

수도권 열섬 중심으로부터 교외까지의 거리 및 국지적 지표특성이 야간 기온분포에 미치는 영향*

이채연^{1*} · 김규량² · 안승만³ · 최영진¹

Impact of the Local Surface Characteristics and the Distance from the Center of Heat Island to Suburban Areas on the Night Temperature Distribution over the Seoul Metropolitan Area*

Chae-Yeon YI^{1*} · Kyu-Rang KIM² · Seung-Man AN³ · Young-Jean CHOI¹

요 약

서울과 주변을 포함하는 수도권에서 발생하는 열섬현상의 특성들을 정량적으로 이해하기 위하여 GIS 및 AWS 관측 자료들을 이용하여 여름과 겨울 야간 기온분포의 공간 경향 그래프를 작성하였다. 또한 기온 변동성에 영향을 미치는 요인들과 31개 AWS 지점들의 야간 평균기온과의 상관성을 분석을 하였다. 그 결과, 야간 평균기온(2004년~2011년) 최고지점과 최저지점의 차이는 여름 4.5°C, 겨울 7.1°C 임을 확인하였다. AWS 지점들 주변의 국지적 지표특성과 기온과의 상관성 분석 결과, 지점별 야간 평균 기온과 반경 1km 이내의 인공피복의 상관계수가 여름(0.84)과 겨울(0.78) 모두에서 높게 나타나 지표면 피복이 중규모적인 도시 열환경 관리에 있어 다른 요인들보다 더 큰 영향을 주는 요인임을 확인하였다. 한편 수도권 야간기온에 대한 회귀모형을 변수선택법을 이용하여 개발한 결과 1km 규모에서 보다 200m 규모에서 상세한 지표특성 변수가 선택됨을 알 수 있었는데, 규모에 따른 모형의 설명력에는 큰 차이가 없었다. 따라서 200m 정도의 상세한 지표특성 자료를 이용하는 기후분석 모델의 구현이 가능함을 알 수 있었으며, 모델의 설명력은 1km 수준으로 분석하였을 때와 비슷한 수준인 57%(겨울)~72%(여름)이었다.

주요어 : 도시열섬, 3차원 도시구조, 토지피복, 지역기후, 야간 평균기온, 회귀모델

2013년 11월 2일 접수 Received on November 2, 2013 / 2014년 1월 7일 수정 Revised on January 7, 2014 / 2014년 2월 17일 심사완료 Accepted on February 17, 2014

* 본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었음(153-3100-3133-302-350).

1 기상기술개발원 차세대도시농림융합기상사업단 Weather Information Service Engine Project, Center for Atmospheric Science & Earthquake Research

2 국립기상연구소 응용기상연구과 Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research

3 건국대학교 신기술융합과 Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University

* Corresponding Author E-mail : prpr.chaeyeon@gmail.com

ABSTRACT

In order to understand the impacts of surface characteristics and the distance from the urban heat island center to suburban areas on the mean night time air temperature, we analyzed GIS and AWS observational data. Spatial distributions of mean night time air temperature during the summer and winter periods of 2004–2011 (six years) were utilized. Results show that the temperature gradients were different by distance and direction. We found high correlation between mean night-time air temperature and artificial land cover area within 1km and 200m radii during both summer ($R=0.84$) and winter ($R=0.78$) seasons. Regression models either from 1km and 200m land surface data explained the distribution of night-time temperature equally well if the input data had sufficient resolution with detailed attribute including building area and height.

KEYWORDS : *Urban Heat Island, 3D Urban Structure, Land Cover, Local Climate, Night-Time Daily Mean Air Temperature, Regression Model*

서 론

전 세계적으로 몇몇 선진국(developed country) 도시들을 제외한다면, 현재 산업화 관련 경제활동을 활발히 추진하는 개발도상국(developing country) 도시들 대부분에서는 공통적으로 자연피복 면적이 줄고 인공피복 면적이 증가하고 있다(Bounoua *et al.*, 2009). 이러한 도시화는 도시지형 및 경관 등 형태적 변화뿐만 아니라 기온, 바람, 습도, 대기오염 등 물리적이고 기능적인 변화를 일으킨다. 이중 도시열섬현상은 도시의 생태, 보건, 환경 분야에서 중요하게 다루는 연구주제로(Yague *et al.*, 1991; Klysiak and Fortuniak, 1999; Montavez *et al.*, 2000) 다수 도시기후 연구들의 공통적인 주장은 도시열섬현상이 지표면을 구성하는 물질들의 열적특성과 대기의 상호작용으로 설명되며(Kuttler *et al.*, 2007; Chow and Svoma, 2011; Park and Kim, 2011; Brandsma and Wolters, 2012; Goldbach and Kuttler, 2012; Lengfeld and Ament, 2012) 결과적으로 지역적 도시기후

완화를 위해서는 다양한 과학적 증거들을 이용해 고유한 지역적 특성을 이해하는 노력이 필요하다(Stewart and Oke, 2012).

도시열섬현상 연구에는 주로 항공/위성 원격탐사, 수치모델, 기상관측 도구를 이용한 과학적 방법들이 이용되고 있다. MODIS 및 Landsat 등 위성 원격탐사 기법을 이용해 수행된 연구들(Roth *et al.*, 1989; Yi, 2005; Bhang and Park, 2009; Fung *et al.*, 2009; Wong *et al.*, 2011)은 도시화로 대표되는 인간활동 및 토지피복 변화가 미치는 도시열섬현상을 지표면온도(land surface temperature, LST) 등을 통해 공간적, 정량적으로 설명하고 있다. 그러나 위성 원격탐사 기법은 3차원 도시 공간에서 발생하는 입체적 기작을 설명하거나 위성이 촬영되지 않은 시간대의 도시열섬을 설명하는데 있어 기술적 한계가 있다. 따라서 최근에는 수치모델들을 이용한 3차원 시공간 모델링 결과, 자동기상관측망(AWS) 자료 등 지표면 근처의 관측 수행 결과, 위성관측자료 분석 결과 등 과학적 증거들을 함께 적용 및 비교하여 도시열섬현상 설명에 대한 신뢰도를 높이고 있다.

한편, 국내 도시열섬현상 연구에서는 인간의 활동에 의한 인공열 방출을 반영하기 위해, 위성영상과 AWS 기상자료를 이용해 용도지구별 영향강도 분석(Ahn *et al.*, 2012)을 하였고, 도시의 위성영상 기반 건물용도별 분류에 따른 에너지사용과 열적 특성을 분석하였다(Lee *et al.*, 2008; Bhang and Park, 2010). Chun *et al.*(2012)은 도시계획에 있어서 입체적인 도시 구조와 인공열 영향이 함께 고려되어 반영이 되어야 한다고 제안했으며, Ryu and Baik (2012)은 WRF-UCM 수치모델을 이용하여 인공열, 불투수층, 3차원 건물구조 요인이 기온에 미치는 상대적 열섬 영향 강도를 연구하였는데, 지표환경, 도시위치, 계절별 기상조건들이 함께 고려된 분석이 필요함을 언급하였다.

국립기상연구소에서는 베를린공대와 함께 도시기후분석(Climat Analysis Seoul, CAS) 시스템을 개발하였고, AWS의 야간기온분포를 이용하여 검증하였다(Yi *et al.*, 2011). CAS 시스템은 항공 LiDAR, 위성영상자료를 이용해 고해상도 3차원 건물 및 식생 분석, 수치모델에 따른 중규모 기온과 바람분포, 건물의 열적부하 및 식생의 냉각효과를 기후지도로 출판한다. CAS 시스템에 의한 서울기후지도 출판결과에 의하면 도심과 교외의 기온은 토지피복과 건물 부피에 따라 5~6°C 정도까지 차이를 보이는 것으로 나타났다. 특히, 도시의 복잡한 구조를 상세하게 설명할 수 있는 고해상도 3차원 공간 자료를 적용하였을 때, 모델 결과와 지상관측 결과의 야간 기온분포 상관성은 더욱 유의하게 나타났다(Yi *et al.*, 2012b). 이는 2차원보다 3차원 지표이용 입력자료가 야간 도시열섬현상 기작을 보다 잘 설명함을 의미한다. 더불어 Yi *et al.*(2012a)은 종관기압장이 서울관측소 풍속에 미치는 영향 분석을 통해 지형, 건물 등 국지적 지표특성이 풍속변이에 크게(약 70%) 기여함을 확인하였다.

본 연구에서는 종관기상의 영향을 제외한 국지적 지표특성이 야간기온에 미치는 영향을 분

석하고자, 야간 평균기온 최고지점으로부터 교외 방향으로 거리에 따라 기온경사도 분석을 하였고, AWS 관측지점 주변의 2차원 토지피복 및 3차원 건물높이, 부피 등을 고려하여 야간 평균기온에 영향을 주는 요인을 선정하여 상관 분석을 하였다. 또한 도시의 다양한 지표이용 형태를 기상 및 기후모델에 입력하기 위해서는 일정한 규모 단위로 평균값을 추출하여 활용하여야 하는데, 대표적인 중규모 모델인 WRF-UCM과 국지규모 모델인 CAS에서는 각각 1km와 200m 정도의 해상도로 분석하고 있다. 여기서는 각 모델의 입력자료 해상도인 1km와 200m로 평균한 지표특성 요인들이 기온분석에 미치는 영향을 분석함으로써, 입력자료 규모에 따른 기온분석 기여 요인을 상세하게 정량화하고자 하였다.

연구 대상지 및 방법

1. AWS 지점 선정

수도권 중심으로부터 거리에 따른 야간 평균기온 특성을 분석하기 위해 그림 1과 같은 AWS 관측지점들을 선정하였다. 선정된 AWS 관측지점은 CAS 시스템의 중규모 모델 지역 내에 위치하며 서울시를 중심으로 E-W, NW-SE, NE-SW 방향으로 분포하고 있는 기상청 AWS 지점들이다. 구분된 세 축은 ① 양수리~부천 방향(E-W) ② 탄현~마장 방향(NW-SE) ③ 화현~서신 방향(NE-SW)으로 교외지역과 도심지역을 선형적으로 연결하는 총 31개 지점이다. 각 방향별 선택된 지점은 ① 부천, 대야, 구로, 광명, 기상청, 광진, 강동, 하남, 양수리 ② 탄현, 금촌, 주교, 고양, 은평, 서울, 중구, 강남, 성남, 오포, 마장 ③ 화현, 광릉, 노원, 동대문, 성동, 용산, 금천, 소하, 고잔, 송산, 서신이다.

2. 연구수행 과정

야간 기온특성 분석을 위해 AWS 31개 지점별 20:00~06:00 시간대 평균기온을 이용하였

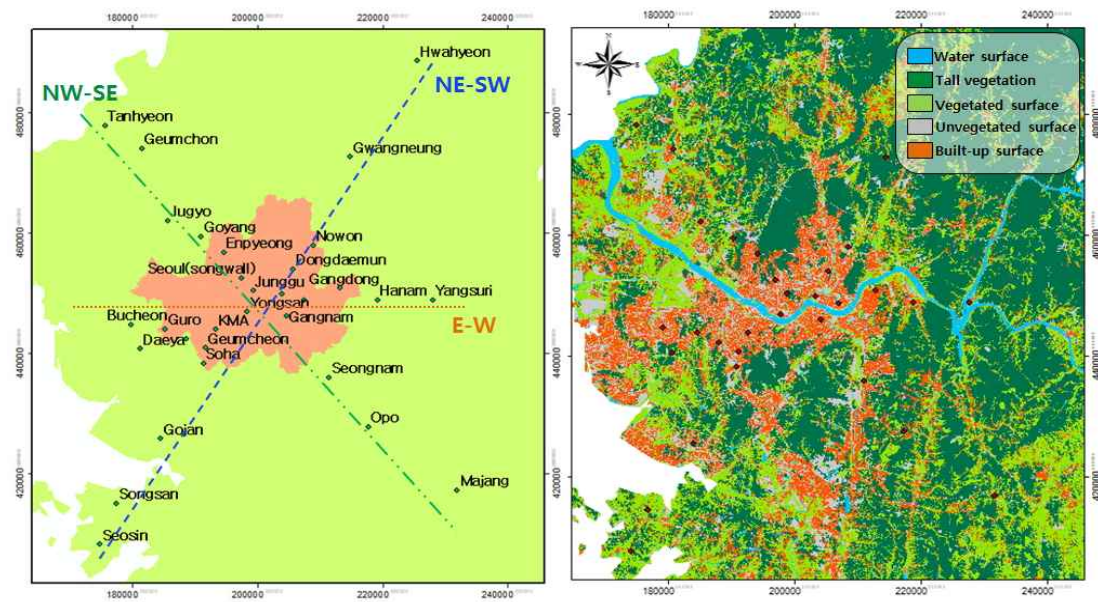


FIGURE 1. Selected AWS (left) considering three compass directions (E–W, NW–SE, NE–SW) and land cover distribution (right) of Seoul and surrounding area

고, 자료 기간은 2004년 12월~2011년 8월로 여름(6월~8월) 및 겨울(12월~2월)이었다. 수도권 중심에서 가장 높은 야간 평균기온이 관측된 광진 AWS를 수도권의 도시열섬의 상징적 중심지점으로 선정하였다. 광진 AWS를 기준으로 주변 AWS 지점들까지의 거리를 계산하여 거리에 따른 야간 평균기온의 차이를 구하였고, 여름과 겨울의 야간 열섬효과를 볼 수 있는 공간 경향 그래프를 작성하였다.

또한 인공피복(건물, 도로, 주차장), 자연피복(숲, 초지), 수역, 건물높이, 건물면적, 건물부피, Sky View Factor(SVF, 0~1), 중심으로부터의 거리를 야간기온에 영향을 미치는 요인들로 선정하였다. 각 요인들의 값 추출에 사용된 GIS 자료는 1m 해상도의 수치건물모델(Digital Building Model, DBM)로써, 국토지리정보원의 항공 LiDAR 자료로부터 생성된 수치지형모델(Digital Elevation Model, DEM)에 안전행정부의 새주소 건물지도의 건물 층수 자료를 중첩하여 작성하였다(표 1). 작성된 DBM

을 이용하여 Zakšek *et al.*(2011)에 의해 제안된 방법으로 SVF를 산출하였다. 산출된 자료로부터 각 AWS 지점 반경 200m와 1km를 국지규모와 중규모 분석 범위로 설정하고, 각 범위에 따른 요인 값을 추출하여 기온과의 상관분석을 수행하였다. 반경 200m 영역은 CAS 시스템의 국지규모 분석해상도이고, 반경 1km 영역은 도시와 근교에서 관측되는 복잡한 중규모 기상현상에 대한 가장 작은 중규모 영역이다(Orlanski, 1975).

본 연구에서 상관분석은 인공피복, 자연피복, 수역, 건물높이, 건물면적, 건물부피, SVF, 중심으로부터의 거리를 독립변수로 선정하고, 31개 관측지점의 여름/겨울 야간 평균기온을 종속변수로 선정하여 수행하였다. 일반 선형회귀모델의 회귀변수 결정은 SAS의 STEPWISE 프로시저를 이용하여 변수중감법(단계적 회귀모델링)을 적용하였고 여름/겨울 야간 평균기온을 가장 잘 설명하는 요인들과 회귀식을 도출하였다(그림 2).

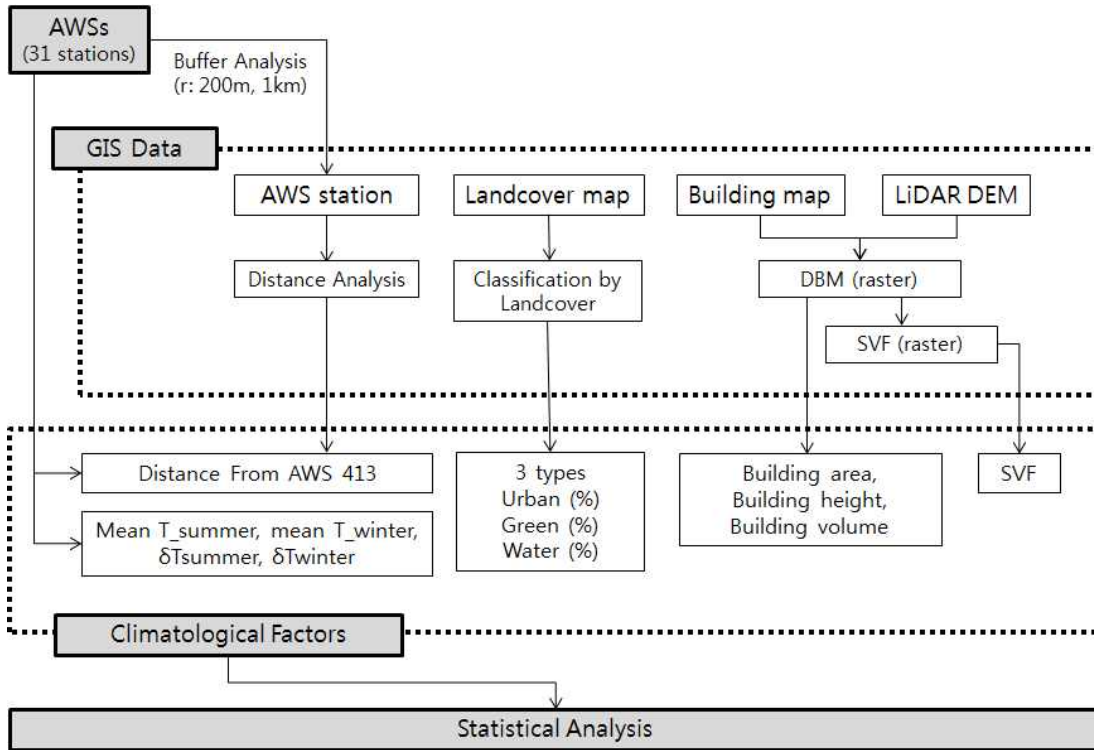


FIGURE 2. Flowchart of the analysis processes on the night temperature using AWS and GIS data

TABLE 1. Input data utilized in this study

Type	Scale /Resolution	Used attributes	Data source
AWS	-	Air temperature	Korea Meteorological Administration
Land cover	1 : 25,000	Land cover area	Ministry of Environment
Building map	1 : 1,000	Area, Height, Permeability	Ministry of Security and Public Administration
LiDAR DEM	1 m × 1 m	Height (A.G.L, A.S.L)	National Geographical Information Institute

연구결과 및 고찰

1. 여름과 겨울의 야간 평균기온 특성

그림 3은 2004년~2011년 여름 및 겨울 31개 지점의 야간 평균 기온자료를 이용하여 x, y 방향으로 투영한 3차원 공간적 분포이다. 여름 기온은 19.7℃(화현)~24.2℃(광진), 겨울

기온은 -7.2℃(화현)~-0.1℃(금천) 범위에 분포하고 있었으며, 야간 평균기온 최고지점과 최저지점의 차이는 여름 4.5℃, 겨울 7.1℃이다. 즉, 여름보다 겨울에 도심과 교외의 기온 차이가 2.6℃ 만큼 더 크게 관측되었다(표 2). 6년에 걸쳐 측정된 각 AWS 지점들의 야간 평균기온 공간적 분포 경향을 보면, 여름과 겨울

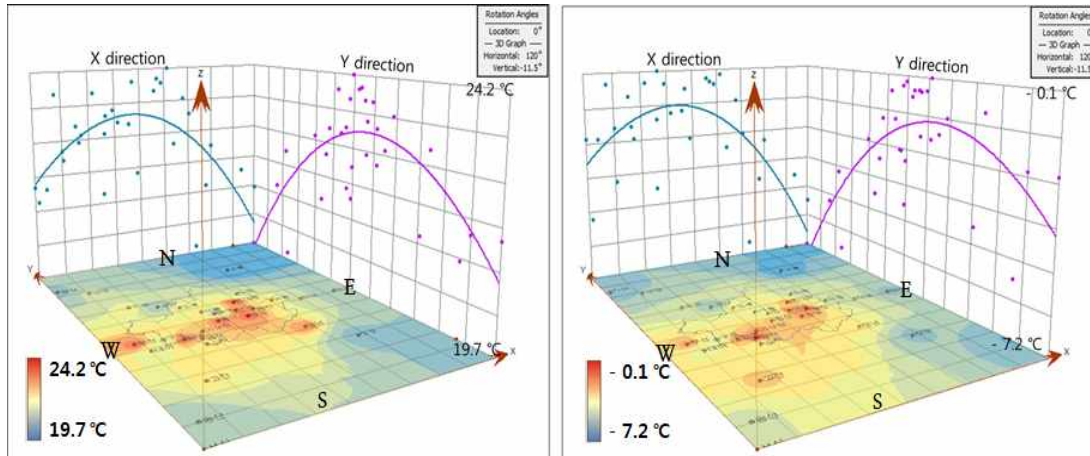


FIGURE 3. Graphs of the three-dimensional spatial distribution of the night temperature in metropolitan area. summer(left), winter(right)

TABLE 2. Landcover ratio of AWS observation points, distance from Gwangjin point (#413) and night temperature distribution

AWS No.	AWS name	Urban (%)		Green (%)		Water (%)		Distance (km)	Mean Temp. summer (°C)	Mean Temp. winter (°C)	δT summer (°C)	δT winter (°C)	
		r:200m	r:1km	r:200m	r:1km	r:200m	r:1km						
481	Tanhyeon	54.5	18.3	45.5	80.5	0.0	1.2	43.5	21.4	-5.1	-2.8	-4.8	
506	Geumchon	39.2	51.5	54.9	46.9	5.9	1.6	36.5	22.3	-3.9	-1.9	-3.6	
450	Jugyo	92.3	56.6	7.7	42.4	0.0	0.9	25.6	22.8	-2.5	-1.4	-2.1	
NW-SE Direction	540	Goyang	36.1	30.1	63.9	69.7	0.0	0.3	19.7	21.4	-4.3	-2.8	-3.9
	416	Enpyeong	99.2	66.0	0.8	34.0	0.0	0.0	15.2	23.0	-1.6	-1.2	-1.3
	108	Seoul(songwall)	100.0	89.5	0.0	10.6	0.0	0.0	10.7	23.0	-1.6	-1.2	-1.2
	419	Junggu	19.0	53.3	81.0	46.7	0.0	0.0	8.3	21.8	-2.6	-2.4	-2.2
	400	Gangnam	100.0	90.7	0.0	9.3	0.0	0.0	3.9	24.0	-0.6	-0.2	-0.2
	572	Seongnam	45.5	40.0	54.5	56.9	0.0	3.2	13.6	23.5	-1.3	-0.7	-1.0
	459	Opo	42.6	36.7	49.2	61.3	8.2	1.9	23.8	21.4	-4.4	-2.9	-4.0
	461	Majang	35.2	22.5	64.8	74.8	0.0	2.7	40.5	21.2	-5.5	-3.0	-5.1
E-W Direction	533	Yangsuri	9.7	11.1	88.9	27.9	1.5	61.1	20.8	21.6	-4.4	-2.6	-4.0
	444	Hanam	74.3	60.0	25.7	40.0	0.0	0.0	11.9	22.3	-2.9	-1.9	-2.5
	402	Gangdong	100.0	74.9	0.0	25.1	0.0	0.0	6.2	23.1	-2.6	-1.1	-2.2
	413	Gwangjin	100.0	93.1	0.0	5.3	0.0	1.6	0.0	24.2	-0.3	0.0	0.0
	410	Gisangcheong	44.0	87.8	55.7	11.5	0.3	0.7	15.1	23.3	-0.6	-0.9	-0.3
	437	Gwangmyeong	90.6	82.5	9.4	14.9	0.0	2.6	20.0	23.7	-0.6	-0.5	-0.2
	423	Guro	67.5	62.7	32.5	37.3	0.0	0.0	22.9	22.6	-2.0	-1.6	-1.7
	544	Daeya	42.2	12.9	57.8	87.1	0.0	0.0	27.6	22.5	-2.0	-1.7	-1.7
433	Bucheon	57.6	93.4	42.4	6.5	0.0	0.0	28.2	23.7	-0.6	-0.5	-0.2	

TABLE 2. Continued

AWS No.	AWS name	Urban (%)		Green (%)		Water (%)		Distance (km)	Mean Temp. summer (°C)	Mean Temp. winter (°C)	δT summer (°C)	δT winter (°C)
		r:200m	r:1km	r:200m	r:1km	r:200m	r:1km					
476	Hwahyeon	36.8	9.5	63.2	86.8	0.0	3.7	44.3	19.7	-7.2	-4.5	-6.9
599	Gwangneung	19.8	2.7	80.2	96.2	0.0	1.2	25.3	19.9	-6.8	-4.3	-6.4
407	Nowon	74.6	60.7	25.5	38.6	0.0	0.7	9.3	22.4	-3.0	-1.8	-2.7
408	Dongdaemun	78.5	85.5	20.5	14.5	1.0	0.0	5.5	23.9	-0.7	-0.3	-0.3
421	Seongdong	65.0	61.5	33.3	27.3	1.7	11.2	3.7	23.7	-0.5	-0.5	-0.1
415	Yongsan	100.0	72.7	0.0	9.8	0.0	17.5	9.3	23.9	-0.8	-0.3	-0.5
417	Geumcheon	100.0	93.2	0.0	6.6	0.0	0.2	17.8	23.2	-0.2	-1.0	0.2
453	Soha	45.8	73.8	52.5	22.5	1.7	3.7	19.4	22.8	-1.8	-1.4	-1.5
435	Gojan	53.5	60.4	21.3	33.7	25.2	5.9	32.8	23.0	-1.0	-1.2	-0.6
488	Songsan	0.0	9.3	100.0	88.9	0.0	1.9	45.7	21.7	-2.4	-2.5	-2.0
489	Seosin	22.1	14.1	77.9	85.9	0.0	0.0	52.7	21.7	-2.4	-2.5	-2.0

모두 광진 AWS를 중심으로 높은 야간온도가 관측되고 있으며, 거리에 따라 뚜렷한 음(-)의 기울기를 가진 분포를 보인다. 또한 연구지역의 x 방향에서는 서쪽이, y 방향에서는 남쪽이 상대적으로 더 높은 기온을 보이고 있어 광진 지점을 중심으로 볼 때 각 세 축의 방향에 따라 기온경사도가 달랐고, 야간 도시열섬의 공간적 분포 특성이 뚜렷하게 나타났다.

2. 최고 기온지점으로부터 6개 방향별 기온 경사도

수도권의 경우 서울을 중심으로 거리가 멀어짐에 따라 도시화 경향이 낮아지지만 방향별로 도시화 속도 및 토지피복이 불균질하고, 특히 서쪽 방향으로는 인천광역시 및 위성도시들이 다수 분포하고 있어 도시화 경향이 다르다. 따라서 열섬 중심으로부터 교외로의 방향별 경향

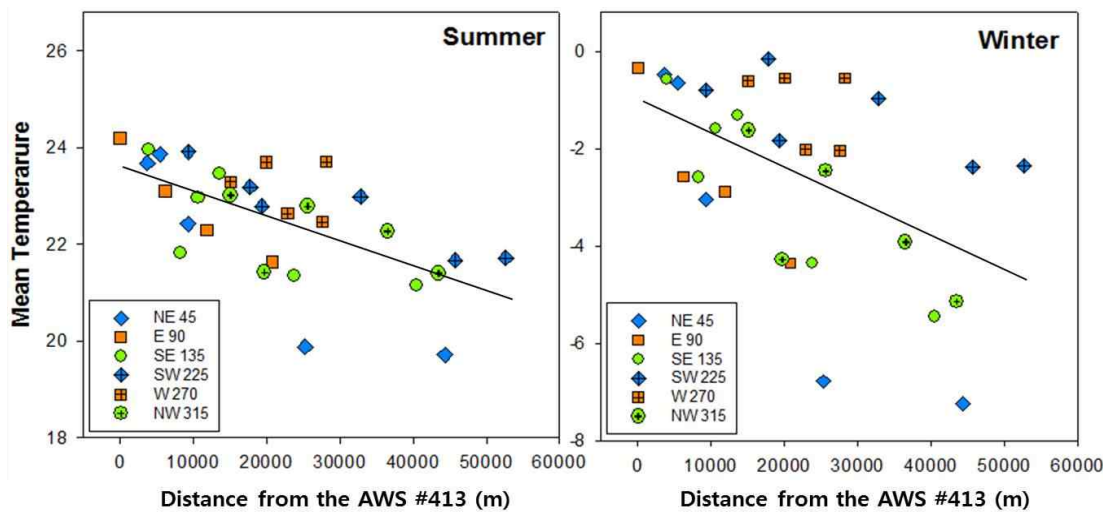


FIGURE 4. The mean night temperature by six compass directions(NE, E, SE, SW, W, NW) and the distance from Gwangjin(#413)

을 확인하기 위해, 야간 평균 최고기온 지점인 광진(413) AWS 지점을 중심으로 세 방향(NW-SE, W-E, NE-SW)별 야간 평균기온 자료 비교를 여섯 방향(NE, E, SE, SW, W, NW)으로 재구성 하여 분석하였다. 그 결과 거리에 따른 기온경사도는 그림 4 및 표 3에서와 같이 여름과 겨울 모두 중심으로부터 뚜렷한 음(-)의 기울기를 가진 분포를 보였으나, 기온경사도는 방향별로 서로 다른 뚜렷한 차이가 있었다.

특히 여름 기온경사도는 E, NE, SE, SW, NW, W의 순으로, 대체로 서쪽에서 기온경사도가 작게 나타났다. 각 도시들의 공간적 분포를 고려하면 서울 서쪽에 분포하는 광역시 및 위성도시들로 인한 작은 규모의 열섬들과 서울을 중심으로 형성된 큰 규모 열섬의 발달은 서로 관련이 있을 것이다. 즉, 서쪽(W) 방향의 작은 기온경사도는 서울을 중심으로 볼 때, 서쪽에 발달한 위성 도시들에 의해 생겨난 소규모의 열적효과에 의한 것으로 판단된다. 반면 동쪽(E) 방향의 급격한 기온경사도는 동쪽에 분포한 주변 산림의 영향으로, 거리가 멀어짐에 따라 기온하강이 크게 나타난 것으로 판단된다.

겨울 기온경사도의 크기는 E, NE, SE, NW,

W, SW의 순으로 나타나며 동쪽(E)에서의 기온경사도가 더 크게, 남서(SW)쪽으로는 작게 나타났다. 서울을 중심으로 겨울과 여름의 기온경사도의 경향은 동쪽과 서쪽으로 나뉘어 다르게 나타났지만, 평균적인 도심과 교외의 기온차이는 겨울에 더 크음을 알 수 있다.

각 방향별 직선회귀식의 결정계수(R^2)를 보면 여름에는 인천 등 위성도시가 위치한 W(0.05), 고양·파주 등이 위치한 NW(0.37)를 제외한 모든 방향에서 높은 값을 보였으며, 겨울에는 W(0.16)를 제외한 모든 방향에서 높은 결정계수 값을 보였다(표 3). 각각의 방향별 직선회귀에서는 겨울이 전반적으로 더 높은 결정계수들을 가지고 있었으나, 31개 전체지점을 통합하여 분석한 결정계수는 여름보다 겨울이 더 낮게 나왔다. 즉, 서울 중심으로부터 여섯 방향별로 분석한 기온경사도가 뚜렷이 차이나는 것로부터 각 방향별 지표 열환경 특성이 다르다는 것을 알 수 있었으며, 전체 지점의 통합 분석 결과 겨울의 결정계수가 낮은 것으로부터 겨울철 지표 특성에 따른 열적부하의 불균일성이 여름철보다 크다는 것을 알 수 있었다. 거리에 따른 기온경사의 계절적 차이를 세밀하게 비교하기 위해서는 분석 기간의 시간적

TABLE 3. The statistical analysis of the mean night temperature in summer and winter by the six compass directions

	Direction	Azimuth	Y-intercept	Slope	R^2	N
Summer	NE	45°	23.81	-0.11	0.84	5
	E	90°	23.99	-0.12	0.96	4
	SE	135°	23.52	-0.06	0.55	6
	SW	225°	24.12	-0.05	0.87	6
	W	270°	23.71	-0.02	0.05	5
	NW	315°	23.20	-0.04	0.37	5
	Total	-	23.6	-0.05	0.40	31
	Direction	Azimuth	Y-intercept	Slope	R^2	N
Winter	NE	45°	-0.57	-0.17	0.85	5
	E	90°	-0.79	-0.18	0.92	4
	SE	135°	-0.55	-0.13	0.83	6
	SW	225°	-0.22	-0.04	0.57	6
	W	270°	0.16	-0.06	0.16	5
	NW	315°	-0.76	-0.10	0.66	5
	Total	-	-0.9	-0.07	0.28	31

세분화(예를 들면 월 단위 분석)와 여러 변수를 이용한 공간적 야간기온 변동을 분석할 필요가 있다.

3. AWS 주변 국지적 지표특성 및 기온과의 상관성

표 4는 여름 야간기온이 가장 높은 광진(413)과 가장 낮은 화현(476) AWS 주변 토지피복, 수치건물, SVF 공간 특성을 보여준다. 31개 지점 중 여름 기온이 가장 높게 나타난 광진과 가장 낮게 나타난 화현의 1km 이내 토지피복을 보면, 광진은 인공피복(주거, 공업, 상업, 문화체육시설, 공공시설, 교통지) 93.13%, 자연피복(혼효림, 자연초지) 5.30%, 수면적 1.57%이며, 화현은 인공피복(주거, 공업, 상업, 문화체육시설, 공공시설) 9.47%, 자연피복(논, 밭, 시설재배, 기타재배, 침엽수림, 혼효림, 자연초지) 86.82%, 수면적 3.71%로 분석되었다. 광진과 같이 인공피복 비율이 클 경우, 야간에 기온 하강은 약하고, 화현과 같이 자연피

복비율이 클 경우 야간 지면 냉각효과가 크게 일어나기 때문에 기온 하강이 크게 일어난다.

DBM(DEM+building height)과 같은 지표형태로부터 산출된 SVF는 특정 지점에서 지형을 포함해 건물에 의해서 가려진 부분을 제외하고, 하늘이 보이는 크기를 지수화 한 척도이다. SVF가 1이면 특정 지점에서 하늘을 가리는 요소가 없는 개방된 환경을 나타내며, SVF가 0이면 주변 장애물에 의해 하늘이 보이지 않는 폐쇄된 환경을 나타낸다. 반경 1km 규모에서의 SVF는 광진의 경우 0.59, 화현의 경우 0.83이다. 이러한 SVF의 차이는 건물 구조와 높이로 인해 발생하는 영향을 광진이 화현보다 더 많이 반영함을 의미한다.

AWS 지점 주변 국지적 지표특성과 기온의 상관분석 수행을 위해, 31개 지점을 중심으로 반경 200m와 1km 규모 내에 분포하는 인공피복, 자연피복, 수역, 건물높이, 건물면적, 건물부피(건물높이×건물면적), SVF 요인별 값들을 계산하였다(표 3, 표 5). 건물높이는 수치지도의 층수 자료를 이용하여(층수에 4m를 곱하여

TABLE 4. Local surface characteristics of the Gwangjin (#413) and Hwahyeon (#476) AWS – land cover, building structure, and SVF

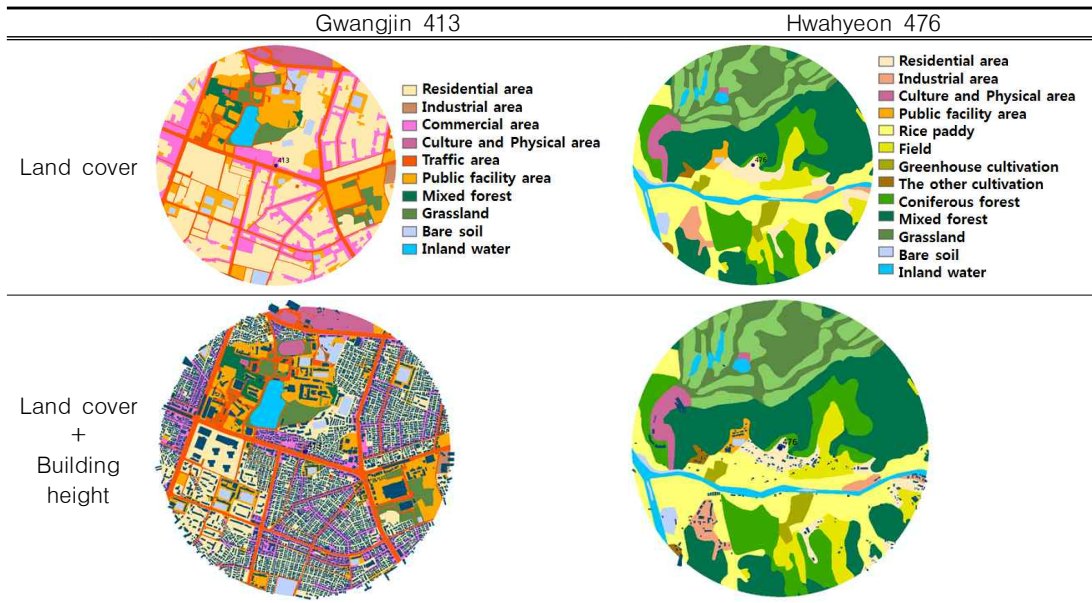


TABLE 4. Continued

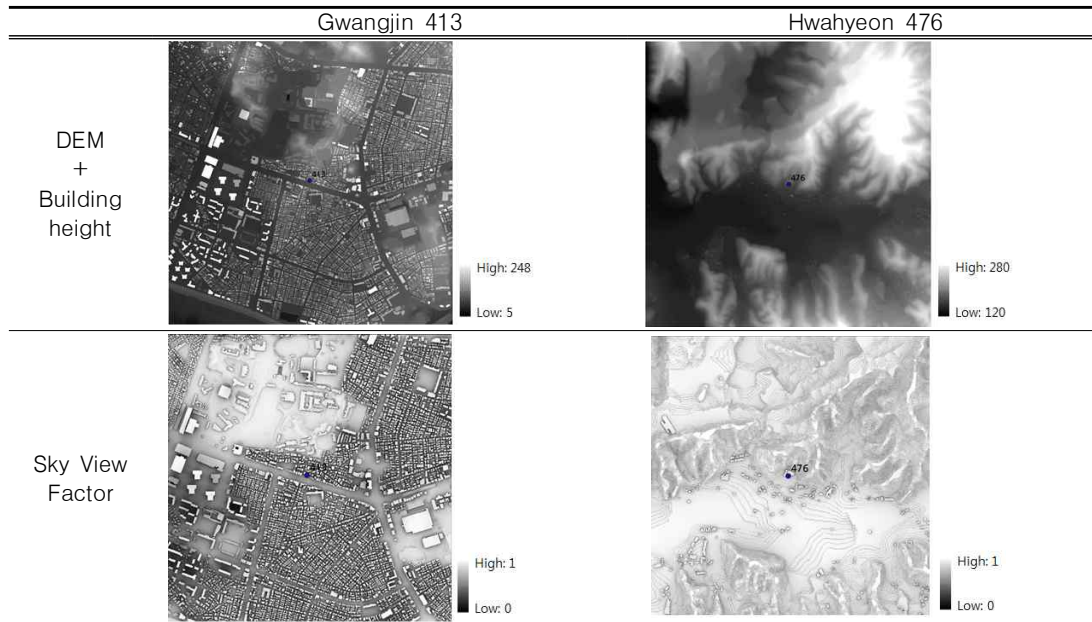


TABLE 5. Mean building height(m), building area(m²), building volume(m³), and sky view factor(SVF, fraction) within 200m and 1km radius from each AWS

	AWS No.	AWS name	Mean building height(m)		Building area(m ²)		Building volume(m ³)		SVF	
			r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km
NW-SE Direction	481	Tanhyeon	4	4	9989	73174	39956	295623	0.83	0.86
	506	Geumchon	5	7	4287	316577	21436	2076746	0.85	0.78
	450	Jugyo	9	11	47419	445417	426774	5077754	0.66	0.73
	540	Goyang	0	4	0	73482	0	305685	0.89	0.86
	416	Enpyeong	10	10	38431	667028	384309	6830367	0.61	0.61
	108	Seoul(songwall)	7	9	42849	799032	299940	7191288	0.64	0.59
	419	Junggu	8	9	804	513422	6434	4620798	0.68	0.66
	400	Gangnam	16	18	47221	953829	755530	17092616	0.49	0.52
	572	Seongnam	4	3	19539	224145	78154	753127	0.94	0.92
	459	Opo	6	3	8120	212840	48721	553384	0.61	0.72
W-E Direction	461	Majang	6	5	7653	122803	45915	618927	0.88	0.84
	533	Yangsuri	4	6	925	56118	3702	343442	0.98	0.97
	444	Hanam	12	10	30968	561967	371617	5507277	0.64	0.70
	402	Gangdong	38	14	23427	547872	890237	7582548	0.58	0.61
	413	Gwangjin	11	11	48972	1016114	538690	11177254	0.56	0.59
	410	Gisangcheong	25	11	21221	908667	530530	9922644	0.83	0.58
	437	Gwangmyeong	11	12	32525	839359	357776	9837287	0.68	0.58
	423	Guro	14	10	17970	544270	251583	5529783	0.77	0.70
	544	Daeya	7	6	2452	50224	17162	285272	0.82	0.84
	433	Bucheon	46	19	12623	663913	580667	12879912	0.83	0.58

TABLE 2. Continued

	AWS No.	AWS name	Mean building height(m)		Building area(m ²)		Building volume(m ³)		SVF	
			r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km	r: 200m	r: 1km
NE-SW Direction	476	Hwahyeon	4	4	5652	49293	22608	209002	0.80	0.83
	599	Gwangneung	4	4	2584	8647	10337	37009	0.88	0.83
	407	Nowon	4	8	4134	238952	16538	1978523	0.95	0.86
	408	Dongdaemun	10	11	39301	849021	393008	9067544	0.71	0.59
	421	Seongdong	11	12	12355	429323	135904	5151876	0.80	0.75
	415	Yongsan	13	18	30168	239136	392185	4371406	0.72	0.81
	417	Geumcheon	10	10	58500	1041146	584998	10786273	0.55	0.61
	453	Soha	8	11	857	591404	6858	6789318	0.92	0.80
	435	Gojan	11	13	18790	510654	206690	6536371	0.77	0.77
	488	Songsan	0	4	0	39237	0	171073	0.99	0.94
489	Seosin	7	5	3650	115371	25547	567625	0.91	0.86	

계산) 각 반경 내의 평균으로 구하였다.

상관분석은 종속변수(여름/겨울 야간 평균기온)와 각 독립변수(인공피복, 자연피복, 수역, 건물높이, 건물면적, 건물부피, SVF, 중심으로부터의 거리) 사이의 상관성을 일대일로 알기 위함이다. 야간 평균기온과 국지적 지표특성 변수간의 상관성은 규모로는 반경 200m 일 때보다, 1km 일 때 더 높게 나타났으며, 계절로는 겨울보다 여름에 더 크게 나타났다. 각각의 독립변수들에서는 인공피복(수역 면적이 차지하는 비율은 매우 낮기 때문에 인공피복과 자연피복은 서로 강한 음의 상관관계를 보임), 건물높이, 건물면적, 건물부피는 양의 상관관계를 보이고, 자연피복, SVF, 중심으로부터 거리는 음의 상관관계로 나타났다.

SVF는 1에 가까울수록 건물에 의해 열을 가두는 효과가 줄어 야간에 냉각이 더 잘 일어나

고 이로 인해 기온이 낮게 나타는 것으로 판단된다. SVF는 지표의 구조적 특성을 설명하는 중요한 요인이지만 본 연구에서는 야간 평균기온과의 상관성이 다른 요인들보다 상대적으로 낮게 나타났으며 특히 수목의 분포면적비율이 높은 곳에서 이러한 경향이 두드러졌다. 이러한 이유는 AWS 야간 평균 기온은 주변 식생과 대기의 상호작용을 반영하는 반면, SVF 계산 결과는 식생을 반영하지 못하고 인공피복 구조물인 건물과 지형만을 고려하기 때문인 것으로 판단된다. An et al.(2013)은 최근 3차원 점군 자료를 통해 이러한 계산상의 제약을 해결하는 방법을 제안한 바 있다. 따라서 추후 연구에서는 수목이 주변에 차지하는 공간적 특성을 반영하도록 SVF 계산을 개선하여 국지적 지표특성 값 추출에 사용해야 할 것으로 판단된다.

TABLE 6. The correlation analysis between the mean night temperature and variables of the local surface characteristics at the 31 AWS points(Pearson' s correlation coefficient ***: P < 0.01, **: P < 0.05, *: P < 0.1, ns: P >= 0.1)

Season	Radius	Unvegetated area	Vegetated area	Water area	Building height	Building area	Building volume	SVF	Dist.
Summer	1 km	0.84***	-0.83***	-0.07 ^{ns}	0.74***	0.74***	0.75***	-0.59***	-0.63***
	200 m	0.68***	-0.69***	-0.02 ^{ns}	0.48***	0.64***	0.67***	-0.43***	
Winter	1 km	0.78***	-0.75***	-0.12 ^{ns}	0.68***	0.74***	0.73***	-0.56***	-0.58***
	200 m	0.55***	-0.56***	0.06 ^{ns}	0.42**	0.58***	0.58***	-0.38**	

TABLE 7. The regression models for the mean night temperature(T: mean night temperature(C), US: unvegetated area in each radius(km²), WS: water surface(km²), BS: building surface(km²), BH: building height(km), SVF: sky view factor(fraction), and D: distance from the city center(km))

Season	Radius	Model	R ²	C(p)
Summer	1km	$T = 17.61 + 1.41 US + 3.43 SVF$	0.74	1.70
	200m	$T = 18.77 + 47.62 BS + 40.98 BH + 4.11 SVF - 0.038 D$	0.72	5.42
Winter	1km	$T = -5.14 + 1.59 US$	0.60	4.34
	200m	$T = -8.73 + 78.22 BS + 61.48 BH + 6.63 SVF - 0.050 D$	0.57	4.56

4. 야간 평균기온 회귀모형

종속변수(여름/겨울 야간 평균기온)와 독립변수(인공피복, 자연피복, 수역, 건물높이, 건물면적, 건물부피, SVF, 도심으로부터의 거리)의 인과관계를 분석하기 위해, 변수선택법을 사용하여 수도권 야간평균기온을 설명하는 회귀모형을 결정하였다(표 7).

계절별 회귀모형에서 여름철 결정계수(평균 R²=0.73)가 겨울철(평균 R²=0.59)보다 높은 것으로부터, 토지피복이나 거리증가 등 모형에 사용된 지표특성 변수들이 야간 평균기온 분포에 영향을 주는 설명력(결정계수)이 여름철에 더 높음을 알 수 있다. 한편 인공피복면적(US 또는 BS)에 따른 기온 증가는 여름철(US: 1.41, BS: 47.62)보다 겨울철(US: 1.59, BS: 78.22)에 더 크게 나타났는데, 이로부터 여름철보다 겨울철에 인공피복에 따른 기온 상승효과(열적 부하)가 더 크음을 알 수 있으며, 겨울철 결정계수가 더 작음에 따라 열적 불균일성은 겨울철에 더 커지는 것을 알 수 있다.

분석 해상도의 규모에 따른 비교는 다음과 같다. 우선 상관분석에서는 1km 반경 내의 건물면적, SVF 등 일부 변수들이 상관계수가 높게 나타났다. 하지만 변수선택법의 단계별회귀(p=0.15) 과정을 통해 결정된 야간기온을 설명하는 회귀모형으로는 건물, 도로 등이 포함되는 인공피복(US)과 SVF(여름철)만 선택되었다. 반면, 200m 반경 내의 지표특성을 이용한 회귀모형은 1km 반경에서 인공피복(US)을 선택된 것과는 달리, 건물면적(BS), 건물높이(BH), SVF 등 더욱 상세하게 설명하는 변수들

이 선택되었다. 즉, CAS와 같이 반경 200m 규모의 기온분석 자료를 생산하기 위해서는 인공피복을 세분화한 입력 자료와 이러한 상세 자료의 분석모형이 필요함을 알 수 있다. 개발된 회귀모형들의 야간 평균기온에 대한 설명력은 입력 자료의 규모에 따라, 1km 규모는 60%~74%, 200m 규모는 57%~72%로 큰 차이가 없었다.


결론

서울과 주변을 포함하는 수도권에서 발생하는 열섬현상의 특성들을 정량적으로 이해하기 위해, 31개 지점의 AWS 관측자료들과 GIS 자료를 이용하여 여름과 겨울 야간 평균기온분포의 공간 경향 그래프를 작성하였다. 또한 통계분석을 통해 AWS 지점들 야간 평균기온과 영향 요인들간의 상관성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 여름 야간 평균기온은 19.7°C~24.2°C, 겨울 야간 평균기온은 -7.2°C~-0.1°C 범위에 분포하고 있었으며, 여름보다 겨울에 도심과 교외의 기온 차이가 2.6°C 만큼 더 크게 나타났다. 수도권 열섬 중심으로부터 교외로의 방위에 따라 기온경사도 크기가 다르며, 겨울과 여름의 기온경사도 경향은 동쪽과 서쪽으로 나뉘어 다르게 나타났다.

둘째, 야간 평균기온과 AWS 주변 지표특성과의 상관분석 결과, AWS 지점으로부터 반경 200m 보다 1km 규모에서 야간 평균기온과의 상관성이 더 높게 나타났다. 반경 1km 규모의 인공피복 상관계수가 여름은 0.84, 겨울은

0.78로 나타났으며, 특히 건물과 관련된 높이(여름: 0.74, 겨울: 0.68), 면적(여름: 0.74, 겨울: 0.74), 부피(여름: 0.75, 겨울: 0.73)는 양의 상관성을 보이고, SVF와 중심으로부터 거리는 음의 상관성을 나타냈다.

셋째, 야간 평균기온 분포를 설명하는 회귀모형을 도출한 결과, 반경 1km 규모의 인공피복 면적(US)이 여름 야간 평균기온의 70% 이상과 겨울 야간 기온의 60% 정도 이상을 설명하였다. 반경 200m 규모의 지표특성 자료를 이용한 회귀모형에는 건물면적과 높이와 같이 인공피복을 좀 더 상세히 설명하는 독립변수가 선택되었다. 분석 해상도에 따른 모형의 설명력에는 큰 차이가 없었기 때문에 본 연구 결과로부터, 도시구조 특성을 반영하는 입력자료의 해상도를 높임에 따라 야간 평균기온의 차이를 더욱 상세하고 정량적으로 분석할 수 있음을 알 수 있었다. 

REFERENCES

- Ahn, J.S., J.D. Hwang, M.H. Park and Y.S. Suh. 2012. Estimation of urban heat island potential based on land cover type in Busan using Landsat-7 ETM+ and AWS data. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* (안지숙, 황재동, 박명희, 서영상. 2012. Landsat-7 ETM+ 영상과 AWS 자료를 이용한 부산의 토지피복에 따른 여름철 도시열섬포텐셜 산출. *한국지리정보학회* 15 (4):65-77).
- An, S.M., B.S. Kim, H.Y. Lee, C.H. Kim, C.Y. Yi, J.H. Eum and J.H. Woo. 2013. Three-dimensional point cloud based sky view factor analysis in complex urban settings. *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.3868.
- Bhang, K.J. and S.S. Park. 2009. Evaluation of the surface temperature variation with surface settings on the urban heat island in Seoul, South Korea using Landsat-7 ETM+ and SPOT. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 6(4):708-712.
- Bhang, K.J. and S.S. Park. 2010. Analysis of the land surface temperature by the anthropogenic heat in the urban area of Seoul : an example in application of satellite images. *Journal of The Korean Society of Environmental Impact Assessment* 19(4):397-407 (방건준, 박석순. 2010. 서울 도심지의 인본열에 의한 지표온도 분석 : 위성영상 적용 사례. *환경영향평가학회지* 19(4):397-407).
- Bounoua, L., A. Safia, J. Masek, C. Peters-Lidard and L.M. Imhoff. 2009. Impact of urban growth on surface climate : a case study in Oran, Algeria. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48:217-231.
- Brandsma, T. and D. Wolters. 2012. Measurement and statistical modeling of the urban heat island of the city of Utrecht(the Netherlands). *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:1046-1060.
- Chow, W.T.L. and B.M. Svoma. 2011. Analyses of nocturnal temperature cooling-rate response to historical local-scale urban land-use/land cover change. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50:1872-1883.
- Chun, B.S. and J.-M. Guldmann. 2012. Spatial analysis of the urban heat island using a 3-D city model. *Journal of Korea Spatial Information Society* 20(4):1-16 (전범석, 장-미셸 굴드만. 2012. 3차원 도시모형을 이용한 도시열섬의

- 공간분석. 한국공간정보학회지 20(4):1-16).
- Fung, W.Y., K.S. Lam, J. Nichol and M.S. Wong. 2009. Derivation of nighttime urban air temperatures using a satellite thermal image. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48:863-872.
- Goldbach, A. and W. Kuttler. 2012. Quantification of turbulent heat fluxes for adaptation strategies within urban planning. *International Journal of Climatology* 33(1):143-159.
- Klysik, K. and K. Fortuniak. 1999. Temporal and spatial characteristics of the urban heat island characteristics of the urban heat island of Lodz, Poland. *Atmospheric Environment* 33(24-25):3885-3895.
- Kuttler, W., S. Weber, J. Schonfeld and A. Hesselschwerdt. 2007. Urban/rural atmospheric water vapour pressure differences and urban moisture excess in Krefeld, Germany. *International Journal of Climatology* 27(14):2005-2015.
- Lee, S.H., C.K. Song, J.J. Baik and S.U. Park. 2008. Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-in region of Korea. *Theoretical and Applied Climatology* 96(3-4):291-303.
- Lengfeld, K. and F. Ament. 2012. Observing local-scale variability of near-surface temperature and humidity using a wireless sensor network. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:30-41.
- Montavez, J.P., A. Rodriguez and J.I. Jimenez. 2000. A study of the urban heat island of Granada. *International Journal of Climatology* 20:899-911.
- Orlanski, I. 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society* 56(5):527-530.
- Park, S.K. and J.H. Kim. 2011. A study on changes in local meteorological fields due to a change in land use in the lake Shihwa region using synthetic land cover data and high-resolution mesoscale model. *Korean Meteorological Society Journal of Atmosphere* 21(4):405-414 (박선기, 김지희. 2011. 합성토지피복자료와 고해상도 중규모 모형을 이용한 시화호 지역의 토지이용 변화에 따른 주변 기상장 변화 연구. *한국기상학회 대기지* 21(4):405-414).
- Roth, M., T.R. Oke. and W.J. Emery. 1989. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the urban climatology. *International Journal of Remote Sensing* 10(11):1699-1720.
- Ryu, Y.H. and J.J. Baik. 2012. Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 51:842-854.
- Stewart, I.D. and T.R. Oke. 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12):1879-1900.
- Wong, M.S., J. Nichol and E. Ng. 2011. A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques. *Landscape and Urban*

- Planning 102:245-253.
- Yague, C., Zurita, E. and Martinez, A. 1991. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmospheric Environment* 25B:327-332.
- Yi, C.Y. 2005. Analysis of urban air pollution changes by using GIS and remote sensing techniques. Master Thesis, Univ. of Hanyang Seoul, Korea. 75pp (이채연. 2005. GIS와 원격탐사기법을 이용한 도시 대기오염 변화에 관한 연구. 한양대학교 대학원 석사학위논문. 75쪽).
- Yi, C.Y., J.H. Eum, Y.J. Choi, K.R. Kim, D. Scherer, U. Fehrenbach and G.H. Kim. 2011. Development of Climate Analysis Seoul(CAS) maps based on landuse and meteorological model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 14(1):12-25 (이채연, 엄정희, 최영진, 김규량, Dieter Scherer, Ute Fehrenbach. 2011. 토지이용도와 기상모델을 이용한 서울기후분석(CAS) 지도 개발. *한국지리정보학회지* 14(1):12-25).
- Yi, C.Y., K.R. Kim, Y.J. Choi, H.Y. Won and D. Scherer. 2012a. Nocturnal surface cooling and cold air transport analysis based on high density observation : a case study of Eunpyeong new town in Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(4): 124-137 (이채연, 김규량, 최영진, 원혜영, Dieter Scherer. 2012a. 고밀도 관측자료를 이용한 야간 지면냉각과 찬공기 이동 분석 : 서울 은평구 뉴타운 사례. *한국지리정보학회지* 15(4):124-137).
- Yi, C.Y., S.M. An, K.R. Kim, Y.J. Choi and D. Scherer. 2012b. Improvement of air temperature analysis by precise spatial data on a local-scale : a case study of Eunpyeong new town in Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15(1):144-158 (이채연, 안승만, 김규량, 최영진, Dieter Scherer. 2012b. 상세 공간정보를 활용한 국지기온 분석 개선 : 서울 은평구 뉴타운을 사례로. *한국지리정보학회지* 15(1):144-158).
- Zakšek, K., K. Oštir and Ž. Kokalj. 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote Sensing* 3(2):398-415. **KAGIS**