

습구흑구온도지수 모델링을 통한 옥외 건설 현장의 고열 노출수준 추정

신새미 · 이혜민¹ · 기노성¹ · 채정수² · 변상훈^{2*}

고려대학교 보건과학연구소, ¹고려대학교 보건과학대학 보건안전융합학과,

²고려대학교 보건과학대학 보건환경융합과학부

Estimation of Extreme Heat Exposure at Outdoor Construction Sites through Wet Bulb Globe Temperature Modeling

Saemi Shin · Hea Min Lee¹ · Nosung Ki¹ · Jung Soo Chae² · Sang-Hoon Byeon^{2*}

Research Institute of Health Sciences, Korea University

¹*Health and Safety Convergence Science Introduction, College of Health Science, Korea University*

²*Department of Health and Environmental Science, College of Health Science, Korea University*

ABSTRACT

Objectives: In this study, the scale of exceeding the extreme heat exposure standard at the construction site was estimated using the nationally approved statistical data and wet bulb globe temperature modeling method. By comparing and analyzing the modeling results with the existing work environment monitoring results, the risk of heat exposure at outdoor construction sites was considered.

Methods: Using the coordinates of second level administrative districts and meteorological observatories as the key, the automated synoptic observing system data and building permit data for 2021 were matched. The wet-bulb temperature was obtained using Stull's formula, and the globe temperature was obtained using the T_{gKMA2006} model. WBGT was calculated using these. Excess rates were obtained compared to exposure limits for heavy work-continuous work and moderate work-25% rest. It was compared with the results of the work environment monitoring in 2020.

Results: As a result, 1,827,536 cases were estimated for 11,052 workplaces in one year. This is much higher than the 5,116 cases of 3818 workplaces of the existing work environment monitoring results. It is confirmed that the exposure limit was exceeded in 10.6~24.0% of the entire period and 70.2~84.1% of the peak period of the heat wave. It is very high compared to 0.9% of the existing work environment monitoring result.

Conclusions: It is necessary to improve the system of monitoring and statistics related to extreme heat. Additional considerations are needed regarding WBGT estimation methods, meteorological data, and evaluation time. Various follow-up risk assessment studies for other industries and time series need to be continued.


Key words: Wet bulb globe temperature, outdoor, construction site, extreme heat


I. 서 론


폭염은 사전적으로 매우 심한 더위를 뜻하며 국내 법


제도상에서는 기상법 시행령 제8조 제2항에 의해 위임된 예보업무규정(기상청훈령 제1013호)에서 33℃ 이상의 일 최고온도가 2일 이상 지속될 것으로 예상될 때


*Corresponding author: Sang-Hoon Byeon, Tel: 02-3290-5693, E-mail: shbyeon@korea.ac.kr, Department of Environmental Health, College of Health Science, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841
Received: November 15, 2022, Revised: December 10, 2022, Accepted: December 24, 2022

 Saemi Shin <http://orcid.org/0000-0003-2473-3244>

 Nosung Ki <http://orcid.org/0000-0002-0618-933X>

 Sang-Hoon Byeon <http://orcid.org/0000-0001-8641-9352>

 Hea Min Lee <http://orcid.org/0000-0001-9257-6434>

 Jung Soo Chae <http://orcid.org/0000-0003-2813-1902>

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.

폭염특보를 발표하도록 하는 기준을 통해 간접적으로 정의되고 있다. 당 특보 발표 기준은 주의보의 경우 국내의 경우 서울 지역의 초과 사망률을 근거로 초과 사망률이 발생하기 시작하는 수준, 경보의 경우 초과 사망률이 50%를 초과하는 수준으로 설정되었다(Park et al., 2007). 세계적으로 폭염의 정의나, 특보의 기준이 되는 온도가 통일되어 있지는 않다(Kim & Lee, 2007; Paek et al., 2018). 같은 강도의 폭염일지라도 폭염에 따른 피해 정도는 각 도시별 기후 특성에 따른 주민의 폭염에 대한 적응 정도에 따라 달라질 수 있기에(Kim & Lee, 2009) 동일 영향을 기준으로 하더라도 온도 기준이 달라질 수 있을 것이다.

폭염은 인체 내의 생리적 변화와 연관되어 있기에 인간의 유병률, 사망률 증가와 직접적인 관련성을 가지며(Kysely et al., 2009), 기상재해 중 사회에 미치는 영향이 가장 크다(Smoyer et al., 2000). 더구나 미래 기후 시나리오에 따르면 지구 온난화 추세와 함께 폭염 빈도수, 지속 일수, 폭염의 강도 등이 증가할 것으로 예상된다(Kim et al., 2020). 이에 따라 폭염에 의한 피해 역시 지금까지보다 더 커질 것이며, 반드시 영향을 예측하고 저감하여야 할 필요가 있다.

다만 국내의 직업적인 폭염 노출 위험에 관해 본격적인 연구가 시작된 지 그리 오랜 기간이 지나지는 않았다. 산업안전보건연구원에서는 2014년과 2019년에 옥외작업 종사자를 대상으로 폭염, 한파, 미세먼지 등 기후적 유해요인 전체에 대한 연구를 실시하였고(Park et al., 2014a; Lee et al., 2019c), 해당 사업 내용에 연관된 파생 연구 또한 진행되었다(Park et al., 2017; Lee et al., 2019a; Lee et al., 2020). 상기 연구들을 통해 지역별 고용조사, 인구주택총조사, 근로환경조사를 통한 옥외작업 종사자 및 기후 관련 유해요인 노출 근로자 규모 추정이 이루어졌으며, 기상관측자료를 통한 일정 기간의 기온 변화와 온열질환 감시체제와 산업재해사례분석 데이터에 기반한 일반 인구 및 근로자의 질병 및 사망 사례 파악 및 기후적 유해요인에 의한 건강 영향 분석이 이루어졌다. 또한 이복임 등(2022)은 근로환경조사 기반으로 고온 노출 옥외작업자의 성별, 학력 등 인구통계학적 특성과 주요 종사 업종 및 규모, 건강 문제에 대해 분석하였다.

그러나 기존의 연구에서 작업장 단위의 대상 파악과 작업장의 기상 조건을 파악하려는 시도는 없었던 것이 사실이다. 작업장소를 특정하려는 시도 또한 직업적인

폭염 노출 위험에 대한 연구에서는 여태까지 없었던 터다. 작업자의 건강 위험 관리에 작업장소에 관한 정보가 필요하다는 점(Mattila, 1985)에서 폭염에 관해서도 작업장 조사 연구가 이루어질 필요가 있는 바이다. 다만 개별 사업장의 조사에는 많은 시간과 비용이 소요되며, 상세조사 지점을 정확하게 특정하여 효율적인 자원 투자를 하기 위해서라도 전국 단위로 수집된 국가통계 데이터를 활용해 폭염 노출에 관한 대략적인 윤곽을 잡는 과정이 선행되어야 할 것이다.

국제표준기구(International Organization for Standardization, ISO)(1989)와 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)(2011)에서의 열의 노출이나 영향에 대한 표준적인 해석은 Yaglou와 Minard (1959)에 의해 도입된 습구흑구온도지수(Web Bulb Globe Temperature, WBGT)를 기준으로 삼도록 하고 있다. ACGIH는 대부분의 근로자가 중심 체온이 38℃를 넘지 않는 수준을 작업장에서의 WBGT 기준으로 정하고 있다(2011). 한국의 법적인 보건관리 역시 WBGT를 통해 이루어지며, 작업장에서 발생하는 열을 WBGT를 통해 나타낼 수 있다면 이 분야의 관계자와 정책결정자까지 익숙하게 이해할 수 있는 형태로 정보를 전달할 수 있을 것이다. 문제는 WBGT 계산에 필요한 자연습구온도, 흑구온도를 국가통계로 수집하고 있지 않다는 것인데, 이는 이미 개발된, 일반적인 기상 측정 요인들을 통해 WBGT를 추정하는 방법(Lee et al., 2019b)을 적용함으로써 해결 가능하다.

우선 상기 선행 연구에서 가장 큰 산업재해 피해가 발생한 것으로 밝혀졌으며(Park et al., 2014b; Lee et al., 2019d), 국가승인통계를 통해 착공 현장, 즉, 작업 현장의 수를 파악 가능한 건설업을 대상으로 설정하였다. 그리하여 본 연구에서는 국가승인통계 데이터를 활용해 건설 현장 수와 기상 조건을 파악하고 건설 현장별 WBGT를 모델링을 통해 추정함으로써 건설업에서의 고열 노출수준을 파악하고, 노출기준 및 기준 고열 측정 결과와 비교 및 분석하여 옥외 건설현장의 폭염에 의한 건강 위험성을 고찰하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 연구 대상

기상관측통계(승인번호 141002) 작성 절차에 따라

수집된 종관기상관측자료(자료 형태: 시간 자료; 기간: 2021년 1월 1일 00:00~2021년 12월 31일 11:59), 건축허가 및 착공현황(승인번호 116005) 작성 절차에 따라 수집된 건축인허가자료(기간: 2020년 4월~2022년 4월), 작업환경실태조사(승인번호 380003) 공표자료, 고용노동부 사전정보 공표목록으로 제공되는 2008년~2020년 작업환경측정 결과보고서를 본 연구의 연구 대상으로 활용하였다.

2. 연구 방법

1) 종관기상관측자료 및 건축인허가자료 간 매칭

우선 연구 대상 건축인허가자료에서 착공처리일, 사용승인일 두 항목을 활용하여, 인허가 건별로 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일 사이의 착공 일수를 산정하였다. 이때, 사용승인 구분이 미사용승인일 경우 실제 착공 기간을 알 수 없으므로 제거하였으며, 사용승인일이 착공처리일 이전일 경우 보고 오류거나 실제 착공일이 착공처리일과 크게 차이 나는 경우로 추정하여 제거하였다.

건축인허가자료의 시군구 항목과 종관기상관측자료의 기상관측지점 항목을 매칭 키로 두 통계 자료를 매칭하였다(Figure 1). 국토교통부 국가공간정보포털에서 제공하는 시군구 중심좌표와 기상자료개방포털에서 제공하는 기상관측지점 좌표 간의 하버사인(Haversine) 거리를 산출하여, 각 시군구와 가장 가까운 종관기상관측지점을 매칭하였다.

고용노동부 고시 제2020-48호 상의 고열 작업환경 측정 방법에 준하여, 각 종관기상관측지점별로 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 일별 최고 시간대의 WBGT를 산출하였고, 이 값은 각 시군구 착공 현장에서의 해당 일 및 시간의 WBGT 값으로 할당되었다.

개별 WBGT 값은, 우선, 종관기상관측자료의 기온(℃), 상대습도(%)를 식 1의 Stull이 개발한 기온과 상대습도의 경험식(Stull, 2011)에 대입하여 자연습구온도(Tw)를 산출하고, 종관기상관측자료의 기온(℃), 상대습

도(%), 풍속(m/s), 일사량(W/m²)을 식 2의 기상청 흑구온도 추정모델(Tg_{KMA2006})(Lee et al., 2019b)에 대입하여 흑구온도(Tg)를 산출한 후, 이를 식 3의 WBGT 모델 원형(Yaglou and Minard, 1959)에 대입함으로써 최종적으로 산출되었다.

$$Tw = Ta \tan^{-1}\{0.151977(RH+8.313659)^{1/2} + \tan^{-1}(Ta+RH) - \tan^{-1}(RH-1.67633) + 0.00391838 RH^{3/2} \tan^{-1}(0.023101RH)\} \quad \dots \text{식 1}$$

$$Tg = 0.926 Ta - 0.028 RH - 0.783 Ws + 10.443 (Slr)^{1/2} \quad \dots \text{식 2}$$

$$WBGT = 0.7 Tw + 0.2 Tg + 0.1 Ta \quad \dots \text{식 3}$$

Tw: 자연습구온도(℃), Ta: 건구온도(℃), RH: 상대습도(%), Tg: 흑구온도(℃), Ws: 풍속(m/s), Slr: 일사량(W/m²)

2) 고열 노출기준 초과 건수 산출

고용노동부 고시 제2020-48호 상의 고열 노출기준과 비교하여 초과 여부를 결정하되, 전국 단위로 일별 초과율을 산출하고, 각 시도 단위로 월별 초과율을 산출하였다. 고열 노출기준은 작업휴식시간비와 작업강도에 따라 결정되는데, 본 연구에서는 가장 가혹한 기준인 중작업 및 계속작업(25℃)과 건설업 옥외작업에서는 가장 낮은 수준의 업무부담일 것으로 기대되는 중등작업 및 25% 휴식(28℃)의 두 가지 기준을 하한 및 상한 기준으로 설정하였다.

3) 기존 고열 작업환경측정 결과와의 비교

작업환경측정 결과보고서 전체 출판연도에 대해 측정 사업장 수, 초과 수, 주요 측정 업종을 파악하였고, 최신 일개년도 자료를 바탕으로 옥외 건설현장 WBGT 모델링 결과와 기준연도, 작업환경측정 건수, 노출기준 초과 건수, 연간 및 폭염 최성기(7월~8월) 노출기준 초과율, 당해 연도 측정 실시 사업장 수, 당해 연도 측정 대

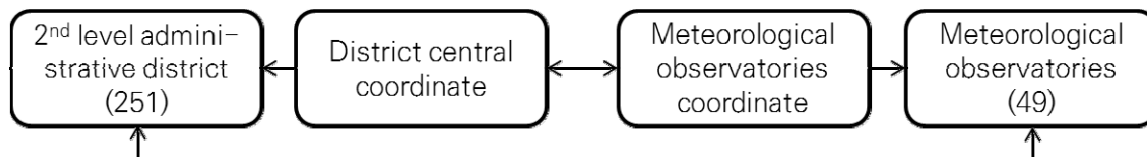


Figure 1. Matching the automated synoptic observing system data and building permit data

상 사업장 수를 비교하였다.

III. 결 과

1. 시군구 매칭 결과

건축인허가자료 상의 시군구와 종관기상관측자료 상의 기상관측지점을 매칭한 결과, 시군구와 기상관측지점 간 거리를 Table 1에 광역자치단체별로 최소거리, 최대거리, 평균 거리의 형태로 나타내었다. 평균 거리가 가장 짧은 광역자치단체는 광주광역시로 평균 거리는 7.89 km이며, 가장 먼 광역자치단체는 강원도로 33.2 km로 확인되었다. 기상관측지점과 가장 가까운 시군구

는 부산 지점과 매칭된 부산광역시 중구(9.61×10^{-2} km)이며, 가장 먼 시군구는 강화 지점과 매칭된 인천광역시 옹진군(87.5 km)이다.

2. 고열 노출기준 초과 건수

1) 일별 전국

일별 전국 착공 건수는 3,692건에서 6,184건, 일평균 5,007건, 1년 총계 1,827,536건으로 확인되었다. 25℃ 초과 건수가 나타나는 일수는 5월 12일에서 10월 15일 사이의 145일이며, 해당 기간의 초과 건수는 일평균 2,783건, 5건에서 4,973건 사이로 확인된다. 28℃ 초과 건수가 나타나는 일수는 5월 14일에서 10월

Table 1. Matching second-level administrative districts and automated synoptic observing system

First-level administrative district(count of second-level administrative districts)	Meteorological observatories(No. of observatories)	Minumun distance (km)	Maximum distance (km)	Average distance (km)
Seoul(25)	Seoul(108)	2.81	16.1	9.41
Busan(16)	Busan(159), Gimhae-si(253), Yangsan-si(257)	9.61×10^{-2}	16.4	7.78
Daegu(8)	Daegu(143)	4.97	19.2	9.37
Incheon(10)	Incheon(112)	1.43	87.5	19.0
Gwangju(5)	Gwangju(156)	3.82	12.6	7.89
Daejeon(5)	Daejeon(133)	3.52	10.7	8.59
Ulsan(5)	Gyeongju-si(283)	28.2	38.3	32.2
Sejong	Cheonju(131)	18.4	18.4	18.4
Gyeonggi-do (40)	Dongducheon(98), Paju(99), Chuncheon(101), Seoul(108), Incheon(112), Wonju(114), Suwon(119)	4.42×10^{-1}	43.6	18.1
Gangwon-do (18)	Bukchuncheon(93), Cheorwon(95), Daegwallyeong(100), Chuncheon(101), Bukangneung(104), Gangneung(105), Wonju(114)	1.47	73.2	33.2
Chungcheongbuk-do(14)	Chungju(127), Cheonju(131), Daejeon(133), Chupungnyeong(135)	6.43	38.8	20.2
Chungcheongnam-do(16)	Seosan(129), Cheonju(131), Daejeon(133), Jeonju(146), Hongseong(177)	2.82	48.2	26.2
Jeollabuk-do(15)	Chupungnyeong(135), Jeonju(146), Gochang-gun(251), Sunchang-gun(254)	2.00	40.2	21.4
Jeollanam-do(22)	Gwangju(156), Mokpo(165), Yeosu(168), Gochang-gun(251), Yeonggwang-gun(252), Sunchang-gun(254), Boseong-gun(258), Gangjin-gun(259), Gwangyang-si(266)	2.90	44.7	19.4
Gyeonsangbuk-do(24)	Ulleungdo(115), Chupungnyeong(135), Andong(136), Sangju(137), Pohang(138), Daegu(143), Cheongsong-gun(276), Gyeonju-si(283)	3.32	57.5	24.3
Gyeonsangnam-do(22)	Changwon(155), Yeosu(168), Jinju(192), Gimhae-si(253), Bukchangwon(255), Yangsan-si(257), Uiryeong-gun(263), Hamyang-gun(264), Gwangyang-si(266)	3.36	42.0	17.8
Jeju-do(2)	Jeju(184)	8.00	21.6	14.8

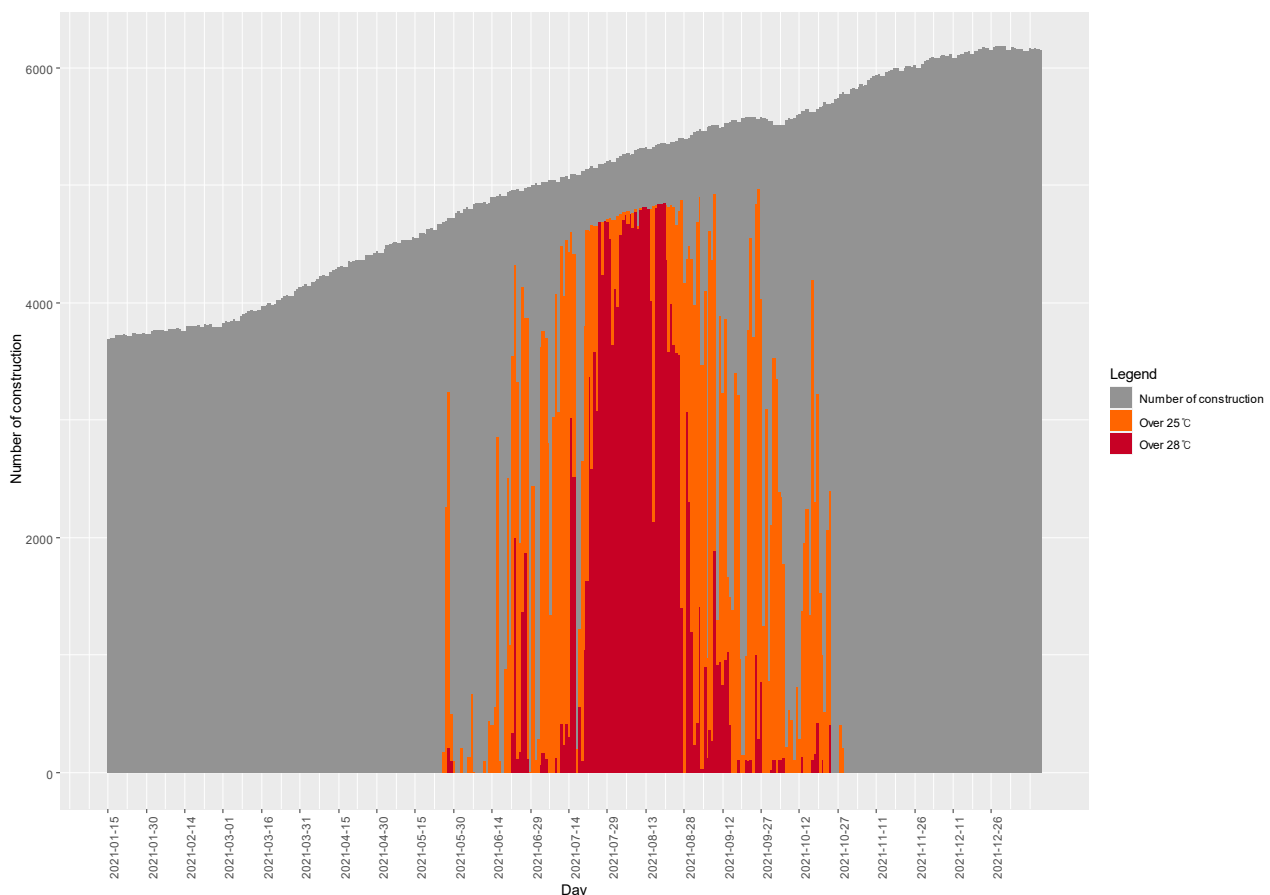


Figure 2. National daily number of construction and the number of cases exceeding the exposure limit

10일 사이의 96일이며, 해당 기간의 초과 건수는 일평균 526건, 27건에서 4,852건 사이로 확인된다. Figure 2를 통해 전국 일별 착공 건수 및 노출기준 초과 건수를 나타내었다.

2) 월별 시도

월별로 전국 및 광역자치단체별로 초과율을 도출한 결과를 Table 2에 나타내었다. 1월~4월, 11월~12월에는 초과 건이 나타나지 않았다. 인천의 경우 5월과 10월에도 확인되지 않았다. 5월의 전국 평균 초과율은 0.2~5.6%이며 지역별 초과율은 인천에서 가장 낮고(0.0~0.0%), 광주에서 가장 높은 것으로(3.3~13.2%) 확인되었다. 6월은 전국 평균 초과율은 5.3~52.9%이며 지역별 초과율은 인천에서 가장 낮고(0.0~20.2%), 광주에서 가장 높은 것으로(34.2~73.9%) 확인되었고, 7월에는 전국 평균 초과율은 70.2~84.1%이며 지역별 초과율은 충북에서 가장 낮고(49.8~57.2%), 제주도에

서 가장 높은 것으로(80.6~100.0%) 확인되었다. 7월의 경우 모든 시도에서 충북(49.8%)를 제외하고 최저 50% 이상의 초과율을 보였다. 8월은 전국 평균 초과율은 39.6~77.6%이며 지역별 초과율은 충북에서 가장 낮고(25.7~51.3%), 경남에서 가장 높은 것으로(69.8~97.0%) 나타났고, 9월은 전국 평균 초과율은 2.1~38.4%이며 지역별 초과율은 인천에서 가장 낮고(0.0~13.2%), 제주도에 가장 높게(33.2~86.6%) 나타났으며, 10월의 경우 전국 평균 초과율은 0.7~12.5%이며 지역별 초과율은 인천에서 가장 낮고(0.0~0.0%), 제주도에 가장 높았다(16.3~39.2%).

3. 기존 고열 작업환경측정 결과와의 비교

1) 고열 작업환경측정 결과 경향

2008년에서 2020년 사이의 전체, 그리고 가장 많은 비중을 차지한 업종 대분류에 대한 고열 작업환경측정 측정 개소와 노출기준 초과 개소를 Figure 3에 나타내

Table 2. The number of construction starts and cases exceeding the exposure limit by first-level administrative district per month

Mon- th	Class	First-level administrative district																	
		Total	Seoul	Busan	Daegu	Incheon	Daejeon	Gwang-ju	Ulsan	Sejong	Gyeong-gi	Gang-won	Chung-buk	Chung-nam	Jeonbuk	Jeon-nam	Gyeong-buk	Gyeong-nam	Jeju
1	Construction sites	115970	13654	3314	4287	1922	3160	1870	1987	299	43219	5845	6082	7765	3518	7654	4641	3877	2659
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
2	Construction sites	107515	13046	3115	3895	1889	2963	1631	1871	304	39368	5472	5418	7285	3204	7327	4262	3802	2533
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
3	Construction sites	127349	15182	3532	4541	2390	3407	1940	2102	367	47043	6500	6600	8555	3682	8790	5091	4544	2911
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
4	Construction sites	132822	15591	3636	4680	2797	3437	1912	2067	499	49220	7002	6929	8971	4115	8954	5500	4469	2836
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
5	Construction sites	146561	16433	4112	5075	3002	3732	2039	2297	594	54783	8150	7803	10099	4628	9841	5957	4592	3127
	Exceeding 25℃	8275	1052	423	164	0	721	269	150	36	2110	339	308	532	485	443	206	607	410
	Exceeding 28℃	309	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	6	41	94	0	0	0	101
	Excess rate(%)	0.2-5.6	0.0-6.4	0.0-10.3	0.0-3.2	0.0-0.0	0.0-19.3	3.3-13.2	0.0-6.5	0.0-6.1	0.0-3.9	0.0-4.2	0.1-3.9	0.4-5.3	2.0-10.5	0.0-4.5	0.0-3.5	0.0-13.2	3.2-13.1
6	Construction sites	149722	15654	4011	5615	3040	3453	2275	2446	672	56210	8910	8190	10662	4664	10035	6070	4434	3089
	Exceeding 25℃	79170	10835	2485	2821	615	2293	1681	1635	449	25793	3602	3356	6502	3274	6121	2522	3037	1864
	Exceeding 28℃	7880	0	420	188	0	695	778	165	69	2397	38	543	979	216	646	87	500	102
	Excess rate(%)	5.3-52.9	0.0-69.9	10.5-62.0	3.3-50.2	0.0-20.2	20.1-66.4	34.2-73.9	6.7-66.8	10.3-66.8	4.3-45.9	0.4-40.4	6.6-41.0	9.2-61.0	4.6-70.2	6.4-61.0	1.4-41.5	11.3-68.5	3.3-60.3
7	Construction sites	161298	16090	3992	6347	3294	3596	2891	2848	713	59821	10287	9096	12004	5008	10693	6327	4777	3213
	Exceeding 25℃	135601	15054	3751	5949	2973	3251	2620	2680	669	45946	9416	5204	11158	4488	9598	4936	4412	3213
	Exceeding 28℃	113293	12470	2958	4323	1703	3136	2442	2073	581	38562	7502	4529	9923	4171	8345	3653	4075	2591
	Excess rate(%)	70.2-84.1	77.5-93.6	74.1-94.0	68.1-93.7	51.7-90.3	87.2-90.4	84.5-90.6	72.8-94.1	81.5-93.8	64.5-76.8	72.9-91.5	49.8-57.2	82.7-93.0	83.3-89.6	78.0-89.8	57.7-78.0	85.3-92.4	80.6-100.0
8	Construction sites	168192	15998	3921	6600	3417	3483	3253	3025	750	62557	11206	10017	12663	5323	10669	6600	5168	3228
	Exceeding 25℃	130534	13916	3785	5103	2409	3257	2934	2637	628	43515	8221	5135	11114	4990	10233	4261	5014	3126
	Exceeding 28℃	66674	6680	2630	1890	432	2810	1869	1653	315	19155	3397	2570	5665	2985	6938	1852	3608	2092
	Excess rate(%)	39.6-77.6	41.8-87.0	67.1-96.5	28.6-77.3	12.6-70.5	80.7-93.5	57.5-90.2	54.6-87.2	42.0-83.7	30.6-69.6	30.3-73.4	25.7-51.3	44.7-87.8	56.1-93.7	65.0-95.9	28.1-64.6	69.8-97.0	64.8-96.8
9	Construction sites	166854	15653	3902	6697	3273	3278	3347	3270	722	62344	11368	10005	12459	5262	10203	6444	5107	3222
	Exceeding 25℃	64032	8867	2241	1782	433	2397	1888	979	292	18955	2552	2431	5731	2863	5577	1279	2893	2791
	Exceeding 28℃	3489	521	273	0	0	108	0	110	0	249	0	0	281	49	400	12	422	1071
	Excess rate(%)	2.1-38.4	3.3-56.6	7.0-57.4	0.0-26.6	0.0-13.2	3.3-73.1	0.0-56.4	3.4-29.9	0.0-40.4	0.4-30.4	0.0-22.4	0.0-24.3	2.3-46.0	0.9-54.4	3.9-54.7	0.2-19.8	8.3-56.6	33.2-86.6
10	Construction sites	173242	16604	3938	6798	3291	3490	3392	3551	726	65053	12001	10456	12415	5548	10618	6455	5293	3307
	Exceeding 25℃	21578	532	1224	1350	0	1235	906	802	150	2205	279	1245	2872	1431	3357	905	1689	1295
	Exceeding 28℃	1192	0	2	0	0	225	0	0	0	0	0	0	0	0	212	0	215	538
	Excess rate(%)	0.7-12.5	0.0-3.2	0.1-31.1	0.0-19.9	0.0-0.0	6.4-35.4	0.0-26.7	0.0-22.6	0.0-20.7	0.0-3.4	0.0-2.3	0.0-11.9	0.0-23.1	0.0-25.8	2.0-31.6	0.0-14.0	4.1-31.9	16.3-39.2
11	Construction sites	187233	18312	4305	7110	3572	3739	3629	3877	726	71675	12544	11151	12799	6119	11318	6802	5641	3688
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0
12	Construction sites	190778	19520	4488	6868	3664	3833	3782	4065	750	73290	12240	10964	12788	6086	11374	7094	5932	3850
	Exceeding 25℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Exceeding 28℃	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Excess rate(%)	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0

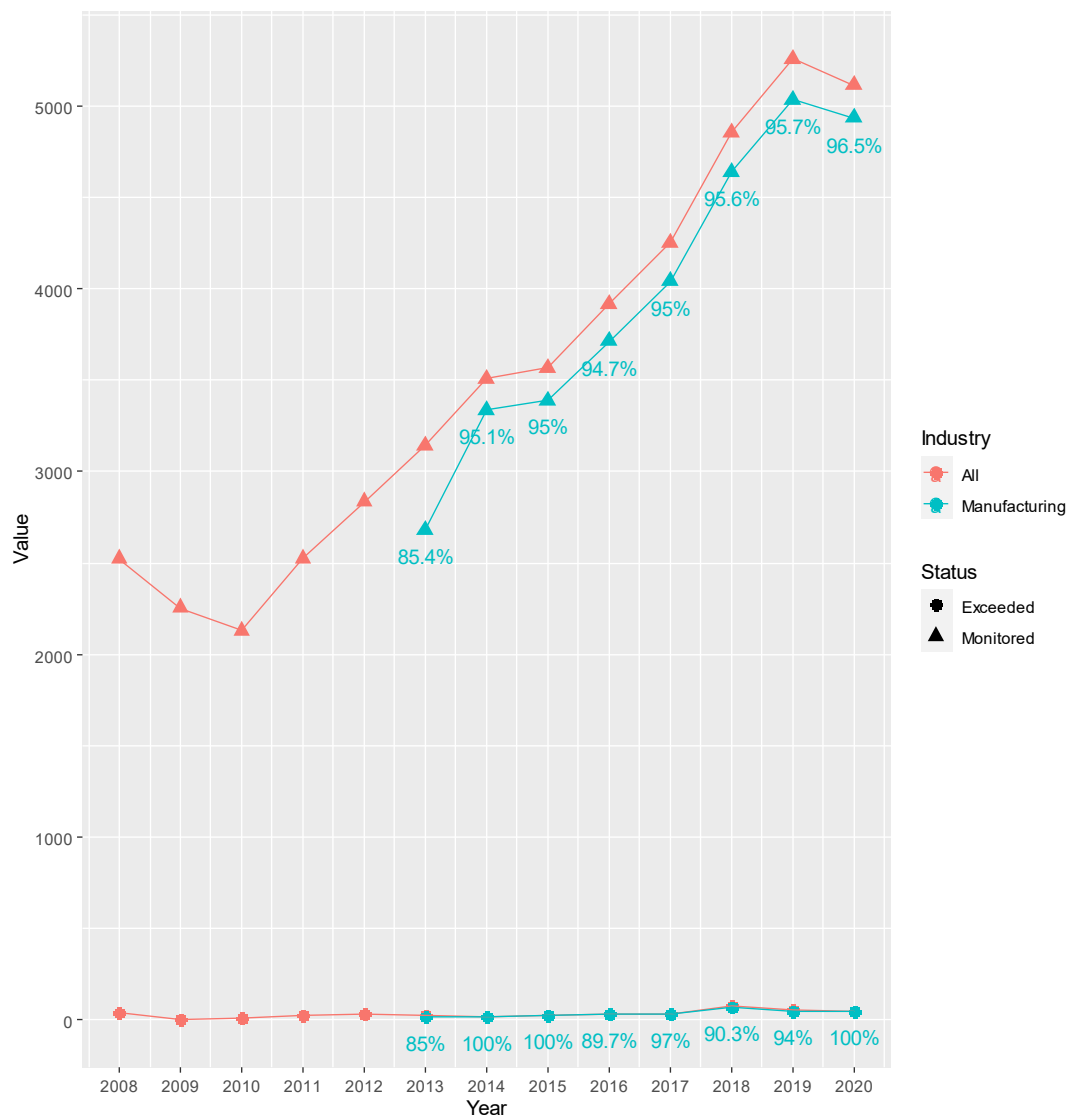


Figure 3. Existing work environment monitoring and the number of excess cases by year

Table 3. Existing work environment monitoring and the number of excess cases of construction by year

Year	First half		Second half		Total	
	Monitored	Exceeded	Monitored	Exceeded	Monitored	Exceeded
2013	1	0	3	0	4	0
2014	5	0	4	0	9	0
2015	5	0	6	0	6	0
2016	8	0	4	2	12	2
2017	10	0	6	1	16	1
2018	5	1	4	0	9	1
2019	5	0	6	0	11	0
2020	8	0	4	0	12	0
Total	29	1	23	3	84	4

었다. 측정 건수는 2008년 2,521건부터 2020년 5,116건까지 증가하는 추세이다. 고열의 주요 측정 업종은 업종별 통계를 공표하기 시작한 2013년 이후로 확인할 수 있으며, 고열의 주요 측정 업종 대부분은 제조업으로 전체 측정 사업장의 85.4~96.5%를 차지한다. 건설업의 고열 작업환경 측정 개소와 노출기준 초과 개소는 Table 3에 별도로 정리하였다. 건설업은 사실상 측정 대상에 해당하지 않는 상태임을 확인할 수 있다. 노출기준 초과율은 전체 측정 결과 기준으로 2008년의 1.2%를 제외한 모든 연도에서 1% 미만의 낮은 수준으로 나타났으며, 건설업의 경우 2013년부터 2020년까지의 측정 건수 84건 중 4건이 초과하여 초과율 4.8%로 확인되었다.

2) 고열 작업환경측정 결과와 옥외 건설현장 WBGT 모델링 결과 비교

2020년 고열 작업환경측정 결과와 2021년 옥외 건설현장 WBGT 모델링 결과에 대하여 기준연도, 작업환경측정 건수, 노출기준 초과 건수, 연간 및 폭염 최성기(7월~8월) 노출기준 초과율, 당해연도 측정 실시 사업장 수, 당해연도 측정 대상 사업장 수를 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 측정대상 개소수의 경우 가장 최근의(2019년) 작업환경실태조사 결과로부터 고열 보유 사업장 수를 인용하였다. 옥외 건설현장 WBGT 모델링 결과 연간 및 폭염 최성기 초과율은 각각 10.6~24.0% 및 70.2~84.1%이며, 고열 작업환경측정 결과 연간 초과율은 전체 업종 0.9%, 제조업 0.9%, 건설업 0%로, 모델링을 통해 건설업에 대해 도출한 초과율이 전체, 제조업, 건설업에 대한 고열 작업환경측정 결과의 초과율에 비해 크게 높은 사실이 확인되었다. 평가한 측정 또는 추정값의 개수 또한 작업환경측정 전체 업종

기준 5,116개와 건설업 모델링 1,827,536만 개로 차이가 컸으며, 19,134개 중 5,112개로 유해작업환경 보유 개소 대비 26.7%를 측정한 작업환경측정에 비해, WBGT 모델링의 경우 유해인자에 노출되는 대상 사업장 전체를 평가 가능하다는 점에서 차이가 있었다.

IV. 고 찰

본 연구를 통해 건축인허가자료와 종관기상관측자료를 각 자료의 시군구 및 기상관측지점의 좌표를 키로 매칭하여 착공현장별로 기상데이터를 할당하였고, 기상데이터를 WBGT 추정식에 대입하여 착공현장별로 WBGT 값을 산출하였다. 작업휴식시간비와 작업강도의 조합을 두 종류로 가정하여 WBGT를 고열 노출기준과 비교하여 초과율을 산출하였으며, 기존 고열 작업환경측정 결과와 비교하였다. 그 결과에 대한 주요 시사점은 우선, WBGT 모델링으로 평가한 옥외 건설 현장의 노출기준 초과율이 매우 높게 나타났다는 것이며, 이는 폭염 최성기(7월) 기준 기존 작업환경측정 초과율에 비해 최대 93.4배까지 큰 값으로 나타났다. 그리고 평가 가능한 건수나 대상 작업장 수 대비 측정 작업장 수 비율이 기존의 실측을 통해 확보한 값의 규모와 큰 차이가 있었다. 건수의 경우 3543배, 측정 작업장 수 비율은 5.0배의 차이를 보였다.

WBGT 모델링으로 평가한 옥외 건설 현장의 높은 노출기준 초과율은 건설업에서의 높은 건강 위험을 예측하는 근거로 활용할 수 있다. 한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원에서 수행한 두 번의 선행연구(Park et al., 2014b; Lee et al., 2019d)에서 모두 건설업이 고열에 의한 질환의 산업재해 중 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 확인되는 등 건설업의 고열에 의한 건강

Table 4. Comparison of existing working environment measurement results and modeling results at construction site

Items	Exist work environment monitoring sites			Construction sites assessed by modeling
	Total	Manufacturing	Construction	
Base year(year)	2020	2020	2020	2021
Work environment monitoring cases	5,116	4,936	12	1,827,536
Exceeding exposure limit cases	44	44	0	192,837-439,190
Excess rate(entire period)(%)	0.9	0.9	0	10.6-24.0
Excess rate(peak period)(%)	0.9	0.9	0	70.2-84.1
Work environment monitoring sites	3,818	-	-	11,052
Work environment monitoring target sites	19,134	-	-	11,052

위험은 산재 사례로도 확인된다. 최근 5개년도(2016~2020년) 산업재해 현황을 근로복지공단 산재보험 최초 요양신청 승인데이터를 통해 다시 확인한 결과 전체 159명 발생, 25명 사망 중 건설업은 75명 발생(47.2%), 15명 사망(75.0%)으로 이러한 경향에는 변함이 없다는 사실이 확인되었다.

그럼에도 건설업의 고열 노출은 여러 작업환경실태조사, 산업재해 현황(승인번호: 118006)과 같은 국가승인 통계로서 공표되거나 작업환경측정, 특수건강진단과 같은 국가 건강 감시 체계에 포함되지 못하여 공적인 영역에서 그 심각성이 드러나지 않고 있다. 산업안전보건법제 상의 고열은 산업안전보건기준에 관한 규칙(안전보건규칙) 제558조에 의해 '열에 의하여 근로자에게 열경련·열탈진 또는 열사병 등의 건강장해를 유발할 수 있는 더운 온도'로서 온도 그 자체로 정의되지만, 실질적인 고열 관리의 범위는 안전보건규칙 제559조에 정의된 고열작업으로 한정되며, 작업환경측정의 범위, 작업환경실태조사 시 유해작업환경 판정 기준은 안전보건규칙 상의 고열작업 해당 여부로서 사실상 규정된다. 현재 폭염 등 고열작업에 해당하지 않는 고열 노출원을 가진 경우 고열의 위험성이 누락되는 한계가 있으므로, 제도적인 개편이 시급한 실정으로 판단된다.

또한 환경 노출의 측면에서뿐 아니라 직업병 발생의 측면에서도 산업재해 현황의 공표항목으로 온열질환에 의한 산재가 포함되지 않고, 이로 인해 현재로서 어떤 데이터를 근거로 온열질환에 의한 산업재해자의 수를 어떻게 산출할지에 대한 표준이 존재하지 않으며, 국가 차원의 통계품질 관리도 기대할 수 없는 상태에 놓여 있어서, 공표항목의 추가 등 산업재해 현황 통계의 개선이 필요한 실정이다.

다만 건설업의 고열 건강 감시에 관해 논하고자 할 때 한 가지 고려해야 할 점이 있다. 건설업의 작업환경은 옥외 환경이며, 옥외 작업장은 실내 냉난방 및 환기 장치에 의한 온열환경 제어가 불가능하여, 사실상 온열환경 자체를 관리할 방편은 없다는 사실이다. 그리하여 옥외 작업장에서는 온열환경의 개선보다는 근로자 개인의 열 스트레스를 감소시키는 기법이 요구되게 된다.

미국 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)은 고열에 노출되는 근로자들의 건강 보호를 위하여 물, 그늘, 휴식을 제공할 것을 권고하였다(OSHA, 1999). 여러 연구를 통해 물, 그늘, 휴식의 건강 보호 효과의 검증이 이루어졌으

며(Bodin et al., 2016; Broberg 2018; Langer et al., 2021), 현행 한국의 폭염 노출에 대한 관리 조치 의무 또한 안전보건규칙 제566조, 제567조 및 제571조를 통하여 물, 그늘, 휴식을 기반으로 부여되고 있다. 그러나 국내에서 물, 그늘, 휴식을 어떤 방식으로 어느 정도 제공하여야 하는지에 관한 세부적 사항은 아직 마련되어 있지 않다. 본 연구에서 제안한 건축인허가자료와 종관기상관측자료 매칭 기법을 통해 관리 조치를 적용할 사업장 규모와 사업장의 기상 조건, 즉, 옥외 고열 노출수준 파악이 가능하며, 이는 관리 조치에 따른 비용 및 편익을 추정하는 과정에서도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

기존 고열 작업환경측정 결과와 비교해 WBGT 모델링 결과가 월등한 온도 값 산출 건수와 대상 사업장 수 대비 측정사업장 수를 확보할 수 있기는 하나, 실측치와 추정치로 데이터의 성질이 달라 단순 비교는 합당하지 않다. 실측 및 추정 조건의 차이를 인지하고 해석 시 유의하여야 한다. 본 연구에서의 평가는, 모든 건설 현장에서 보호 조치 없이 본 연구에서 설정한 작업휴식시간비(0% 또는 25%)로 일근로시간 동안 동일 양의 열에 연속적으로 노출된다는 가정하에 적합하다. 그러나 우선 시간에 따른 태양의 입사각 변동으로 일사량 자체에 일변이가 극심하며, 작업조건 또한 건설 현장에서의 모든 작업이 일사에 노출된 상태에서 연속적으로 이루어질 것이라고 가정할 수도 없다.

많은 양의 데이터를 고열 위험 추정에 효율성 있게 활용하기 위해서는 추정 및 평가 과정에서 발생하는 실제와의 격차를 줄이고 정확성을 높이기 위한 노력이 필요하다. WBGT 추정을 통해 측정을 실시하지 않는 사업장의 고열 노출을 파악하려는 시도는 많지 않았기에 많은 부분에 관한 논의가 추가로 이루어져야 할 것이다.

우선적으로 고려하여야 할 부분은 WBGT의 추정 방법이다. 본 연구에서는 국내의 경험식으로서 국내 기상 조건을 바탕으로 하여 개발되었고, WBGT 산출에 기전적으로 관계하는 기상요인을 최대한으로 포함한(4요인) 이유로 T_{gKMA2006} 모델을 선정하였다. 더 적합한 모델을 선정하거나, 기존의 모델을 보완한 신규 모델을 개발하는 것도 가능할 것이다.

다음으로 고려하여야 할 사항은 기상관측데이터의 종류이다. 본 연구에서는 기상 관측에서 생산되며 오랜 측정 기간을 보유하고 있어 신뢰성이 높고, T_{gKMA2006}

을 구성하는 4요인에 대한 측정값이 모두 존재하는 종관기상관측자료를 활용하였다. 그러나 기상자료개방포털에서는 다른 용도로 수집한 다양한 기상관측자료를 추가로 제공하고 있다. 예컨대 기온과 습도만을 활용하는 2요인 모델을 채택할 경우, 더 많은 측정 지점에서 측정하여 더 많은 데이터와 현장에서 더 가까운 정보를 확보 가능한 방재기상관측자료를 활용하는 것이 합리적일 수 있다.

기상청에서는 흑구온도에 대한 추정 모델을 개발(2006)한 이후 2016년 기온과 상대습도를 통해 WBGT를 추정하는 새로운 2요인 모델(KMA₂₀₁₆)을 개발하였으며, 이는 2020년까지 ‘더위체감지수’라는 이름으로 더위로 인한 건강 영향의 예측에 활용되었다. 일본에서는 활용되는 환경성 WBGT 추정 모델인 JME의 경우 4요인 모델이지만, 국내에서는 4요인 모델에서 필요로 하는 일사량의 측정 지점이 많지 않아 넓은 지역에서 추정이 가능한 더위체감지수의 활용성이 높은 것으로 평가되었다(Lee et al., 2019b). 본 연구에서는 기상요인을 다양하게 고려한 부분을 우선하여 T_{gKMA2006} 모델을 선정하였으나, 더위체감지수를 비롯한 다양한 모델을 적용하여 작업장에서의 활용 적합성을 판단할 필요가 있을 것이다.

세 번째 고려점은 작업강도 및 작업휴식시간비이다. WBGT를 통한 고열 평가에는 공기 중 기상요인을 측정하는 것에서 그치지 않고 작업조건이 필요하다. WBGT 모델링을 통해 작업장의 고열을 평가하고자 할 때는 작업조건에 관해 광범위하고 신뢰성 있는 데이터를 얻는 것에도 중점을 둘 필요가 있다. 본 연구에서는 Al-Bouwarthan et al.(2019)가 사우디아라비아의 건설업 10개 공정에 대해 국내에서도 준용하고 있는 ACGIH 작업강도 구분 기준을 바탕으로 작업강도를 평가한 것을 바탕으로, 옥외 건설현장에서의 활동을 최저 중등작업에서 최고 중작업으로 추정하였다. 작업휴식시간비의 경우, 옥외 건설 작업에 관한 별도의 시간활동양상 자료를 얻을 수 없어, 계속작업을 최저의 작업조건으로, 폭염경보 시 1시간당 15분의 휴식을 권고하는 고용노동부 가이드라인을 준수하는 경우를 최고의 작업조건으로 추정하였다. 차후의 연구에 업종별 시간활동양상에 대한 국내 실태조사 자료를 확보하여 활용할 시 정확성을 제고할 수 있을 것이다.

네 번째 고려점은 옥외 환경의 평가 기준 반영이다. 본 연구에서는 기존 고열 작업환경측정 결과와의 비교

를 위해 현행 작업환경측정 방법에 준하여 최고 노출 시간대의 시간자료를 활용하는 방법을 택하였으나, 옥외 고열 노출은 일변이가 심한 특성이 있으므로, 최고 노출 시간대의 시간가중평균을 대푯값으로 활용하는 현행 작업환경측정 방법은 현실적으로 적합하지 않다. 국내에서 준용하는 연속적인 작업에 대한 측정 방법 외에, ACGIH(2011)나 ISO(1989)에서는 일정 시간의 단속적 작업의 고열 노출량을 산출하는 방법으로 TWA를 권고하고 있으나, 해당 방안이 적절하지 않다는 의견이 제기되었다(Francesca et al., 2014). WBGT를 옥외 환경 평가에 적극적으로 활용하는 일본에서는 옥외 환경의 WBGT와 건강 위험 간의 관계를 분석하는 연구가 이루어지는 한편(Iwamoto&Ohashi, 2021; Oka et al., 2023), 시간대별로 WBGT 수준에 따른 안전 여부를 판정하는 등(Suzuki-Parker&Kusaka, 2016), 옥외의 환경적 특성을 WBGT 평가에 반영하려는 사례가 확인된다. 국내에서도 WBGT를 옥외 환경의 고열 평가용으로 활용하기 위해서는 특성을 반영한 방법의 변형이 필요할 것으로 사료된다.

상기에 기술한 WBGT 추정에 있어 고려할 부분, 즉, WBGT 추정 방법, 기상관측데이터, 변이가 큰 경우의 일 노출량 평가 방법에 대한 고려는 다른 업종에 대해서도 적용할 수 있고, 고민하여야 할 부분이다. 또한 본 연구는 시험적으로 1개년도 데이터를 대상으로 수행하였으므로 여러 연도의 데이터를 확보하여 시계열을 분석하는 것을 시도해볼 수 있다. 이러한 추가적인 연구 사안들을 보완하여, 기후적 열 스트레스의 옥외 작업자 노출과 그것이 건강에 미치는 영향에 관해 후속 연구가 다양한 종적, 횡적 관점에서 수행되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 국가승인통계 데이터와 습구흑구온도 모델링 기법을 활용하여 건설현장의 고열 노출기준 초과 규모를 추정하였고, 모델링 결과를 기존 작업환경측정 측정 결과와 비교 분석해 옥외건설현장의 폭염 노출에 의한 위험성을 고찰하였다. 중작업-계속 작업을 하한, 중등작업-25% 휴식을 상한으로 두고 평가한 그 결과 전체 기간의 10.6~24.0%, 폭염 최성기의 70.2~84.1%에서 고열 노출기준을 초과한 것으로 확인된다. 옥외 환경에 대책 없이 노출될 경우 건강 위험이 클 것으로 예측되어 적절한 관리가 필수적이며, 적절한 온도

기준의 설정과 빅데이터를 활용한 휴식시간 및 기간의 적절한 선정이 그 한 가지 방법이 될 수 있을 것이다. WBGT의 원활한 추정을 위해서는 추정 방법, 기상관측 데이터, 옥외 환경의 평가 기준 반영에 관하여 추가적인 고려가 필요하며, 시계열 데이터 또는 타 업종의 데이터를 대상으로 다양한 위험 평가 연구가 이어질 필요가 있다.

References

- Al-Bouwarthan M, Quinn MM, Kriebel D, Wegman DH. Assessment of Heat Stress Exposure among Construction Workers in the Hot Desert Climate of Saudi Arabia. *Ann Work Expo Health* 2019;63(5): 505–520. (<https://doi.org/10.1093/annweh/wxz033>)
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposures indices, 2011. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.; 2011. p. 1–307
- Bodin T, Garcia-Trabanino R, Weiss I, Jarquan E, Glaser J et al. Intervention to reduce heat stress and improve efficiency among sugarcane workers in El Salvador: Phase 1. *Occup Environ Med* 2016;73(6): 409–416. (<http://dx.doi.org/10.1136/oemed-2016-103555>)
- Broberg K. Water, rest, shade: Can simple actions stop an epidemic of chronic kidney disease of unknown etiology among farm workers in Central America?. *Scand J Work Environ Health* 2018;44(1):1–2 (<https://doi.org/10.5271/sjweh.3699>)
- Francesca RA, Jacques M, Boris IP, Giuseppe Ri. WBGT Index Revisited After 60 Years of Use. *Ann Occup Hyg* 2014;58(8):955–970 (<https://doi.org/10.1093/annhyg/meu050>)
- International Organization for Standardization(ISO). Hot environments – estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) – ISO 7243 Standard. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.; 1989. p. 1–9
- Iwamoto Y, Ohashi Y. Assessing the Climatological Relationship between Heatstroke Risk and Heat Stress Indices in 47 Prefectures in Japan. *GeoHazards* 2021;2(4):321–331. (<https://doi.org/10.3390/geohazards2040017>)
- Kim DH, Kim YH, Kim JW, Kim TJ, Moon HJ et al. Korean Peninsula Climate Change Prospect Report. Seogwipo; National Institute of Meteorological Sciences. Korea Meteorological Administration.; 2020. p. 1–38
- Kim JY, Lee DG. Characteristics of Heat Acclimatization for Major Korean Cities. *Atmosphere* 2009;19(4): 309–318
- Kim JY, Lee SH. The distribution of heat waves and 10 cause in South Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* 2007;42(3):332–343.
- Kysely J, Kim J. Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: how exceptional was the 1994 heat wave?. *Clim Res* 2009;38(2):105–116. (<https://doi.org/10.3354/cr00775>)
- Langer CE, Mitchell DC, Armitage TL, Armitage TL, Moyce SC et al. Are Cal/OSHA Regulations protecting farmworkers in California from heat-related illness?. *J Occup Environ Med* 2021;63(6): 532–539. (<https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002189>)
- Lee BI. Characteristics and health status of outdoor workers exposed to high temperature. *Korean J Occup Health Nurs* 2022;31(2):95–103. (<https://doi.org/10.5807/kjohn.2022.31.2.95>)
- Lee JH, Kang DY, Lee SH, Kim EJ, Lee WH et al. Analysis of the status of workers exposed to high temperature, low temperature and dust – 4th and 5th Korea Work Environment Survey (KWCS). *Proceedings of the Conference of the Annals of Occupational and Environmental Medicine* 2019; 133–134.
- Lee JH, Lee YH, Yoon MJ, Yoon JH, Kang MY et al. High temperature exposure and health effects of workers – a systematic literature review. *Proceedings of the Conference of the Annals of Occupational and Environmental Medicine* 2020; 187–188.
- Lee JS, Kim KR, Cho CB. Evaluating the accuracies of the WBGT estimation models and their onsite applicability in Korea. *J Korean Soc Hazard Mitig* 2019;19(4):53–63 (<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.4.53>)
- Lee WH, Yoon JH, Kang SG, Choi WJ, Ham SH et al. Research for the outdoor workers' health management related with climate change. Ulsan; Occupational Safety and Health Research Institute. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2019. p. 1–7
- Lee WH, Yoon JH, Kang SG, Choi WJ, Ham SH et al.

- Research for the outdoor workers' health management related with climate change. Ulsan; Occupational Safety and Health Research Institute. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2019. p. 36
- Mattila MK. Job load and hazard analysis: A method for the analysis of workplace conditions for occupational health care. *Occup Environ Med* 1985; 42(10): 656-666. (<http://dx.doi.org/10.1136/oem.42.10.656>)
- Occupational Safety Health Administration(OSHA). OSHA Technical Manual Section III. Chapter 4 Heat Stress. Salt Lake City, UT, USA: Occupational Safety Health Administration.; 1999. p. 1-17.
- Oka K, Honda Y, Phung VLh, Hijioka Y. Potential effect of heat adaptation on association between number of heatstroke patients transported by ambulance and wet bulb globe temperature in Japan. *Environ Res* 2023;216(3):114666. (<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114666>.)
- Paek SY, Kim SW, Jeong MI, Noh JW, Sohn SW. Classification of heat wave events in Seoul using self-organizing map. *J Climate Change Res* 2018; 9(3):209-221. (<https://doi.org/10.15531/KSCCR.2018.9.3.209>)
- Park J, Kim Y, Oh I. Factors affecting heat-related diseases in outdoor workers exposed to extreme heat. *Ann Occup Environ Med* 2017;29(1):1-6. (<https://doi.org/10.1186/s40557-017-0183-y>)
- Park JG, Jung WS, Kim EM, Song JH, Lee JE et al. A study on the setting of the heat wave warning stage in the Korean Peninsula. *Proceedings of the Spring Meeting of KMS* 2007: 404-405.
- Park JS, Kim YH, Park JS, Jeong IS. Occupational health protection strategies for outdoor workers exposed to heat, cold, and fine particles. Ulsan; Occupational Safety and Health Research Institute. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2014. p. 17-20
- Park JS, Kim YH, Park JS, Jeong IS. Occupational health protection strategies for outdoor workers exposed to heat, cold, and fine particles. Ulsan; Occupational Safety and Health Research Institute. Korea Occupational Safety and Health Agency.; 2014. p. 62
- Smoyer KE, Rainham DG, Hewko JN. Heat-stress-related mortality in five cities in Southern Ontario: 1980-1996. *Int J Biometeorol* 2000;44(4):190-197. (<https://doi.org/10.1007/s004840000070>)
- Stull R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. *J Appl Meteorol Climatol* 2011; 50(11):2267-2269. (<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0143.1>)
- Suzuki-Parker A, Kusaka H. Future projections of labor hours based on WBGT for Tokyo and Osaka, Japan, using multi-period ensemble dynamical downscale simulations. *Int J Biometeorol* 2016;60:307-310. (<https://doi.org/10.1007/s00484-015-1001-2>)
- Yaglou CP, Minaed D. Control of heat casualties at military training centers. *Arch Indust Health* 1957; 16(4):302-16

<저자정보>

신새미(연구교수), 이혜민(연구원), 기노성(연구원), 채정수(연구원), 변상훈(교수)