환경영향평가 제19권 제1호(2010) pp.15~28

연구논문

도시개발에 따른 대기환경 변화가 건강에 미치는 영향연구

김재철 · 이종범 · 천태훈 · 장윤정
강원대학교 환경과학과
(2009년 8월 24일 접수, 2009년 12월 17일 승인)

A Study about the Impact of Atmospheric Environmental Changes by Urban Development on Human Health

Jea-Chul Kim · Chong Bum Lee · Tae Hun Cheon · Yun Jung Jang
Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
(Manuscript received 24 August 2009; accepted 17 December 2009)

Abstract

Because deterioration of air quality and urban heat island directly harm health of citizens, Health Impact Assessment (HIA) and Environmental Impact Assessment (EIA) for urban development projects needs to conduct analysis of their impacts objectively. This study aims to review appropriate methods for assessment of air quality used at each stage of urban development and to investigate prediction and assessment methods of urban heat island. In addition, by evaluating impacts of climate change following supposed urban construction performed in the central area of Korea on public health, it examines usefulness of HIA for urban construction.

When urban heat island prediction and HIA method suggested in this study are applied to an imaginary city, they predict urban heat island properly and the impacts of climate changes on public health inside the city could be determined clearly by calculating life-climate index and bio-climate index related with thermal environment from the model.

Keywords : urban heat island, HIA, EIA

Corresponding Author: Chong Bum Lee, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea
Tel: +82-33-250-8571 E-mail: cbl@kangwon.ac.kr

I. 서 론

도시개발 사업은 많은 인구 집중을 유발하며 그에 따른 교통과 에너지 수요 증가 등 대기질을 악화시킬 요인이 많다. 또한 대규모적인 지표면 변형에 따른 일사량 흡수율 변화 등 지표면 열수지의 변화와 에너지 사용에 따른 인공열 발생은 도시내부의 기온을 상승시키는 이른바 도시열섬(Urban Heat Island)현상을 초래하게 된다(Landsberg, 1981). 이와 같은 대기질 악화와 도시열섬현상은 시민의 건강에 직접적으로 위해를 주게 되므로 도시개발 사업에 따른 환경영향과 건강영향을 객관적이고 정량적으로 평가할 필요가 있다. 도시개발은 여러 계획단계를 거쳐서 이루어지므로 계획단계 초기부터 도시개발에 따른 환경영향과 건강영향을 예측하고 평가하여 환경과 도시민 건강에 쾌적한 도시를 개발할 수 있도록 진행하는 것이 바람직하다. 도시 대기질에 관한 선행연구로서 장래 배출량증감을 예측하여 산출하는 모델과 장래 대기오염농도 예측을 위한 확산모델 등 영향평가 기법이 많이 개발되어 있다(마창민 등, 1999). 그러나 도시의 열환경이라고 할 수 있는 도시열섬현상의 예측기법과 건강에 미치는 영향 등은 비교적 연구방법이 미흡한 편이다. 2001년 12월 WHO(World Health Organization)와 국제영향평가학회가 상호협력을 목적으로 한 양해각서에는 모든 정책 · 계획 · 프로그램 · 프로젝트 수준에서 인간의 건강을 포함한 영향평가가 실시되어야 하고 인간의 건강을 보호 및 증진시키기 위한 권고사항이 건강영향평가서에 포함되어야 함을 강조하고 있다(WHO, 2001). 이에 건강과 환경의 연계방안으로서 환경건강영향평가방법과 함께 EIA (Environmental Impact Assessment)와 SEA (Strategic Environmental Assessment)에 내재화시켜 보다 효과적인 환경건강영향평가를 도입하는 것이 바람직하다.

인체가 일정한 심부온도를 유지하기 위해서는 체내 열 생산이나 방출이 적당한 균형을 이루어야 한다. 고열이나 저온으로 인해 열 스트레스(thermal stress)가 증가하면, 주어진 스트레스에 효과적으로 반응하기 위하여 체온을 조절하는 심장혈관계에 대한 요구가 많아진다. 심한 열 스트레스에 오래 동안 노출되면 병에 걸리거나 사망할 수 있다. 특히 외부 열의 스트레스에 적응하는 능력이 약한 어린 아이나 노인, 호흡기나 심장 질환을 가진 사람은 쉽게 영향을 받을 수 있다(한국정책평가 연구원, 2007).

우리나라에서는 기상연구소에서 생명기상기술개발연구(기상연구소, 2005)라는 프로젝트로 생명기상모델을 이용하여 기온이 인체에 미치는 영향에 관한 연구를 수행한 바 있다. 생명기상모델은 독일 기상청에서 개발하여 현재 사용하고 있으며 우리나라 기상청(기상연구소, 2005)에서 독일과의 협력사업으로 도입한 모델로서 핵심부분은 인간의 열 스트레스 지수인 지각온도(Perceived Temperature, PT)를 계산하는 Klima-Michel 모델이며 이를 이용하여 열 스트레스 빈도를 산출할 수 있다. 생명기상모델은 대기환경과 인체의 복잡한 열 교환(heat exchange)을 수치적으로 계산될 수 있도록 고안된 모델이다.

본 연구의 목적은 도시개발에 따른 적절한 대기질 평가 방법을 검토하고 도시열섬 예측과 건강평가 방법에 대해 연구하는 것이다. 또한 이 방법을 적용하여 우리나라 중부지방에 가상적인 도시를 건설하여 도시건설에 따른 기상변화와 건강에 미치는 영향을 산출함으로서 도시건설에 따른 건강영향평가방법의 유용성을 확인할 것이다. 그리고 실제 적용 시 해결해야할 문제점을 검토하여 해결방안을 제안하고자 한다.

II. 연구방법

1. 대상지역 및 기간

대상영역은 아래와 같이(그림 1) 나누어 Lambert-conformal 격자투영법을 써서 나타냈으며, 그 중심은 한반도 북위 38°, 동경 126°로서 중국, 일본을 포함하는 30km(162×120)격자를 설정하였다. 고해상도 모델실행을 위해 nesting 기법을 이용하여 10km, 3.3km를 설정하였고, 최종 1.1km 격자의

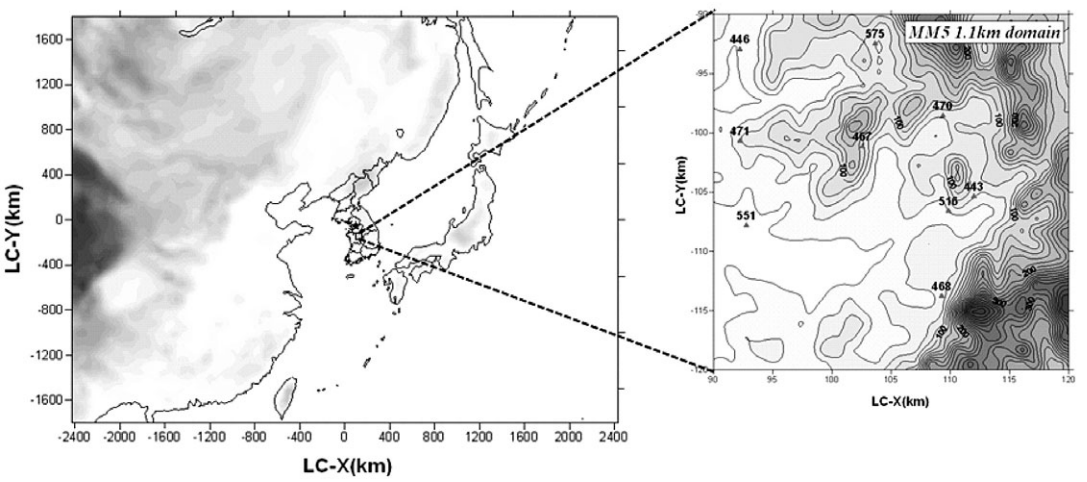


Fig. 1. Modeling domain of MM5. Solid triangle denote Automatic Weather Stations operated by the Korea Meteorological Administration (KMA)

영역을 설정하여 모사하였다.

대상 기간의 경우 2008년 1년 중 heat stress 산출을 위해 가장 무더운 8월 한 달과 cold stress 산출을 위해 가장 추운 1월을 선택하였다. 기상 모델(Meteorological Mesoscale Model Version 5, MM5)의 초기 및 경계 입력자료는 3시간 단위로 생성된 기상청의 30km 격자의 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)자료를 기본 입력자료로 사용하였다. 연직층의 경우 기상청에서 제공받은 RDAPS 33층 연직 격자층 결과를 지표로부터 2층을 추가한 35층으로 세분화하여 지표부근의 난류 확산을 보다 세밀히 모사하도록 하였다. 또한 고해상도 수치모의를 위해 동아시아 지역의 상층기상자료를 이용하여 자료동화(Four Dimensional Data Assimilation, FDDA)를 실행하였으며 이때 지형자료와 토지이용도는 각각 미국 나사(NASA)에서 조사한 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)자료와 환경부 대분류 자료를 이용하여 지형 특성을 고려하였다. 또, 경계조건 등으로 인한 수치모델링의 계산 오차를 줄이기 위해 광역규모 영역의 계산부터 시작하여 Nesting방법을 이용하여 평가하고자 하는 대상지역에 대하여 세밀한 격자의 기상장을 산출하였다(이종범 등, 2006). 또한 우리나라 중부지역 가상도시의 중앙 격자에서 기상모델을 실행하여 기상모델결과와 무인기상관측소(Automatic Weather Station; AWS)의 실측자료를 비교 · 평가하여 도시가 생성되기 전과 후의 지표 특성이 기상에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 기상모델의 적용 및 실행

도시 건설에 따른 건강영향을 평가하기 위해 소규모 도시에서 일어나는 국지 기상 및 기후변화를 모사할 수 있도록 기상모델의 해상도는 격자크기 1km 또는 그 이하의 높은 해상도가 요구된다.

CFD(Computational Fluid Dynamics) 모델과 같은 도시 구조물 내부의 바람장을 생성하는 모델은 해상도가 충분히 섬세하지만 도시의 열적인 환경을 모사하지 못하므로 도시열섬을 대상으로 모델링하기는 부적합하다. 반면, 해상도가 다소 불리하더라도 3차원 기상모델의 경우 비정상상태의 기상과 비정수(non-hydrostatic)방정식계를 사용하며, 질량, 운동량, 스칼라량을 보존하기 때문에 열(thermal)계산에 보다 유리한 장점이 있다(송은영, 2007). 따라서 실제기상 모사와 대상지역의 적절한 적용을 판단하기에는 3차원 기상모델이 적절하다. 대표적인 3차원 기상모델은 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration,

NOAA)에서 개발한 MM5(The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model)와 WRF(Weather Research and Forecasting), 그리고 RAMS(Regional Atmospheric Meteorological System) 등이 있다. 이중 MM5는 현재 우리나라 기상청에서 수치예보모델(30km 및 5km 해상도)로 활용되며 그 안정성이 입증되었다. 따라서 본연구에서는 3차원기상모델로서 MM5를 사용하였다. MM5 중규모기상모델은 시그마 좌표계로 쓰인 비정수 방정식계를 사용하며, Arakawa B격자망으로 구성되어 있다. 공간적으로는 2차 중앙차분을 적용하고 있으며, 기상분석과 관측자료의 4차원자료동화가 가능하며, 다중격자방법의 둥지격자를 사용할 수 있다(김재철, 2006).

본 연구에 사용된 기상모델의 격자정보와 물리적 매개변수는 표 1에 나타내었다. 또한 도시개발 전·후의 기상모델 결과를 비교하기 위하여 각각의 CASE를 설정하였다(그림 2). CASE A는 현재를 나타내며, CASE B는 도시가 개발된 가상도시를 설정하였고, 모델 도메인 중심의 3×3 격자의 토지이용도를 도시로 변경한 후 도시개발에 따라 미래 기상인자의 변화를 모사하였다. 도시 건설 전후의 비교지점은 중심의 9개 도시격자 중에서 중앙격자(2,2)의 값을 사용하였다.

Table 1. The Grid system and Physical options of MM5 model

	Configurations for MM5	
Horizontal resolution	30km(162×120)	1.1km(27×27)
Vertical layers	35/50hpa	35/50hpa
Time steps	60sec	30sec
Forecast times	24hr	24hr
Initialization	FDDA (1hr)	
Explicit scheme	mixed-phase (Reisner)	
Cumulus scheme	Grell	
PBL scheme	MRF (Hong and Pan, 1996)	
Radiation scheme	RRTM Radiation	
Soil scheme	5-layer Soil	

3. 생활기상지수 산출

기상청에서 제공하고 있는 생활기상지수 산출식(http://www.kma.go.kr/aaw2008/aaw_01_04.jsp)에 기상모델에서 모사한 도시개발 전·후의 MM5 모사 결과로 불쾌지수, 체감온도지수, 열지수, 열대야 등을 산출하여 도시효과에 따른 생활지수 변화를 파악했다.

4. 생명기상모델

1) 개요

생명기상모델은 그림 3에서 나타낸 것과 같이 인간은 주변 환경과의 상호작용에 의한 열 스트레스

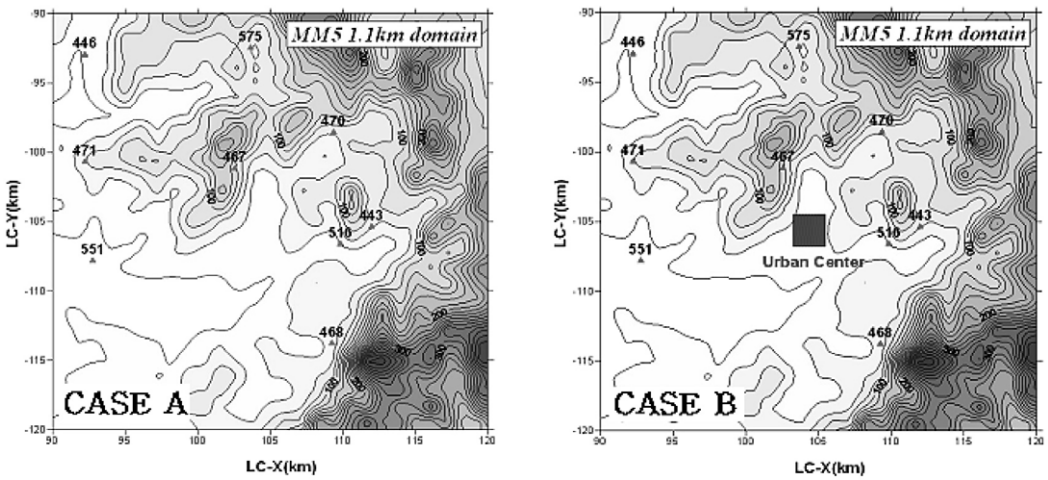
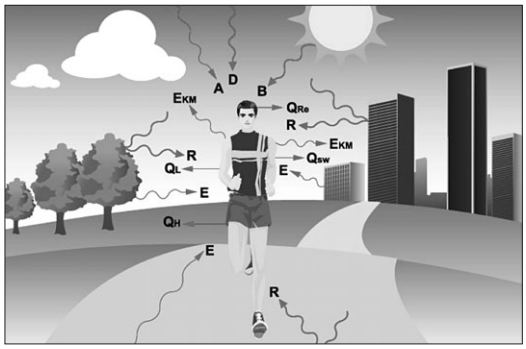


Fig. 2. Intercomparison of the modeling domain (1.1km) between CASE_A (before urban development) and CASE_B(after urban development). Blue box(■) is urban area in center of CASE_B



M Total energy turnover
$\mathbf{Q_H}$ convection flow of perceivable warmth
$\mathbf{Q_{sw}}$ convection flow fo latent heat (sweat evaporation)
QI convection flow of leatent heat through water vapor diffusion
$\mathbf{Q_{Re}}$ Heat flow of the breath (perceivable and latent)
B direct insolation (solar radiation)
D diffuse insolation (solar radiation)
R reflected radiation-shortwave
A heat radiation of the atmosphere
E heat radiation of surrounding surface
$\mathbf{E_{KM}}$ heat radiation of humans

Fig. 3. Thermal influences on human body and Factors of thermal effects complex

를 포함한다(김정식 등, 2006).

인간의 열 스트레스 영향은 결코 하나의 기상요소에 의한 것이 아니라 많은 개개 요소들이 결합하여 유기적으로 작용한다. 인간은 주변 환경과 독립적으로 어떤 범위 내에서 인체의 온도를 유지할 수 있는 능력이 있다. 이것은 인체의 자율적인 물리 · 화학적 순환 메커니즘에 의해서 가능하다. 이런 시스템은 인체와 환경조건 사이에 열 손실과 발생의 균형을 유지한다(Fanger, 1972).

2) 크리마-미첼(Klima-Michel) 모델

독일에서는 모든 분야에 적용이 가능하고 열 생리적인 환경을 잘 표현하는 열수지 모델(heat budget model)로서 Klima-Michel model (KMM)을 개발하였다. 이 모델은 열의 스트레스를 표현하는 주요 지수로서 PT를 제시하였다. PT란 실제 조건에서의 열 스트레스(heat stress)와 한기 스트레스(cold stress)를 느끼는 기본 환경에서의 기온이며(Staiger *et al.*, 1997) 단위는 ℃이다. 느끼는 열과 추위는 Fanger(1970)의 comfort식에 의해서 계산되는데 인체의 열 생리적 상태를 새로운 지수 형태인 예측평균지수(Predicted Mean Vote : PMV)로 제시하였으며 이것은 인체 열수지 모델의 기초가 된다(김정식 등, 2006). 본 연구에서는 KMM 모델을 이용하여 기상모델에서 구해진 시간별 기온, 풍속, 습도, 일사량, 장파복사, 지표면온도 등의 자료로 PMV와 PT를 산출하였다. 또한 cold stress와 heat stress의 발생빈도와 강도를 파악하여 허용기준치와 비교 · 검토 하였다.

III. 연구결과

1. 현재기상 평가

1) 현재의 기상모사 및 평가

우리나라 중부지역에 설계한 가상지역의 1.1km 격자크기의 기상모델(MM5) 결과(CASE A)를 대상기간동안 측정된 안성(ID:516) AWS지점의 실제측정 값(온도, 풍향, 풍속)과 비교하였다. 겨울철(1월) 온도의 경우 실측의 일주기 패턴을 모델결과가 유사한 패턴으로 모사하고 있다. 풍속의 경우모델결과가 실측에 비하여 과대평가 하고 있지만 풍속역시 유사한 일주기 패턴을 보였다. 풍향의 경우 실제 서풍계열의 바람이 불었지만 모델 결과는 북풍내지 북동풍계열의 바람을 모사하였다(그림 4).

여름철(8월) 온도의 경우 겨울에 비하여 작은 일교차를 보이고 있다. 겨울철 일변화의 경우 약 15℃ 정도를 보이고 있으나, 여름의 경우 약 10℃ 정도 차이를 보인다. 또한 일최고 온도의 경우 유사한 결과로 실측을 모델이 모사하고 있지만 일최저 기온의 경우 모델이 과대평가되고 있다. 풍속의 경우 겨울과 마찬가지로 모델 농도가 실측결과에 과대평가하고 있고, 풍향은 실제 대상기간동안 남서풍 내지 동풍의 풍향을 기상모델 역시 유사한 패턴으로 모사하였다(그림 5).

2) 통계분석

겨울(1월)과 여름기간(8월) 동안의 기상모델 검증을 통하여 기상대 2 지점(안성:516, 평택:551)의 실

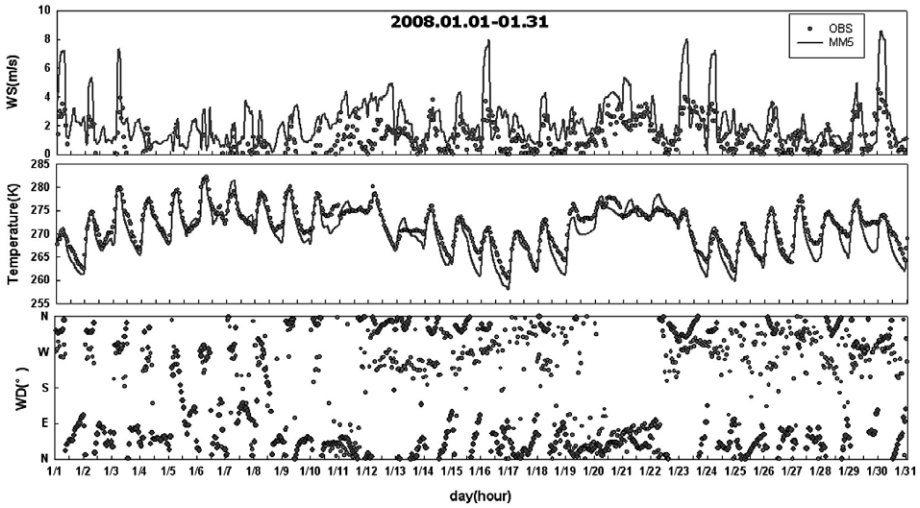


Fig. 4. Comparisons of temperature, Wind speed and Wind direction observed in Ansung AWS and calculated (CASE A) by MM5 for 1~31. Jan. 2008

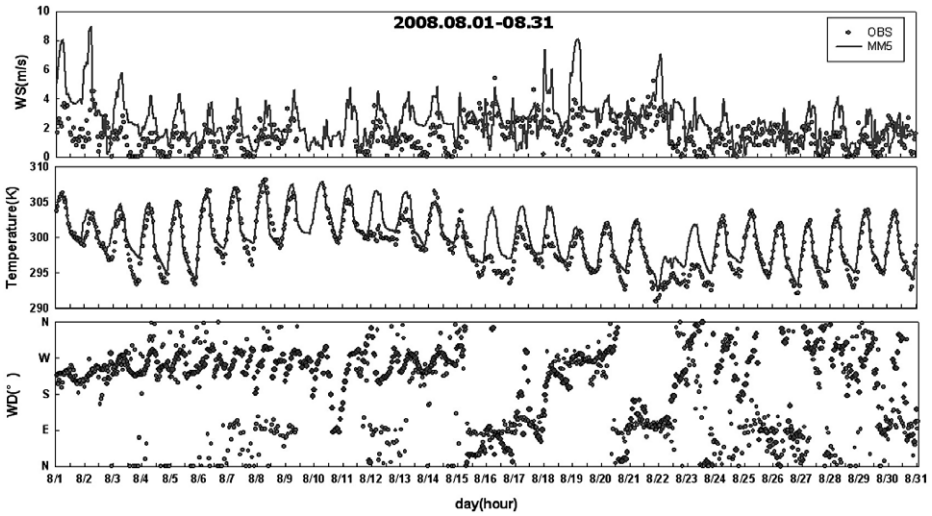


Fig. 5. Comparisons of temperature, Wind speed and Wind direction observed in Ansung AWS and calculated (CASE A) by MM5 for 1~31. Aug. 2008

측과 모델결과를 대상기간 동안 통계분석 하였다. 통계분석의 경우 표 2에 제시한 6가지 통계 방법을 사용하여 모델을 평가하였다(이종범 등, 2007).

온도의 경우 겨울과 여름 모두 0.89이상의 높은 상관관계를 보이고 있고, RMSE 오차의 경우 상관값이 높은 겨울 기간이 여름 기간보다 큰 오차 값을 나타내고 있다. 편차의 경우 겨울 기간의 온도를 제외한 모든 성분의 모델 결과가 실측을 과대평가하고 있다. 풍속의 경우 상관값의 결과는 반대로 겨울 기간의 상관도가 높게 계산되었고, 오차역시 적게 나타나며, 여름기간에 비하여 실측에 유사한 결과를 보였다(표 3).

Table 2. The statistical treatment methods for the comparison of data

Correlation coefficient	$r = \frac{\overline{(c_o - \overline{c_o})(c_p - \overline{c_p})}}{\sigma_{c_o}\sigma_{c_p}}$
Root Mean Square Error (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C_p - C_O)^2}$ $RMSEs = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C^* - C_O)^2}$ $\quad RMSEu = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{1}^{N}(C^* - C_p)^2}$ $C^* = a + bC_o$
Fractional Bias (FB)	$FB = \frac{\overline{C_p} - \overline{C_o}}{0.5(\overline{C_p} + \overline{C_o})}$
Mean Bias (MB)	$MB = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(C_p - C_O)$

Cp: predicted concentration, Co: observed concentration

Table 3. Statistical performance for meteorological parameters

parameter	January		August	
	Temp.(K)	WS(m/s)	Temp.(K)	WS(m/s)
r	0.93	0.62	0.89	0.38
RMSE	2.13	1.67	1.48	1.75
MB	1.06	-1.07	-1.11	-0.98
FB	0.004	-0.59	-0.004	-0.48
RMSEs	1.48	1.47	1.11	1.51
RMSEu	1.52	0.79	1.64	0.88
n	697	569	697	569

2. 도시건설 후 기상변화

1) 시계열 분석

도시건설 후의 기상변화를 파악하기 위하여 겨울(1월)기간 동안의 온도를 도시개발 전 · 후로 구분하여 실측값(안성:516)과 비교하였다(그림 6). 대상기간동안 온도의 경우 CASE_A, CASE_B 모두 실측결과와 유사한 일주기 패턴을 나타내고 있다. 각각의 모델결과 차이(CASE_B - CASE_A)를 보았을 때 도시건설 후의 낮 동안의 기온은 높아졌으나, 일몰 후 도시생성 전의 결과보다 낮아지는 결과를 보이고 있다. 반면 실제 일교차가 크게 나타났던 날의 경우 CASE_B의 결과 역시 CASE_A에 비하여 큰 일교차를 보이고 있으며, 실제 일교차가 작게 나타난 날의 경우 도시건설 후 야간 일교차가 줄어들어 실제 일교차가 작아지는 결과를 모사하였다.

풍속의 경우 CASE_A 결과가 실제 측정값을 과대평가하고 있고, CASE_B 결과 일최대 풍속이 CASE_A에 비하여 낮아진 결과를 보였다(그림 7). 그림 8은 여름(8월)기간 동안의 온도를 도시개발 전 · 후로 구분하여 실측값과 비교하였다. 대상기간 동안의 일주기패턴은 CASE_A, CASE_B 모두 실측결과와 유사한 결과를 나타내고 있고, CASE_B의 경우 도시가 생성된 후 낮 최고 기온이 CASE_A보다 약 2.5℃높아진 결과를 보이고 있다. 모델결과의 차이(CASE_B - CASE_A)를 보았을 때 도시건설 후의 결과가 주간과 야간 모두 높아진 결과를 보이고 있다. 풍속의 경우 측정결과에 비하여 각각의 모델결과가 모두 과대평가되고 있다. 특히 바람이 강하게 측정되었던 대상일의 모델 결과 역시 높은 풍속 결과를 모사하였다.

또한 도시건설 전 · 후 풍속의 모델결과차이(CASE_B - CASE_A)를 비교한 결과 실측 풍속을 과대평가하였던 대상일의 경우 도시건설 후 바람이 약하게 계산되며 오히려 실측에 유사한 결과를 나타냈다. 한편 실측 풍속이 낮은 대상일의 경우 도시건설 전 · 후 모델 결과 역시 차이를 보이고 있지만 약한 풍속의 결과는 강한 풍속의 결과와 반대로 도시건전 후의 결과가 도시건설 전의 결과보다 높게 나타나고 있다(그림 9).

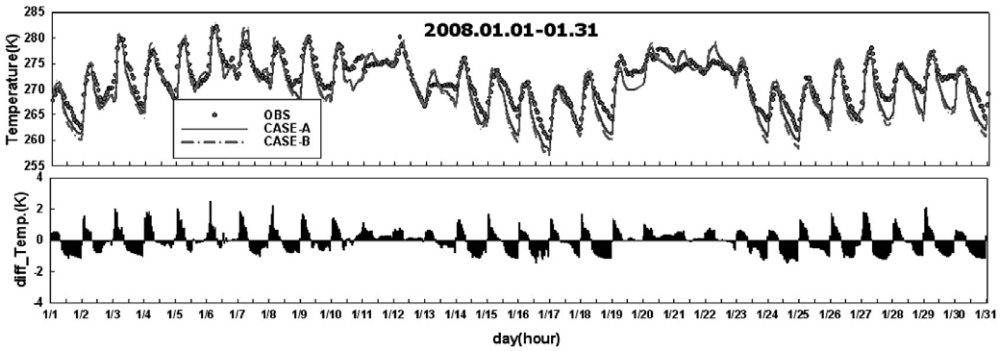


Fig. 6. Comparisons of temperature observed in Ansung AWS and calculated by MM5 for 1~31. Jan. 2008

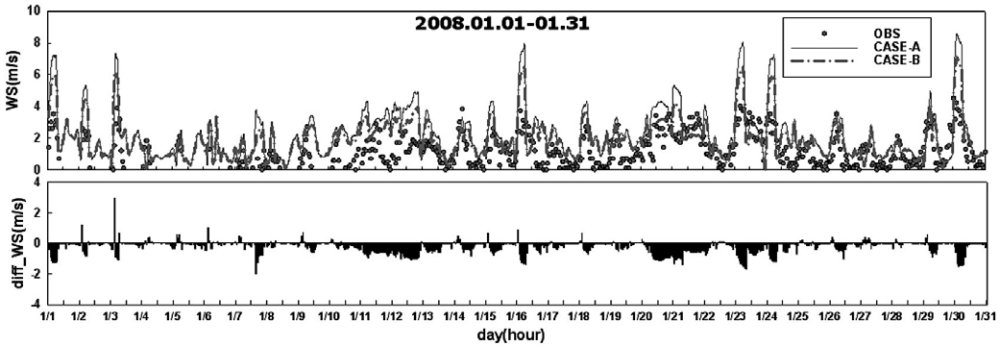


Fig. 7. Comparisons of WS observed in Ansung AWS and calculated by MM5 for 1~31. Jan. 2008

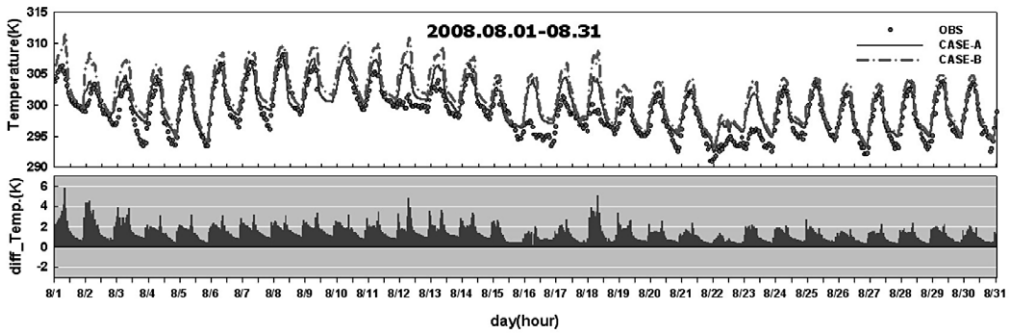


Fig. 8. Comparisons of temperature observed in Ansung AWS and calculated by MM5 for 1~31. Aug. 2008

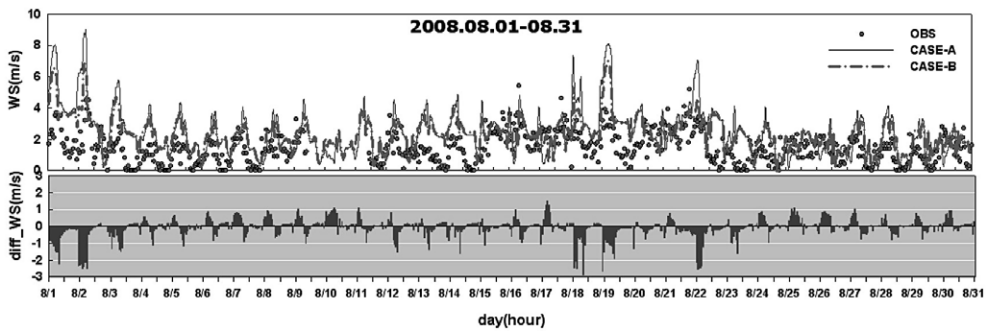


Fig. 9. Comparisons of WS observed in Ansung AWS and calculated by MM5 for 1~31. Aug. 2008

2) 수평분포 비교

도시 생성 전 · 후의 기온변화를 비교하기 위하여 대상지역의 지표온도의 수평분포를 각각 비교하였다. 겨울기간(1월)의 경우 강한 풍속과 함께 일교차가 크게 나타났던 1월 18일의 06UTC(15LST)와 18UTC(03LST)의 도시건설 전 · 후 모델 결과를 각각 비교하였다.

온도의 경우 CASE_B의 지표온도 분포에서 CASE_A의 지표온도 분포차이를 나타내어 도시가 생성된 후 주간과 야간의 온도변화를 나타내었다. 그 결과 도시가 생성된 모델 격자를 중심으로 여름기간과는 반대로 주간의 온도변화 폭보다 야간의 온도변화 폭이 약 3배 정도 큰 차이를 보였다.

여름기간(8월)에 대하여 비교적 풍속이 약하게 불고 일교차가 크게 나타났던 8월 7일의 06UTC(15LST)와 18UTC(03LST)의 도시건설 전 · 후 모델 결과를 각각 비교하였다. 그 결과 주간(06UTC)의 온도변화가 야간(18UTC)의 온도차이보다 큰 폭으로 바뀐 결과를 보였다. 이것은 도시가 생성되며 낮 동안의 온도 상승폭이 더 커졌기 때문으로 사료된다(그림 10).

바람장의 경우 1월 주 · 야간 모두 강한 풍속에 의해 큰 차이를 보이지 않고 일정한 방향으로 불었고, 8월의 바람장 변화는 크지 않았다. 하지만 주간(06UTC)에는 도시건설 전 강하게 불던 바람이 도시건설 후 약해지는 결과를 보였다(그림생략).

도시건설 전 · 후의 혼합층 고도를 비교하기 위하여 대상기간 중 겨울(1월 17일)과 여름(8월 7일)의 15시의 고도분포를 각각 비교하였다(그림 11). 겨울의 경우 여름에 비하여 낮은 혼합층 고도를 보이고

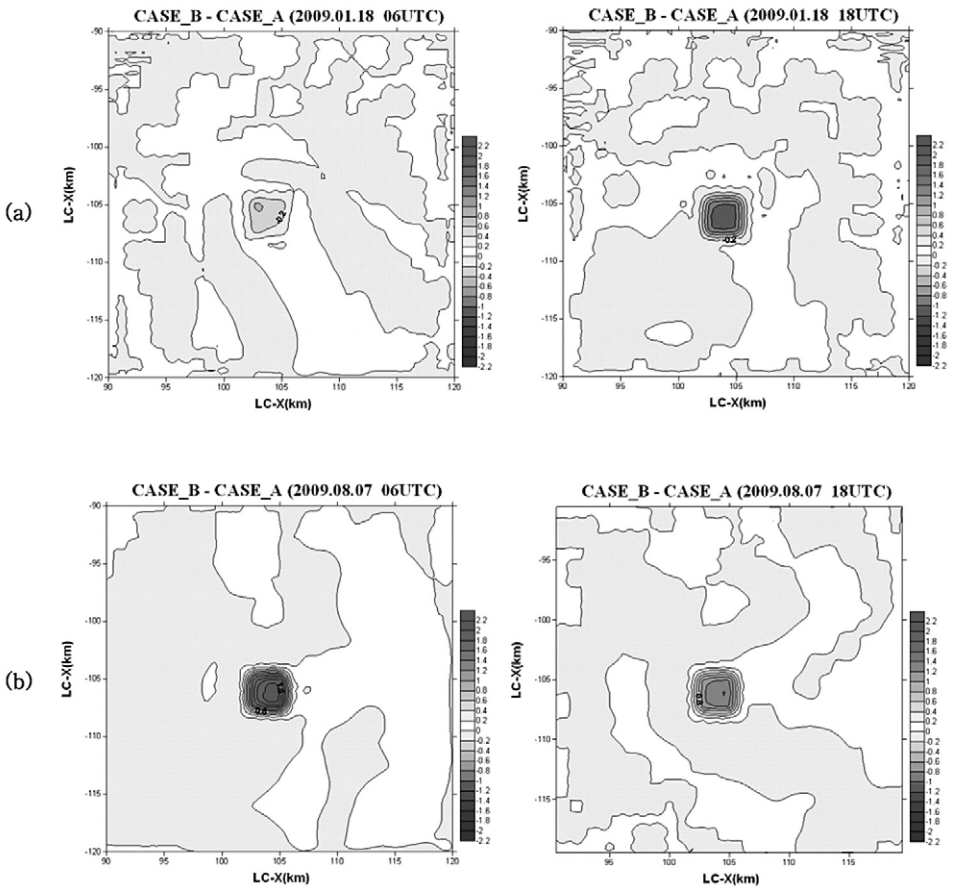


Fig. 10. Difference of ground temperature (CASE_B minus CASE_A) in (a) January and (b) August

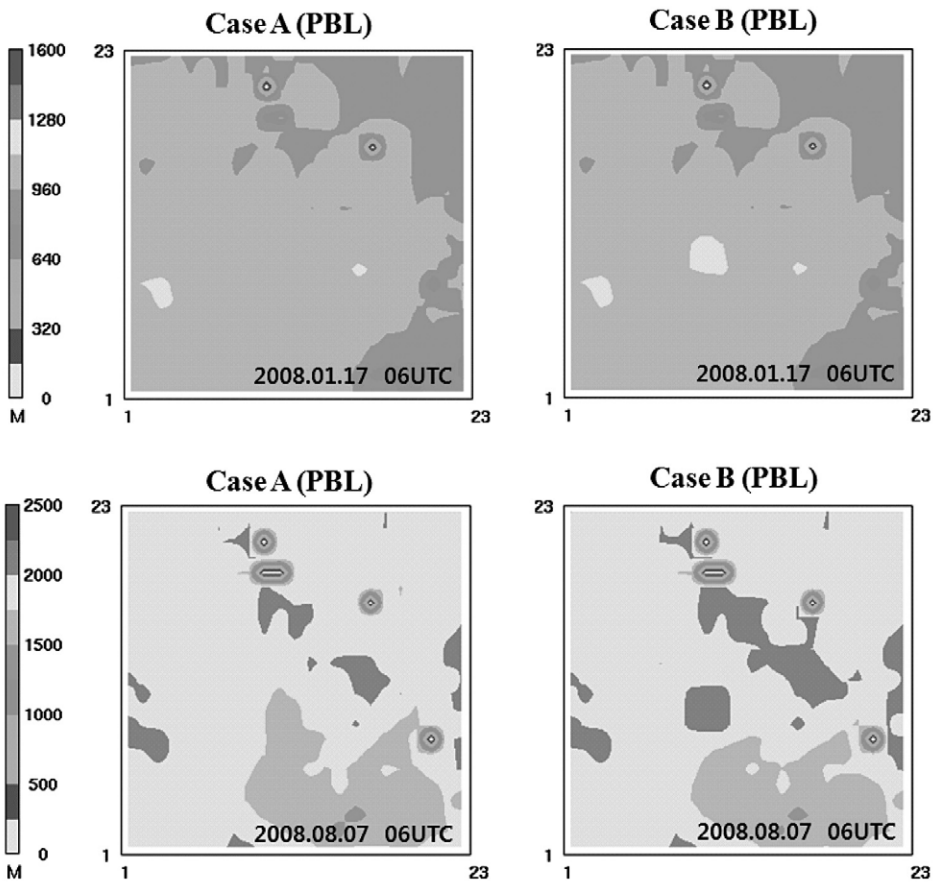


Fig. 11. Comparisons of mixing height CASE_A and CASE_B (January and August)

있으며, 여름과 마찬가지로 도시가 생성된 후(CASE B) 도시지역을 중심으로 혼합층고도가 높게 발달하는 결과를 보였다. 여름의 경우 CASE A와 B 모두 대상지역 최대혼합층고도가 2000m 이상 높게 발달하였다. 또한 도시건설 후 도시가 형성된 격자를 중심으로 혼합층고도의 분포가 바뀌는 결과를 보였다. 이것은 도시가 생성되며 도시 주변의 혼합층 고도까지 영향을 주는 결과를 보여준다.

3. 생활기상지수를 이용한 도시개발 전 · 후의 변화

1) 체감온도

체감온도는 주로 추운 정도를 나타내기 때문에 1월을 대상으로 산출하였다. 그 결과 도시개발 전 · 후의 차이는 크지 않았다. 주간의 경우 도시개발 후에 체감온도가 도시개발 전보다 조금 높아졌고 야간은 도시개발 후에 도시개발 전보다 조금 낮아졌다(그림 생략).

2008년 1월을 대상으로 체감온도를 단계별로 구분하여 표 4에 제시하였다. 도시개발 후에 보호 장구 없이 장기간 노출되면 저체온에 빠질 위험이 있는 주의단계가 5회 늘어났으며 추위를 느끼는 관심단계는 12회 줄어들었다. 또한 도시개발 전 · 후의 최저체감온도를 보면 도시개발 후가 -16.96℃로 도시개발 전 보다 0.5℃정도 낮아졌다.

Table 4. The frequency of Sensible temperature in CASE_A and CASE_B

단 계	도시개발 전 (CASE_A)	도시개발 후 (CASE_B)
주의 (-10℃ ~ -25℃)	51회	56회
관심(10℃ ~ -10℃)	668회	656회
최저 체감온도 (℃)	-16.47	-16.96

2) 불쾌지수

불쾌지수는 덥고, 습한 여름에 사용되는 지수로서 여름철인 8월을 대상으로 산출하였다. 그 결과 8월 6일부터 8월 14일까지는 도시개발 전 · 후 모두 야간에도 불쾌지수가 높게 나타났다. 주간의 불쾌지수는 도시개발 후에 크게 높아졌으며 그 결과 80 이상의 매우 높음 단계도 도시개발 후에 늘어났다 (그림 생략).

표 5는 불쾌지수 단계별 발생 횟수를 나타낸 것으로써 CASE_A는 매우 높음 단계가 131회 발생하였으나 CASE_B는 247회로 116회 증가 하였다. 따라서 도시개발에 따라 기온과 습도의 변화로 모든 사람이 불쾌감을 느끼는 횟수가 증가하였다.

Table 5. The frequency of discomfort index in CASE_A and CASE_B

단 계	도시개발 전 (CASE_A)	도시개발 후 (CASE_B)
매우 높음 (80이상)	131	247
높음(75~80)	324	272
보통(68~75)	263	201
낮음(68이하)	2	-

3) 열지수

열지수는 폭염특보의 보조 자료로 활용되며 그림 12는 열지수를 나타내었다. 도시개발 후에 열지수가 높아졌으며 특히 주간에 주로 높아졌다.

열지수 단계별 발생 횟수를 도시개발 전 · 후로 구분한 결과 매우 높음 단계(53이상)는 없으며 높음(41~54)은 CASE_A에서 8회였던 것이 CASE_B에서 53으로 증가하였다. 보통(41~32) 역시 183이였던 것이 247로 발생횟수가 크게 증가하였다. 따라서 도시개발에 따라 기온과 습도의 변화로 열사/일사병의 위험이 높아진 결과를 보였다.

4) 열대야

그림 13은 CASE_A와 CASE_B의 2008년 8월의 MM5에서 산출된 기온을 나타낸 것이다. 도시개발 전에 비하여 후에 기온이 많이 상승하였다. 또한 일최저 기온이 25℃이상 되는 열대야 현상이 일어나는 날은 CASE_A 10일에서 CASE_B에 11일로 하루가 증가하였다. 또한 도시개발 전 · 후 모두 8월 6일 부터 8월 14일까지 9일간 지속적으로 열대야 현상이 일어났다.

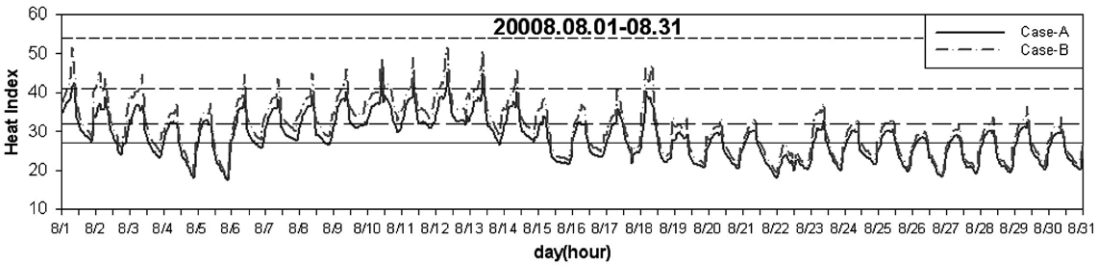


Fig. 12. Heat index of CASE_A and CASE_B calculated by MM5 for 1~31. Aug. 2008

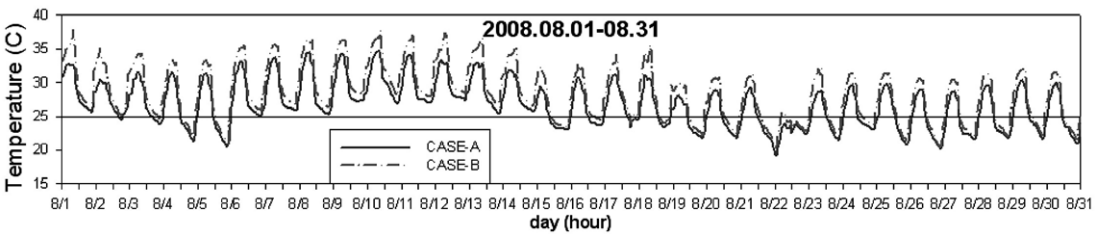


Fig. 13. Temperature of CASE_A and CASE_B calculated by MM5 for 1~31. Aug. 2008

4. 생명기상모델 결과

가상적인 도시 건설지역을 대상으로 2008년 1월과 2008년 8월 각각 1개월씩 현재와 장래 도시건설이 완료된 시점에 대하여 MM5 모델을 실행하고 그 결과로 PT와 PMV를 구하여 도시 건설 전후의 열스트레스 변화를 고찰하였다. 도시 건설 전후의 비교지점은 가상의 도시(3×3) 중심의 9개 격자 중에서 중앙격자(2,2)의 값을 사용하였다.

그림 14는 1월의 CASE_A와 CASE_B의 PMV와 PT의 일평균 값을 나타낸 것이다. 일평균 값의 경우 현재 PT의 최저값이 -18.85℃이며, PMV는 최저값이 -1.94℃이다. 그러나 건설 후 최저값이 -19.05℃이며, PMV는 최저값이 -1.96℃로서 도시건설로 cold stress가 증가했음을 나타낸다. 그러나 PMV가 -1.0 이하 일때 cold stress 가 크다고 하면 도시건설전 19일에서 도시건설 후 18일로 감소되었다.

그림 15는 8월 CASE_A와 CASE_B의 PMV 와 PT의 일평균 값을 나타낸 것으로서 일평균 값의 경우 현재 PT의 최고값이 38.44℃이며, PMV는 최고값이 3.51이다. 한편, 건설 후 최고값이 40.27℃이며 PMV는 최고값이 3.80로서 가상 도시건설로 heat stress가 증가했음을 나타낸다. 또한 PMV가 2.0 이상일 때 heat stress 가 크다고 하면 도시 건설전 17일에서 도시건설 후 23일로 현저히 증가한

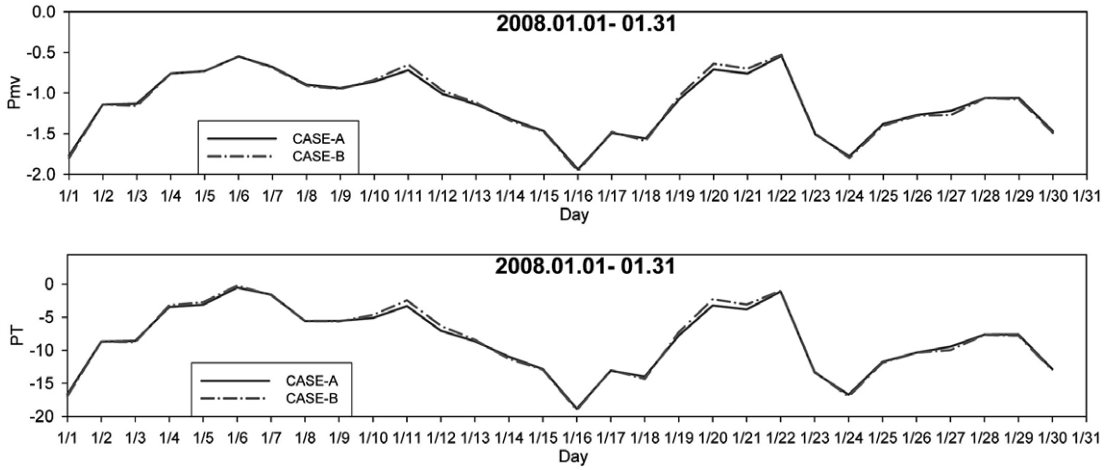


Fig. 14. Comparison of Pmv (upper) and PT (lower) for CASE_A and CASE_B in January

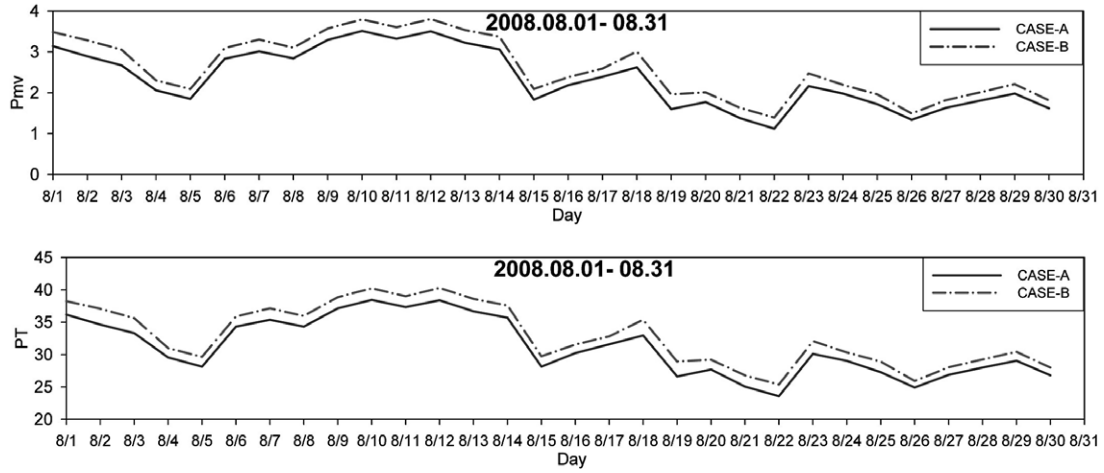


Fig. 15. Comparison of Pmv (upper) and PT (lower) for CASE_A and CASE_B in August

결과를 나타냈다. 대상기간동안의 매시간 PMV와 PT의 값은 겨울보다 여름기간동안 도시 생성 전 · 후의 값이 차이를 보이고 있고, 일평균에 비하여 미세한 차이를 보였다(그림 생략).

IV. 결론 및 논의

최근 지구온난화에 의한 태풍 빈도 증가, 이상 열파 등은 인류의 건강에 심각한 영향을 주고 있다. 더욱이 IPCC는 지구 기온이 앞으로 더욱 가파르게 상승할 것으로 예측하고 있다. 여기에 더하여 도시 내에서는 도시 열섬 현상으로 도시민의 열부담은 가중되게 될 것이다. 따라서 도시개발, 신도시건설의 경우 도시열섬을 최소화하기위한 노력이 필요하다.

도시 건설에 따른 도시열섬 현상은 오래전부터 잘 알려져 왔지만 도시열섬을 정량적으로 예측하는 데는 현재의 기술로 어려움이 있다. 그러나 최근의 기상모델의 발전으로 비교적 만족스러운 도시열섬 모사가 가능하게 되었으며 이러한 열섬현상에 의한 건강영향을 산출하는 기법들도 여러가지 개발되었다. 따라서 도시 개발에 의한 대기질 영향이외에 기후변화에 의한 건강영향평가 제도를 도입하여 도시열섬에 의한 건강영향을 최소화하고 쾌적한 도시환경을 유지할 필요가 있다.

본 연구에서 제시한 도시열섬 예측과 건강영향평가기법을 가상적인 도시에 적용한 결과 도시열섬 현상을 적절하게 모사하였다. 또한 모델결과로 부터 열환경에 관계되는 생활기상지수와 생명기상기수를 산출한 결과 지표면 변화로 인하여 주변지역의 기상환경이 바뀔 수 있음을 입증하였다. 앞으로 건강영향평가를 도입하여 제도화 하가 위해서는 더욱 신뢰도 높은 건강영향평가기법 개발이 선행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구를 지원해주신 한국환경정책 · 평가연구원에 감사드립니다.

참고문헌

기상연구소, 2005, 생명기상기술개발연구(I). pp 187.

김재철, 2006, 동해시 복잡산악지형에서 CALPUFF 모델을 이용한 대규모 점오염원의 NOx 모사, 강원대학교 대학원 석사논문.

김정식, 류상범, 2005, 열 스트레스 정보 제공시스템, 한국기상학회 추계학술대회 논문집, 559-561.

김정식, 박일수, 방소영, 김지영, 2006, 생명기상모델에서 산출된 우리나라 지각 온도 특성, 한국기상학회 춘계 학술대회 논문집, 266-267.

마창민, 이종범, 1999, Photochemical Box model에 의한 서울시 ozone 농도 시뮬레이션 및 장래 배출량 변화에 따른 ozone 농도예측, 한국대기환경학회 학술대회 논문집 2, 41-42.

송은영, 2007, 수도권 지역 고농도 오존 오염의 시공간 거동과 광화학 모델을 이용한 고농도 오존 현상 모사, 강원대학교 대학원, 박사학위 논문.

이종범, 구윤서, 노기환, 문태훈, 문윤섭, 이강웅, 이미혜, 이화운, 손장호, 조용성, 조석연, 전의찬, 최기주, 2006, 대도시 대기질 관리방안 조사연구(광화학 대기오염 생성과정 규명과 저감대책 수립), 환경부.

이종범, 김재철, 이강웅, 노철언, 김혜경, 2007, 추적기체의 확산 특징과 CALPUFF 모델에 의한 모사, 한국대기환경학회지, 23(4), 405-419.

한국정책평가연구원, 2007, 기후변화 영향평가 및 적응 시스템구축 III, 한국정책평가연구원 연구보고서.

Fanger, P. O., 1972, Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York.

Fanger, P. O., 1970, Thermal comfort, p. 244. Copenhagen: Danish Technical Press 1970.

Friedrich, M, A. Gratz and G. Jendritzky, 2001, Further development of the urban bioclimate model UBIKLIM, taking local wind system into account, Meteorological Zeitschrift, *Germany*, 10(4), 267-272.

GA Grell, J Dudhia, and DR Stauffer, 1995, A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR Technical Note.

Helmut E. Landsberg, 1981, The Urban Climate, International Geophysics Series, Vol.28.

Landsberg, H. E., 1981, The Urban Climate. Academic Press, New York, P.285

Steiger, H., Jabalpurlawa, S., Champagne, J., and Stotland, S., 1997, A controlled study of trait narcissism in anorexia and bulimia nervosa. International Journal of Eating Disorders, 22, 173-178.

The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science, R. G. Steadman, Journal of Applied Meteorology, July 1979, 18(7), 861-873.

The Assessment of Sultriness. Part II: Effects of Wind, Extra Radiation and Barometric Pressure on Apparent Temperature Journal of Applied Meteorology, R. G. Steadman, July 1979, 18(7), 874-885.

Willmott, C. J., 1982, Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.

WHO Europe, 2001, Health Impact Assessment as part of strategic Environmental Assessment.

최종원고채택 09. 12. 31