효과적 폭염대응을 위한 열지수 활용가능성 검토

Applicability of Heat Index for Effective Heatwave Response

강지윤* · 박봉철** · 허종배*** · 김기욱****

Kang, Ji Yoon*, Park, Bong-Chur**, Heo, Jongbae***, and Kim, Keewook****

Abstract

Damage caused by heatwaves has been increasing recently worldwide. As climate change led by global warming progresses, heatwaves are projected to cause the most damage. Thus, it is very important to issue an appropriate heatwave advisory so that one can be prepared for it. Considering that the degree of heat experienced by people differs depending on the difference in humidity between regions with similar summer temperatures, it is necessary to evaluate whether the issuance of a heatwave warning using only the daily maximum temperature is appropriate. This study intends to examine the applicability of the heat index considering both temperature and humidity for effective heatwave response. First, the agreement between the occurrences of heatwaves and heat-related illness, where the occurrence is decided by the daily maximum temperature and daily maximum heat index, was evaluated. The results show that when the daily maximum heat index was applied as a criterion for issuing a heatwave warning, the coincidence with the occurrence of heat-related illness was more than two times higher than when the daily maximum temperature was applied. Next, on evaluating the prediction accuracy of the heat index according to the prediction-related leading time, the accuracy of the heat index was noted to be higher than that of the temperature for all the leading times; the highest accuracy was shown at the leading time of 10 hours (NSE = 0.7196; CORR = 0.8698). Based on the results of this study, it is necessary to consider using a heat index that contains both temperature and humidity elements to issue a heatwave warning. Furthermore, to establish regional standards for heatwave warnings, the relationship between heatwave characteristics and meteorological factors should be first analyzed using long-term data from various observation points.

Key words : Heatwaves, Heat-related Illness, Temperature, Heat Index, Heatwave Warning

요 지

최근 전 세계에서 지구온난화 등으로 인한 폭염피해가 증가하고 있다. 특히 폭염은 기후변화가 진행됨에 따라 피해가 가장 증가 할 것으로 예상되는 기상재해로 폭염대비를 위한 폭염특보의 적절한 발령이 매우 중요하다. 여름철 기온이 유사하게 나타나는 지역 간에도 습도의 차이에 따라 사람이 느끼는 더위의 정도가 다르다는 점을 고려할 때, 일최고기온만을 이용한 폭염특보의 발령이 적절한지에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 효과적 폭염대응을 위해 기온과 습도를 함께 고려한 열지수의 활용가능성을 검토하고자 한다. 먼저 기온 및 열지수와 폭염피해의 관계를 확인하기 위해 일최고기온과 일최고열지수에 의한 폭염발생과 온열질환자 발생 사이의 일치성을 평가하였다. 그 결과 폭염특보 발령을 위한 기준으로 일최고열지수를 적용한 경우에 일최고기온을 적용한 경우보다 온열질환자 발생과의 일치성이 2배 이상 높게 나타나는 것을 확인하였다. 다음으로 예측 선행시간에 따른 열지수 예측정확성 평가 결과, 모든 예측 선행시간에 대하여 기온보다 열지수의 예측정확성이 높게 나타났으며, 예측 선행시간 10시간에서 상대적으로 높은 정확성(NSE = 0.7196; CORR = 0.8698)을 보였다. 본 연구의 결과를 고려할 때, 폭염특보 발령을 위해 기온과 습도가 모두 고려된 열지수를 이용하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다고 판단되며, 지역별 폭염특보 기준설정을 위해 다양한 관측지점의 장기간 데이터를 활용한 폭염특성과 기상인자와의 연계성 분석이 선행되어야 할 것이다.

핵심용어 : 폭염, 온열질환, 기온, 열지수, 폭염특보

*정회원, 부산연구원 연구원, 인제대학교 환경공학과 박사수료(E-mail: jykang@bdi.re.kr)

Member, Assistant Researcher, Busan Development Institute, Doctoral Candidate, School of Environmental Engineering, Inje University

**부산연구원 연구위원

Research Fellow, Busan Development Institute

***부산연구원 연구위원

Research Fellow, Busan Development Institute

****교신저자, 정회원, 부산연구원 연구위원(Tel: +82-51-860-8700, Fax: +82-51-860-8787, E-mail: kkim@bdi.re.kr)

Corresponding Author, Member, Research Fellow, Busan Development Institute

1. 서 론

최근 가속화되고 있는 기후변화로 인해 지구온난화와 이상 기온 현상 등의 빈번히 발생함에 따라 세계적으로 지역적 홍수 위험증가, 최저기온 상승, 폭염일수 증가 등이 발생하고 있다(Kim et al., 2007). 그 중에서도 특히 폭염은 기후변화가 진행됨에 따라 피해가 가장 많이 증가될 것으로 우려되는 기상재해 중 하나(Kim et al., 2014; Sim et al., 2014; Mazdiyasi et al., 2019)이다.

최근 연구결과에 따르면 극한고온현상 발생빈도가 계속 증가하고 있는 추세이다(Choi and Lee, 2019). NOAA (2020)에 따르면, 2019년 전 지구 연평균 기온이 140년 역사상 두 번째로 높았고, 최근 5년(2015년~2019년)이 상위 5위를 차지하고 있다. 우리나라 역시 2018년에 관측 사상 최고기온을 경신하였고, 일최고기온 33 °C 이상으로 정의 되는 폭염일수가 평년(1981~2010년) 대비 3배 이상 증가하였다(KEI, 2020; KMA, 2019).

우리나라 및 세계 각국은 효과적 폭염대비를 위한 특보제도를 운영하고 있다. 폭염특보는 기온, 습도 등 기후환경이 특정수준을 초과하게 되면 폭염 피해가 증가한다는 사실에 기반하는 것으로, 폭염특보가 발령되면 피해 예방을 위한 주의를 기울일 필요가 있음을 의미한다(Kim et al., 2019). 호주의 경우 최고기온 및 최저기온을 고려하여 폭염예보를 수행하고 있으며, 일본은 미국에서 개발된 열사병위험지수(WBGT)를 2008년부터 도입하여 폭염대응시스템에 적용하고 있다. 또한 미국의 경우 폭염 대비를 위해 기온과 습도를 함께 고려한 열지수(Heat Index)를 활용하고 있으며, 열지수표를 제작·배포하고 있다. 열지수는 대기온도와 상대습도를 결합하여 인간의 인지온도를 측정할 지표로 우리나라와 같이 기온과 습도가 높은 몬순기후 지역에 적용하기 가장 적합한 것으로 알려져 있다(Steadman, 1979; Choi et al., 2005; Lee et al., 2013).

우리나라는 2007년부터 폭염특보제를 도입하여 일최고기온과, 일최고열지수를 기준으로 운영¹⁾해 왔으나, 2012년부터 업무효율화와 국민이해도 증진을 위해 일최고기온만을 특보발령 기준으로 활용해 왔다. 하지만 여름철 기온이 유사하게 나타나는 지역 간에도 습도에 따라 사람이 느끼는 더위의 정도가 다르다는 점(Kim and Kim, 2000; Park et al., 2008)을 고려할 때, 일최고기온만을 이용한 폭염특보 발령이 적절한지에 대한 검토가 필요하다. 이에 기상청은 폭염특보 기준을 ‘일최고기온’에서 습도를 반영한 ‘일최고 체감온도’로 변경하여 2020년 5월 15일부터 시범운영 중에 있다.

1) 폭염주의보: 일최고기온이 33 °C 이상이고 일최고열지수가 32 °C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때; 폭염경보: 일최고기온이 35 °C 이상이고 일최고열지수가 41 °C 이상인 상태가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때

효과적 피해 예방을 위한 폭염특보 발령을 위해서는 두 가지 사항을 고려할 필요가 있다. 먼저 특보의 기준이 되는 기후인자와 폭염피해 사이의 상관성을 고려해야 한다. 폭염 피해의 증가를 적절히 예측할 수 있는 기후인자를 선정한 후, 이를 활용한 특보 발령을 통해 효과적인 피해 예방이 가능하기 때문이다. 다음으로 기후인자의 예측정확성을 고려해야 한다. 특정 기후인자를 통해 폭염에 의한 피해 증가를 적절히 예측할 수 있다고 하더라도 해당 기후인자의 예측정확성이 높지 않은 경우, 효과적인 피해의 예방이 불가능하기 때문이다. 아울러 업무의 효율성 및 국민이해도 증진을 위해 너무 복잡한 기준의 설정은 지양할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 현재 미국에서 활용되고 있으며 우리나라에서도 과거에 도입되었던 바 있는 기온과 습도를 함께 고려한 열지수의 폭염특보 활용가능성을 검토해 보았다. 이를 위해 ①기온 및 열지수에 따른 폭염특보 발령과 인명피해 발생 간의 일치성 평가, ②기온과 열지수의 예측정확성 평가를 수행하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 자료

본 연구는 부산광역시 전역을 대상지역으로 설정하였다. 열지수 활용성 검토를 위해 2011년부터 2018년까지 여름철(6월~9월)의 기후자료와 온열질환자 자료(Table 1)를 활용하였다. 온열질환을 열사병(T67.0), 열실신(T67.1), 열경련(T67.2), 열탈진(T67.3~67.5), 열피로(T67.6), 열부종(T67.7) 등 열 및 빛의 영향에 의한 질환으로 정의하고 부산광역시 온열질환감시체계 참여 의료기관에 내원한 환자 수를 활용하였다. 기후자료는 기상청의 기상자료개방포털과 부산보건환경연구원에서 제공하는 중관기상관측소 1개소 및 대기오염측정소 19개소 자료를 이용하였다. 또한 폭염예보의 예측정확성 평가를 위해 기상청의 기상예보(동네예보) 중단기예보 자료인 3시간기온 및 습도 예측자료를 이용하였다.

2.2 폭염특보 발령과 인명피해 발생 간의 일치성 평가

기온 상승에 의한 폭염과 열대야 등 고온 현상은 인간에게 열사병, 열탈진, 열실신, 열경련 등의 질병과 신체적 피해를 줄 수 있고, 인간의 유병율(prevalence) 및 사망률(mortality) 증가에도 영향을 미친다(Cinar et al., 2001; Kim et al., 2006; Park and Lee, 2006; Kysely et al., 2009). 또한 폭염 일수가 증가함에 따라 폭염 사망자는 지수적으로 증가하고, 최고기온이 33 °C 이상일 때 사망자가 급증하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014). 따라서 폭염 및 온열질환자 발생 여부 사이의 일치성 평가를 통해 폭염 발생의 기준이 되는 기온, 습도 등 기상인자의 적절성을 평가하고자 하였다.

일치성 평가방법은 평가자 간 신뢰도(inter-rater reliability)

평가를 위해 주로 적용되는 Cohen's Weighted Kappa (κ_w)를 사용하였다. Cohen's Kappa (κ)는 Cohen (1960)이 제안한 방법으로 폭염 및 온열질환자와 같이 '미 발생' 혹은 '발생'으로 구분되는 명목척도(nominal scale)들 간의 일치성을 확인하는데 적절하다(Eq. 1).

$$\kappa = \frac{(p_0 - p_e)}{(1 - p_e)} \quad (1)$$

여기서, p_0 는 두 변수가 일치하는 비율(관측값), p_e 는 두 변수가 우연히 일치할 확률(기대값)이다. 이후 Cohen (1968)은 Cohen's Kappa가 두 변수 간의 불일치 정도를 반영하지 못하는 한계를 수정하여 Cohen's Weighted Kappa (κ_w)를 제안하였다(Eq. 2).

$$\kappa_w = 1 - \frac{\sum w_{ij} p_{ij}}{\sum w_{ij} p_{e,ij}} \quad (2)$$

여기서, w_{ij} 는 가중치, p_{ij} , $p_{e,ij}$ 는 각각 두 변수가 i , j 가

되는 관측값 및 기댓값, κ_w 는 두 변수가 각각 두 개를 초과하는 척도를 가질 때, 두 변수 간의 불일치 정도를 반영한다. Landis and Koch (1977)는 kappa 값의 범위에 따라 일치성 없음(<0; poor), 약간의 일치성(0~0.2; slight), 적은 일치성(0.2~0.4; fair), 보통의 일치성(0.4~0.6; moderate), 상당한 일치성(0.6~0.8; substantial), 거의 완벽한 일치성(0.8~1; almost perfect)으로 정의하였다(Table 2).

일치성 평가를 위해 폭염 및 온열질환자 발생 여부를 Table 3과 같이 구분하였다. 비교변수 중 폭염 발생은 '미 발생'과 '폭염주의보', '폭염경보'로 구분하고, 폭염주의보 및 폭염경보의 기준(각각 33, 35 °C)을 초과하는 일최고기온과 일최고열지수가 발생한 날의 비율을 기준으로 온열질환자의 발생 정도를 '미 발생', '약간 발생', '많이 발생'으로 구분하였다.

2.3 기온과 열지수의 예측정확성 평가

미래 폭염상황에 효과적으로 대응하기 위해서는 피해 발생을 최대한 정확하게 예측하기 위한 기상인자 활용과 동시에 해당 기상인자에 대한 예측 정확성 확보가 필요하다.

Table 1. Description of Climate, Patients with Heat-Related Illness Data

Assortment	Climate	Patients with Heat-related Illnesses
Source of data	ASOS, Busan Health and Environmental Research Center, KMA weather forecast	Heat-related Illnesses surveillance system
Elements	maximum temperature and relative humidity, neighborhood forecast	The number of patients with heat-related illnesses
Temporal resolution	Hourly, Daily	Daily
Period	2011~2018 (Jun.~Sep.)	2011~2018 (Jun.~Sep.)

Table 2. Agreement Measures for Categorical Data

Kappa	Strength of Agreement
<0.00	Poor
0.00~0.20	Slight
0.21~0.40	Fair
0.41~0.60	Moderate
0.61~0.80	Substantial
0.81~1.00	Almost perfect

Landis and Koch (1977)

Table 3. Category of Occurrences of Heatwave and Patients

Assortment	Category		
Heatwave	Not occurring	Advisory (≥ 33 °C)	Warning (≥ 35 °C)
Patients*	Not occurring	Occurs slightly	Occurs a lot

* Patients with heat-related illnesses

따라서 본 연구에서는 현재 폭염특보 발령 기준으로 활용되고 있는 일최고기온과 습도, 일최고열지수의 예측정확성 평가를 통해 일최고열지수의 활용가능성을 검토하였다.

열지수 계산식은 Eq. (3)과 같다. 여기서, HI는 열지수, T는 온도(°C), RH는 상대습도(%)를 나타낸다. 우리나라에서는 폭염특보제 도입 당시 열지수에 대한 기준을 Table 4와 같이 적용하여 폭염의 위험수준을 평가 하였다(Choi, 2004).

$$\begin{aligned}
 HI = & -42.379 + 2.04901523 \\
 & \times ((T-32) \times 5/9) \\
 & + 10.14333127 \times RH \\
 & - 0.22475541 \times ((T-32) \times 5/9) \\
 & \times RH - 6.83783 \times 10^{-3} \\
 & \times ((T-32) \times 5/9)^2 \\
 & - 5.481717 \times 10^{-2} \\
 & \times RH^2 + 1.22874 \times 10^{-3} \\
 & \times ((T-32) \times 5/9)^2 \\
 & \times RH + 8.5285 \times 10^{-4} \\
 & \times ((T-32) \times 5/9) \\
 & \times RH^2 - 1.99 \times 10^{-6} \\
 & \times ((T-32) \times 5/9)^2 \times RH^2
 \end{aligned} \quad (3)$$

예측정확성 평가를 위한 예측자료는 기상청 동네예보

예측기온 및 습도를, 관측자료는 부산시 보건환경연구원 대기오염원 측정소 자료를 이용하였다(Table 1 참고). 일최고기온(열지수)이 오후 3시에 발생한다고 가정하고 평가를 위한 예측 선행시간을 Table 5와 같이 설정하였다. 예를 들어, 예측 선행시간이 19시간인 경우 예측 목표시간인 오후 3시에 발생하는 일최고기온(열지수)의 예측은 전날 오후 8시에 발표된다.

열지수 예측 정확성 평가를 위해 관측값과 예측값 간의 정확성 검증에 주로 사용되는 Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE; Eq. (4))와 관측값과 산정값의 상호연관성에 대한 통계적 유의성을 검증하는데 주로 사용되는 피어슨 상관계수(CORR; Eq. (5))를 이용하였다. 그 값에 따른 유의성은 ‘Very good’, ‘Good’, ‘Satisfactory’, ‘Unsatisfactory’ 4가지로 구분된다(Table 6).

$$NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{cal})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (4)$$

여기서, Q_{obs} 는 관측치, Q_{cal} 는 예측치, $\overline{Q_{obs}}$ 는 평균관측치이다.

Table 4. Health Effect of the Heat Index

Heat Index (°C)	Categories	Possible Symptoms
≥ 54	Extreme Danger	Heatstroke or sunstroke are imminent
41~54	Danger	Sunstroke, heat cramps or heat exhaustion are likely. Heatstroke with prolonged exposure and physical activity
32~41	Extreme Caution	Sunstroke, heat cramps and heat exhaustion with prolonged exposure and physical activity under these conditions
27~32	Caution	Fatigue with prolonged exposure and physical activity

Lee et al. (2013), Steadman (1979)

Table 5. Time of Prediction by Prediction Leading Time

Prediction Target Hour	Prediction Leading Time (hr)	Time of Prediction
PM 3:00	10	AM 5:00 on the day
	19	PM 8 the day before
	25	PM 2 the day before

Table 6. General Performance Ratings for Recommended Statistics

Performance Rating	NSE	CORR
Very good	0.75 < NSE ≤ 1.00	CORR < ±0.8~1.0
Good	0.65 < NSE ≤ 0.75	CORR < ±0.3~0.8
Satisfactory	0.50 < NSE ≤ 0.65	CORR < ±0.1~0.3
Unsatisfactory	NSE ≤ 0.50	CORR < ±0.1

Moriasi et al. (2007), Choi (2007)

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

여기서, $\bar{x}$ 는 관측치 평균, $\bar{y}$ 는 예측치 평균, n 은 데이터의 개수이다.

3. 분석 결과

3.1 폭염특보 발령과 인명피해 발생 간의 일치성 평가

2018년의 일최고기온, 일최고열지수, 일별 온열질환자

Fig. 1. Trends of Temperature, Heat Index, and Number of Patients

수(Fig. 1)를 보면 최고기온에 비해 최고열지수가 온열질환자 발생과 더 큰 연관성을 가지는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 최고기온을 기준으로 폭염이 아닌 날에 81명(39%)의 온열질환자가 발생한 반면, 최고열지수를 기준으로 폭염일과 온열질환자의 발생일은 거의 일치 하는 것을 알 수 있다.

Table 4의 척도에 따른 일최고기온과 일최고열지수를 기준으로 하는 폭염 발생에 따른 온열질환자 발생 일치 횟수 평가 결과는 Table 7과 같다. 일최고열지수와 일최고기온을 이용하여 각각의 경우를 비교한 결과 일최고열지수가 35 °C 이상일 때 온열질환자 발생 횟수가 92회 일치 한 반면 일최고기온이 35 °C 이상일 때의 온열질환자 발생 일치 횟수는 5회에 그쳤다.

Table 7의 자료를 바탕으로 산정된 폭염과 온열질환자 발생 사이의 일치성 평가를 위한 κ_w 값은 Table 8과 같다. 산정된 κ_w 값을 보면, 일최고열지수가 일최고기온보다 온열질환자 발생과의 일치성이 2배 이상 높은 것을 알 수 있다. 또한 Table 2의 일치성 기준을 적용했을때, 일최고기온을 적용한 폭염의 발생은 온열질환자 발생과 적은 일치성(fair)을 보이는 반면 일최고열지수를 적용한 폭염의 발생은 온열질환자 발생과 보통의 일치성(moderate)을 보이는 것으로 나타났다.

3.2 열지수 예측의 정확성

예측 선행시간에 따른 각 관측지점에서의 기온, 습도, 열지수에 대한 예측 정확성 평가를 위한 오차는 Table 9, Fig. 2와 같다. 평균적으로 기온, 열지수, 습도에 대한 예측값

Table 7. Number of Agreements between Heatwave and Patient Occurrences

Criteria of Heatwaves	Whether Heatwaves Occur	Patients with Heat-Related Illness			
		Occurs A Lot	Occurs Slightly	Not Occurring	All
Daily maximum temperature	Warning	5	4	0	9
	Advisory	13	24	9	46
	Not occurring	15	138	768	921
	All	33	166	777	976
Daily maximum heat index	Warning	92	35	54	181
	Advisory	13	19	38	70
	Not occurring	6	34	685	725
	All	111	88	777	976

* The larger the diagonal value (cells with comb pattern), the higher the degree of agreement

Table 8. Assessment Result of Agreement between Heatwave and Patient Occurrences

Criteria of Heatwaves	Cohen's Weighted Kappa (κ_w)	Strength of Agreement
Daily maximum temperature	0.2892	Fair
Daily maximum heat index	0.5990	Moderate

Table 9. Differences between Predicted and Observed on Temperature, Heat Index, and Related Humidity by Prediction Leading Time

Measuring Points	10hr			19hr			25hr		
	Temperature (°C)	Heat Index (°C)	Rel. Humidity (%)	Temperature (°C)	Heat Index (°C)	Rel. Humidity (%)	Temperature (°C)	Heat Index (°C)	Rel. Humidity (%)
Gwangbok	0.00	-0.51	-3.48	-0.01	-0.59	-4.10	-0.04	-0.68	-4.62
Gwang-an	0.89	0.83	-6.96	0.90	0.78	-7.47	0.91	0.80	-7.59
Gijang	-0.39	-0.46	1.20	-0.41	-0.52	0.90	-0.38	-0.48	0.84
Noksan	0.18	0.55	3.56	0.09	0.34	2.87	0.13	0.40	2.99
Daesin	0.18	0.41	2.46	0.17	0.35	1.90	0.16	0.27	1.30
Daeyeon	0.78	1.05	0.85	0.77	0.94	0.26	0.78	0.99	0.13
Daejeo	0.39	0.10	-3.65	0.36	0.00	-4.01	0.39	0.04	-4.10
Daechyeong	-0.01	0.00	-0.29	-0.04	-0.11	-1.05	-0.05	-0.18	-1.56
Deogcheon	-1.03	-1.03	4.09	-1.04	-1.11	3.80	-1.04	-1.10	3.69
Deokpo	0.23	1.92	4.59	0.21	1.78	4.42	0.31	2.04	4.89
Myeonggyang	0.27	-0.17	-6.21	0.36	0.03	-5.94	0.39	0.10	-5.90
Bukok	-0.86	-0.87	-1.81	-0.86	-0.91	-1.68	-0.84	-0.87	-1.74
Sujeong	0.31	0.11	-4.67	0.30	0.03	-5.41	0.30	0.05	-5.66
Yeonsan	-0.69	-1.29	-2.22	-0.59	-1.07	-2.00	-0.57	-0.97	-1.99
Yongsu	-1.12	-1.53	2.06	-1.15	-1.60	1.92	-1.10	-1.51	1.66
Janglim	-1.51	-3.02	0.63	-1.56	-3.19	-0.53	-1.55	-3.23	-1.08
Jeonpo	-0.50	-0.39	3.97	-0.50	-0.48	3.39	-0.51	-0.49	3.27
Jwadong	0.51	0.66	-2.10	0.49	0.59	-2.39	0.49	0.58	-2.39
Cheonglyong	0.73	1.02	-4.09	0.73	1.01	-3.97	0.75	1.01	-4.21
Hakjang	-0.60	-0.14	7.01	-0.65	-0.28	6.35	-0.64	-0.28	6.11
Average	-0.11	-0.14	-0.25	-0.12	-0.20	-0.64	-0.11	-0.17	-0.80

Fig. 2. Box-plots of Differences between Predicted and Observed for Temperature, Related Humidity, and Heat Index by Prediction Leading Time

Table 10. Goodness of fit Statistics by Prediction Leading Time

Prediction Leading Time (hr)		Temperature	Humidity	Heat Index
10hr	NSE	0.7016	0.2773	0.7196
	CORR	0.8573	0.6641	0.8698
19hr	NSE	0.6849	0.2866	0.7104
	CORR	0.8478	0.6555	0.8633
25hr	NSE	0.4944	-0.1663	0.5661
	CORR	0.7346	0.3976	0.7833

과 관측값 사이의 오차가 각각 0.11 °C, 0.14 °C, 0.25%p (선행시간 10시간), 0.12 °C, 0.20 °C, 0.64%p (선행시간 19시간), 0.11 °C, 0.17 °C, 0.80%p (선행시간 25시간)로 나타났다. 평균적으로 기온이 열지수보다 오차범위가 작게 나타나지만 덕포, 명장, 수정, 학장 등 다수의 지역에서 열지수의 오차가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 습도의 오차범위가 기온에 비해 상당히 큰 것을 고려하면 습도와 기온을 함께 고려한 열지수의 오차범위가 기온과 유사하게 나타나는 것은 상당히 유의미하다고 볼 수 있다.

Eqs. (4)와 (5)를 적용한 기온, 습도 및 열지수 예측 정확성 평가 결과(Table 10), 모든 선행시간에서 열지수의 NSE와 피어슨 상관계수(CORR)가 가장 높게 나타나 가장 높은 예측 정확성을 보였다. 선행시간 10시간의 경우, 기온과 습도의 NSE는 각각 ‘Good’, ‘Unsatisfactory’로 분류되는 반면 열지수의 NSE는 ‘Very Good’으로 가장 높은 예측 정확성을 보였다. 피어슨 상관계수를 보면, 습도는 ‘Good’, 기온과 열지수는 ‘Very Good’으로 나타났으나 열지수의 상관계수 값이 기온보다 1에 더 가까웠다. 선행시간 19시간의 경우 열지수가 ‘Good (NSE)’, ‘Very Good (CORR)’으로 기온과 습도보다 높은 예측 정확성을 보였다. 선행시간 25시간 역시 열지수가 ‘Satisfactory (NSE)’, ‘Good (CORR)’으로 가장 높은 예측 정확성을 보였다. 결과적으로 예측 선행시간 10시간 및 19시간인 경우 열지수의 예측치가 기온의 예측치보다 높은 정확성을 보였으며, 특히 예측 선행시간 10시간의 경우 상대적으로 더 정확한 값을 예측하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 효과적인 폭염특보 발령을 위한 열지수의 활용가능성을 부산광역시를 대상으로 검토하였다. 이를 위해 ① 기온 및 열지수에 따른 폭염특보 발령과 인명피해 발생 간의 일치성 평가, ② 기온과 열지수의 예측정확성 평가를 수행하였다.

기온 및 열지수에 따른 폭염특보 발령과 인명피해 발생 간의 일치성 평가 결과, 일최고열지수를 이용한 폭염의 발생이 일최고기온을 이용하는 폭염의 발생보다 온열질환자 발생과의 일치성이 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 이는 기온과

습도가 함께 고려된 열지수가 기온보다 온열질환자의 발생을 더 잘 설명하고 있다는 결과로 일최고열지수를 이용한 폭염특보의 발령이 일최고기온을 이용하는 경우보다 폭염피해의 발생을 더 정확하게 예측할 수 있음을 의미한다.

기온과 열지수의 예측정확성 평가 결과, 모든 선행시간에서 열지수의 예측 정확성이 가장 높게 나타났다. 이는 일최고 열지수의 정확한 예측을 통해 폭염피해의 발생을 상대적으로 더 정확하게 예측할 수 있으며, 피해 예방을 위한 자원의 낭비를 최소화하여 효율적인 폭염 대응이 가능함을 의미하는 결과이다. 본 연구의 결과를 고려할 때, 폭염특보 발령을 위해 기온과 습도가 모두 고려된 열지수를 이용하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다고 판단된다.

현재 운영 중인 폭염특보는 2019년까지 기온만을 기준으로 발령되어 폭염 발생의 효과적 예측을 통해 그 피해를 최소화하기 위한 폭염특보의 근본적인 목표를 달성하는데 부족함이 있었다. 이에 우리나라는 2020년부터 폭염특보 기준을 ‘일최고기온’에서 습도를 반영한 ‘일최고체감온도’로 변경하여 시험운영 중에 있다. 또한 미국에서는 폭염 대비를 위해 기온과 습도를 함께 고려한 열지수(Heat Index)를 활용하고 있으며, 열지수 표를 제작하여 배포하고 있다.

해외 사례 및 본 연구의 결과 등을 고려할 때, 폭염특보를 위한 기온 및 습도를 모두 고려한 열지수 활용의 필요성은 강조되어야 할 것으로 판단된다. 또한 같은 기온이라도 온열질환자의 발생에 차이가 나타나며, 폭염의 정의에 상대적인 개념이 포함되는 것을 고려하면 지역별 기후특성이 고려된 폭염특보의 기준설정이 필요하다. 지역별 폭염특보 기준설정을 위해서는 지역별 다양한 관측지점의 장기간 데이터를 활용할 필요가 있으며, 이를 이용하여 폭염특성과 기상인자와의 연계성 분석이 선행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 부산연구원 2020년 연구과제 ‘부산시 폭염발생 현황 및 대응방안(정책연구 2020-01-891)’의 연구비 지원으로 수행되었으며, 해당 연구보고서의 내용 중 일부를 포함하고 있음.

References

- Choi, G., Choi, J., and Kwon, H.J. (2005). The impact of high apparent temperature on the increase of summer-time disease-related mortality in Seoul; 1991-2000. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, Vol. 38, No. 3, pp. 283-290.
- Choi, H.C. (2007). *Social Statistics Methodologies - SPSS/PC Windows. 12.0*. Nanam.
- Choi, N., and Lee, M.I. (2019). Spatial variability and long-term trend in the occurrence frequency of heatwave and tropical night in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 55, No. 1, pp. 101-114.
- Choi, S.B. (2004). *Industry Safety Dictionary*. Gold.
- Cinar, Y., Senyol, A.M., and Duman, K. (2001). Blood viscosity and blood pressure: Role of temperature and hyperglycemia. *American Journal of Hypertension*, Vol. 14, pp. 433-438.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, Vol. 20, pp. 37-46.
- Cohen, J. (1968). Weighted kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*, Vol. 70, No. 4, pp. 213-220.
- Korea Environment Institution (KEI). (2020). *2020 Heatwave impact report*.
- Kim, D.W., Chung, J.H., Lee, J.S., and Lee, J.S. (2014). Characteristics of heat wave mortality in Korea. *Atmosphere Korean Meteorological Society*, Vol. 24, No. 2, pp. 225-234.
- Kim, H.D., and Kim, S.B. (2000). On the property of climatological environment with discomfort index in Korea. *Journal of the Environmental Sciences International*, Vol. 10, pp. 129-133.
- Kim, J.Y., Kim, J.O., and Yu, K.Y. (2007). A study on foreign cases for the management of extreme heat response plan in Korea. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 2, pp. 25-33.
- 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. Korean Meteorological Society*, Vol. 16, No. 4, pp. 269-278.
- Kim, K., Heo, J., and Park, B.-C. (2019). *The impact and corresponding strategies of heat waves in Busan*. Busan Development Institute.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2019). *2018 Abnormal climate report*.
- Kysely, J., Huth, R., and Kim, J.Y. (2009). Evaluating heat-related mortality in Korea by objective classification of 'Air Masses'. *International Journal of Climatology*, Vol. 30, pp. 1484-1500.
- Landis, J.R., and Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, Vol. 33, pp. 159-74.
- Lee, S., Kwon, B.Y., Jung, D., Jo, K., Kim, M., Ha, S., et al. (2013). Future prediction of heat and discomfort indices based on two RCP scenarios. *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, Vol. 23, No. 2, pp. 221-229.
- Mazdiyasni, O., Sadegh, M., Chiang, F., AghaKouchak, A. (2019). Heat wave intensity duration frequency curve: A multivariate approach for hazard and attribution analysis. *Scientific Reports*, Vol. 9, pp. 14117.
- Moriassi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2020). *State of the climate: Global climate report for annual 2019*. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913>
- Park, J.K., and Lee, D.G. (2006). *Correlation between daily mortality and temperature of seoul, in summer*. Proceedings of the 99th Annual Meeting of AWMA, New Orleans, LA, 06-A-384-AWMA.
- 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*, Vol. 17, pp. 657-669.
- Sim, H.J., Ahn, M., and Kim, S. (2014). Feasibility assessment of RCP 8.5 in extreme air temperature. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 3, pp. 351-359.
- Steadman, R.G. (1979). The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *American Meteorological Society*, Vol. 18, pp. 861-873.

Received	June 25, 2021
Revised	June 25, 2021
Accepted	July 12, 2021