

ORIGINAL ARTICLE

2018년 폭염 기간 동안 경북의 내륙과 해안 도시 간 열 환경 비교 - 대구와 포항의 비교 -

추승현 · 안은지 · 김해동^{1)*}

계명대학교 환경과학과, ¹⁾계명대학교 자연과학대학 지구환경학전공

Comparison of Thermal Environment between Inland and Coastal Cities in Gyeongbuk during the Heat Wave of 2018 - Comparison between Daegu and Pohang -

Sung-Hyun Choo, Eun-Ji An, Hae-Dong Kim^{1)*}

Department of Environmental Science, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

¹⁾Major in Global Environment, Faculty of Environment, College of Natural Sciences, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

Abstract

The characteristics of time changes in air temperature, DI (discomfort index) and WBGT (wet-bulb globe temperature) were investigated for inland city (daegu) and coastal city (pohang) of Gyeongbuk Province during the 2018 consecutive heat wave season. The time when the temperature dropped below 33°C was around 19h in both regions. As such, the two regions were similar with respect to the time up to which the heatwave warning levels continued. However, the discomfort index (DI) was higher than 27 in Pohang. Most people feel unpleasant when an discomfort index of 27 or higher appears. The results indicated that Korea's night-time thermal environment during the summers is particularly poor in the southern coastal areas. WBGT began at 09:00 and lasted until 21:00, with a score of 31 or higher; this score, in principle, corresponded with the duration of outdoor activity in both regions. Therefore, it was found that outdoor work was at a level where all day long had to be stopped in both areas during the heat wave. Although time changes in temperature and WBGT were similar in both regions, Discomfort Index (DI) differed significantly. The difference refers to the fact that Pohang is strongly affected by the high heat capacity effect and the supply of water vapor from the sea.

Key words : Heat wave, Discomfort index, Wbgt, Heat capacity

1. 서론

2018년 여름은 1942년, 1994년과 함께 우리나라에

서 기상관측이 이뤄진 이래로 가장 더운 해로 기록되었
다. 여름철 일 최고기온과 일 최저기온 모두 기상관측이
래로 가장 높았으며, 폭염일수와 열대야 일수 등 폭염을

Received 17 May, 2021; Revised 28 June, 2021;

Accepted 8 July, 2021

*Corresponding author: Hae-Dong Kim, Major in Global Environment,
Faculty of Environment, College of Natural Sciences, Keimyung
University, Daegu 42601, Korea.

Phone: +82-53-580-5930

E-mail: khd@kmu.ac.kr

본 논문은 2020년도 계명대학교의 석사 학위논문의 축약본(일부)입니다.

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

Ⓒ This is an Open-Access article distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted
non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium,
provided the original work is properly cited.

나타내는 모든 지표에서 역대 최고치를 기록하였다. 남부 지방만이 아니라 중부 영서 지방에도 40°C를 넘어서는 기록적인 고온이 전국을 강타하였다(Hwang et al., 2019). 폭염의 원인은 지구온난화와 도시화에 있으며, 이 두 요인을 줄여야 폭염을 완화할 수 있다. 산업혁명은 인간의 생산 활동에 필요한 에너지를 화석연료에서 얻게 되면서 시작되었다. 산업혁명이 시작될 당시에 3억 명 정도에 지나지 않던 인구가 오늘날 78억여 명으로 늘어난 것도 화석연료 덕분이다. 화석연료로 인해 인류는 풍요로운 삶을 누리게 되었지만 그 대가로 발생한 이산화탄소가 지구온난화를 가져와 폭염을 가중시키고 있다(Park et al., 2011; An and Kim, 2019).

폭염의 또 다른 원인은 도시화에 있다. 대도시의 기온 상승에 미치는 영향은 지구온난화보다 도시열섬의 효과가 훨씬 큰 것으로 알려져 있다. 우리나라의 도시화율은 80%를 초과하고 있는데, 이것은 몇몇 도시형 국가들을 제외하고는 가장 높은 수준이다. 특히 서울, 부산, 대구 등 대도시의 도시면적 확장 속도는 뉴욕, 런던, 동경 등을 뛰어넘는 매우 빠른 수준이다(Lee and Kim, 2008). 도시열섬의 가장 큰 원인은 아스팔트 도로와 건축물이 늘어나면서 토양과 녹지가 사라지는 것에 있다. 인공구조물은 낮에 태양에너지를 더 많이 흡수하고 더 많이 저장한다. 이를 열용량의 증가라고 하는데, 열용량의 증가로 도시의 지표온도와 기온은 상시적으로 교외에 비하여 높은 상태가 된다(Moriyama, 2004; Kim et al., 2016).

우리나라의 여름철 고온현상은 1990년대 이후 발생 빈도와 강도가 뚜렷하게 증가하고 있는데 특히 2018년 여름철 고온은 전국적으로 기상관측망이 구성된 1973년 이래 가장 심각한 것이었다. 여름철 일 최고기온과 일 최저기온 모두 가장 높았으며, 폭염 일수와 열대야 일수 등 폭염을 나타내는 모든 지표에서 역대 최고치를 기록하였다. 기상청이 2018년 9월에 발표한 자료에 따르면 전국적으로 낮 최고기온이 33°C를 넘어서 폭염특보가 발령된 폭염 일수는 31.4일로 기상 관측 이후 최다였던 1994년 기록(29.7일)을 넘어섰다. 일 최저기온이 25도 이상인 열대야 일수도 17.7일로 나타나서 1994년 기록(17.4일)보다도 길었다. 야외 작업을 하는 사람들의 체감 더위 지수에 큰 영향을 미치는 일조 조건도 사상 최고 수준이었다. 일조시간이 695시간에 달해 1994년(680시간)을 넘어 역대 최장이었다. 뿐만 아니라 소위 말하는 일 최고기

온 38°C 이상의 슈퍼고온도 기승을 부렸다. 1942년 대구에서 한차례 기록되었을 뿐인 일 최고기온 40°C 이상도 8월 1일에 강원도 홍천(41.0°C) 등 무려 5개 기상관측소 지점에서 40°C 이상이 관측되었고, 여름의 고온이 약화되는 시기인 8월 14일에도 경북 의성(40.3°C)에서 40°C를 넘어서는 늦더위가 이어졌다(KMA, 2018).

이 연구에서는 2018년에 포항과 대구 두 지역에서 동시에 연속적으로 33°C 이상의 폭염특보가 이어진 시기를 대상(7월 12~26일)으로 기온만이 아니라 DI (Discomfort Index)와 WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature) 사용하여 동일 위도 대에 위치한 내륙 대도시(대구)와 해안 도시(포항)의 열적 환경의 차이를 조사해 보았다. 그 결과로부터 폭염시기 두 지역의 시간대별 열 환경에 어떤 차이가 있었는지 살펴보았다. 아울러 두 지역에 열적 차이가 발생하는 원인을 찾아보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2018년에 포항과 대구에서 동시에 연속적으로 폭염 특보가 발령되었던 시기를 대상으로 시간대별 기온, 불쾌지수(discomfort index), WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature)의 차이를 비교 분석하였다. 2018년 여름은 대기 상층에 발달한 티벳 고기압이 한반도까지 확장하여 대기의 상층에 고온의 공기가 지속적으로 유입되고, 대기 중하층에서 북태평양 고기압의 영향을 받아 덥고 습한 공기가 유입되어 장마가 일찍 종료되고 무더위가 이어졌다. 이로 인해 대구의 폭염일수는 26일, 포항은 15일로 평년보다 긴 기간 동안 나타났다. 연구 대상 지역은 포항과 대구는 도시열섬의 효과를 비교하기 위하여 도심과 교외지역의 대표지점으로 선정하였다.

기상자료는 기상청에서 관측한 포항과 대구의 기온, 상대습도, 풍속, 일사량을 사용하였다. 2018년의 폭염일은 대구와 포항이 연속으로 일 최고기온이 33°C 이상이었던 7월 12일부터 7월 26일까지 분석하였다. 불쾌지수는 Nakamura and Kitamura(1987)을 따라서 아래의 공식을 이용하였다. 이 공식으로 계산되는 값은 체감 섭씨온도와 유사하게 나오는 것으로 알려져 있으며, 불쾌지수 값에 따른 사람들의 고온 체감도는 Table 1과 같다. 일반적으로 사용하고 있는 불쾌지수 값은 화씨온도와 비슷하게 나오는데, 이들의 관계는 Table 1에 제시한 바와

Table 1. Values of Discomfort Index (DI) (Giles, 1990)

Value of DI(°C)	Value of DI(°F)	Conditions
≥ 32	> 90	State of medical emergency
32 > DI ≥ 29	90 > DI ≥ 85	Everyone feels severe stress
29 > DI ≥ 27	85 > DI ≥ 80	Most of population feels discomfort
27 > DI ≥ 24	80 > DI ≥ 75	Over 50% of population feels discomfort
24 > DI ≥ 21	75 > DI ≥ 70	Under 50% of population feels discomfort
> 21	70 >	No discomfort

Table 2. Warning criteria of Hyperthermia Prevention of MOE(Ministry of Environment) in Japan (Kim et al., 2015)

Stage	Criteria
Nearly Safety	WBGT < 21
Warning	21 ≤ WBGT < 25
Alert	25 ≤ WBGT < 28
Severe Alert	28 ≤ WBGT < 31
Danger	WBGT ≥ 31

같다.

$$DI = T_d - 0.55 \times (1 - 0.01 \times RH) \times (T_d - 14.5) \quad (1)$$

여기서 기온 T_d 는 건구온도(dry-bulb temperature (°C)), RH는 상대습도(relative humidity(%))이다.

WBGT는 Yaglou and Minard(1957)가 제안한 지수인데, 고온 조건 하에서 야외 군사훈련의 한계 조건을 찾을 목적으로 만들었다. 현재는 미국연방 직업 안전 보건국(OSHA), 미국 및 국내 군사훈련소, 일본, 호주, 홍콩, 기상청 등에서 열 환경 지수로 널리 이용하고 있다. 또한 ISO(국제표준기구) 규격 지표(ISO 7243)로, 야외 노동 환경에서 작업자가 고온으로 받는 열적 스트레스를 평가하는 지표로 이용되고 있다. WBGT를 계산하는 공식은 아래와 같다.

흑구온도(globe temperature(T_g)) 관측 자료가 있는 경우,

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (2)$$

흑구온도(T_g) 관측 자료가 없는 경우,

$$WBGT = 0.735 T_a + 0.0374 RH + 0.00292 T_a RH + 7.619 SR - 4.557 SR^2 - 0.0572 W_s - 4.064 \quad (3)$$

여기서 T_w , T_g , T_a 는 각각 습구온도(wet-bulb temperature(°C)), 흑구온도(°C), 건구온도(dry-bulb temperature(°C))이고, RH는 상대습도(relative humidity(%)), SR은 태양복사량(solar radiation(W/m²)), W_s 는 풍속(m/s)이다. WBGT를 계산하려면 흑구온도 관측값이 필요하다. 그러나 우리나라 주요 도시에 설치된 기상 관측소에서는 흑구온도를 측정하고 있지 않기 때문에 해당 자료가 없다. 그래서 이 연구에서는 식(3)을 이용하여 WBGT를 계산하였다. WBGT 값에 대한 인체의 고온 체감온도는 Table 2와 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기온과 습도의 비교

2018년 연속 폭염일을 대상으로 포항과 대구의 기온과 상대습도의 시간평균 분포를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 제시하였다. 두 지역 모두 11~19h에 걸쳐서 폭염 주의보 수준(33°C 이상)의 고온이 이어진 것을 볼 수 있다.

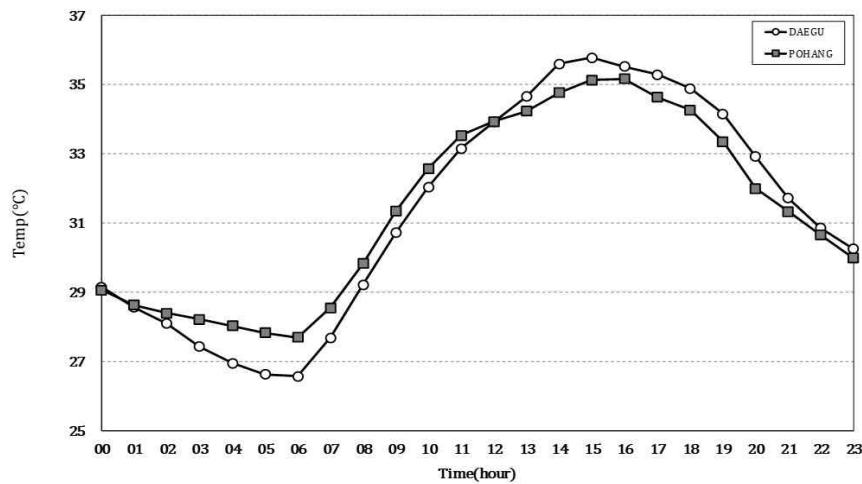


Fig. 1. Time variation of air temperature(°C) in Pohang and Daegu during heatwave period of 2018.

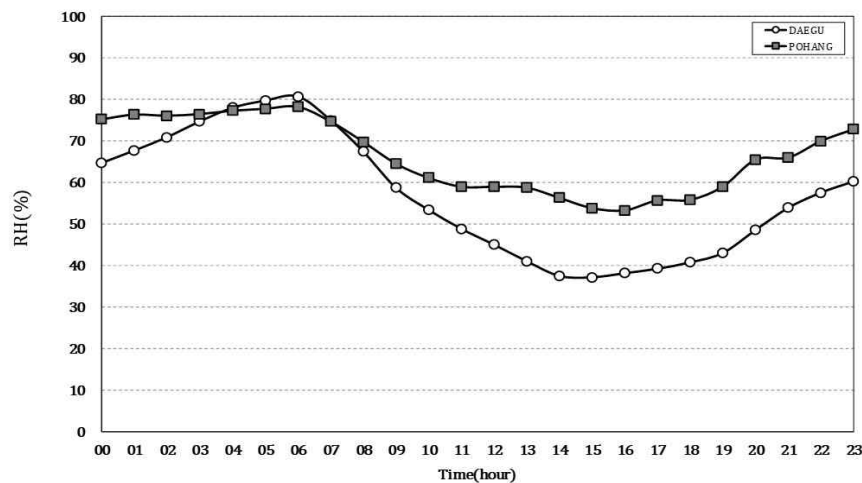


Fig. 2. Same as Fig. 1 but for relative humidity(%).

새벽부터 오전 11시까지 평균기온은 대구보다 포항이 약간 높게 나타났고 정오부터 자정까지 대구가 포항보다 더 높았다. 일출 후 정오경까지 기온 상승률은 대구가 포항보다 컸다. 일몰 후 기온 하강률도 포항보다 대구가 크게 나타났다. 또한 포항에서 일 최고기온이 나타나는 시간대는 대구보다 1~2시간 정도 늦은 16시경이었다.

이러한 기온의 시간변화 차이는 도시 내 인공구조물의 밀도가 훨씬 높다는 사실에 기인하는 것으로 추정할 수 있다. Kim et al.(2016)과 An et al.(2019) 및 Oke

and Maxwell(1975)은 도시열섬 연구를 통해서 인공구조물의 밀도가 높은 도시일수록 열용량(heat capacity)이 커지기 때문에 기온 상승과 하강 속도가 늦어진다고 지적한 바 있다. Yamajoe et al.(1999)도 Tokyo와 주변 야외 지역을 대상으로 기상관측을 수행하여 도심지는 교외에 비하여 일출 후 오전까지 기온상승률이 높고 일 최고기온이 나타나는 시간대는 더 늦어진다는 사실을 확인했으며, 그 원인은 도심지의 높은 열용량(heat capacity)에 있다고 지적한 바 있다.

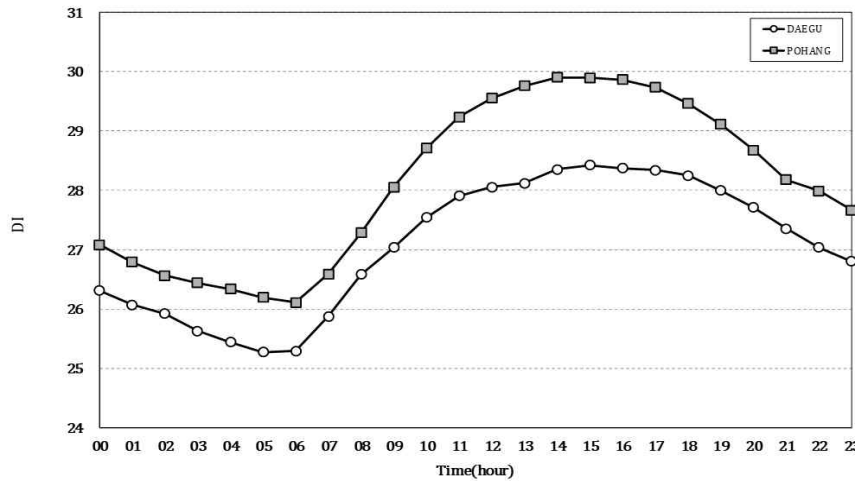


Fig. 3. Time variation of DI(Discomfort Index) in Pohang and Daegu during heatwave period of 2018.

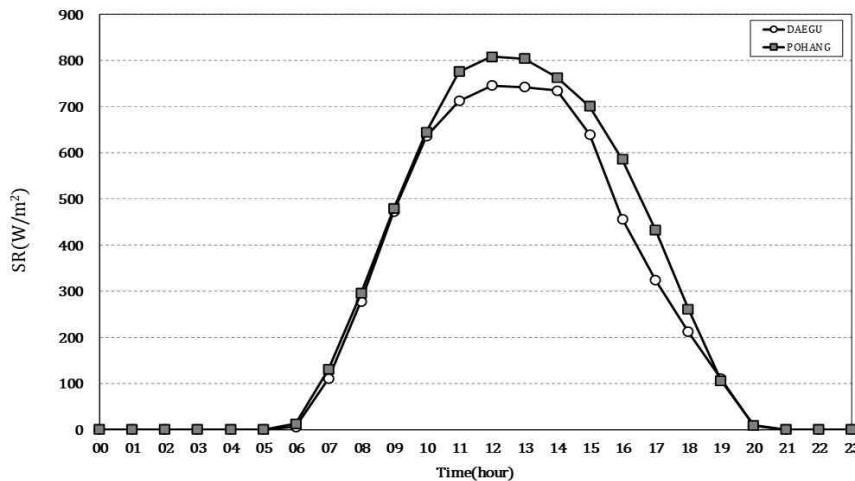


Fig. 4. Same as Fig. 1 but for solar radiation(W/m²).

포항은 대구에 비하여 인공구조물에 의한 도시의 열용량은 작겠지만, 열용량이 큰 해양에 접하고 있어서 포항의 도시 열용량이 대구보다 오히려 큰 특성을 보였다.

상대습도의 시간분포(Fig. 2)를 살펴보면, 대구의 상대습도는 일출 경에 약 80%로 높았지만 11~20 h에 걸쳐서 50% 이하로 낮았다. 반면에 포항에서는 기온이 높은 낮 시간에도 상대습도가 50%를 초과하였다. 11~23 h 동안에 두 지역 간 상대습도는 약 10~20%로 꽤 큰 차이를 보였다. 상대습도가 비슷하게 나타난 일출 전(3~6h)

에 대구보다 포항의 기온이 1°C 정도 높았다는 점을 고려한다면, 절대습도(g/kg)는 하루 종일 포항이 대구보다 많았다고 판단할 수 있다.

낮 시간 동안에 포항이 대구보다 기온이 낮지만 상대습도는 포항이 대구보다 10% 이상 높아서 포항의 고온 체감도가 대구보다 더 높았다.

3.2. 블랙지수와 WBGT의 비교

2018년 연속 폭염일 동안 포항과 대구의 DI와 solar radiation의 시간 평균 분포를 Fig. 3과 Fig. 4에 각각 제시

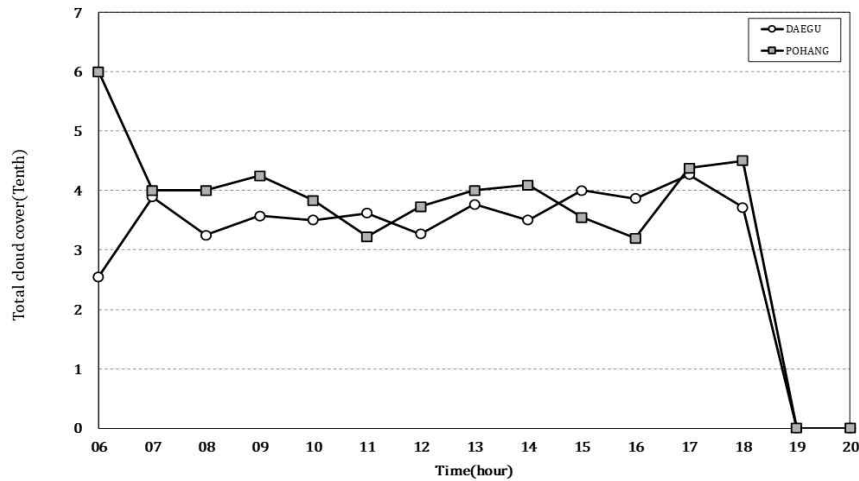


Fig. 5. Same as Fig. 1 but for cloudiness.

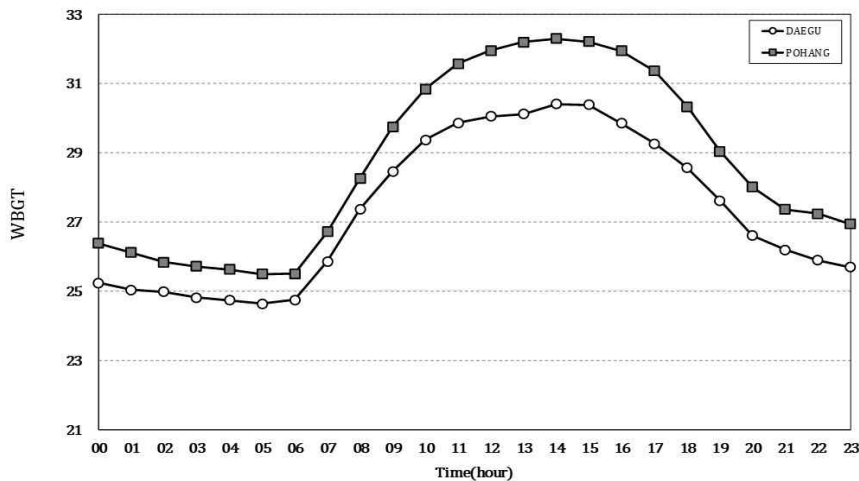


Fig. 6. Same as Fig. 1 but for WBGT.

하였다. 두 지역 간의 DI의 시간 분포를 비교해보면, 전반적으로 포항이 대구보다 높은 값을 보였다. 특히 포항에서 11-19 h 동안에는 DI 값이 29를 넘어섰는데, 이것은 모든 사람들이 심각한 고온 불쾌감을 느끼는 최고 등급에 해당한다. 하루 중에 가장 높은 DI 값이 대구는 15 h, 포항에선 14 h에 나타났다. 93% 이상의 사람들이 고온 불쾌감을 감지하는 DI 27 이상은 포항에선 08~23 h, 대구에선 09~22 h 동안에 나타났다. 이를 통해 두 지역 모두 심야에서 아침 시간대를 제외한 온종일 심각한 고

온 불쾌감에 노출되었다는 사실을 알 수 있다.

체감온도를 나타내는 데에 사용하는 가장 중요한 기상요소는 기온, 습도, 일사량 및 풍속으로 알려져 있다. WBGT는 식(3)으로부터 알 수 있듯이 이들 기상요소를 이용하여 야외에서 활동하는 사람들이 체감할 수 있는 고온 환경을 잘 나타낼 수 있는 지수이다. 또한 여름철 야외 체감 열 환경에는 일사량이 큰 역할을 한다. 이에 따라 Fig. 4에 시간 평균한 일사량 값을 제시하였다. 폭염기간 동안 일사량은 포항이 대구보다 많았다. 동일한 계절

내에서 일사량에 미치는 영향이 가장 큰 기상요소 (meteorological element)는 운량(cloudiness)이다. 그래서 이 기간 동안에 포항과 대구의 운량의 시간평균 자료를 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 대구에서는 12 h에 일사량이 가장 높았는데 1시간 동안에 약 2.68 MJ/m²로 평가되었다. 이것은 약 746 W/m²에 해당한다. 포항에서도 12 h에 일사량이 가장 많아서 1시간 동안에 약 2.91 MJ/m²로 평가되었다. 이것은 약 808 W/m²에 해당한다.

WBGT의 시간평균 분포를 Fig. 6에 나타내었다. DI와 마찬가지로 포항이 대구보다 높은 값을 보였다. 특히 포항에서 11~17 h 동안에는 WBGT 값이 31을 넘어섰는데, 이것은 특별한 사유가 없는 한 야외 활동을 멈춰야 하는 최고 등급(Danger)에 해당한다. 대구에서 09~18 h 사이에 야외 활동에 엄중 경고가 내려지는 단계인 WBGT 28 이상이 나타났고 포항은 이보다 1시간이 더 이어졌다. 이것은 포항과 대구 모두 낮에 온종일 야외 활동을 금지해야 하는 수준의 고온 열 환경에 노출되었다는 것을 말한다. 하루 중에 가장 높은 WBGT가 대구와 포항이 14 h에 나타났다.

4. 결론

우리나라 기상관측 역사상 가장 심각한 폭염의 해로 기록된 2018년에 전국에서 연속적으로 폭염 정보가 발령되었던 기간을 대상으로 포항과 대구의 폭염 현황과 지역 간 차이를 분석해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 하루 중 기온은 대체로 한낮에는 대구가 포항보다 높았고 야간에는 포항이 대구보다 1~2°C 높게 나타났다. 일 최고 기온은 대구에서는 15시, 포항에서는 16시 경에 나타났다. 일출 후 오전 동안 기온 상승률은 대구가 포항보다 빨랐다. 이러한 특성은 도시의 열용량을 높이는 인공구조물의 밀집도는 대구가 포항보다 높음에도 불구하고 포항은 해안도시라 바다의 영향으로 실제 지역의 열용량은 포항이 대구보다 크다는 사실을 말한다. 우리나라의 여름철 고온현상은 낮에는 내륙에서 심각하지만 야간 열대야 현상은 해안 도시에서 더 심각한데(KMA, 2011), 이것은 해양의 높은 열용량에 기인한다고 판단할 수 있다.

둘째, 실제 고온 열 환경 수준을 잘 나타낼 수 있는 DI

와 야외 고온 열 환경 수준을 잘 표현할 수 있는 WBGT를 이용하여 포항과 대구의 하루 중 체감온도를 조사해 본 결과 모든 시간대에서 포항이 대구보다 더 높은 열 환경 수준을 보였다. 특히 포항에서 낮 시간에 WBGT 최고 등급에 해당하는 심각한 고온 열 환경 수준을 보였는데 이는 높은 습도의 영향도 컸다.

셋째, 장래에 2018년과 같은 폭염의 해가 다시 나타날 경우에 인명피해를 줄이기 위해서는, 기온과 습도에 의존하는 체감온도보다 WBGT와 같이 야외 고온 환경을 잘 표현할 수 있는 고온 정보를 생산하고 그에 따른 노동 규제정책을 시행하는 것이 바람직할 것이다.

REFERENCES

- An, E. J., Kim, H. D., 2019, Analysis of the correlation between urban high temperature phenomenon and air pollution during summer in Daegu, *J. Environ. Sci. Int.*, 28, 831-840.
- Giles, B. D., Balafoutis, C., Maheras, P., 1990, Too hot for comfort: the heatwaves in Greece in 1987 and 1988, *Int. J. Biometeorol.*, 34, 98-104.
- Hwang, M. K., Kim, Y. K., Oh, I. B., 2019, Health risk estimation for daily maximum temperature in the summer season using healthcare big data, *J. Environ. Sci. Int.*, 28, 617-627.
- Kim, S. H., Kim, B. J., Kim, H. D., 2016, Diurnal variations in the horizontal temperature distribution using the high density urban climate observation network of Daegu in summer, *J. Environ. Sci. Int.*, 25, 259-265.
- Kim, S. R., Jung, E. H., Kim, H. D., 2015, Observational study to investigate thermal environment and effect of clean-road system over a broad way of Daegu in summer, *J. Environ. Sci. Int.*, 24, 1171-1180.
- KMA, 2011, Regional climate change report-Busan, Ulsan, Kyungnam-, Korea meteorological administration, Seoul, KOREA.
- KMA, 2019, 2018 weather yearbook, Korea meteorological administration, Seoul, KOREA.
- Lee, S. H., Kim, H. D., 2008, Effects of regional warming due to urbanization on daytime local circulations in a complex basin of the Daegu metropolitan area, Korea. *J. Appl. Meteor. and Climato.*, 47, 1427-1441.
- Moriyama, M., Takebayashi, H., Nogami, S., 2004, Experimental study on the measurement of sensible heat

- flux at the roof surface coated by high reflectivity paints, Fifth conference on urban environment.
- Oke, T. R., Maxwell, G. B., 1975, Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver, *Atmos. Environ.*, 9, 191-200.
- Park, M. H., Jung, W. S., Kim, H. D., 2011, A Study on urban environmental climate mapping method for sustainable urban planning in Daegu, *J. Environ. Sci. Int.*, 20, 465-482.
- Yaglou, C. P., Minard, D., 1957, Control of heat casualties at military training centers, *Arch. Indust. Health*, 16, 302-316.
- Yamajoe, K., Ushiyama, T., Mikami, T., Kimura, K., 1999, An Analysis of diurnal variations in the horizontal temperature distribution using the high density urban climate observation network in Tokyo metropolitan area: a comparison of the summer case with the autumn case. Monitoring and management of urban heat Island interim report, Japan Science and Technology Corporation, 16-22.
-
- Master degree. Sung-Hyun Choo
Department of Environmental Science, Keimyung University
chshsk6919@naver.com
 - Doctor's course. Eun-Ji An
Department of Environmental Science, Keimyung University
0601eunji@daum.net
 - Professor. Hae-Dong Kim
Major in Global Environment, Faculty of Environment,
College of Natural Sciences, Keimyung University
khd@kmu.ac.kr