

관측과 기상모델을 이용한 춘천지역의 도시열섬현상 연구

A Study of Urban Heat Island in Chuncheon Using WRF Model and Field Measurements

이 종 범 · 김 재 철* · 장 윤 정

강원대학교 환경학과

(2011년 8월 24일 접수, 2011년 9월 23일 수정, 2012년 3월 26일 채택)

Chong Bum Lee, Jea-Chul Kim* and YunJung Jang

Department of Environmental Science, Kangwon National University

(Received 24 August 2011, revised 23 September 2011, accepted 26 March 2012)

Abstract

Heat island phenomena in Chuncheon (Korea) were investigated using air temperature measured by automatic weather stations and temperature dataloggers located at rural and urban sites. Numerical simulation of the phenomena was performed using Weather Research and Forecasting Urban Canopy Model (WRF-UCM) and results were compared with the observation. The model was initialized with NCEP/FNL data. The horizontal resolution of the fine domain is 0.33 km. The results of observational analyses show that the intensity of heat island was significantly higher during the nighttime than during the daytime. The highest measured temperature difference between rural and urban site is 3.49°C and average temperature difference varies between 1.4 and 1.9°C. Good agreement was found between the simulated and observed temperatures. However, significantly overestimated wind speed was found at the urban sites. The linear regression analysis between observed and simulated temperature shows high correlation coefficient 0.96 for urban and 0.94 for rural sites while for wind speed, a very low correlation coefficient was found, 0.30 and 0.55 respectively.

Key words : Urban heat island, Chuncheon, WRF, UCM

1. 서 론

도시는 일반적으로 주변의 교외지역에 비하여 고온의 공기층을 형성하게 된다. 이러한 요인으로서는 도시지역의 인구집중에 따른 인공열의 증가와 건물

등 구조물에 의한 거칠기 길이의 변화, 지표면에서의 증발잠열의 차이가 있다. 또한 아스팔트나 콘크리트 처럼 도시에서 주로 사용되는 건축자재는 열 특성(열용량, 열전도성 등)이나 표면 반사도(알베도, 열방사력)에 있어서 주변의 농촌지역과 크게 다르기 때문에 도시지역의 에너지 균형에 변화를 일으켜, 주변의 교외지역에 비해 도시지역의 온도를 높게 만든다(Mackey *et al.*, 2011; Stewart and Oke, 2009; Ackerman, 1985; Oke, 1979).

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-250-8571, E-mail : kjc25@kangwon.ac.kr

지난 수십 년 동안 도시 지역과 그 주변 지역사이의 기상요소(기온, 풍속, 습도, 강수 등)의 차이를 설명하기 위한 수많은 연구들이 진행되어 왔다(Chen *et al.*, 2010; Kusaka *et al.*, 2009; Lee, 2009; Miao *et al.*, 2009). 도시화에 따른 열섬현상의 연구가 1900년대 초부터 활발히 진행된 국외 사례에 비하여 우리나라의 경우 1990년대에 들어와서 춘천지역의 도시열섬 관측과 대기질에 미치는 영향분석(Lee *et al.*, 1993), 대기 확산 모델 개발(Yoon *et al.*, 1994), 시골지역과 도시지역의 기상조건 비교, 도시열섬과 도시 미기후 관계(Jo and Ahn, 1999) 등의 연구가 이루어져 왔다. 최근 Hwang and Kim(2003)이 전주시의 열섬현상은 주택단지의 입지와 특성에 따라 차이가 있음을 확인하였으며, Kim *et al.*(2000)과 Park and Baik(2007)은 도시기후가 대기오염물질의 증가와 결합하여 건강에 직접적으로 영향을 미치고 있음을 밝히며, 도시지역의 국지적 대기 순환과 도시의 대기 환경에 관심이 고조되고 있다.

현재, 기상청은 전국 610개소에 자동기상관측(Auto Weather Station; AWS)망을 운영하고 있다. 자동기상관측소는 서울을 포함한 광역 대도시 지역에는 비교적 조밀하게 설치되어 있어서 도시기온의 분포를 파악하기에 용의하다. 하지만 춘천을 포함한 중·소규모 도시의 경우 1~2지점밖에 없기 때문에 도시열섬의 시공간적 구조를 연구하기에는 부족한 실정이다. 따라서 춘천과 같은 중·소규모 도시에서는 고해상도 입력자료를 이용한 기상모델을 이용하여 토지이용도에 따른 도시열섬현상을 이해하는 것이 매우 유용할 것으로 판단된다.

중규모 기상모델을 이용한 도시지역의 수치모의는 도시열섬현상의 특성을 파악하는 데 이용될 수 있으며(Moon and Koo, 2006), Kim *et al.*(2009)은 기상모델인 MM5를 이용하여 도시건설로 인한 기상의 차이가 건강에 미치는 영향을 파악하였고, Lee *et al.*(2009)은 대구지역의 최신 토지피복자료를 이용하여 도시지역 세분화와 물리특성을 고려한 도시 열환경 변화를 고찰하였다. 또한 Lee *et al.*(2005)은 춘천지역의 안개발생을 기상모델과 수질모델을 이용하여 모사한 바 있다.

중규모 기상모델을 이용한 도시지역의 모델링에서는 도시의 특성을 고려할 수 있는 모델의 적용이 요구된다. 실제 중규모 모델에서 수행된 바람장 모의는 건물이 밀집한 도시에서 관측과 이론사이에 상당한 차이를 보이게 되며(Eichhorn *et al.*, 1988) 이를 위해

서는 도시의 특성을 고려할 필요가 있다. Kundan *et al.*(2009)은 도시 캐노피 층을 고려하여 기상모델(Weather & Research Forecasting; WRF)을 실행시킨 결과 일본 오사카 지역에서 야간의 열섬현상을 실제와 더 유사하게 모사할 수 있었다. 또한 Masakazu *et al.*(2009)은 WRF-UCM(Urban Canopy Model) 모델링을 통하여 도시지역의 기온상승은 오사카 지역의 강한 해풍을 불어오게 하는 원인으로 작용된다는 것을 확인하였다.

본 연구의 대상지역인 춘천시는 중소규모 도시로서 현재 많은 아파트와 고층 건물들이 들어서 있으며, 도시의 규모는 점점 커져가고 있다. 도시화된 지역의 직경의 범위는 5km 정도로 이와 같은 제한된 면적에 인구가 밀집되어 있고 주변은 녹지로 둘러싸여 있기 때문에 도시지역과 교외의 경계가 뚜렷해 도시 열섬현상을 관측하기에 적당하다. 따라서, 본 연구에서는 춘천지역의 기상관측을 통하여 시·공간적인 열섬강도의 분포특성을 밝히고, WRF 수치모델을 이용하여 춘천지역의 도시열섬현상 모사 결과를 실제 관측자료와 비교·평가 하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 춘천지역 도시열섬현상의 관측

2.1.1 대상 기간

춘천지역의 시·공간적 기온 특징을 파악하기 위해 2009년 8월 31일부터 12월 6일까지 약 3개월 동안 HOBO(Self-contained temperature loggers: HOBOPendent loggers, Onset Computer, UA-001-64, www.onsetcomp.com)를 이용하여 측정하였다. 본 연구에서 선정된 대상일은 도심과 교외지역의 대표지점에서 상층측정(8월 31일~9월 11일)이 포함된 기간인 2009년 8월 31일부터 9월 6일까지 7일이며, 이때 관측된 자료를 지역에 따라 비교·분석하였다. 측정 지점은 도심과 교외지역을 포함하는 춘천의 중심(37°52'53", 127°43'48")으로부터 직경 약 10km 이내 지역을 선정하였고, 총 40지점(도시 20지점, 교외 20지점)에 HOBO를 설치하였다(그림 1).

2.1.2 지상 및 상층관측

기온측정에 사용된 HOBO는 측정시간을 1초에서

18시간까지 조절 가능하고 수은건전지를 사용하며, 연속측정 사용기간은 약 1년이다. 본 연구에서는 5분 간격으로 기온을 측정하였으며, 지점에 따른 비교·분석을 위하여 1시간 간격으로 평균하여 사용하였다. 또한 도시지역(봉의 초등학교; 127°43'51.2", 37°52'21.7")과 교외지역(고은리; 127°46'37.8", 37°50'26.9")의 기상차이를 파악하기 위해 두 지역에 10m 높이의 기상 탐(AWS)을 설치하였다. 기상 탐에서 측정되는 기상요소는 온도(2m, 10m), 풍향(10m), 풍속(10m), 일사량(2m)이며, 5분 간격으로 측정하고, 30분 간격으로 평균하여 저장되도록 설정하였다.

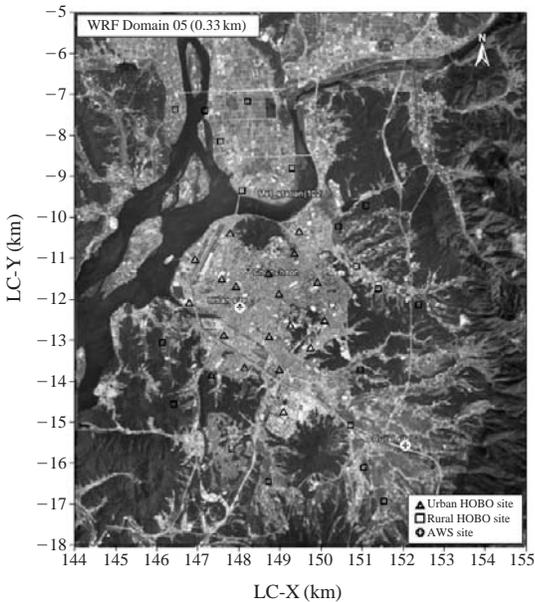


Fig. 1. Study area of the Chuncheon. Urban HOBO sites are marked with a triangle, and rural HOBO sites with a open square. Circle shows the position of AWS site.

또한, 도시와 교외지역의 연직분포를 관측하기 위하여 기상 탐을 설치한 두 지점에서 8월 31일 오후 4시부터 익일 오후 3시까지 Tethered sonde를 이용한 상층기상(기온, 습도, 기압)을 집중 측정하였고, 측정 기간 동안 관측지점의 연직 풍향, 풍속을 파악하기 위하여 3시간 단위로 경위기(theodolite)를 이용한 Pibal 측정을 하였다(Jang, 2010).

2.2 WRF 수치모형의 실행

2.2.1 UCM의 적용

대도시의 빌딩높이와 불투수층의 비율은 지표면의 특성을 복잡하게 하며, 운동량과 열적 차이는 도시 특유의 기후를 생성하며, 오염 물질의 확산에 영향을 미친다(Lee, 2000). 도시 형태의 효과를 명시적으로 다루고 도시 효과에 의한 도시 기상모사의 정확도를 향상시키기 위해서는 빌딩 면적비와 빌딩과 도로 등 물리적 차이 상수를 포함하는 도시 형태에 관한 변수가 포함되어야 하며, 이러한 목적으로 도시 캐노피 모형이 필요하다(Byon *et al.*, 2010; Kusaka *et al.*, 2001).

WRF-UCM은 단일 도시 캐노피 모형이며 현재 WRF 수치 모형에서는 도시지역에 차별화된 2차원으로 대칭된 빌딩과 도로 형태를 가정한 빌딩높이, 거칠기 길이, 인공열, 도로 폭 등의 도시효과를 고려할 수 있는 UCM이 결합되어 있다. 따라서 대상지역에 대한 세분화된 도시이용(토지이용도) 정보와 인공열 등의 정보가 있다면 인공열을 고려한 도시모델링이 가능하다(Chen and Miao, 2008). 표 1은 대상지역에 대하여 도시를 세분화하여 적용한 물리옵션을 나타내었다. UCM의 경우 단순 도시(URBAN)를 3가지 도시타입(31: High Intensity Residential, 32: Low Intensity Residential, 33: Commercial and Industrial)으로 구분하여 모델을 실행한다. 춘천시의 경우 비교

Table 1. Urban canopy parameters in WRF for three urban lan-use categories: low-intensity residential (31), high-intensity residential (32), and industrial and commercial (33) (Chen *et al.*, 2010).

Parameter	Unit	Urban type in the study		
		31	32	33
h (building height)	m	5	7.5	10
AH (Anthropogenic Heat)	W m ⁻²	20	50	90
F _{urb} (urban fraction)	Fraction	0.5	0.9	0.95
Z _{OR} (roughness length for momentum over roof)	m	0.01	0.01	0.01
Z _{OW} (roughness length for momentum over Wall)	m	0.0001	0.0001	0.0001
Z _{OG} (roughness length for momentum over road)	m	0.01	0.01	0.01

적 저밀도 주거지역에 속하기 때문에 대부분 지역이 32번 도시타입에 속하며, 사용된 물리옵션은 Chen *et al.* (2010)을 참조하였다.

2.2.2 모델링 영역 및 수치모의 조건

기상모델의 대상영역은 한반도, 중국, 일본을 포함하는 27 km 격자를 설정하였고, nesting 과정을 거쳐 9, 3, 1, 0.33 km까지 5개의 도메인으로 구성하였다. 마지막 분석도메인은 춘천지역을 중심으로 하는 격자로 0.33 km 간격으로 33×42 격자 영역으로 구성되었

다. 초기자료와 경계 자료는 격자간격 1°×1°인 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)/Global Final Analysis (FNL)를 이용하였으며, 대상기간은 집중 관측기간과 동일하다.

WRF-UCM 적용에 따른 춘천지역의 도시열섬을 모사하기 위하여 사용된 모델의 물리 옵션 및 실행조건은 표 2에 나타내었다. UCM은 격자크기 3 km 이하의 영역에 대하여 가능하며 본 연구에서는 1 km와 0.33 km에 대하여 적용하였다. 또한 지표현상을 보다 자세히 모사하기 위하여 연직층을 35층으로 나눴으며, 최하층은 24 m로 설정하여 모델을 실행하였다.

고해상도 입력자료를 이용한 상세모델에 적용된 지형 입력자료의 경우 나사(NASA)와 일본이 공동 제작한 ASTER_GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Map; 1")자료와 환경부 중분류 토지피복도(1:250,000)자료를 각각 지형 및 토지피복자료로 사용하였고(그림 2), 지표물리과정을 계산하기 위한 모델로서 Noah (NCEP Oregon State University Air Force Hydrologic Research Laboratory) LSM (<http://www.ral.ucar.edu/research/land/technology/lsm.php>)을 이용하였다. 모델결과는 0.33 km 격자의 결과를 이용하여 관측자료와 비교·분석하였다.

Table 2. Details of the physics options used in the WRF model.

WRF V3.1	Physics options
horizontal resolution	27 km · 9 km · 3 km · 1 km · 0.33 km
Urban Canopy Model	on (1 km, 0.33 km)
Vertical layers	35 layers (top: 50 mb, bottom: 998 mb)
PBL scheme	YSU scheme
Microphysics option	WSM6
Initialization	NCEP/FNL
Radiation scheme	ra_lw : RRTM scheme/ ra_sw : Dudhia scheme
Topography & Landuse Data	ASTER_GDEM/KME
Land Surface Model	Noah_LSM (Chen and Dudhia, 2001)

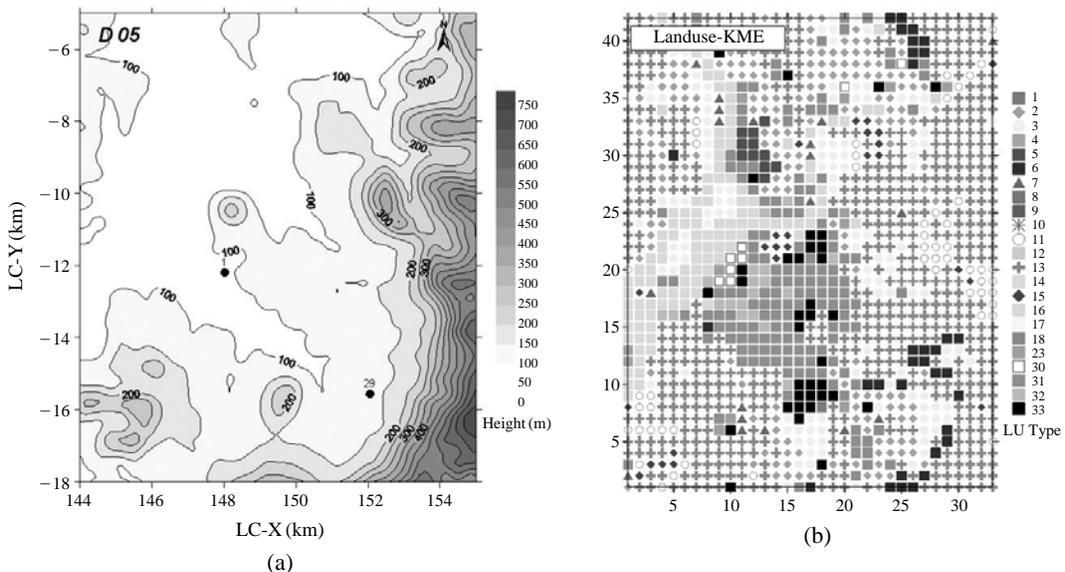


Fig. 2. Distribution of topography (a) and landuse map (b) in Domain-5 of the model region.

3. 연구결과

3.1 춘천지역 도시열섬현상의 관측

3.1.1 도시와 교외지역의 기온변화

관측기간 동안의 도시와 교외지역에 설치된 40개의 HOBO에서 관측된 일평균 기온은 도시지역이 교

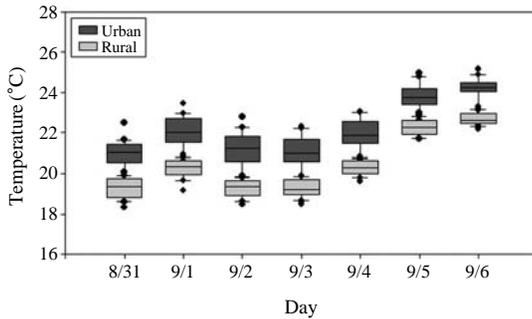


Fig. 3. Daily average of temperature variation in urban and rural areas during 7 days period.

외지역보다 1~2°C 높게 나타났으며, 대상기간 중 9월 5일과 6일에 가장 높게 나타났다. 도시에서 기온의 지역적 차이가 교외에서의 지역적 차이보다 크게 나타났으며, 도시와 교외지역의 일평균 기온 차이는 9월 2일 가장 크게 나타났다(그림 3).

또한 시간 변화에 따른 도시지역과 교외지역의 기온 차이를 비교하기 위해 각각 지점의 시간 평균을 비교한 결과 도시지역에 비하여 교외지역의 기온 차이가 일몰 이후 점차 커져서 최고 3°C까지 차이가 났고, 일출 후 주간의 기온 차이는 0.5°C 내외로 줄어드는 결과를 보였다(그림 생략).

3.1.2 주·야간의 기온 수평분포

대상기간 중 HOBO를 이용하여 측정된 도시와 교외지역의 기온변화(일평균 기온 차이)가 가장 크게 나타난 9월 2일에 대하여 각각의 측정지점 기온을 한 시간 단위로 평균하여 주간(12시)과 야간(20시)의 수평분포로 나타내었다(그림 4). 대상기간의 주간시와 야간시의 기준은 천문우주지식정보(<http://astro.kasi.re.kr>) 남중시와 일몰시를 각각 적용하였다.

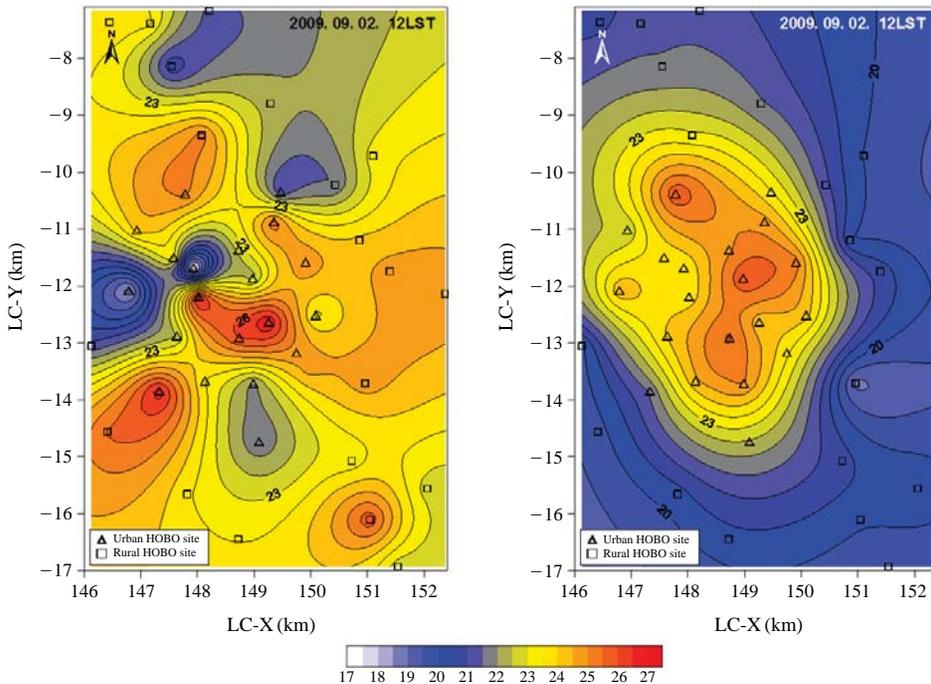


Fig. 4. Daytime horizontal distributions of temperature in Chuncheon on September 2, 2009. Triangles and squares symbol represent the location of urban and rural HOBO sites.

주간 기온분포의 경우 최저 기온이 20°C 이내이며, 교외지역에서 도시로 갈수록 기온이 상승하여 도시 중심부의 기온은 한낮에 28°C 이내로 나타났다. 반면 일몰 직후인 20시의 수평분포는 도시지역이 교외지역에 비하여 뚜렷한 고온의 기온분포를 형성하는 것을 확인할 수 있었고, 도시열섬이 나타나는 면적은 도시 중심의 반경 5 km 내외의 지역으로 나타났다.

3.1.3 춘천의 도시열섬강도

도시와 교외를 구분하기 위하여 환경부 중분류 토지피복자료를 참고하였고, 그림 1에서 구분한 것처럼 춘천 도심을 중심으로 직경 5 km 이내 지역을 도심으로 그 외 지역을 교외지역으로 구분하였다. 각 지역의 냉각율 및 열섬 강도는 HOBO에서 1시간 간격으로 측정된 기온 자료를 각각 이용하였다.

냉각율의 경우 도시(교외)지역의 시간변화에 따른 기온차이를 시간평균으로 나타내었고, 열섬강도의 경우 시간변화에 따른 도시지역의 평균기온에서 교외지역의 평균기온 차이를 구하여 나타내었다. 대상 기

간 동안 도시와 교외지역 모두 주간동안의 기온은 보통 15시까지 상승하였으나 일몰직후 하강하기 시작하여 도시지역은 20시에 가장 큰 냉각율을 보였고, 시골지역은 도시지역보다 빠른 18시에 가장 큰 냉각율이 나타났다. 또한 두지역 모두 일출직전인 새벽 5까지 냉각이 계속 지속되었다.

열섬강도는 낮시간에 비해 일몰 후와 일출 직전이 3°C 이상 큰 값을 나타내었고, 낮동안 1°C 내외의 작은 변화를 보였다(그림 5). 표 3은 대상기간 동안 열섬강도 평균값과 최대·최소값을 나타냈다. 도시와 교외지역의 열섬강도와 일평균의 차이가 가장 크게 나타난 날은 평균 기온이 1.92°C, 최대/최소 기온이 각각 3.49°C와 0.29°C를 나타낸 9월 2일이며, 열섬강도의 경우 21시에 3.5°C로 최대값을 나타냈다. 그림 6은 대상기간동안의 40개 HOBO의 측정결과를 이용하여 도시와 교외지역의 열섬강도 빈도 분포를 나타내었다. 주간의 경우 1.5°C 미만의 낮은 열섬강도 영역에 빈도가 집중되어 있는 반면 야간에는 1.5°C 이상의 영역에서 높은 빈도를 나타내며 일몰 이후 도

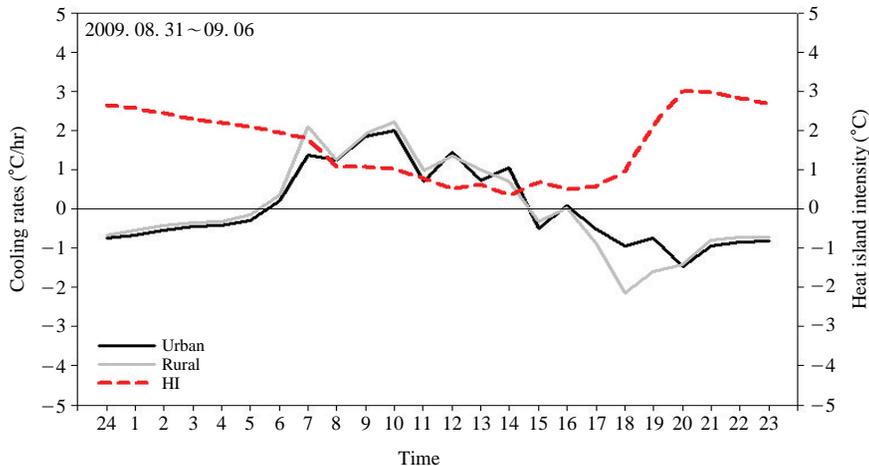


Fig. 5. Diurnal variations of urban heat island (UHI) intensity and cooling rates for urban and rural during Sep. 2009.

Table 3. Diurnal variations of urban heat island intensity in Chuncheon for Sep. 2009.

Temp.	Day						
	8/31	9/1	9/2	9/3	9/4	9/5	9/6
Average (°C)	1.65	1.73	1.92	1.76	1.62	1.49	1.48
Maximum (°C)	3.13	3.16	3.49	3.11	3.21	3.02	2.74
Minimum (°C)	-0.31	0.37	0.29	0.05	0.15	-0.05	-0.22

시열섬 현상에 의한 뚜렷한 열섬강도 차이를 측정결과를 통하여 확인하였다.

3.2 WRF 모델을 이용한 도시열섬 모사 및 평가

3.2.1 HOBO 측정 지점에서의 WRF 모델 비교 검증 기상모델의 온도 결과를 평가하기 위해 춘천시 전

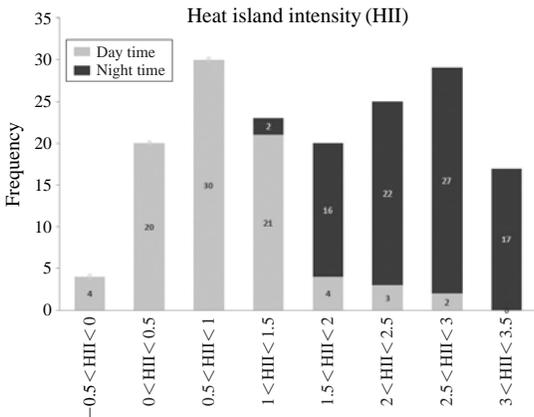


Fig. 6. Frequency and intensity of the UHI intensity during the day and night. The frequency is plotted along the Y axis, and the degree of intensity is plotted along the X axis.

역에 설치한 HOBO의 측정결과를 모델 결과와 비교하였다. 비교 지점은 도시와 교외지역 각각 20개 지점이며, 주간과 야간의 특징을 고찰하기 위하여 주간 시간(오전 7시~오후 6시)과 야간시간(오후 7시~오전 6시)으로 구분하여 나타내었다(그림 7). 그 결과 도심지역에 비하여 교외지역의 모델 결과가 실측과 유사한 결과를 나타내고 있으며 주간과 야간의 기온차가 도시지역보다 분명하게 나타났다. 도시지역의 경우 모델 결과가 주야간 모두 관측값을 과소평가하는 경향을 보였고, 야간의 기온이 교외지역에 비하여 높게 나타났다. 이는 도시 지표의 열적특성으로 인하여 낮동안 열저장이 증가하고 밤에 감소하는 특징을 모델이 잘 모사하지 못하는 것으로 사료된다. 그림 8은 HOBO 측정 지점의 실측 온도와 모델 결과의 차이를 나타낸 수평분포로서 낮과 밤 시간동안의 차이를 나타내었다.

낮과 밤 모두 도시지역을 중심으로 측정 온도의 분포가 높게 나타났으며, 특히 주간에 비하여 야간의 도시지역 온도차이가 1°C 이상 크게 나타났고, 교외지역의 온도차이 역시 야간에 1°C 이상 차이났다. 이는 도시와 교외지역에 나타나는 냉각율 차이에 의한 결과로 사료되며, 이런 결과를 WRF모델 또한 일부 모사하였다.

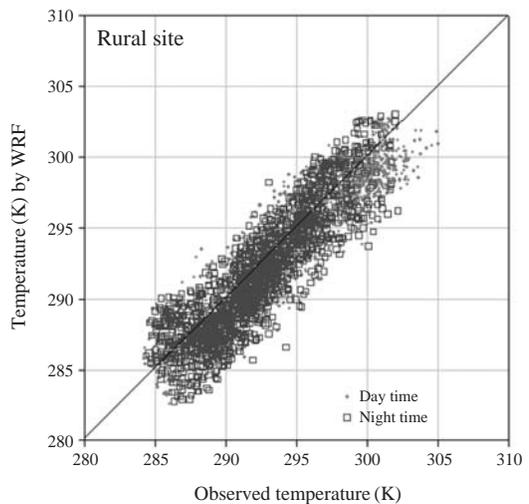
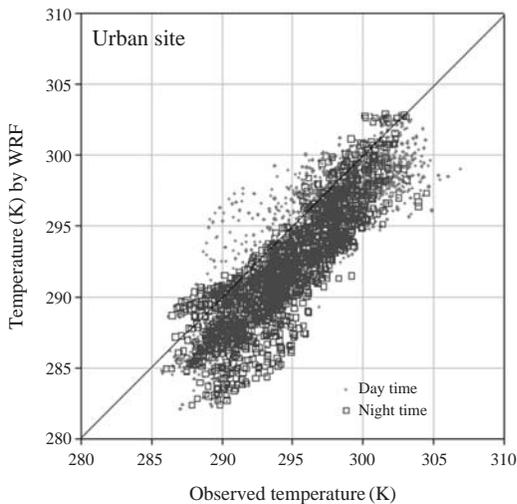


Fig. 7. Comparisons between observed and simulated temperature at 2 m for urban and rural stations on Aug. 31-Sep. 1, 2009.

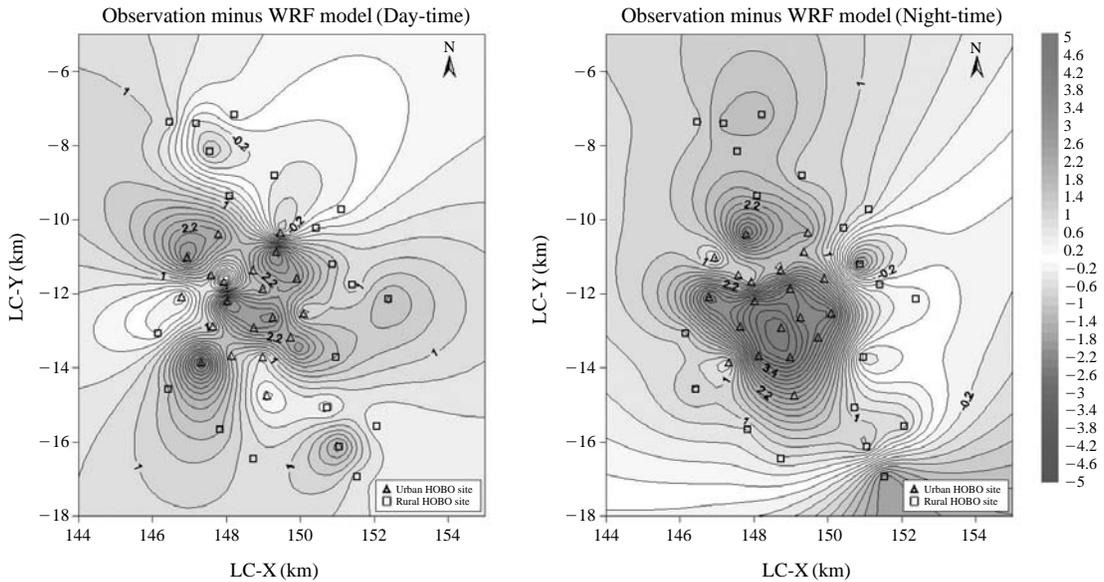


Fig. 8. Distributions of temperature at 2 m fields of the difference between observation and simulation at day-time and night-time on Aug. 31-Sep. 1, 2009. Symbol and color represented the location HOBO sites and the difference in temperature.

3.2.2 기상대 및 AWS 지점의 시계열 분석 및 통계분석

기상모델의 결과를 평가하기 위해 춘천기상대 관측결과와 고은리에 설치한 기상 탐(AWS)자료를 이용하여 모델 결과를 비교 분석하였다(그림 9, 10). 그 결과 두 지점의 기온은 매우 상관도가 높았고, 교외 지역에 해당하는 고은리의 일교차가 춘천기상대보다 크게 나타났다. 또한 도시에 속한 춘천기상대 지점은 8월 31일과 9월 5일 야간 모델의 온도가 과소평가 되고 있지만, 고은리의 경우 야간의 낮은 온도를 모델이 잘 모사하고 있다.

풍속의 경우 Lee *et al.* (2009)에 의해 연구된 춘천 지역의 기상모델 결과 보다 도시의 풍속이 UCM 옵션을 사용하며 일부 개선된 결과를 보였다. 하지만 대상기간동안 두 지점 모두 풍속을 모델이 과대평가 하였다. 특히 고은리 지점에서 낮게 관측된 풍속을 모델은 낮 동안 과대평가 하였고, 춘천기상대 역시 8월 31일부터 9월 2일까지 낮 동안 2m/s 이상 관측된 풍속을 모델은 2배 가까이 과대평가 하였다.

UCM 옵션을 사용했음에도 불구하고 도시지역에 대한 모델 결과가 실측을 과대평가한 결과는 향후 선행연구(Hwang *et al.*, 2010; Kondo *et al.*, 2008, 2005)

Table 4. The statistical treatment methods for the comparison of data.

Correlation coefficient	$r = \frac{(c_o - \bar{c}_o)(c_p - \bar{c}_p)}{\sigma_{c_o} \sigma_{c_p}}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_p - C_o)^2}$
Fractional Bias (FB)	$FB = \frac{\bar{C}_p - \bar{C}_o}{0.5(\bar{C}_p + \bar{C}_o)}$
Mean Bias (MB)	$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_p - C_o)$

*Cp: predicted concentration, Co: observed concentration

에서 나타난 풍속의 정확도 향상을 위한 도시 구조물 등 건물효과를 고려한 모델링연구가 필요하다고 사료된다.

각각 도시와 교외지역의 온도와 풍속에 대한 모델 결과와 실측의 통계분석을 위하여 표 4의 식을 이용하여 대상기간동안 모델 결과를 통계분석 하였다. 그 결과 온도의 경우 두 지역 모두 0.90 이상의 높은 상관값을 보였고, 도시의 오차와 편차가 교외보다 작게 나타났다. 풍속의 경우 상관값은 교외지역인 고은리

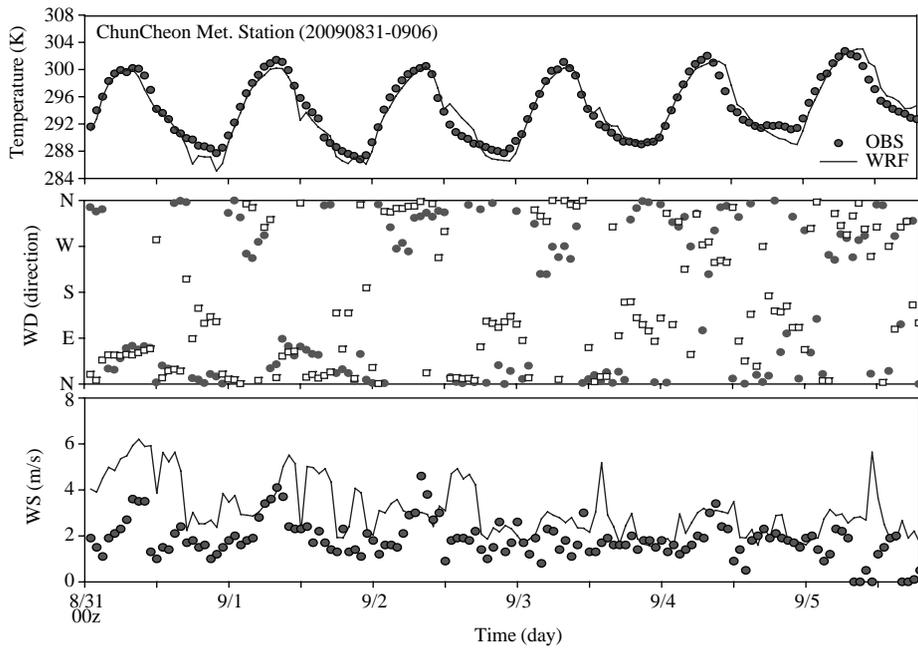


Fig. 9. Observed and simulated time series of temperature at 2 m and wind direction (WD), and speed (WS) at 10 m in Chuncheon Met. station.

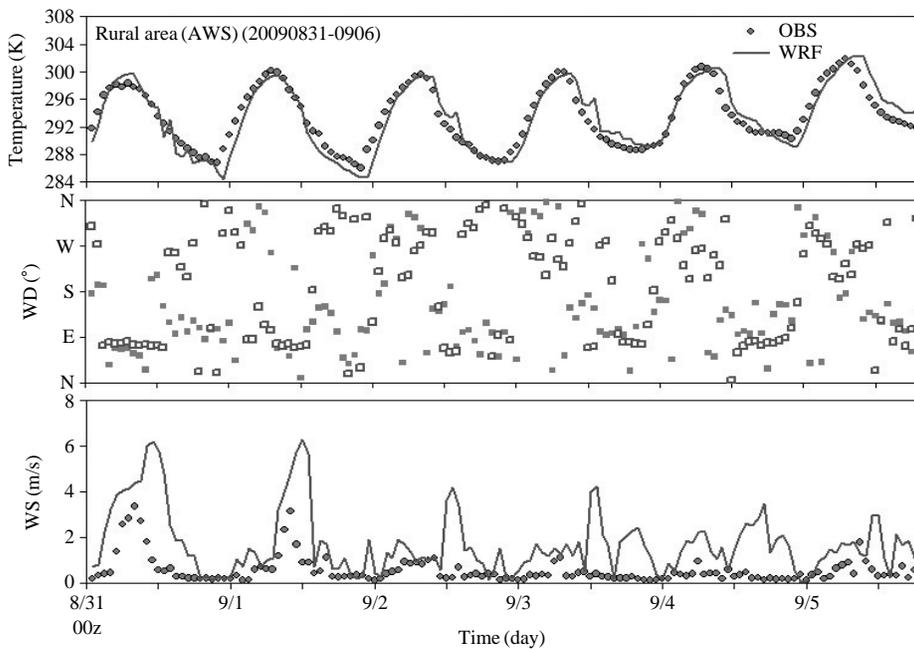


Fig. 10. Observed and simulated time series of temperature at 2 m and wind direction (WD), and speed (WS) at 10 m in rural AWS.

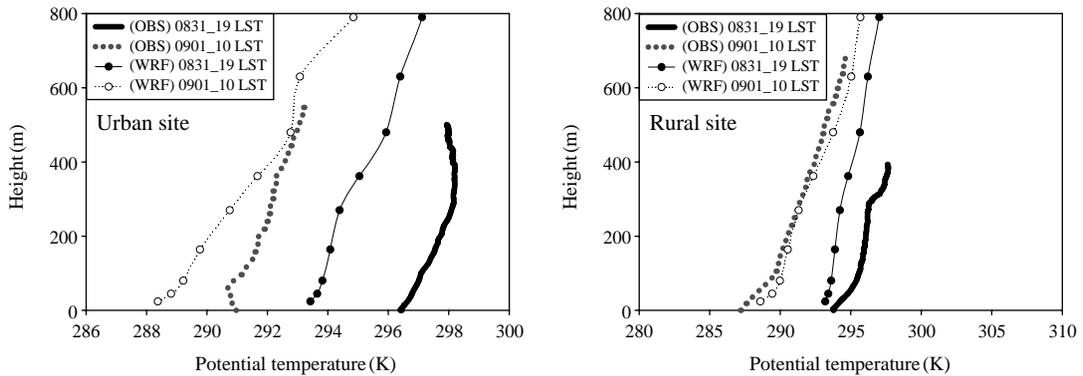


Fig. 11. Observed and simulated vertical profiles of potential temperature at the urban and rural site. Observational data are taken from the tethered sonde during two take offs at 19 LST, August 31 and 10 LST September 1, 2009.

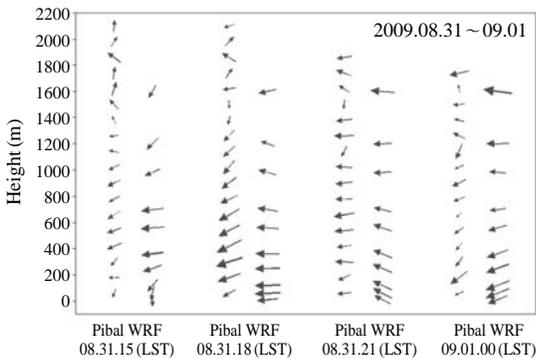


Fig. 12. Observed and simulated vertical profiles of wind at the urban site. Observational data observed from the theodolite during four take offs at 15 LST, 18 LST, 21 LST August 31 and 00 LST September 1, 2009.

의 모델 결과가 좋았지만 오차와 편차에서 도시지역의 모델 정확도가 높았다.

3.2.3 WRF 모형의 대기경계층내의 기상 모사 평가
 열섬의 연직분포를 관측하기 위한 Tethered sonde를 이용해 상층기상(기온, 습도, 기압)을 측정하여 연직 온도 분포를 모델 결과와 비교하였다(그림 11). 또한, 관측지점의 연직 풍향, 풍속을 파악하기 위하여 같은 기간 3시간 단위로 경위기(theodolite)를 이용한 Pibal 측정하여 모델 결과와 비교하였다(그림 12). 도시지역의 온위는 지상 약 400 m 이상의 상층에서는 1°C 내외의 작은 차이를 보이고 있으나 지표 부근의

Table 5. Summary statistics of simulated and observed for meteorological parameters during the period.

Statistics	Urban (Met. st)		Rural (Goeunri)	
	Temp.(K)	WS (m/s)	Temp.(K)	WS (m/s)
r	0.96	0.30	0.94	0.55
RMSE	1.38	1.47	1.67	1.67
FB	0.0004	-0.1006	-0.0002	-1.0473
MB	0.122	-0.187	-0.048	-1.158

온위는 3°C 내외의 큰 차이를 보였다. 또한 일출 후 지표부근에 나타난 역전을 모델은 모사하지 못하였다. 교외지역의 경우 0.5°C 내외의 작은 차이를 보이며 모델 결과가 실측과 유사한 패턴을 보였다. 특히 일출 후 지표부근의 가열에 의한 온도 변화를 모델이 잘 모사하였다.

도시지역의 Pibal 결과 주로 동풍 계열의 바람이 불었으며 지표로부터 200~300 m 부근에서 풍속이 가장 강했다. WRF 모형의 상층 바람장의 풍향 패턴은 실제 측정값과 유사하게 나타났으나, 풍속은 전반적으로 과대평가되는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 한반도 중부내륙에 위치한 춘천지역의 열섬현상 관측을 통하여 열섬강도의 시·공간적인 분포특징을 밝히고, WRF 기상모델을 이용하여 춘천지역의 도시열섬 현상을 모사하고 비교·평가하였다.

비교적 중·소규모 도시에 속하는 춘천의 열섬현상 분포는 일몰 이후부터 자정까지 관측된 도시열섬의 수평규모가 대체로 도시화된 직경(반경 5 km)에 해당하는 범위에서 형성되었다. 열섬강도의 경우 측정일의 기상상태에 따라 다르게 나타났으나 평균적으로 1.5~2°C 내외로 나타났으며, 주간에는 도시와 교외지역의 온도 차이가 1°C 이하에서, 야간에는 2.5°C 이상에서 열섬강도가 높은 빈도를 나타냈다. 도심지역과 교외지역에서 측정된 연직온위분포를 분석한 결과 두 지역의 온위는 300 m 이상의 상층에서 1°C 이하의 차이를 보이고 있으나 지표부근의 경우 토지피복 상태에 따른 열섬강도 차이로 3~5°C의 온위 차이를 보였다. 또한 각각 HOBO 관측 지점의 기온 수평분포 결과 주간보다 야간에 열섬현상이 분명히 나타나며, 낮보다 일몰 이후 열섬강도 차이에 의한 도시와 교외지역의 온도차이가 뚜렷하게 구분되었다. 또한 도시열섬의 시공간적 구조를 모사하기 위하여 기상모델인 WRF에 UCM을 적용하여 도시 캐노피층을 고려한 고해상도 모델링을 실시한 결과, 기상대 지점에서 온도는 실제와 유사하게 모사하였다. 풍속의 경우 교외지역에 비하여 도시지역 기상모델 결과의 상관값은 낮게 평가 되었지만, 상관값 이외의 자수 평방근 오차와 편차는 도시지역의 모델 정확도가 교외에 비해 높았다. 또한 기상모델 결과 연직 150 m 이하 지표부근의 실측모사에 대한 모델 개선이 필요하다. 이는 차후 도시지역의 토지이용도 재분류와 인공열 산출, 실제 건물효과 등을 고려한 보다 구체적인 모델링을 통해 개선 될 것으로 사료된다.

본 연구는 국내 중·소규모 도시에서 나타날 수 있는 도시열섬현상에 대하여 측정을 통해 파악하였으며, 기상모델적용에 따른 모사능력을 검증한 연구로서 향후 중·소규모 도시의 도시열섬현상 연구의 자료로 이용 될 것이다.

감사의 글

이 연구는 2009년 한국과학창의재단 과학고 R&E 프로그램 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

이종범 (2000) 대기오염 기상학, 신광문화사.

- 이종범 (2009) 도시개발에 따른 대기환경의 건강영향 평가 방법 연구, 환경정책평가연구원.
- Ackerman, B. (1985) Temporal March of the Chicago heat island, *J. Appl. Meteorol.*, 24, 547-554.
- Byon, J.-Y., Y.-J. Choi, and B.-G. Seo (2010) Evaluation of Urban Weather Forecast Using WRF-UCM Over Seoul, *J. Korean Meteor. Soc.*, 20(1), 13-26. (in Korean with English abstract)
- Chen, F. and J. Dudhia (2001) Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model in the Penn state-NCAR MM6 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, *Mon. Wea. Rev.*, 129, 569-585.
- Chen, F. and S. Miao (2008) Formation of horizontal convective rolls in urban area, *Atmos.*, 89, 298-304.
- Chen, F., H. Kusaka, S. Miao, R. Bornstein, J. Ching, C.S.B. Grimmond, G.-C. Susanne, T. Loridan, K.W. Manning, A. Martilli, D. Sailor, F.P. Salamanca, H. Taha, M. Tewari, X. Wang, A.A. Wyszogrodzki, and C. Zhang (2011) The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc.2158.
- Eichhorn, J., R. Schrodin, and W. Zdunkowski (1988) Three-Dimensional Numerical Simulations of the Urban Climate, *Beitr. Phys. Atmos.*, 61, 187-203.
- Hwang, J.-W. and S.-C. Kim (2003) A Comparative Analysis on the Urban Heat Island by Residential Types, *J. of Korea Planner A*, 38(7), 235-244. (in Korean with English abstract)
- Hwang, M.-K., Y.-K. Kim, I.-B. Oh, and Y.-H. Kang (2010) High-resolution Simulation of Meteorological Fields over the Coastal Area with Urban Buildings, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 26(2), 137-150. (in Korean with English abstract)
- Jang, Y.-J. (2010) A Study of Urban Heat Island in Chuncheon Area Using Meteorological Model and in situ Observation, *Kangwon National Univ. Master's thesis.* (in Korean with English abstract)
- Jo, H.-K. and T.-W. Ahn (1999) Function of Microclimate Amelioration by Urban Greenspace, *J. of Korean Inst. Lands. Arc.*, 27(4), 203-216. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.-K., H.W. Lee, J.-H. Hong, and E.-H. Son (2000) A Study on the Effect of Anthropogenic Heat Flux and Land-Use on Thermal Environment in Pusan, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 16(4), 363-372. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.-C., C.B. Lee, T.-H. Chen, and Y.-J. Jang (2009) A

- Study about the Impact of Atmospheric Environmental Changes by Urban Development on Human Health, *J. of Environ. Imp. Assess.*, 19(1), 15-28. (in Korean with English abstract)
- Kondo, H., T. Tokairin, and Y. Kikegawa (2008) Calculation of wind in a Tokyo urban area with a mesoscale model including a multi-layer urban canopy model, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 96, 1655-1666.
- Kondo, H., Y. Genchi, Y. Kikegawa, Y. Ohashi, H. Yoshikado, and H. Komiyama (2005) Development of a multi-layer urban canopy model for the analysis of energy consumption in a big city: Structure of the urban canopy model and its basic performance, *Bound.-Layer Meteor.*, 116, 395-421.
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura (2001) A Simple Single-Layer Urban Canopy Model for Atmospheric Models: Comparison with Multi-Layer and Slab Models *Bound.-Layer Meteor.*, 101, 329-358.
- Kusaka, H., F. Chen, M. Tewari, M. Duda, J. Dudhia, Y. Miya, and Y. Akimoto (2009) Performance of the WRF model as a high resolution regional climate model: model intercomparison study, *Proceedings of ICUC-7*.
- Lee, C.-B., Y.-G. Kim, and T.-W. Kim (1993) Aspects of Urban Heat Island and It's Effect on Air Pollution Concentration in Chunchon Area, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 9(4), 303-309. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.-J., K.-Y. Lee, G.M. Won, and H.W. Lee (2009) Application of the Latest Land Use Data for Numerical Simulation of Urban Thermal Environment in the Daegu, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 25(3), 196-210. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.W., K.-Y. Lee, S.-J. Baek, and D.H. Kim (2005) Analysis of Meteorological Features and Prediction Probability Associated with the Fog Occurrence at Chuncheon, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 21(3), 303-313. (in Korean with English abstract)
- Mackey, C.W., X. Lee, and R.B. Smith (2011) Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island, *Building and Environment*, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.08.004.
- Masakazu, M., S. Nakajima, T. Tanaka, H. Takebayashi, and N. Kitao (2009) Countermeasures of Urban Heat Island by the Conversion of Urban Geometry Using Meso-Scale Meteorological Model, *Proceedings of ICUC-7*.
- Miao, S., F. Chen, M.A. LeMone, M. Tewari, Q. Li, and Y. Wang (2009) An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing, *J. Appl. Meteorol. and Climatology*, 48(3), 484-501.
- Moon, Y.-S. and Y.-S. Koo (2006) A Study on Examples Applicable to Numerical Land Cover Map Data for Atmospheric Environment Fields in the Metropolitan Area of Seoul, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 22(5), 661-678. (in Korean with English abstract)
- Oke, T.R. (1979) Review of urban climatology, 1973-1976, *WMO Tech. note NO.169*, World Meteorol. Organiz., 100pp.
- Park, S.-B. and J.-J. Baik (2007) An Investigation of Flow and Pollutant Dispersion in Three-Dimensional Asymmetric Street Canyons Using a CFD Model, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 23(2), 214-224. (in Korean with English abstract)
- Shrestha, K.L., A. Kondo, C. Meada, A. Kaga, and Y. Inoue (2009) Numerical simulation of Urban Heat Island Using Gridded Urban Configuration and Anthropogenic heat Data Generated by a Simplified Method, *Proceedings of International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*.
- Stewart, I. and T.R. Oke (2009) Classifying Urban Climate Field Sites by "Local Climate Zones", *International Association for Urban Climate (IAUC)*, 34, 8-11.
- Yoon, I.H., K.D. Min, and K.E. Kim (1994) A Study on the Meteorological Characteristics of Taegu Area and Its Application to the Atmospheric Dispersion Modelling: II. Characteristic features of the Urban Heat Island: Case Study, *J. Korean Meteor. Soc.*, 30(2), 303-313. (in Korean with English abstract)