한반도 미래 폭염의 발생 분포 및 종관패턴 분석

김진아¹ · 김규량¹ · Cameron C. Lee² · Scott C. Sheridan² · Laurence S. Kalkstein³ · 김백조¹

¹국립기상과학원 응용기상연구과 · ²켄트 주립대학교 · ³마이애미 대학교
(2016년 2월 15일 접수, 2016년 3월 18일 수정, 2016년 3월 23일 게재 확정)

Analysis of Occurrence Distribution and Synoptic Pattern of Future Heat Waves in Korea

Jin-Ah Kim¹ · Kyu Rang Kim¹ · Cameron C. Lee² · Scott C. Sheridan² · Laurence S. Kalkstein³ · Baek-Jo Kim¹

¹Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences

²Department of Geography, Kent State University

³Department of Public Health Sciences, Miller School of Medicine, University of Miami

(Received 15 February 2016, Revised 18 March 2016, Accepted 23 March 2016)

Abstract : The occurrence of heat waves estimated on historical runs of climate change was compared to that on reanalysis data from 1981 to 2005. Heat waves in the future then were predicted on the basis of climate change scenarios from 2006 to 2100. For the past period, the heat wave days predicted from the climate change scenarios data overestimated and than those by the reanalysis data. For the future period, the heat wave days increased until the mid-21st century and then stay stagnant by the RCP 2.6 scenario. However, the yearly heat wave days steadily increased until 2100 by the RCP 8.5 scenario. The synoptic cause of the most severe year of the heat wave days was analyzed as a strong high pressure developed around the Korean peninsula. The high pressure under the RCP 2.6 scenario was caused by the high level jet stream in the border area between China and Russia, whereas the high pressure under the RCP 8.5 scenario was caused by the strong high level jet stream and pressure ridge in the East Sea.

Key Words : Heat wave, SSC, RCP

주요어 : 폭염, 종관기단분류, 기후변화 시나리오

1. 서론

전세계적으로 극한 현상의 발생빈도가 증가하고 그 강도 역시 강해진다는 것을 많은 연구(Frich *et al.*, 2002; Alexander *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2009)

를 통해 알 수 있다. 이러한 이상현상으로 인해 자연재해뿐만 아니라 경제피해와 인명피해까지 증가될 것으로 예상된다. IPCC 5차 보고서(IPCC, 2013)에 따르면, 지구의 평균기온이 지난 133년간(1880~2012년) 0.85℃ 상승하였으며, 이는 IPCC

4차 보고서(IPCC, 2007)의 0.76℃(1950~2005년)보다 높은 상승률이다. 이에 따라, 평균기온과 관련이 있는 폭염의 발생일수 역시 상승할 것으로 판단된다.

폭염은 매우 심한 더위를 의미하는 한자어이나 폭염에 대한 명확한 정의는 없다. 유사한 단어는 혹서, 폭서, 무더위 등이 있다. 폭염은 혹서, 폭서와는 조금 다른 개념으로 나타내며 기간의 의미가 내재되어 있다(Park *et al.*, 2008). 대체적으로 일정한 온도가 넘는 경우에 폭염이 발생하였다고 정의한다(Robinson, 2001).

폭염은 자연재해뿐만 아니라 인명피해까지 이어질 수 있는 문제이다(Choi, 2006). 이와 관련하여 전 세계적으로 온열질환 사망자수에 대한 연구(Semenza *et al.*, 1996; Nakai *et al.*, 1999; Kysely and Huth, 2004; Tan *et al.*, 2004; Choi *et al.*, 2005)가 활발히 이루어지고 있다. 자연재해의 인명피해에 대한 외국사례를 살펴보면, 2010년에 가장 많은 사망자수를 발생시킨 아이티 지진(222,570명) 다음으로 동일 해 러시아에서 발생한 폭염에 의한 사망자수(55,336명)가 그 해에 두 번째로 많았다(Heo and Song, 2012). 국내에서도 1994년에 발생한 폭염(33일 지속)으로 직접적 영향뿐만 아니라 간접적 영향까지 포함하여 3,027명이 사망하였다(Heo and Song, 2012). 폭염이 발생하면 체온조절을 위해 심박출량이 증가하면서 기존의 심혈관 질환이나 뇌혈관 질환을 가지고 있는 사람은 사망할 가능성이 높다. 특히 고령자는 폭염에 더욱 취약한데, 폭염에 적응하기 위한 고온 순응 과정 중 필요한 땀의 분비 능력이 나이가 들수록 떨어지기 때문이다(Kim *et al.*, 2007a; Kim, 2008; Sheridan *et al.*, 2012). 더욱이 통계청의 장래인구추계에 따르면, 우리나라의 미래 연령별 인구 분포에서 고령자(65세 이상)가 전체 인구 중 2010년에는 11%에서 2060년에는 40.1%로 3배 이상 증가한다고 전

망(Statistics Korea, 2010)하였기 때문에 향후 폭염 피해 전망에서 인구 분포도 고려하여야 한다.

폭염 피해를 저감하기 위하여 전세계적으로 폭염에 대한 경보의 기준을 설정하여 그 기준을 초과할 것으로 예상되면 경보를 하고 있는데, 그 기준은 각 나라마다 다르다. World Meteorological Organization(WMO)는 최고기온이 평년보다 5℃ 이상 높고 5일 이상 지속될 때를 기준으로 하며, 캐나다의 경우 연속 3일 동안 32℃ 이상의 기온이 나타날 때를 기준으로 한다. 한국에서 폭염 특보의 기준은 일 최고 기온이 33℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 주의보를 발령하고, 일 최고 기온이 35℃ 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때 경보를 발령한다. 또한 한국 기상청은 열지수를 이용한 폭염 정도 역시 홈페이지를 통해 추가적으로 표출하고 있다.

이러한 폭염은 기온 상승에 의해 발생이 촉진되기도 하지만 다양한 기상요소의 결합으로 인해 복합적으로 영향을 받아 발생된다. 그 예로, 폭염이 심하게 발생한 해인 1994년 한반도 폭염은 티벳 고원의 상층 고기압의 조기 발달과 남중국해 지역의 저기압 발달에 의한 것이라는 연구(Park and Schubert, 1997)가 있었다. 그리고 2013년에 발생한 폭염은 지속적인 고기압의 영향으로 맑은 날이 지속되었고, 하층 대기에서 온난기류가 지속적으로 한반도로 유입되었기 때문이라고 밝힌 연구(Kim *et al.*, 2014)가 있었다. 이외에도 폭염과 관련된 종관분석을 한 연구(Choi *et al.*, 2005; Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007b; Kim *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2010)가 많으며, 이러한 연구를 통해 종관 분포가 폭염 발생에 큰 영향을 미치고, 폭염을 분석하기 위해서는 종관 분석이 유용하다는 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구는 미래 폭염의 빈도와 원인을 살펴보기 위해서 먼저 과거 폭염 발생 비교를 하였

다. 이를 위해 기후변화 시나리오 과거 자료와 재분석 자료를 이용하여 종관기단분류(Lee and Sheridan, 2011)를 수행한 후, 두 자료의 결과를 비교하여 분류 방법의 유효성 및 미래 자료 활용 가능성을 확인하였다. 그 후 기후변화 시나리오 RCP 2.6과 RCP 8.5를 이용한 종관기단분류를 수행하여 미래 폭염 발생 빈도를 조사하여, 미래의 폭염 빈도를 예상하였다. 그리고 미래 기간 중 최대 폭염 발생연도에 대한 원인을 분석하여 어떤 종관적 패턴이 강한 폭염을 유발하는지 조사하였다.

2. 자료 및 방법

1) 자료

한반도 주변의 종관 기상을 분석하기 위해 6시간 간격의 전 지구 기후변화 시나리오와 재분석자료를 사용하였다. 두 자료에서 공통적으로 사용한 변수는 4~10월의 고도별 기온과 상대습도, 지위 고도, 비습이다.

사용한 기후변화 시나리오 자료는 IPCC 5차 평가보고서에서 정한 대표농도경로인 Representative Concentration Pathway(RCP) 과거(1981~2005년)와 RCP 2.6(2006~2100년), RCP 8.5(2006~2100년)로써, 기상청에서 제공하는 자료(HadGEM2-AO)이다. 해상도가 $1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 이고 1개월은 30일, 1년은 360일로 표출된다. RCP 2.6은 인간 활동에 의한 결과를 지구 스스로가 회복 가능한 경우(온실가스 저배출)이며, RCP 8.5는 현재 추세로 온실가스가 배출되는 경우(온실가스 고배출)이다.

RCP 과거 자료와 비교 분석을 하기 위해 사용한 재분석 자료는 기후변화 시나리오 자료의 historical 자료와 유사한 기간의 자료를 이용하였으며 그 중 해상도가 높은 자료를 이용하였다. 해상도는 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 이고, 1981~2012년 National Oceanic

and Atmospheric Administration (NOAA) -Co-operative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) 20th Century Reanalysis version 2 자료이다.

그리고 두 자료의 비교를 위해 해상도가 다르므로 두 자료의 해상도를 재분석자료에 맞게 재격자하여 일치시켰다.

2) 종관기단분류(Spatial Synoptic Classification: SSC)

일반적인 기단 분류에서 환경문제에 대한 응용이 적합하도록 새로운 기단분류방법(Bergeron, 1930; Kalkstein *et al.*, 1996)이 개발되었다. 이 분류방법은 처음에 지상관측지점의 자료를 이용하여 분류(Sheridan, 2002)를 하였으나 그 지역의 특징뿐만 아니라 공간적인 영역에 대한 기단 분류를 위해 격자 자료를 이용하여 종관기단분류방법(Lee and Sheridan, 2011)으로 확장되었다. 종관기단분류방법은 총 6개 단계로 패턴 범주화가 이루어진다. 재분석자료를 Principal Component Analysis(PCA) 분석을 통해 Principal Components(PCs)를 도출한다. 이렇게 추출된 PCs를 이용하여 이단계 군집분석을 실행한다. 다음으로 재분석자료와 기후변화 시나리오를 이용하여 PCA를 한번 더 시행한다. 다음으로 도출된 PCs를 이용하여 판별분석을 실행한다. 그리고 재분석자료와 기후변화 시나리오 자료의 실제 값과 PCs 간의 다항 기호 논리학 회귀를 실행한다. 마지막으로 이전 판별분석 결과와 다항기호 논리학 회귀의 결과를 이용하여 판별분석을 한번 더 해준다. 더 자세한 방법은 Lee and Sheridan(2011)을 참고하면 된다. 이 기단 분류는 Table 1과 같이 총 7개로 구분된다. 기단 분류 중 MT의 경우, MT와 MT+, MT++로 더 세분화된다. MT+는 그날의 열 지수 기준으로 오전과 오후의 값이 동시에 평균

Table 1. The classification category of spatial synoptic classification (SSC) (Sheridan, 2002; Kalkstein *et al.*, 2011).

Air mass type	Meteorological characteristics
DP (Dry polar)	Very cold and dry
DM (Dry moderate)	Mild and dry
DT (Dry tropical)	Very hot and very dry
MP (Moist polar)	Cold, cloudy, rainy
MM (Moist moderate)	Overrunning, cool, drizzle, foggy
MT (Moist tropical)	Hot, very humid
TR (Transition)	A change from one air mass to the next, front

이상을 나타낼 때(Steadman, 1979)이며, MT++는 오전과 오후의 열지수가 그날 값의 표준 편차(1 Standard deviation: SD) 이상일 때(Sheridan and Kalkstein, 2004)를 나타낸다.

본 연구에서는 종관기단분류방법과 동일하게 재분석 자료와 기후변화 시나리오 자료의 700hPa 지위고도와 850hPa 기온 및 상대습도 자료를 이용하여 한반도 주변 영역(115.3125–137.8125°E, 28.125–49.375°N)에 대해 종관기단분류하여 분석하였다.

3. 연구 결과 및 토론

1) 과거의 폭염 발생 비교

폭염을 나타낼 수 있는 기단인 DT와 MT군(MT, MT+, MT++)에 대해 재분석 자료와 기후변화 시나리오 과거 자료를 비교해 보았다. 연도별 발생일을 살펴보면, 재분석 자료에서 DT는 2002년(16회), MT는 1994년(57회)에 가장 많이 발생하였다. MT+는 1998년과 2005년에 많이 발생(8회)하였고, MT++는 1994년에 최대 2회 발생하였다(Figure 1a). 기후변화 시나리오의 과거자료 중 DT는 1992년과 2000년에 각각 8회로 가장 많이 발생하였고, MT는 1999년(68회)에, MT+는

1990년(6회)에 가장 많이 발생하였다. MT++는 재분석 자료보다 과거 분석기간 전체에서 많이 발생하였으나 그 횟수는 적었으며 1990년과 2005년에 각각 3회 발생하였다(Figure 1b).

두 자료의 폭염 발생을 비교해 보면, 기후변화 시나리오는 재분석 자료보다 1993, 1995, 1999년에는 과다모의 하였고, 1983, 1994년에 과소모의 하였다(Figure 2). 1981~2005년의 변화경향을 각 그룹별로 살펴보면, DT는 재분석 자료($0.35 \text{ day decade}^{-1}$)가 기후변화 시나리오($0.15 \text{ day decade}^{-1}$)보다 더 증가하는 경향을 나타냈다. MT는 기후변화 시나리오($10.05 \text{ day decade}^{-1}$)가 재분석 자료($1.88 \text{ day decade}^{-1}$)보다 더 많이 증가하는 것으로 나타났다. MT+는 재분석 자료($0.46 \text{ day decade}^{-1}$)가 기후변화 시나리오($0.39 \text{ day decade}^{-1}$)보다 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. MT++는 기후변화 시나리오($0.35 \text{ day decade}^{-1}$)가 재분석 자료($0.04 \text{ day decade}^{-1}$)보다 더 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 MT와 MT++에 대해 기후변화 시나리오가 재분석 자료보다 폭염 발생을 과다 모의하고 있는 것을 알 수 있으며, MT++의 변화경향이 크게 증가(약 9배)하는 것을 확인하였다.

미래 기후변화 시나리오를 이용하여 미래에 발생할 폭염을 분석하기 위해 모델 값인 기후변화 시나리오 자료와 관측 값인 재분석자료의 상관성을

Figure 1. Yearly total days of MT, DT, MT+, and MT++ by the SSC from (a) reanalysis data from 1981 to 2012 and (b) RCP historical data from 1981 to 2005. The bar plots denote MT and scatter and line plots denote DT (blue), MT+ (green), and MT++ (red).

Figure 2. Yearly total days of (a) DT, (b) MT, (c) MT+, and (d) MT++ by the SSC. The scatter and line plots denote hot days of reanalysis data (blue) and RCP historical data (red). The dashed line denote trend (day year⁻¹) of hot day of reanalysis data (blue) and RCP historical data (red).

비교하여 미래 분석에 대한 신빙성을 살펴보았다. 실제 자료를 이용할 경우, 두 자료의 시간 조건(재분석자료: 365일 또는 366일/기후변화 시나리오 360일)이 동일하지 않아 비교 조건을 동일하게 만들기 위하여, 기후변화 시나리오와 재분석 자료의 연도별 폭염일(MT+와 MT++)을 분석기간의 연도별 일수로 나눠 폭염일 비율로 환산하여 상관 분석을 하였다. 이때 DT는 여름 이전 건조한 기간에 발생한 폭염을 나타내는 기단이며, MT+와 MT++는 여름을 대표하는 기단인 MT 군 중 강한 폭염을 대표하는 기단이다. 재분석 자료와 기후변화 시나리오 자료 모두 폭염 발생이 증가한다는 것을 앞의 분석에서 알 수 있었다. 두 자료의 편차 값이 큰 연도(1990년)는 극 값에 해당하였고 해당 연도를 제외하면 두 자료는 상관성이 있는 것으로 나타났고($r=0.48$) P-value가 0.019로 신뢰수준 95%에 유의하게 나타났다. 실제로 대기대순환 모델 예측률은 물리모수화과정 등의 다양한 이유로 인해 높지 않다고 보고된 바 있다(Ahn and Hwang, 2005; Kwon, 2013). 이를 감안한다면 해당 기후변화 시나리오를 이용한 미래 폭염 전망이 타당한 것으로 판단된다.

2) 미래 기후변화 시나리오에 따른 폭염의 발생 빈도

2006~2100년 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 연도별 폭염 발생을 확인하였다. RCP 2.6은 21세기 초반에 폭염 발생일이 증가하다가 중반 이후부터는 연도별 편차가 발생하지만 일정한 범위 내에서 발생하였다(Figure 3a). 그러나 RCP 8.5의 경우, 연도별 폭염의 발생일이 21세기 후반까지 계속적으로 증가하였다(Figure 3b). 21세기 동안 MT+의 경우, RCP 2.6은 2059년(29회), RCP 8.5는 2085년(32회)에 가장 많이 발생하였다. MT++의 경우, RCP 2.6은 2059년(8회), RCP 8.5는 2100년(15회)에 가장 많이 발생하여 각 시나리오의 특성이 잘 반영된 것으로 생각된다.

RCP 2.6과 8.5는 21세기 후반으로 갈수록 다른 변화경향을 나타냈다. MT의 경우, RCP 2.6에서는 $0.005 \text{ day year}^{-1}$ 로 약하게 증가하나 RCP 8.5에서는 $6.2 \text{ day decade}^{-1}$ 로 급격히 증가한다. MT+의 경우, RCP 2.6에서는 $0.5 \text{ day decade}^{-1}$, RCP 8.5에서는 $2.2 \text{ day decade}^{-1}$ 로 RCP 8.5에서 더 급격히 증가하였다. MT++의 경우, RCP 2.6에서는 아주 약하게 증가하여 거의 0에 가까우나 RCP 8.5에서는 $0.7 \text{ day decade}^{-1}$ 로 증가하여 RCP 8.5

Figure 3. Yearly total days of MT, DT, MT+, and MT++ by the SSC from (a) RCP 2.6 and (b) RCP 8.5 scenario data. The bar plots denote MT. The scatter and line plots denote DT (blue), MT+ (green), and MT++ (red).

의 변화경향이 RCP 2.6보다 400배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 21세기를 전·후반으로 분석하였을 때, RCP 2.6에서는 폭염일이 21세기 전반까지 증가(MT+: 0.78 day decade⁻¹, MT++: 0.27 day decade⁻¹)하다가 그 이후 거의 증가하지 않지만(MT+: 0 day decade⁻¹, MT++: -0.12 day decade⁻¹) RCP 8.5에서는 21세기 후반까지 계속해서 증가하며, 21세기 전반(MT+: 1.82 day decade⁻¹, MT++: 0.35 day decade⁻¹)보다 후반(MT+: 2.8 day decade⁻¹, MT++: 0.52 day decade⁻¹)에 더 크게 증가하는 것을 확인하였다.

3) 최대 폭염 발생빈도가 나타난 해의 원인 분석

각 기후변화 시나리오별 폭염의 최대 발생 해의 발생 원인을 고도별 종관 분포를 통해 살펴보았다. 이때, 실제 폭염이 발생한 날의 종관 분석을 위해 각 시나리오별 최대폭염연도의 MT++가 발생한 날짜의 자료를 이용하여 분석하였다.

RCP 2.6(2059년)은 7월 15일, 7월 16일, 7월 29일, 7월 30일, 8월 2일, 8월 6일, 8월 22일, 8월 23일(총 8일)의 자료를 사용하였고, RCP 8.5(2100년)는 4월 12일, 7월 11일, 7월 12일, 7월 13일, 7월 14일, 7월 17일, 7월 18일, 7월 19일, 7월 20일, 7월

Figure 4. The deviation of (a) geopotential height (m), (b) air temperature (°C), (c) relative humidity (%), (d) specific humidity (kg kg⁻¹), and (e) wind (m s⁻¹) at 850 hPa on heat wave days by the RCP 2.6. The mean values of the distribution is from 2006 to 2100 by the RCP 2.6.

22일, 7월 23일, 7월 26일, 8월 20일, 8월 21일, 8월 30일(총 15일)의 자료를 사용하였다. 평균은 미래 기후변화 시나리오의 전체 분석 기간인 2006~2100년의 자료를 사용하였다.

먼저 폭염이 가장 강하게 발생한 연도의 원인을 분석하기 위해, SSC를 분석할 때 사용한 변수인 지위고도와 기온, 상대습도, 비습, 바람의 편차를 살펴보았다(Figure 4). 비습의 경우, 실제 공기 속 수분량을 알 수 있기 때문에 추가적으로 분석하였다. RCP 2.6은 지위고도와 기온이 평균에 비해 높게 나타났고(Figure 4a and 4b), 상대습도는

낮게 나타났다(Figure 4c). 비습의 경우, 한반도 일부지역에서 평균보다 높게 나머지 지역은 낮게 나타났다(Figure 4d), 바람은 고기압성 편차가 강하게 나타났다(Figure 4e). RCP 8.5의 경우, 지위고도와 기온, 상대습도, 비습은 비슷한 경향을 나타냈다(Figure 5a, 5b, 5c and 5d). 그러나 바람의 경우(Figure 5e), 중국과 러시아 경계지역에서 강한 고기압성 흐름이 나타나 RCP 2.6과 고기압성 흐름의 위치가 차이가 있으나 한반도에 고기압성 흐름의 영향이 미친다는 것은 동일하다.

RCP 2.6에서는 500hPa부터 한반도와 일본열도

Figure 5. The deviation of heat wave days of (a) geopotential height (m), (b) air temperature ($^{\circ}\text{C}$), (c) relative humidity (%), (d) specific humidity (kg kg^{-1}), and (e) wind (m s^{-1}) at 850 hPa on heat wave days by the RCP 8.5.

The mean values of the distribution is from 2006 to 2100 by the RCP 8.5.

에 걸쳐 고기압이 나타났으며 그 강도는 하층으로 갈수록 약해지는 경향을 띄었다. 그리고 남중국에 500~850hPa에서 저기압이 발달하였다. 이로 인해 북태평양에서 유입된 온난기류가 중국 대륙 쪽으로 유입되면서 한반도 일부 지역과 남중국 주변의 비습이 높게 나타나고 상대적으로 고기압의 영향권에 있는 한반도의 비습은 낮게 나타났다. 북태평양고기압 역시 평균에 비해 한반도로 많이 확장된 것을 확인하였다(Figure 6a). 또한 강한 상층 제트류가 중국과 러시아의 경계 지역에 나타나므로 한반도 지역에 강한 상층 고기압이 발달하였다(Figure 6b).

강한 폭염이 발생한 해에 RCP 8.5에서는 RCP 2.6보다 전세계적으로 기압 편차가 증가하였다. 고도별로 살펴보면, 500~850hPa까지 동해안에 강한 고기압이 발달하였고 이로 인해 남쪽에서 유

입된 기류가 모두 한반도 주변지역을 지나면서 한반도의 비습이 낮게 나타났다. 특히 1000hPa에서 동쪽으로부터 유입된 기류가 모두 서해안을 통과하는데, 남중국에 발달한 저기압이 강한 고기압으로 인해 RCP 2.6보다 더 서쪽에 발달하였다.

따라서, RCP 2.6과 8.5에서 모두 한반도 지역에 강한 고기압이 발달하였고, 주변의 비습이 높아 한반도는 상대적으로 맑은 날이 지속되었을 것으로 추측된다. 이로 인해, 한반도의 폭염이 강하게 발달한 것으로 판단된다.

이때, 두 시나리오의 고기압이 발달한 원인은 차이가 있었다. RCP 2.6은 강한 상층 제트류의 영향으로 한반도 상층까지 고기압이 발달할 수 있었지만, RCP 8.5는 2가지의 원인으로 고기압이 발달하였다. 첫째는 북태평양 지역에 강한 고기압이 발달하여 일본 동쪽에 기압골이, 동해에 기압능이

Figure 6. (a) The North Pacific high pressure (m) and (b) The averaged Jet stream (m s^{-1}) of heat wave days in mean year (solid line) and in 2059 (shade) by the RCP 2.6 scenario.

Figure 7. (a) Wind (vector) and geopotential height (contour) at 500 hPa on 11-14 and 17-20 July, 2100 by the RCP 8.5 scenario. (b) Wind (vector) and jet stream (shade) at 200 hPa on 20, 21 and 30 August, 2100 by the RCP 8.5 scenario. The wind units m s⁻¹. The geopotential height units m.

발달하여 동해에 고기압이 발생한 것이고(Figure 7a), 둘째는 RCP 2.6과 동일하게 중국과 러시아 사이에 상층 제트류가 강하게 발달하여 키 큰 고기압이 발달한 것이다(Figure 7b).

4. 결론 및 토의

과거 한국의 폭염 발생을 재분석 자료와 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 비교하고 미래의 폭염 분포와 그 원인을 분석하였다. 이때, DT의 경우, 봄에 주로 나타나는 폭염이라면, MT군은 여름에 나타나는 폭염이라고 할 수 있다.

먼저 과거기간에 대한 재분석 자료와 기후변화 시나리오 과거 자료를 이용하여 폭염이라고 할 수 있는 DT, MT, MT+, MT++의 연도별 분포를 살펴보았다. 실제로 기후변화 시나리오와 재분석 자료에서 각 그룹별 최대값이 나타나는 연도는 일치하지 않았다. 이는 모델과 관측 자료의 날짜 수 차이 등의 원인에 의한 것으로 파악되었다. 따라서 각 자료의 폭염일수를 연도별 분석일수로 나

누어 계산하였다. 이때, 최대 폭염연도를 기후변화 시나리오 값에서는 모의하지 못하였으나, 기후변화 시나리오와 재분석 자료에는 상관성이 있는 것으로 나타나 미래의 폭염에 대한 연구를 진행하였다.

미래의 한반도 폭염에 대해 비교해보면, RCP 2.6은 21세기 중반일 때, 폭염 발생이 최고로 나타났고, RCP 8.5는 21세기 말에 최고 값을 나타냈다. 특히 RCP 8.5는 RCP 2.6에 비해 폭염의 발생률이 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 이는 각 시나리오별 온실가스 유입률 차이에 의한 것으로 판단된다.

강한 폭염이 발생한 연도 중 가장 많이 발생한 연도의 원인을 밝히기 위하여 시나리오별(RCP 2.6과 8.5) 종관 분석을 하였다. 두 시나리오 모두 키 큰 고기압이 평년에 비해 한반도 쪽으로 더 확장했으며 한반도 주변지역에서 수분량이 많고 한반도의 수분량이 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이로 인해 맑은 날이 지속될 가능성이 높아 폭염이 강했던 것으로 판단된다. 과거 자료와 비교해보면 미래는 과거에 비해 한반도에 발달한 고기

압이 더 강해졌고 이로 인해 남중국에 발달하는 저기압이 다소 약화되는 경향을 나타냈다.

이러한 결과는 IPCC 5차 보고서에서 기온이 상승한다는 예측과 일치하는 측면이 있다. 본 연구에서는 온실가스의 대기 중 유입률이 유지된다면(RCP 8.5), 폭염의 위험기단(MT+와 MT++) 발생횟수가 급격히 증가하게 되어 2076~2100년(평균 23.96일)에는 1981~2005년(평균 1.72일)보다 약 14배 증가할 것으로 분석되었다.

해당 연구는 하나의 기후변화 시나리오에 대해 종관기단분류를 하여 분석하였다. 그러나 추후 기후변화 시나리오를 이용한 분석을 위해 다양한 기후변화 시나리오 자료의 양상분을 이용하여 더욱 신뢰성 있는 연구가 필요하다고 판단된다.

미래에 본 연구와 동일한 현상이 발생하면, 폭염이 더 많이, 더 강하게 발달할 것으로 판단된다. 폭염은 고령자에게 더 취약하다는 여러 연구가 있었으며, 현재의 고령자 비율보다 미래에는 고령자의 비율이 크게 증가할 것으로 보고된 바 있다(Statistics Korea, 2010). 따라서, 폭염에 대한 직·간접적인 피해를 줄이기 위해 폭염을 대비할 수 있는 시설(쿨링센터, 쉼터 등) 및 취약계층에 대한 맞춤형 서비스 등에 대한 대책이 마련되어야 한다고 판단된다.

사사

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 국립기상과학원 주요사업 “응용기상기술개발연구”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Ahn, J.-B. and Hwang, Y.-J., 2005, A study of predictability of CME/PNU CGCM for East Asia winter temperature, *Asia-Pacific Journal of atmospheric sciences*, 41(6), 943-954 (in Korean).
- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M., and Vazquez-Aguirre, J. L., 2006, Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111: D05109, DOI:10.1029/2005JD006290.
- Bergeron, T., 1930, Richtlinien einer dynamischen klimatologie, *Meteorologische Zeitung*, 47(7), 246-262.
- Choi, G.-Y., Choi, J.-N., and Kwon, H.-J., 2005, The impact of high apparent temperature on the increase of summertime disease-related mortality in Seoul: 1991-2000, *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 38(3), 283-290 (in Korean).
- Choi, G.-Y., 2006, A definition of Korean heat waves and their spatio-temporal patterns, *Journal of the Korean Geographical Society*, 41(5), 527-544.
- Frich, P., Alexander, L. V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein Tank, A. M. G., and Peterson, T., 2002, Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the 20th century, *Climate Research*, 19(3), 193-212.
- Heo, B.-Y. and Song, J.-W., 2012, Countermeasures on heat wave related disasters increasing due to climate change, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(6), 171-177 (in Korean).
- IPCC, 2007, *Climate change 2007: synthesis report*, Inter-

- governmental panel on climate change.
- IPCC, 2013, *Climate change 2013: The physical science basis*, Intergovernmental panel on climate change.
- Kalkstein, L. S., Barthel, C. D., Greene, J. S., and Nichols, M. C., 1996, A new spatial synoptic classification: application to air mass analysis, *International Journal of Climatology*, 16(9), 983-1004.
- Kalkstein, L. S., Greene, S., Mills, D. M., and Same-now, J., 2011, An evaluation of the progress in reducing heat-related human mortality in major US cities. *Natural Hazards*, 56(1), 113-129.
- Kim, J.-O., 2008, A study on the cooling center manual of facility and maintenance for extreme heat disaster, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 8(4), 17-22 (in Korean).
- Kim, J.-Y., Kim, J.-O., and Yu, K.-Y., 2007a, A study on foreign cases for the management of extreme heat response plan in Korea, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 7(2), 25-33 (in Korean).
- Kim, J.-Y., Lee, D.-G., Choi, B.-C., and Park, I.-S., 2007b, Synoptic air mass classification using cluster analysis and relation to daily mortality in Seoul, South Korea, *Atmosphere*, 17(1), 45-53 (in Korean).
- Kim, J.-Y., Lee, D.-G., and Kysely, J., 2008, A synoptic and climatological comparison of record-breaking heat waves in Korea and Europe, *Atmosphere*, 18(4), 355-365 (in Korean).
- Kim, J.-Y., Lee, D.-G., Park, I.-S., Choi, B.-C., and Kim, J.-S., 2006, Influences of heat waves on daily mortality in South Korea, *Atmosphere*, 16(4), 269-278 (in Korean).
- Kim, Y.-J., Kim, H.-S., Kim, Y.-K., Kim, J.-K., and Kim, Y.-M., 2014, Evaluation of thermal environments during the heat waves of summer 2013 in Busan metropolitan area, *Journal of Environmental Science International*, 23(11), 1929-1941 (in Korean).
- Kwon, M.-H., 2013, Diagnosis of northeast Asian summer precipitation using the western north pacific subtropical high index, *Journal of Korean Earth Science Society*, 34(1), 102-106 (in Korean).
- Kysely, J. and Huth, R., 2004, Heat-related mortality in the Czech Republic examined through synoptic and 'traditional' approaches, *Climate Research*, 25(3), 265-274.
- Lee, C. C. and Sheridan, S. C., 2011, A six-step approach to developing future synoptic classifications based on GCM output, *International Journal of Climatology*, 32(12), 1792-1802.
- Lee, D.-G., Choi, Y.-J., Kim, K.-R., Byon, J.-Y., Kalkstein, L. S., and Sheridan, S. C., 2010, Development of heat-health warning system based on regional properties between climate and human health, *Journal of Climate Change Research*, 1(2), 109-120 (in Korean).
- Nakai, S., Itoh, T., and Morimoto, T., 1999, Deaths from heat-stroke in Japan: 1968-1994, *International Journal of Biometeorology*, 43(3), 124-127.
- Park, J.-K., Jung, W.-S., and Kim, E.-B., 2008, A study on development of the extreme heat standard in Korea, *Journal of the Environmental Sciences*, 17(6), 657-669 (in Korean).
- Park, J.-K., Jung, W.-S., and Kim, E.-B., 2009, Study on the establishment of threshold criteria for heat health watch warning system in Korea; Part I: establishment of criteria and verification, *Journal of the Environmental Sciences International*, 18(7), 767-780 (in Korean).
- Park, C. K. and Schubert, S. D., 1997, On the nature of the 1994 East Asian summer drought, *Journal of Climate*, 10(5), 1056-1070.
- Robinson, P. J., 2001, On the definition of a heat wave, *Journal of Applied Meteorology*, 40(4), 762-775.

- Semenza, J. C., Rubin, C. H., Falter, K. H., Selanikio, J. D., Flanders, W. D., Howe, H. L., and Wilhelm, J. L., 1996, Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago, *The New England Journal of Medicine*, 335(2), 84-90.
- Sheridan, S. C., 2002, The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America, *International Journal of Climatology*, 22(1), 51-68.
- Sheridan, S. C., Allen, M. J., Lee, C. C., and Kalkstein, L. S., 2012, Future heat vulnerability in California, Part II: Projecting future heat-related mortality, *Climatic Change*, 115(2), 311-326.
- Sheridan, S. C. and Kalkstein, L. S., 2004, Progress in heat watch-warning system technology, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(12), 1931-1941.
- Statistics Korea, 2010, *Population projections for Korea: 2010-2060*, Statistics Korea.
- Steadman, R. G., 1979, The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science, *Journal of Applied Meteorology*, 18(7), 861-873.
- Tan, J., Kalkstein, L. S., Huang, J., Lin, S., Yin, H., and Shao, D., 2004, An operational heat/health warning system in Shanghai, *International Journal of Biometeorology*, 48(3), 157-162.

책임편집: 허인혜

영문교열: 조창현