

폭염시 도로 노면온도산출을 통한 위험등급 산정방안: 청주시를 대상으로

The Analysis of Road Surface Characteristics for Road Risk Management in Heat Wave: Focused on Cheongju City

양호진* · 이채연** · 배민기***

Hojin Yang · Chaeyeon Yi · Min-Ki Bae

요약: 본 연구의 목적은 폭염 시 도로관리 우선지역 및 사고발생 위험가능지역을 산출하는 것이다. 이를 위해서 미시적 기후분석을 통해 도로노면의 구성특성과 태양복사에너지 자료에 따른 도로 노면온도 정보를 산출하였고, 여름철 노면온도에 대한 우선적 관리가 필요한 지역선별을 위한 기준을 제시하였다. 분석결과, 도로 노면온도는 지형이나 건물에 의해 발생하는 그림자자유무와 높은 상관성을 나타냈고, 그림자의 비율과 표면온도의 변화량을 이용하여 4단계의 위험관리 등급을 산정하였다. 도시 외곽지역의 개방되어 있는 대형도로와 도시 내부의 낮고 평평한 형태의 공업단지 주변 소형도로에서 위험관리 등급이 높게 나타나 우선적으로 관리의 필요성을 보여주었다. 본 연구를 통해 여름철 폭염으로 인한 도로피해 대응 및 예방을 위한 관리요소들을 도출할 수 있었다.

핵심주제어: 태양복사, 노면온도, 폭염, 도로노면 관리

Abstract: The purpose of this study was to calculate the priority areas for road management and the potential areas of accident risk on heat wave days. Micro-climate analysis was conducted to calculate road surface temperatures according to the road surface compositions and solar radiation data; these findings suggested screening criteria for areas requiring priority management for summer surface temperatures. In the analysis, the road surface temperature showed a high correlation with the shadows caused by the terrain or buildings, and we calculated risk management for four levels of risk using the ratios of the shadows and the variations in the surface temperature. High risk occurred on the open roads on the outskirts of the city and on the small roads around the industrial parks in the low, flat inner city, indicating the need to manage these areas first. Through this study, it was possible to derive the management factors for preventing road damage caused by heat wave.

Key Words: Solar Radiation, Road Surface Temperature, Heat Wave, Road Management

* 주저자, 한국외국어대학교 대기환경연구센터 선임연구원

** 공동저자, 한국외국어대학교 대기환경연구센터 책임연구원

*** 교신저자, 충북연구원 연구위원

I. 서론

최근 기후변화로 인해 이상 기상현상이 빈번히 발생하면서, 여태껏 경험해보지 못한 사고들이 자주 발생하고 있다. 특히, 41℃에 이르는 폭염으로 인한 도로 균열, 자연 발화, 유리 파손 등의 사건들은 우리나라에서 일어날 것으로 예측하기 어려운 사건들이었다.

도로를 구성하는 콘크리트나 아스팔트는 온도변화에 따라 수축과 팽창을 반복하는데, 폭염 때문에 도로가 과열돼 균열과 함께 파손되는 사례가 늘어나고 있다. 실제로 2018년 7월엔 부산울산 고속도로에서 폭염으로 상판이 팽창하면서 이음쇠 장치가 돌출돼 차량들의 타이어가 파손되기도 했으며, 중앙 및 서해안고속도로, 울산대교에서는 콘크리트가 팽창하면서 도로가 솟아올라 교통이 통제되기도 했다. 도로 노면 온도는 직접적으로 아스팔트를 녹이거나 타이어 파손에도 영향을 미치는데 기온이 30℃ 이상 일 때 타이어 펑크사고도 약 42.8% 정도 증가한다(현대해상, 2013). 이처럼 폭염으로 인한 도로 안전성 저하는 대형 참사로까지 이어질 수 있어 대책마련이 시급하다. 물론 국가와 지자체에서는 도로에 물을 뿌리거나 차열성 포장을 하거나 클린로드 시스템을 구비하는 등의 노력을 하고 있지만 한정된 구역에서 특정 시간에만 시행되고 있는 실정이다. 이를 고려할 때 도로 관리에서 폭염에 적절히 대응하기 위한 노력이 한층 요구되는 시점이다.

도로 노면온도는 구성 재질, 주변 지형, 일사량 등에 따라 열 흡수와 방출량이 달라지며, 이상고온이 지속되는 날이 많아지면 도로노면 온도변화 및 관련 사고의 발생 가능성도 증가한다. 이와 관련하여 도로자체의 피해 및 관련 사고에 대한 가능성을 미리 인지할 수 있는 사전 정보가 있다면 효율적인 대응이 가능하지만 그와 관련된 연구도 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기상조건에 따른 미시적 기후 분석을 통해 도로 노면의 구성특성과 일사량 정보를 이용하여 도로 노면온도 정보를 산출하여, 폭염시 도로관리 우선지역 및 사고발생 위험가능지역을 산출하고 구

간별 우선적 관리가 필요한 지역선별을 위한 기준을 제시하고자 한다. 본 연구결과는 폭염이 발생했을 때 노면 훼손으로 인한 교통사고 피해가능성을 미리 인지하고 대책을 마련하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

II. 선행연구고찰

도시화로 인한 다양한 토지피복 변화 중 대표적인 것은 도로 면적의 증가이며, 이는 직접적인 교통량 증가로 이어져 폭염발생시 도시열섬의 주범이 되기도 하고, 폭염으로 훼손되기도 하고, 2차 피해 발생원이 되기도 한다. 폭염과 관련해서 도시, 보건, 건축물 등의 분야에서는 도시열섬 해결 및 건강영향 저감을 위해 다양한 연구들이 이뤄지고 있다(송봉근·박경훈, 2012; 서경호·박경훈, 2017). 이에 비해 도로분야에서는 노출된 아스팔트나 콘크리트와 같은 포장도로가 도시열섬을 악화시키는 요인이라는 것은 인식되고 있을 뿐, 도로 자체가 폭염 피해대상이 되거나 2차 피해의 원인이 된다는 측면에서 시도된 연구는 거의 없는 실정이다.

실제로 강우시 노면유출 특성(강희민 등, 2012; 신성훈 등, 2019), 노면 온도 예측(송동운, 2014; 김인수 등, 2014), 도로의 기하구조와 도로교통 조건이 도로 주변부 기온에 미치는 한계효과 파악(이유화 등, 2013), 지표면과 대기사이의 열-에너지 균형원리를 이용한 노면온도예측모형 개발(양충현 등, 2011), 노면결빙 위험특성 파악(이동현 등, 2013; 김상엽 등, 2015; 도로교통연구원, 2016) 등의 기존 연구는 있었으나, 미시적 기후 분석을 통해 도로노면의 구성특성과 일사량 정보를 이용하여 도로 노면온도를 산출한 연구는 거의 없었다.

도로 노상, 혹은 가로 식재의 온도 변화 및 현열(Heat flux)의 정도를 빅데이터, 시뮬레이션 분석, 위성, 항공사진, 원격 열환경 측정, 현장 실측 자료 등을 통해 파악하여 대책을 제시하거나(김승현 등, 2017; 이유화 등, 2013), 지자체 도로포장 파손형태 및 대책 방안(진정훈 등, 2012), 도로 침

하에 따른 아스팔트 파손(강인원 등, 2012)등의 연구가 있었으나 폭염으로 인한 도로 훼손과는 거리가 있었다.

이처럼 아직까지 도시 내 폭염 시 도로에의 영향은 훼손 후 현황 파악 수준이며, 폭염과의 정량적인 인과관계 파악, 과학적 예측, 효과 규명을 통한 정책제안 등은 아직 미비한 실정이다. 특히 정책적인 측면에서 폭염 시 피해 확률이 높을 것으로 예상되는 도로가 어디인지를 예측할 수 있다면, 실제적인 인명과 재산피해를 최소화하는데 큰 도움이 될 것으로 판단되나, 폭염 시 도시 내 관리 우선지역을 찾아내는 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 여름철 토지피복 유형별 노면온도 분석 및 노면온도 위험등급 산정하고 청주시를 대상으로 위험구간을 도출해보고자 한다.

III. 연구방법

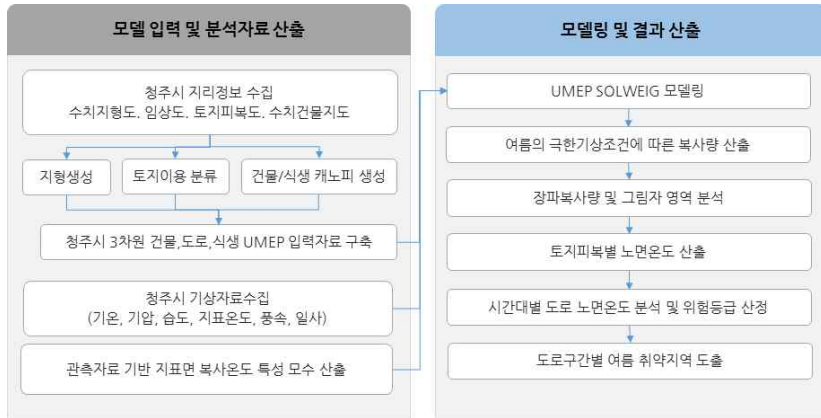
도로 노면온도는 노면상태에 영향을 미치는 주요 요인으로 태양복사, 주변지형물의 물리적 특성(건물, 지형높이, 식생구성), 노면구성 재질특성(알베도, 열용량, 열방출율) 등 다양한 환경적 요인에 의해 결정된다. 이를 위하여 도로노면 주변의 환경적요인을 종합하여 노면온도를 산출할 수 있는 UMEP SOLWEIG 모델¹⁾을 사용하였다. 모델에 도로노면을 구성하기 위하여 수치지형도, 수치건물도, 임상도, 토지피복도 자료를 이용하여 모델에 입력되는 형태로 지형, 토지이용, 건물/식생 캐노피 입력자료를 구축하였고, 청주기상지청의 ASOS(Automated Synoptic Observing System) 자료를 이용하여 실제 기상정보(기온, 지표온도, 일사)를 반영하였다.

UMEP SOLWEIG 모델링을 통하여 여름의 기상조건에 따른 도로 노면의 복사온도를 산출하고, 토지피복별 방출량에 따른 표면온도 산출식을

1) UMEP: Urban Multi-scale Environmental Predictor, SOLWEIG 모델: Solar Long Wave Environmental Irradiance Geometry model.

적용하여 도로 노면온도를 산출하였다. 노면온도 정보를 이용하여 도로 열환경 분석을 실시하고 위험등급을 산정²⁾하여 여름철 취약지역을 도출하였다(〈그림 1〉).

〈그림 1〉 도로노면온도 산출방법 및 취약구간 도출 흐름도



1. 연구대상지 선정

연구지역은 충청북도 청주시이며, 청주시를 중심으로 한 지역으로 가로 25km, 세로 22km로 청주시내 도심지 도로와 1순환, 2순환, 3순환 외곽도로를 포함하는 영역이다(〈그림 2의 상단 오른쪽〉). 청주시는 2018년 기준 전국에서 열대야가 가장 오래 지속된 도시로서 폭염으로 가로수 고사 및 도로변형이 발생하고 있어 여름철 도로안전사고 위험이 높은 지역이라 연구대상지로 적합하다고 판단된다.

1순환로는 청주시 청원구 울량동 상리 교차로를 기준으로 하여 반시계 방향으로 순환하는 도로로, 총 길이는 19.32km이고 왕복 4~7차선 도로이다. 도심지 내부에 위치하여 건물구조물에 의한 음영과 콘크리트 및 아스팔트 피복의 도로가 구성되어 있다. 2순환로는 청주시 청원구 울량동 상

2) 본 연구에서는 도로노면온도가 높으면 잠재적인 위험도 높다고 전제하였으나, 실제로는 노면온도와 위험도가 반드시 일치하는 것은 아니다.

리 교차로와 상당구 지북동 지북 교차로를 잇는 충청북도의 도로이다. 1순환로보다 더 외곽을 순환하는 도로이며, 왕복 4~7차선 도로로 이루어져 있고 건물지역과 식생지역 사이에 위치하여 복합적 요인이 있다. 외곽에 위치한 3순환로는 청주시 상당구 남일면 효촌분기점에서 시작해 청원구 내수읍 국동교차로를 잇는 도로이다. 청주시 국도대체우회도로라고도 불리며, 동부 구간 일부는 개통되지 않았다. 주변의 지형고도가 상대적으로 높으며 식생지역으로 구성되어 있다.

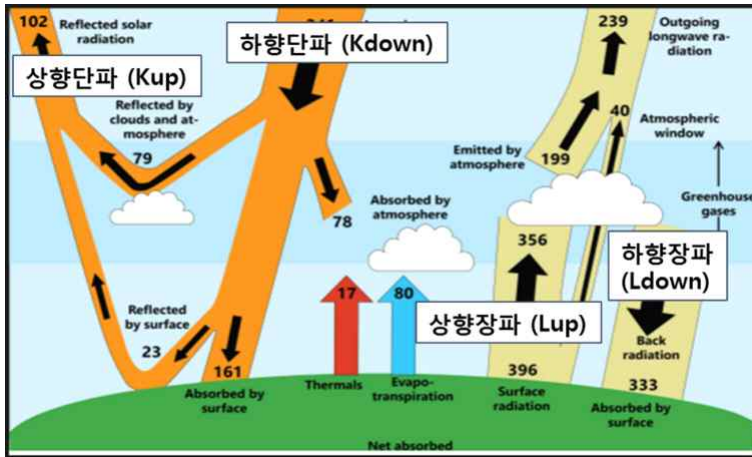
〈그림 2〉 청주시 도로망지도 및 도로환경



2. SOLWEIG 모델

본 연구에서 사용된 SOLWEIG 모델은 식생과 건물의 천개지수(Sky view factor)와 그림자효과, 지형에 의한 Ground view factor, 매 시간별 기온, 습도, 일사량 자료를 이용하여 상향 및 하향 단파, 상향 및 하향 장파 복사량을 계산한다(〈그림 3〉). 이러한 복사량의 자료를 이용해 연구대상지의 격자마다 평균복사온도를 계산할 수 있으며 평균복사온도를 이용하여 도로수준에서의 시공간적 변화에 대한 수치적 진단이 가능하다.

〈그림 3〉 복사플럭스 개념도



출처: <http://climatica.org.uk/greenhouse-effect-role-earths-climate>

본 모델에 적용되어 있는 방정식은 태양으로부터 입사되는 복사량(하향단파복사)과 대기 중에서 반사되는 복사(상향단파복사)량이 있으며, 지표면에 흡수되었다가 다시 방출하는 복사량(상향장파복사)과 대기중에서 반사되어 다시 지표면으로 흡수되는 복사량(하향장파복사)의 관계를 적용하고 있다(Yi et al., 2018). 모델의 정확도는 선행연구들에 의해 검증된바 있다. Lindberg et al.(2016)는 관측실험을 통해 SOLWEIG 모델이 실제적으로 복사량을 잘 모의하고 있음을 확인 하였고, Yi et al.(2018)은 복사관측과 위성자료를 이용하여 실제적인 복사온도와 표면온도를 생산할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 SOLWEIG 모델의 산출식 중에 상향장파복사량을 이용하여 도로 표면온도를 산출하였고, 상향장파복사의 관계식은 식은 아래와 같다.

(1)

는 격자의 행렬(i, j)에서의 상향장파복사, 은 토지피복별 방출률, 은 스테판-볼츠만 상수, 는 격자의 행렬(i, j)에서의 그림자 유무

(유:0, 무:1), T_s 는 표면온도, T_a 기온을 말한다.

표면온도와 기온의 차이($T_s - T_a$)는 Lindberg et al.(2016)의 관측실험을 통해 고안된 경험식을 사용하여 산출하였다. 경험식은 다음과 같으며, 토지피복별 사용된 모수는 <표 1>과 같다.

$$y = T_s / \eta_{\max} x + T_{start} \quad (2)$$

<표 1> 표면온도추정에 사용된 관계식 모수

	Emissivity(ϵ_g)	$T_s / \eta_{\max}$	T_{start}
Buildings	0.95	0.37	-3.41
Dark_asphalt	0.95	0.58	-9.78
Grass	0.94	0.21	-3.38
Water	0.98	0	0

자료: Lindberg et al.(2016)

산출된 상향장파복사량 자료를 이용하여, 식 (1)을 아래와 같은 형태로 변형하여 표면온도를 변환 산출하였다.

$$T_s = \left(\frac{L_{\uparrow ij}}{\epsilon_g \sigma} \right)^{-4} \quad (3)$$

$$* \sigma: 5.67 \times 10^{-8} kg s^{-3} K^{-4}$$

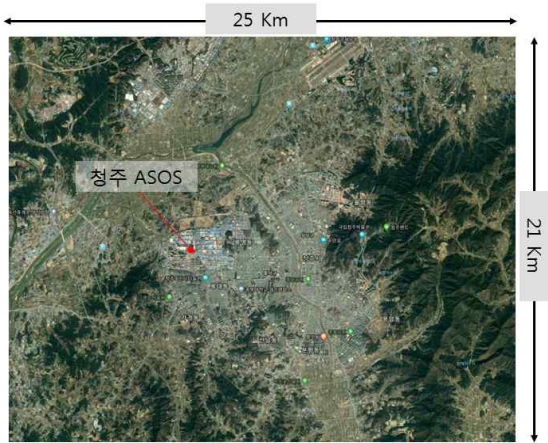
3. 입력자료 구축

1) 기상자료

실제적인 태양복사와 온도 반영을 위하여 청주 ASOS 131번 지점 자료를 이용하여 입력자료를 생성하였다. 청주 ASOS 131 지점은 청주시 흥덕구의 청주기상지청 내에 위치하고 있으며(<그림 4>), 청주시 내외와 제 1, 2, 3 순환로를 포함하는 청주 일대의 종관기상을 대표하는 정규기상관측

자료를 생산하고 있다. 기상청 ASOS 자료는 기온, 강수량, 풍향, 풍속, 습도, 기압, 일조, 일사, 전운량 등으로 구성되어 있으며, 연구대상 일시인 2016년 8월 12일 자료를 SOLWEIG의 입력 형태로 변환하였다.

〈그림 4〉 청주 ASOS 위치



〈표 2〉 모델에 입력되는 기상자료

Year	Month	Day	Hour	Relative humidity [%]	Air temperature [°C]	Kdown [W/m²]	Wind direction [°]	Wind speed [m/s]
2016	8	12	8	71	27.0	233.3	340	0.6
2016	8	12	9	66	28.3	411.1	320	1.7
2016	8	12	10	63	29.5	577.8	290	1.9
2016	8	12	11	54	31.1	713.9	340	2.3
2016	8	12	12	52	31.9	811.1	360	1.5
2016	8	12	13	52	33.0	741.7	20	2.1
2016	8	12	14	47	33.5	605.6	360	1.7
2016	8	12	15	46	34.2	622.2	340	1.7
2016	8	12	16	39	34.9	605.6	250	2.1

2) 도시환경 및 지형자료

모델의 지면정보 입력자료는 국토지리정보원의 수치지형도를 사용하였고, 본 수치지형자료는 1:1000 축적의 자료로 건물과 지형의 정확도가 높으며 2016년 기준 자료로 최신의 건물 및 지형을 포함하고 있다. 형태분류의 건물자료, 점군분류와 선 분류로 구성된 지형자료를 4m 해상도의 래스터로 변환하여, 형태분류의 건물자료와 결합하여 지표면 입력자료를 생성하였다.

식생정보 입력자료는 산림청으로부터 제공받은 2015년~2017년에 제작된 형태분류 식생높이 자료를 사용하였고, SOLWEIG 모델에 입력되는 식생자료는 Canopy DEM과 Trunk zone DEM으로 두 가지 형태로 구분된다. Canopy DEM은 식생의 상부높이까지를 표현하며, Trunk zone DEM은 식생의 하부와 둘레에 대한 정보를 표현하는 것이며, 본 연구에서는 식생의 하부를 전체 식생높이의 25% 값으로 적용하였다.

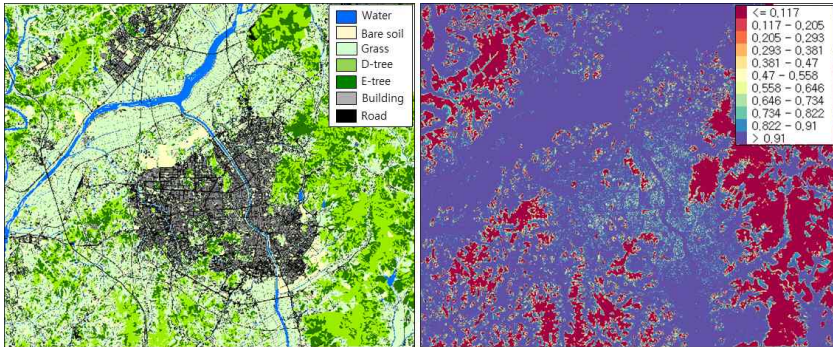
도시지역은 건물과 같은 복잡한 구조물로 구성되어 있어 도시지역의 복사량 계산을 위해서는 건물 구조물의 벽면과 건물 구조물 사이의 너비에 대한 정보가 필요하다. 도시 벽면 높이 계산을 위해 Lindberg et al. (2015a)의 필터링을 이용하여 DSM 자료로부터 벽면위치와 높이, 경사 측면의 높이를 계산하고, Lindberg et al.(2015b)의 선형필터를 통해 벽면방향을 추정하였다.

천개지수(Sky view factor)는 패널중심의 반구면적으로부터 복사흡수(방출) 방향을 나타내며, 이는 구조물구역과 개방구역을 0에서 1사이의 무차원단위로 표현된다. DSM자료를 이용해 산출 할 수 있으며, 식생을 동시에 고려한 천개지수 산출이 가능하다. 본 연구에서는 Lindberg and Grimmond(2011)이 사용한 방법을 이용하여 천개지수를 산출 하였으며 식생의 잎을 통과하는 태양빛의 투과율은 0.03%로 적용하였다.

토지피복별 차등 가열효과를 적용하기 위하여 환경부제공 토지피복 세분류도를 이용하여 청주시 주변지역에 대한 토지피복분류를 수행하고 모델에 입력되는 형태로 재분류하였다(〈그림 4〉). 재분류된 토지피복은 도로

(Road-1), 건물(Building-2), 침엽수(Etree-3), 활엽수(Dtree-4), 자연초지(Grass-5), 나지(Bare soil-6), 수역(Water-7)으로 구분되었고, 이 토지피복 유형에 따라 알베도, 방출률 등의 매개변수들에 차등 적용된다.

〈그림 5〉 토지피복 분류(좌)와 천개지수(우)



IV. 분석결과 및 고찰

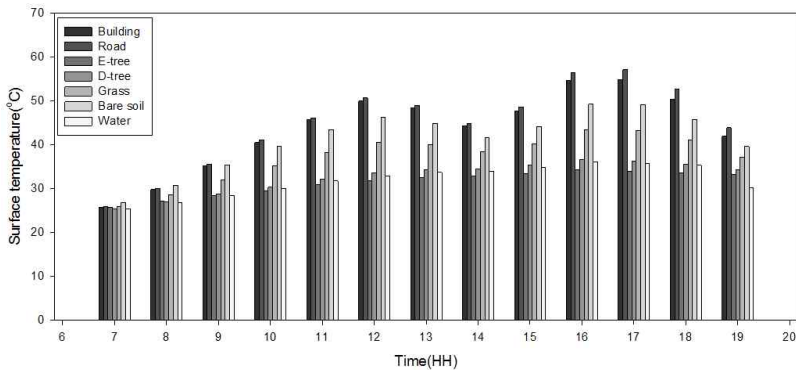
SOLWEIG 모델과 표면온도 산출식에 의해 토지피복 유형별 표면온도를 산출하였고, 일사에 대한 영향을 분석하였다. 분석된 결과로부터 위험등급을 구분하고, 위험도가 높은 등급을 나타내는 지역에 대한 공간특성을 분석하였다.

1. 여름철 토지피복 유형별 표면온도

가열이 시작되는 시간인 오전 7시에는 토지피복별 표면온도에 차이가 크게 나타나지 않으나, 태양고도각이 높아짐에 따라 토지피복 유형별 표면온도 차이가 나타나기 시작한다(〈그림 5〉). 전반적으로 열 흡수율이 높은 아스팔트재질의 도로면과 건물지역에서 빠른 온도상승이 발생하였으며, 도로면에서는 최대 평균온도가 약 58℃까지 상승하였다. 반면에 식생

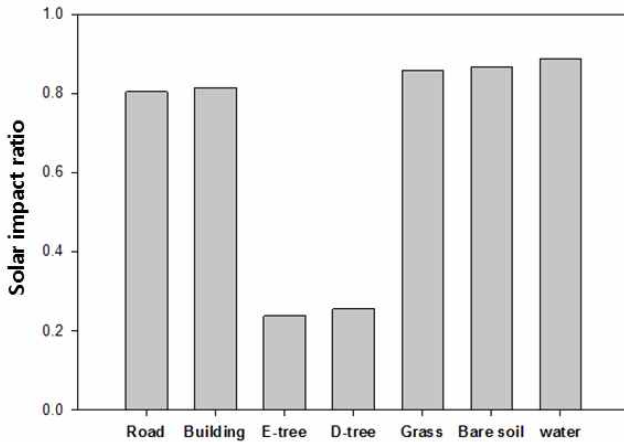
지역(E-tree, D-tree)에서는 온도 상승속도가 인공피복지역(Building, Road)에 비해 느렸으며, 최대 평균온도가 35℃로 인공피복지역에 비해 낮게 나타났다.

〈그림 6〉 시간에 따른 토지피복 유형별 표면온도 변화(2016년 8월 12일)



이는 인공피복지역의 열 흡수율과 용량이 상대적으로 크기 때문에 많은 양의 열을 흡수 및 저장하고, 식생지역은 나무의 차광효과로 인해 항상 음영이 저있기 때문인 것으로 판단된다. 식생지역의 주간 평균 일사영향 비율은 0.2로 매우 낮았으며, 이를 제외한 다른 토지피복 유형에서는 평균적으로 0.8 이상으로 일사의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다(〈그림 7〉). 도로, 건물, 자연초지, 나지, 수역 중에서 도로지역은 다른 지역에 비해 상대적으로 일사영향이 적은 것으로 나타났으며, 이는 도로면에서 건물로 인한 그림자가 일사차단에 영향을 주는 것으로 보인다. 건물지역에서의 일사영향은 옥상면에서의 일사영향을 나타내며, 이 밖에 자연초지, 나지, 수역 모두 개방된 공간이기 때문에 높게 나타난 것으로 보인다.

〈그림 7〉 연구영역의 토지피복 유형별 일사영향 비율(범위: 0~1)



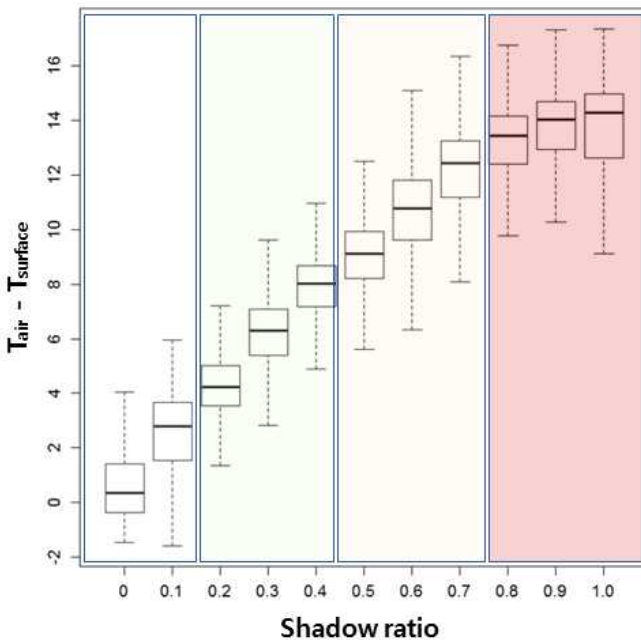
2. 노면온도 위험등급 산정

그림자분포 비율정도에 따라 등급을 분류하기 위하여, 대기와 표면온도의 차이($T_{\text{air}} - T_{\text{surface}}$)와 그림자비율(shadow ratio)에 대하여 일원 분산 분석을 하였다. 일원 분산분석은 범주화된 집단 요인이 둘이나 셋 이상인 집단 간 평균을 비교하는데 사용된다. 그림자분포(0~1)를 10% 단위로 그룹화하여 온도변화의 정도를 분석한 결과(〈그림 8, 표 3〉), P 값이 $2e-16$ 미만으로 유의수준(95%) 보다 매우 낮게 나타났다. 이를 통해 그림자 비율에 따라서 온도변화에 영향을 준다고 판단할 수 있다.

그림자비율 그룹 간 각각 관계를 비교하여 분석한 결과(〈표 4〉), 각각의 그림자비율 그룹간에 평균온도차이가 0 이상 나타났다. 이는 각각의 그림자 그룹이 표면온도에 유효한 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 그림자가 없는 그룹과 그림자가 완전히 존재하는 그룹간의 차이는 최대 13.7°C 차이를 보였다. 그림자가 없는(0) 그룹과 그림자가 반 정도 존재(0.5)하는 그룹까지는 온도차이가 점진적으로 높게 나타나, 각 그룹별로 의미성을 가지고 있고 0.6과 0.7그룹, 0.8~1.0까지의 그룹은 각각 비슷한 경향을 보여, 정성적으로 같은 등급으로 분류할 수 있다.

각각의 그림자분포 비율그룹이 개별적인 유효성을 지니고 있지만, 위험 등급 분류와 간소화를 위해 유사한 효과를 주는 그룹으로 재그룹화하였다. 재그룹화를 위하여 각 그룹의 평균표면온도를 산정하였고, 그룹간 평균표면 온도변화의 경도가 비교적 높은 경계를 기준으로 단계를 산정하였다. <그림 9>의 그룹간 평균표면온도차이(DMST, Difference of Mean Surface Temperature)에 따라 4단계의 위험등급 기준을 산정하였다. 1단계는 그림자 비율이 0~0.1, 2단계는 0.2~0.4, 3단계는 0.5~0.7, 4단계는 0.8~1.0으로 각각의 단계로 산정하였다.

<그림 8> 그림자분포비율에 따른 대기과 표면온도 차이의 변화량과 4단계의 등급화



〈표 3〉 그림자분포 비율 그룹별 통계 값

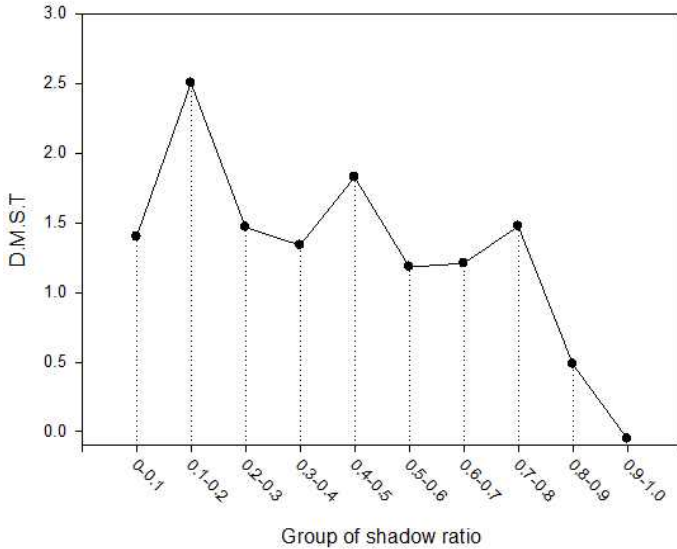
Shadow ratio	Min	1st Qu	Median	3rd Qu	Max
0.0	-1.47	-0.35	0.36	1.42	4.23
0.1	-1.79	1.54	2.78	3.66	5.96
0.2	-1.73	3.54	4.23	5.00	7.61
0.3	-2.25	5.37	6.31	7.08	9.80
0.4	-2.08	7.16	8.01	8.68	12.16
0.5	-3.15	8.19	9.12	9.92	14.10
0.6	-3.58	9.62	10.78	11.81	15.93
0.7	-3.57	11.19	12.43	13.26	16.88
0.8	-3.25	12.40	13.42	14.14	17.46
0.9	-3.24	12.92	14.03	14.69	17.62
1.0	-2.79	12.63	14.28	14.98	17.33

〈표 4〉 그림자분포 비율 그룹간 다중비교 분포 통계 값

group	diff	lwr	upr	padj
0.1-0	1.399874	1.259633	1.540115	0
0.2-0	3.902603	3.796976	4.00823	0
0.3-0	5.370424	5.266016	5.474831	0
0.4-0	6.709039	6.606596	6.811482	0
0.5-0	8.536253	8.437956	8.634549	0
0.6-0	9.719357	9.620498	9.818217	0
0.7-0	10.9276	10.82932	11.02588	0
0.8-0	12.4032	12.30636	12.50005	0
0.9-0	12.88812	12.79119	12.98505	0
1-0	12.83591	12.73907	12.93274	0
0.2-0.1	2.502729	2.391657	2.6138	0
0.3-0.1	3.970549	3.860637	4.080462	0
0.4-0.1	5.309165	5.201117	5.417212	0
0.5-0.1	7.136378	7.032253	7.240503	0
0.6-0.1	8.319483	8.214827	8.42414	0

0.5-0.2	4.63365	4.585363	4.681936	0
0.6-0.2	5.816754	5.767333	5.866176	0
0.7-0.2	7.024996	6.976736	7.073255	0
0.8-0.2	8.500601	8.455336	8.545866	0
0.9-0.2	8.985516	8.940083	9.03095	0
1-0.2	8.933302	8.888067	8.978537	0
0.4-0.3	1.338615	1.284692	1.392538	0
0.5-0.3	3.165829	3.120273	3.211385	0
0.6-0.3	4.348934	4.302175	4.395692	0
0.7-0.3	5.557175	5.511647	5.602703	0
0.8-0.3	7.03278	6.990439	7.075121	0
0.9-0.3	7.517696	7.475175	7.560217	0
1-0.3	7.465481	7.423173	7.50779	0
0.5-0.4	1.827214	1.78636	1.868067	0
0.6-0.4	3.010319	2.968129	3.052508	0
0.7-0.4	4.21856	4.177739	4.259381	0
0.8-0.4	5.694165	5.656931	5.731399	0
0.9-0.4	6.179081	6.141642	6.216519	0
1-0.4	6.126866	6.089669	6.164064	0
0.6-0.5	1.183105	1.152321	1.213888	0
0.7-0.5	2.391346	2.362466	2.420226	0
0.8-0.5	3.866951	3.843413	3.890489	0
0.9-0.5	4.351867	4.328006	4.375727	0
1-0.5	4.299653	4.276172	4.323133	0
0.7-0.6	1.208241	1.1775	1.238982	0
0.8-0.6	2.683846	2.658059	2.709634	0
0.9-0.6	3.168762	3.14268	3.194844	0
1-0.6	3.116548	3.090813	3.142282	0
0.8-0.7	1.475605	1.452123	1.499088	0
0.9-0.7	1.960521	1.936715	1.984326	0
1-0.7	1.908307	1.884882	1.931731	0
0.9-0.8	0.484916	0.467984	0.501848	0

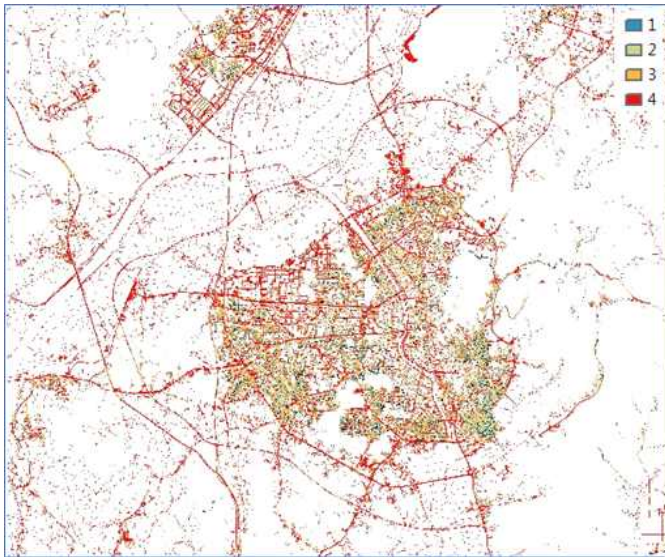
〈그림 9〉 그림자분포비를 그룹간 평균표면온도 차이



3. 노면온도 위험등급 공간특성

개방된 공간에 위치한 대형도로들 대부분은 고수준의 도로위험 관리등급이 나타났다(〈그림 10〉). 대형도로의 일부 구간에서는 1~3단계의 낮은 관리등급이 나타난 구간도 있는데, 이는 주변에 높은 지형과 식생이 존재하는 산지 구간에 위치하여 그림자의 영향을 많이 받는 지역이다. 대부분의 대형도로 2순환, 3순환 도로 구간은 일사의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 도심지 내의 소형도로에서는 3단계 이하의 비교적 낮은 등급이 나타났으며, 도심지의 고층 빌딩과 내부에 위치한 식생지역에 의한 그림자 효과에 의한 것으로 판단된다.

〈그림 10〉 연구영역 내 도로노면온도 위험등급 분포도

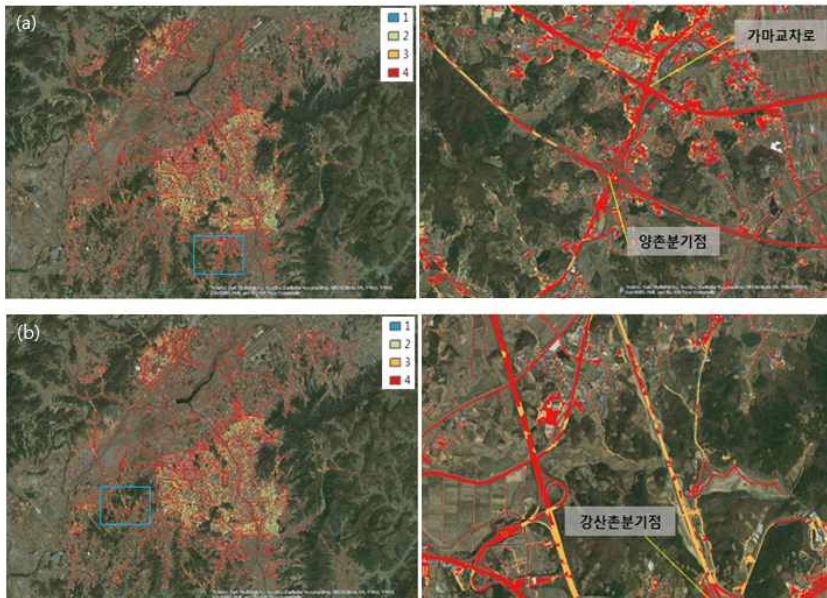


1) 청주 2순환 및 3순환 도로

청주시 외곽에 위치한 2, 3 순환로는 비교적 균질한 초지 지대를 가로질러 지형이나 식생에 의해 발생하는 그림자의 영향을 비교적 받지 않고 높은 열환경에 노출되어 전반적으로 높은 관리등급이 산정되었다. 가마교 차로 주변지역은 높은 지형이 없고 초지대이기 때문에 대기온도보다 15℃ 높은 온도분포가 나타났다(〈그림 11a〉). 양촌분기점 역시 마찬가지로 비슷한 주변 지형, 지표 구성으로 인해 같은 도로관리 등급이 산정되었고 양촌분기점 북동방향으로 약 1.5km 떨어진 일부 구간은 비교적 높은 지대의 식생지역을 통과하여 주변 도로에 비해 약 3℃ 낮은 온도 분포가 나타나 한 단계 낮은 등급으로 산정되었다.

강산촌 분기점 북쪽구간과 주변 일부 구간에서는 주변 도로온도보다 약 7℃ 낮은 온도 분포가 나타났는데, 이는 비교적 키가 높은 나무식생 사이를 지나는 도로구간이 많았으며, 골 형태의 지형에 위치하여 그림자의 영향을 비교적 많이 받았기 때문이다(〈그림 11b〉).

〈그림 11〉 청주 2순환 및 3순환 도로 노면온도 위험도



2) 청주시내 도로

시내지역의 대부분의 도로에서는 3등급 수준의 비교적 높은 관리 등급이 산정 되었지만, 외곽 도로들에 비해 낮은 온도 분포를 나타내었다. 특히 아파트와 같은 고층 건물 주변의 소도로에서는 주요 대형도로 온도보다 7~8℃ 낮은 지역이 분포하며, 식생뿐만 아니라 건물의 그림자에 의한 기온 저감효과가 요인임을 나타낸다.

청주의 공업단지는 시내와 같이 건물이 존재 하고 있지만 고층건물이 없고 비교적 균질한 형태의 높이구조를 가지고 있다. 또한 지형의 높낮이 차이가 거의 없고, 주변의 토지피복도 논, 밭과 포장재질로 이루어져 있어 도로의 온도가 대기온도보다 15℃ 이상 높게 나타났다.

〈그림 12〉 청주 시내 도로 노면온도 위험도



V. 결론

본 연구는 폭염으로 인한 피해 중 도로피해에 초점을 두고 청주시를 대상으로 토지피복 유형별로 표면온도 산정하고 그 중 도로 노면온도를 통해 폭염 시 우선 관리가 필요한 도로구간을 찾아내는데 목적이 있다.

분석결과, 도로 노면온도는 일사가 지속되는 시간 및 그림자의 유무와 상관성이 높게 나타났다. 이 관계를 통해 위험등급을 구분할 수 있었으며, 높은 위험등급을 나타낸 청주시 2,3차 순환도로 및 공업단지 주변도로의 관리 필요성이 높은 것으로 나타났다.

이 구간을 대상으로 우선 시도해 볼 수 있는 것은 첫 번째, 새로운 도로 포장법을 적용해 보는 것이다. 아스팔트 포장의 경우 빛을 반사하는 특수 도료를 이용해 노면의 온도를 10도 이상 낮추는 차열성 포장 공법을 시공을 시도해 볼 수 있다.

둘째, 도로의 식생 중앙분리대는 설치하지 않은 도로에 비해 1.3~2.2℃ 정도의 기온 저감효과가 있으며, 도로 경관미 향상과 도시 쾌적성 개선에도 효과가 있기 때문에 적극 도입을 고려한다. 현실적으로 교통량이 많은 도로에 우선 설치를 고려하고 하는 것이 바람직하다.

셋째, 교통흐름을 원활하게 하는 것도 중요한 관리 요소이다. 평균통행속도가 낮아질수록, 차로당 교통량이 많을수록 차량으로부터 발생하는 인공폐열로 인해 기온이 올라가기 때문이다.

넷째, 도로 물청소 확대 및 클린로드 시스템 도입을 검토해볼 필요가 있다. 클린로드는 도로 지면의 온도를 20도가량 낮추어 주며, 도로에서 발생하는 먼지를 줄여주는 역할도 할 수 있다.

다섯째, 폭염시 화물차나 트레일러 등 대형차량이 자주 통행하는 아스팔트 도로는 상대적으로 훼손되기 쉬우므로 해당 도로 관리에 유의할 필요가 있으며, 타이어 펑크는 대형사고로 이어질 수 있기 때문에 운전자들의 인식개선노력도 요구된다.

본 연구에서는 여름철 폭염시 도로관리에 초점을 두었으나 장마철 집중호우 때 많이 발생하는 포트-홀 파손, 혹은 발생시 동결에 의한 파손 등 기후변화에 따른 도로 구조물의 다양한 파손 사례를 검토하여 체계적인 개선전략을 마련할 시점이라고 판단된다.

본 연구는 도로 피해의 노면온도를 대상으로 했기 때문에 교통량 증가, 도로 포장 노후화 등을 고려하지는 못하였다. 또한 상대적으로 노면온도가 높다는 것이 위험수준도 높다는 것을 의미하지는 않으므로 위험등급을 실제 사업과 연계할 때는 다양한 도로여건을 고려할 필요가 있다. 실제적인 모의가 가능한 것으로 검증된 모형이지만 추후 실제 관측치와의 비교 검증이 필요하며, 우선관리 도로로 규명된 지역을 중심으로 실제 교통사고와의 관계나 유동인구 속성과의 관계를 규명하는 연구도 진행될 필요가 있다.

■ 참고문헌 ■

- 강인원·조상훈·심철우·김동철, 2012, “도로 침하에 따른 아스팔트 파손에 대한 연구,” 『대한안전경영과학회지』, 14(3), pp.175-181.
- 강희만·이두진·배우근·강혜진, 2012, “강우시 고속도로 노면 유출 오염부하 발생 특성 분석,” 『상하수도학회지』, 26(1), pp.47-54.
- 김상엽·장영수·김성규·민동찬·나호혁·최재성, 2015, “겨울철 도시부 노면결빙사고 발생에 미치는 요소에 관한 연구,” 『한국도로학회논문집』, 17(2), pp.79-87.
- 김승현·김강화·이민우·조연주·함유근, 2017, “도로 노면상태 및 기상 빅데이터 분석을 통한 차량 안전성 제고,” 『정보화연구』, 14(4), pp.375-386.
- 김인수·양충현·최기주, 2014, “신경망 이론을 이용한 노면온도예측모형 개발,” 『大韓交通學會誌』, 32(6), pp.686-693, DOI: 10.7470/jkst.2014.32.6.686.
- 도로교통연구원, 2016, “동절기 도로안전을 위한 노면관리 방안,” (연구보고서; 2016 연구원 ; 2016-55-534.9607호), 화성: 한국도로공사 도로교통연구원.
- 서경호·박경훈, 2017, “GIS 및 MODIS 영상을 활용한 행정구역별 도시열섬강도 분석,” 『한국지리정보학회지』, 20(2), pp.1-16.
- 송동웅, 2014, “지표면 에너지 수지 이론을 이용한 도로노면온도예측을 위한 예단 모델 개발,” 『한국지반공학학회논문집』, 30(11), pp.17-23.
- 송봉근·박경훈, 2012, “도시공간을 고려한 야간시간대의 열섬특성 분석,” 『한국지리정보학회지』, 15(1), pp.133-143.
- 신성훈·백영석·박준하·박점옥, 2019, “물 부족 해결을 위한 도로노면 유출수 처리 및 빗물 재이용 방안 연구,” 『한국수처리학회지』, 27(1), pp.31-38, DOI: 10.17640/KSWST.2018.27.1.31.
- 양충현·박문수·윤덕근, 2011, “도로기상정보체계 활성화를 위한 노면온도예측 모형 개발,” 『大韓交通學會誌』, 29(2), pp.123-131.
- 이동현·정원석·김홍진·김지원, 2013, “도로 노면 일조량에 따른 결빙 위험도 평가 방법에 관한 연구,” 『한국구조물진단유지관리공학회 논문집』, 17(5), pp.130-135, DOI: 10.11112/jksmi.2013.17.5.130.
- 이유화·양인철·김도경·임지현, 2013, “도로 주변부 기온에 영향을 미치는 요인에 관한 연구,” 『Journal of the Korean Society of Civil Engineers』, 33(4), pp.1619~1629, DOI: 10.12652/Ksce.2013.33.4.1619.
- 진정훈·조명환·이재식·박종태, 2012, “지자체 도로포장 파손형태 및 대책 방안,” 『도로학회지』, 14(3), pp.12-18.
- 현대해상 교통기후환경연구소, 2013, 『여름철 교통사고 특성분석』, 서울: 현대해상 교통기후환경연구소.
- Lindberg, F. and C. Grimmond, 2011, “The influence of vegetation and building

- morphology on shadow patterns and mean radiant temperature in urban areas: Model development and evaluation,” *Theoretical and Applied Climatology*, 105(3), pp.311-323.
- Lindberg, F., P. Jonsson, T. Honjo, and Wastberg, D., 2015a, “Solar energy on building envelopes - 3D modelling in a 2D environment,” *Solar Energy*, 115, pp.369-378.
- Lindberg, F., C. S. B. Grimmond, and A. Martilli, 2015b, “Sunlit fractions on urban facets - Impact of spatial resolution and approach,” *Urban Climate*, 12, pp.65-84, DOI: 10.1016/j.uclim.2014.11.006.
- Lindberg, F., S. Onomura, and C. S. B. Grimmond, 2016, “Influence of ground surface characteristics on the mean radiant temperature in urban areas,” *International Journal of Biometeorology*, 60(9), pp.1439-1452.
- Yi, C. Y., H. G. Kwon, and F. Lindberg, 2018, “고밀도 주거지역에서의 복사플럭스 영향 연구-서울시 중랑구 지역을 대상으로-,” 『한국지리정보학회지』, 21(4), pp.26-49, DOI: 10.11108/kagis.2018.21.4.026.
- Haigh, J., 2014, “The greenhouse effect and its role in the Earth’s climate,” <http://climatica.org.uk/greenhouse-effect-role-earths-climate>.

양호진: 부경대학교 환경대기과학전공으로 석사학위를 취득하고, 현재 한국외국어대학교 박사과정 중 및 대기환경연구센터에 선임연구원으로 재직중이다. 도시 미기후 및 미기상과 관련된 관측자료 분석, 기계학습, 수치기상모델링 등의 방법론을 사용하여 연구수행을 하고 있다(hobakzzz@nate.com).

이채연: 한양대학교 대기공학전공으로 석사학위를 취득하고, 현재 한국외국어대학교 박사과정 수료 및 대기환경연구센터에 책임연구원으로 재직중이다. 기상자료와 환경모델을 응용하여 도시기후·환경정책 및 계획분야에 적용될 수 있는 서비스정보 개발연구를 수행하고 있다(https://www.researchgate.net/profile/Chaeyeon_Yi).

배민기: 현재 충북연구원 상생발전연구부 연구위원, 충청북도 재난안전연구센터장으로 재직하고 있으며, 기후변화, 재난안전 등에 관심을 가지며 연구를 수행하고 있다. 현재 미세먼지, 폭염 등과 관련된 과제를 수행중이며 “지자체 공간화기반 환경보전계획수립방안”(2017), “도시 내 생활안전 대응시설의 공간분포 특성 분석”(2016) 등의 논문이 있다(mkbae@cri.re.kr).

투 고 일: 2019년 07월 31일
심 사 일: 2019년 08월 05일
게재확정일: 2019년 09월 09일