Journal of Environmental Science International
29(7); 773~784; July 2020

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.7.773

ORIGINAL ARTICLE

한반도 내륙 지역의 기후 변화 대응을 위한 극한기후 분석 및 적응 방안 연구 – 대구 광역시 사례를 중심으로 –

Yamada Keiko · 김해동 · 김은지[1] · 이순환[2)*]

계명대학교 자연과학대학 환경학부 지구환경학전공, [1)]부산대학교 지구과학과, [2)]부산대학교 지구과학교육과

Extreme Climate Analysis and Adaptation Research on the Response of Climate Change in the Inland Region of the Korean Peninsula - Case of Deagu Metropolitan Area -

Keiko Yamada, Hae-Dong Kim, Eun-Ji Kim[1)], Soon-Hwan Lee[2)*]

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

[1)]Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea

[2)]Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

In order to protect the lives and property of citizens, the central and local governments are responding by enacting municipal ordinances and regulations as the frequency of extreme weather conditions due to climate change increases and intensity increases gradually. Accordingly, the basic contents and strategies of domestic and foreign policies to cope with cold and heat waves were reviewed, referring to measures suitable for application to the Daegu metropolitan area. In addition, it is intended to provide a policy alternative to Daegu metropolitan area to minimize damage from extreme weather by identifying the current status, characteristics, and future prospects of extreme weather in Daegu metropolitan area. Since the damage caused by the cold wave in Daegu area is not as great as that of other regions, it is urgent to come up with cold wave measures for the health and transportation sectors, and to come up with measures against the heat wave as the damage caused by the heat wave is the most serious in the country. Also we will identify spatial characteristics so that the districts and counties with high vulnerability to extreme weather can be identified and implemented first, and present civic life-oriented facilities and civic action guidelines to overcome cold and heat waves.

Key words : Daegu metropolitan area, Cold wave, Heat wave, Countermeasure

1. 서 론

지구 온난화에 따른 한반도 지역의 기상 변화는 매우 급격히 일어나고 있다. 특히 2018년 여름은 우리나라에 전국적으로 기상관측망이 구성된 이래 폭염 일수와 열대야 일수 등 폭염을 나타내는 모든 지표에서 역대 최고치를

Received 30 June, 2020; **Revised** 13 July, 2020;
Accepted 17 July, 2020
[*]**Corresponding author**: Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone: +82-51-510-2706
E-mail: withshlee@pusan.ac.kr

ⓒ 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.

기록하였다. 이 시기에는 일 최고기온 38℃ 이상의 슈퍼 고온이 기승을 부리고 대구와 강원도 홍천 등 무려 5곳의 기상관측소에서 40℃ 이상이 관측되었다(KMA press release 17 Dec. 2018). 이러한 기록적인 폭염으로 인해 온열 질환자 수와 초과 사망자 수도 크게 증가하였다. 질병관리본부의 발표에 의하면 2011년부터 2017년까지 7년 동안 온열 질환으로 인한 사망자 수는 75명이었는데 2018년에 전국적으로 발생한 온열 질환 사망자 수는 48명이었다. 그리고 온열 질환자 수는 2017년 약 1570명이었는데, 2018년에는 2.7배인 약 4300명의 환자가 발생했다(KCDC, 2019). 농축산물의 고온 피해, 하천의 녹조 발생 등 생태계에도 큰 피해가 발생했다. 이와 같은 지구 온난화에 따른 고온 현상은 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 형태는 한반도 동남 내륙지역에서 급격히 일어나는 경향이 있다(Heo and Song, 2012).

그리고 지구 온난화에 따른 겨울철 한파 역시 종관 기상학적, 지정학적 영향으로 지속적으로 증가하고 있다. 최근 50년을 돌아보았을 때 2017년 겨울이 가장 기온이 낮았다. 2018년에는 우리나라에서는 큰 한파가 없었지만, 유럽과 북미 대륙에는 극심한 한파로 인해 사상자가 다수 발생하였다. 우리나라 겨울철 대설 재난을 분석해 보면, 정부 기관 및 국민들의 사전대비 강화와 인식 전환으로 인명피해는 감소추세에 있으나, 한랭 질환자가 지속적으로 발생하는 추세이다. 더불어 적설이 서해안과 강원 영동 지역에 집중되어 지역 편차가 크게 발생하였다(Kwon et al., 2016). 이러한 극한 기후는 현상의 원인을 파악(Heo and Lee, 2006; He et al., 2017; Lee et al., 2020), 피해 정도와 취약지역 파악(Kim and Kim, 2020, Kim et al., 2020), 대처 방안 제시(Lee et al., 2008; Heo and Song, 2012; Kang and Hong, 2018), 예보 능력 향상(Lavers et al., 2016; Guan and Zhu, 2017; Chung et al., 2019; Jung and Yu, 2019) 등 여러 분야에서 연구가 이루어져 왔다.

현재 기후변화로 인해 극한기후 발생 빈도가 증가하고, 강도가 강화됨에 따라 시민들의 인명과 재산을 보호하기 위하여 중앙정부와 각 지자체에서는 자치법규를 제정하여 대응하고 있다. 특히 중앙정부에서는 2018년 9월 재난법을 개정하였고, 폭염에 대한 법규는 규정되어 있으나 한파에 대한 법규는 아직 미미한 상황에 있다.

본 연구에서는 한반도 내륙에 위치한 대도시인 대구지역에서 발생하는 극한기후인 폭염과 한파의 특성을 분석하고 이러한 극한기후가 발생하였을 때 지역사회에서 효과적으로 대응할 수 있도록 여러 가지 대응책을 국내외 사례를 바탕으로 제안하고자 한다. 그리고 타 시도와 비교하여 극한기후의 차이점 및 발생 강도를 파악하여 대구지역에서 수립해야 할 적정규모의 대응책을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

연구대상 지역인 대구는 한반도 동남부에 위치하고 있고, 2017년 기준으로 총 인구는 2,475,231명이며 대구광역시 내 가장 인구가 많은 곳은 면적이 가장 넓은 달서구(578,068명)이며, 인구가 가장 적은 곳은 면적 또한 가장 작은 중구(78,896명)이다. 중앙저지대에 위치한 대구광역시는 침식분지인 대구 분지 중심에 위치하며, 한반도에서 대표적 분지로 알려져 있다. 금호강이 흐르는 동부와 서부는 남부와 북부에 비해 고도가 낮고, 분지 특성상 낮은 구릉지가 다수 위치하고 있다. 대구 광역시의 주요 하천인 금호강은 분지 중앙부를 동에서 서로 흐르면서 낙동강으로 합류하며, 신천은 남쪽에서 시내 중심부를 관통하여 금호강으로 합류한다(KMA, 2017).

본 연구에서는 최근 발간 보고서(기상청, 한국환경정책평가연구원, 국립재난안전연구원, 한국환경산업기술원, 국립기상과학원)에 제시된 내륙도시인 대구의 한파 현황, 폭염 현황, 장래전망, 폭염 취약성 평가, 한파 취약성 평가 자료를 바탕으로 대구 극한기후의 현황과 전망을 파악하였다. 대구 지역의 공간 상세 특성을 파악하기 위해 대구기상청을 대구의 대표 관측지점으로 하고, 공간 상세 지점으로는 대구기상청에서 운영하는 달성군, 서구, 수성구에 위치하는 자동기상관측자료(AWS)를 거리, 고도, 지향면, 해양도를 고려하여 내삽하고 1 km 해상도의 격자자료로 산출한 각 읍면동에 해당하는 격자를 평균하여 행정구역별 자료를 생산하였다. 고해상도 격자형 관측 자료 산출방법은 PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) 기법을 적용하였다. PRISM 기법은 점 데이터, 디지털 고도 모델(Digital elevation model) 그리고 기타 공간 데이터를 이용하여 연간, 월간 및 사건 기반기후 매개변수의 공간 추정치를 생성하는 모델이다. 이렇게 고해상도로 산출한

자료를 바탕으로 한파와 폭염 지수의 공간분포 및 시간 변화 경향을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 국내외 극한 기후 현황 및 대응

세계 각국은 지구온난화에 따른 극한 기상 현상의 발생에 대하여 다양하게 대응하고 있다. 미국은 기상청, 재해관리센터, 연방재난 관리청에서 폭염에 대한 대응을 하고 있다. 폭염은 5월 1일부터 9월 30일까지 감시, 주의, 경보/비상의 3단계로 열지수를 기준으로 특보 체계를 운영한다. 미국은 사전에 기상정보를 입수하여 폭염 취약 계층에 대한 정보와 대피 장소에 대한 정보를 확보한 후 폭염 발생 시 쿨링 센터 이용에 대한 정보를 방송을 통해 국민에게 전달한다. 미국에서 가장 대표적인 폭염 대응 시스템은 시카고의 폭염 대응 시스템이라 할 수 있다. 시카고에서는 1995년 7월 13일을 시작으로 일최고기온 41℃를 넘는 기록적인 무더위가 지속되면서 800명이 넘는 사망자가 발생하였다. 시카고는 폭염으로 인한 사망을 개인의 책임으로 돌리지 않고, 사회적인 원인으로 간주하여 그에 맞는 대응 지침을 만들어 운용하고 있다. 그 결과 1999년에는 1995년과 비슷한 규모의 폭염이 발생했을 때 인명 사망자는 110명에 그쳤다(Hayhoe et al, 2010). 이외에 필라델피아에서는 '자진 지원 시스템(Buddy system)'을 운영한다. 버디 시스템은 날씨가 더울 때 대중매체를 통해 친구, 친족, 이웃 등 지인들이 주변에 사는 노약자를 방문하길 권고하고 개인적인 주의와 보건 담당부서의 방문 등을 통해 인명 피해를 줄이는 것이다(Kalkstein et al, 1996). 그리고 뉴욕, 시애틀, 애틀랜타 등에서는 Cool roof 등 Green building program을 자치법규로 의무화하여 도시 열섬 현상 완화와 건물 노후화 속도 감소, 냉방시스템 전력 사용량을 줄여 온실가스 배출량 감소의 성과를 이루었다(Abair, 2008).

일본은 기상청, 환경성, 총무성, 후생노동성에서 폭염에 대한 대응을 한다. 일본에서는 안전, 주의, 경계, 매우 경계, 운동중지 등 5단계로 나누어 6월 1일부터 10월 31일까지 습구 흑구온도를 기준으로 특보를 발표한다. 일본은 수분 보충 등을 포함한 열사병 예방 권고를 시작으로 열사병 사고 모니터링을 통해 열사병 저감을 위한 야외활동 제한 권고를 한다. 도쿄에서는 열환경지도를 활용한 구체적 활용 방안에 대한 가이드 라인을 제공하여 건물 용도별로 대책을 마련하였다. 지상에는 자연 피복에 가까운 재료를 사용해 온도 상승을 줄이고, 수목녹화로 나무그늘을 만들어 보행자의 열환경을 개선하고, 옥상녹화로 건물의 에너지 절약에 기여하고 있다. 그리고 반사율이 좋은 도료로 건물의 축열을 줄이고, 건물을 새로 지을 때 바람길을 고려하여 배치하도록 하였다(Heo and Song, 2012). 사이타마현의 구마가야시는 'cooling share' 사업을 통해 가정에서의 개인적 냉방을 멈추고 시원한 곳에 모여 열사병 환자를 줄이고 가정 냉방에 따른 전력 소비도 줄일 수 있었다(Ng et al, 2016).

한파에 대한 대응 역시 다양한 방법으로 이루어지고 있다. 한파에 대응하여 영국은 국민건강보험, 지방정부, 사회보장 단체, 개인, 지역사회, 자원봉사 단체에서 각각 수행할 지침들을 규정해 놓았다. 그리고 한파에 대한 계획을 2011년부터 매년 발표하고 있다. Level 0부터 Level 4까지 총 3단계로 구분하고 매년 실시, 동절기 대비, 평균 기온 2℃와 60%의 강설확률을 대비, 혹한기와 폭설 대비, 비상사고 대응으로 나누어 지침을 준비하였다. 영국은 평상시 독감 예방주사 권장을 비롯하여 난방을 미리 점검하여 준비하길 권하고 있다. 더불어 자원봉사자와 현업 실무진들의 협업을 강조해 취약계층에 대한 모니터링과 지속적인 점검 및 조언을 수행한다(Public Health England, 2018).

광대한 영토를 가진 중국은 지리적 환경에 따라 한파의 특징이 매우 다르다. 중국 북서부지역과 Loess 고원에서는 강설은 적으나 모래폭풍이 부는 강풍이 동반되고, 내몽골초원에서는 강풍과 저온, 강설을 동반한다. 남부지방에서는 한파와 강우가 동반된다. 따라서 중국에서는 4단계로 나누어 한파주의보가 발령된다. 적색, 주황색, 노란색, 청색으로 구분하는데, 하루나 이틀 사이에 기온이 떨어지는 정도와 최저기온, 평균 온도를 기준으로 구분한다. 그리고 국민 행동요령으로 실외 구조물 보강, 빙판길 주의, 석탄 난로 이용 시 가스 중독 주의, 외출 자제 등을 권하고 있다(China Meteorological Administration, 2012).

그리고 북극권에 가까이 위치한 캐나다에서는 wind chill 지수를 이용해서 한파경보를 발표한다. 일반적으로 wind chill 지수가 −27 이하일 때 바람에 의한 피부염(Windburn)과 동상이 증가한다. 캐나다 북부 일부 지역

에서는 −70 미만의 wind chill 지수값을 기록하기도 하였다. 캐나다는 바람에 의한 피부염, 동상, 저체온증에 대비하여 적절한 의복 착용을 권하고, 노출된 피부에 동상을 일으키는 조건에 대해 윈드 쿨링 경보를 발령한다. 그리고 곳곳에 피난처를 마련하였다. 피난처를 찾더라도 체온을 유지하기 위해 계속 움직일 것을 권한다. 더불어 집안의 난방시스템 점검과 알코올 섭취를 금하고 있다(Health Canada, 2018).

국내에서는 기상청에서 날씨 예보와 기상 관련 생활지수 발표, 환경부에서 폭염 취약성 지수 및 위험도 파악, 보건복지부에서 취약계층을 대상으로 한 감시체계와 보호대책 운영하고 건강 관련 프로그램을 운영하며 홍보 및 교육을 담당, 소방방재청에서 구급 대책 수립과 무더위 쉼터 운영과 재난 도우미 운영, 폭염 및 한파 정보 전달 체계를 담당하여 극한 기상에 대한 대책을 수립하고 있다.

한파의 경우 중앙재난안전대책본부에서 관심, 주의, 경계, 심각 4단계로 나누어 비상근무를 운영한다. 주의보와 경보가 내려진 도시 수를 기준으로 근무단계가 강화된다. 과거 피해사례를 분석하여 재해상황 판단시스템을 마련하고, 인천, 경기지역 5개소에 CCTV를 설치하여 눈구름의 서울 유입전 비상근무 소집 및 제설제 사전 살포 등 선제대응을 하도록 하였고, 서해안지역에 설치된 항로표지관리소(유인 등대 13개소)와 실시간 강설정보를 공유하도록 하고 있다. 그리고 기상청의 방재 기상 정보시스템을 활용하여 사전에 기상정보 필요사항을 시스템에서 설정하였을 때 '맞춤형 알람' 수신자 대상을 확대하였다. 그리고 대설로 인한 긴급상황을 대비하여 사전에 유관기관(한국도로공사, 한국전력공사 등) 및 민간단체(대한건설협회, 한국열관리시공협회 등)와 협약을 체결해 연례 간담회를 열어 긴급협조 체계를 점검하였다(Choi, 2020).

폭염은 최고기온을 기준으로 국민의 건강에 미치는 영향정도에 따라 주의보와 경보로 나누어 6월 1일부터 9월 30일까지 4개월간 운영하고 발표한다. 특히 소방방재청에서 폭염종합대책을 수립하고 추진하고 있다. 폭염대비 '주민준비요령', '무더위 쉼터' 운영 관리, 폭염에 취약한 독거노인 보호를 위한 특별대책 강구, 취약계층 특별보호 대책 등이 주요 내용이다. 이외에도 지자체에서도 개별적으로 폭염에 대비해 여러 가지를 조례로 제정해 운영하고 있다. 전라남도 의회는 폭염취약계층 지원책으로 건축물 녹화시설, 냉방물품, 온열질환의료비 등을 지원하고, 폭염저감을 위해 안개분사, 자동 살수 시스템과 같은 수경시설 마련, 고정형 그늘막 시설 등을 지원하고 있다(NDMR, 2013; Lee, 2015).

3.2. 대구지역의 한파 발생 특성

한반도 지역에서 발생하는 한파 발생의 주요 이유는 북극진동에서 찾을 수 있다. 북극진동이란, 북극 지역과 중위도의 기압 차이가 년 단위로 커지고 작아지는 현상이다. 중위도 지역이 온난한 경우는 북극이 추울수록 북극과 중위도 지역의 기압 차이에 의하여 북극 주위를 도는 제트기류가 강해져 북극의 차가운 공기가 저위도쪽으로 내려오지 못하여 양의 북극진동이 발생할 때이다. 반대로 북극의 기온이 높아져 북극과 중위도의 기압 차이가 작아져 음의 북극진동이 발생하게 되면 북극의 제트기류가 남북으로 크게 사행하게 되어 북극의 찬 공기가 저위도 쪽으로 내려와 한파가 발생하게 된다.

겨울 한파의 또 다른 원인은 라니냐 현상이다. 엘니뇨와 라니냐는 적도 태평양의 서부와 동부 표층 해수 온도 변화로 정의할 수 있다. 적도 근처의 태평양의 무역풍이 평상시보다 강하게 불어 동태평양의 표층 수온이 서태평양 수온보다 훨씬 낮아지는 현상을 라니냐라고 한다. 지구 온난화가 진행될수록 엘니뇨와 라니냐가 더 자주 더 강하게 발생하여 폭염과 한파가 심각해질 것으로 예상된다.

한파는 블로킹고기압이라고 불리는 저지고기압이 형성되어 장기간 지속된다. 한반도에 한파가 지속될 때에는 우랄산맥 근처에서 저지고기압이 발달하여 시베리아 북쪽의 찬 공기가 유입되기 때문이다(우랄 블로킹). 동시에 우리나라의 북동쪽에도 저지고기압이 발달하여 한파를 유발하는 제트기류의 이동을 막는 경우에도 한파가 장기간 지속될 수 있다. 저지고기압은 상당 기간을 한자리에 있으면서 정체하는데 이것의 해소과정에 대한 메커니즘이 정확히 밝혀지지 않아 일기예보에 큰 어려움을 겪고 있다.

기상청의 한파 특보는 10월부터 다음 해 4월까지 발표된다. 한파 특보는 기온 자체가 특별히 낮아서 발령되는 경우는 거의 없고, 대부분 전날과 비교할 때 기온 하강폭이 매우 클 때 발령된다. 기상청 한파 특보기준은

Table 1. Standards for the Korea Meteorological Administration's announcement of a cold wave warning

Type	Cold wave watch	Cold wave alert
Cold wave	① When the morning minimum temperature is expected to fall by more than 10°C from the previous day, below 3°C and 3°C lower than usual. ② When the morning minimum temperature is expected to last at least two days −12°C. ③ When severe damage is expected due to rapid cold temperatures.	① When the morning minimum temperature is expected to fall by more than 15°C from the previous day, below 3°C and 3°C lower than usual. ② When the morning minimum temperature is expected to last at least two days −15°C. ③ When severe damage is expected in a wide range of areas due to rapid cold temperatures.

Table 2. The average value and change of winter temperature, highest temperature, and lowest temperature in Daegu from 1909 to 2018

Section	Average	Normal year value (1981~2010)	Tendency	the last 30 years - the past 30 years	the last 10 years - the last 30 years
Average temperature [℃]	0.9	2.2	0.30/10 years	+2.6 (-0.2→2.4)	-0.4 (2.4→2.0)
Highest temperature [℃]	6.1	7.4	0.28/10 years	+2.5 (5.0→7.5)	-0.6 (-0.2→2.4)
Lowest temperature [℃]	-3.7	-2.2	0.34/10 years	+2.9 (-4.8→-1.9)	-0.5 (-1.9→-1.4)

Table 3. Average and change of winter day in Daegu

Section	Average	Tendency	the last 30 years - the past 30 years	the last 10 years - the last 30 years
Cold wave days	5.7	-0.93/10 years	-8.0 (9.4→1.5)	+0.7 (1.5→2.2)
Snow days	14.3	-0.77/10 years	-6.5 (17.4→10.9)	-0.5 (10.9→3.2)

Table 1과 같다.

대구에서 기상관측을 시작한 1909년부터 2018년까지의 변화 경향을 요약하면 Table 2와 같다. 최근 110년 동안 겨울철 평균 기온은 10년에 0.3℃ 상승하였으며, 최근 30년 동안에는 2.6℃ 상승한 것으로 나타났다. 최근 10년 동안에는 2011년과 2018년 한파의 영향으로 오히려 과거에 비하여 겨울 기온이 약간 하강한 것으로 평가되었다. 겨울철 기온의 상승은 일 최고기온의 상승보다 일 최저기온의 상승이 더 큰 것이 원인이 되어 겨울철 한파가 완화되고 있는 경향으로 볼 수 있다.

대구의 한파일 수는 지난 110년 동안 −0.93일/10년의 비율로 감소추세를 보였으며, 눈 현상일수 또한 −0.77일/10년의 비율로 감소하고 있다. 그 결과 대구의 한파일 수는 연간 1.5일, 강설은 10.9일이었다. 평균 한파일 수는 5.7일로 전국 11.0일의 52% 정도로 매우 적게 나타났다(Table 3).

진 겨울일 수(True winter day)는 하루 중 0℃ 이상으로 회복되지 않은 일 수를 뜻한다. 서울과 대구의 진 겨울일 수를 비교해 보면 서울에 비하여 대구가 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 대구는 2018년의 11일을 제외하고는 지난 15년간 연간 5일을 초과한 경우가 없었다(Fig. 1).

최근 10년 동안 대구의 진 겨울일 동안의 기온(일 최고기온, 일 최저기온) 공간분포는 Fig. 2와 같다. 달서와 달성 등 서쪽 지역의 기온이 낮고, 동구와 북구 지역의

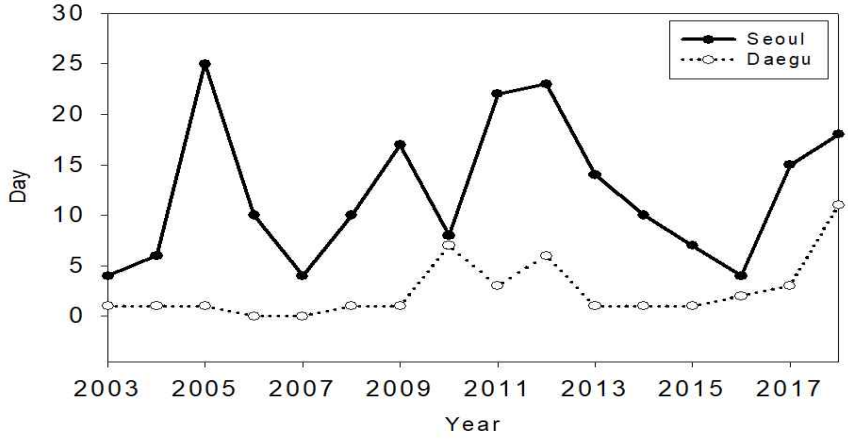

Fig. 1. Comparison of the number of true winter days between Seoul and Daegu from 2003 to 2018.

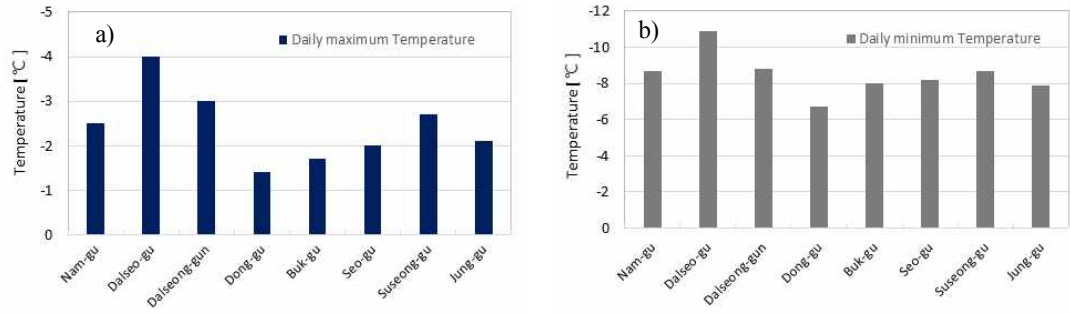

Fig. 2. The distribution of spatial temperature in Daegu during the winter days in the last 10 years, a) daily maximum temperature, b) daily minimum temperature (In order from the left Nam-gu, Dalseo-gu, Dalseong-gun, Dong-gu, Buk-gu, Seo-gu, Suseong-gu and Jung-gu).

기온이 높았다. 이는 겨울철 한파에 수반된 풍향이 북서풍, 즉 서풍계열이기 때문에 바람이 동쪽으로 불어갈수록 도시 열섬의 영향으로 가열되기 때문으로 해석할 수 있다. 그 차이는 2℃ 내외였다.

자료는 첨부하지 않았지만 최근 10년 동안의 대구의 강설일수는 연간 3일에서 20일로 다양하게 나타나고, 3 cm 이상의 강설은 연간 3일을 초과하는 사례는 없었다. 이로부터 대구는 폭설에 따른 교통 장애로 인한 생활 불편이 발생할 가능성은 낮다는 것을 알 수 있다.

3.3. 대구지역의 폭염 발생 특성

대구는 우리나라에서 여름철에 덥기로 유명한 지역이다. 대구가 특별히 더운 지역인 이유로 내륙 분지 지형이라는 지형적 특성이 많이 언급되나, 우리나라 대부분의 자연 발생적 도시들은 분지 형태를 띠고 있어 대구의 경우에 한해서 분지라는 지형적 특성을 폭염의 원인으로 특정짓기에는 어려운 점이 있다(Park et al., 2011). Kwon(2018)은 대구의 도시 구조와 기상여건 사이의 연관성을 연구하였는데, 대구의 열 환경 취약성은 도시 구조 문제로 더욱 가중될 수 있음을 확인할 수 있었다. 대구의 경우 산곡풍의 영향으로 외부의 선선한 공기가 유입되어도 대구의 서쪽에 위치한 발열 시설을 거치면서 온도가 올라간 공기가 도시 중심으로 이동되며 도시 열섬 현상이 가중될 가능성이 크다고 보았다(Kim and Kim,

Table 4. Standards for the Korea Meteorological Administration's announcement of a heat wave warning

Section	Heat wave warning	Heat wave alert
criteria	When a daily high temperature of 33°C or above is expected to last for more than two days from June to September	When a daily high temperature of 35°C or above is expected to last for more than two days from June to September

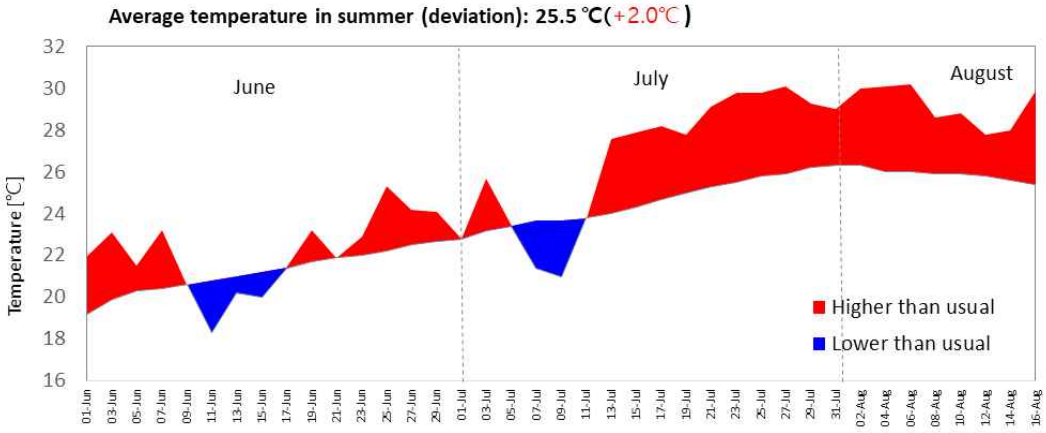

Fig. 3. The relationship of the number of heat-related deaths to the population over the continuation of the heat wave (Source: Korea Meteorological Administration press release 17 Dec. 2018).

Table 5. The average value and change of summer temperature, highest temperature, and lowest temperature in Daegu from 1909 to 2018.

Section	Average	Normal year value (1981~2010)	Tendency	the last 30 years - the past 30 years	the last 10 years - the last 30 years
Average temperature [℃]	24.6	25.0	0.14/10 years	+1.0 (24.3→25.3)	+0.6 (25.3→25.9)
Highest temperature [℃]	29.8	29.8	0.05/10 years	+0.4 (29.7→30.1)	+0.8 (30.1→30.9)
Lowest temperature [℃]	20.6	21.1	0.17/10 years	+1.3 (20.1→21.4)	+0.5 (21.4→21.9)

2017).

기상청의 폭염 특보는 6월부터 9월까지 발표된다. 폭염 특보는 일 최고기온을 기준으로 발표된다. 기상청 폭염 특보 기준은 Table 4와 같다.

기후변화로 인한 극한기후 중에서도 폭염의 발생 빈도가 높아지고 강도가 강해지며 생활상의 불편뿐만 아니라 건강과 재산상의 피해도 커지고 있다. 여름철 고온현상은 1990년대 후반 이후부터 강도와 발생 빈도가 현저히 증가하고 있다. 특히 2018년 여름은 기상청 발표에 의하면 1973년 이래 가장 더운 여름이었다. Fig. 3을 보면 평년보다 약 2℃ 정도 더운 날이 7월과 8월에 지속되었다.

대구에서 1909년부터 기상관측이 시작되어 현재까지 110년간 여름철 기온 특성을 정리하면 Table 5와 같다. 최근 110년간의 계절별 평균 기온 상승폭은 봄, 겨울, 가을, 여름 순서로 높았고, 여름철 평균기온은 10년 기준으로

Table 6. Average and change of heatwave days in Daegu from 1909 to 2018

Section	Average	Tendency	the last 30 years - the past 30 years	the last 10 years - the last 30 years
Daegu [day]	23.3	+0.69/10 years	+6.3 (20.2→26.5)	+5.5 (26.5→32.0)
All parts of the country [day]	9.0	+0.13/10 years	-6.5 (17.4→10.9)	+2.5 (9.9→12.4)

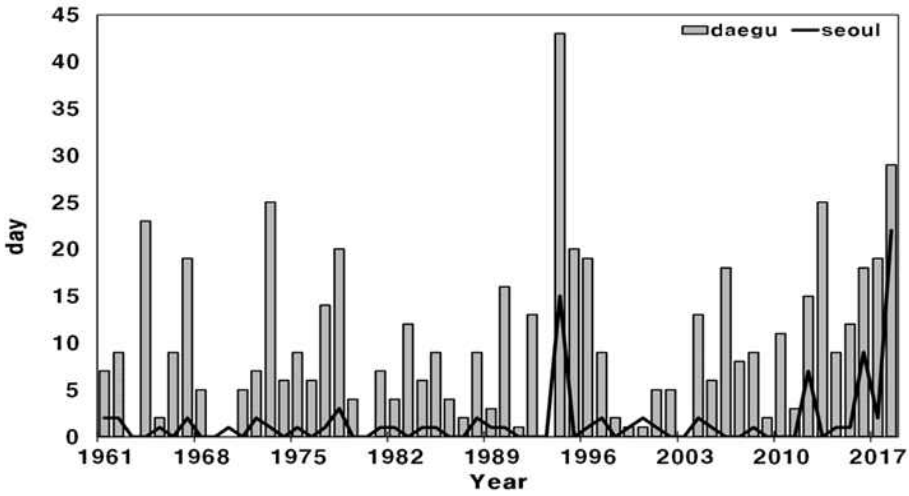

Fig. 4. Status of the number of days of heat wave warnings in Daegu and Seoul.

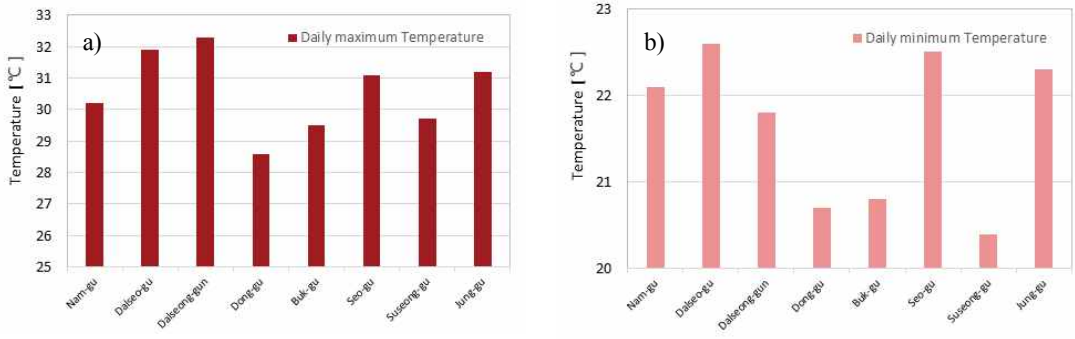

Fig. 5. The Distribution of spatial temperature in Daegu in summer in the last 10 years, a) daily maximum temperature, b) daily minimum temperature (In order from the left Nam-gu, Dalseo-gu, Dalseong-gun, Dong-gu, Buk-gu, Seo-gu, Suseong-gu and Jung-gu).

0.14℃ 상승했고, 최근 30년 동안에는 1.0℃ 상승하였다. 대구의 여름철 기온은 최저기온이 크게 상승하여 기온 상승폭이 크게 나타났고, 도시열섬 효과로 인한 야간시간의 열 환경 악화가 빠르게 진행되고 있다.

대구의 폭염일수 변화 경향은 +0.69일/10년으로 증가 추세를 보이고 있다. 이것은 전국 평균 값인 +0.13일

Table 7. The pattern of disasters accompanying the cold wave (National Disaster Management Research Institute, 2015)

Disaster phase	The pattern of disasters accompanying the cold wave
Stage 1 early winter warmer than usual	• Drought of winter • Warmer than usual weather
Stage 2 a surprise cold wave after heavy snow	• Low body temperature death of elderly people living alone • Fall accident, snow traffic accident • The number of pipes and meters in frozing and bursting accidents increase and the number of fires is increasing. • Livestock industries (The company, cattle and fruit is damaged by frozen)
Stage 3 persistent cold wave	• nationwide hypothermia deaths and a surge in cardiovascular patients • Traffic congestion: Flights and ferries, road congestion, suspension and delay of trains and subways • Isolated by heavy snow: route, mountain villages • Lack of backup power: Increase in heating gas and power demand • Agriculture, livestock industry : cold weather damage crops, wet injury, wither • Water shortage in mountainous areas: freezing of water sources and freezing of water pipes
Stage 4 an unending cold wave	• Massive casualties: hypothermia, frostbite, respiratory disease, cerebral cardiovascular disease, falls, etc. • Large-scale property damage: Secondary property damage caused by delayed response and recovery increased rapidly. • a major fisheries and agricultural damage

/10년에 비하여 5.2배 정도 높다. 최근 30년 동안의 폭염일수는 26.5일로 과거 30년의 폭염일수 20.2일과 비교해 6.3일 증가하였고, 최근 10년의 폭염일수는 32.0일로 최근 30년보다 5.5일 증가하였다(Table 6).

Fig. 4는 1960년대 이후 대구와 서울의 폭염 경보 발령 일수를 비교한 그래프이다. 대구에서 일 최고기온이 35℃ 이상이 2일 이상 지속되는 경우 발표되는 폭염경보 일수는 서울과 비교했을 때 현저히 많다. Fig. 5는 최근 10년 동안의 일 최고기온과 일 최저기온을 나타낸 그래프이다. 대구 폭염의 원인에서 다루었던 도시 구조에서 다룬 서쪽 지역의 열원을 확인할 수 있다. 대구의 서쪽 지역에는 달서구, 서구가 해당된다. 서쪽 지역은 산업 활동이 많이 이루어지고 인구가 많이 있다. 이로 인해 인공 구조물 비중이 높고, 서쪽에서 유입된 공기가 가열되는 것이다. Fig. 5b를 보면 동쪽과 서쪽의 온도 차이는 낮의 최고기온보다 야간의 최저기온에서 더욱 뚜렷한 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 그래프로 나타내지는 않았지만 열대야 역시 달서구와 서구가 가장 많이 나타나는 것과도 일치한다.

3.4. 대구의 한파 및 폭염 대응책 제안

국립재난연구원에서는 한파에 수반되는 재난 양상을 Table 7과 같이 4단계로 분류하고 있다. 재난 단계 중 대구에 발생할 가능성이 있는 한파 재해는 1단계와 2단계 수준까지로 판단할 수 있다. 대구시는 특히 보건과 교통 부문과 관련하여 한파로 인한 한랭 질환 및 사망자 증가 대비와 폭설로 인한 고립, 도심 교통과 항공 마비, 빙판 교통사고에 대비해야 한다.

한파 피해 대책은 도시구조물의 피해를 줄일 수 있는 '구조적 대책'과 시민들의 행동 방향을 개선하는 '비구조적 대책'으로 나눌 수 있다. 대구시에서 도입해볼 수 있을 것들을 정리하면 다음과 같다. 우선 구조적 대책으로 교통 부분의 경우 주요 도로의 결빙구간을 조사하여 경사와 굴곡 정도, 교통사고 빈도를 고려하여 우선 대응 지역을 선정해야 한다. 그리고 도로결빙 방지 자동화 시스템을 도입하면 도로 결빙에 의한 피해를 줄일 수 있을 것으로 보인다. 그리고 동파 방지형 수도계량기를 보급하는 방법이 있다. 비구조적 대책으로는 동파예보제도의 도입과 풍속과 기온을 모두 고려한 한랭지수인 wind chill 지수를 도입하는 것이다. 더불어 시민행동요령에

대한 홍보를 강화하고, 한파 취약계층을 파악하여 행동요령 방문교육과 지원 대책을 수립하는 방법이 있다.

폭염 대응책은 폭염에 대한 정보제공시스템과 시민들의 자발적 대응을 돕는 비구조적 방법과, 도시의 구조와 관련된 구조적 방법으로 나누어 볼 수 있다. 비구조적 대책으로는 건축 및 시설물 기준을 설정하고, 가장 더운 시기에는 휴식제 운영과 보건 인력을 활용하여 재난도우미를 운영하고, 폭염 취약성 지도를 작성하여 도움이 필요한 부분을 미리 파악할 수 있는 법과 제도를 마련하는 방법이 있다. 그리고 폭염 예·경보 시스템과 고온경보시스템 운영하여 경보시스템을 발령하였을 때 노인정과 공공시설 등의 무더위 쉼터 정보를 제공하여 이용할 수 있게 하는 것이다. 각 가정에서 냉방을 하지 않음으로써 온실가스 저감에도 효과가 있을 것이다. 이 경우 시에서 냉방비 및 폭염 예방물품을 지원하여 운영에 차질이 생기지 않도록 도와줄 수 있다. 그리고 폭염 대응 행동 매뉴얼을 마련하여 배포하고, 전광판이나 현수막을 설치하여 폭염에 대한 홍보와 대응 교육을 실시하여 폭염이 닥쳤을 때 침착하게 대응할 수 있도록 하여 폭염에 의한 피해를 줄일 수 있을 것이다.

구조적 대책으로는 건축물 녹화(Green roof), 시설물 녹화, 수목 급수 시스템 설치 및 운영, 공원과 같은 오픈스페이스를 조성하여 환경을 개선하는 방법을 첫 번째로 꼽을 수 있다(Park and Kim, 2010). 두 번째는 물을 이용한 폭염 예방법으로 일최고기온 시간을 기준으로 도로 살수 시스템 설치 및 살수차 운영, 도심 물 순환 시스템 및 하천 개발, 수경시설 설치, 빗물 이용 시스템, 소방 용수 공급 등이 있다. 세 번째는 바람을 이용한 온도 저감방법으로 건축 시 바람길 고려하기와 쿨링 포그 설치가 있다.

그리고 대구의 폭염 발생의 주요 원인으로 지적되는 도시열섬 완화를 위한 정책 제언이 반드시 필요하다. 특히 대도시의 기온상승은 기후변화보다는 도시화의 효과가 더 큰 것으로 평가되기 때문에 도시의 고온화를 억제하는 일이 매우 중요하다.

첫 번째로는 도시의 도로 주변 거리 가로수는 지표에 그늘을 만들어 아스팔트 표면 온도 상승을 크게 억제한다. 여름철 한낮의 아스팔트 표면온도는 60℃를 훌쩍 넘기지만 나무 그늘 아래의 아스팔트 표면온도는 이보다 30℃ 이상 낮다. 도로 주변에 가로수가 많을수록 교통소음 저감과 더불어 통행 환경의 개선을 도모할 수 있고, 자동차의 냉방도 절약할 수 있다(Kim et al, 2011).

두 번째로 도시녹화 이외에 폭염 대응을 위해 개발되고 있는 첨단기술의 적극 도입도 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대된다. 대표적인 기술로는 옥상에 기존의 초록색이 아닌 흰색의 방수처리를 하여 옥상 표면온도를 낮추는 기술(Cool roof)이 있다. 고반사성 도료를 도포하거나, 옥상녹화 모두 포함되는 기술이다. 쿨 루프 기술을 가장 적극적으로 도입하는 나라는 미국이다. 대표적 사례로 로렌스 버클리 연구소의 열섬대책그룹에서 고반사성 도료를 이용해 건축물의 표면 온도를 낮추는 주요 대책으로 삼고 있다. 우리나라에서는 김해시청 옥상에 쿨 루프를 설치해 옥상의 온도 하강 효과를 검증한 사례가 있는데 여름철 낮에 60℃를 넘던 것이 설치 후에는 25℃ 내외로 낮아진 것이 있다(Daegu International Heat wave Response Forum, 2017).

세 번째는 아스팔트로 된 기존의 도로를 보수성 포장을 이용하거나 열 교환 도료의 이용이다. 보수성 포장은 고로재나 제올라이트 같은 다공질의 재료나 섬유성 재료를 혼합하여 제작한다. 수분이 도로 내부로 침투하게 하고, 1주일 정도 보수 기능이 유지될 때 기존 도로 표면에 비해 15℃ 이상 온도가 하강하는 효과가 있다는 보고가 있다. 열 교환 도료는 차열성 도료의 단점으로 언급되는 겨울철 도시의 온열 환경 저해 효과를 해결하기 위해 제시된 기술이다. 이 도료의 특성은 표면온도가 25℃ 이상이 될 때부터 기능이 발휘되며, 고온일수록 표면온도를 낮추는 효과가 크게 나타났다(Seoul Quality Inspection Office, 2016).

4. 결 론

대구시의 한파특보는 대부분 전날에 비하여 기온이 급감하여 발령된다. 한파특보 발령일수도 서울에 비하여 적기 때문에 한파 취약성 평가에서 낮은 취약성 지역으로 분류된다. 반면 폭염일수는 지난 110년 동안 연평균 23.3일로 전국 평균 9.0일보다 2.6배 많이 나타나 폭염은 전국에서 가장 심각한 지역이라 할 수 있다.

대구의 한파 전망을 살펴보면 금세기 중후반이 되면 한파피해는 사실상 사라질 것으로 보인다. 국립재난연구원에서 분류하는 한파에 수반되는 재난 양상을 기준으로

볼 때 대구시는 한파로 인한 한랭 질환 및 사망자 증가에 대한 대비와 폭설로 인한 고립, 도심 교통과 항공 마비, 빙판 교통사고 부분을 대비하면 될 것으로 판단된다. 보건 부문에서는 노숙자들의 동사와 빈곤층의 한랭 질환 대책 수립이 필요하고, 교통부문에서는 굴곡진 도로에 강설을 대비하여 사전 암염 살포가 가장 실효성 높은 대책이 될 것으로 판단된다.

대구의 폭염일수의 변화 경향은 +0.69일/10년으로 증가추세를 보였는데 이것은 전국 평균 +0.13일/10년과 비교하여 523%로 매우 높은 수준이다. 그리고 대구의 여름철 고온 상세 공간분포를 살펴보면 달서구, 서구 등 서쪽 지역이 높고 동구, 북구 등의 동쪽 지역의 온도가 낮다. 이는 산업활동과 많은 인구로 인해 인공구조물의 밀도가 높아 폭염현상이 증가하기 때문으로 볼 수 있고 모든 기후변화시나리오에서 금세기말까지 폭염현상일수가 증가할 것으로 전망한다. 이에 대비해 구조적 대책으로 건축물의 열을 줄이기 위한 cool roof, 반사도 높은 피복재료 사용 등과 비구조적 대책으로 무더위 쉼터 운영, 녹지 조성, 물을 이용한 폭염예방의 방법 등을 제안할 수 있다. 나아가 탁월풍의 장애를 최소화 할 수 있는 도시개발을 위한 조례 제정으로 도시개발 규제 방안도 적극 검토할 필요성이 높다.

감사의 글

본 연구는 부산대학교 기본 연구 지원 사업(2년)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Abair, J. W., 2008, Green buildings: What it means to be “Green” and the evolution of green building laws, Urb. Law., 623-632.

China Meteorological Administration, 2012, http://www.cma.gov.cn/en/DisasterMitigation/HazardsAndPrevention/201203/t20120320_166805.html .

Choi, B. J., 2020, Comprehensive countermeasures for snow and cold waves in winter 2019, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 20, 9-17.

Chung, J. H., Lee, Y. G., Lee, J. W., Kim, S. J., 2019, Correlation analysis between Terra/Aqua MODIS LST and air temperature: mainly on the occurrence period of heat and cold waves, J. Korean Ass. Geog. Inform. St., 22, 197-214.

Daegu International Heat Wave Response Forum, 2017, http://www.hotdaegu.org/.

Guan, H., Zhu, Y., 2017, Development of verification methodology for extreme weather forecasts. Weather and Forecast., 32, 479-491.

Hayhoe, K., Sheridan, S., Kalkstein, L., Green, S., 2010, Climate change, heat waves, and mortality pronections for Chicago, J. Great Lakes Res., 36, 65-73.

He, S., Gao, Y., Li, F., Wang, H., He, Y., 2017, Impact of Arctic oscillation on the east Asian climate: a review. Earth Sci. Rev., 164, 48-62.

Health Canada, 2018, https://www.canada.ca/en/health-canada/services/healthy-living/your-health/environment/extreme-cold.html.

Heo, B. Y., Song, J. W., 2012, Countermeasures on heat wave related disasters increasing due to climate change, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 12, 171-177.

Heo, I. H., Lee, S. H., 2006, Changes of unusual temperature events and their controlling factors in Korea, Korean Geogr. Soc., 41, 94-105.

Jung, H. C., Yu, I. S., 2019, Establishment of cold-related health risk maps based on climate change scenarios, Korea Adaptation Ctr. Clim. Change News Lett., 2, 24-29.

Kalkstein, L. S., Jamason, P. F., Greene, J. S., Libby, J., Robinson, L., 1996, The Philadelphia hot weather–health watch/warning system: development and application, summer 1995, Bull. Amer. Meteor. Soc., 77, 1519-1528.

Kang, B. J., Hong, C. E., 2018, Paradigm shift of disaster management policy -focusing on fine dust, heat waves and cold waves-, J. Pol. Dev., 18, 79, 122.

Kim, I. G., Lee, S. W., Kim, H., Lee, D. G., 2020, Evaluating economic value of heat wave watch/warning information in Seoul and Busan in 2016: focused on a cost of heat wave action plan and sample of patients. J. Korea Cc. Assoc., 20, 525-535.

Kim, J. H., Kim, H. D., 2017, Comparison of several heat stress indices for the 2016 heat wave in Daegu, J. Environ. Sci. Int., 26, 1399-1405.

Kim, J. S., Kim, H. Y., 2020, Landsat 8 analysis on the characteristics of heat wave vulnerable areas using Landsat 8 data and vulnerability assessment analysis, J. Korean Assoc. Geogr. Inform. St., 23, 1-14.

Korea Meteorological Administration, 2017, Daegu Metropolitan City Climate Change Forecast Analysis Report, Report, 11-1360000-001559-01, Seoul, Korea.

Korea Metoeorology Administration press release, 17 Dec. 2018, http://www.kma.go.kr/notify/press/kma_list.jsp?mode=view&num=1193585.

Kwon, S. H., Park, H. S., Chung, G. H., 2016, Analysis of snow vulnerability and adaptation policy for heavy snow, J. Korean Soc. Hazard Mitig., 16, 363-368.

Kwon, Y. S., 2018, Estimation and countermeasure of the heat wave cause of Daegu metropolitan basin from the urban structural dimension, Korea Res. Inst. Hum. Settle., 98, 23-25.

Lavers, D. A., Pappenberger, F., Richardson, D. S., Zsoter, E., 2016, ECMWF extreme forecast index for water vapor transport: a forecast tool for atmospheric rivers and extreme precipitation. Geophys. Res. Lett., 43.

Lee, H. D., Min, K. H., Bae, J. H., Cha, D. H., 2020, Characteristics and comparison of 2016 and 2018 heat wave in Korea, Atmos., 30, 1-15.

Lee, J. S., 2015, Counter attack of global warming and extreme cold wave, Natl. Disaster Man. Res. Inst, Future safety issue(4), 11-1750140-000062-14, Ulsan, Korea.

Lee, S. H., Park, M. H., Kim, H. D., 2008, Study on the variation of nighttime cooling rate associated with urbanization, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24, 83-90.

Ng, C. F. S, Boeckmann, M., Ueda, K., Zeeb, H., Nitta, H., Watanabe, C., Honda, Y., 2016, Heat-related mortality: effect modification and adaptation in Japan from 1972 to 2010, Global Environ. Change, 39, 234-243.

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.

Park, M. H., Kim, H. D., 2010, Cool island intensity in a large urban green in downtown Daegu: Seasonal variation and relationship to atmospheric condition, J. Environ. Sci. Int., 19, 81-87.

Public Health England, 2018, The cold weather plan for England protecting health and reducing harm from cold weather, Guidance, 2018518, London, United Kingdom.

Seoul Quality Inspection Office, 2016, Development of materials and technologies for road pavement for heat and waterproofing(1), 51-6110000-001546-01, Seoul, Korea.

Woo, G. M., 2019, Analysis of heat related illness surveillance in 2018, Korea Cen. Dis. Cont. Prev., Brief report, 1, Cheongju, Korea.

Yoon, I. T., 2013, , A Study on extreme temperature disaster management, Natl. Disaster Man. Res. Inst, Report, 11-1312184-000062-01, Ulsan, Korea.

• Assistant Professor. Keiko Yamada
Major in Global Environment, Faculty of Environment, College of Natural Sciences, Keimyung University
keikoy@kmu.ac.kr
• Professor. Hae-Dong Kim
Major in Global Environment, Faculty of Environment, College of Natural Sciences, Keimyung University
khd@kmu.ac.kr
• Doctor's course. Eun-Ji Kim
Department of Earth Science, Pusan National University
eunji1024@pusan.ac.kr
• Professor. Soon-Hwan Lee
Department of Earth Science Education,Pusan National University
withshlee@pusan.ac.kr