노출 대응변수는 총 9개로서 일 최저기온이 25℃ 이상인 날의 횡수, 일 최고기온, 일 최고기온이 33℃ 이상인 날의 횡수, 일평균 영하일수, 일 강수량이 80mm 이상인 날의 횡수, 일 최대 강수량, 연속적인 무강수일의 최대값, 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횡수, 실패습도가 35% 이하인 날의 횡수이다. 선정된 기후노출 대응변수가 기후변화가 진행함에 따라 시간 및 공간적으로 얼마나 민감하게 진행되었는지를 알아보기 위해 시간변화 파라미터(T)와 공간변화 파라미터(S)를 정의하여 기후변화에 따른 상대적 변화율의 크기를 정량적으로 비교하였다.

그 결과 선정된 9개의 기후노출 대응변수 중에서 과거 30년간 시간적·공간적으로 가장 민감하게 변화된 변수는 실패습도가 35% 이하인 날의 횡수였으며, 두 번째로 민감한 변수는 시간 최고풍속이 14m/s 이상인 날의 횡수였다. 실패 습도의 감소 경향을 통해 한반도가 가뭄과 같은 극한 기후에 노출

되고 있음을 알 수 있어 산림, 생태계 등 관련 분야에서 효율적으로 사용할 수 있는 대응변수임을 알 수 있었다. 그러나 강풍 횡수는 순간최대풍속과는 달리 시간에 따라 그 변화 경향이 오히려 감소하고 있어서, 증가하는 극한 기후 값을 필요로 하는 경우에는 기후변화의 영향을 반영하지 못함을 확인하였다.

기온 및 강수와 연관된 기후노출 대응변수는 시간 및 공간적으로 지속적으로 변화되어 왔으며, 기온과 연관된 기후노출 대응변수는 시간 변화 보다는 공간 편차 순위가 더 높게 나타나, 기후노출 자료를 산출할 때 기간과 목적에 따라 기후노출 대응변수에 가중치를 부여하는 연구와 기후변화 취약성 지수를 산출하는 기초 자료로 사용 될 수 있을 것으로 판단된다.

CCGIS를 이용하여 2100년에 대한 미래 기후를 모의한 결과 일부 제한된 지역을 제외하고는 전반적으로 관측자료에 의해 산출된 기후노출 대응변수의 선형 회귀식의 시간 연장 결과와 유사하였고, 공간 분포 또한 지역별 증감 차이를 대체로 잘 모사하고 있는 것으로 판단된다. 실패습도의 경우 과거 30년 동안 관측되었던 급격한 감소율은 미래 기후에는 모의되지 않았고, 이는 미래 기후의 주요 특성으로 볼 수도 있으나 전구기후모델의 불확실성에 일부 기인함을 확인하였다. 따라서 아열대 기후 등에 관한 여러 문헌 등을 기초로 하여 습도와 연관된 미래 기후에 적용 가능한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단하였다.

본 연구 결과 61개 지점 자료를 이용하여, 기온, 강수, 풍속, 상대습도와 관련된 9개의 기후노출 대응변수를 선정하고 이들 선정된 변수들의 시간 변화 및 공간 편차의 크기를 상대적으로 파악하였다. 그 결과, 시간 변화뿐만 아니라 지역 간의 경향차이도 매우 크고 다양하게 나타나, 한두가지 변수를 제외하고는 대부분 지역의 특성을 보다 잘 반영할 수 있음을 확인하였다. 아울러 기후변화에 따른 변동성이 크고 한반도에 적용 가능한 새로운 기후노출 대응변수를 더 많이 개발할 필요가 있으며, 새로운 기후노출 대응변수를 선정할 때에도 본 연구에서

사용한 시간 및 공간 변동성 파라미터를 통해 그 실용성을 검증할 수 있을 것으로 판단되며, 보다 다각적인 검증 방법 또한 필요할 것으로 판단된다. 마지막으로 기후노출 대응변수의 변동성 연구뿐만 아니라, 기후노출 대응변수의 표준화 연구, 민감도 연구, 적응 능력의 대응변수 선정 및 그 가중치 문제 등 기후변화 취약성 지표 산정에 필요한 여러 항목들의 특성에 관한 다각도의 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3212)의 일부 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 경기개발연구원, 2009, 경기도 기후변화 취약성 평가 연구, 3-43, 75-100.
- 고재경, 2011, 지방자치단체 기후변화 취약성 유형 및 적응방안 연구, 한국사회와 행정연구, 22(2), 93-118.
- 국립환경과학원, 2008, 기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영, 63-69.
- 국립환경과학원, 2009, 기후 및 대기환경 통합시스템 구축 및 운영(II), 3-27.
- 국립환경과학원, 2010, 기후 및 대기환경 통합 모델링 구축 및 운영(III), 3-10.
- 기상연구소, 2004, 기후변화협약대응 지역기후 시나리오 산출기술개발(III), 60-69.
- 김연희, 김맹기, 전은지, 이중대, 민경우, 장용석, 2010, 한반도 강수의 양극화 현상, 기후연구 5(1), 1-15.
- 김은화, 2010, 정규지상관측자료를 이용한 기후변화 취약성 지수 산정, 부산대학교 석사학위 청구논문, 26-30.
- 김철희, 김은화, 송창근, 홍유덕, 유정아, 홍성철, 2011, 한반도 기후 변화 적응을 위한 취약성 지수 산정에 관한 고찰, 한국환경과학회지, 20(6), 789-798.
- 류상범, 김연희, 권태현, 박일수, 2006, 기상청 기후자료의 균질성 문제(I): 관측지점의 이전, 대기, 16(3), 215-223.
- 배덕효, 이문환, 2010, 기후변화에 따른 홍수취약성 평가와 사례분석, 국토, 344, 20-31.
- 유정아, 송창근, 이현주, 홍유덕, 2011, 전국 지자체 단위 기후변화 부문별 취약성평가 표준화 방법론 개발, 한국대기환경학회 2011년 추계학술대회 논문집, 154.
- 이재범, 문경정, 홍성철, 김덕래, 송창근, 최원준, 유정아, 홍유덕, 2010, 기후변화에 따른 대기질 취약성 평가, 한국대기환경학회 2010년 춘계학술대회 논문집, 363-365.
- 진영훈, 박성천, 2005, 남방진동지수의 범주구분에 의한 강수량에 미치는 ENSO 영향의 통계학적 분석, 대한토목학회지, 25(6B), 443-450.
- 최현아, 이우균, 곽한빈, 최성호, 변재균, 유성진, 2009, 시·공간정보기반 기후변화 취약성 평가, 한국공간정보시스템학회 논문지, 11(3), 63-69.
- 한국환경정책·평가연구원, 2008, 기후변화 취약성 평가지표의 개발 및 도입방안, 4-43, 51-52.
- Bey, I., Jacob, D. J., Yantosca, R. M., Logan, J. A., Field, B., Fiore, A. M., Li, Q., Liu, H., Mickley, L. J. and Schultz, M., 2001, Global modeling of tropospheric chemistry with assimilated meteorology: Model description and evaluation, J. Geophys. Res., 106, 23, 073-095.
- Byun, D. W. and Ching, J. K. S., 1999, Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA Report, EPA/600/R-99/030, NERL, Research Triangle Park, NC.
- Collins, W. D., Rasch, P. J., Boville, B. A.,

- Hack, J. J., McCaa, J. R., Williamson, D. L., Briegleb, B. P., Bitz, C. M., Lin, S. J. and Zhang, M., 2006, The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3(CAM3), *Journal of Climate*, 19, 2144-2161.
- Colman, R. A., 2004, On the structure of water vapour feedbacks in climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L21109, doi:10.1029/2004GL020708.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J. and Shirley, W. L., 2003, Social Vulnerability to Environmental Hazards, *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-261.
- Dai, A., 2006, Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models, *Journal of Climate*, 19, 4605-4630.
- Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R., 1995, A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, 138.
- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*, Third Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Impacts, adaptation, and vulnerability*, Fourth Assessment Report, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Moss, R. H., Brenkert, A. L. and Malone, E. L., 2001, Vulnerability to climate change: A quantitative approach, PNNL-SA-33642, Prepared for the U.S. Department of Energy.
- Soden, B. J. and Held, I. M., 2006, An assessment of climate feedbacks in coupled ocean-atmosphere models, *Journal of Climate*, 19, 3354-3360.
- Trenberth, K. E., Fasullo, J. and Smith, L., 2005, Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapour, *Climate Dynamics*, 24, 741-758.
- UNDP, 2005, *Adaptation policy frameworks for climate change: Developing strategies, policies, and measures*, Cambridge University Press, UK.
- USEPA, 1999, *Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality(CMAQ) Modeling System*, USEPA No.EPA/600/R-99/030, Office of Research and Development, Washington, DC 20460.
- Wehbe, M. B., Seiler, R. A., Vinocur, M. R., Eakin, H., Santos, C. and Civitaresi, H. M., 2005, Social methods for assessing agricultural producer's vulnerability to climate variability and change based on the notion of sustainability, *Assessments of Impacts and Adaptations of Climate Change Working Papers*.
- Wentz, F. J. and Schabel, M., 2000, Precise climate monitoring using complementary satellite data sets, *Nature*, 403, 414-416.