H-지수를 이용한 폭염 정량화 및 미래 폭염 전망

Quantification of Heat Wave and Projection of Future Heat Wave Using H-Index

서지유* · 원정은** · 최정현*** · 이옥정**** · 김상단*****

Seo, Jiyu* · Won, Jeongeun** · Choi, Jeonghyeon*** · Lee, Okjeong**** · Kim, Sangdan*****

Abstract

As global surface air temperature (SAT) rises, the highest daily SAT is also rising. The rise in the highest daily SAT leads to an increase in heat waves, which in turn increases the physical and ecological damage being caused by the heat waves. In Korea, the highest daily SAT is used to determine whether a heat wave has occurred or not. In this study, H-index using the highest daily SAT was calculated to quantify the heat waves at 60 Automated Surface Observing System (ASOS) sites operated by the Korea Meteorological Agency (KMA). The changes in H-index were also investigated using projected future SAT data gathered from KMA's national standard climate change scenarios. As a result, it was possible to investigate the temporal and spatial changes in heat wave behavior by quantifying the heat wave using the H-index. The H-index is expected to increase faster in future than its current upward trend.

Key words : Climate Change, Heat Wave, H-index, Surface Air Temperature

요 지

전 세계적으로 기온이 상승하면서 일 최고기온 또한 상승하고 있다. 그로 인한 폭염 현상이 증가하고 폭염으로 인한 신체적, 생태계적 피해도 증가하고 있다. 우리나라의 경우 일 최고기온을 통해 폭염을 판단한다. 본 연구에서는 일 최대기온을 이용한 H-지수를 산정하여 기상청 ASOS 60개 지점에서의 폭염을 정량화하고자 하였다. 또한 기상청 국가표준 기후변화 시나리오로부터의 미래 기온 정보를 이용하여 미래 H-지수의 변화를 살펴보았다. 연구결과, H-지수를 이용하여 폭염을 정량화하여 폭염 거동의 시간적 공간적 변화를 살펴볼 수 있었으며, 미래 H-지수는 현재의 상승추세보다 더 빠르게 증가할 것으로 전망되었다.

핵심용어 : 기후변화, 폭염, H-지수, 지표면 기온

1. 서 론

폭염(Heat wave)의 기준은 국가별로 다르다. 우리나라 기상청의 폭염 특보 기준은 폭염 주의보와 폭염경보로 나뉜다. 폭염주의보는 일 최대 기온이 33 °C 이상인 날이 이를

이상 지속될 경우 발령되며, 폭염경보는 35 °C 이상인 날이 이를 이상 지속될 경우 발령된다. 기준이 되는 기온 및 지속기간이 국가별로 조금씩 다른 것은 폭염이 단순한 날씨 현상을 넘어서 인체, 생태계, 사회경제 시스템에 미치는 고유한 영향을 함께 고려해야 한다는 점을 의미한다.

*정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정(E-mail: gu426@naver.com)

Member, Master Course Student, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정

Member, Ph.D. Student, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

***정회원, 부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정

Member, Ph.D. Student, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University

****정회원, 부경대학교 i-SEED 지구환경교육연구단 박사후연구원

Member, Postdoctoral Researcher, School of Integrated Science for Sustainable Earth & Environmental Disaster, Pukyong National University

*****교신저자, 정회원, 부경대학교 환경공학과 교수(Tel: +82-51-629-6529, Fax: +82-51-629-6523, E-mail: skim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

2003년 북서부 지중해 분지의 주요지역을 포함하는 6개 지역에서는 폭염에 의하여 해수의 변칙적인 온난화가 발생하였다. 이는 지금까지 기록된 최고 기온보다 1~3 °C 높은 온도였으며 이로 인하여 사망률이 증가하였다(Garrabou et al., 2009). 2003년 프랑스의 경우 폭염에 의해 가뭄이 발생했고 옥수수의 수확률이 다른 년도에 비해 떨어졌다. 또한 가뭄으로 인해 재배지역마다 추가적인 관개를 필요로 하였으며 폭염 직전 3주에 비해 폭염기간 중 사망률이 급증하였고 특히 파리의 경우 6월 25일부터 7월 29일까지의 하루 평균 사망률이 46명에서 322명으로 7배 증가하였다(van der Velde et al., 2010; Dear et al., 2005). 2010년 모스크바의 폭염은 14일 평균 24~31 °C의 기온을 기록하였으며 이 기간 동안 주로 65세 이상의 사람들이 우발적인 원인으로 인해 11,000명 가까이 사망하였다. 사망의 주원인은 폭염으로 인한 심혈관, 호흡기, 비뇨생식기 및 신경계 질환이었고 폭염기간 동안 장기간 고온에 따른 위험이 지속적으로 증가하였다고 보고되었다(Shaposhnikov et al., 2014). 2001~2010년 독일은 폭염으로 인해 허혈성심장질환의 사망률이 15.2%로 크게 증가하였고 연간 폭염사상의 발생빈도가 현재 기후와 비교하여 21세기 말까지 3배 이상 증가된다고 전망되었다(Zacharias et al., 2015). 중국에서는 폭염기간 중 심장질환으로 인한 사망률이 증가한 것으로 보고되었으며(Tian et al., 2013), 미국에서는 폭염기간 동안 북동부의 사망률은 4.39% 증가, 중서부는 3.22% 증가한 것으로 조사되었다. 특히 미국 북동부 지역은 폭염 지속기간과 사망률의 연관성이 매우 컸으며 폭염 발생 시 사망 위험이 열파가 지속된 날마다 평균 2.5%씩 증가하였다(Anderson and Bell, 2011). 우리나라의 경우 1994년 7월 기록적인 폭염으로 부산지역에서 약 109명의 초과사망(폭염기간 동안 8.2%의 초과 사망률 기록)이 나타났다(Lee et al., 2007). 서울의 경우 기상 관측사상 일 최고기온이 38.4 °C로 가장 높았던 1994년 7월 24일의 하루 뒤인 7월 25일에 약 80명 이상의 초과 사망자가 나타나기도 하는 등 폭염으로 인한 인명 피해의 정도가 뚜렷이 나타났다. 우리나라의 폭염 기준을 고려하여 지역별 폭염지속일수가 인명피해 발생에 미치는 영향을 분석하였을 때 대부분의 지역에서 폭염발생일수가 길수록 인명피해가 많이 발생했으며, 폭염지속일수와 인명피해가 양의 상관관계를 나타내고 있음이 나타났다(Park et al., 2016). 또한 폭염기간에 주요도시별로 기온이 1 °C 상승함에 따른 사망자 증가율은 인천 4.8명, 서울 4.7명, 대전 4.3명, 광주 2.8명, 대구 2.4명, 부산 1.5명으로 나타났다(Kim et al., 2009).

많은 연구결과들에 따르면 미래에 우리나라의 기온은 현재의 기온보다 크게 높아질 것으로 보고되고 있으므로(Cho et al., 2011; Sim et al., 2014; Won et al., 2018; Sim et al., 2019; Lee et al., 2020), 폭염으로 인한 피해 또한 증가할 것으로 전망된다(Kim et al., 2019). 이에 다양한 관점에서 폭염을 정량화하고 이를 기반으로 미래의 경향을

예측하여 요구되는 방안을 마련할 필요가 있다. 본 연구에서는 일 최대기온을 이용한 H-지수 개념을 도입하여 우리나라의 폭염 현황을 정량화하고자 하였다. 또한 이를 기반으로 기상청 국가표준 기후변화 시나리오를 반영하여 미래 폭염을 전망해보고자 하였다.

2. 방 법

2.1 자료

본 연구에서는 기상청 Automated Surface Observing System (ASOS) 60개 지점의 1973~2019년 일 최대기온과 일 평균기온이 사용되었다. 일 최대기온은 하루 동안 기온 중 최대의 기온을 말하며 일 평균기온은 하루 동안의 기온 중 최대기온과 최소기온의 평균을 의미한다. Fig. 1에 사용된 지점들의 공간적 위치를 나타내었다.

Fig. 1. Location of Meteorological Sites

본 연구에서 사용된 미래 자료는 영국 기상청 Hadley Centre의 전 지구 기후변화 예측 모델인 HadGEM2-AO로부터 생산된 135 km 공간해상도의 전 지구자료를 영국 Hadley Centre 지역 기후모델인 HadGEM3-RA를 이용하여 역학적으로 다운스케일한 12.5 km 공간해상도의 한반도 지역자료인 기상청 국가표준 시나리오로부터 획득되었다(<https://www.climate.go.kr>). 이 자료는 현재기간 1979~2005년과 미래기간 2006~2100년으로 구성되며, 미래기간은 다시 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 기후변화 시나리오에 따라 구분된다.

기후변화 시나리오는 온실가스 에어로졸, 토지이용 변화 등 인위적인 원인으로 발생한 복사강제력 변화를 전 지구 기후모델에 적용하여 산출된 미래기후 전망정보이다. 기후변화 시나리오는 미래에 기후변화로 인한 영향을 평가하고

피해를 최소화하는데 활용할 수 있는 선제적인 정보로 활용되며, 한반도 지역별 상세 기후변화 전망은 지자체별 기후변화 대응과 적응대책 수립을 위한 필수적인 정보이다. 기후변화 시나리오의 종류에는 SRES, RCP, SSP 등 다양하게 구성될 수 있으며, 기상청 국가표준 기후변화 시나리오는 Representative Concentration Pathways (RCP)를 기준으로 제공된다. RCP의 기본 목적은 시간에 따른 대기 온실가스농도 전망을 제공하는 것으로, 이를 강조하기 위하여 RCP는 “경로(Pathways)”로서 간주된다. 또한, RCP가 유사한 복사강제력과 배출 특성을 가진 여러 다른 시나리오들 중의 하나라는 점에서 대표라는 의미를 가진다. Table 1은 RCP의 네 가지 형태를 보여주고 있다. 이 때, RCP 시나리오 숫자의 의미는 온실가스로 인한 추가적인 지구온난화여지양을 의미한다(Baek et al., 2011).

2.2 미래기후정보의 편의보정

기상청 국가표준 기후변화 시나리오의 미래 기후변화를 전망하는 과정은 일반적으로 1860년의 온실가스 농도를 고정하여 200년 또는 400년 동안의 제어적분을 수행하고, 1860년부터 2005년까지 관측된 자연과 인위적인 강제력에 대한 과거 기후를 모의한 후에, RCP 시나리오에 따라 2100년까지 미래 기후를 모의하는 과정을 거치게 된다. 1986년부터 2005년까지의 기간을 모의한 것이 현재의 대기상태와 같다고 정의하였으며, 이를 현재(Present)자료라고 한다. 미래(Future)자료는 현재 상태에서 CO₂ 농도를 RCP 시나리오에 따라서 변화시켜 2006년부터 2100년까지 모의된 자료이다.

전 지구 기후모델 또는 지역기후모델로부터 생산된 자료는 수많은 편의를 포함하고 있기 때문에 이를 그대로 사용하는 것은 적절하지 않다. 현재자료는 현재기간을 모의한 것이기

때문에 동 기간의 관측 자료와는 차이가 있게 되며, 이러한 편의는 미래 자료에도 그대로 전파된다. 따라서 현재자료와 관측자료 사이의 편의를 보정할 필요가 있으며, 이러한 보정은 미래자료에도 적용될 필요가 있다. 대부분의 기후변화 평가 및 적응을 위한 연구에서는 이들 모델로부터 생산된 자료의 편의를 연구의 목적에 맞게 보정하여 사용하는 것이 일반적이다(Cannon et al., 2015; Lee et al., 2016; Cha et al., 2017; Lee and Kim, 2018; Choi et al., 2019; Kim et al., 2020).

Quantile-Mapping 방법은 관측자료와 모의자료의 누가확률분포를 이용하여 모의자료의 확률분포를 관측자료의 확률분포에 사상시키는 방법이다. 많은 연구들(Park et al., 2012; Thrasher et al., 2012; Moon et al., 2013)에서 Quantile-Mapping 방법을 사용하였다. Quantile-Mapping 방법을 이용한 현재기간 기후모델 모의자료의 편의보정은 Eq. (1)로 나타낼 수 있다.

$$X_p[j] = F_o^{-1}[F_p[\hat{X}_p[j]]] \quad (1)$$

여기서, $\hat{X}_p[j]$ 는 현재기간 기후모델 모의자료 값, $X_p[j]$ 는 현재기간 편의보정 값, F_p 는 현재기간 기후모델 모의자료의 누가확률분포, F_o^{-1} 는 사상의 목표가 되는 관측자료의 누가확률분포의 역함수이다. 미래기간 기후모델 모의자료는 Eq. (2)를 이용하여 편의 보정된다.

$$X_f[j] = F_o^{-1}[F_f[\hat{X}_f[j]]] \quad (2)$$

여기서, $\hat{X}_f[j]$ 는 미래기간 기후모델 모의자료 값이며, $X_f[j]$ 는 미래기간 편의보정 값이다. 이를 도해 적으로 나타내면 Fig. 2와 같다.

Table 1. Type of RCP

Type	Meaning	CO ₂ Concentration
RCP 2.6	Reduction of greenhouse gases immediately from now on	420 ppm
RCP 4.5	Significant realization of greenhouse gas reduction policy	540 ppm
RCP 6.0	Greenhouse gas reduction policy to some extent	670 ppm
RCP 8.5	Greenhouse gas emissions according to current trends	940 ppm

Fig. 2. Quantile-Mapping

그러나 Quantile-Mapping 방법만으로는 기후모델에서 생산된 자료의 편의를 적절하게 보정할 수 없다(Cannon et al., 2015). 또한 Quantile-Mapping 방법은 모델링된 자료의 기록 범위에 대해서만 적용이 가능하다. 즉, 투영되는 미래 정보가 Quantile-Mapping에 적용된 자료의 범위를 벗어날 경우에는 적절한 방법에 따른 외삽이 필요하게 된다. 외삽 방법으로는 Wood et al. (2004)에 의해 제안된 매개변수적 분포 형을 사용하는 방법과 Boe et al. (2007)에 의해 제안된 차이 값 외삽법 등이 있다. 본 연구에서는 Boe et al. (2007)에 의해 제안된 방법을 적용하였으며, 이에 대한 설명은 아래와 같다. 기후모델 현재기간 일 최대기온 중 최댓값이 Δ 만큼 편이 보정되었다면, 기후모델 미래기간 일 최대기온 중 기후모델 현재기간 일 최대기온보다 큰 모의값들은 모두 Δ 만큼 편이보정된다. 또한 기후모델 현재기간 일 최대기온 중 최솟값이 δ 만큼 편이보정되었다면, 기후모델 미래기간 일 최대기온 중 기후모델 현재기간 일 최대기온보다 작은 모의값들은 모두 δ 만큼 편이보정된다. 즉, 기후모델 현재기간 모의자료의 범위의 상한과 하한의 편이보정값을 그 범위를 벗어나는 미래자료들에 가감하는 것이다(Boe et al., 2007).

2.3 H-지수

H-지수는 개별 연구자의 연구업적과 성취, 학계에 미치는 영향력을 자연수로 표현한 것으로, 어떤 연구자의 H-지수가 x 라 함은 이 연구자의 논문들 중 x 편이 x 회 이상 인용되었다는 것을 의미한다(Hirsch, 2005). 즉, 어떤 연구자의 논문을 인용 빈도가 높은 순부터 나열하였을 때 논문의 인용빈도가 논문의 순위보다 크거나 같은 마지막 논문의 순위가 그 연구자의 H-지수가 된다(Lee, 2006). H-지수는 과학자의 연구의 질과 양을 모두 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 그것을 비교적 얻기 쉬운 자료만으로도 분석할 수 있으며, 매우 간단한 계산만을 요구하는 장점이 있다(Cho and Song, 2011). 또한 H-지수는 인용빈도가 높은 소수 논문에 좌우될 여지를 없애고 연구 생산성과 발표논문의 중요도를 함께 반영하는 척도라고 평가된다(Lehmann et al., 2006).

Cronin and Meho (2006)에서는 H-지수를 이용하여 영향력 있는 과학자의 순위를 지정했고, Murray et al. (2016)에서는 연어 양식업을 위한 질병 우선순위를 평가하기 위해 H-지수를 사용했다. 그리고 Jang (2014)에서는 10주간의 타이치운동이 말초 신경 병증 환자의 신체 기능에 부작용 영향을 미치는 것을 확인하기 위해 H-지수를 사용했으며 Jang et al. (2014)에서는 에너지안보의 문제를 지수화 방식으로 분석하기 위해서 H-지수를 사용했다.

Treacy et al. (2019)은 이를 이용하여 미국 도시의 일 최대 화씨온도가 $H(^{\circ}\text{F})$ 이상인 연중일수 H 로 정의된 폭염지수인 H-지수를 제안하였다. 본 연구에서도 이를 이용하여 어떤 해에 어떤 지점의 H-지수 값이 H 이라고 함은 어떤

해에 일 최대기온이 $H^{\circ}\text{C}$ 이상인 날이 H 일 이상이라고 정의하였다. 즉, 어떤 해에 어떤 지점의 H-지수가 30이라는 것은 그 해에 일 최대기온이 30°C 이상인 날이 30일 이상임을 의미한다.

2.4 Mann-Kendall 검정

Mann-Kendall 검정은 시계열 자료의 경향성 여부를 분석하기 위한 비모수적인 통계기법으로 대상 변수가 증가 또는 감소 경향이 있는지를 분석하는데 유용하게 사용된다. 본 연구에서는 유의수준 α 를 0.05로 설정하고 Mann-Kendall 검정을 이용하여 H-지수의 경향성을 평가하였다. 자료들 사이의 차의 합인 S 는 Eqs. (3), (4)와 같이 정의된다.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{sgn}(X_j - X_k) &= 1 & \text{if } (X_j - X_k) > 0 \\ &= 0 & \text{if } (X_j - X_k) = 0 \\ &= -1 & \text{if } (X_j - X_k) < 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, n 은 자료의 개수이며 X 는 일 최대기온 시계열을 나타낸다. S 의 값이 양이면 증가추세, 음이면 감소추세를 의미한다.

S 에 대한 분산 $\text{Var}(S)$ 는 Eq. (5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \text{Var}(S) &= \frac{1}{18}n(n-1)(2n+5) \\ &\quad - \frac{1}{18} \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, g 는 자료에서 같은 값을 가지는 그룹의 수, t_p 는 각 그룹에 해당하는 자료의 수이다. 동일한 관측치가 많을 경우 분산이 감소할 수 있으므로 동점그룹을 고려해준다.

Mann-Kendall 검정통계량 Z 는 S 와 $\text{Var}(S)$ 를 이용하여 Eq. (6)과 같이 산정된다.

$$\begin{aligned} Z &= \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ &= 0 & \text{if } S = 0 \\ &= \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

만약 $Z > Z_{1-\alpha}$ 이면 유의수준 α 에서 증가 경향성이 있음을 수용하게 된다. 여기서 $Z_{1-\alpha}$ 는 표준정규분포의 $1-\alpha$ 분위수(quantile)이다. 만약 $Z < -Z_{1-\alpha}$ 이면 감소 경향성이 있음을 수용하게 된다.

또한 경향성 검증은 Eq. (7)과 같은 p -값으로도 판별할 수 있다.

$$p = 2(1 - \Phi(|Z|)) \quad (7)$$

여기서 Φ 는 누가표준정규분포함수이다. $p \geq \alpha$ 일 경우 유의수준 0.05에 대해 경향성이 없다고 판단하며, $p < \alpha$ 일 경우에는 유의수준 0.05에 대해 경향성이 있다고 판단한다 (Hamed, 2008; Yun et al., 2015; Jung et al., 2016; Kim et al., 2019).

3. 결 과

3.1 과거 자료 분석

ASOS 60개 지점의 1973~2019년의 일 최대기온을 이용하여 지점별 연도별 H-지수를 구한 뒤, 이를 지점별로 평균하여 지점별 평균 H-지수를 산정하였다. Fig. 3은 지점별 평균 H-지수를 높은 순서대로 도시한 그림이다.

Fig. 3. Average H-index of Sites

지점별 평균 H-지수를 비교해본 결과, 대구, 밀양, 의성, 합천, 전주, 영천, 구미 지점 순으로 H-지수가 높았다. 대구 지점의 평균 H-지수는 31.8이었으며, 구미 지점은 31.1이었다. 전주 지점을 제외하면 영남지역, 그 중에서는 경북지역에 위치한 지점들의 H-지수가 높음을 살펴볼 수 있었다. 반대로 대관령, 울릉도, 속초, 울진, 여수, 인천, 강화, 통영, 완도, 부산 지점 순으로 H-지수가 낮았으며, 분석된 지점 중에서 가장 고도가 높은 대관령 지점을 제외하면 모두 해안지역에 위치한 지점들의 H-지수가 낮음을 살펴볼 수 있었다. 가장 낮은 H-지수를 보인 대관령 지점의 평균 H-지수는 24.9이었으며, 대관령 지점에서 가장 높게 관측된 H-지수는 27이었다. Fig. 4는 H-지수가 가장 높은 대구 지점과 H-지수가 가장 낮은 대관령 지점의 H-지수의 시계열을 비교한 것으로, 평균 H-지수는 6.9 만큼 차이가 나며 대구의 가장 낮은 H-지수가 대관령의 가장 높은 H-지수보다도 높음을 살펴볼 수 있었다.

Fig. 4. H-index of Daegu and Daegwallyeong Sites

Fig. 5는 우리나라의 7대 도시인 부산, 대전, 대구, 광주, 인천, 서울, 울산 지점의 H-지수 시계열을 비교한 그림이다. 경북 내륙에 위치한 대구 지점의 H-지수가 가장 높고 해안에 위치한 인천 지점의 H-지수가 가장 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 7개 지점 모두 연도별 H-지수가 증가하는 추세를 살펴볼 수 있으며, 증가율은 1.4%, 1.7%, 1.6%, 2.9%, 2.7%, 3.2%, 1.7% 순으로 나타난다. 이 중 광주, 인천, 서울 지점의 H-지수 증가율이 상대적으로 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

H-지수의 경향성을 살펴보기 위하여 Mann-Kendall 검정을 수행하였다. Table 2는 Mann-Kendall 검정을 통해 획득된 지점별 p-값을 보여주고 있다. 유의수준 0.05에서 증가 경향성이 존재하는 지점은 수원, 합천, 완도, 밀양, 속초, 춘천, 원주, 서울, 임실, 제주, 구미, 의성, 거제, 군산, 광주, 홍천, 부안, 영덕, 서귀포, 남해, 전주, 진주, 영천, 거창, 인천, 금산으로 26개 지점이었다. 그 밖에 울진, 대관령, 인제,

Fig. 5. H-index Time Series at 7 Major Cities in Korea

Table 2. Trend of H-index through Mann-Kendall Test

Site	P-value	Site	P-value	Site	P-value	Site	P-value
Boeun	0.2131	Geochang	0.0486	Jeju	0.0069	Seoul	0.0044
Boryeong	0.3294	Geoje	0.0083	Jeongeup	0.1124	Sokcho	0.0004
Buan	0.0184	Goheung	0.2329	Jeonju	0.0466	Suwon	0.0000
Busan	0.3358	Gumi	0.0080	Jinju	0.0469	Tongyeong	0.1415
Buyeo	0.09	Gunsan	0.0097	Kumsan	0.05	Uiseong	0.0080
Cheonan	0.0781	Gwangju	0.0153	Miryang	0.0002	Uljin	0.0550
Cheongju	0.0837	Haenam	0.3584	Mokpo	0.9461	Ulleung	0.1656
Chuncheon	0.0014	Hapcheon	0.0001	Mungyeong	0.3074	Ulsan	0.2038
Chungju	0.1381	Hongcheon	0.0154	Namhea	0.0412	Wando	0.0002
Chupungnyeong	0.2738	Icheon	0.0732	Namwon	0.7508	Wonju	0.0029
Daegu	0.0986	Imsil	0.0053	Pohang	0.3537	Yangpyeong	0.2988
Daegwanyeong	0.0571	Incheon	0.0490	Sancheong	0.7726	Yeongcheon	0.0486
Daejeon	0.3089	Inje	0.0684	Seogwipo	0.0368	Yeongdeok	0.0201
Gangneung	0.0808	Jangheung	0.7661	Seongsan	0.2914	Yeongju	0.7398
Gangwha	0.3361	Jecheon	0.1123	Seosan	0.9376	Yeosu	0.6654

이천, 천안, 강릉, 청주, 부여, 대구 9개의 지점은 유의수준 0.1에서 증가 경향성이 존재하였으며, 5개 지점은 유의수준 0.2에서 증가 경향성이 있었다. 즉, 60개 지점 중 2/3인 40개 지점에서 신뢰수준 80% 이상의 수준에서 증가 경향성을 보여주고 있었으며, 감소 경향성을 나타내는 지점은 존재하지 않았다.

Fig. 3과 Table 2를 비교해보면 높은 H-지수를 가진 10개 지점들 중에서 남원과 정읍 지점을 제외한 모든 지점들이 유의수준 0.1에서 증가 경향성이 존재하였다. 반면 낮은 H-지수를 가진 10개 지점들 중에서는 완도, 인천, 속초, 울진, 대관령 지점만이 유의수준 0.1에서 증가 경향성이 존재하였다. 또한 유의수준 0.2에서도 증가 경향성이 존재하지 않는 지점들은 주로 평균 H-지수가 작은 지점들로 구성되어 있음을 발견할 수 있다.

과거와 최근 H-지수의 변화 정도를 보다 명확하게 비교하기 위하여 1973-1982년의 평균 H-지수와 2010-2019년의 평균 H-지수 사이의 변화율을 산정하여 Table 3에 나타내었

다. 고흥과 문경 지점을 제외한 모든 지점에서 최근 10년 평균 H-지수가 과거 10년 평균 H-지수보다 높았다. 변화율이 높은 지점은 거제 6.6%, 수원 6.5%, 속초 6.3%, 완도 5.9%, 밀양 5.9%, 합천 5.7%, 서울 4.7% 순이었다.

Fig. 6은 Table 3의 H-지수 변화율과 Table 2의 Mann-Kendall test를 통한 경향성 분석을 비교하여 도시하였다. 경향성 분석에서 유의수준을 0.1로 하여 증가경향성이 존재하는 지점은 빨간색으로, 증가경향성이 존재하지 않은 지점은 파란색으로 표시하였다. 변화율은 원의 크기로 표현하였다. 대체로 변화율이 높은 지점은 경향성도 높게 나타났으며, 변화율이 낮은 지점은 경향성도 낮게 나타났다. 특히 변화율이 4.5% 이상 되는 지점들은 모두 유의수준 0.05에서 경향성이 존재하였으며 3.5% 이상 4.5% 미만인 지점들의 경우 정읍과 부산 지점을 제외한 모든 지점에서 유의수준 0.1에서 경향성이 존재하였다. 반면 변화율 0% 이상 2.5% 미만의 지점들의 경우에는 대관령, 강릉, 진주 지역을 제외한 모든 지점에서 유의수준 0.2에서도 경향성이 존재하지 않았으며,

Table 3. Change Rate of H-index between 1973-1982 and 2010-2019

Site	Rate (%)	Site	Rate (%)	Site	Rate (%)	Site	Rate (%)
Boeun	3.02	Geochang	3.02	Jecheon	3.05	Seoul	4.73
Boryeong	2.42	Geoje	6.60	Jeju	4.47	Sokcho	6.27
Buan	3.68	Geumsan	4.47	Jeongeup	3.95	Suwon	6.51
Busan	3.50	Geumsan	3.67	Jeonju	3.26	Tongyeong	2.09
Buyeo	2.98	Goheung	-0.33	Jinju	1.98	Uiseong	4.53
Cheonan	3.68	Gumi	4.26	Miryang	5.90	Uljin	2.91
Cheongju	3.62	Gwangju	3.96	Mokpo	0.68	Ulleung	3.40
Chuncheon	4.38	Haenam	1.33	Mungyeong	-0.32	Ulsan	2.32
Chungju	3.31	Hapcheon	5.56	Namheha	4.71	Wando	5.94
Chupungnyeong	1.35	Hongcheon	4.25	Namwon	0.00	Wonju	4.01
Daegu	2.53	Icheon	4.01	Pohang	1.65	Yangpyeong	2.64
Daegwanyeong	2.39	Imsil	4.07	Sancheong	1.3	Yeongcheon	3.25
Daejeon	2.98	Incheon	3.23	Seogwipo	2.77	Yeongdeok	4.04
Gangneung	2.03	Inje	2.72	Seongsan	2.77	Yeongju	1.32
Gangwha	1.39	Jangheung	0.66	Seosan	1.02	Yeosu	0.70

변화율이 0% 미만의 지점들도 유의수준 0.2에서 경향성이 존재하지 않았다.

Fig. 6. Change Rate of H-index between 1973-1982 and 2010-2019 with Mann-Kendall Test.

H-지수가 폭염을 정량화하는데 적합한지 확인하기 위해서 H-지수와 여름철(6~8월) 평균기온, 여름철 최대기온 사이의 연관성을 살펴보았다. 여름철 평균기온은 6~8월 동안의 일평균기온의 산술평균을 사용하였으며, 여름철 최대기온은 6~8월 동안의 일 최대기온의 산술평균을 사용하였다. Table 4는 H-지수와 여름철 평균기온(Average) 그리고 H-지수와 여름철 최대기온(Highest)이 각각 얼마나 비슷한 양상을 보이는지 살펴보기 위한 교차상관계수를 나타내고 있다.

천안 지점을 제외하면 H-지수와 여름철 평균기온의 교차상관계수는 모든 지점에서 0.77 이상이었으며, H-지수와 여름철 최대기온의 교차상관계수는 가장 낮은 강화 지점도 0.79 이상이였다. 우리나라에서 폭염은 여름철에 발생되므로 여름철 일 최대기온의 상승은 폭염 발생률을 높이게 된다. H-지수와 여름철 최대기온의 양상이 비슷하므로 H-지수가 상승함에 따라 폭염발생률 또한 높아진다고 볼 수 있다. 또한 H-지수는 일 최대기온으로 인해 산정되지만 Table 4를 통해 여름철 평균기온과도 높은 관련성이 있음을 알 수 있다. 여름철 평균기온이 상승함에 따라 H-지수의 값 또한 상승한다고 볼 수 있을 것이다. 따라서 여름철 평균기온이 상승함에 따라 폭염의 발생률도 동반하여 높아질 가능성이 높다.

연도별 H-지수를 비교하기 위해 지점별 H-지수를 지도에 도시한 후 공간 평균하여 각 년도의 해당하는 한국의 평균 H-지수를 산정하였다. Fig. 7에 일부 특정 년도에 기록된 H-지수를 나타내었다. Fig. 7(a)는 2018년으로 전국 평균 H-지수가 가장 높았던 해이다. 울릉도와 대관령 지점을 제외한 모든 지점의 H-지수가 30 이상이였으며, 특히 의성 지점의 H-지수는 35까지 기록되었다. Fig. 7(b)는 1993년으로 전국 평균 H-지수가 가장 낮았던 해이다. 당시 대관령 지점의 H-지수는 22를 기록했으며 모든 지점의 H-지수가 30을 넘지 못하였다. Fig. 7(c)는 2007년으로 24번째로 H-지수가 높은 해이다. 참고로 분석된 자료의 연한은 47년이므로, 2007년은 가장 중간 값에 해당되는 해이다. Fig. 7(d)는 1988년으로 H-지수가 가장 높은 지점과 낮은 지점의 차가 가장 큰 해이다. 산청과 대구의 H-지수는 32이고 대관령의 H-지수는 23으로 차이가 9로 나타났다. Fig. 7에서 나타나듯이 내륙지역은

Table 4. Cross-Correlation between H-index and Average Surface Air Temperature in Summer and Maximum Surface Air Temperature in Summer

Site	Average	Highest	Site	Average	Highest
Boeun	0.8589	0.9324	Jecheon	0.8133	0.8996
Boryeong	0.8496	0.8917	Jeju	0.9093	0.9285
Buan	0.8923	0.9389	Jeongeup	0.9095	0.9272
Busan	0.8550	0.8814	Jeonju	0.9097	0.9309
Buyeo	0.8615	0.8894	Jinju	0.8190	0.8574
Cheonan	0.5926	0.9126	Miryang	0.8579	0.9093
Cheongju	0.8276	0.8878	Mokpo	0.8307	0.8939
Chuncheon	0.8547	0.8981	Mungyeong	0.9215	0.9387
Chungju	0.8527	0.9215	Namhea	0.8835	0.8983
Chupungnyeong	0.8236	0.9013	Namwon	0.8051	0.8801
Daegu	0.8756	0.9231	Pohang	0.8556	0.9168
Daegwanyeong	0.8814	0.9048	Sancheong	0.8043	0.8741
Daejeon	0.8648	0.9212	Seogwipo	0.8434	0.8617
Gangneung	0.8381	0.8609	Seongsan	0.8648	0.8809
Gangwha	0.7935	0.7932	Seosan	0.8157	0.8893
Geochang	0.809	0.9105	Seoul	0.8809	0.9198
Geoje	0.9117	0.9428	Sokcho	0.8382	0.8496
Geumsan	0.841	0.9084	Suwon	0.9515	0.9505
Goheung	0.8668	0.9293	Tongyeong	0.8898	0.9013
Gumi	0.8709	0.9055	Uiseong	0.8184	0.9356
Gunsan	0.9245	0.9213	Uljin	0.8523	0.8834
Gwangju	0.9264	0.9118	Ulleung	0.8179	0.8678
Haenam	0.8903	0.9046	Ulsan	0.9216	0.9078
Hapcheon	0.8004	0.9234	Wando	0.8528	0.9332
Hongcheon	0.8638	0.9211	Wonju	0.8251	0.8756
Icheon	0.8807	0.9207	Yangpyeong	0.7750	0.8915
Imsil	0.8942	0.8952	Yeongcheon	0.8915	0.9016
Incheon	0.7849	0.9105	Yeongdeok	0.8932	0.9127
Inje	0.8193	0.889	Yeongju	0.7942	0.8745
Jangheung	0.7543	0.9039	Yeosu	0.8350	0.9041

대부분 높은 H-지수를 보이며 특히 경북지역은 매년 상대적으로 높은 H-지수를 보인다. 또한 동해안과 남해안 지역이 낮은 H-지수를 보이는 경향이 있다.

3.2 미래 자료 분석

폭염 전망을 위한 기후변화 시나리오 자료를 사용하기 위하여 관측자료에 대한 기후모델 모의자료의 편의보정을 시행하였다. 현재기간 모의자료가 잘 편의보정되었는지 확인하기 위해서 관측자료와 현재기간 모의자료의 평균과 표준편차를 비교하였다. 대부분의 편의 보정된 현재기간 모의자료들은 관측자료의 평균과 표준편차를 잘 재현하고 있는 것으로 파악되었다. 관측자료와 편의보정된 현재기간 모의자료의 평균의 차이는 대략 0.25 °C 정도이며 모든 경우

에 대하여(60개 지점 × 12개월) 가장 큰 차이는 0.44 °C로 나타났다. 표준편차 역시 평균적으로 0.23 °C 정도의 차이를 보였으며, 가장 많은 차이가 나는 경우에는 0.63 °C 정도의 차이를 보였다. 평균과 표준편차를 비교해 볼 때, 현재기간 모의자료의 편의보정은 잘 시행되었다고 판단되었다. Fig. 8은 인천, 울릉도, 성산, 거제 지점의 8월 관측자료와 편의보정된 현재기간 모의자료, 편의보정된 미래기간 모의자료의 Box-plot을 보여주고 있다. 현재기간 모의자료의 자료 범위가 관측자료의 범위와 비슷하게 나타나고 있음을 살펴볼 수 있다. 또한 RCP 시나리오에 따라 미래 일 최대기온의 범위가 변화하고 있음을 발견할 수 있다. 특히 RCP 2.6과 RCP 8.5를 비교해 보았을 때 RCP 8.5에서의 일 최대기온의 범위가 더 넓고 평균값도 더 높은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7. Comparison of H-index in 1988, 1993, 2007 and 2018

Fig. 8. Box-plot of Observed and Bias-corrected Climate Model Data

모의자료들의 편의보정이 제대로 수행되었으므로 모의자료들의 H-지수를 산정하여 관측자료와 현재기간 모의자료 그리고 미래기간 모의자료의 H-지수를 비교할 수 있다. Fig. 9는 관측자료, 현재기간 모의자료, 미래기간 모의자료의 ASOS 60개 지점 H-지수를 공간 평균한 시계열을 비교한 그림이다. Fig. 9에 나타난 미래기간 모의자료의 기울기로 미래 H-지수의 증가정도를 확인할 수 있으며 특히 미래 RCP 2.6은 현재기간과 비슷한 양상의 H-index를 보이는 반면, 미래 RCP 8.5는 현재기간과 비교해 봤을 때 H-지수가 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다.

공간평균한 미래기간 모의자료와 관측자료의 연도별 평균 H-지수를 비교해 보았을 때 관측자료의 연도별 평균 H-지수는 2018년이 32.2로 가장 높았다. RCP 2.6에서는 2059년의 평균 H-지수가 33.7로 가장 높았으며 2044년, 2051년, 2055년, 2059년, 2068년, 2083년, 2098년 만이 현재자료 2018년의 평균 H-지수보다 높음을 알 수 있다. RCP 4.5에서는 2094년에 평균 H-지수가 34까지 상승하였고 분석된 미래 95년 중에서 28개년이 현재자료의 2018년의 평균 H-지수보다 높음을 보였다. RCP 6.0에서는 2080년의 평균 H-지수가 34.6으로 가장 높았고 RCP 8.5에서는 2100년에 평균 H-지수 36.5로 가장 높게 나타났다.

미래 모의자료들을 통해 산정한 H-지수로 H-지수의 미래 동향을 살펴 볼 수 있다. Fig. 10은 미래기간 모의자료(RCP 2.6, 4.5, 6.0 8.5)를 지점별 H-지수가 높은 순으로 나열한 것이다. RCP 2.6의 경우에는 대구의 평균 H-지수가 32.8로 가장 높았으며 대구, 목포, 거제, 전주, 보령, 정읍 순으로 높은 H-지수를 나타냈다. 관측 H-지수와 비교했을 때 충청남도인 보령의 H-지수가 높은 값을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 반면 낮은 H-지수를 보이는 지점은 대관령, 속초, 울진, 완도, 강화, 울릉도 순으로 관측자료와 유사한 양상을 보이고 있음을 볼 수 있다. RCP 4.5의 경우에는 목포, 거제, 보령, 대구, 전주, 남원 지점 순으로 H-지수가 높았으며 관측 H-지수와 비교했을 때 충청남도인 보령의 H-지수와 전라북도의 남원 H-지수가 높은 값을 나타냈다. 반면에 대관령, 속초, 울진, 부산, 완도, 울릉 지점 순으로 H-지수가

낮게 나타나 관측자료와 비슷한 양상을 보였다. RCP 6.0의 경우 또한, 대구, 목포, 보령, 남원, 거제, 정읍 지점 순으로 H-지수가 높게 나타났으며 관측 H-지수와 비교했을 때 RCP 4.5와 마찬가지로 충청남도인 보령의 H-지수와 전라북도의 남원 H-지수가 높은 값을 나타냈다. 반면에 대관령, 속초, 울진, 부산, 울릉, 완도 순으로 H-지수가 낮게 나타나 관측자료와 비슷한 양상을 보였다. RCP 8.5의 경우에는 거제, 목포, 보령, 대구, 통영, 남원, 성산 순으로 H-지수가 높았으며 관측자료와 달리 경상북도 지역보다는 경상남도과 전라도 지역의 H-지수가 높음을 알 수 있다. 하지만 H-지수가 낮은 지점은 대관령, 속초, 울진, 강화, 부산, 완도 순으로 과거자료와 유사한 양상을 보이고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 미래기간 모의자료들의 지점별 H-지수를 비교해봤을 때 RCP 4개 시나리오 자료에서 공통적으로 대구, 목포, 거제, 전주, 보령, 정읍, 남원, 의성 지점의 H-지수가 높았으며 대관령, 속초, 울진, 완도, 강화, 울릉도, 부산, 인제, 서귀포 지점의 H-지수가 낮았음을 알 수 있다. 전반적으로 폭염이 우려되는 지역이 경북내륙에서 전라도와 경상남도로 확대되어가는 양상을 확인할 수 있다.

미래기간 모의자료들을 통해 산정한 H-지수로 미래의 H-지수의 변화율에 대해서도 분석이 가능하다. H-지수의 지점별 증가율을 비교하기 위해서 30년 단위로 평균 H-지수를 나타내어 관측자료의 최근 30년(1990-2019년) 평균 H-지수에 대한 미래기간 모의자료(2040-2069년과 2070-2099년) 평균 H-지수의 증가율을 구하였다. Fig. 11은 미래기간 모의자료의 관측자료에 대한 H-지수 증가율을 지점별로 나타낸 그림이다. H-지수 증가율은 거제, 목포, 보령, 성산, 여수, 울릉, 인천, 통영 지점이 대체적으로 높았다. 특히 인천, 목포, 여수, 성산, 보령, 거제 지점은 2040-2069년도에 RCP 2.6의 상태임에도 H-지수 증가율이 9% 이상으로 높게 나타났다. 또한 2070-2099년도에 RCP 8.5의 상태일때 H-지수 증가율이 20%를 넘어선다. 반대로 낮은 변화율을 보이는 지점은 밀양과 함천이다. 2070-2099년도에 RCP 2.6 상태에서는 5% 정도의 증가율을 가지며 RCP 8.5의 상태에서는 9.5%의 증가율을 나타내고 있다.

Fig. 9. Future H-index Time Series (Obs / Present / Future (RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5))

(a) RCP 2.6

(b) RCP 4.5

(c) RCP 6.0

(d) RCP 8.5

Fig. 10. Future Average H-index at 60 Sites

(a) RCP 2.6 (Increase Rate 2040-2069)

(b) RCP 4.5 (Increase Rate 2040-2069)

(c) RCP 6.0 (Increase Rate 2040-2069)

(d) RCP 8.5 (Increase Rate 2040-2069)

(e) RCP 2.6 (Increase Rate 2070-2099)

(f) RCP 4.5 (Increase Rate 2070-2099)

Fig. 11. H-index Increase Rate in 2040-2069 and 2070-2099

(g) RCP 6.0 (Increase Rate 2070-2099)

(h) RCP 8.5 (Increase Rate 2070-2099)

Fig. 11. (Continued)

RCP별로 증가율을 비교해봤을 때 RCP 2.6은 2040-2069와 2070-2099의 H-지수 증가율의 차이가 거의 없었다. 참고로 RCP 2.6의 2070-2099년에 해당하는 H-지수 증가율은 모든 지점이 10%를 넘지 않았다. 하지만 RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5는 2040-2069에 해당하는 H-지수 증가율과 2070-2099에 해당하는 H-지수 증가율이 많은 차이를 나타냈고 특히 RCP 8.5의 2070-2099에 해당하는 H-지수 증가율은 합천, 밀양 지점을 제외한 대부분의 지점이 10%보다 크게 나타났다. RCP 시나리오에 관계없이, 미래 H-지수는 지금까지의 상승추세보다 더 증폭해서 증가될 가능성이 높을 것으로 전망할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 ASOS 60개 지점의 47년(1973-2019)의 일 최대기온 자료를 이용하여 지점별 연도별 H-지수를 산정하고 현재 폭염양상의 분석을 진행한 후 ASOS 60개 지점의 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 미래 H-지수를 산정하여 폭염의 미래 양상을 분석하는 연구를 진행하였다.

H-지수의 경향성 분석을 위해 각 지점별 H-지수 시계열을 Mann-Kendall 검정을 통한 경향성 분석을 진행하였다. 35개의 지점이 유의수준 0.1에서 증가경향성을 나타냈으며 관측자료의 H-지수를 10년씩 평균하여 구한 증가율을 이와 비교한 결과 증가율이 높은 지점은 증가 경향성 정도가 크고 반대로 증가율이 낮은 지점은 증가경향성 정도가 작음을 알 수 있었다. 또한 H-지수가 폭염관측에 적절한지 판단하기 위해 여름철의 평균기온과 최고기온을 연 평균하여 H-지수와의 교차상관계수를 구하고 이를 통해 H-지수와 평균기온 그리고 H-지수와 최고기온과의 연관성을 알 수 있었다. 대부분의 교차상관계수가 0.8 이상이므로 H-지수와 폭염의 관계성을 알 수 있다.

H-지수가 폭염의 양상을 설명하기에 적합함을 근거로 기

후변화 시나리오의 미래기간 모의자료 또한 H-지수를 적용하여 미래 폭염 양상을 예측할 수 있었다. 관측자료와 미래기간 모의자료의 지점별 평균 H-지수를 비교해봤을 때 대구, 의성, 전주 지점은 과거와 마찬가지로 미래에도 높은 H-지수를 보일 것으로 예상되며, 목포, 거제, 전주, 보령, 정읍, 남원 지점은 과거에는 H-지수가 높은 지점이 아니었지만 미래에는 H-지수가 높은 지점에 속할 것으로 예상된다. 미래기간 모의자료의 30년 평균 H-지수(2040-2069, 2070-2099)를 관측자료의 30년 평균 H-지수(1990-2019)에 대한 증가율로 비교해 보았을 때 목포, 거제, 보령 지점이 가장 높은 H-지수 증가율을 보이기 때문에 미래 폭염에 더 많은 주의를 기울여야 할 것으로 예상된다.

RCP자료는 온실가스 정책 시행에 대한 기후변화 시나리오자료이기 때문에 온실가스와 폭염의 영향성도 알 수 있다. RCP 2.6의 지점별 평균 H-지수와 RCP 8.5의 지점별 평균 H-지수를 관측자료 지점별 평균 H-지수와 비교해봤을 때 RCP 2.6의 경우에는 평균적으로 9%정도의 H-지수 증가율을 보인 반면 RCP 8.5의 경우에는 평균 28.8%의 H-지수 증가율을 보였다. 또한 공간 평균하여 나타낸 연별 H-지수로 비교하면 RCP 2.6의 최고 H-지수는 33.7이었고 RCP 8.5의 최고 H-지수는 36.5였다. 차이는 2.7이었다. 만약 온실가스에 대한 제재가 마련되지 않는다면 RCP 8.5의 시나리오에 따라 2053년의 한국의 평균 H-지수는 34를 넘어설 것이며 2087년에는 평균 H-지수가 35를 넘어설 거 될 것이라는 것을 알 수 있다.

연구에서 폭염의 미래예측을 위해 사용한 기후변화 시나리오는 관측자료를 바탕으로 작성된 시나리오가 아니므로 관측자료와 시나리오 자료간의 오차가 있다. 편의 보정을 이용하여 오차를 줄여 연구를 진행했지만 한계가 있었다. 만약 오차를 더 줄일 수 있다면 더 정확한 미래의 폭염 정보를 예측할 수 있을 것이고 폭염에 대한 대책법을 마련하는 데 보다 도움이 될 수 있을 것이라고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Anderson, G.B., and Bell, M.L. (2011). Heat waves in the United States: Mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. *Environmental Health Perspectives*, Vol. 119, No. 2, pp. 210-218.
- Baek, H.J., Cho, C., Kwon, W.T., Kim, S.K., Cho, J.Y., and Kim, Y. (2011). Development Strategy for New Climate Change Scenarios based on RCP. *Climate Change Research*, Vol. 2, No. 1, pp. 55-68.
- Boe, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E. (2007). Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, Royal Meteorological Society, Vol. 27, No. 12, pp. 1643-1655.
- 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.
- Cha, W., Lee, O., Kim, S., and Park, Y. (2017). Analysis of indicators of hydrological alteration on the Geumho River basin under AR5 RCP scenarios. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 4, pp. 317-326.
- Cho, E.S., and Song, J.D. (2011). The influence of Korean international marketing journals: Focused on the problems of Kor-Factor and impact factor. *Journal of Marketing Management Research*, Vol. 16, No. 2, pp. 53-82.
- Cho, S.J., Jun, H.D., Park, M.J., and Kim, S.D. (2011). Record breaking occurrence frequency of air temperature and precipitation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 5, pp. 345-352.
- Choi, J., Lee, O., Jang, J., Jang, S., and Kim, S. (2019). Future intensity-depth-frequency curves estimation in Korea under representative concentration pathway scenarios of Fifth assessment report using scale-invariance method. *International Journal of Climatology*, Vol. 39, No. 2, pp. 887-900.
- Cronin, B., and Meho, L. (2006). Using the *h*-index to rank influential information scientists. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, Vol. 57, No. 9, pp. 1275-1278.
- Dear, K., Ranmuthugala, G., Kjellström, T., Skinner, C., and Hanigan, I. (2005). Effects of temperature and ozone on daily mortality during the August 2003 heat wave in France. *Archives of Environmental & Occupational Health*, Vol. 60, No. 4, pp. 205-212.
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., et al. (2009). Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology*, Vol. 15, No. 5, pp. 1090-1103.
- Hamed, K.H. (2008). Trend detection in hydrologic data: The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *Journal of Hydrology*, Vol. 349, No. 3-4, pp. 350-363.
- Hirsch, J.E. (2005). An index to quantify an individual's scientific research output. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 102, No. 46, pp. 16569-16572.
- Jang, D. (2014). The effects of Tai Chi exercise during 10 weeks on physical function ability of patients with peripheral neuropathy. *The Korean Journal of Sports Science*, Vol. 23, No. 4, pp. 859-870.
- Jang, Y.C., Bang, K.Y., Lee, K.Y., and Kim, K.N. (2014). Analysis of energy security by the diversity indices: A case study of South Korea. *Journal of Energy Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 93-101.
- Jung, K.Y., Lee, I.J., Lee, K.L., Cheon, S.U., Hong, J.Y., and Ahn, J.M. (2016). Long-term trend analysis and exploratory data analysis of Geumho River based on seasonal Mann-Kendall test. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 25, No. 2, pp. 217-229.
- Kim, J., Lee, D.G., and Kysely, J. (2009). Characteristics of heat acclimatization for major Korean cities. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 19, No. 4, pp. 309-318.
- Kim, K., Choi, J., Lee, O., Cha, D.H., and Kim, S. (2020). Uncertainty quantification of future design rainfall depths in Korea. *Atmosphere*, MDPI, Vol. 11, No. 1, 22. doi:10.3390/atmos11010022
- Kim, R., Won, J., Lee, J., Choi, J., and Kim, S. (2019). Trend of heat wave events in South Korea using daily minimum air temperature. *Journal of Wetlands*

- Research*, Vol. 21, No. 4, pp. 344-353.
- Lee, D.G., Kim, J., and Choi, B.C. (2007). Characteristics of daily mortality due to heat waves in Busan in July 1994. *Atmosphere*, Korean Meteorological Society, Vol. 17, No. 4, pp. 463-470.
- Lee, J.Y. (2006). Some improvements on H-index: Measuring research outputs by citations. *Journal of the Korean Society for Information Management*, Vol. 23, No. 3, pp. 167-186.
- Lee, O., and Kim, S. (2018). Estimation of future probable maximum precipitation in Korea using multiple regional climate models. *Water*, Vol. 10, No. 5, 637. doi:10.3390/w10050637
- Lee, O., Sim, I., and Kim, S. (2020). Application of the non-stationary peak-over-threshold methods for deriving rainfall extremes from temperature projections. *Journal of Hydrology*, Vol. 585, 124318. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124318
- Lee, O., Park, Y., Kim, E.S., and Kim, S. (2016). Projection of Korean probable maximum precipitation under future climate change scenarios. *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, 3818236. doi:10.1155/2016/3818236
- Lehmann, S., Jackson, A.D., and Lautrup, B.E. (2006). *Measures and mismeasures of scientific quality*. arXiv:physics/0512238v2
- Moon, S., Kim, J., and Kang, B. (2013). Bias correction for GCM long-term prediction using nonstationary quantile mapping. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 8, pp. 833-842.
- Murray, A.G., Wardeh, M., and McIntyre, K.M. (2016). Using the H-index to assess disease priorities for salmon aquaculture. *Preventive Veterinary Medicine*, Vol. 126, pp. 199-207.
- Park, J., Kang, M.S., and Song, I. (2012). Bias correction of RCP-based future extreme precipitation using a quantile mapping method; for 20-weather stations of South Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 54, No. 6, pp. 133-142.
- Park, J.E., Heo, B.Y., and Sunwoo, Y. (2016). A study on human damage due to heat wave by region. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 1, pp. 103-109.
- Shaposhnikov, D., Revich, B., Bellander, T., Bedada, G.B., Bottai, M., Kharkova, T., et al. (2014). Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. *Epidemiology* (Cambridge, Mass.), Vol. 25, No. 3, pp. 359-364.
- Sim, H.J., Ahn, M., and Kim, S. (2014). Feasibility assessment of RCP 8.5 in extreme air temperature. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 3, pp. 351-359.
- Sim, I., Lee, O., and Kim, S. (2019). Sensitivity analysis of extreme daily rainfall depth in summer season on surface air temperature and dew-point temperature. *Water*, Vol. 11, No. 4, 771. doi:10.3390/w11040771
- Thrasher, B., Maurer, E.P., McKellar, C., and Duffy, P.B. (2012). Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, Vol. 16, pp. 3309-3314.
- Tian, Z., Li, S., Zhang, J., and Guo, Y. (2013). The characteristic of heat wave effects on coronary heart disease mortality in Beijing, China: A time series study. *PloS one*, Vol. 8, No. 9, e77321. doi:10.1371/journal.pone.0077321
- Treacy, M., Ramirez, C., and O'Keeffe, M. (2019). Hotness and coldness indexes based on the Fahrenheit scale. *Eos*, 100. doi:10.1029/2019EO127323
- van der Velde, M., Wriedt, G., and Bouraoui, F. (2010). Estimating irrigation use and effects on maize yield during the 2003 heatwave in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 135, No. 1-2, pp. 90-97.
- Wood, A.W., Leung, L.R., Sridhar, V., and Lettenmaier, D.P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, Vol. 62, pp. 189-216.
- Won, J., Jang, S., Kim, K., and Kim, S. (2018). Applicability of the evaporative demand drought index. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 18, No. 6, pp. 431-442.
- Yun, J.H., Hwang, S., Kim, D.H., and Kim, S.M. (2015). Trend analysis of monthly water quality data in Nakdong River based on seasonal Mann-Kendall test. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 6, pp. 153-162.
- Zacharias, S., Koppe, C., and Mücke, H.G. (2015). Climate change effects on heat waves and future heat wave-associated IHD mortality in Germany. *Climate*, Vol. 3, No. 1, pp. 100-117.

Received	September 8, 2020
Revised	September 10, 2020
Accepted	October 19, 2020