

Study Note

생명기후분석시스템(BioCAS)을 이용한 폭염 건강위험의 검증 - 서울시 건물규모를 중심으로 -

김규랑* · 이지선* · 이채연** · 김백조* · 브리타 애니케* · 아힘 홀트만*** · 디터 쉐러***
국립기상과학원 응용기상연구과*, 차세대도시·농림융합기상사업단**, 베를린공대 생태학과***

Evaluation of Health Impact of Heat Waves using Bio-Climatic impact Assessment System (BioCAS) at Building scale over the Seoul City Area

Kyu Rang Kim* · Ji-Sun Lee* · Chaeyeon Yi** · Baek-Jo Kim* · Britta Jänicke*,
Achim Holtmann*** · Dieter Scherer***

National Institute of Meteorological Sciences*, Weather Information Service Engine**
Department of Ecology, Technische Universität Berlin***

요약 : 생명기후분석시스템(BioCAS)을 이용하여 서울시 전역의 폭염사례일 기온, 인지온도(PT), 초과사망률(r_{EM}) 분포를 분석하였다. 분석 해상도는 25m 였으며, 사례일은 2012년 8월 5일이였다. 분석 결과는 관측된 사망률 및 내원환자수 자료와의 비교를 통해 평가되었다. 2004년에서 2013년의 폭염 원인인 사망률 자료와 2006년에서 2011년의 국민건강보험공단의 폭염 내원환자수 자료를 이용하여 행정구별 폭염 건강위험 자료를 추출하였다. 자료 비교를 위한 공간 해상도는 사망률 및 내원환자수 자료의 해상도인 행정구 단위였다. BioCAS에서 분석된 사례일 최고 인지온도 및 초과사망률 분포 자료는 행정구별 공간 평균, 최대, 최소 및 누적값으로 변환된 후 건강피해자료와 상관분석이 수행되었다. 분석 결과 일 최고 인지온도 및 초과사망률의 공간 평균값은 건강피해를 설명하지 못하는 것으로 나타났다. 대신 일 최고 인지온도의 공간 최솟값은 사망률과, 공간 최댓값은 내원환자수와 상관관계가 있는 것으로 나타났다(각각 $r=0.53$, $r=0.42$). 즉, 밀집된 건물에 의해 생겨나는 공간 최댓값은 낮 동안의 일사병 발생과 내원환자수 증가에 영향을 주었고, 식생에 의해 나타나는 공간 최솟값은 밤 동안의 열 스트레스를 감소시켜 사망률에 영향을 주었던 것으로 판단된다. 한편 분석된 초과사망률(r_{EM})은 공간 최댓값과 내원환자수가 상관관계가 있었지만 ($r=0.52$) 사망률과의 상관관계는 인정되지 않았는데, 이것은 연령별 인구구성 차이에 따른 기저 폭염위험도 차이 등 행정구별 불균일성을 고려하지 못한 한계가 나타난 것으로 판단된다. 개별 건물과 식생의 열

First and Corresponding Author: Kyu Rang Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju-do, Korea, Tel: +82-64-780-6753, E-mail: krk9@kma.go.kr

Co-Authors: Ji-Sun Lee, Applied Meteorology Research Division, NIMS, Jeju-do, Korea, E-mail: ljsun6@korea.kr

Chaeyeon Yi, Weather Information Service Engine, Seoul, Korea, E-mail: prpr.chaeyeon@gmail.com

Baek-Jo Kim, Applied Meteorology Research Division, NIMS, Jeju-do, Korea, E-mail: bjkim@kma.go.kr

Britta Jänicke, Applied Meteorology Research Division, NIMS, Jeju-do, Korea, E-mail: britta.jaenicke@posteo.net

Achim Holtmann, Department of Ecology, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, E-mail: achim.holtmann@tu-berlin.de

Dieter Scherer, Department of Ecology, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, E-mail: dieter.scherer@tu-berlin.de

Received: 14 July, 2016. Revised: 22 December, 2016. Accepted: 22 December, 2016

적 효과는 공간 평균보다 최대, 최소 등 그 분포가 중요한 것으로 나타났다. 이러한 고해상도 분석기술은 도시의 건강영향평가를 통해 도시개발에 관한 경제성 분석에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

주요어 : 사망률, 입원환자수, 공간분석, 인지온도, 건강영향

Abstract : The Bio-Climatic impact Assessment System, BioCAS was utilized to produce analysis maps of daily maximum perceived temperature (PT_{max}) and excess mortality (r_{EM}) over the entire Seoul area on a heat wave event. The spatial resolution was 25 m and the Aug. 5, 2012 was the selected heat event date. The analyzed results were evaluated by comparing with observed health impact data - mortality and morbidity - during heat waves in 2004-2013 and 2006-2011, respectively. They were aggregated for 25 districts in Seoul. Spatial resolution of the comparison was equalized to district to match the lower data resolution of mortality and morbidity. Spatial maximum, minimum, average, and total of PT_{max} and r_{EM} were generated and correlated to the health impact data of mortality and morbidity. Correlation results show that the spatial averages of PT_{max} and r_{EM} were not able to explain the observed health impact. Instead, spatial minimum and maximum of PT_{max} were correlated with mortality ($r=0.53$) and morbidity ($r=0.42$), respectively. Spatial maximum of PT_{max} , determined by building density, affected increasing morbidity at daytime by heat-related diseases such as sunstroke, whereas spatial minimum, determined by vegetation, affected decreasing mortality at nighttime by reducing heat stress. On the other hand, spatial maximum of r_{EM} was correlated with morbidity ($r=0.52$) but not with mortality. It may have been affected by the limit of district-level irregularity such as difference in base-line heat vulnerability due to the age structure of the population. Areal distribution of the heat impact by local building and vegetation, such as spatial maximum and minimum, was more important than spatial mean. Such high resolution analyses are able to produce quantitative results in health impact and can also be used for economic analyses of localized urban development.

Keywords : mortality, morbidity, spatial analysis, perceived temperature, health impact

I. 서론

폭염에 따른 건강 피해에 대해서 기존 연구에서는 Armstrong et al.(2011)과 같이 기후 조건을 고려하여 임계값 이상의 기온에 의한 사망률 증가를 분석하거나 넓은 지역의 기후 순응(Curriero et al, 2002)을 위도에 따른 기후 차이를 고려하여 설명하는 등 기온에 따른 건강피해 설명 모델을 개발하기 위해 많은 노력을 기울여왔다. 또한 인체 열 스트레스에 영향을 주는 여러 기상 요소를 고려하는 PET(Physiological Equivalent Temperature)나 UTCI(Universal Thermal Climate Index)와 같은 인체 생리학적 지수는 넓은 지역의 폭염 사망률 증가 분석(Natos & Matzarakis 2012)과 같이 지역별로 다르게 나타나는 폭염과 건강피해 관계를 좀 더 직관적으로 분석할 수 있게 한

다. 한편 앞으로의 극한 기상으로서의 폭염 빈도 증가 분석(Natos & Kapsomenakis 2015)과 같이 기후변화에 따라 미래의 폭염이 현재 우리가 경험한 수준에 머물러 있을 것인지 아니면 그 수준을 뛰어넘을 것인지에 대한 연구도 점차 활성화되고 있다.

도시 개발은 필연적으로 열환경 변화를 초래한다. 기존의 환경영향평가는 대단위 개발 사업에 대해서만 기상부문을 포함한 영향평가를 수행하였다. 청계천 복원의 효과 같이 대중의 관심이 집중된 사업의 경우 복원 전·후의 기온 차이 등 열환경 변화에 대한 연구가 수행되기도 하였으나(Kim et al, 2009; Kwon et al, 2009), 도시내 개발 지역의 기온 변화가 주변 환경에 미치는 영향을 어느 정도로 제한하여야 하는지에 대한 논의는 포함되지 않았다. 이러한

이유 중 하나는 기온에 따른 인체의 건강영향을 정량적으로 평가할 수 있는 도구가 없었기 때문이다. 하지만 기후변화에 따라 앞으로 수십 년 이상 지속될 기온의 상승에 미리 대응하자면 특히 도시지역 개발의 경우 그 개발이 유발할 수 있는 기온 상승/하강량과 그에 따른 비용 부담의 증가/감소 평가가 필요하다. 즉, 기온 상승이 유발하는 건강 부담 비용 모델이 필요한 것이다.

도시의 열환경은 크게 불투수 도로 및 건물과 식생의 배치와 밀도에 영향을 받는다. 건물의 형태와 밀집도(Theeuwes et al. 2014) 및 식생의 분포(Konarska et al. 2016) 등 도시의 열환경에 미치는 영향에 관한 여러 연구가 누적됨(Theeuwes et al. 2016)에 따라 열 환경에 대한 종합적인 판단을 할 수 있는 시스템적인 접근이 필요하게 되었다. 이에 따라 Scherer et al.(1999)이 제안한 도시 미기후영향평가를 위한 기후지도인 Climatope을 서울에 적용하여 기온의 기후분포를 상세히 분석하는 CAS(Yi et al. 2016)와 폭염기간 중 건강위험 분석지도를 제공하는 BioCAS(Kim et al. 2014)가 개발되었다.

본 연구에서는 앞서 개발된 BioCAS(생명기후분석시스템, Kim et al. 2014) 및 서울시 상세 기온분석시스템(Yi et al. 2016)을 이용하여 건물과 식생의 밀도에 따른 열환경 건강영향 평가 가능성을 시험하였다. 즉, 도시개발 정도에 따라 달라지는 열환경을 BioCAS를 이용하여 서울시 전역에 대해 분석하고, 이를 서울시에서 관측된 사망률과 내원환자수 관측자료와 상관성을 비교함으로써 개발된 시스템의 활용성을 확인하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

BioCAS를 이용한 건강영향평가는 서울시 전역에 대한 기온, 평균복사온도, 인지온도 및 초과사망률 분석과 행정구별 관측된 초과사망률 및 내원환자수의 비교로 구성되어 있다.

1. BioCAS

생명기후분석시스템(BioCAS)은 인체 열 스트레스

에 가장 큰 영향을 주는 요소인 기온과 평균복사온도를 개별 건물과 식생 수준에서 분석하고, 관측 또는 중규모 모델에서 분석한 습도와 바람을 이용하여 인지온도를 계산하며, 인지온도에 따른 초과사망률을 추정하여 열 스트레스 위험도 분포를 분석한다(Figure 1).

BioCAS의 첫 단계인 CAS(Climat Analysis Seoul, Yi et al. 2016)는 그 입력 자료로 크게 지면, 건물 및 식생의 높이 자료와 토지피복 자료를 사용한다. 항공 LiDAR를 이용하여 지면, 건물 및 식생 높이에 대한 입력 자료를 생산하였고, 위성영상자료로부터 토지피복 입력 자료를 생산하여 사용하였다. 서울시 전역에 대한 입력 자료 해상도는 25m로 설정하였다(Figure 2).

CAS는 중규모 수치기상모델인 MPM을 이용하여

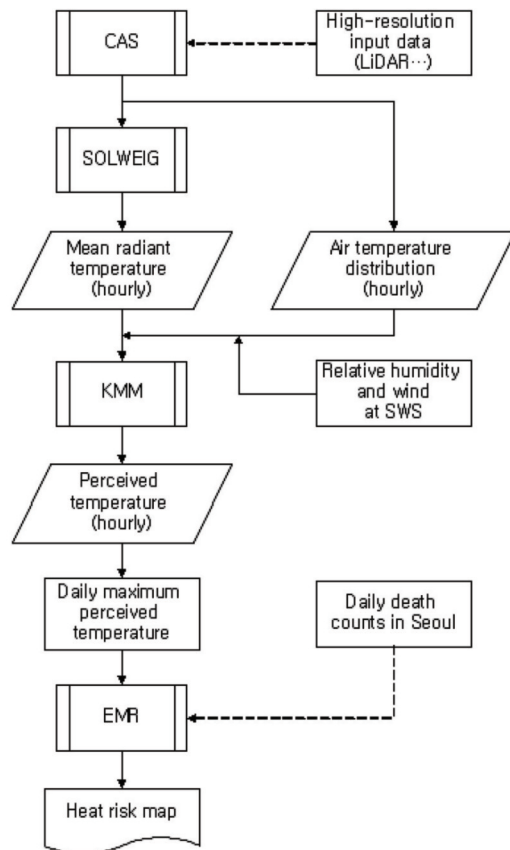


Figure 1. Component models of BioCAS and its flowchart (Kim et al. 2014)

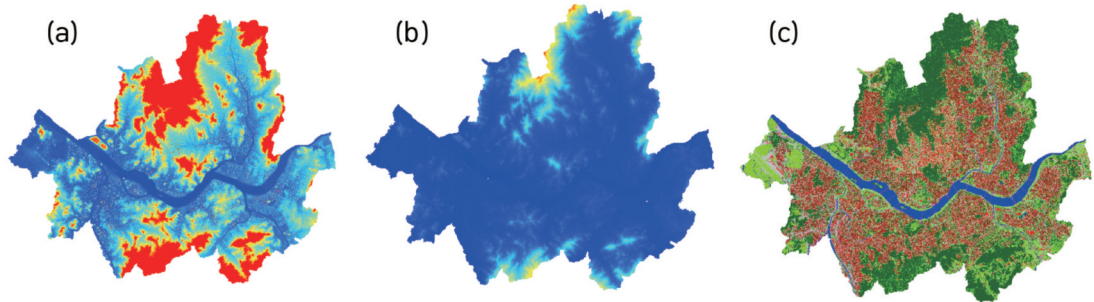


Figure 2. Input data of BioCAS at 25 m resolution over Seoul: Digital (a) building on top of elevation (DEM+DBM), (b) vegetation (DVM), and (c) land cover (LC) models.

500 m 해상도의 중규모 바람 및 기온장을 계산하고, 건물과 식생의 면적 비율, 건물 높이 및 지형 고도에 의해 나타나는 열적 효과를 입력 자료 해상도에 맞추어 국지규모 기온 영향을 계산한다. 서울의 상세 기온분포(TD)는 서울 관측소와 서울시 25개 AWS 지점의 최고 기온 차이(dT_{max})를 추정하고, 추정된 dT_{max} 를 서울 관측소 기온(T_{SWS})에 더함으로써 입력 자료의 해상도인 25m 간격으로 상세 기온 분포(TD)를 계산한다(Table 1). dT_{max} 계산에 사용된 변수는 중규모 기상모형인 MetPhoMod에 의해 분석된 기온 분포(MD), 건물(f_{BS}) 및 식생(f_{TV}) 비율, 건물높이(h_B), 지형고도(z)이다. 계수 c_0 , c_{MD} , c_{BS} , c_{TV} , c_{vol} , c_z 는 각각 0.28, 1.18, 0.5, -0.8, -0.05, -0.002이다. 서울 관측소 일 최고기온(T_{SWS})에 격자별로 계산된 dT_{max} 를 더하면 서울의 상세 일 최고기온분포(TD)가 계산된다.

기온과 아울러 인체 열 스트레스에 큰 영향을 주는 요소인 3차원 평균복사온도(T_{mrt})를 추정하기 위해 SOLWEIG 모델(Solar and Long Wave Environmental

Irradiance Geometry model, Lindberg와 Grimmond 2011)이 구동된다. 모델의 지면 경계 자료로 건물높이와 건물배치 및 식생분포가 사용되고 서울관측소에서 관측된 기온, 상대습도, 일사량이 모델 구동을 위한 기상 입력 자료로 사용된다.

다음 단계로 CAS에서 분석된 상세 기온 분포(TD) 및 평균복사온도(T_{mrt})와 서울관측소에서 관측된 습도 및 풍속자료를 이용하여 인지온도(Staiger et al. 2012)를 계산한다. 시간별 인지온도 분포로부터 일 최고 인지온도(PT_{max}) 분포를 추출한다.

마지막으로 폭염일의 초과사망률(r_{EM}) 모형은 통계청의 일별 사망 자료를 사용하여 개발되었다. 먼저 서울시의 1991-2011년 기간 중 평균 일별 사망률을 추정하고, 이를 초과하는 일별 폭염 사망률(초과사망률)을 계산한 후 PT_{max} 를 이용하여 회귀분석으로 개발하였다(Table 1, Kim et al. 2014). 모델 개발에 사용한 폭염 사례일로 1983-2012년 기간 중 PT_{max} 의 30년 평균 + 2 × 표준편차인 51.2°C 이상인 기간을 선택하여 사용하였는데, 총 21일 자료가 사용되었

Table 1. Key equations of the component models implemented in BioCAS for the estimation of detailed excess mortality (r_{EM}) in Seoul

Model (Variable)	Equation (references are listed in the text)
CAS (TD')	$T_{SWS} + (T_{max} - T_{max, SWS}) + \epsilon = T_{SWS} + dT_{max} + \epsilon$
CAS (dT_{max})	$c_0 + c_{MD} \times MD + c_{BS} \times f_{BS} + c_{TV} \times f_{TV} + c^{vol} \times h_B \times f_{BS} + c_z \times z \times \epsilon$
CAS (MD)	MetPhoMod model's Mesoscale temperature Deviation (500 m grid)
SOLWEIG (T_{mrt})	SOLWEIG model = f(T, RH, Rad, DEM, DBM, DVM)
KMM (PT)	Klima-Michel model = f(TD' , RH, WS, T_{mrt})
EMR (r_{EM})	Excess mortality model = $c_{00} + c_{01} \times PT_{max} + \epsilon$

다. Table에서 coo 와 cor 은 각각 -9.07 과 0.178 이다. PT_{max} 분포도를 이용하여 모델을 구동함으로써 25m 해상도의 초과사망률 공간 분포를 계산한다.

한편 모든 폭염 사례일의 정밀한 기온 분포 등을 분석하기 위해서는 각 과거 사례일의 지면·건물·식생 높이 자료와 토지피복 자료가 필요하지만 자료 확보 및 처리에 어려움이 있으므로 대표적으로 한 폭염 사례를 선정하였다. 선정된 폭염일은 2012년 8월 5일로 이 날의 서울시의 기온, 평균복사온도, 인지온도 및 초과사망률 분포를 산출하여 이후의 분석에 사용하였다.

2. 폭염의 건강피해 평가

앞서 계산된 열 스트레스 분포도 중 최고 인지온도와 초과사망률 분포가 실제로 발생한 건강 피해를 얼마나 잘 설명할 수 있는가를 평가하였다. BioCAS에서 분석된 건강피해와의 비교를 위해 사용된 건강 피해 관측 자료는 통계청의 일별 사망원인 자료와 국민건강보험공단의 일별 내원환자수 자료이다. 자료의 공간 해상도는 행정구 단위이고, 사망자 수와 내원환자 수 각각의 자료 기간은 2004년에서 2013년의 10년, 2006년에서 2011년의 6년 여름동안(6월-9월)이다. 사망자수 자료의 사망원인은 폭염의 간접적인 영향으로 인해 사망에 이를 수 있는 심장질환, 신경질환, 순환계질환, 호흡계질환 등의(국제사인코드

Table 2. Heat-related mortality from 2004 to 2013 and morbidity from 2006 to 2011 for 25 districts in Seoul

District	Total heat-related deaths(persons)	Mean population	Mortality per 10,000	Morbidity (# of patients)
Jongno	1186	166,974	71.0	63
Jung	934	130,003	71.8	43
Yongsan	1540	234,431	65.7	62
Seongdong	1803	317,757	56.7	74
Gwangjin	1758	373,361	47.1	183
Dongdaemoon	2424	369,331	65.6	81
Joongrang	2608	424,174	61.5	104
Seongbook	2820	469,982	60.0	95
Gangbook	2358	345,383	68.3	67
Dobong	2192	370,891	59.1	68
Nowon	3776	611,401	61.8	121
Eunpyeong	3050	474,093	64.3	153
Seodaemoon	2099	332,502	63.1	230
Mapo	2220	384,801	57.7	93
Yangcheon	2429	497,127	48.9	170
Gangseo	3316	559,993	59.2	193
Guro	2103	419,775	50.1	148
Geumcheon	1502	247,891	60.6	61
Yeongdeungpo	2289	401,055	57.1	168
Dongjak	2188	403,534	54.2	80
Gwanak	2736	526,959	51.9	172
Seocho	1851	414,630	44.6	146
Gangnam	2435	552,090	44.1	216
Songpa	2928	644,548	45.4	155
Gangdong	2409	474,677	50.8	127

Data source: Statistics Korea (mortality) and National Health Insurance Service (morbidity)

ICD-10 E, F, G, I, J, R) 질환사망을 선별하여 이용하였고, 폭염의 직접적인 영향으로 사망에 이르는 열사병, 일사병, 열탈진 등의(ICD-10 T67) 질환사망은 구 단위로 분석하기에 사례수가 너무 적어 통계적으로 유의한 분석이 도출되지 않아 제외하였다. 내원환자수 자료는 폭염의 직접적인 영향으로 인한 ICD-10 T67 질환자수 자료를 이용하였다(Table 2).

BioCAS 분석 결과와 관측된 건강피해의 직접적인 비교를 위해서는 규모와 관련된 두 가지 문제를 해결해야 한다. 하나는 분석사례 폭염일 하루 동안의 건강피해만을 비교하기에는 피해 건수가 너무 적었다는 것이고, 또 하나는 건강 피해 자료의 공간해상도가 건물별 차이를 구분할 수 있을 정도로 높지 않았다는 것이다. 이들 문제를 해결하기 위하여 지난 10년(사망) 또는 6년(내원환자)간의 자료를 행정구별로 누적하고, 행정구별 인구차이를 보정하기 위해 천명 당 사망자수의 비율로 계산한 뒤, BioCAS의 인지온도와 초과사망률도 행정구별로 공간통계 처리하여 비교하였다.

구별 BioCAS의 비교 자료를 위해 공간통계 처리가 필요하였다. 일 최고 인지온도(PT_{max})의 공간 평균, 최대, 최솟값 및 초과사망률(r_{EM})의 공간 최대, 평균, 누적값을 산출하여 통계분석에 사용하였다. 도시민의 직접적인 열적 스트레스를 좀 더 잘 나타내기 위하여 행정구별 산출 영역은 전체 행정구 면적이 아닌 주거 영역으로 한정하였다. 통계분석으로 상관분석을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

Figure 3는 분석 사례일 12시의 기온(T), 평균복사온도(T_{mrt}), 인지온도(PT) 분포이다. 도심의 기온이 도심 내부 식생지역보다 7도 이상 높게 나타남을 알 수 있고, 도시 주변의 산악지역보다는 10도 이상 차이가 발생하였다. 평균복사온도는 일사가 집중되는 평지에서 더 높게 나타났는데, 도심에서는 빌딩 그림자 등으로 인하여 평균복사온도의 분포가 상당히 복잡하게 나타남을 알 수 있다. 기온과 평균복사온도를 종합적으로 고려한 인지온도는 주변 산지를 제외하고는 매우 높은 온도 분포를 보여주었으며, 특히 그림자가 없는 강변을 따라 높은 온도가 나타남을 알 수 있었다.

Figure 4는 분석 격자별 일 최고 인지온도(PT_{max}) 및 PT_{max} 에서 계산된 초과사망률(r_{EM}) 분포이다. 최고 인지온도는 Figure 3(c)와 같이 계산된 시간별 인지온도에서 각 격자별 일 최고값을 추출한 것이다. 도심 및 주변 식생지역에서도 남서쪽 사면은 북동쪽 사면보다 더 많은 일사량을 받음으로 인하여 더 높은 최고 인지온도가 나타났다. 도심에서는 빌딩 그림자 등의 복합적인 효과로 인하여 복잡한 온도 패턴이 나타났다. 초과사망률 분포는 일사량이 많았던 한강 영역에서 비교적 높은 초과사망 위험 영역이 뚜렷하게 나타났다. 도심에서는 최고 인지온도 분포와 마찬가지로 빌딩 그림자 등으로 인한 복잡한 패턴이 나타났다.

한강 등에 나타난 비교적 높은 초과사망 위험 영역은 실제로는 일상 생활 영역이 아니고, 인체 열 스트

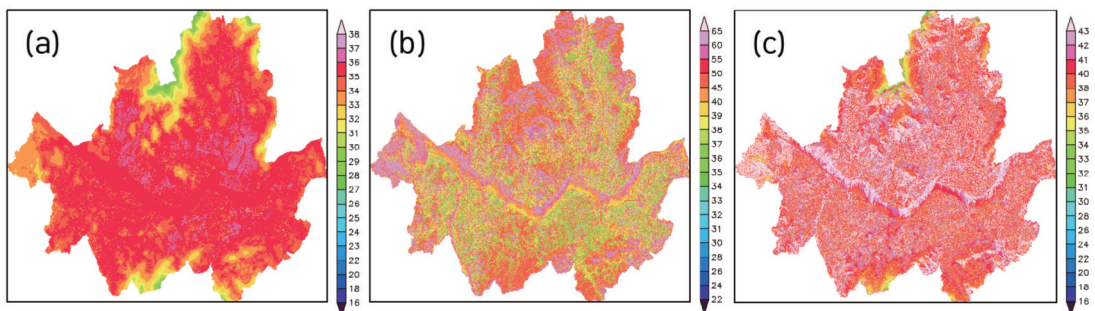


Figure 3. (a) Temperature distribution (TD), (b) mean radiant temperature (T_{mrt}), and (c) perceived temperature (PT) over the Seoul city area on 12:00 LST 5 Aug. 2012.

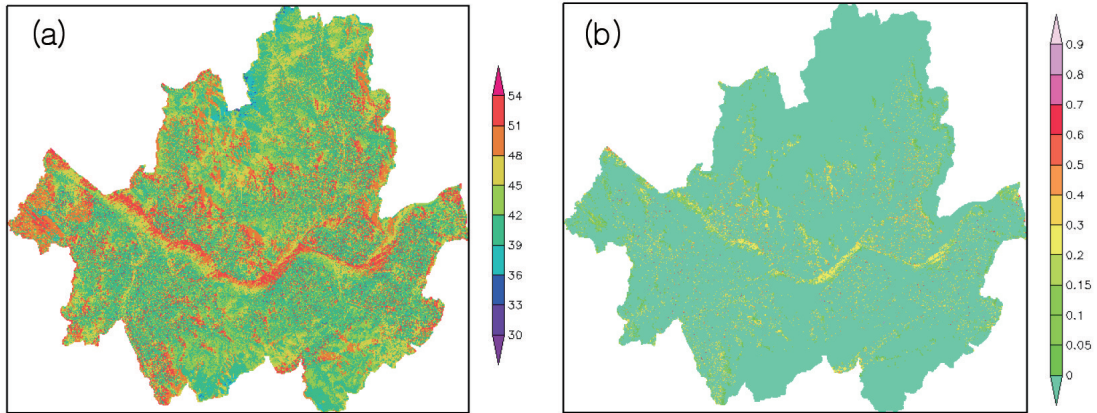


Figure 4. (a) Maximum perceived temperature (PT_{max}) and (b) excess mortality rate (r_{EM}) over the Seoul city area for the heat wave event date of 5 Aug. 2012.

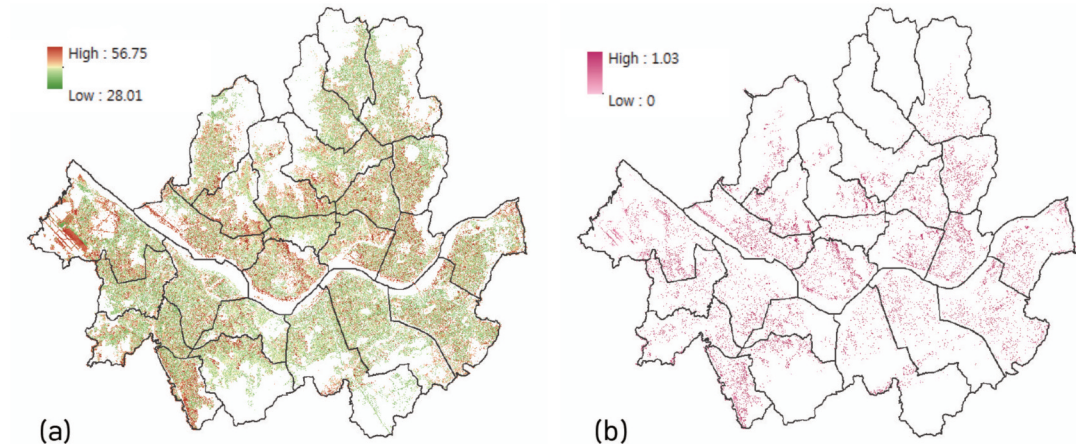


Figure 5. (a) Maximum perceived temperature (PT_{max}) and (b) excess mortality rate (r_{EM}) over the residential areas of Seoul with district boundaries for the heat wave event date of 5 Aug. 2012. Residential areas are determined by the land cover classes of built-up surface (BS) and unvegetated surface (US).

레스의 지역별 비교에 포함하기에는 무리가 있는 것으로 판단하였다. 따라서 건물(BS)과 나지(US) 지역의 BioCAS 분석자료를 추출하고 행정구별 공간 최대, 최소, 평균 및 누적값을 계산함으로써 행정구별 폭염의 건강평가를 위한 통계분석 자료를 생산하였다(Figure 5). 용산구, 마포구, 서대문구 등 도심 밀집지역에서 폭염의 초과사망 위험도가 높은 것으로 나타났고, 강북구, 도봉구 등 도시주변 산림 인접 지역에서는 폭염 위험도가 거의 나타나지 않았다.

BioCAS에서 분석된 개별 건물과 식생 단위의 건강피해 영향에는 건물과 식생의 장기간에 걸친 평균적인 기온 영향(Yi et al, 2016)이 포함되어 있기에

실제 관측된 건강 피해와 직접 비교할 때는 보다 장기적인 비교가 적합한 것으로 판단된다. 상관분석에 사용된 행정구별 폭염 사망률 및 내원환자수는 Figure 6와 같다. 대체적으로 도심 지역의 폭염 사망자와 내원환자수가 더 많은 것으로 나타났지만 사망률의 경우 인구 1,000명 당 사망자 수이므로 인구가 적은 구의 경우 사망률이 과대 추정될 수 있다.

상관분석 결과는 Table 3 및 4와 같다. 공간 최소 PT_{max} 와 사망률, 공간 최대 PT_{max} 와 내원환자수는 양의 상관관계가 인정되었다. 한편 공간 최대 PT_{max} 와 사망률간에는 음의 상관관계가 나타났다. 공간 최대 및 누적 r_{EM} 과 내원환자수는 양의 상관관계가 인정

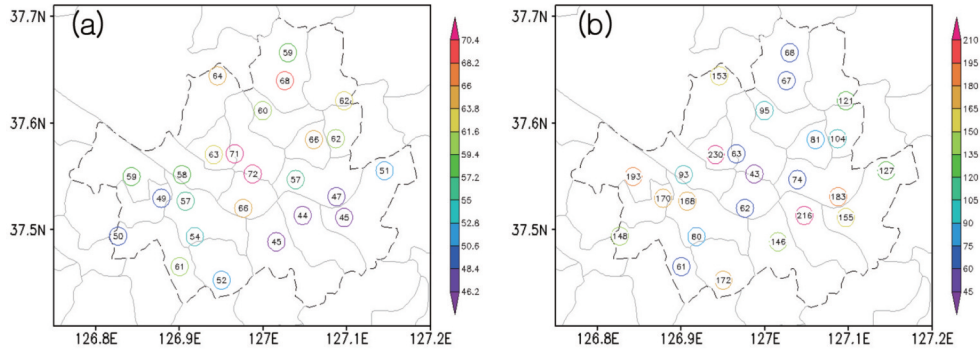


Figure 6. (a) Daily heat-specific mortality per 1,000 residents by district during 2004-2013 and (b) total number of hospital visits by heat-induced symptoms by district during 2006-2011.

Table 3. Correlation coefficients between analyzed PT_{max} from BioCAS and observed human impacts by district. PT_{max} was spatially analyzed to yield minimum, maximum, and mean values by district. Mortality and hospital visit were the same data as in Figure 6

Observation	Spatially analyzed PT_{max} :		
	Minimum	Maximum	Mean
Mortality	0.53**	-0.584**	0.234NS
(p)	(0.007)	(0.002)	(0.26)
Hospital Visit	-0.340NS	0.422*	-0.017NS
(p)	(0.10)	(0.036)	(0.93)

Table 4. Correlation coefficients between analyzed r_{EM} from BioCAS and observed human impacts by district. r_{EM} was spatially analyzed to yield maximum, mean, and total values by district. Mortality and hospital visit were the same data as in Figure 6

Observation	Spatially analyzed r_{EM} :		
	Minimum	Maximum	Mean
Mortality	-0.105NS	-0.243NS	0.11NS
(p)	(0.62)	(0.24)	(0.60)
Hospital Visit	0.515**	0.072NS	0.387*
(p)	(0.009)	(0.73)	(0.06)

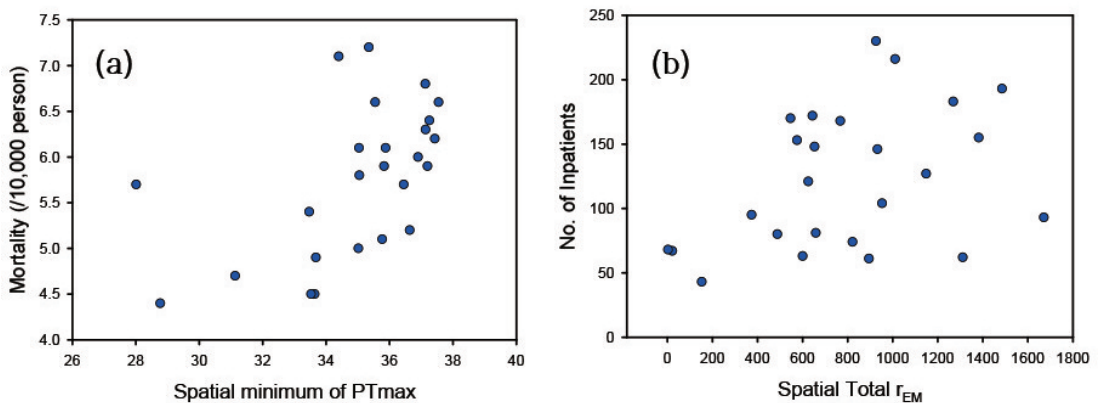


Figure 7. Scatter diagram between (a) spatial minimum of maximum PT (PT_{max}) and mortality and (b) spatial total of excess mortality (r_{EM}) and morbidity.

되었다. PT_{max} 와 r_{EM} 의 공간 평균값과 실제 관측된 건강피해인 사망률 및 내원환자수는 유의성이 없었다.

BioCAS에서 분석된 25개 구의 열적 공간 특성과 보고된 폭염 건강피해의 상관관계 중 유의한 차이를 보여준 최고 인지온도(PT_{max})의 공간 최솟값과 폭염 사망률 및 초과사망률(r_{EM})의 공간 누적값과 폭염 환자수의 관계를 Figure 7에 나타내었다. BioCAS를 통해 분석된 최고 인지온도와 초과사망률의 상세 분포는 중규모 이상 큰 규모의 지표 차등 가열과 지표 이용도와 건물 밀도 등에 따른 인공열, 복사 차단 등의 복합적인 열적 효과가 분석된 것이다. 관측된 인체 반응과의 직접적인 비교를 위하여 폭염 사망률과 내원환자수를 선택하였고, 이들 관측 자료의 공간 해상도에 맞추어 BioCAS 분석 자료를 행정구별 자료로 변환하였다. 공간자료의 변환 방법 중 공간 평균은 관측된 건강피해와 상관관계가 나타나지 않았는데, 이것은 공간 평균이 행정구별 지표면의 차이와 이에 따른 열적 스트레스 분포를 상쇄시켰기 때문인 것으로 판단된다.

PT_{max} 와의 비교를 보면 공간 최솟값과 사망률의 상관관계가 인정되었다. PT_{max} 의 공간 최솟값은 주로 식생지역에서 나타나므로 이 값이 높은 지역(행정구)은 공원이나 식생을 적게 가지고 있는 지역인 것이다. 식생 지역은 열 스트레스를 낮춰주는 역할을 하며 특히 밤 시간대 최저 기온을 낮추는 역할을 한다. 밤 시간 최저기온이 낮은 열 스트레스를 풀어주지 못한 파리의 2003년 폭염 사례에서는 사망률의 급증에 큰 영향을 준 것으로 보고되었다(Hajat 2006). 즉, 본 연구의 PT_{max} 의 공간 최솟값과 사망률의 양의 상관관계는 기존 연구결과와 부합한다.

PT_{max} 의 공간 최댓값은 내원환자수와 상관관계가 있었다. 공간 최댓값이 나타나는 지역은 주로 건물이나 나지 지역인데, 이런 지역의 일 최고 인지온도(PT_{max})가 높을수록 낮시간 동안의 과도한 열 스트레스에 따른 열 실신 등 응급상황이 빈번하게 일어날 수 있었던 것으로 해석된다. 한편 PT_{max} 의 공간 최댓값과 사망률은 역상관관계를 보였다. 이것은 낮 시간대의 높은 열 스트레스에 따라 내원환자는 증가하였

지만, 그 환자는 내원으로 인해 열 스트레스의 누적이 중단되고 폭염에 의한 사망을 회피할 수 있었기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

초과사망률(r_{EM})은 모델 개발 의도와는 달리 관측된 행정구별 사망률과는 상관관계가 없었고 내원환자수를 설명하는 것으로 나타났다. 초과사망률 모델 개발에 서울시 전역의 관측 자료를 사용하였는데, 행정구별 인구의 연령대별 구성 비율 차이에 따른 기저 폭염 위험도 차이에 따라 이러한 결과가 나타난 것으로 추정된다. 추후 행정구별 인구 구성 등을 고려한 모델 개선이 필요할 것이다. 본 연구의 일 사망자 자료 분석에서 사용한 행정구의 구분은 사망 장소가 아닌 주소지가 기준이다. 따라서 낮 시간대에 사망자가 받은 열 스트레스 발생 장소와 자료에 기록된 주소지가 같지 않을 가능성이 존재한다. 하지만 사망자가 밤 시간대에 주소지에서 받아 누적된 열 스트레스가 다음날 낮 시간대까지 누적 효과를 나타낸다고 가정한다면, 밤 시간대의 최저 기온이나 최저 인지온도 등을 이용하여 사망자 발생 모델을 개선함으로써 주소지와 열 스트레스 발생 장소의 차이에 의한 오류를 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

통계청의 폭염에 의한 사망자료 또는 국민건강보험공단의 내원환자 자료에서 발생 지점은 주민등록지 또는 병원 소재지를 기준으로 작성된다. 본 연구에서와 같이 좁은 영역에 대한 상세한 분석이 요구되는 경우 행정구별 자료로 추출하여 분석하는 것이 공간적인 최선의 방법인 것으로 판단되었다. 하지만 앞에서 기술한 바와 같이 열 스트레스의 발생 장소와 주소지 또는 내원한 병원의 주소지가 다를 수 있는 문제나 각 행정구별 연령 구성이 다름에 따라 발생할 수 있는 폭염 취약성의 불균일성 등은 기존 연구에서는 고려하지 못하였던 부분으로 향후 추가 연구가 필요한 분야이다.

IV. 결론

본 연구에서는 BioCAS를 이용하여 서울시 전역에 대한 25m 해상도의 기온, 인지온도, 초과사망률 상세 분포를 추정하였고, 실제 발생한 폭염 피해 사례

인 사망률과 내원환자수 자료를 이용하여 폭염위험도 공간 분포를 평가하였다. 상세 분포도를 행정구별 평균하면 공간적인 특성이 사라져서 폭염 피해를 설명할 수 없었지만, 공간 최대, 최소, 누적에서는 상세 분석되었던 공간 특성이 남아있고 실제 폭염 피해를 설명할 수 있는 것으로 분석되었다. 앞으로 폭염시 가동되는 응급실 내원환자 자료를 이용하도록 분석을 확대한다면 환자가 받은 열 스트레스를 좀 더 상세하게 분석할 수 있게 될 것이다. 또한 시간대별 열 스트레스 발생 빈도를 고려할 수 있도록 분석 시간을 세분화하고, 행정구별 인구 구성 차이에 따른 폭염위험도를 고려하도록 초과사망률 모델을 개선할 필요가 있다.

한편 본 연구는 이제까지의 기후영향평가에서 다루어지지 못하였던 기온 변화의 인체 영향에 대한 정량적 평가 가능성을 보여주었으나, 폭염에 의한 사망이 발생하였던 모든 날짜에 대한 상세한 건강영향을 분석하지는 못하고 있다. 연도별 상세 빌딩 · 지면 상태와 일자별 종관 기상조건을 상세히 고려하여 지난 폭염기간의 건강영향을 분석할 수 있는 토대가 마련되었으므로, 앞으로의 추가 연구에서는 폭염 사례일별 건강영향의 차이를 시 · 공간적으로 분석할 수 있을 것이다.

기후변화에 따른 건강영향 평가 · 적응 정책방향 (Shin et al. 2011)에서는 폭염을 건강영향 위해 주요 인자로 명시하고 있다. 폭염에 따른 건강 피해 분석은 인과관계의 복잡성에도 불구하고 국내외 여러 연구를 통해 건강피해모델로 개발되었다. 이전까지의 BioCAS 개발 연구(Kim et al. 2014)에서는 서울의 일부 재개발 지역을 대상으로 개별 건물 수준에서 열 환경을 분석하고 그에 따른 건강피해를 추정한 바 있다. 본 연구에서는 그 적용 범위를 서울시 전역으로 확대하고, 그 결과를 관측된 폭염 사망률과 내원환자수를 이용하여 종합적으로 판단하고 검증하였다. 이러한 연구를 통하여 기후변화에 따른 건강영향 정책 추진을 과학적으로 뒷받침할 수 있는 분석 결과를 제공하고 도시개발 영향평가 등에서 널리 활용할 수 있게 되기를 기대한다. 특히, 본 연구의 실용적 관점에서는 도시개발에 따른 상세 초과사망률 변화가 경제

적으로 어떠한 부담 또는 이익이 있는가를 판단할 근거를 제시할 수 있다. 즉, 친환경 개발 사업의 추가 비용과 편익을 경제적 영향 평가 관점에서 분석하게 되면 열 스트레스 저감을 촉진하는 개발사업에 대한 투자가치를 판단할 수 있게 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 “기상업무지원기술개발연구” 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Armstrong BG, Chalabi Z, Fenn B, Hajat S, Kovats S, Milojevic A, Wilkinson P. 2011. Association of mortality with high temperatures in a temperate climate: England and Wales. *J. Epidemiol Community Health* 65(4): 340-345.
- Curriero FC, Heiner KS, Samet JM, Zeger SL, Strug L, Patz JA. 2002. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States. *American Journal of Epidemiology* 155(1): 80-87.
- Hajat S. 2006. Climate change: extreme weather events (in Wilkinson, P. ed., “Environmental Epidemiology”). Berkshire England: Open University Press.
- Kim KR, Kwon TH, Kim YH, Koo HJ, Choi BC, Choi CY. 2009. Restoration of an inner-city stream and its impact on air temperature and humidity based on long-term monitoring data. *Adv. Atmos. Sci.* 26(2): 283-292.
- Kim KR, Yi C, Lee JS, Meier F, Jaenicke B, Fehrenbach U, Scherer D. 2014. BioCAS: Biometeorological Climate impact Assessment System for building-scale impact assessment of heat-stress related

- mortality. *Die Erde* 145(1-2): 62-79.
- Konarska J, Uddling J, Holmer B, Lutz M, Lindberg F, Pleijel H, Thorsson S. 2016. Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *Int J Biometeorol.* 60(1): 159-172.
- Kwon TH, Kim KR, Byon JY, Choi YJ. 2009. Spatiotemporal changes of the thermal environment by the restoration of an inner-city stream. *J of Environmental Impact Assessment* 18(6): 321-330. [Korean Literature]
- Lindberg F, Grimmond CSB. 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105(3-4): 311-323.
- Nastos PT, Kapsomenakis J. 2015. Regional climate model simulations of extreme air temperature in Greece. Abnormal or common records in the future climate? *Atmospheric Research* 152(15): 43-60.
- Nastos PT, Matzarakis A. 2012. The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece. *Theoretical and Applied Climatology* 108(3): 591-599.
- Scherer D, Fehrenbach U, Beha HD, Parlow E. 1999. Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes. *Atmospheric Environment* 33(24-25): 4185-4193.
- Shin YS, Ha JS, Bae HJ, Kim SD. 2011. Policy Directions for Assessment and Adaptation in Health Impacts of Climate Change. Korea Environment Institute. [Korean Literature]
- Staiger H, Laschewski G, Graetz A. 2012. The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *Int. J. Biometeorol* 56(1): 165-176.
- Theeuwes NE, Steeneveld GJ, Ronda RJ, Heusinkveld BG, van Hove LWA, Holtslag AAM. 2014. Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 140(684): 2197-2210.
- Theeuwes NE, Steeneveld GJ, Ronda RJ, Holtslag AAM. 2016. A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *Int. J. Climatol.* DOI: 10.1002/joc.4717.
- Yi C, Kim KR, An SM, Choi YJ, Holtmann A, Jaenicke B, Fehrenbach U, Scherer D. 2016. Estimating spatial patterns of air temperature at building-resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *Int. J. Climatol.* 36(2): 533-549.