

인지온도 확률예보기반 폭염-건강영향예보 지원시스템 개발 및 2019년 온열질환자를 이용한 평가

강미선¹⁾ · 벨로리드 밀로슬라브²⁾ · 김규랑^{3)*}

¹⁾국립기상과학원 현업운영개발부, ²⁾국립기상과학원 융합기술연구부,
³⁾국립기상과학원 재해기상연구부

(접수일: 2020년 4월 21일, 수정일: 2020년 6월 4일, 게재확정일: 2020년 6월 5일)

Development of Impact-based Heat Health Warning System Based on Ensemble Forecasts of Perceived Temperature and its Evaluation using Heat-Related Patients in 2019

Misun Kang¹⁾, Miloslav Belorid²⁾, and Kyu Rang Kim^{3)*}

¹⁾Operational Systems Development Department, National Institute of Meteorological Sciences,
KMA, Seogwipo, Korea

²⁾Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,
KMA, Seogwipo, Korea

³⁾High Impact Weather Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,
KMA, Gangneung, Korea

(Manuscript received 21 April 2020; revised 4 June 2020; accepted 5 June 2020)

Abstract This study aims to introduce the structure of the impact-based heat health warning system on 165 counties in South Korea developed by the National Institute of Meteorological Sciences. This system was developed using the daily maximum perceived temperature (PTmax), which is a human physiology-based thermal comfort index, and the Local ENsemble prediction system for the probability forecasts. Also, A risk matrix proposed by the World Meteorological Organization was employed for the impact-based forecasts of this system. The threshold value of the risk matrix was separately set depending on regions. In this system, the risk level was issued as four levels (GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) for first, second, and third forecast lead-day (LD1, LD2, and LD3). The daily risk level issued by the system was evaluated using emergency heat-related patients obtained at six cities, including Seoul, Incheon, Daejeon, Gwangju, Daegu, and Busan, for LD1 to LD3. The high-risks level occurred more consistently in the shorter lead time (LD3 → LD1) and the performance (r_s) was increased from 0.42 (LD3) to 0.45 (LD1) in all cities. Especially, it showed good performance ($r_s = 0.51$) in July and August, when heat stress is highest in South Korea. From an impact-based forecasting perspective, PTmax is one of the most suitable temperature indicators for issuing the health risk warnings by heat in South Korea.

Key words: Perceived temperature, LENS, heat-related risk, risk matrix, impact-based forecasts

*Corresponding Author: Kyu Rang Kim, High Impact Weather
Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,
KMA, Gangneung 25457, Korea
Phone: +82-70-7850-6721, Fax: +82-33-644-2657
E-mail: krk9@kma.go.kr

1. 서 론

기후변화에 대한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2013)에 의하면 향후 평균기온의 상승과 함께 폭염 발생빈도가 증가하고 그 강도가 심화될 것이라고 보고하였다. 폭염에 의한 과도한 열은 모든 대기 위험 중에서 사망률에 가장 치명적인 영향을 미칠 것으로 인식되고 있고(Sheridan and Kalkstein, 2004), 이미 전 세계적으로 폭염으로 인한 인체(건강) 악영향의 심각성이 부각되고 있다(Guest et al., 1999; Azhar et al., 2014; Heaviside et al., 2016). 열 환경에서 인체가 기상환경과의 열 교환(열 손실, 열 발생) 과정을 통해 과도한 열 손실 및 열 발생이 없는 상태에 이르면 열 스트레스(heat stress)를 받지 않는 열 쾌적(thermal comfort)한 상태라고 한다(Parsons, 2002; Gosling et al., 2014). 그러나 과도한 열이 인체로 유입되거나 인체 내에서 생산된 열이 축적하게 되면 열 스트레스가 발생하고 체온조절중추에 의해 조절되는 체온조절 기능이 상실되어 온열질환(열사병, 열탈진, 열경련, 열실신, 열부종 등)의 발병 또는 심한 경우 사망까지 이르게 한다(Parsons, 2002).

이에 전 세계적으로 폭염 정보를 공유하고 피해를 예방하기 위하여 열 스트레스를 지수화한 다양한 폭염지수(thermal index)가 개발되었고 이를 폭염경보시스템에 활용하고 있다(Koppe, 2009; NOAA, 2010; Giannaros et al., 2018; Met Office, 2018; CMA, 2019; JMA, 2019; MOEJ, 2019; KMA, 2019; Matzarkis et al., 2020; etc.). 현재 대부분 나라에서는 폭염경보시스템의 폭염지수로 일 최고 기온을 가장 많이 사용하고 있는 실정이다(McGregor et al., 2015; Hwang et al., 2019). 그러나 인체 열 쾌적성은 기온뿐만 아니라 풍속, 복사, 습도 등의 기상요소와도 관련이 있고 인체 생리학적 반응 및 물리적 환경과의 상호작용에도 영향을 받는다(Fanger, 1970). 이와 관련하여 많은 연구자들은 인체-보건 기상학적(human-biometeorological) 특성을 제공하기 위해서는 인체 열 수지 모델(human heat budget model)을 고려해야 한다고 하였고(Fanger, 1970; Parsons, 2002), 이에 따라 폭염지수로 PMV(Predicted Mean Vote; Fanger, 1970), 인지온도(Perceived Temperature, PT; Jendritzky et al., 2000; Staiger et al., 2012), PET(Physiological Equivalent Temperature; Höppe, 1999), MENEX(Man Environment Exchange Model; Blazejczyk, 2005), UTCI(Universal Thermal Climate Index; Jendritzky et al., 2012) 등의 사용을 제안하였다. 선행연구에서는 이러한 지수 사용이 열 스트레스 관련 건강 위험 평가에 적합함을 나타내었고(Urban et al., 2014; Blazejczyk et al., 2018) 우리나라

에서도 열 환경 평가에 적용한 바 있다(Byon et al., 2008a, 2008b; Kang et al., 2020; Hwang et al., 2016; Kim et al., 2014). Byon et al. (2008a, 2008b)은 PT를 이용하여 우리나라를 대상으로 예보가능성을 평가하였고 Kang et al. (2020)은 우리나라의 주요 도시의 열 스트레스 위험 분석에 PT의 적용가능성을 평가하였으며 PT가 습구흑구온도(Wet Bulb Globe Temperature)와 기온보다 좋은 지표임을 확인하였다.

한편 세계국제기구인 WMO(World Meteorological Organization)에서는 기상현상으로부터 발생할 수 있는 사회·경제적 영향을 고려하는 영향예보(impact-based forecasts)의 필요성을 강조하고 있다(WMO, 2015). 영국기상청(Met Office)과 유럽 기상 서비스 네트워크(The Network of European Meteorological Service)에서는 위험가능성 도표(Risk matrix)를 기반으로 예상되는 위험 가능성(likelihood)과 잠재적인 영향(impact)을 고려하여 기상 영향예보에 활용하였고(Meteoalarm, 2019) 현업 운영에 사용 가능함을 제안하였다(WMO, 2015). 한국기상청에서도 기상재해 대응을 위해 효과적인 의사결정을 지원할 수 있는 체계구축의 필요성을 인지하고(KMA, 2016) 2019년부터 우선적으로 폭염과 한파에 대하여 영향예보를 시행하고 있다.

국립기상과학원에서는 폭염에 대한 위험 정보 뿐만 아니라 폭염-건강 영향 정보를 함께 제공하는 ‘폭염-건강영향예보 지원시스템’을 구축하여 한국기상청의 폭염 영향예보(보건분야)를 지원하고자 하였다. 폭염-건강영향예보 지원시스템은 PT 모델과 국지앙상블 예측시스템(Local ENSEMBLE prediction system, LENS)의 오프라인 결합(offline coupling)을 통해 위험가능성 도표에 적용되었다(Kim et al., 2018; NIMS, 2018). 본 연구에서는 국립기상과학원의 폭염-건강영향예보 지원시스템의 개념(concept)을 소개하고, 시스템의 2019년 운영 결과를 분석하고, 온열질환자료를 이용하여 그 결과를 평가하고자 한다.

2. 폭염-건강영향예보 지원시스템의 구성 및 평가방법

2.1 인지온도

PT는 인체 열수지 모델인 Klima-Michel-Model(KMM)을 기반으로 하는 폭염지수로 인체 열평형을 고려하여 인체가 실제로 느끼는 표준환경의 온도로 정의한다(Jendritzky et al., 2000; Staiger et al., 2012). Fanger (1970)가 제안한 열 쾌적 방정식을 통해 인체가 체감하는 열을 계산하여 PT로 표현하며, 기상 요소(기온, 습도, 일사, 풍속 등)뿐만 아니라 의복 단열 효과와 표준 인체의 신진대사(활동량)를 고려한다.

KMM에서 고려하는 표준 인체는 옷을 입은 상태로 평지를 시속 4 km로 걷고 있는 신장 1.75 m, 몸무게 75 kg의 35세 남성이다. 본 연구에서는 폭염환경에서의 인체 열 스트레스 상태를 표현하기 위해 여름철 의복 보온성(0.5 clo)을 고려하였다. 1 clo는 기온 21°C, 상대습도 50% 미만, 풍속 0.1 m s⁻¹ 환경에서 의자에 앉아 휴식하고 있는 사람이 쾌적감을 유지할 수 있는 의복 보온력을 말한다(1 clo = 0.155°C m² W⁻¹; Gagge et al., 1941). PT는 열 생리학적 방법을 기반으로 인간의 복잡한 열 인식 시스템을 고려하기 때문에 폭염 환경에서 열 스트레스를 표현하기에 적절하다. PT의 이론적인 설명은 다음과 같이 표현할 수 있다[ASHRAE, 2001; 식(1)].

$$M - W = (C_{skin} + R_{skin} + E_{skin}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{skin} + S_{core} \quad (1)$$

여기에서 M (W m⁻²)은 인체 대사율, W (W m⁻²)는 기계적인 일을 위한 에너지를 의미하고 C , R , E 는 각각 대류, 복사, 증발을 의미한다. 피부($skin$)와 호흡(res)에서의 대류(C), 복사(R), 증발(E)은 인체 내부에서 생산된 열($M - W$)을 인체 외부로 전달한다. 또한 피부(S_{skin})와 심부(S_{core})는 열을 저장하기도 한다. 정상상태(steady-state)에서는 인체 내부에서 생산된 열과 외부 환경과 교환하는 열의 양이 같고, 피부와 심부에 저장되는 열은 0이다($S_{skin} = 0$ and $S_{core} = 0$). 이때 인체 내부에서 생산된 열과 손실된 열의 편차를 PMV로 표현할 수 있다[Fanger, 1970; 식(2)].

$$PMV = \alpha \{M - W - (C_{skin} + R_{skin} + E_{skin}) - (C_{res} + E_{res})\} = \alpha L \quad (2)$$

여기에서 α ($= [0.303 \exp(-0.036 M) + 0.0275]$)는 M 의 함수이고 L 은 열 부하를 의미한다. 본 연구에서는 Fanger (1970)가 제안한 열 쾌적 방정식에 유효온도(effective temperature)를 고려한 Gagge et al. (1986)의 PMV를 이용하였다. 최종적으로 이 PMV를 이용하여 PT를 산정한다[식(3)].

$$PT = 6.18PMV + 16.83 \quad (3)$$

식(3)은 열 스트레스 범위($PMV > 0$)에서 이용 가능하고 PMV 가 0이거나 0보다 작을 경우에는 다른 방정식을 이용해야 한다. PT 계산을 위한 기상 입력자료로는 기온, 이슬점 온도, 바람, 복사 자료(지표도달 전천-산란 일사, 상향 단파 복사, 상향 장파 복사, 하향 장파 복사) 또는 구름 자료(전체-중층 운량, 고-중-하층 운형)를 이용한다. PT 계산에 대한 보다 자세한 사항은 Staiger et al. (2012)의 Table 1을 참고하면 된다.

Table 1. Frequency of risk levels (GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) issued for 6 cities by the impact-based heat health warning system from 1 May to 30 September 2019.

	GREEN	YELLOW	ORANGE	RED
Seoul	32.0	23.5	36.0	8.5
Incheon	39.9	37.9	19.0	3.3
Daejeon	36.0	36.6	20.9	6.5
Gwangju	34.0	48.4	9.2	8.5
Daegu	36.6	33.3	22.2	7.8
Busan	51.6	23.5	21.6	3.3

2.2 국지 앙상블예측시스템 및 편의보정

국지앙상블예측시스템(Local ENSEMBLE prediction system; LENS)은 기상청에서 운영하는 UM (Unified Model) 기반의 고해상도 앙상블예측시스템으로 한반도 영역에 대하여 13개의 앙상블 멤버로 구성되어 있다. 수평해상도는 2.2 km × 2.2 km이고 연직층수는 70 층이며, 일일 2회(0000, 1200 UTC) 예측되고 있다. LENS의 예측시간은 72시간으로 선행시간 1일(first lead day, LD1), 선행시간 2일(second lead day, LD2), 선행시간 3일(third lead day, LD3)의 총 3일의 선행시간(lead day)을 확보 할 수 있다. 또한 각각의 앙상블 멤버는 똑같은 확률가능성을 지니기 때문에 확률예보의 정량적 기준을 제공하므로 폭염-영향 예보에 이용하기 적절하다. 그러나 국립기상과학원에서 기상청 중관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 21개 지점에 대하여 2018년 여름철(5~9월)을 대상으로 LENS 폭염 예측성능을 평가한 결과, LENS 기반으로 계산된 일 최고 PT (LENS-PTmax)가 전반적으로 과소모의 되는 것을 확인하였다(NIMS, 2018). 이러한 LENS-PTmax의 과소모의로 인하여 폭염-건강 영향예보에서 극한의 폭염 사례를 감지하지 못 할 수 있다. 따라서 폭염-건강 영향예보의 확률 예측에 적용하기 위해서는 LENS-PTmax의 계통오차(systematic error)를 제거하는 과정이 필요하다. 이를 위하여 편의보정(Bias Correction, BC) 기법 중 감쇠형 평균 기법(decaying average technique)을 적용하였다. 감쇠형 평균 기법의 원리는 이전 시간의 예측 성능 정보를 고려하여 최근의 예측 오차에 더 큰 가중치를 주는 것이다. 이를 수행하기 위해 우선 예측과 관측의 예측 오차(e_t)를 산정한다[식(4)].

$$e_t = f_t - y_t \quad (4)$$

여기에서 f_t 과 y_t 는 각각 기준 시각(t , reference time)에서의 예측과 관측 값을 나타낸다.

이후, e_t 를 이용하여 다음 예보 시각($t'+1$)의 예측을 보정하기 위한 BC 항인 $B_{(t'+1)}$ 을 산정한다[식(5)].

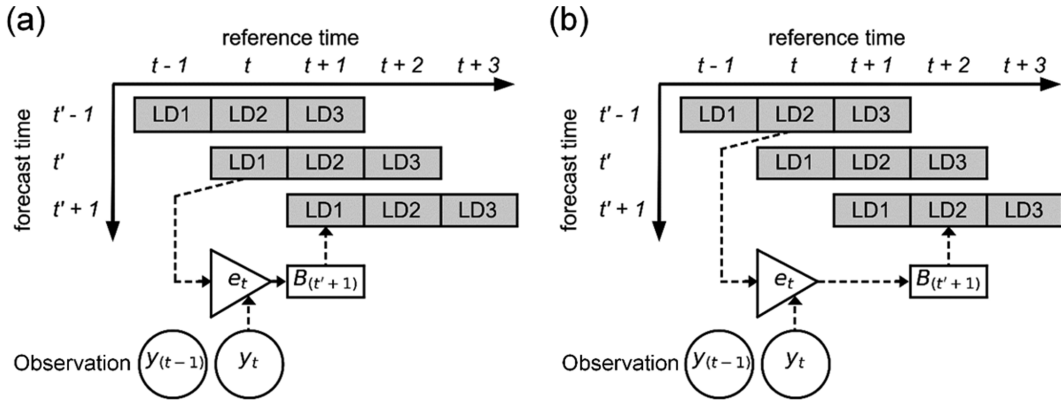


Fig. 1. An example flowchart of how the bias correction is applied to (a) the first lead day (LD1) and (b) second lead day (LD2) of the subsequent forecast $f_{(t'+1)}$.

Probability	75%	Green	Yellow	Orange	Red	Red	Take action
	50%	Green	Green	Yellow	Orange	Orange	Be aware of possible occurrence of heat-related morbidity and mortality in all social groups
	25%	Green	Green	Green	Yellow	Yellow	Be aware of possible occurrence of heat-related morbidity and mortality in vulnerable social groups
		Green	Green	Green	Green	Green	No heat-related impact
		PT1	PT2	PT3			Impact

Fig. 2. Risk matrix and risk description in impact-based heat health warning system.

$$B_{(t'+1)} = (1 - w)B_{t'} - we_t \tag{5}$$

여기에서 t' 은 가장 최근 예보 시각(forecast time)을 의미하고 $B_{t'}$ 은 고려된 샘플 윈도우(sample window) 내에서 누적된 편의(bias)를 의미하며 샘플 윈도우에는 가장 최근의 예측(f_t) 자료를 포함한다. w 는 e_t 와 $B_{t'}$ 에 대한 가중치(weighting factor)를 나타낸다. 본 연구에서 샘플 윈도우의 크기는 35일, w 는 0.14(14%)를 이용하였다.

최종적으로 편의보정한 $F_{(t'+1)}$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{(t'+1)} = f_{(t'+1)} - B_{(t'+1)} \tag{6}$$

Figure 1은 BC 수행 과정의 이해를 돕기 위해 LD1과 LD2의 $f_{(t'+1)}$ 에 대한 BC 수행 방법 예시를 나타낸 것이다. LD1의 $f_{(t'+1)}$ 를 BC하기 위하여 기준 시간(t)에서의 f_t 와 y_t 의 차이인 e_t 를 산정하고 $B_{(t'+1)}$ 를 산정한다. 그 후 $B_{(t'+1)}$ 를 이용하여 $f_{(t'+1)}$ 를 $F_{(t'+1)}$ 로 보정한다. LD2의 경우에도 LD1의 수행방법과 같지만 기준시간(t)의 관측 자료를 이용해야 하기 때문에 e_t 는 $f_{(t-1)}$ 와 y_t 를

이용하여 산정한다. LD3의 경우에는 $f_{(t-2)}$ 와 y_t 를 이용하여 BC를 수행한다(그림 생략).

감쇠형 평균 기법을 이용한 자세한 LENS 편의보정 방법과 결과는 Belorid et al. (2019)를 참고하면 된다. 또한 본 시스템에서는 편의보정된 LENS-PTmax를 이용하였다(NIMS, 2018).

2.3 폭염-건강 영향기반의 예보

본 시스템에서는 폭염에 의한 건강 영향을 고려하기 위해 WMO (2015)에서 제시한 위험가능성 도표를 활용하였다(Fig. 2). 위험가능성 도표는 초록(GREEN), 노랑(YELLOW), 주황(ORANGE), 빨강(RED)의 네 가지 색으로 구성되어 있다. 각 색은 폭염-건강 위험정보 수준을 나타내고 각 색에 대한 의미는 Fig. 2를 참고하면 된다. 또한 위험가능성 도표는 영향축(impact axis)과 가능성축(probability axis)으로 구성되어 있고 각 축은 각각 3가지 조건의 임계값을 필요로 한다.

영향축 설정은 관측자료를 기반으로 계산된 일 최고 PT (O-PTmax)를 이용하여 폭염-건강 피해가 발생하는 기상조건으로 설정하였다. 국립기상과학원에서

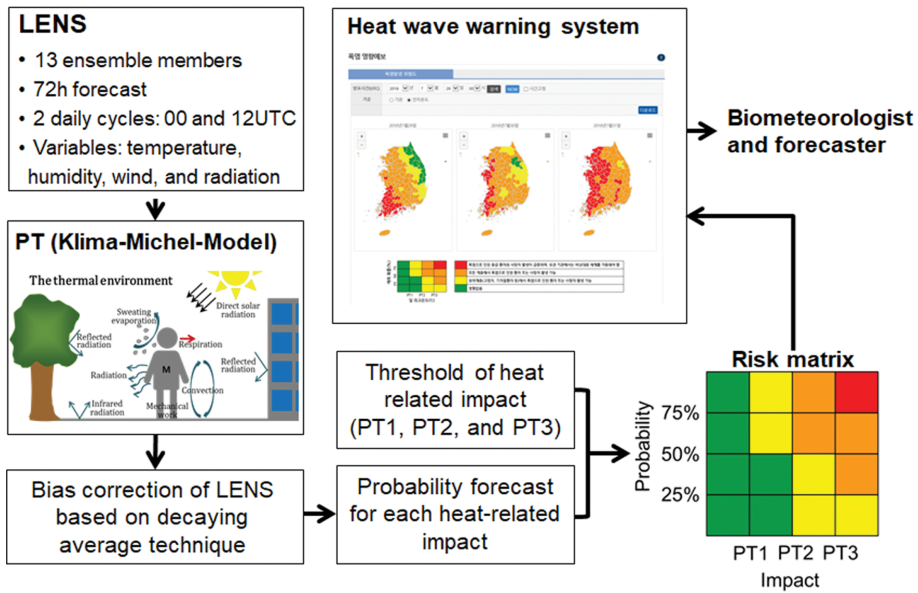


Fig. 3. Flow chart of the impact-based heat health warning system using ensemble forecast of perceived temperature.

는 한국인을 대상으로 고온다습한 환경의 인공기후실에서 인체 열 스트레스 실험을 수행하였고 설문지를 이용하여 인체가 느끼는 온냉감(thermal sensation)을 조사한 바 있다(NIMS, 2018). 영향축의 첫 번째 임계 온도(PT1)는 이 실험에서 조사된 인체가 ‘더움’을 느끼는 온도(36°C)로 설정하였다. 두 번째 임계온도(PT2)는 폭염 규모에 따라 폭염 관련 사망자가 통계적으로 유의미하게 증가하는 온도로 설정하였다. PT2를 위한 분석 자료에는 통계청 사망원인 통계자료와 19개 ASOS 지점 자료를 이용하였고 분석 기간은 2000년부터 2016년까지이다(NIMS, 2018; Kang et al., 2020). 세 번째 임계온도(PT3)는 30년(27개 ASOS 지점, 1987~2016 여름철) 동안의 극한 기후 값인 99 백분위수(percentile)로 설정하였다. 건강영향에 미치는 임계 온도는 지역적으로 차이가 있다고 알려져 있다(Kang et al., 2020). 따라서 지역별로 산정할 수 있는 PT2와 PT3는 특별·광역시 및 도 단위(서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 울산, 부산, 경기, 강원, 충북, 충남, 전북, 전남, 경북, 경남, 제주)로 구분하여 설정하였다. 폭염-건강 피해의 발생 가능성은 편의보정된 LENS-PTmax가 각 영향축의 임계온도를 초과할 확률로 고려되었고 그 확률은 각각 25, 50, 75%로 설정하였다.

2.4 폭염-건강영향예보 지원 시스템 흐름

본 시스템은 폭염 대응 시간을 확보하기 위하여 3일의 선행 시간을 이용하였다. 3일 폭염-건강 영향예보를 위해, 우선 LENS에서 멤버 별로 72시간 예측되

는 1.5 m 기온, 이슬점 온도, 10 m 바람성분, 복사 자료(지표도달 전천·산란 일사, 상향 단파 복사, 상향 장파 복사, 하향 장파 복사)를 이용하여 KMM 모델에서 멤버 별 LENS-PT를 계산한다. 계산된 시간 별 LENS-PT를 이용하여 LENS-PTmax를 산출하고 감쇠형 평균 기법을 기반으로 LENS-PTmax의 편의보정을 수행한다. 편의보정된 13개 멤버의 LENS-PTmax가 위험가능성 도표의 기상조건(PT1, PT2, PT3)을 초과하는지 확인하고 발생확률(가능성)을 확인한다. 최종적으로 위험가능성 도표의 폭염-건강 영향 임계값(PT1, PT2, PT3)과 발생확률(25, 50, 75%)을 기반으로 격자별 폭염-건강 위험경보 수준을 결정한다. 이후 행정구역별(시·군 단위의 165개 지역) 위험수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)이 선정된다. 이러한 작업은 일일 2회(0000, 1200 UTC) 수행된다. 대상지역에 대한 폭염-건강 위험경보는 각각 LD1, LD2, LD3의 총 3일에 대하여 산출된다. 최종산출물인 폭염발생 위험도는 예보관이 확인 할 수 있도록 웹에 표출된다. 자세한 폭염-건강영향예보 지원시스템의 흐름은 Fig. 3를 참고하면 된다.

2.5 시스템 운영결과 평가

폭염-건강 영향예보 시스템이 열 스트레스에 대한 사회적 취약성을 적절하게 반영하고 있는지 평가하는 것은 중요하다. 그러나 아직까지 시스템을 평가할 일 변화 된 방법은 존재하지 않기 때문에 시스템에서 발생한 폭염-건강 위험경보 수준과 열 스트레스관련 건

강피해 사이의 관계를 조사할 적절한 평가 방법을 이용해야 한다.

시스템을 평가할 수 있는 열 스트레스관련 건강피해 자료로는 통계청의 사망원인 통계와 질병관리본부의 응급실내원 온열질환·사망자를 예로 들 수 있다. 통계청 사망원인 통계는 열 스트레스 피해 자료 중 신뢰성이 높은 자료이지만 1년 이상 지연되어 제공(2019년 사망자는 2020년 하반기에 제공)되기 때문에 실시간으로 폭염피해를 감시하기에는 어려움이 있다(Kim et al., 2014). 반면, 질병관리본부 온열질환 응급실감시체계는 응급실에 내원한 온열질환·사망자 발생현황을 익일에 제공 하므로 준실시간으로 폭염피해현황을 감시할 수 있다(KCDC, 2019). 따라서 본 연구에서는 시스템에서 발생한 폭염-건강 위험경보 수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)을 평가하기 위해 질병관리본부 온열질환 응급실감시체계 중 응급실에 내원한 온열질환자 자료를 이용하였다(KCDC, 2019). 온열질환자 자료를 이용하여 위험경보 수준을 평가할 때에는 값 자체보다는 값의 순위(rank)를 고려하는 것이 중요하다. 따라서 평가 방법으로는 Wilks (2006)의 스피어만 순위상관계수(spearman rank correlation coefficient, r_s)를 이용하였다[식(7)].

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (7)$$

여기에서, d_i 는 일별 온열질환 발생 순위와 폭염-건강 위험경보 수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)의 순위 차이를 의미하고 n 은 입력 자료의 총 개수를 의미한다.

한편, 질병관리본부의 온열질환 응급실감시체계는 특별·광역시 및 도(province) 단위로 자료가 제공되고 있다. 도(province) 전체로 제공되는 온열질환자수 자료를 이용하여 도내에서 발생한 시·군별 위험경보 수준을 평가하기에는 어려움이 따른다. 따라서 지역별로 단일 위험경보 수준이 발생하는 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산을 대상으로 평가하였다. 온열질환자수는 서로 다른 지역별 인구를 고려하기 위하여 인구 백만명당 환자수인 온열질환율(morbidity rate, 10^{-6} day^{-1})로 환산하여 이용하였다.

3. 결 과

3.1 2019년 시스템 운영 결과

국립기상과학원은 2019년 5월 1일부터 9월 30일까지 5개월간 폭염-건강영향예보 지원시스템을 운영하였고, 기상청 폭염 영향예보를 지원하고자 시스템에서 예측된 지역별 위험경보를 기상청 예보관에게 제공하였다. 2019년 5월부터 9월까지의 지역별 위험경

보 발생빈도 차이를 분석하기 위하여, Table 1에는 지역별 발생한 위험경보 수준별(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) 발생빈도(%)를 나타내었다. 발생빈도(%)는 0000UTC에 예보된 LD1 자료를 이용하였고 분석 지역은 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산이다. 지역별로 발생한 위험경보 수준에는 차이가 있었으나 서울을 제외한 대부분 지역에서 GREEN과 YELLOW가 많이 발생하였다. 이 중 GREEN의 발생빈도는 부산(51.6%)에서 가장 높았고 YELLOW의 발생빈도는 광주(48.4%)에서 가장 높았다. 서울에서는 GREEN 또는 YELLOW보다는 ORANGE의 발생빈도(40.0%)가 가장 높았다. 모든 지역에서 열 스트레스 강도가 가장 높은 RED는 가장 낮은 빈도로 발생했고 서울과 광주에서 각각 8.5%로 높은 빈도율을 보였다.

폭염-건강 위험경보 수준은 시기별로 다르게 나타날 수 있다. 따라서 지역별 위험경보 수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)의 월별 발생빈도(%)를 분석하였다(Fig. 4). 지역별로 월별 발생한 위험경보 수준에는 차이가 있었으나 대부분 지역에서 5월과 9월에는 GREEN의 발생빈도가 높았고 6월에는 YELLOW의 발생빈도가 높게 나타났다. 7월에는 RED가 발생하기 시작하였고 YELLOW와 함께 ORANGE의 발생도 증가하였다. 8월에는 7월보다 RED의 발생이 증가하여 RED와 ORANGE의 발생빈도가 높게 나타났다. 서울과 광주에서 상대적으로 높았던 RED의 발생은 대부분 8월에 나타난 것이고 서울에서 높았던 ORANGE의 발생은 주로 5~7월에 나타난 것이다. 서울은 다른 지역보다 ORANGE의 발생(5월)이 빨랐고 6, 7월에 높게 나타났다. 또한 광주에서 높았던 YELLOW의 발생은 다른 지역보다 높았던 6월의 YELLOW가 영향을 미친 것이다(Table 1). 이러한 결과로부터 대부분 지역에서 5월과 9월은 상대적으로 열 스트레스가 낮은 시기이고 7월과 8월에는 상대적으로 열 스트레스가 높은 시기임을 알 수 있다.

열 스트레스 강도가 가장 높았던 시기인 7~8월에 대하여 위험경보 발생빈도 전국 분포를 분석하고자 하였다. 시스템의 예보구역으로 이용되는 전국 165개 지역에서 발생한 위험경보 수준별(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) 발생빈도(%)를 공간분포도로 나타내었다(Fig. 5). 발생빈도(%)는 0000 UTC에 예보된 LD1의 결과를 나타낸 것이다. 태백산맥이 위치해 있는 지역(인제, 평창, 정선, 태백)을 제외한 대부분 지역에서는 GREEN의 발생률이 20.0% 내외로 낮게 나타났다. 경남, 경기, 강원에서는 YELLOW의 발생률이 높았고 그 중 포천에서의 발생률이 약 80.0%로 가장 높았으며 전북, 전남, 경북, 충북, 충남, 대전에서는 ORANGE의 발생률이 높았다. 서울, 광주, 대구, 전북 일부지역(고창, 정읍, 임실, 남원, 김제, 전주, 익

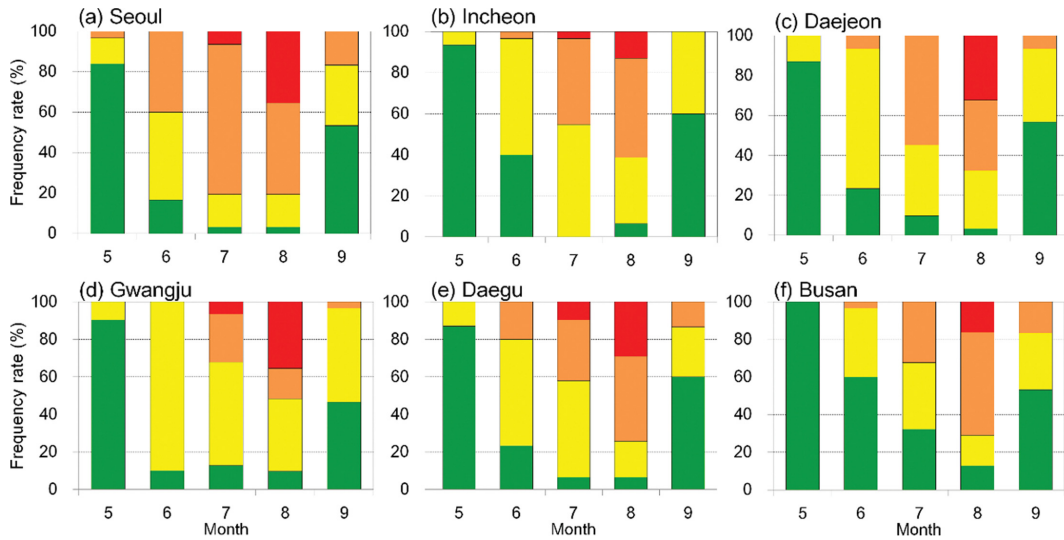


Fig. 4. Monthly change in frequency of risk levels (GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) issued for 6 cities by the impact-based heat health warning system from May to September in 2019 at first forecast lead day (LD1).

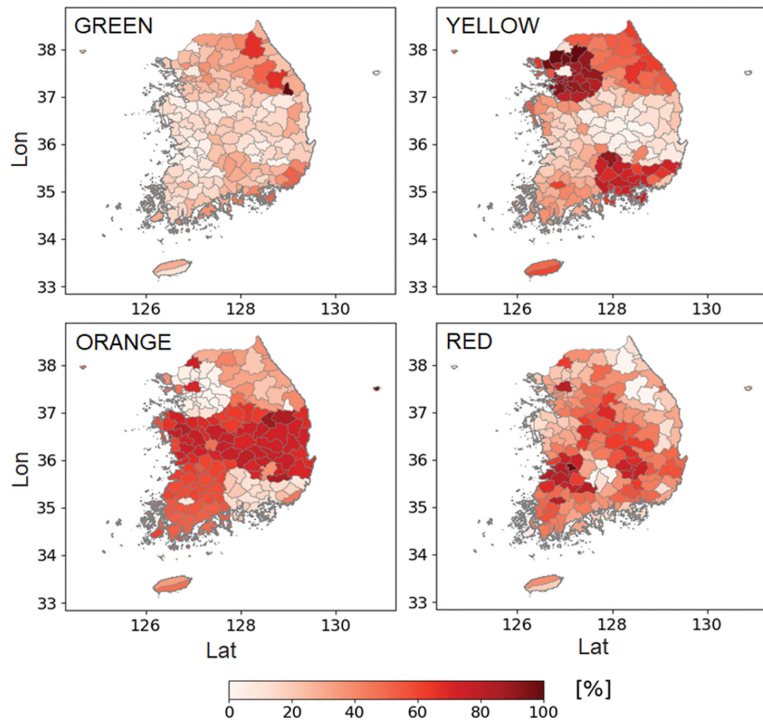


Fig. 5. Frequencies of risk levels (GREEN, YELLOW, ORANGE, RED) issued for 165 counties by the impact-based heat health warning system from July to August in 2019 at first forecast lead day (LD1).

산, 완주 등), 경북 일부지역(성주, 김천, 구미, 칠곡, 의성 등)에서는 RED의 발생이 가장 높았고 산맥에 위치해 있는 지역(인제, 평창, 정선, 태백, 영양, 청송,

거창, 함양, 장수, 무주 등)에서는 RED의 발생이 낮게 나타났다. RED가 LD1보다 LD3에서 넓은 지역에서 발생한 것을 제외하면 LD2와 LD3의 발생 패턴도

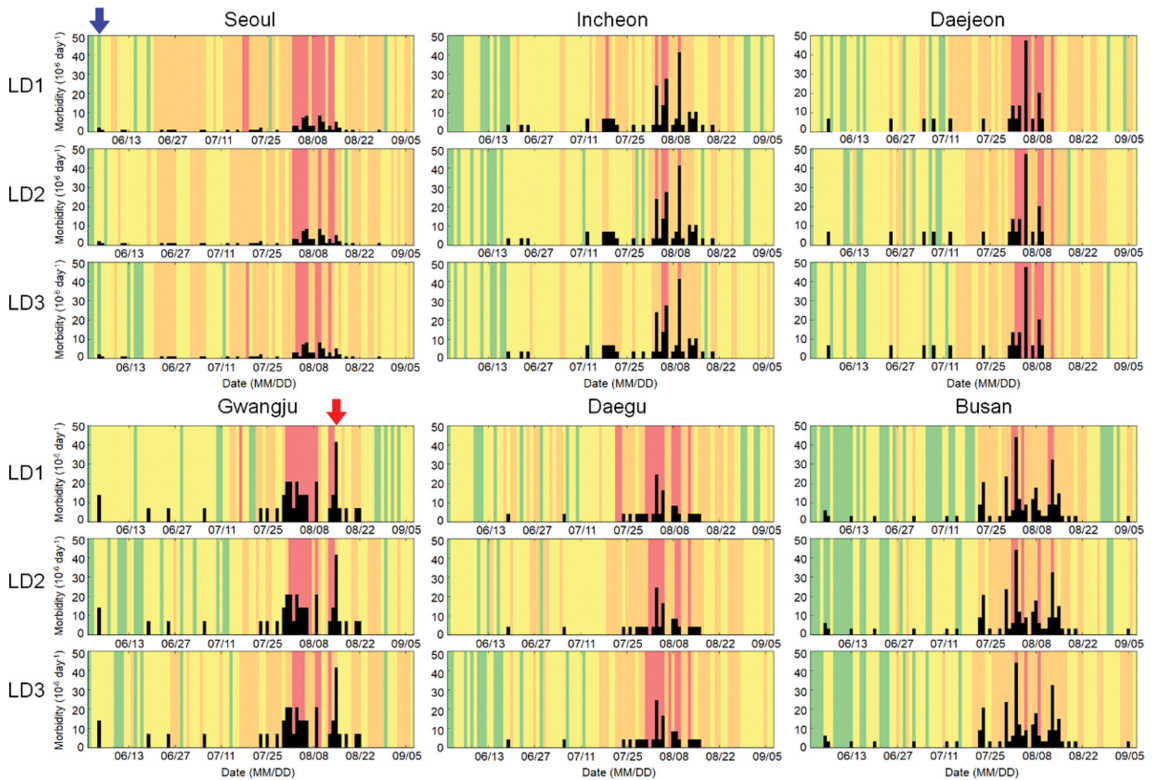


Fig. 6. Time-series of the risk levels (colors) issued for 6 cities compared to daily observed heat-related morbidity (black bars) from June to September in 2019 at first, second and third forecast lead day (LD1, LD2, and LD3). Blue arrow indicates missed detection and red one, false alarm.

LD1과 거의 비슷하게 나타났다.

3.2 2019년 폭염-건강 위험경보 수준 평가

기상청 예보관에게 제공된 2019년 시스템 운영 결과를 평가하고자 시스템에서 발생한 폭염-건강 위험경보 수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)과 온열질환율(10^{-6} day^{-1})의 일 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 평가 기간은 질병관리본부 온열질환 응급실감시체계 자료를 획득할 수 있는 기간인 2019년 6월 1일부터 9월 7일까지이다. Figure 6에는 각 지역(서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산)에서 발생한 일별 위험경보 수준(GREEN, YELLOW, ORANGE, RED)과 지역별 발생한 일별 온열질환율(10^{-6} day^{-1} ; 검정막대)을 선행시간 별(LD1, LD2, LD3; 0000 UTC 예보자료)로 나타내었다. 또한 Fig. 6에 상응하는 지역별 평가결과(r_s)와 평가 기간 동안 발생한 지역별 온열질환율(10^{-6} day^{-1})을 Table 2에 나타내었다.

우선, 지역별 온열질환자는 6월 초부터 발생하기 시작하여 7월 말과 8월 초에 최대로 발생하였고 8월 말 이후에는 거의 발생하지 않았다(Fig. 6). 평가 기간 동

Table 2. Spearman correlation coefficient of heat-related daily morbidity and warnings issued according to daily PTmax for three lead days in 6 cities of South Korea (p -value < 0.001; June to September).

	Lead day			Morbidity rate (10^{-6} day^{-1})
	LD1	LD2	LD3	
Seoul	0.36	0.39	0.45	78
Incheon	0.49	0.48	0.58	215
Daejeon	0.42	0.38	0.33	162
Gwangju	0.52	0.45	0.34	289
Daegu	0.46	0.46	0.46	117
Busan	0.56	0.49	0.46	278
Mean	0.47	0.44	0.44	190

안 발생한 온열질환자 수는 인구 백만명당 광주 289명, 부산 278명, 인천 215명, 대전 162명, 대구 117명, 서울 78명 순으로 발생하여, 광주에서 인구수 대비 가장 많이 발생했고 서울에서 가장 적게 발생했다(Table 2).

Figure 6에서 LD1에 대한 지역별 폭염-건강 위험경

보 수준과 온열질환율의 일 변화 패턴은 비슷한 것을 확인할 수 있다. 대부분 지역에서 온열질환자가 발생하지 않았거나 적었던 기간(6월 초~7월 중순, 8월말 이후)에는 GREEN, YELLOW, ORANGE가 발생했고 온열질환율이 높았던 기간(7월 말~8월 초)에는 ORANGE, RED가 발생했다. 특히 열 스트레스 수준이 가장 높은 RED는 대부분 지역에서 온열질환율이 높았을 때 발생하였다. 그러나 광주에서는 온열질환율이 가장 높았던 사례일(8월 14일)에 YELLOW의 경보를 발생하여 높은 열 스트레스 수준을 나타내지 못하였다(Fig. 6 빨간색 화살표 참고). 각 지역별 폭염-건강 위험경보와 온열질환자의 상관(r_s ; LD1)은 부산($r_s = 0.56$)에서 가장 높았고 광주($r_s = 0.52$), 인천($r_s = 0.49$), 대구($r_s = 0.46$) 대전($r_s = 0.42$) 순으로 상관이 높게 나타났다(Table 2).

선행시간 별 평가결과를 비교하면, 온열질환자가 많이 발생했던 기간(7월말, 8월초)에는 모든 지역에서 선행시간이 짧아질수록(LD3 → LD1) 높은 위험도(RED 등)가 많이 발생하고 연속적으로 발생하는 특성을 보였다(Fig. 6). 선행시간 변화에 따른 이러한 발생패턴 변화에 의해 선행시간이 짧아질수록(LD3 → LD1) 위험경보와 온열질환율의 상관도(r_s)가 변화하였다. r_s 를 지역 평균으로 비교한 결과 LD1 ($r_s = 0.45$)에서 상관이 가장 높았고 LD2 ($r_s = 0.42$), LD3 ($r_s = 0.42$) 순으로 감소하였다(LD1 > LD2 = LD3). 지역별로 선행시간 변화에 따른 r_s 를 비교하더라도 대부분 지역에서 선행시간이 짧아질수록 LD1에서의 r_s 가 높게 나타났다(Table 2). 대표적으로 부산에서의 선행시간 별 r_s 는 각각 0.56 (LD1), 0.49 (LD3), 0.46 (LD3)으로 나타났다. 그러나 이와는 다른 양상으로 서울과 인천에서는 LD3의 r_s 가 LD1보다 높게 나타났다(서울: LD3 > LD2 > LD1, 인천: LD3 > LD1 > LD2).

추가적으로 폭염-건강 피해가 가장 많이 발생했던 7~8월에 대하여 위험경보 발생빈도를 평가하였다. Table 3에는 7~8월 동안 발생한 지역별 온열질환율(10^{-6} day^{-1})과 함께 각 선행시간(LD1, LD2, LD3; 0000 UTC 예보자료)에 대한 지역별 평가결과(r_s)를 나타내었다. 7~8월의 평가결과에서도 전체기간의 평가결과와 마찬가지로 선행시간이 짧아질수록(LD3 → LD1) 지역 평균 r_s 가 증가하였다. LD1 ($r_s = 0.50$)에서 가장 높은 상관을 보였고 LD2 ($r_s = 0.47$), LD3 ($r_s = 0.46$) 순으로 감소하였다(LD1 > LD2 > LD3). 지역별로 선행시간에 대하여 r_s 를 비교하더라도 대부분 지역에서 선행시간이 짧아질수록 LD1에서의 r_s 가 높았다(Table 3). 예를 들어 광주의 경우, LD1, LD2, LD3의 r_s 는 각각 0.55, 0.49, 0.37로 나타났다. 7~8월의 선행시간 별 지역평균 r_s 는 0.49로 전체 기간($r_s = 0.45$)보다 평가결과가 좋음을 확인하였다.

Table 3. Spearman correlation coefficient of heat-related daily morbidity and warnings issued according to daily PTmax for three lead days in 6 cities of South Korea (p-value < 0.001; July to August).

	Lead day			Morbidity rate (10^{-6} day^{-1})
	LD1	LD2	LD3	
Seoul	0.41	0.39	0.53	68
Incheon	0.51	0.50	0.66	205
Daejeon	0.44	0.37	0.34	148
Gwangju	0.55	0.49	0.37	262
Daegu	0.49	0.48	0.51	114
Busan	0.65	0.61	0.52	260
Mean	0.51	0.47	0.49	176

4. 토 의

기상청 폭염 영향예보를 지원하기 위해 2019년 국립기상과학원에서 운영한 폭염-건강영향예보 지원시스템의 평가 결과는 본 시스템이 폭염-건강 위험경보에 사용하기 적절하다는 것을 나타내고 있다(6~9월 평균 $r_s = 0.44\text{--}0.47$, 7~8월 평균 $r_s = 0.47\text{--}0.51$). 특히, 6~9월(LD1 = 0.47) 보다 7~8월(LD1 = 0.51)에 높은 r_s 를 나타낸 것으로 보아(Table 2, 3), 본 시스템은 높은 열 스트레스 강도가 발생할 때에 적합도가 더 높아진다고 판단된다. 또한 3일 선행시간이 확보된 지역별 폭염-건강 위험경보 수준이 제공됨에 따라 예보관의 폭염 영향예보 의사결정에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그러나 폭염-건강영향예보 지원시스템은 지속적으로 개선되어야 할 사항이 존재한다.

Figure 5에서 전국에서 발생한 위험경보 분포는 도 단위로 비슷한 패턴을 보이고 있다. YELLOW, ORANGE, RED를 결정하는 위험가능성 도표의 영향축 임계온도가 특별-광역시 및 도 단위로 반영된 것을 그 원인으로 들 수 있다. 폭염-건강 위험경보를 상세 지역으로 세분화 하여 결정하기 위해서는 영향축의 임계온도를 폭염 관련 질병과 기후자료를 이용하여 상세지역별로 조정 하면 된다. 현재 이용중인 PT를 계산하기 위해서는 기온, 이슬점온도, 상대습도, 풍속, 운량(전체-중층), 운형(고-중-하층), 지리적 정보와 같은 여러 매개 변수를 필요로 한다. 그러나 구름이 관측되는 지점은 제한적이므로 PT를 이용하여 모든 지역의 열 스트레스 위험을 평가하기엔 어려움에 있다. 따라서 ASOS 지점뿐만 아니라 AWS 지점에서도 구름관측 또는 일사량 자료를 대체할만한 흑구온도(globe temperature) 관측(Thorsson et al., 2007) 등이 수행된다면 세부 지역별 열 스트레스 위험을 평가하기에 더욱 유용할 것이다. 더불어 폭염에 의한 건강 영향을 고려하기 위하여 현재 사용중인 인체 열 스트

레스 실험 결과와 폭염 사망자 자료를 이용한 사례기반 폭염 위험 분석 방법뿐만 아니라 다양한 피해 자료와 방법론을 활용하여 지역별로 적절한 임계온도를 결정하는 것도 중요하다.

본 시스템에서는 온열질환자가 발생하지 않거나 적게 발생했던 기간(6월 초~7월 중순, 8월말 이후)에도 YELLOW, ORANGE의 경보가 발생했다(Fig. 6). 평가자료로 사용된 질병관리본부의 응급실 내원 온열질환·사망자 자료는 전국 응급실 운영 의료기관 중 약 500여개의 기관만 참여하기 때문에 각 지역의 전체 자료를 포함하고 있는 것은 아니다(KCDC, 2018). 또한 많은 선행연구에서는 허혈성 심질환(ischaemic heart disease), 뇌혈관 질환(cerebrovascular disease), 심혈관계 질환(cardiovascular disease), 호흡기 질환(respiratory disease)에 의한 사망도 폭염에 의한 고온에 영향을 받는다고 알려져 있다(Saez et al., 2000; Huynen et al., 2001; Hajat et al., 2002, 2005; Gosling et al., 2009). 그러나 현재 이용되고 있는 온열질환자수 자료에는 한국표준질병·사인분류 기준의 온열질환 관련 질병코드(T67)만 포함 되어있는 실정이다. 이러한 이유로 실제 발생한 온열질환자는 집계된 통계 보다 더 많이 발생되었을 것으로 생각되며 이러한 시스템의 과대 경보는 이러한 사항을 적절히 고려하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 시스템에서는 온열질환자가 발생했다라도 GREEN의 위험경보가 발생한 사례(서울 6월 4일 등)가 존재한다(Fig. 6 파랑색 화살표 참고). 적은 수의 온열질환자가 발생한 사례지만 이는 시스템의 치명적인 오류일 수 있기 때문에 추후 개선되어야 할 사항이다.

한편, 지역별 위험경보 비교에서 서울은 다른 지역보다 ORANGE의 빈도가 높게 발생했고 그 발생은 대부분 6, 7월에 나타난 것으로 분석됐다(Table 1, Fig. 4). 이 때 서울에서 발생한 온열질환자 발생일수는 12 회로 다른 지역보다 2~3배 높았고, 온열질환자가 2, 3일 연속으로 발생했기 때문에 다른 지역보다 위험수준이 높게 나타난 것이 적절하였던 것으로 판단된다.

Table 2, 3에서 선행시간이 짧아질수록(LD3 → LD1) 높은 위험도(RED)의 발생빈도가 높아지고 평가 성능(r_s)이 증가하였다. 선행시간이 길어질수록(LD1 → LD3) 수치모델의 불확실성이 증가하기 때문에(Beloid et al., 2019), LD3에서 높은 위험도의 발생이 적게 나타났고 이러한 결과가 시스템의 평가결과에 반영된 것으로 생각된다. 그러나 서울과 인천에서는 LD3의 평가결과가 LD1보다 약간 좋게 나타났는데, 이는 평가에 이용된 기간이 짧기 때문에 적은 수의 위험경보 변화에도 r_s 가 영향을 민감하게 받았기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Table 2, 3에서는 온열질환자가 많이 발생한 광주, 부산, 인천에서 높은 시스템 성능(높은 r_s)을

보였다. r_s 는 각 그룹(폭염-건강 위험경보, 온열질환자)의 순위를 이용하여 산정되는 상관계수이므로 장기간 변동성이 있는 자료를 이용하여 평가를 수행한다면 더욱 정확한 평가결과를 얻을 것이라 생각된다. 현재 시스템은 2018년에 구축되었으나(Kim et al., 2018), 2019년도에 LENS의 해상도 개선(3 km → 2.2 km)과 함께 지역별 폭염-건강 영향 평가 방법이 개선됨에 따라 본 연구에서는 2019년 1년간의 결과에 대해서만 평가하였다(Table 2, 3). 또한 열 스트레스 피해 자료 중 신뢰성이 높은 통계청 사망원인 통계는 1년 이상 지연되어 제공(2019년 사망자는 2020년 하반기에 제공)되므로 평가에 이용하지 못하였다. 따라서 본 시스템의 적정성을 면밀히 검토하기 위해서는 지속적인 시스템 운영을 통한 장기 자료 구축과 함께 장기간의 평가가 필요하다. 또한 신뢰성이 높고 시·군·구 단위의 자료를 활용할 수 있는 통계청 사망원인 통계를 이용하여 대도시 이외에도 노약자의 인구비율이 높은 지역을 대상으로 추가적인 평가가 필요하다.

현재 PT는 4 km h^{-1} 의 속도로 걷고 있는 35세 남성을 대상으로 하는 KMM을 기반으로 하기 때문에 본 시스템은 가벼운 작업을 하고 있는 일반인을 고려하고 있다. 그러나 폭염에 의한 인체 건강 취약성은 지역기후, 문화, 사회기반시설 등의 요인에 의해 다르게 나타난다(Kovats and Hajat, 2008; Kim et al., 2009). 특히, 같은 열 노출이라도 고령군이 열 스트레스에 더욱 취약하다고 알려져 있다(Kovats and Hajat, 2008; Kysely and Kim, 2009; Kim et al., 2014; D'Souza et al., 2019). 따라서 연령대별 열 스트레스를 설명하기 위해 그 연령대에 알맞게 조정된 PT가 필요하다. 독일기상청(Matzarakis et al., 2020)에서는 고령군에 알맞도록 연령, 체중, 활동 조건을 수정한 Klima-Michel Senior Model (KMSM)을 도입했다. KMSM의 표준 인체는 평지를 시속 1 km로 걷고 있는 신장 1.75 m, 몸무게 70 kg의 70세인 남성이다. 추후 KMSM을 기반으로 산정된 PT를 이용하여 고령군으로 폭염-건강 영향예보를 확장 할 필요가 있고, 최종적으로는 한 시스템에서 두 가지 유형의 PT를 동시에 고려하는 방법이 개발되어야 한다. 또한 PT는 기상조건뿐만 아니라 신진대사나 의복 착의특성을 고려할 수 있으므로 노출환경(폭염/한파, 실내/실외) 및 작업강도 등을 다양하게 고려하여 목적에 맞게 세분화할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 기상청 폭염 영향예보를 지원하고자 국립기상과학원에서 개발된 폭염-건강영향예보 지원 시스템의 개념을 소개하였다. 또한 2019년 운영되고

기상청 예보관에게 제공되었던 시스템 운영결과를 분석하였고 지역별(서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산) 발생한 폭염-건강 위험경보 수준을 평가하였다. 3일의 선행시간이 확보된 지역별(시·군 단위의 165개 지역) 폭염-건강 위험경보 수준을 예보관에게 제공함에 따라 폭염-건강 피해 방지에 일조하기를 기대한다. 또한 본 연구에서 개발된 시스템이 관련부처의 상호 검증과 개선을 거쳐 폭염뿐만 아니라 다른 위험 기상 영향예보를 위한 유용한 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 기대한다. 특히, 폭염은 더욱 빈번하고 강하게 발생하고 그 지속일수가 증가할 것으로 전망됨에 따라 폭염과 관련된 정확한 폭염-건강 영향예보를 위해서는 기상-보건분야의 융합 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「생명·산업기상 기술개발」(KMA2018-00620)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- ASHRAE, 2001: *ASHRAE Handbook Fundamentals-8*. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, 892 pp.
- Azhar, G. S., D. Mavalankar, A. Nori-Sarma, A. Rajiva, P. Dutta, A. Jaiswal, P. Sheffield, K. Knowlton, and J. J. Hess, 2014: Heat-related mortality in India: excess all-cause mortality associated with the 2010 Ahmedabad heat wave. *PLoS One*, **9**, e91831, doi:10.1371/journal.pone.0091831.
- Belorid, M., K. R. Kim, and C. Cho, 2019: Bias correction of short-range ensemble forecasts of daily maximum temperature using decaying average. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s13143-019-00143-8.
- Blażejczyk, K., 2005: MENEX_2005-the updated version of man-environment heat exchange model. 14 pp [Available online at https://www.igipz.pan.pl/tl_files/igipz/ZGiK/opracowania/indywidualne/blazejczyk/MENEX_2005.pdf].
- Błażejczyk, A., K. Błażejczyk, J. Baranowski, and M. Kuchcik, 2018: Heat stress mortality and desired adaptation responses of healthcare system in Poland. *Int. J. Biometeorol.*, **62**, 307-318, doi:10.1007/s00484-017-1423-0.
- Byon, J.-Y., J.-S. Kim, J.-Y. Kim, B.-C. Choi, Y.-J. Choi, and A. Graetz, 2008a: A Study on the characteristics of perceived temperature over the Korean Peninsula during 2007 summer. *Atmosphere*, **18**, 137-146 (in Korean with English abstract).
- _____, J. Kim, B.-C. Choi, and Y.-J. Choi, 2008b: Forecast and verification of perceived temperature using a mesoscale model over the Korean Peninsula during 2007 summer. *Atmosphere*, **18**, 237-248 (in Korean with English abstract).
- CMA, 2019: Warning Signal-Heat wave, China Meteorological Administration. [Available online at http://www.cma.gov.cn/en2014/weather/Warnings/WarningSignals/201409/t20140919_261774.html].
- D'Souza, A. W., S. R. Notley, R. D. Meade, and G. P. Kenny, 2019: Intermittent sequential pneumatic compression does not enhance whole-body heat loss in elderly adults during extreme heat exposure. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, **44**, 1383-1386, doi:10.1139/apnm-2019-0364.
- Fanger, P. O., 1970: *Thermal comfort-Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press, 244 pp.
- Gagge, A. P., A. C., Burton, and H. C. Bazett, 1941: A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment. *Science*, **94**, 428-430.
- _____, A. P. Fobelets, and L. G. Berglund, 1986: A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans.*, **92**, 709-731.
- Giannaros, T. M., K. Lagouvardos, V. Kotroni, and A. Matzarakis, 2018: Operational forecasting of human-biometeorological conditions. *Int. J. Biometeorol.*, **62**, 1339-1343, doi:10.1007/s00484-018-1525-3.
- Gosling, S. N., J. A. Lowe, G. R. McGregor, M. Pelling, and B. D. Malamud, 2009: Associations between elevated atmospheric temperature and human mortality: a critical review of the literature. *Clim. Change*, **92**, 299-341.
- _____, and Coauthors, 2014: A glossary for biometeorology. *Int. J. Biometeorol.*, **58**, 277-308, doi:10.1007/s00484-013-0729-9.
- Guest, C. S., K. Willson, A. J. Woodward, K. Hennessy, L. S. Kalkstein, C. Skinner, and A. J. McMichael, 1999: Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990, and predicted impacts in five major cities in 2030. *Clim. Res.*, **13**, 1-15.
- Hajat, S., R. S. Kovats, R. W. Atkinson, and A. Haines, 2002: Impact of hot temperatures on death in London: a time series approach. *J. Epidemiol. Community Health*, **56**, 367-372.

- _____, B. G. Armstrong, N. Gouveia, and P. Wilkinson, 2005: Mortality displacement of heat-related deaths-A comparison of Delhi, São Paulo, and London. *Epidemiology*, **16**, 613-620.
- Heaviside, C., H. Tsangari, A. Paschalidou, S. Vardoulakis, P. Kassomenos, K.E. Georgiou, and E. N. Yamasaki, 2016: Heat-related mortality in Cyprus for current and future climate scenarios. *Sci. Total Environ.*, **569**, 627-633, doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.138.
- Höppe, P., 1999: The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int. J. Biometeorol.*, **43**, 71-75, doi:10.1007/s004840050118.
- Huynen, M. M., P. Martens, D. Schram, M. P. Weijenberg, and A. E. Kunst, 2001: The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environ. Health Perspect.*, **109**, 463-470.
- Hwang, M.-K., J. Yun, H. Kim, Y.-J. Kim, Y.-J. Lim, Y.-M. Lee, Y. Kim, E. Yoon, and Y.-K. Kim, 2016: Heat stress assessment and the establishment of a forecast system to provide thermophysiological indices for harbor workers in summer. *J. Environ. Health Sci.*, **42**, 92-101, doi:10.5668/JEHS.2016.42.2.92 (in Korean with English abstract).
- _____, M.-K., Y.-H. Kang, S. Kim, and Y.-K. Kim, 2019: Investigation of operation and improvement for heat watch warning system to provide health-weather information. *J. Environ. Sci. Int.*, **28**, 277-285, doi: 10.5322/JESI.2019.28.2.277 (in Korean with English abstract).
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T. F. Stocker et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- JMA, 2019: Weather Warning/Advisories, Japan Meteorological Agency. [Available online at <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/kouon/index.html>].
- Jendritzky, G., H. Staiger, K. Bucher, A. Grätz, and G. Laschewski, 2000: The perceived temperature: The method of the Deutscher Wetterdienst for the assessment of cold stress and heat load for the human body. *Proc. Internet Workshop on Windchill*, Meteorological Service of Canada.
- _____, R. de Dear, and G. Havenith, 2012: UTCI-Why another thermal index?. *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 421-428, doi:10.1007/s00484-011-0513-7.
- Kang, M., K. R. Kim, and J.-Y. Shin, 2020: Event-based heat-related risk assessment model for South Korea using maximum perceived temperature, wet-bulb globe temperature, and air temperature data. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **17**, 2631, doi:10.3390/ijerph17082631.
- KCDC, 2019: Korea Centers for Disease Control and Prevention. [Available online at www.cdc.go.kr].
- Kim, J., D.-G. Lee, and J. Kysely, 2009: Characteristics of heat acclimatization for major Korean cities. *Atmosphere*, **19**, 309-318 (in Korean with English abstract).
- Kim, D.-W., J.-H. Chung, J.-S. Lee, and J.-S. Lee, 2014: Characteristics of heat wave mortality in Korea. *Atmosphere*, **24**, 225-234 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-J., H. Kim, Y.-K. Kim, J.-K. Kim, and Y.-M. Kim, 2014: Evaluation of thermal environments during the heat waves of summer 2013 in Busan metropolitan area. *J. Environ. Sci. Int.*, **23**, 1929-1941 (in Korean with English abstract).
- Kim, K. R., M. Kang, J. S. Lee, M. Belorid, C. Cho, and J.-C. Ha, 2018: A test-bed for impact-based forecasts on human health during heat waves by implementing the threshold temperature and probability forecast. *Proc. Autumn Meeting of KMS*, 193 (in Korean).
- KMA, 2016: *Meteorological Technology & Policy vol. 9 No. 1*. Korea Meteorological Administration, 74 pp (in Korean).
- _____, 2019: Korea Meteorological Administration. [Available online at <http://www.kma.go.kr>].
- Koppe, C., 2009: The heat health warning system of the German meteorological service. In UmweltMedizinischer InformationsDienst, *UMID Special Issue - Climate Change and Health*, 39-43.
- Kovats, R. S., and S. Hajat, 2008: Heat stress and public health: a critical review. *Annu. Rev. Public Health*, **29**, 41-55.
- Kysely, J., and J. Kim, 2009: Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: How exceptional was the 1994 heat wave?. *Clim. Res.*, **38**, 105-116.
- Matzarakis, A., G. Laschewski, and S. Muthers, 2020: The heat health warning system in Germany-Application and warnings for 2005 to 2019. *Atmosphere*, **11**, 170, doi:10.3390/atmos11020170.
- McGregor, G. R., P. Bessemoulin, K. Ebi, and B. Menne, 2015: *Heat waves and health: Guidance on warning system development*. World Meteorological Organization and World Health Organization, 96 pp.
- Met Office, 2018: UK weather warnings [Available online at <https://www.metoffice.gov.uk/weather/warnings-and-advice/uk-warnings>].
- Meteoalarm, 2019: Weather warnings: Europe. [Available

- online at www.meteoalarm.eu].
- MOEJ, 2019: Heat Stress Index: WBGT, Ministry of the Environment of Japan. [Available online at <http://www.WBGT.env.go.jp>].
- NOAA, 2010: National weather service reference guide, National Oceanic and Atmospheric Administration, 133 pp.
- NIMS, 2018: *Advanced Research on Biometeorology and Urban Meteorology development Research of Advanced Applied Meteorological Instrument*. National Institute of Meteorological Sciences, 107 pp (in Korean).
- Parsons, K., 2002: *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance, 3rd edition*, CRC Press, Inc., 635 pp.
- Saez, M., J. Sunyer, A. Tobias, F. Ballester, and J. M. Antó, 2000: Ischaemic heart disease mortality and weather temperature in Barcelona, Spain. *Eur. J. Public Health*, **10**, 58-63.
- Sheridan, S. C., and L. S. Kalkstein, 2004: Progress in heat watch-Warning system technology. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 1931-1942.
- Staiger, H., G. Laschewski, and A. Grätz, 2012: The perceived temperature-a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int. J. Biometeorol.*, **56**, 165-176, doi:10.1007/s00484-011-0409-6.
- Thorsson, S., F. Lindberg, I. Eliasson, and B. Holmer, 2007: Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *Int. J. Climatol.*, **27**, 1983-1993.
- Urban, A., and J. Kysely, 2014: Comparison of UTCI with other thermal indices in the assessment of heat and cold effects on cardiovascular mortality in the Czech Republic. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **11**, 952-967, doi:10.3390/ijerph110100952.
- Wilks, D. S., 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences, 2nd edition*. Academic Press, 648 pp.
- WMO, 2015: *WMO Guideline on multi-hazard impact-based forecast and warning services*. World Meteorological Organization, 23 pp.