

친환경 도시계획을 위한 도시기후지도 작성에 관한 연구*

신동훈** · 조상필*** · 森山正和**** · 竹林英樹***** · 이규석*****

A Study on the Mapping Urban Climate Atlas for the Pro-Environmental Urban Planning*

Dong-hoon Shin** · Sang-pil Cho*** · Masakazu Moriyama**** · Hideki Takebayashi***** · Kyoo-seock Lee*****

요약: 본 연구는 도시지역에서의 바람장 및 대기온도의 분석을 통해 도시기후지도를 작성하여 도시계획과 개발단계에서 더욱 쾌적한 도시환경 조성을 위한 기초자료를 제공하고자 하는 목적으로 실시되었다. 이를 위해 중규모 기상예측 모형인 Weather Research and Forecasting(WRF) 모형의 계산 결과와 자동 기상관측 시스템(AWS) 자료를 이용하여 도시지역에서의 바람장 및 대기온도의 분포를 파악하였다. 중규모 지역을 대상으로 하는 도시기후지도와 도시계획 및 관리를 위한 지침도의 제작에 이를 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구결과는 도시환경관리 시스템의 구축, 도시계획 지침의 정비, 사전환경성 검토 및 환경영향평가, 환경기본계획 및 자연환경보전 등에 활용 가능할 것으로 기대된다.

주제어: 도시기후지도, 바람장, 대기온도, Weather Research and Forecasting(WRF)

ABSTRACT: This study aims to forecast the regional wind pattern and air temperature using Weather Research and Forecasting(WRF) Model and Automatic Weather Station(AWS) data. Ultimately, the purpose of this study is to supply basic data for urban planning and development to make more comfortable urban environment by mapping urban climate atlas. The result of this study is used in the following parts is effected to be available. The construction of urban environmental management system, the maintenance of planning guidelines for urban planning, pre-primary review environment, environmental impact assessment and environmental and master plan for nature conservation.

Key Words: Urban Climate Atlas, Regional Wind Pattern, Air Temperature, WRF

I. 서론

경을 제공하고 도시기후를 안정화시키는 데 기여하고 있다. 또한 도시 지역에서의 생물종 다양성 도시의 녹지는 도시 거주자들에게 자연적인 환경 증가, 소음 흡수, 대기오염 감소, 대기온도와 지표

* 이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2007-357-F00022).

** 전남발전연구원 도시연구팀 위촉연구위원(Assistant Research Fellow, Dept. of Urban Research, Jeonnam Research Institute, Korea), 교신저자(E-mail: dhshin@jeri.re.kr, Tel: 061-280-3938)

*** 전남발전연구원 도시연구팀 선임연구위원(Senior Research Fellow, Dept. of Urban Research, Jeonnam Research Institute, Korea)

**** 일본 고베대학교 공과대학원 건축학과교수(Professor, Department of Architecture Graduate School of Engineering, Kobe University, Japan)

***** 일본 고베대학교 공과대학원 건축학과조교(Assistant, Department of Architecture Graduate School of Engineering, Kobe University, Japan)

***** 성균관대학교 조경학과 교수(Professor, Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Korea)

면온도를 감소시키는 등 환경친화적인 기능뿐 아니라 도시민의 쾌적한 삶을 위한 여가공간 기능, 심리적인 안정을 제공하는 기능 등 다양한 기능을 수행하고 있다. 그러나 이러한 도시 녹지의 기능에도 불구하고 1970년대 이후, 우리나라에서는 도시로의 과도한 인구집중이 발생되면서, 도시확장과 도로건설 등과 같은 과도한 난개발로 인해 도시열섬(Urban Heat Island: UHI) 현상, 대기오염 심화 등 다양한 환경적인 문제가 야기되었다. 최근 들어 이러한 환경적인 문제해결에 대한 접근방법의 하나로 도시환경을 쾌적하게 하기 위한 도시기후학이 관심을 받고 있다.

도시에서의 바람길은 해당지역의 건물 형태와 배치유형 등의 고정적인 요소뿐 아니라 풍향, 풍속, 대기안정도와 같은 기상학적 조건 등 가변적인 요인에 의해 변하게 되며, 이에 따른 기류의 소용돌이 또는 차단 등에 의해 대기질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다(주현수 외, 2006). 또한 국지적인 바람장 분석은 도시계획에 있어 앞으로의 대기오염을 최소화할 수 있는 방안 및 도시열섬현상의 완화를 위한 방안을 제시할 수 있으므로, 고층건물 등의 인공 구조물이 밀집된 도시지역의 쾌적한 대기환경을 위해 바람길의 분석과 조성은 최근 들어 많은 주목을 받고 있다. 그러나 기존의 도시계획에서는 이러한 바람길의 대기환경과 도시열섬현상 완화 효과에 대한 영향이 크게 고려되지 못하였으며, 일부 사례에서 바람길 분석이 시도된 경우가 있으나, 바람길 변화로 인한 대기오염에 대한 정량적인 분석이 이루어지지 않고 공기흐름 방해와 정체, 외류현상 방지차원에서의 건물 배치에 대한 접근과 같은 원론적인 수준을 제시하는 연구에 그치고 있는 실정이다.

미국, 독일, 일본 등에서는 도시기후 파악을 통

해 도시계획적인 차원에서의 접근에 관한 연구(Reiss-Schmidt, 1987; Evans and Schiller, 1991; Barlag and Kuttler, 1991; Schirmer et al., 1993; Rosefeld et al., 1998; Lazar and Podesser, 1999; 日本環境省, 2000, 2004; ドイツ工業協會, 2004; 名古屋市, 2004; 環境情報科學センタ, 2004; 日本國土交通省, 2005; Matzarakis, 2005; 清田忠志 외, 2006; 田中貴宏 외, 2007; 東京都, 2008a, 2008b; 日本建築學會, 2000, 2008)가 1980년대 후반부터 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 아직까지 CFD(Computation Fluid Dynamics) 모형에 의한 도시기후 수치해석에 관한 연구(김상진 외, 2001), 주택단지 설계시 바람길 예측에 관한 연구(김동호 외, 2006), 서울시 상계4동을 대상으로 한 도시기후도 작성(송영배, 2002a), 분당신도시와 판교 지역을 대상으로 도시 개발이 도시 열섬 형성에 미치는 영향(송영배, 2002b) 등과 같은 기초적인 연구단계에 머무르고 있는 실정이다. 실제 도시계획적인 차원에서의 도시기후에 대한 연구(김운수·김학열, 2000, 2001; 엄정희 외, 2001; 조경두·박민하, 2003; 구윤서, 2004)가 일부 시도되었으며, 최근 서울시에 의해 도시기후지도에 관한 연차적인 연구(서울시, 2006, 2007)가 진행되었다. 그러나 대부분의 선행연구들이 기상모형의 시뮬레이션에 의한 대기온도와 바람장 분석이 아닌 몇몇 지점에서의 기상관측장비의 실측값을 이용한 보간법을 이용하여 연구대상지 전역의 대기온도 분포 및 바람장 분석을 파악하기에는 미흡하며, 기상관측장비가 밀집되지 않은 지역에서의 적용은 어려운 실정이다.

국내의 택지개발 추진단계에서 환경영향을 고려하도록 한 관련 법규 및 규정을 살펴보면, 환경부의 '환경정책기본법' 및 '환경, 교통, 재해 등에

관한 영향평가법', 건설교통부의 '국토의 계획 및 이용에 관한 법률', 서울시의 '환경 교통 재해영향 평가조례' 등이 시행되고 있다. 이러한 환경영향 관련 법규 및 규정 등에서는 개발사업 시 공기의 순환, 풍량과 같은 통풍과 관련된 요소들을 검토 하도록 하고 있으나 이러한 통풍요소들의 검토를 위해 어떠한 요소를 어떤 방법으로 검토해야 하는 지에 대한 구체적인 언급이 없는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 실측자료의 보간법을 이용한 기존 연구의 한계성을 극복하기 위해 중규모 기상예측 모형인 Weather Research and Forecasting(WRF)을 사용한 계산결과와 실시간 관측자료를 이용하여 도시지역에서의 바람장 및 대기온도의 분포를 파악하여 도시계획 및 개발 과정에서 친환경적인 계획 및 개발에 활용할 수 있는 도시기후지도를 작성하여 도시계획과 개발 단계에서 보다 쾌적한 도시환경 조성을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

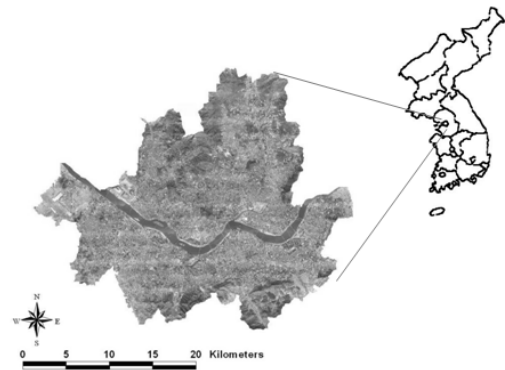
II. 연구방법

1. 연구 진행 과정

문헌 조사를 통해 연구방향을 설정한 후, 도시 기후지도 작성을 위해 대기온도, 풍속, 풍향 등의 기후요소 예측을 위해 입력자료 및 매개변수 설정과 같은 자료의 전처리 과정을 진행하였으며, 그 후 중규모 기상예측 모형인 WRF를 이용하여 예측 결과를 도출하였다. 계산된 예측 결과를 기상청에서 제공하는 자동기상 관측 시스템(Automatic Weather Station: AWS)에서 수집된 관측자료와의 비교 분석을 통해 검증한 후, 도시기후지도와 지침도를 작성하고 최종적으로 결과를 도출하였다.

2. 연구대상지

본 연구의 대상지는 서울 및 인접 지역을 포함하는 중규모 공간을 대상으로 한다(〈그림 1〉 참조). 1970년대 이후, 도시화와 택지개발로 인해 인구가 급속하게 증가하였으며, 도로건설에 의해 산림이 절편화되었고 경작지와 산림과 같은 기존의 녹지지역이 주거지역이나 상업지역 등의 도시지역으로 토지이용이 변화되어 원래의 자연경관이 급속하게 바뀌었다.



〈그림 1〉 연구대상지

3. 사용 자료

1) WRF 모형

수치 기상예측 모형은 3차원적인 대기의 상황에 대해서 수치적분과정을 통해 기상자료를 예측하는데, 전 세계적으로 WRF 모형과 MM5 모형 등과 같은 중규모 모형이 널리 이용되고 있다.

WRF 모형은 미국 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction: NCEP)와 미국 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research: NCAR)에서 개발한 기상예측과 대기연구의 요구에 부합하도록 설계된 차세대 중규모 수치 기상예측 모형이다. WRF 모

형은 중·단기 기상예측에서 인지도와 정확도가 다른 기상예측 모형에 비해 상대적으로 높고, 공간적으로 1km에서 수천 km에 이르는 범위에 적용이 가능하므로 광범위한 영역에서의 기상예측 및 대기연구에 이용되고 있다.

MM5(The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model) 모형은 1970년대 초기에 미국 국립대기연구센터와 펜실베이니아 주립대학이 공동 개발한 중규모 기상예측의 제5세대 모형이다. 기상분석과 관측자료의 4차원 자료동화(Four-Dimension Data Assimilation: FDDA)가 가능하고 다중 격자(domain) 방법으로 여러 개의 연직적인 단방향 및 양방향으로의 둥지격자(nest domain)을 사용할 수 있으며, 미시적 물리학에 관련된 여러 가지 방법을 선택적으로 사용할 수 있다.

그 이외에 GCM(Global Climate Model)과 GSM(Global Spectral Model) 등의 전 지구 수치 기상모형이 사용되고 있다. 이러한 모형들의 결과가 생성되는 패턴은 각각의 모형별로 과정별 차이는 있지만 전체적인 작업형식은 지형자료와 기상자료 등의 초기자료와 격자자료를 사용하여 수치적분 과정을 통해 최종 결과를 예측하는 공통점을 가지고 있다.

2) 사용자료

WRF와 MM5 모형의 정확도 검증을 위한 선행연구(Heo et al., 2009; Steven et al., 2010)를 살펴본 결과, 두 모형 모두 실제 기상현상과 유사한 경향을 나타냈으나, WRF 모형의 결과가 MM5 모형의 결과보다 상대적으로 정확성이 높은 것으로 나타났다. 또한 WRF 모형이 가장 최근 개발된 점을 감안하여 본 연구에서는 대기온도와 바람장 예측을 위해 중규모 기상예측 모형인 WRF 모형을 사용하였다.

을 사용하였다.

WRF 모형을 이용한 결과 예측을 위해 미국 국립환경예측센터에서 제공하는 Global Forecast System(GFS)의 grib 자료를 기상입력 자료로 사용하였다. 또한, WRF 모형의 계산결과 향상을 위해 표고자료와 토지이용자료 등의 지형자료를 수정하여 사용하였다. 이때 수치표고모형(Digital Elevation Model: DEM)은 국제 농업연합기구(Consultative Group for International Agriculture Research: CGIAR)에서 제공하는 90m 공간해상도의 우주선 레이더 지형 임무(Shuttle Radar Topography Mission: SRTM) 자료를 사용하였으며, 토지이용자료는 환경부에서 제공하는 1:25,000 축척의 중규모 토지피복도와 2005년에 제작된 1:3,000 축척의 서울시 도시생태현황도의 토지이용현황 자료를 사용하였다. 이때 토지이용 자료는 WRF 모형에서 사용되는 미국 지질조사소(United States Geological Survey: USGS)의 토지피복 및 토지이용 항목(〈표 1〉 참조)과 일치시키기 위해 이와 유사한 성격을 갖는 토지피복 등급을 묶어 24개 항목으로 재분류하고, 두 번째 둥지격자의 해상도를 고려하여 300m×300m의 공간해상도로 재배열하였다.

WRF 모형의 계산결과 검증을 위해 기상청에서 제공하는 서울시 26개 지점의 AWS에서 관측된 기온, 풍향, 풍속 등의 실시간 기상관측 자료를 사용하여 계산값과 실측값 사이를 비교하였다. 〈표 2〉는 본 연구에서 사용된 기상입력 자료 및 지리정보 자료를 보여주고 있다. 본 연구에서는 WRF 모형의 입력자료 수정 및 계산결과의 분석을 위해서 ArcGIS ver. 9.2를 사용하였다.

〈표 1〉 미국 지질조사소 토지이용/토지피복 항목

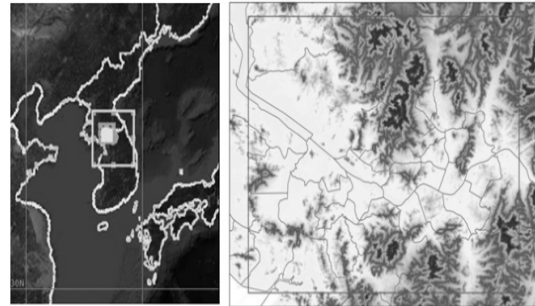
값	코드	내용
1	100	도시 및 건물밀집지역
2	211	건조경작지 및 목초지
3	212	관개경작지 및 목초지
4	213	건조/관개 혼효경작지 및 목초지
5	280	경작지/초지 혼합
6	290	경작지/삼림 혼합
7	311	초지
8	321	관목지
9	330	관목/초지 혼합
10	332	사바나
11	411	낙엽·활엽수림
12	412	낙엽·침엽수림
13	421	상록·활엽수림
14	422	상록·침엽수림
15	430	혼효림
16	500	수체
17	620	초지습지
18	610	목지습지
19	770	나대지 또는 성긴 초지
20	820	초지 툰드라
21	810	목지 툰드라
22	850	혼효 툰드라
23	830	나대지 툰드라
24	900	눈 또는 얼음

〈표 2〉 본 연구에 사용된 기상입력 자료 및 지리정보 자료

자료	명칭	특성
기상 입력자료	GFS grib data	측정간격: 매 6시간 공간해상도: 위경도 1°
표고 자료	CDIAR SRTM DEM	90m 공간해상도
토지 이용자료	환경부, 중분류 토지피복도	축척: 1:25,000
	서울시, 도시생태현황도	축척: 1:3,000
기상 관측자료	기상청, 자동기상관측시스템 관측자료	서울시 26개 지점

4. 연구방법

중규모 기상예측 모형인 WRF를 사용한 연구 대상 지역에서의 대기온도와 바람장의 예측을 위해, 우선적으로 3개의 격자를 설정하였다. 어미 격자(mother domain)는 X축 110화소, Y축 110화소로 각 화소를 2.7km×2.7km의 공간 해상도로 설정하였다. 첫 번째 등지격자는 어미격자의 1개 화소를 9개로 재배열하여 X축 106화소, Y축 106화소로 각 화소를 900m×900m의 공간 해상도로 설정하였으며, 마지막으로 두 번째 등지격자는 첫 번째 등지격자의 1개 화소를 9개로 재배열하여 X축 175화소, Y축 151화소로 각 화소를 300m×300m로 설정하여 바람장과 대기 온도를 분석하였다. 분석을 위해 사용된 두 번째 등지격자의 지리학적 위치는 동경 126° 40′ 53″ ~ 동경 127° 12′ 53″, 북위 37° 23′ 34″ ~ 북위 37° 46′ 59″의 범위를 가지고 있다(〈그림 2〉 참조).



왼쪽: 어미격자 및 첫 번째 등지격자
오른쪽: 두 번째 등지격자

〈그림 2〉 WRF 계산을 위한 도메인 설정

분석기간은 우리나라의 기후 특성을 감안하여 여름철과 겨울철의 도시기후를 파악하기 위해 2개의 기간으로 분류하여 실시하였다. 여름철은 2007년 8월 10일 오전 10시부터 2007년 8월 17일

〈표 3〉 연구대상지 분석기간 동안의 기상자료

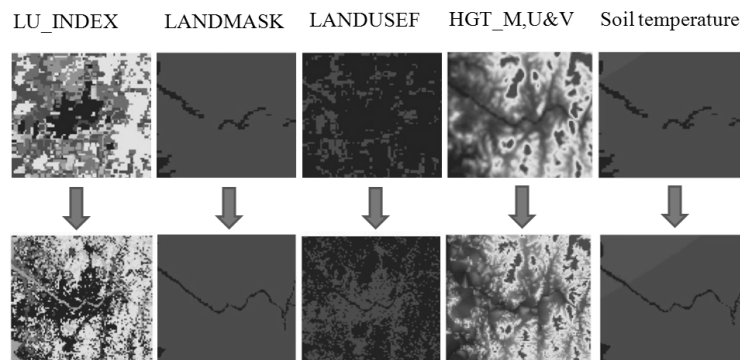
날짜	여름철(2007)								겨울철(2008)							
	8/10	8/11	8/12	8/13	8/14	8/15	8/16	8/17	1/10	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15	1/16	1/17
평균기온(℃)	27.7	28.7	26.2	27.6	24.0	24.7	19.9	22.4	0.1	0.6	0.9	-4.3	-2.7	-4.2	-7.1	-4.8
최고기온(℃)	31.0	33.0	28.1	30.3	27.8	29.0	25.2	27.7	4.3	2.0	4.4	-1.1	1.5	-0.4	-3.0	-0.7
최저기온(℃)	25.7	25.5	24.6	24.8	22.0	19.1	18.6	19.0	-3.5	-1.7	-4.5	-8.5	-5.1	-7.1	-9.5	-8.6
일 강수량(mm)	3.5	0.0	9.0	2.5	0.0	0.0	10.0	2.5	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

자료: 기상청

오전 08시까지의 7일간을, 겨울철은 2008년 1월 10일 오전 10시부터 2008년 1월 17일 오전 8시까지의 7일간을 분석기간으로 설정하여, 10m 상공의 대기기온, 풍속, 풍향 값을 매 2시간 간격으로 계산하였다. 분석기간의 일기상 자료를 확인하면, 여름철의 경우 2007년 8월 10일과 2007년 8월 11일에 열대야 현상이 관측된 것으로 확인되었다. 평균기온은 여름철 19.9℃~28.7℃, 겨울철 -7.1℃~0.9℃의 분포가 나타났으며, 일 강수량은 여름철의 경우 8월 10일 3.5mm, 8월 12일 9.0mm, 8월 13일 2.5mm, 8월 16일 10.0mm, 8월 17일 2.5mm,

겨울철의 경우 2008년 1월 11일 6.7mm의 강수량이 확인되었다(〈표 3〉 참조).

다음으로, WRF 모형 계산 결과의 정확도를 향상시키기 위해서 WRF 모형의 후처리 시스템인 WPS(WRF Post-process System)를 실행하여 생성된 두번째 등지격자의 지리정보 생성 자료인 geo-em.03.nc 파일의 토지이용(LU_INDEX)¹⁾, 토지이용세분(LANDUSEF)²⁾, 육지와 수면 분포(LANDMASK), 해발고도(HGT), 지표면온도(Soil temperature) 등의 초기 입력자료들을 수정하였다(〈그림 3〉 참조).



〈그림 3〉 WRF모형 계산을 위한 초기입력자료 수정

1) 토지이용(LU_INDEX) : WRF 모형의 지형입력자료인 USGS 24개 토지이용항목을 의미하며, 본 연구에서는 환경부 중분류 토지피복자료와 서울시 도시생태현황도의 토지이용현황자료를 USGS 토지이용 및 피복자료 항목으로 재분류하여 사용하였다.

2) 토지이용세분(LANDUSEF: Landuse Fraction) : 각 화소 내의 USGS 토지이용 및 피복자료 24개 항목의 비율을 의미하며, WRF 모형 계산 시 토지표면의 모형, 알베도, 표면거칠기 등 각 화소의 평균가치를 결정한다.

그런 후에, 기상입력자료인 grib 형식의 자료를 WRF 모형에서 사용하는 grid 형식으로 변환하기 위해 ungrib.exe와 metgrid.exe를 수행한 후 WRF 분석과정을 실행하였다. 이 과정에서 매개변수를 설정(〈표 4〉 참조)한 후 계산 과정을 수행하였으며, 계산된 결과값은 GIS 소프트웨어인 ArcGIS ver. 9.2에서 대기온도와 바람장의 특성을 분석하기 위해 ESRI Grid 포맷 형식으로 변환하였다. 마지막으로, 분석된 도시기후환경의 특성을 기반으로 하여 친환경 도시계획을 위한 도시기후지도와 지침도를 작성하였다.

〈표 4〉 WRF모형 계산을 위한 매개변수 설정

	Parameters
Planetary Boundary Layer (PBL)	YSU scheme
Longwave Radiation	RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)
Shortwave Radiation	Dudhia
Surface Layer	5-layer Soil Model
Cumulus parameterization	Kain_Fritsh
Microphysics	WSM3-class simple ice scheme

III. 결과 및 고찰

1. 대기온도

대기온도의 경우, 계산결과와 관측값의 상관분석 결과 R^2 값이 여름철 0.52, 겨울철 0.73으로 여름철보다 겨울철의 계산결과가 더 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 서울시 26개소 자동 기상

관측지점에서의 실측값과 WRF 모형 계산결과와의 상관분석 결과를 보면, 여름철의 상관계수는 각각의 관측지점별로 0.68~0.80으로 전체 대상지역의 상관계수는 0.72로 비교적 높은 상관관계가 있는 것으로 판단된다. BIAS³⁾는 -0.93~2.09의 범위로 나타났으며, 전체적으로는 0.02로 계산된 온도와 실측온도 간 평균은 비슷한 것으로 나타났다. 제공근 평균오차(Root Mean Square Error: RMSE)⁴⁾는 각 관측지점별로 1.87~2.70 사이의 범위로 나타났으며, 전체 대상지의 RMSE는 2.49였다. 이는 68% 신뢰수준으로 보았을 때 연구대상지 전체의 여름철 대기온도 오차는 2.49℃보다 낮은 것으로 예상할 수 있다. 또한, 겨울철의 상관계수는 각각의 관측지점별로 0.84~0.93으로 전체 대상지역의 상관계수는 0.85로 여름철보다 더 높은 상관관계를 보였다. BIAS는 -2.57~1.01의 범위로 나타났으며, 전체적으로는 -1.33으로 이는 계산된 온도가 실측된 온도보다 평균적으로 1.33℃ 정도 높게 나타났음을 의미한다. RMSE는 각 관측지점별로 1.87~2.55 사이의 범위를 나타내었으며, 전체 대상지의 RMSE는 2.41로 68% 신뢰수준으로 보았을 때 연구대상지 전체의 겨울철 대기온도 오차는 2.41℃보다 낮은 것으로 예상할 수 있다.

토지이용별 대기온도의 분포를 살펴본 결과 대기온도가 낮은 지역은 산림지역과 초지와 같은 녹지지역에 분포하고 있는 반면, 높은 대기온도를 나타낸 지역은 공업지역, 상업지역, 주거지역 등 도시 내의 개발지역에 분포하고 있었다.

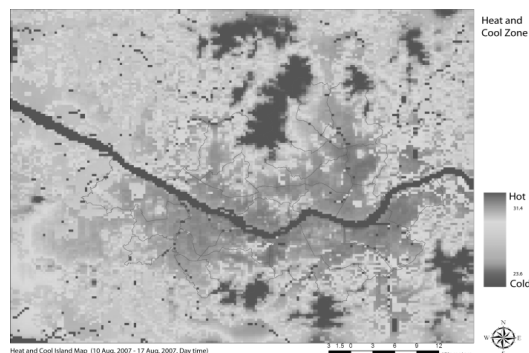
여름철의 경우 전체적으로 서울의 남동부에서 높은 대기온도 분포가 나타났다. 평균 대기온도는

3) BIAS : WRF 계산결과치의 평균값과 AWS에서 실측자료의 평균값과의 차이를 의미한다.

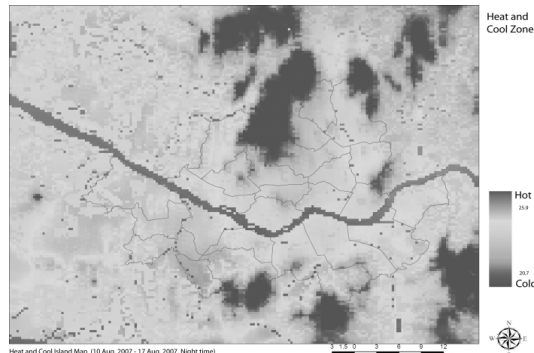
4) RMSE(Root Mean Square Error) : 계산값과 관측값 사이에 평균적으로 어느 정도 오차가 발생하는 것을 의미하는 것으로, 이때 발생하는 오차는 정규분포를 따른다고 가정하는데 68%의 실험·관측 결과는 RMSE보다 큰 오차를 가지지 않으며, 95%의 실험·관측 결과에서는 RMSE의 2배보다는 작은 오차를 가진다.

강남구, 송파구, 서초구 등에서 다른 지역보다 높았다. 주간의 경우 영등포구, 구로구, 금천구와 같은 지역의 온도가 한강 이북보다 높게 나타났으며, 야간의 경우 서울의 전역에서 주변지역보다 높은 대기온도 분포가 확인되어 열섬현상이 나타나고 있는 것으로 판단되었다. 야간의 온도가 이렇게 높게 분포하는 것은 주간동안 흡수되었던 태양복사에너지가 야간에 대기중으로 방출되는 것과 더불어 인위적으로 발생하는 인공폐열의 영향으로 판단된다. 한강 이남지역보다 한강 이북지역이 낮은 온도 분포를 보이는 것은, 서울의 북쪽 외곽에 위치한 북한산, 도봉산 등의 산악지역에서 도시 내부로 유입되는 냉기류의 영향이 있기 때문

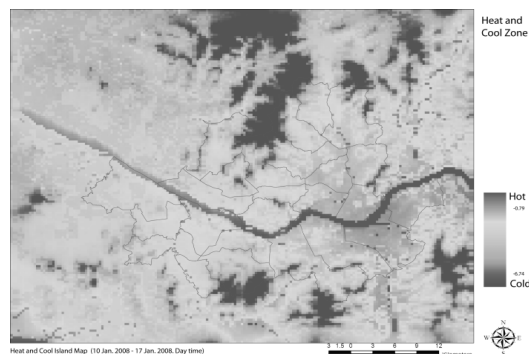
인 것으로 판단된다. 겨울철의 경우에는, 서울시의 동쪽 부분에서 높은 대기온도 분포가 나타났다. 주간의 경우 송파구, 강동구, 광진구, 동대문구와 같은 지역에서 높은 온도 분포를 확인하였으며, 야간의 경우 여름철과 마찬가지로 한강 이남지역이 한강 이북지역보다 높은 온도 분포가 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 도시내부 지역에서 여름철과 겨울철 모두 명확히 주간과 야간 사이의 대기온도 분포 차를 확인할 수 있었다. 또한 산림에서 불어오는 냉기류의 열섬 저감효과에 미치는 영향은 여름철과 겨울철 모두 주간보다는 야간에 더 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, 여름철보다는 겨울철에 그 효과가 더 높은 것으로



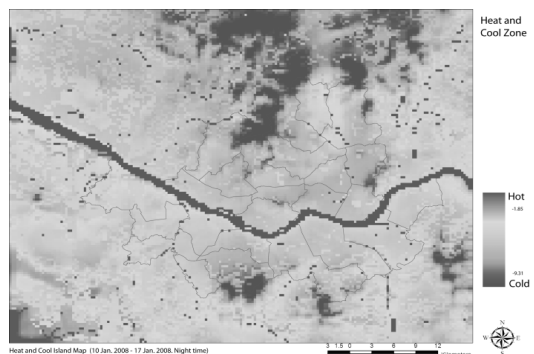
〈그림 4〉 여름철 주간 평균 대기온도 분포



〈그림 5〉 여름철 야간 평균 대기온도 분포



〈그림 6〉 겨울철 주간 평균 대기온도 분포



〈그림 7〉 겨울철 야간 평균 대기온도 분포

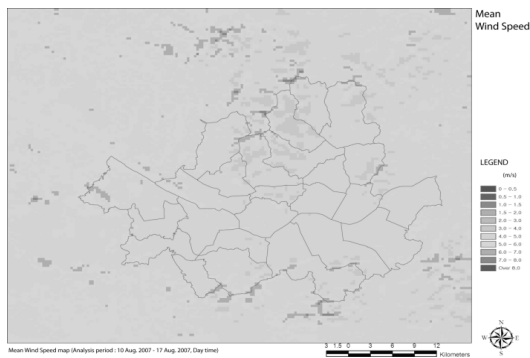
나타났다(〈그림 4, 5, 6, 7〉 참조).

2. 풍속 및 풍향

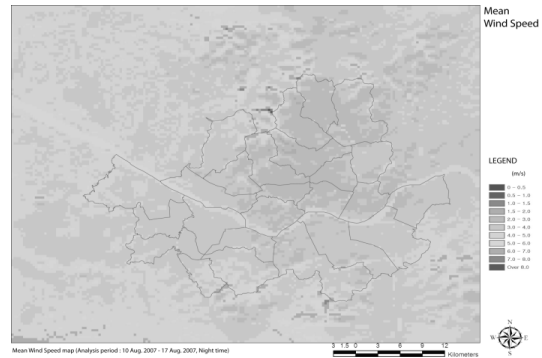
풍속의 경우에는, 계산결과와 관측값의 상관분석 결과 R^2 값이 여름철 0.33 겨울철 0.07로 대기 온도와는 반대로 겨울철 계산결과보다 여름철 계산결과와 정확도가 비교적 높은 것으로 나타났다. 서울시 26개소 자동기상관측지점과 WRF 모형 계산 결과와의 상관분석 결과를 보면, 여름철의 상관계수는 각 관측지점별로 0.22~0.85로 나타났으며, 전체 대상지역의 상관계수는 0.57로 나타나 여름철보다 낮은 상관관계를 보였다. BIAS는 0.3

0~2.62의 범위로 나타났으며, 전체적으로는 1.69로 이는 연구 대상지 전체로 보았을 때 계산된 풍속이 실측된 풍속보다 1.69m/s 빠르게 계산되었음을 의미한다. RMSE는 각 관측지점별로 0.94~2.54 사이의 범위로 나타났으며, 전체 대상지의 RMSE는 1.62로 68%의 신뢰수준에서 연구대상지 전체의 여름철 풍속 오차가 1.62m/s보다 낮을 것으로 예상할 수 있다.

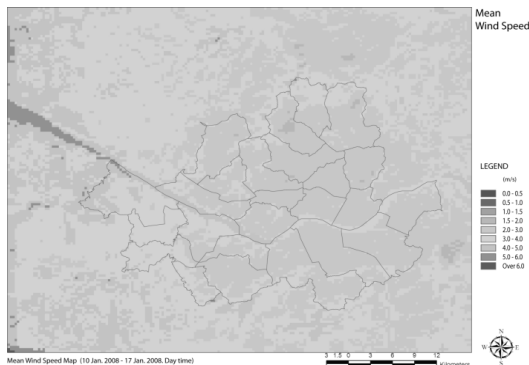
겨울철의 상관계수는 각각의 관측지점별로 0.07~0.68로 나타났으며, 전체 대상지역의 상관계수는 0.26으로 계산값과 실측값의 상관성이 낮은 것으로 나타났다. BIAS는 -1.60~3.08의 범위로 나타났으며, 전체적으로는 0.83으로, 이는 연구대



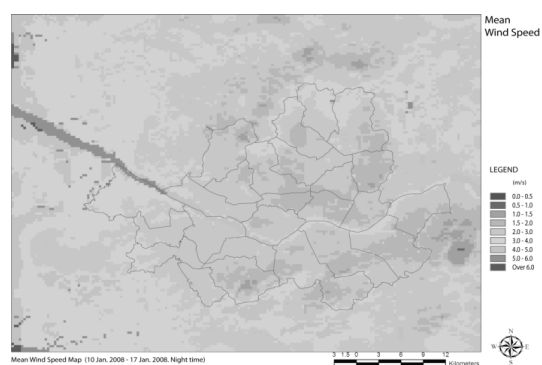
〈그림 8〉 여름철 주간 평균 풍속 분포도



〈그림 9〉 여름철 야간 평균 풍속 분포도



〈그림 10〉 겨울철 주간 평균 풍속 분포도



〈그림 11〉 겨울철 야간 평균 풍속 분포도

상지 전체로 보았을 때 계산된 풍속이 실측된 풍속보다 0.83m/s 빠르게 계산되었음을 의미한다. RMSE는 각 관측지점별로 0.94~2.54 사이의 범위로 나타났으며, 전체 대상지의 RMSE는 1.52로 68% 신뢰수준으로 보았을 때 전체대상지의 겨울철 풍속오차는 1.52m/s보다 낮은 것으로 예상할 수 있다.

풍속의 계산결과 정확도가 낮게 나타난 이유는 대기온도에 비해 풍속과 풍향이 주변의 지형과 건물의 배치 형태와 같은 주변 상태의 영향을 더 강하게 받기 때문인 것으로 생각되며, 300m 공간해상도에 의해 건물의 형태와 배치유형 등에 의한 풍향과 풍속의 순간적인 변화를 정확히 반영하지 못하기 때문에 나타나는 문제점으로 파악된다.

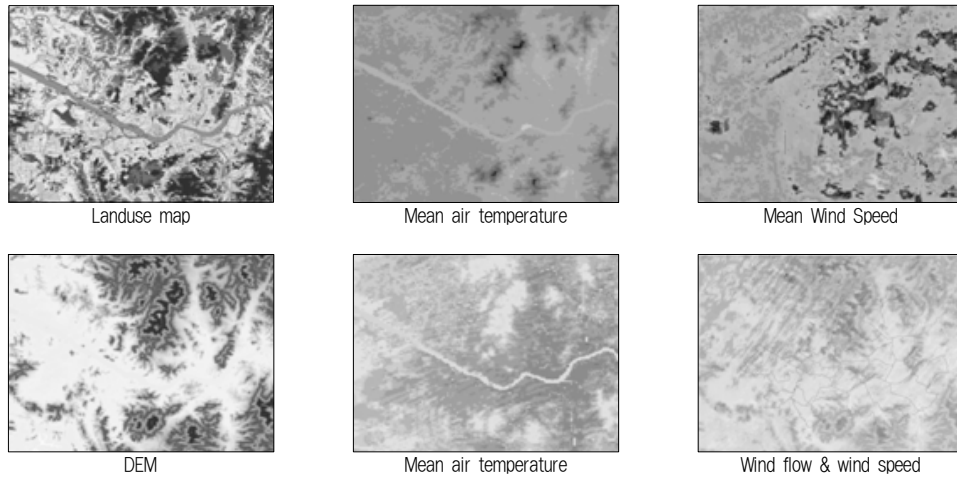
주풍향은 겨울철에는 북서풍과 북풍이었으며, 여름철에는 남동풍과 남서풍이었다. 또한 도시지역의 외곽에 위치하고 있는 북한산, 도봉산, 관악산, 청계산 등의 산림지역과 한강에서 빠른 풍속이 발생하는 경향을 보였다. 겨울철에 비해 여름철 주간의 경우 비교적 도시내부에서 바람의 소통이 원활한 것으로 예측되었으나, 야간의 경우 겨울철과 여름철 모두 도시내부에서 바람의 풍속이 약해지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 중구, 강북구, 성북구, 성동구, 도봉구 등은 여름철 야간에 낮은 풍속으로 나타났는데, 여름철 야간의 대기온도 분포도와 비교를 통해 북한산과 도봉산 등 외곽 산악지역에서 이들 지역으로 냉기류가 유입되고 있다는 것을 알 수 있다. 겨울철 야간에는 한강이 북지역을 비롯한 한강 이남지역의 강남구, 관악구, 송파구, 서초구, 강동구 등에서도 청계산, 우면산, 일자산, 관악산 등에서 약한 냉기류가 유입되고 있음을 알 수 있다. 주요한 바람길은 한강과 한강의 지류 그리고 산림지역에서 계곡의 지형을 따라

형성되는 것으로 판단된다(〈그림 8, 9, 10, 11〉 참조). 여름철과 겨울철 모두 평균 풍속은 주간보다 야간에 감소되는 것으로 예측되기 때문에 도시내부에서 발생된 대기오염물질이 풍속의 감소로 인해 분산되지 못하고 축적될 것으로 예상되어 이에 대한 대책 마련이 필요할 것으로 판단된다.

3. 도시기후지도 작성

WRF 분석결과와 AWS 실측값 사이의 상관계수를 살펴본 결과 대기온도의 경우 여름철과 겨울철 모두 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났으나, 바람장의 경우에는 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 바람장의 상관관계가 낮게 나타난 이유는 대기온도에 비해 풍속과 풍향이 주변 지형과 건물 배치 형태와 같은 주변 상태의 영향을 더 강하게 받기 때문인 것으로 생각되며, 300m 공간해상도에 의해 건물의 형태와 배치유형 등에 의한 풍속과 풍향의 순간적인 변화를 정확히 반영하지 못하기 때문에 나타나는 문제점으로 파악된다. 특히 풍속이 빠르게 관측된 강북, 광진, 성북, 성동 등의 관측지점에서 이러한 문제점이 두드러지게 나타났다. 아울러 BIAS와 RMSE 등의 오차 발생은 관측값과 계산값 사이의 관측 높이와 계산 높이 사이의 차이와, 관측지점 주변의 도로 및 건물에 의한 축열 및 인공폐열 등으로 국소적인 영향을 받은 것이 원인일 것으로 판단된다.

또한, 수치모형을 이용한 기상예측의 한계점으로 실제 대기현상이 복잡한 과정을 통해 나타나고 모형을 통해 계산되는 공간해상도상의 문제와 더불어 수치모형 자체가 가지고 있는 계산상의 오차가 발생되기 때문에 모형을 통해 예측된 결과와 실제 기상현상 사이의 차이가 발생하게 되는 경우



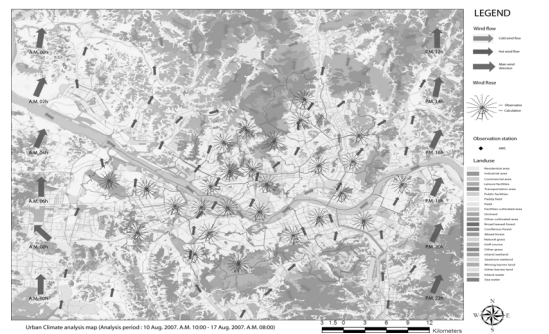
〈그림 12〉 도시기후지도의 주제도 구성

도 있는 것으로 보인다.

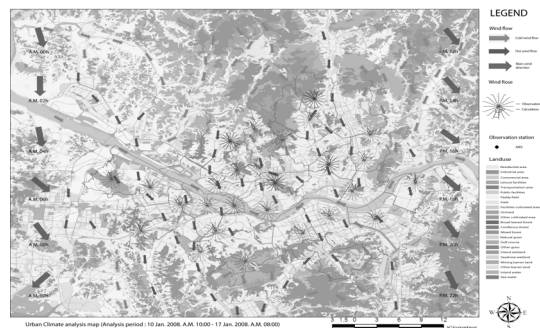
비록 대기온도와 풍속에 대한 WRF모형과 실측값 사이의 오차가 있는 것으로 확인되었으나, 본 연구의 주된 목적이 WRF모형의 정확도에 대한 검증이 아닌, WRF모형의 분석결과를 바탕으로 친환경적 도시계획과 개발을 위한 도시기후지도의 작성이므로 분석결과를 활용하여 도시기후지도를 작성하는 데에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

도시계획과 관리를 위한 기초적인 자료 제공을 위해, WRF 계산결과와 AWS 관측값을 기본으로 하는 여름철과 겨울철의 도시기후지도를 작성하였다. 이 지도에는 토지이용도, 수치표고모형(DEM), 분석기간 중의 오전 8시부터 오후 6시까지의 주간 평균 대기온도, 오후 8시부터 다음날 오전 6시까지의 야간 평균 대기온도와 2시간 간격의 풍속과 풍향 그리고 주야간 평균 풍속 등의 주제도로 구성되어 있다(〈그림 12〉 참조). 풍배도는 WRF 계산 결과와 AWS 관측 자료를 바탕으로 각각의 AWS 관측점 위에 나타내었다. 또한 매 2시간 간격의 주 풍향을 표시하였고, 냉기류와 온

기류의 흐름을 파악하여 바람길을 표시하였다. 〈그림 13〉과 〈그림 14〉는 각각 여름철과 겨울철의 도시기후지도를 보여주고 있다.



〈그림 13〉 여름철 도시기후지도



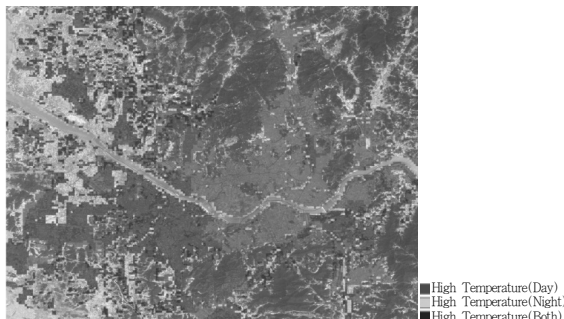
〈그림 14〉 겨울철 도시기후지도

4. 도시계획 및 관리를 위한 지침도 (Advice Map) 작성

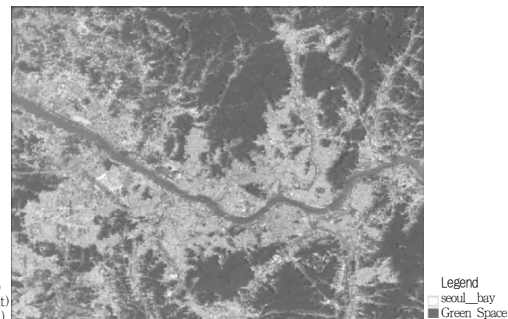
여름철 평균 대기온도 자료를 사용하여 대기온도 개선이 필요한 지역을 도출하였다. 대기온도 개선이 요구되는 지역은 첫 번째로 주간 평균 대기온도가 30℃ 이상인 지역, 두 번째로 야간의 평균 대기온도가 25℃ 이상인 지역, 마지막으로 주간 평균 대기온도가 30℃ 이상이고 야간에도 평균 대기온도가 25℃ 이상인 지역의 3개 등급으로 구분하였다(〈그림 15〉 참조). 서울시 도시생태 현황도의 토지이용도와 현존식생자료를 참고하여 산림, 자연초지, 하천을 포함하는 녹지보호 필요 지역을 도출하였으며(〈그림 16〉 참조), 도심에서 추가적인 녹지확충이 필요한 지역을 파악하기 위해 서울시 도시생태현황도의 현장조사 항목 중 건

폐율 자료를 사용하였다. 녹지확충의 우선순위 파악을 위해 건폐율 65~70% 지역, 70~75% 지역, 75~80% 지역, 80% 이상 지역의 4등급으로 구분하였다(〈그림 17〉 참조). 등급이 높은 지역일수록 추가적인 녹지 확충이 필요한 지역을 의미한다. 건폐율 자료만으로는 녹지확충지역 선정에 대한 부족함이 있을 것으로 생각되므로, 향후 현장조사를 통한 녹지조성 가능 여부 및 토지 소유사항 등의 추가적인 조치가 필요할 것이다.

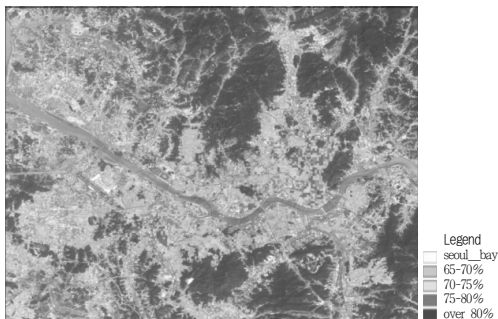
겨울철과 여름철의 평균풍속 자료 및 토지이용도를 사용하여 대기오염물질의 축적 지역을 예상하고 도면으로 나타내었다(〈그림 18〉 참조). WRF 모형에서 계산된 여름철과 겨울철 각각의 풍속 자료를 0~2m/s, 2~3m/s, 3m/s 이상의 3가지 유형으로 분류하고 토지이용도에서 도시 개발 지역을 추출하였다. 그런 후, 도시에서의 기온역



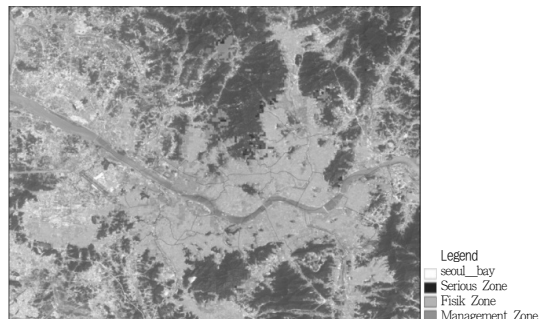
〈그림 15〉 대기온도 개선 요구 지역



〈그림 16〉 녹지 보호 필요 지역



〈그림 17〉 녹지 확충 요구 지역



〈그림 18〉 대기오염물질 축적 예상 지역

전 현상을 고려하기 위해 겨울철에는 주야간 대기 온도 차이가 3.1°C 이상인 지역, 여름철에는 주야간 대기온도 차이가 5.06°C 이상인 지역으로 분류하여 주간과 야간 사이의 대기온도 차이가 큰 지역을 추출하였다. 이렇게 생성된 풍속, 토지이용, 대기온도 자료를 중첩하여 여름철과 겨울철 각각의 대기오염물질 축적 예상지역을 1~3등급으로 나타낸 후, 최종적으로 겨울철과 여름철 결과를 결합하여 대기오염물질의 축적이 심각할 것으로 예상되는 지역, 대기오염물질 축적의 위험성이 있는 지역, 지속적인 관리가 요구되는 지역의 3등급으로 구분하여 대기오염물질 축적 예상지역을 나타냈다.

대기온도 개선 요구지역, 녹지보호 필요지역, 녹지확충 요구지역, 대기오염물질 축적 예상지역의 4가지 유형으로 작성된 도시계획 및 관리를 위한 지침도(Advice map)는 바람의 흐름과 대기오염물질의 분산을 고려한 바람통로와 차갑고 신선한 공기 생성지역을 보호 및 보전하고, 도시지역에서의 도시계획과 토지개발을 위한 녹지확충 및 지형변화의 방향에 대한 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 결론

본 연구는 중규모 기상예측 모형인 WRF와 AWS 실측 자료를 이용하여 도시지역에서의 바람장 및 대기온도의 분석을 통해 도시기후지도를 작성하고 도시계획과 개발 단계에서 보다 쾌적한 도시환경 조성을 위한 기초 자료를 제공하고자 하는 목적으로 실시되었다.

WRF 계산 결과와 AWS 실측 사이의 상관관계를 살펴본 결과 대기온도의 경우 여름철과 겨울

철 모두 비교적 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났다. 바람장의 경우에는 겨울철의 상관관계가 약한 것으로 나타났다. 비록 풍속에 대한 WRF 모형과 실측값 사이의 상관관계가 약한 것으로 확인되었으나, 본 연구의 주된 목적이 WRF 모형의 정확도 검증이 아닌, WRF 모형의 분석결과와 실측값을 이용하여 친환경적 도시계획과 개발을 위한 도시기후지도의 작성이므로 계산결과를 활용하는 데에는 별다른 무리가 없을 것으로 판단된다.

중규모 지역을 대상으로 한 도시기후지도의 제작에 WRF 계산결과와 AWS 관측자료의 활용이 가능할 것으로 판단되며, 특히 AWS 관측지점이 밀집되어 있지 않은 지역에서 그 활용 가능성이 높을 것으로 판단된다. 또한, 각각의 여름철과 겨울철 도시기후지도와 4가지 유형의 도시계획 및 관리를 위한 지침도는 바람의 흐름과 대기오염물질의 분산을 고려한 바람통로 파악과 도시지역에서의 도시계획과 토지개발을 위한 녹지 확충 및 지형변화의 방향에 대한 참고자료로 활용가능성이 있을 것으로 판단된다.

본 연구결과의 활용분야를 정리하면 다음과 같다.

1. 도시환경관리 시스템 구축

도시기후지도의 제작을 통해 향후 도시계획 과정의 조건으로 도시계획 시 바람환경의 영향평가, 바람환경영향평가에 의한 부정적인 영향 제어, 도시 미기후 요인별 분석, 차가운 공기 생성지역 및 바람길 파악, 녹지 네트워크 조성을 통한 도시열섬 및 대기오염 정화효과 분석 등의 사전작업이 가능하게 되며, 독일 베를린시의 환경주제도(Environ-

mental Atlas) 등과 같은 도시내부의 생태환경 영향요인을 종합적으로 분석할 수 있는 도시환경관리 시스템의 구축에 활용될 수 있다.

2. 기상특성을 고려한 도시계획지침 정비

바람길의 조성과 더불어 바람의 정체구간을 해소하고 녹지네트워크의 구축, 바람길을 고려한 건축물의 배치 등과 같은 도시기후를 보전하고 쾌적한 도시공간을 창출하기 위한 도시계획의 방향 설정 및 그에 따른 지침 마련에 활용될 수 있다.

3. 사전 환경성 검토 및 환경영향평가

도시계획 및 도시 개발 시 실시되는 사전 환경성 검토의 평가항목으로 바람길 확보, 녹지 보존 및 확충, 대기온도 개선 등의 항목을 추가하여 도시 계획 및 개발에 따른 대기온도 및 표면온도 상승과 녹지 단절 및 잠식에 따른 생태적인 위험분석을 통해 사전 환경성 검토의 논리적인 근거를 제공하는 데 활용이 가능하다. 또한, 환경영향평가 시 대기질 적용항목에 바람길 평가항목을 추가함으로써 도시 내 대기오염물질의 축적을 방지하고 정확한 대기환경영향평가가 이루어질 수 있도록 환경영향평가에의 적용이 가능하다.

4. 환경기본계획과 자연환경보전

본 연구의 결과로 제시된 도시기후지도는 도시지역에서의 차가운 공기 생성지역 및 바람길 파악, 녹지 네트워크 조성을 통한 도시열섬 및 대기오염 정화효과의 역할을 할 수 있는 산림과 녹지의 위치를 파악하고, 이를 환경기본정책에 반영하여 보존산림 지정 및 녹지확충 지점 설정과 같은

환경기본계획 수립 및 자연환경보전계획 수립 등에 활용이 가능하다. 또한, 이러한 바람통로를 보호 및 보전할 수 있는 지역 및 지구를 지정하고, 현재 단절되어 있는 녹지축 연결을 위한 산림 및 녹지의 관리이용 및 도시지역에서의 도시계획과 토지개발을 위한 녹지 조성 및 개발 시 발생하는 지형변화의 가이드라인 제시를 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것이다.

향후, WRF 모형의 활용성을 파악하기 위해 AWS 기상관측장비가 밀집되어 있지 않은 중규모 지역을 대상으로 하는 추가적인 연구가 필요할 것이다. WRF 모형의 정확도 향상을 위해 도시공간의 특성을 고려한 도시 캐노피 모형(Urban Canopy Model: UCM)의 적용, 인공위성 영상과 열적외선 항공사진을 이용하여 주야간의 지표면 온도 파악, 상관관계 분석을 통한 지표면온도의 개선에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 도시개발 사례대상지에서의 바람길 분석을 통해 도시계획 및 개발 방향을 설정하여 고밀도로 개발된 도시지역에서 초고층 건물군에 의한 바람이동의 변화를 분석하고, 차갑고 신선한 공기가 유입되는 지형적 특징을 가진 지역에 대규모 개발이 이루어질 경우 바람효율 변화에 대한 영향을 예측하여 바람길을 고려한 도시계획 및 개발의 방향을 제시하는 후속 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 구운서, 2004, 「신행정수도건설을 위한 친환경 바람길 해석 및 전략적 도시설계방안 연구」, 대한주택공사.

- 김동호·육인수·송두삼·김재민, 2006, “주택 단지 설계시 바람길 예측에 관한 CFD 활용 기법 연구”, 『대한건축학회 학술발표대회 논문집』, 665~668.
- 김상진·Murakami, S., 서승직, 2001, “CFD를 이용한 도시기후의 수치해석”, 『한국풍공학회 학술대회 논문집』, 211~217.
- 김운수·김학열, 2000, 『서울시 기상특성을 고려한 도시계획기법연구 (I)』, 서울시정개발연구원.
- _____, 2001, 『서울시 기상특성을 고려한 도시계획기법연구 (II)』, 서울시정개발연구원.
- 서울시, 2006, 『서울시 기후지도 제작 1차년도 보고서』.
- _____, 2007, 『서울시 기후지도 제작 2차년도 보고서』.
- 송영배, 2002a, “도시기후지도의 작성 : 상계 4동을 중심으로”, 『한국조경학회지』, 29(6): 27~36.
- _____, 2002b, “신도시 개발이 도시열섬 형성에 미치는 영향 : 분당신도시와 판교지역을 중심으로”, 『한국조경학회지』, 30(4): 37~46.
- 엄정희·우정현·양병이, 2001, “바람통로를 활용한 도시녹지계획에 관한 연구 : 용인시를 대상으로”, 『국토계획』, 36(1): 231~241.
- 조경두·박민하, 2003, 『바람통로를 고려한 대기환경개선 및 계획부분 활용방안』, 인천발전연구원.
- 주현수·김석철·반지영·최순심, 2006, 『도시지역에서의 바람길과 대기질 영향에 관한 연구』, 한국환경정책평가연구원.
- 東京都, 2008a, 『東京都環境基本計画』.
- _____, 2008b, 『東京都 熱環境 対策 ガイドライン』.
- 名古屋市, 2004, 『名古屋ヒートアイランド対策への提言』.
- 日本建築學會, 2000, 『都市環境のクリマアトラス-氣候情報を活かした都市づくり』.
- _____, 2008, “都市環境クリマアトラスの標準化に向けて I”, 『公開講演會 資料集』.
- 日本國土交通省, 2005, 『ヒートアイランド現象の緩和に資する緑地等の配置に関する検討, 調査』.
- 日本環境省, 2000, 『ヒートアイランド対策の推進のために』.
- _____, 2004, 『日本環境白書』.
- 田中貴宏·森山正和·山下卓洋, 2007, “都市環境氣候図を利用した多主体参加型まちづくりワークショップに関する研究-神戸市長田區駒ヶ林地區におけるワークショップの實踐-”, 『日本建築學會環境系論文集』, 611: 91~98.
- 清田忠志·谷口明·清田誠良·中村安弘, 2006, “都市域におけるヒートアイランド現想の緩和對策に関する研究-その1 廣島市の都市域における海陸風および風の時間帶での氣溫の特性”, 『日本建築學會環境系論文集』, 602: 69~75.
- 環境情報科學センタ, 2004, 『環境氣候學 - 都市・綠地計劃のための氣候環境地圖』.
- ドイツ工業協會, 2004, 『環境氣象學 - 都市・地域計劃のための氣候環境地圖』.
- Barlag, A. B. and Kuttler, W., 1991, “The Significance of Country Breezes for Urban Planning”, *Energy and Building*, 15(16): 291~297.
- Evans, J. M. and Schiller, S., 1991, “Climate and Urban Planning: the Example of the Planning Code for Vicente Lopez, Buenos Aires”, *Energy and Building*, 15: 35~41.
- Heo, K. Y., Lee, J. W., Ha, K. J., Jun, K. C., Park, K. S., and Kwon, J. I., 2009, “Simulation of atmospheric states for a storm surge on the west coast of Korea: model comparison between MM5, WRF and COMMPS”, *Natural Hazards*, 51: 151~162.
- Lazar, R. and Podesser, A., 1999, “An Urban Climate Analysis of Graz and Its Significance for Urban Planning in the Tributary Valleys east of Graz(Austria)”, *Atmospheric Environment*, 33(24): 4195~4209.
- Matzarakis, A., 2005, “Country Report Urban Climate Research in Germany”, *IAUC Newsletter*, 11: 4~6.
- Reiss-Schmidt, H., 1987, *Klima und Lufthygiene als Planungsfaktoren*, Essen: Kommunalverband Ruhrgebiet.
- Rosefeld, A. H., Akbari, H., Romm, J. J., and Pomerantz, M., 1998, “Cool Communities: Strategies for Heat Islands Mitigation and Smog Reduction”, *Energy*

- and Building*, 28(1): 51~62.
- Schirmer, H., Kuttler, W., Löbel, J., and Weber, K., 1993, *Lufthygiene und Klima. Ein Handbuch zur Stadtund Regional planung. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN (Hrsg.)*, Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Steven, R. H., Reen, B., Hendrick, E., Santos, L., Stauffer, D., Deng, A., McQueen, J., Tsidulko, M., Janjic, Z., Jovic, D., and Ian Sykes, R., 2010, "Comparison of Observed, MM5 and WRF-NMM Model-Simulated, and HPAC-Assumed Boundary-Layer Meteorological Variables for 3Days During the IHOP Field Experiment", *Boundary-Layer Model*, 134: 285~306.

원 고 접 수 일 : 2010년 11월 19일
1차심사완료일 : 2010년 12월 13일
2차심사완료일 : 2011년 2월 16일
최종원고채택일 : 2011년 2월 28일