

## Envi-Met.을 이용한 도심 대기경계층 내 확산장 변화 수치 모의

최 현 정<sup>†</sup>

KAIST 부설 한국과학영재학교 물리지구과학부

### Diffusion Simulation Using Envi-Met. in Urban Planetary Boundary Layer

Choi, Hyun-Jeong<sup>†</sup>

Department of Physics & Earth Science, Korea Science Academy of KAIST, Busan 614-100, Korea

#### ABSTRACT

Buildings in the city acts as a cause of distorted wind direction, wind speed, causing the stagnation of the air flow. In the recent trend of climate change can not but consider the temperature rise of the urbanization. This study was aimed to analyze the thermal comfort of planetary boundary layer in different artificial constructions areas which has a direct impact on urban climate, and estimating the warming phenomena. Envi-met model was used to consider the urban structure associated with urban growth in order to precisely determine the impact of the building on the city weather condition. The analyzed values of thermal comfort index were temperature, wind speed, horizontal and vertical turbulent diffusivity. In particular, analysis of the PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied) represents the human thermal comfort. In this study, by adjusting the arrangement and proportion of the top floor building in the urban it was found that the inflow of the fresh air and cooling can be derived low PPD. Vertical heat flux amount of the city caused by climate change was a factor to form a high potential temperature in the city and the accumulation of cold air does not appear near the surface. Based on this, to make the city effectively respond to climate change may require a long-term restructuring of urban spatial structure and density management.

**Key words:** Thermal Comfort, Envi-Met. Model, Planetary Boundary Layer, Urbanization, Climate Change

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

#### 1.1.1 연구의 배경

최근 몇 년간 우리나라 대도시는 물론 중소도시는 꾸준히 도시화가 진행되어 결과적으로 토지이용에서 농경지와 삼림 등의 면적이 현격히 줄어들었고, 건물과 아스팔트와 같은 대단위 인공건조물들이 들어서 대지와 도로의 점유율이 50% 이상 차지하는 고밀도형 대도시 형태를 갖고 있다. 우리나라의 도시는 대부분 산지가 도시외곽을 둘러싸고 있는 전형적인 분지형 도시지역으로서, 대기오염물질의 확산이 불리하여 대기 오염이 심화되는 지형상의 특성을 내포하고 있다(Ministry

of Environment, 2003). 이와 같이 지형조건의 특성상 대기오염물질의 확산이 용이하지 않아, 국지적으로 대기정체뿐만 아니라, 도시지역에서 배출되는 오염물질 배출량은 적정 환경기준을 훨씬 초과하는 수준을 보이고 있다(The Seoul Institute, 2000). 도시 열섬효과를 일으키는 도시화에 따른 지면피복의 변화는 관측된 온난화에 일정부분 기여하며(Allwine *et al.*, 2004), 이러한 도시화에 의한 기온 증가량을 추정하는 것은 온실기체에 의한 미래의 기온 증가를 결정하는데 있어서 매우 중요하다(IPCC Report 5th, 2014). Lee와 Kang(1997)은 한반도 평균 도시화 경향이 최근 20년간 약 0.3°C임을 제시하였고, Kim *et al.*(2000), Kim *et al.*(2001)은 지난 40년간 12개 관측소에서 약 0.6°C의 기온 증가량 중 도시화 효과가 기여한 양을 약 0.4°C로 추정하였다. 이러한 연구에서 지난 30여 년간 연평

<sup>†</sup> Corresponding author: [coscoo@naver.com](mailto:coscoo@naver.com)

Received July 28, 2016 / Revised August 22, 2016 (1st), September 19, 2016 (2nd) / Accepted September 26, 2016

균 기온이 1.17°C 증가하였고, 이 중 약 35%인 0.41°C가 도시화 효과에 기인한다고 밝힌 바 있다. 특히 우리나라의 경우, 도시화의 속도가 빨라서 도시화가 기온 증가에 미치는 영향이 큰 것으로 알려졌으며, 그 양을 정량적으로 추정하려는 다양한 연구가 있었다(Baek et al., 1994; Lee et al., 1997; Boo et al., 2000; Choi et al., 2010). 중규모 대기확산 모형을 이용한 수치실험을 통하여 복잡한 도시지역에서 표출되는 다양한 국지순환계에서 고농도 오염물질의 발생 원인을 찾고, 그것을 검증하기 위한 연구를 통해(Pielke and Avissar, 1998; Chan and Chan, 2000; Lee et al., 2002; Hyun et al., 2003; Ryu et al., 2004) 도시화에 따른 지표의 변화가 오염물질 확산과 대기질의 변화, 열적안정도의 변화를 유도할 수 있음을 보고하였다. 이러한 한반도의 도시화와 관련하여 특히 도시의 밀집도, 거칠기(roughness length)에 따라 기온상승 양상이 달라짐을 연구하기도 하였다(Choi et al., 2007; Lee et al., 2008; Choi et al., 2012). 한편, Choi(2006)는 각 도시 내의 구별 크기를 고려하여 지표 기온의 장기 변동에서의 도시화 효과를 평가하고, 도시화에 의한 정량적인 기온 증가에 대한 연구를 진행하였다. 그러나 이와 같은 연구를 통하여 중규모 기상모델 내에서 지형 위 건물의 효과를 충분히 고려하기는 힘든 상황으로 구별로 도심 내 건물의 최고층수를 고려하여 도시의 거칠기로 계산하여 건물의 효과를 대신하였다. 2013년 기준 전국민의 82.2%에 달하는 인구가 도시지역에 거주하고 있다는 현실(Statistics Korea, 2015.10.20.)만으로도 기후변화에 대한 도시설계 계획분야의 적극적 대응과 그 필요성은 설명될 수 있다. 기후변화에 효과적으로 대응하는 도시를 만들기 위해서는 장기적으로 도시공간의 밀도 관리와 그에 따른 특성을 반영한 도시계획 분야의 설계가 더욱 요구될 수밖에 없는 현실이며, 그러한 요구가 고려될 수 있는 미기상 도시모델 Envi-Met.으로 본 연구를 진행하고자 한다.

### 1.1.2 연구의 목적

도심의 건물은 고밀도 개발에 의해 대기오염물질의 공간적 확산보다는 정체에 의한 대기환경 악화와 풍향·풍속을 왜곡시키는 원인으로 작용하며, 이로 인한 도시 미기후 변화는 대기 흐름의 정체를 유발하여 대기오염을 가중시키게 된다. 이러한 도시지역의 건축 구조물이 풍속을 약화시키고, 불규칙한 난류를 발생시키는 영향을 세밀하게 파악하기 위하여 다양한 도시 성장과 관련된 도심구조물들을 모델 내 설계하여 기상요소들의 변화를 분석하여야 한다. 실질적인 도시 대기의 확산장을 예측하기 위해서는 지형의 특성과 더불어 도심 건물들에 의해 나타나는 현상을 충분히 고려하여 난류유동을 포함한 지면 가

끼이의 복잡한 대기 유동장의 양상을 수치 해석적으로 풀어야 한다. 특히 국지지형 내에서 지면 근처의 난류유동을 포함한 보다 자세한 유동장 해석을 위해서는 지형효과나 해양, 육지의 특성의 차이 외에도 지면마찰, 건축물 등 지형·지물의 효과로 인하여 발생하는 다양한 열환경에 대한 평가도 중요하다. 즉, 본 연구에서는 도심규모 미기상 모델을 통해 지표면의 구조물에 의한 정보로부터 산출된 지표면 거칠기(roughness length) 자료의 특성에 의해 운동량, 열 속, 수증기 속 등과 같은 지표면과 대기의 교환과정에 대한 모사를 비교하고, 도심규모의 모델을 통해 도심 대기경계층 내 확산장에 대한 특성을 연구하여, 그 층 내의 열환경에 대한 안정도 평가를 미기상 도시모델 Envi-Met.을 이용한다. 이를 적용한 도심 내 바람장의 발산 수렴, 수송 구조의 특성에 관한 진단은 바람장에 의해 확산, 수송되는 물질 및 열의 이동 및 축적을 좌우하는 요소들의 하나로 작용할 것이라는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

### 1.2.1 연구의 방법

#### 1.2.1.1 미기상 모델 Envi-Met.

도시의 열환경 변화 등을 수치모의하기 위해 중규모 기상 모델인 M5(Mesoscale Meteorological Model version 5)나 WRF(Weather Research and Forecasting model), RAMS(Regional Atmospheric Modeling System) 등에서 지형이나 지표면 자료 변조를 통해 수치모의하는 것이 일반적이라 볼 수 있다. 그러나 도시의 대부분을 차지하는 건물에 대한 자료가 고려될 수 없어 지형이나 지표면만큼 도시의 기상장에 상당한 영향을 미치고 있는 하층 대기에서 건물에 의한 영향을 고려하기 위해서는 도심 내에 있는 도시의 건물, 배치, 식생 등이 고려되어 모델링할 수 있는 시스템이 필요하다. Envi-Met.은 3차원 미기상 모델링 프로그램으로 독일 Bochum university의 Michael Bruse에 의해 1998년 개발되었다. Envi-Met.에는 1차원의 토양 모델, 식생모델, 열교환 모델이 포함되어 있다. 또한 Envi-Met.은 최대 250×250×30셀의 공간모델링이 가능한 격자 형태를 지원하여, 세밀한 미기후 변화를 수치적으로 분석할 수 있는 특징이 있어, 도시 지역의 고층 건물에 의한 주변 지역의 미기후 변화(기류, 유체의 흐름장, 온도와 습도의 분포) 등을 모델링을 통해 계산할 수 있다. 또한 Envi-Met.은 지표, 식물, 대기의 상호작용을 기본으로 하여 건축물, 대기, 지표면, 식생 요소 간 소규모의 상호작용을 분석할 수 있는 모델이다(Ozkeresteci et al., 2003). 이러한 조건들은 다양한 유형의 선택으로 격자 내부에서 자유롭게 배치될 수 있어 사용

자의 설계 계획에 따라 실제지형을 고려한 미세규모로 분석이 가능하다는 장점이 있다(Fig. 1, Fig. 2).

1.2.1.2 Envi-Met. 초기경계입력자료

도시성장과 열환경 변화와의 관계를 알아보기 위해 실제 대상지역의 기상관측지점(Automated Weather Station, AWS)에서 관측된 매시 기상관측자료를 초기 기상입력 자료로 사용할 예정이며, 도시 내 관측된 난류, 토양, 건물의 경계조건은 Table 1과 같이 주어진다.

1.2.1.3 중규모 기상 모델 MM5

본 연구에 사용된 중규모 기상모델은 미국 기상연구소(U.S. National Center for Atmospheric Research)와 펜실베니아 주립대학(Pennsylvania State University)이 공동 개발한 모델인 MM5(Mesoscale Meteorological Model version 5)로, 초기에는 중규모 현상의 기상예측에 주로 사용되었으나 최근 중규모와 미규모 기상현상에 적용 가능하게 되었고, 대기오염물질 광화학반응/이동/침착 모형의 입력자료 생성에도 사용할 수 있도록 수정·보완되었다(Grell and Dudhia, 1993).

1.2.1.4 모델링 영역 및 수행조건

대기경계층 내 혼합층의 고도와 운위, 수평바람장에 대한 수치모의를 위해서, 서울시를 중심으로 하는 수도권 지역의

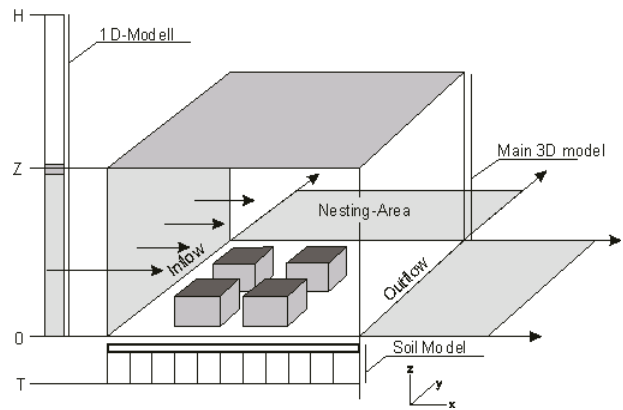


Fig. 2. Envi-Met. model boundary.

복잡한 도시 지형 등의 특성을 고려하며, 경계조건 등으로 인한 수치모델링의 계산 오차를 줄이고, 대규모 영역의 계산부터 시작하여 관심지역(서울시)의 영역까지 계산하는 등지격자 도메인을 이용하는 nesting 방법을 도입한다. 등지격자 모델의 외부경계조건을 생성하기 위해서 two-way interacting nested grid system을 사용한다. 모델의 등지격자 도메인은 아래와 같으며, 그 중심은 38°N, 126°E이다(Fig. 3, Table 2). 사용된 지형고도 자료 및 지표면 자료는 각각 환경부 지리 정보 시스템(EGIS)의 해상도 90m(3-seconds)인 자료와 해상도 30 m(1-second) 지표면 자료를 모델 내 fine domain에 안정적으로 내삽하여 사용하였다(Choi, 2006).

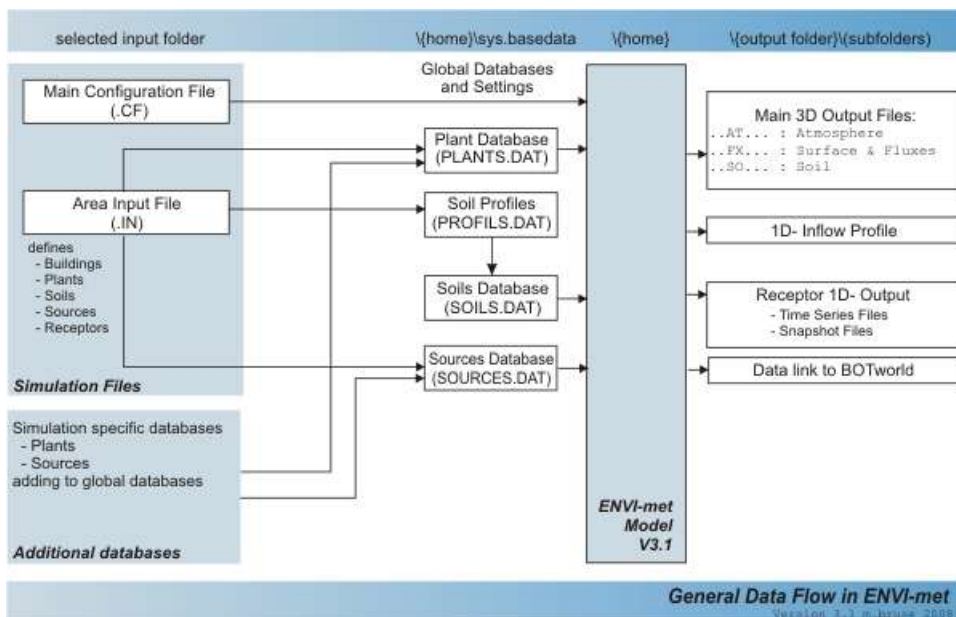


Fig. 1. Envi-Met. modeling flow chart.

Table 1. Envi-Met. model initial boundary data

Variable	
Turbulence	· Options turbulence model
	· Turbulence closure ABL (0:diagn.,1:prognos.) = 1
	· Turbulence closure 3D modell (0:diag.,1:prog) = 1
	· Upper boundary for e-epsilon (0:clsd., 1:op.) = 0
Soildata	· Settings for soil
	· Initial temperature upper layer (0~20 cm) [K] = 293
	· Initial temperature middle layer (20~50 cm) [K] = 293
	· Initial temperature deep layer (below 50 cm) [K] = 293
	· Relative humidity upper layer (0~20 cm) = 50
	· Relative humidity middle layer (20~50 cm) = 60
PMV	· Settings for PMV-calculation
	· Walking speed (m/s) = 0.3
	· Energy-exchange (Col. 2 M/A) = 116
	· Mech. factor = 0.0
	· Heattransfer resistance cloths = 2.5
Bulding	· Building properties
	· Inside temperature [K] = 293
	· Heat transmission walls [W/m <sup>2</sup> ] = 1.94
	· Heat transmission roofs [W/m <sup>2</sup> ] = 6
	· Albedo walls = 0.2
LBC-types	· Types of lateral boundary conditions
	· LBC for T and q (1:open, 2:forced, 3:cyclic) = 1
	· LBC for TKE (1:open, 2:forced, 3:cyclic) = 1

Table 2. The grid system of the horizontal dimensions for model integration in Fig. 3

Domain	Number of grid points		Grid size (km)	Time step (s)
	x	y		
1	190	170	30	60
2	69	75	10	20
3	95	85	3	6
4	170	160	1	5

대기경계층 내 확산장 발달의 불확실성 때문에 예측된 오염농도나 대기의 환기효과에 변화성이 나타날 가능성이 여러 선행연구를 통해 제시되고 있다. 국지기후에서는 대상 지역의 지형이나 토지 이용도에 따라 이러한 확산장의 변화가 가장 크게 나타나며, 언덕이나 산이 분포한 지역에서 특히 중요하다 (Tong *et al.*, 2005). 지형적인 형태는 풍향과 관련된 열적 관성류(thermally driven flow)의 분포에 영향을 주며(Atkinson, 1981), 복잡지형에서 특히, 지형 경사와 형태에 따른 복사(solar radiation)의 불균등한 분포가 바람장 분포(wind behavior)의 다양성에 가장 큰 요인이 된다. Lee and Kimura(2001), Lee *et al.*(2005), Jeon *et al.*(2009)은 많은 수치실험을 통해 지형에 의해 형성되는 산곡풍(mountain-valley breeze)의 형성과 진화 과정을 비교하여 지형이 중규모 순환에 미치는 영향을 조사하여, 지형에 의한 영향은 다른 어떤 요소보다도 매우 직접적이고 응답성이 빠르게 나타남을 보고하였다. Choi(2006)는 이상적인 지형을 이용한 수치실험을 통하여 지형의 폭이 중규모 순환강도와 밀접한 관련을 가지고 있으며, 지형의 폭이 작은 경우에는 기본적인 지표 난류 성분이 더욱 중요하게 작용함을

1.2.2 연구의 범위

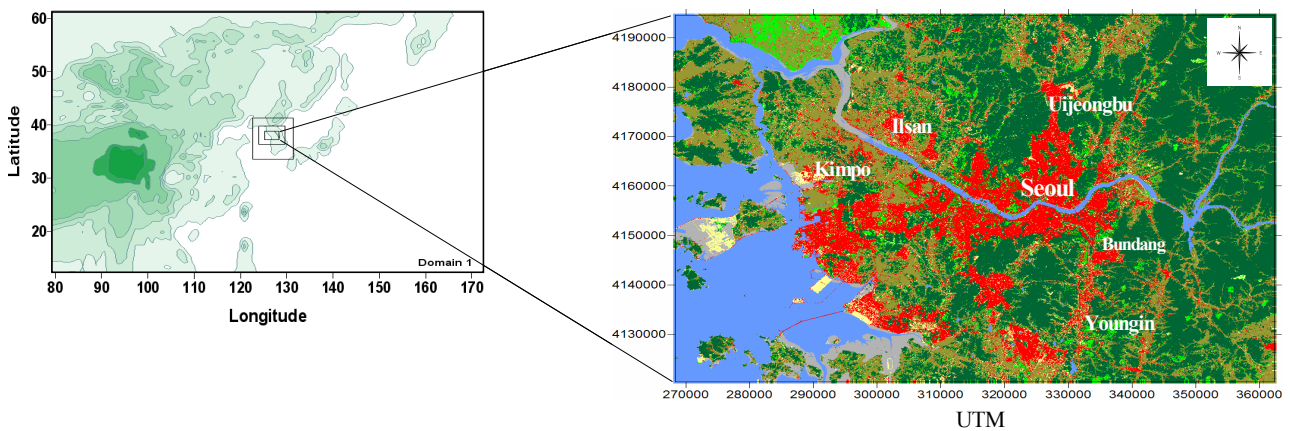


Fig. 3. The coarse and nested grid domains used in this study.

분석하였다. 즉, 지형과 함께 건물의 존재는 기계적, 열적 대기현상에 절대적인 영향을 미치게 된다는 것이다. 따라서 이러한 건물의 영향을 상세히 고려한 기상장 수치실험은 우리나라와 같은 복잡한 지형과 지표면 상태에서는 보다 신중하게 접근하여야 한다. Choi *et al.*(2007)은 복잡지형에서 도시화에 따른 대기오염 확산 연구를 통하여 불균질한 도시 인공열에 의한 현열 열류량이 부산지역의 중규모 순환장의 형성에 영향을 미치고, 이로 인한 대기오염 물질의 확산 변화에 직접적으로 관계한다는 것을 밝혔다. 따라서 아래와 같은 연구 범위를 설정하여 본 연구를 진행하고자 한다.

1.2.2.1 도시의 구조적 요인에 따른 열 환경 분석

도시환경은 인간 활동이 활발히 이뤄지면서 주변 자연과는 다른 특징을 가지게 된다. 미래의 도시개발과 성장을 통해 예측되는 도시기상의 결과를 알기 위해 도시의 구조물의 배치와 최고층의 비율 등에 의해 나타나는 확산효과와 도시 열환경 변화를 예측하여야 한다. 이는 도시 내 열린 바람 길의 효과를 통한 확산효과, 난류 확산 효과, 냉각효과 등에 관한 연구를 통하여 향후 기후변화에 대응하는 도시가 되기 위한 도시공간의 구조와 종관적인 기상조건에 맞는 합리적인 도시구조물의 밀도관리에 대한 정보를 제공하는데 그 의의가 있다.

1.2.2.2 기후변화에 따른 도심 확산장 분석

지구 온난화에 일정부분 기여하는 도시화에 의한 기온 증가는 미래의 기온증가를 결정하는데 있어서 매우 중요하다 (NIER, 2008; IPCC 5th Assessment report, 2014). 특히 우리나라의 경우, 도시화와 그 밀집율의 속도가 빨라서 도시화가 기온증가에 미치는 영향이 큰 것으로 예측되며(Choi, 2006), 기후변화에 대응하는 도시로 만들기 위해 도시는 계획의 초기 단계부터 이를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 한반도 기후변화 시나리오(기상청, HadGzm3-RA 모델을 사용하여 산출)에 따른 기후자료 중 기온상승률 +2.3°C(2045 ~2065)을 중규모 기상 모델인 MM5와 미기상 도시모델인 Envi-Met에 적용하여 기후변화 사례(이하 CC case)로 수행하였다.

2. 모델링 결과

도심의 건물은 고밀도 개발에 의해 대기오염물질의 공간적 확산보다는 정체에 의한 대기환경 악화와 풍향-풍속을 왜곡시키는 원인으로 작용하며, 이로 인한 도시 미기후 변화는 대기 흐름의 정체를 유발하여 대기오염을 가중시키게 된다. 이러한

도시지역의 건축 구조물이 풍속을 약화시키고 불규칙한 난류를 발생시키는 영향을 세밀하게 파악하기 위하여 도시성장과 관련된 도심구조물들을 모델 내 설계하여 풍향, 풍속, 온도, 연직확산속도, 난류(Turbulence Kinetic Energy), PPD(Predicted Percentage of Dissatisfied)를 계산하여 분석하였다. PMV(Predicted Mean Vote)는 인간 생활공간의 온열환경 6요소(공기 온도, 상대습도, 기류, 복사온도, 착의량, 대사량)의 복합효과를 평가하기 위해 1970년 덴마크 교수 Fanger PO가 온열감각을 정량화된 수치로 나타낸 것이다. PMV값에 대해 사람들이 느끼는 불만족 정도를 %로 나타내는 것이 PPD이다. 쾌적한 PPD의 수치로서 PPD<10%로 권장하고 있다. 다른 온열지표와 달리 직접 감각량을 표시하기 쉽고, 불만족율도 쉽게 예측할 수 있기 때문에 온열감 및 쾌적성과 관련하여 현재 가장 많이 사용되어지고 있다(Ha, 2016).

아래 식은 PMV에 의해 유도된 PPD식을 나타낸다.

$$PMV = [0.303e^{-0.036M} + 0.028] \{ (M - W) - 3.96E^{-8}f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a) - 3.05 [5.73 - 0.007(M - W) - p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) \}$$

$$f_{cl} = 1.0 + 0.21I_{cl}, 1.05 + 0.1I_{cl}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.0275(M - W) - R_{cl} \{ (M - W) - 3.05 [5.73 - 0.007(M - W) - p_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.87 - p_a) - 0.0014M(34 - t_a) \}$$

$$R_{cl} = 0.155I_{cl}$$

$$h_c = 12.1(V)^{1/2}$$

- Where
- e* Euler's number (2.718)
  - f<sub>cl</sub>* clothing factor
  - h<sub>c</sub>* convective heat transfer coefficient
  - I<sub>cl</sub>* clothing insulation [clo]
  - M* metabolic rate [W/m<sup>2</sup>] 115 for all scenarios
  - p<sub>a</sub>* vapor pressure of air [kPa]
  - R<sub>cl</sub>* clothing thermal insulation
  - t<sub>a</sub>* air temperature [°C]
  - t<sub>cl</sub>* surface temperature of clothing [°C]
  - t<sub>r</sub>* mean radiant temperature [°C]
  - V* air velocity [m/s]

$W$  external work (assumed = 0)

Since PPD is a function of PMV, it can be defined as

$$PPD = 100 - 95_e [-(0.3353PMV^4 + 0.2179PMV^2)]$$

2.1 도시의 구조적 요인에 따른 확산장 및 열환경 분석

2.1.1 건물 분배효과(Building distribution Effect)

신선한 공기를 도심지역에 효과적으로 확산시킬 수 있는 바람통로 설계와 지역의 환기성능을 개선시키기 위한 건축물의 배치 방법에 대한 고려가 필요하다. 바람길 분석과 바람통로의 설계를 통한 도시 환기 및 통풍능력을 개선하여 도시의 점진적인 지속성을 유지하고자 건물의 구조적인 수평배치에 따른 시뮬레이션을 진행하여 도시공간구조 재편을 통한 기상 변화 대응의 관계를 연구하고자 한다. 본 연구에서는 바람길을 확보할 수 있었던 건물의 공간 배치 주변에서 난류의 움직임, 온도, 풍향, 풍속, 연직방향 확산속도, PPD 등을 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 Envi-Met.에 설계를 하였다. 가운데 녹지공간(green)을 공통으로 주고 5 m 높이의 가로수를 녹지공간 주변에 배치하였고, 높이 40 m에 해당하는 건물들(gray)을 세 가지 형식으로 배치한 후 Table 3과 같은 초기 기상 조건을 두어 진행하였다. 본 사례일은 강수확률이 가장 적었고, 지상 10 m에서의 풍속이 건물에 의한 난류효과가 잘 표현될 수 있었던(Choi, 2006) 3 m/s 내외의 풍속이 나타나는 사례로, 풍향은 서울 관측소(지점번호(108))기준 주풍향인 북동풍, 초기풍속은 3 m/s이다. 종관 규모 운동은 거의 수평적이나 연직 속도가 구름과 강수의 형성 또는 소멸을 유도하기 때문에 연직 속도는 물리적으로 상당히 중요하다. 본 연구에서 계산된 연직

Table 3. Envi-Met. execution condition

Variable	
Start simulation at day (DD.MM.YYYY)	2016.05.14
Start simulation at time (HH:MM:SS)	15:00:00
Total simulation time in hours	1.00
Save model state each min	60
Wind speed in 10 m ab. ground [m/s]	3
Wind direction (0:N..90:E..180:S..270:W..)	45.0
Roughness length z0 at reference point	0.3
Initial temperature atmosphere [K]	290.77
Specific humidity in 2,500 m [g Water/kg air]	7
Relative humidity in 2m [%]	54.73

속도장은 강한 상승역의 경우 0.25~0.45 m/s의 값을 나타내고, 반대로 하강역도 나타나고 있다. 수평확산장의 결과 4.3~4.8 m/s의 범위를 가지는 것으로 모델링되었다. 연직적으로 높은 연직확산속도를 통해 확보된 대기 혼합고는 확산효과가 높고, 환경용량도 크며, 차고 깨끗한 공기의 유입을 기대할 수 있어 대기오염도는 약해진다고 볼 수 있다(Choi, 2006). 이러한 가정 하에 Fig. 5(a), Fig. 5(c)는 상승역을 따라 상승한 공기가 다시 하강역을 따라 하강하며, 모델링 영역 내에서 하나의 상승과 하강을 반복하며, 대류세포를 건물의 배치형태에 따라 반복적으로 잘 나타내고 있지만, Fig. 5(b)의 경우 상승과 하강의 대류세포가 동서로 배치된 건물의 전면과 후면에서 각각 나타나, 상승의 공기가 상대적으로 다른 건물배치에 비하여 유입될 수 있는 가능성이 적다. 이는 냉각효과나 환기효과에 있어서 주풍향에 대해 가장 부적절한 건물 배치로 Fig. 7(b)

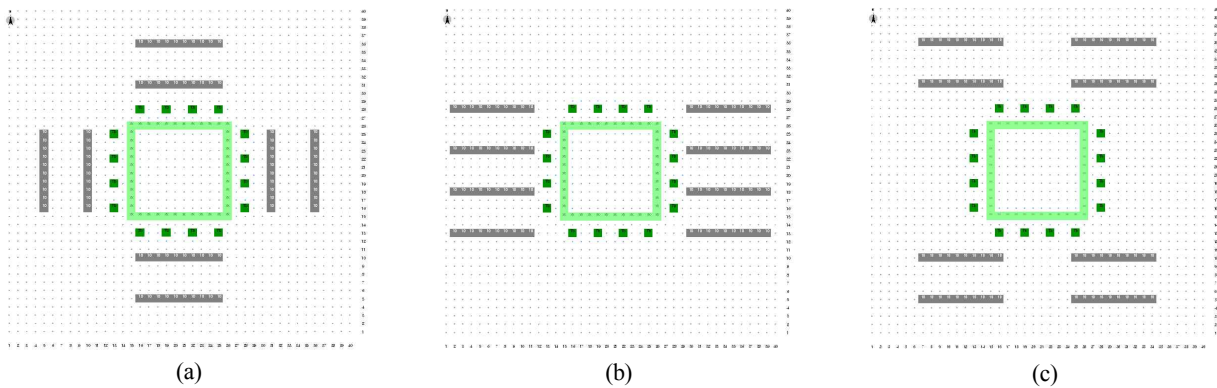


Fig. 4. The building layout design for building distribution effect simulation.



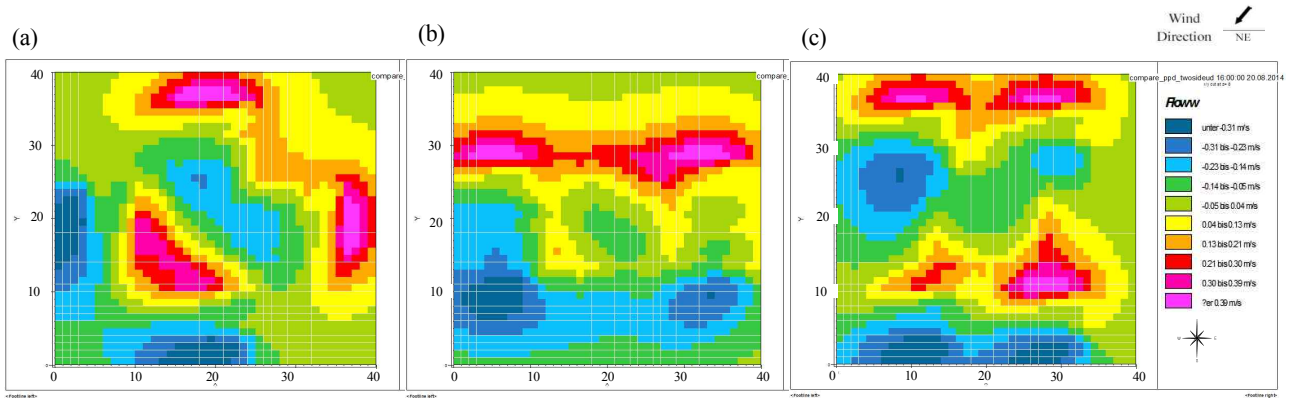


Fig. 5. The vertical velocity difference by building distribution effect.

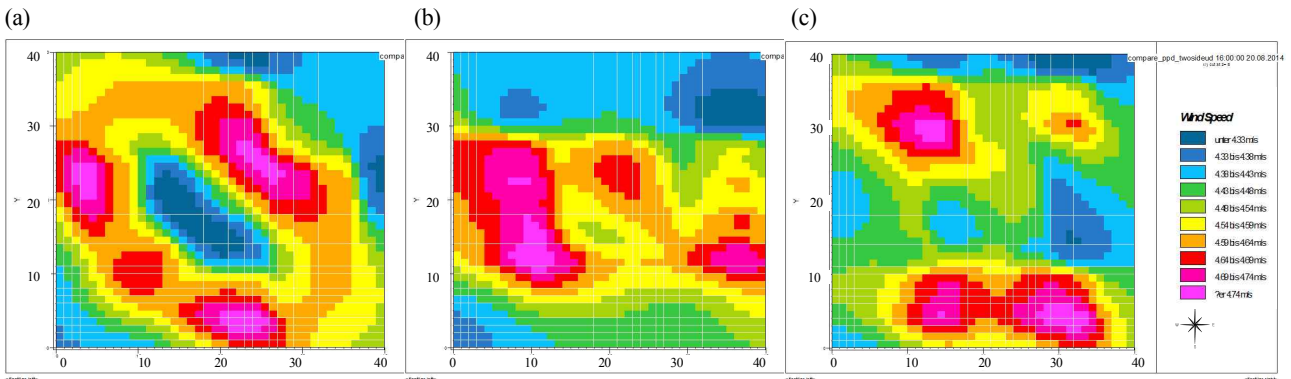


Fig. 6. The horizontal velocity difference by building distribution effect.

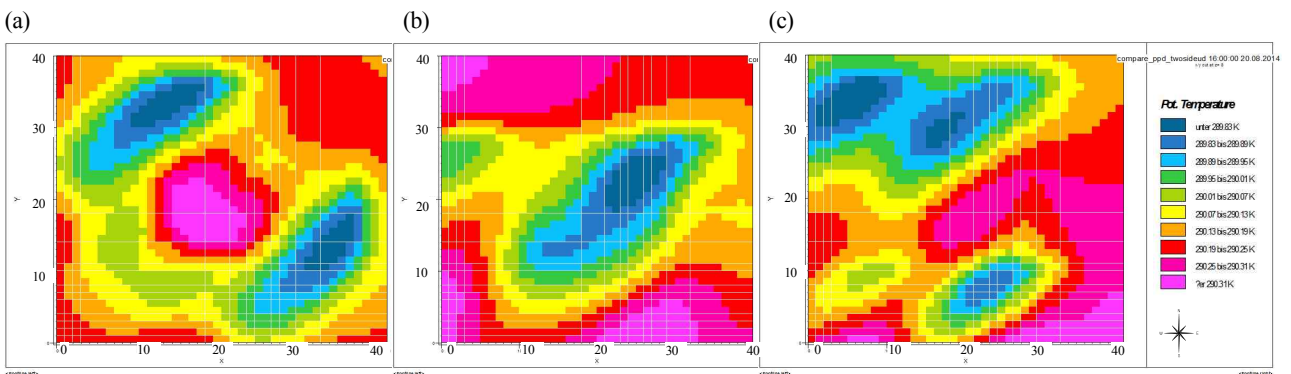


Fig. 7. The temperature difference by building distribution effect.

에서와 같이 290 K 이상의 기온역이 만들어질 가능성이 제안 되었다. Fig 8(b)의 PPD 모델링 결과에서도 건물의 중심부에는 25이상의 값을 나타내어, 환기와 냉각효과가 가장 저하되고 정체된 도심 열적 대류세포에 의해 불쾌적도가 높아짐을 알 수 있었다.

### 2.1.2 건물 높이효과(Building Height Effect)

조밀한 고층 건물로 인해 도시의 풍속이 비정상적으로 증가함으로써 고층건물에 부딪힌 도심 상공의 강한 바람이 지표면으로 급강하한 뒤, 소용돌이처럼 위로 솟구치거나, 좌우로 빠르게 이동하는 현상인 downwash 현상에 대한 시뮬레이

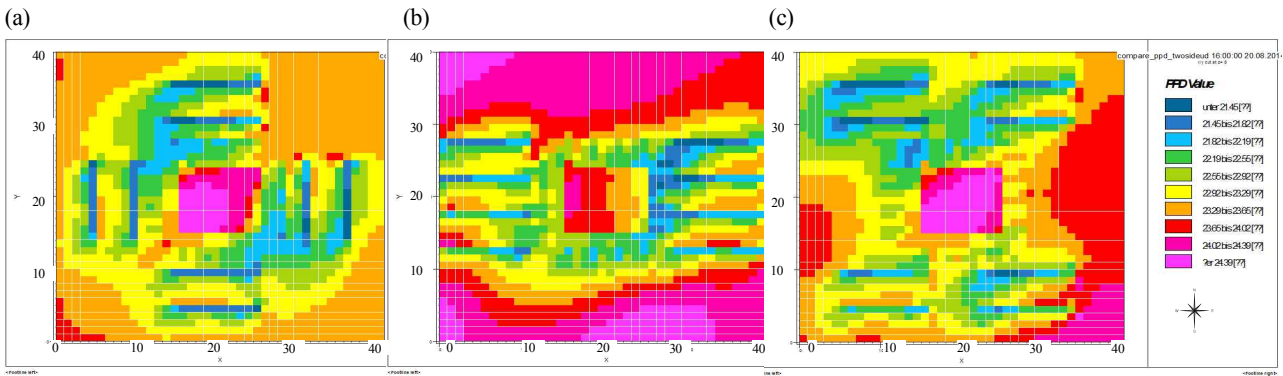


Fig. 8. The PPD difference by building distribution effect.

션을 하였다. 즉, 건물간의 마찰에 의해 상층과 하층 공기의 속도가 달라질 때 건물에 생기는 하강류 효과를, 시뮬레이션을 통하여 최고층 높이가 다른 아파트단지 구조에서 저항에 의한 하강류 효과와 계곡풍 효과가 어떻게 나타날 수 있는지 관찰할 수 있을 것이다. 이때 같은 방향으로 배열된 건물의 높이 차이의 비율을 다르게 하여 downwash 영향을 시뮬레이션하였다(Fig 9, Fig. 10). 이때 생긴 빌딩풍은 주거지역의 통풍 및 환기와 관련하여 중요한 의미를 갖는 공기교환이 된다. 상층의 공기의 유입을 유도하여 확산을 통해 도심의 정체되어 그 층 내에 머물러 있게 된 도심의 열환경이 어떻게 해소되는지, 수치모의하기 위하여 Fig 9, Fig 10과 같은 건물의 배치를 두고, 건물의 최고층을 각각 H1, H2, H3, H4라고 했을 때, 북쪽에 위치한 가장 앞 동을 H1, 뒤에 위치한 동을 각각 H2, H3, H4로 둔다. 남북으로 배치된 아파트 단지에서 최고층의 높이가 다 같은 H1/H2/H3/H4의 = 1인 사례와 H1/H2 = 0.8, H2/H3 = 0.8, H3/H4 = 0.8로 최고층이 서서히 높아지는 사례에 대한 모델링을 북풍으로 초기 조건을 주어 모델링하였다. Fig 11(a)의 경우, 건물의 전면부에서 모두 연직확산이 일어나고 있는 반면, Fig 11(b), Fig 12(b)의 경우 건물의 전면부에서는 하강기류가 후면부에서는 상승기류가 만들어져 건물의 최고층높이 비율이 서서히 올라가는 경우, 상승과 하강하는 대

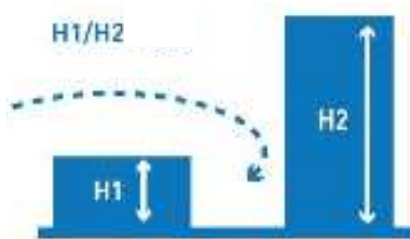


Fig. 9. The building layout design for downwash effect simulation.



Fig. 10. The arrangement of buildings.

류세포가 만들어져 상층의 공기의 유입이 일어나고, 하층의 열원이 상당히 제거되고 있음을 알 수 있다. Fig 13의 난류 확산속도(TKE) 값의 경우에도 Fig 13(a)의 경우 대기 정체현상이 나타나 확산이 일어나지 않는 특징을 나타내는 것에 반해, Fig 13(b)에서는 모델링 영역 전반에 걸쳐 대기의 확산이 자유롭게 일어나 확산효과가 더욱 크게 나타날 수 있음을 보여 준다. 따라서 조밀한 고층 건물들의 배치뿐만 아니라, 최고층의 비율을 다르게 조성했을 때 고층건물에 부딪친 도심 상공의 바람이 지표면으로 유동하는 현상인 downwash 현상을 일으켜 상대적으로 상층 공기의 유입을 유도해 도심의 열섬현상을 해소할 수 있음을 나타내었다.

2.2 기후변화에 따른 도심 대기경계층 변화 분석



(a)  $H1/H2/H3/H4 = 1$

(b)  $H1/H2 = 0.8, H2/H3 = 0.8, H3/H4 = 0.8$

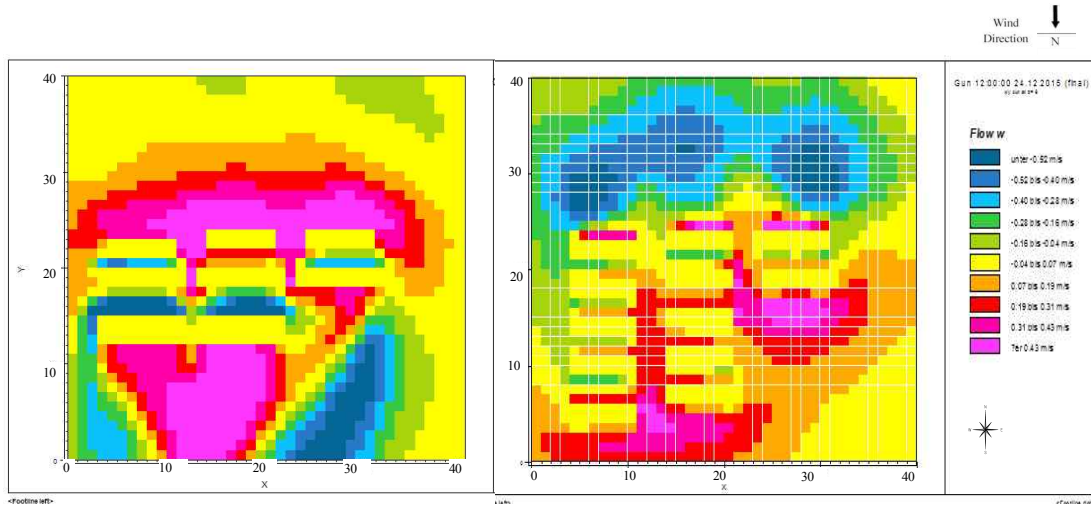
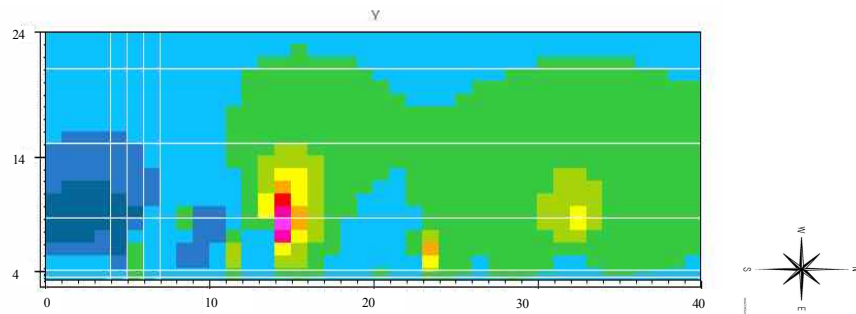
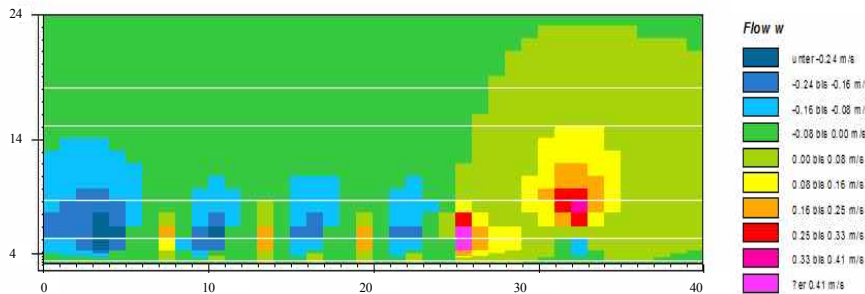


Fig. 11. The vertical velocity difference by building height ratio.



(a)  $H1/H2/H3/H4 = 1$



(b)  $H1/H2 = 0.8, H2/H3 = 0.8, H3/H4 = 0.8$

Fig. 12. The vertical velocity difference by building height ratio.

중규모 기상모델인 MM5를 통하여 기후변화에 따른 도심의 연직 확산 속도와 운위 및 수평 바람장의 비교를 모델링하였다. 사례일인 2003년 6월 5~6일의 상층풍은 5~7 m/s의 서남서(WSW)풍이 우세하며 시간에 따라 순전(veering)하고

있음을 나타내어, 다소 약한 종관계의 영향으로 국지적인 순환이 표출될 수 있는 가능성이 있는 날로 선정된 사례일이었다. 이후 미기상 도심 모델인 Envi-Met에서는 도심의 건물을 고려한 상황에서 이러한 향후 기후변화의 양상이 어떻게

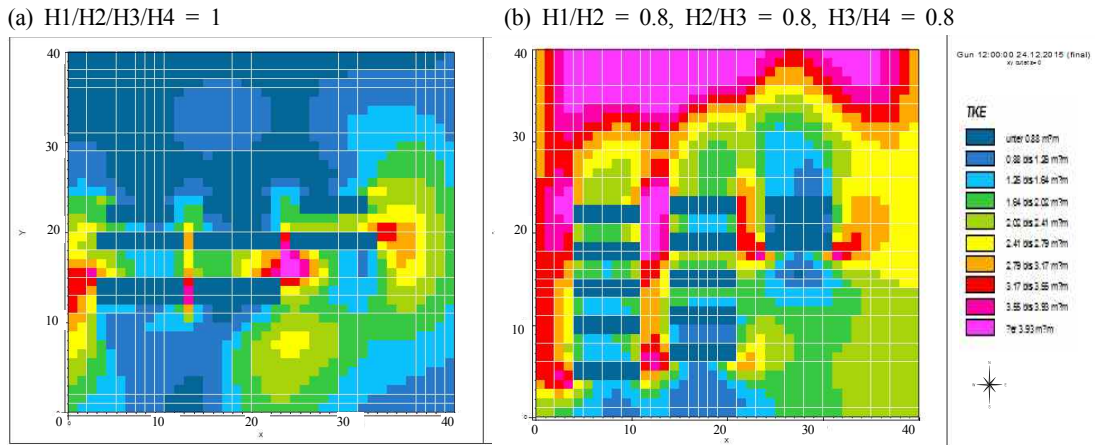


Fig. 13. The TKE difference by building height ratio.

나타나는지 건물효과에 대한 분석을 토대로 진행한다.

2.2.1 연직 열류량과 온위장의 비교

연직 열류량과 온위장의 비교는 대기경계층 내 확산장을 예측하는데 필수적인 과정이 된다. 즉, 대기 경계층의 연직구조를 조사하고, 이를 바탕으로 혼합층의 고도를 결정하는 것은 대기의 미기상학적 현상을 규명하고, 대기오염 농도 변화를 모사하며, 열환경을 예측하는데 중요하다. Fig. 14에 표시된 수평단면을 따라 대표적인 도심인 서울(위도 37° 33′)을 통과하여 연직분석을 하였다. 모델링 결과 중 연직 열류량과 온위장을 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 15(b)의 0900 LST의 경우, 일사가 시작되면서 해양보다 육지에서의 가열이 빨리 진행되어 해양과 육지의 연직온위의 차가 특히 해안선 부근에서 커지기 시작하는 모습이 잘 나타나고 있다. 해안지역은 해

풍의 영향으로 상대적으로 찬 바다 쪽의 공기가 육지로 유입되어 내륙에 비해 온위가 낮아져 해안선을 따라 강한 경도를 이루고 있다. 일사가 강해지면서 1200 LST에서는 지면가열에 의한 현열 속과 경계층 꼭대기에서의 상층공기의 유입에 의해 온위가 점차 증가하고 있으며 특히, 내륙의 분지 지역에서 상향 열류량의 발달을 볼 수 있으며(Fig. 15(b)), 이러한 패턴은 1500 LST에서 가장 강하게 나타나, 혼합고도 가장 높이 성장하고 있다(Fig. 15(b)). 일사가 강해지는 1500 LST에 가장 높이 성장한 혼합층은 지표면이 가열됨에 따라 온난해진 공기덩이가 부력으로 상승하게 된 공기덩이의 밀도가 주변공기와 등밀도를 유지하면서 더 이상 부력을 갖지 않는 상태가 된 높이이다. 이후 현열속의 감소에 따라 대류를 약화시켜 혼합고도도 감소하게 되는 일변화가 나타나고 있다.

Fig. 15(b)에 비하여 Fig. 15(a)에서는 한랭한 공기의 축적이 아직 남아서 나타나고 있으며, 이후 1200 LST에서는 각 case에서 지면 가열에 의한 연직속도의 상승으로 혼합층의 고도가 급격히 상승하고 있는 것을 볼 수 있으며, 혼합층 내 연직쉬어(shear)에 의해 약한 하강류도 형성되고 있다. 이때 Fig. 15(b)에서 기후변화를 고려한 도심의 연직 열류량은 같은 시간대에서 Fig. 15(a)에 비하여 높은 온위장을 형성하는 요인으로 작용하고 있다. 이후 1,500 LST에서는 각 사례에서 모두 연직속도의 최대 증가를 볼 수 있으며, 이것은 혼합층의 생성속도를 빠르게 하며, 혼합의 지속시간을 지속시키는 것으로 볼 수 있다. Fig. 15(b)에서는 축적된 현열 열류량으로 인해 Fig. 15(a)에 비하여 급격한 연직 속도 차를 보이며 상승하는 상승역이 뚜렷이 나타나, 한랭한 공기의 축적이 거의 일어나고 있지 않음을 확인할 수 있다. 이는 기후변화 사례에서 도심의 냉각효율이 더욱 감소하여 도시의 기온변화가 냉각에 이르기

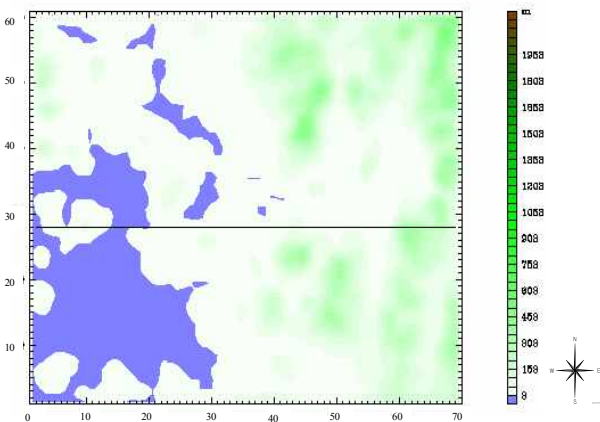


Fig. 14. Cross section for vertical analysis.

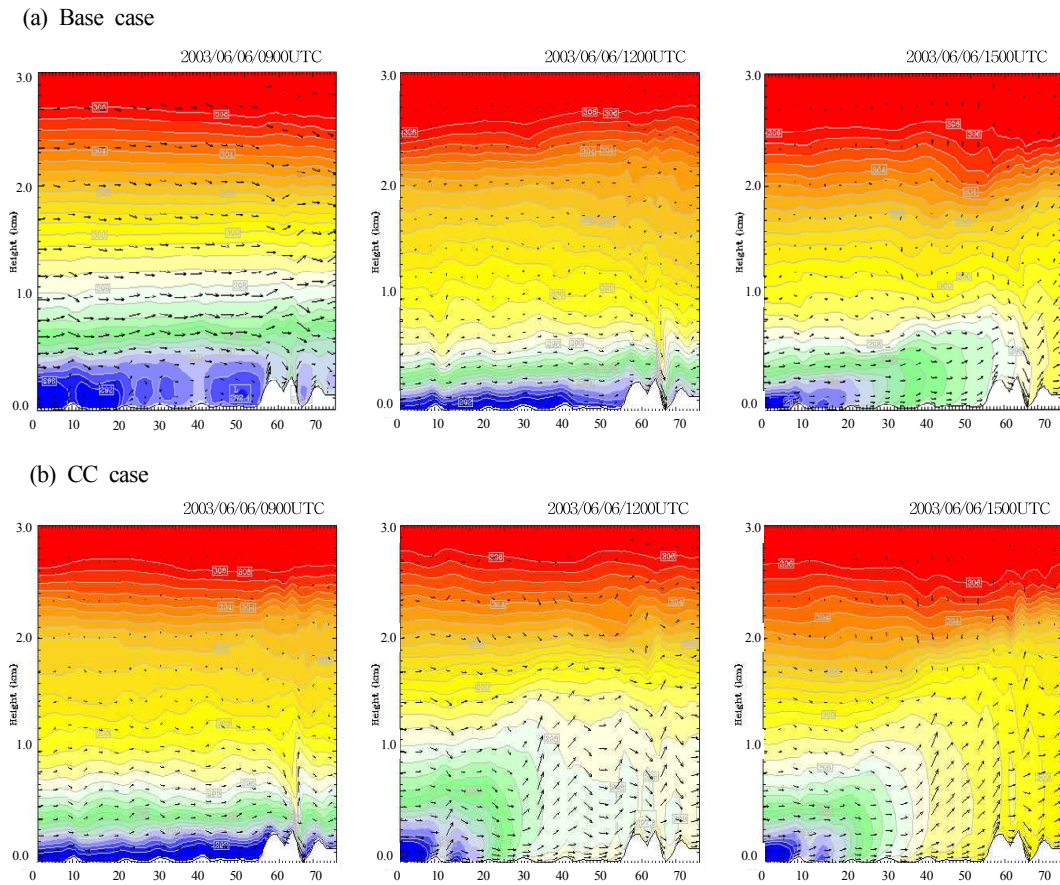


Fig. 15. The vertical flux and potential temperature field simulated.

유리하지 않은 상황으로 도시 열섬현상이 지속될 원인이 되고 있음을 알 수 있다.

Fig 16은 각 사례에 대한 지상의 수평 풍속의 변화를 나타낸 것이다.

0900 LST의 경우, Fig. 16(a)에 나타난 풍속에 비하여 Fig. 16(b)는 지형에 의해 나타나는 배수류의 존재를 예상할 수 있는 산지 아래부근의 강화된 풍속을 제외하면 분지와 내륙을 포함한 해안에서 모두 풍속은 약화되어 있다. 특히 분지화 되어 있는 도심과 주변의 풍속 차이는 급격히 줄어들어 있다. 분지형태의 도심에서 0.5~2.5m/s 약화된 풍속 분포를 보이다 1500 LST에서는 해안과 산지아래를 제외하면 도심에서 역시 약화된 풍속을 모의하는 것으로 나타났다. 오전에 비해 오후에 감소된 영역이 많이 나타나고 있으며, 그 감소폭은 0.5~2.2 m/s이다.

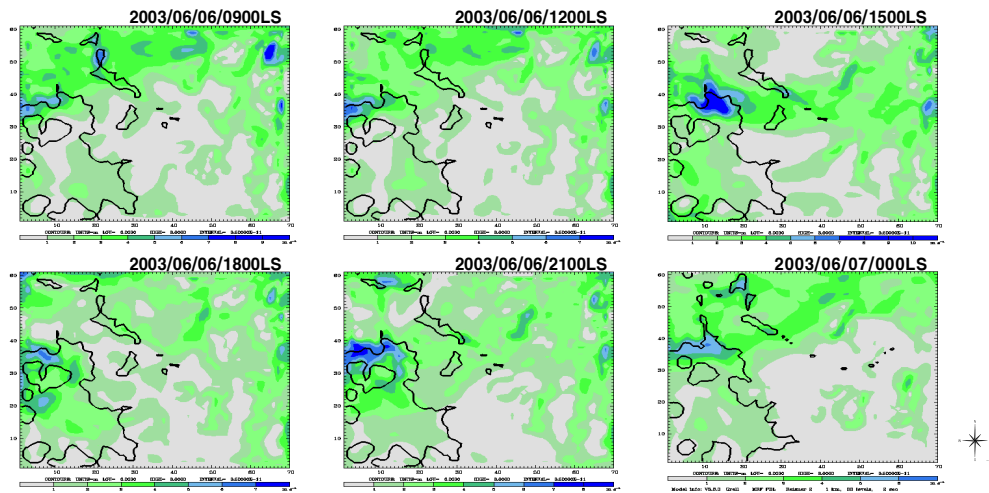
중규모 모델로 계산된 지상 10 m 기온, 수평 풍속 결과를 초기경계자료로 하여 도시모델 Envi-Met.에서 도심 내에서의 확산장의 변화를 살펴 본 결과에서, Fig 17(b)에서도 기후변화

를 고려한 CC,사례는 모델링 영역에서 전반적으로 고려된 +2.3 °C보다 도심 내 높은 승온율을 보이고 있었으며, 모델영역의 z(연직)축을 중심으로 단면 분석한 결과(Fig. 18(b))에서 나타난 바와 같이 CC 사례에서는 현열열류량의 증가가 도심에서 뚜렷이 나타나고 있으며, 도시의 지표 부근으로 냉각역을 유도하지 못하고 있어 도심 열돔(urban heat dome) 현상이 나타날 수 있음을 알 수 있었다.

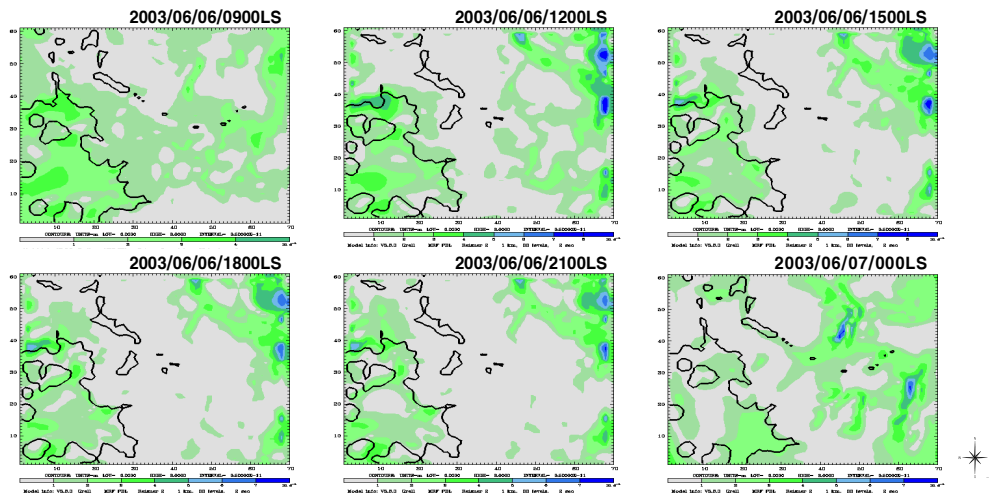
### 3. 결 론

본 연구에서는 지표면의 구조물에 의한 정보로부터 연직확산속도, 난류량, 기온, 쾌적도(PPD) 등과 같은 요소에 대해 지표면과 대기의 교환과정에 대한 모사를 비교하고, 도시 내 열환경에 대한 안정도 평가를 하였다. 특히, 도심구조물 적용한 도심 내 바람장의 발산 수렴, 수송 구조의 특성에 관한 진단은 바람장에 의해 확산, 수송되는 열이나 물질의 이동 및 축적을 좌우하는 요소들의 하나로 작용할 것이라는 점에서 중





(a) Base case



(b) CC case

Fig. 16. The horizontal wind speed field simulated.

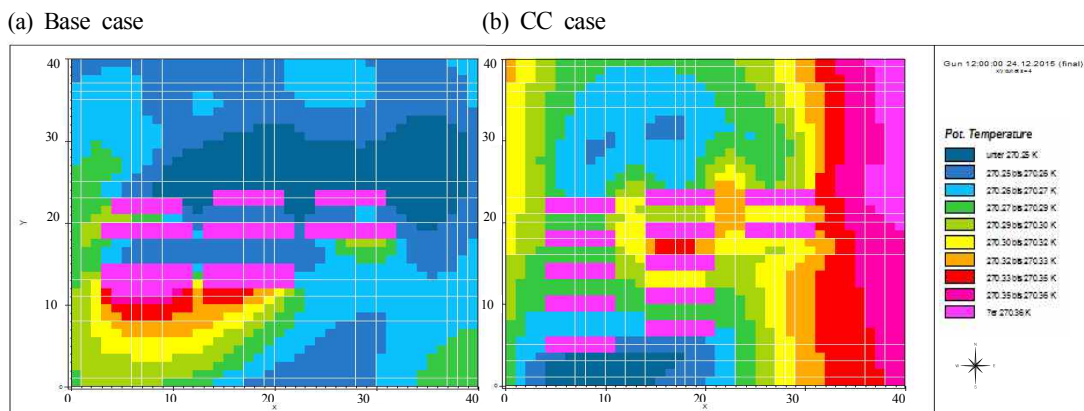


Fig. 17. The horizontal temperature field simulated.

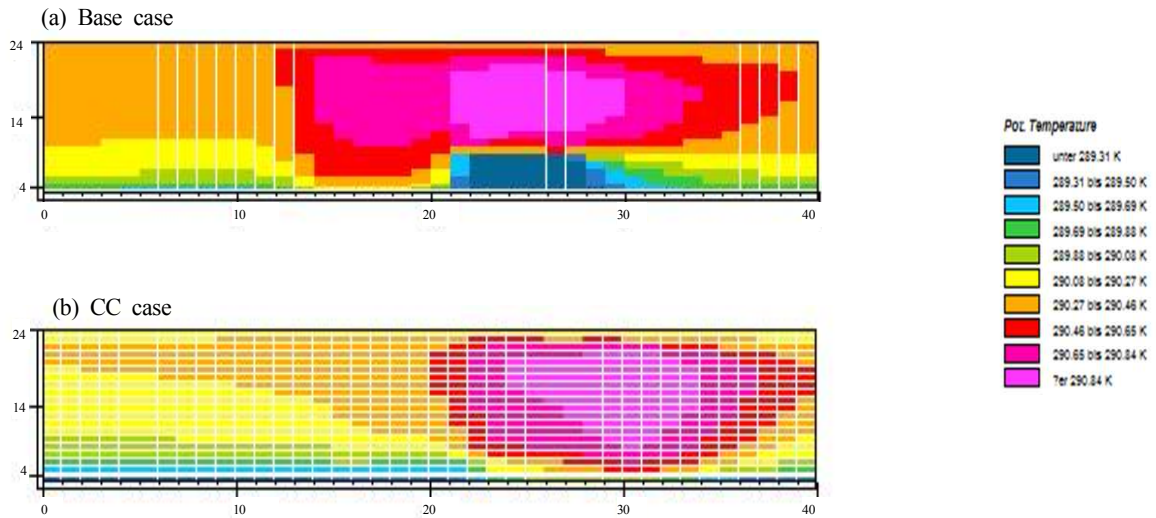


Fig. 18. The horizontal temperature field simulated by (a) and (b), cross section: z axis in Fig. 17.

요한 의미를 갖는다.

본 연구에 사용된 미기상 도시모델 Envi-Met.으로 도시의 건물에 대한 구조적 요인에 따른 열 환경분석 중 건물 분배효과에 관한 시뮬레이션에서 신선한 공기를 도심지역에 효과적으로 확산시킬 수 있는 바람통로 설계와 지역의 환기성능을 개선시키기 위한 건물의 배치 방법에 대한 고려가 필요함을 알 수 있었다. 모델링 영역 내에서 하층공기의 상승과 상층공기의 하강을 반복하며, 대류세포를 형성하며, 상대적으로 상층의 공기가 유입될 수 있는 가능성이 건물배치형태에 따라 달라지고 있으며, 이는 냉각효과나 환기효과에 있어서 가장 부적절한 건물 배치에서 고온역이 만들어질 가능성이 제안되었고, 정체된 도심 열적 대류세포에 의해 불쾌적도가 높아짐을 알 수 있었다. 또한 건물 최고층 비율효과로 인한 downwash 현상에 대한 시뮬레이션에서 건물간의 마찰에 의한 상층과 하층 공기의 속도가 달라질 때 건물에 생기는 하강류 효과는 높이가 다른 아파트단지 구조에서 저항에 의한 하강류 효과와 계곡풍 효과가 함께 작용함을 관찰할 수 있었다. 이때 같은 방향으로 배열된 건물의 높이 차이의 비율을 다르게 한 downwash 영향에서 주거지역의 통풍 및 환기와 관련하여 중요한 의미를 갖는 공기교환이 최고층 비율 효과에서 유도됨을 보였다. 즉, 도심 대기의 정체를 가져오는 도시열섬 현상의 확산과 이동은 이러한 상층의 상대적으로 차고 깨끗한 공기의 유입을 유도하여 확산을 통해 도시의 정체가 그 층 내에 머물러 있게 된 도시의 열환경이 어떻게 해소되는지 알게 되었다. 기후변화에 의해 유발되는 도시의 연직 열류량은 같은 시간대에서 도심에서 높은 온위장을 형성하는 요인으로 작용하고

있었으며, 급격한 연직 속도 차를 보이며 상승하는 열적상승 구역이 뚜렷이 나타나, 한랭한 공기의 축적이 지표 부근에서 거의 일어나고 있지 않음을 확인할 수 있다. 중규모 모델을 통한 기후변화 결과를 바탕으로 도시모델 Envi-Met.에서 나타난 바와 같이 CC 사례에서는 현열 플럭스의 증가가 도심에서 뚜렷이 나타나고 있으며, 도시의 지표 부근으로 냉각역을 유도하지 못하므로 인해 한반도 기후변화 예상 승온율보다도 도심 내 높은 승온율을 보이고 있었으며, 도심열 열돔(heat dome) 현상이 나타날 수 있음을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 기후변화에 효과적으로 대응하는 도시를 만들기 위해서는 장기적으로 도시공간 구조의 개편이 필요하고, 지역 여건에 맞는 합리적인 도시의 밀도 관리가 요구됨을 알 수 있다.

#### 4. 사 사

본 연구는 미래창조과학부의 지원을 받아 KAIST 부설 한국과학영재학교의 프로그램의 일환으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

Allwinem KJ, Leach, MJ, Stockham LW, Shimn JS, Hosker RP. 2004. Overview of joint urban 2003-An atmospheric dispersion study in Oklahoma City. Amer Meteor Soc 23:6854-6866.

Atkinson BW. 1981. Meso-scale atmospheric circulations, In. Academic Press, London, pp 495.



- Baek HJ, Kwan WT. 1994. Changes in the temperature trend analysis Korean peninsula due to urbanization. *Journal of the Meteorological Research*. 11:12-26 (in Korean with English abstract).
- Boo KO, O SN. 2000. Spatiotemporal distribution characteristics of temperature in Seoul 1999. *J Korean Meteor Soc* 36(2):499-506 (in Korean with English abstract).
- Chan CY, Chan LY. 2000. The effect of meteorology and air pollution transport on ozone episodes at a subtropical coastal Asian city, Hong Kong. *J Geophys Res* 105:20707-20724.
- Choi HJ. 2006. Numerical simulation of high-resolution meteorological and photochemical pollution. PNU Dept. Atmos. Ph.D. thesis. pp 21 (in Korean with English abstract).
- Choi, HJ, Lee HW, Sung KH. 2007. Numerical simulation of the ozone concentration in complex terrain. *J Korean Atmos Environ Soc* 23(4):430-439 (in Korean with English abstract).
- Choi, HJ, Lee HW, Kim MJ. 2010. Effect of ground and vertical observation data assimilation in accordance with synopsis characteristics on the horizontal and vertical proliferation. *J Korean Atmos Environ Soc* 26(2):177-189 (in Korean with English abstract).
- Choi, HJ, Lee HW, Jeon WB, Lee SH. 2012. The numerical modeling the sensitivity of coastal wind and ozone concentration to different SST forcing. *Atmospheric Environment* 46:554-56.
- Grell GA, Dudhia J. 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). [https://www.researchgate.net/publication/230642695Technical\\_Report](https://www.researchgate.net/publication/230642695Technical_Report).
- Ha JN. 2016. Environmental health. (in Korean with English abstract) Crown publisher: p 568.
- Hyun JK, Kim KI, Ha KJ. 2003. Analysis of estimated altitude and the wind characteristics of the atmospheric boundary layer stability. *J Korean Meteor Soc* 39(2):187-206 (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment. 2003. Building land cover maps using satellite image data(4th).
- IPCC Report. 2014. IPCC fifth assessment report - expert review. Chapter 10, p 7.
- Jeon WB, Lee SH, Choi HJ. 2009. Numerical study of improving local dispersion according to the detailed sea surface temperature data. *J Korean Atmos Environ Soc* 25(4):304-315 (in Korean with English abstract).
- Kim KW, Kim BJ, O JH, Kwan WT, Baek HJ. 2000. Studies of the effects of urbanization detected temperature changes on the Korean peninsula. *J Korean Meteor Soc* 36(5):519-526 (in Korean with English abstract).
- Kim SY, Min KD. 2001. The impact of the local topography and surface characteristics on the circulation and temperature changes during the summer in Daegu. *J Korean Meteor Soc* 37(5):487-512 (in Korean with English abstract).
- Lee MI, Kang IS. 1997. The temperature rise due to urbanization. *J Korean Meteor Soc* 33(1):429-443 (in Korean with English abstract).
- Lee SH, Lee HW, Kim YK. 2002. Numerical simulation of atmospheric dispersion in complex terrain by the urbanization. *J Korean Atmos Environ Soc* 18(2):67-83.
- Lee HW, Won HY, Choi, HJ, Lee KY. 2005. Numerical simulation on the complex coastal regions to the effects of atmospheric flow caused by the detailed elevation data. *J Korean Atmos Environ Soc* 21(2):179-189 (in Korean with English abstract).
- Lee HW, Jeon WB, Lee HW, Choi, HJ. 2008. Analysis of coastal wind due to the complicated surface refinement data. *J Korean Atmos Environ Soc* 24(6):649-661 (in Korean with English abstract).
- Lee SH, Kimura F. 2001. Comparative studies in the local circulation induced by land-use and by topography. *Bound Layer Met* 101:157-182.
- NIER. 2008. Basic research for the environmental assessment of climate change.
- Ministry of Environment. 2003. Building land cover maps using satellite image data (4th).
- Ozkeresteci I, Crewe K, Brazel AJ, Bruse M. 2003. Use and evaluation of the ENVI-MET model for environmental design and planning: An experiment on linear parks. *Proceedings of the 21 International Cartographic Conference (ICC)*.
- Pielke RA, Avissar R. 1998. Influence of landscape structure on local and regional climate. *Landscape Ecology* 4:133-

155.

Ryu CS, Sin YM, Lee SH. 2004. Numerical experiments of the effects by the coastal terrain complexity on mesoscale circulation. J Korean Meteor Soc 40(1):71-86 (in Korean with English abstract).

Statistics Korea. <http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action>

The Seoul Institute. 2000. Characteristics of air pollution in seoul. p 120.

Tong H, Walton A, Sang J, Johnny CL. 2005. Numerical simulation of the urban boundary layer over the complex terrain of Hong Kong J Atmos Envir 39:3549-3563.