

이 학 석 사 학 위 논 문

CFD 모델의 지표경계입력자료  
생성을 위한 일조 모델 개발



지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공

김 도 형

이 학 석 사 학 위 논 문

# CFD 모델의 지표경계입력자료 생성을 위한 일조 모델 개발

지도교수 : 김 재 진

이 논 문 을 석 사 학 위 논 문 으 로 제 출 함 .

2013년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

지구환경시스템과학부 환경대기과학 전공

김 도 형

김도형의 이학석사 학위 논문을 인준함.

2013년 8월



주	심	이학박사	권	병	혁	(인)
위	원	공학박사	김	재	진	(인)
위	원	이학박사	정	형	빈	(인)

# Contents

List of Figures .....	ii
List of Tables .....	iv
Abstract .....	v
I. 서론 .....	1
II. 수치 모델 .....	4
1. 일조 모델 개발 .....	4
2. 일조 모델 검증 .....	10
3. CFD 모델 .....	19
4. 수치모델 실험 설계 .....	21
III. 결과 및 토의 .....	26
IV. 요약 및 결론 .....	36
참고문헌 .....	39
감사의 글 .....	42

## List of Figures

Fig. 1. Flow chart on the numerical model for sunshine duration. ....	7
Fig. 2. Schematic diagram for the algorithm horizontally detecting the buildings which potentially affects sunshine duration at an observatory. ....	8
Fig. 3. Schematic diagram for the algorithm vertically detecting the buildings which potentially affects sunshine duration at an observatory. ....	9
Fig. 4. Three-dimensional topography and building configuration for the target area. Dot represents Dae-gu ASOS (Automated Synoptic Observing System). ....	15
Fig. 5. Comparison between the observed and calculated hourly solar angles [(a) azimuth and (b) altitude angles] on 19 December 2008 for the target area. MAE and RMSE indicate the mean absolute error and root mean square error, respectively. ....	16
Fig. 6. (a) Observed and (b) calculated solar positions from 0800 LST to 1700 LST on 19 December 2008. ....	17
Fig. 7. Buildings (shaded in black) blocking sunshine toward Dae-gu ASOS. ....	18

Fig. 8. Three-dimensional topography and building configuration for the target area. Dot represents Seoul ASOS. ....	24
Fig. 9. The CFD model domein setup information. ....	25
Fig. 10. Using sunshine model and land cover map data is created 3-Dimension topography data. ....	29
Fig. 11. Surface temperature input data by Case I, Case II, Case III. ·	30
Fig. 12. Surface temperature field by Case I, Case II, Case III. ....	31
Fig. 13. Surface wind vector field by Case I, Case II, Case III. ....	32
Fig. 14. Wind vector fields at zoom in Point of box(Case II, Case III). ....	33
Fig. 15. Case by case at temperature fields difference vale. ....	34
Fig. 16. Comparision with air temperature at ASOS observation value, WRF, Case I, Case II, Case III by CFD model value. ....	35

## List of Tables

Table 1. The observed and calculated sunshine index from 0800 LST to 1700 LST on 19 December 2008 at Dae-gu ASOS. .... 14



# CFD 모델의 지표경계입력자료 생성을 위한 일조 모델 개발

김도형

부경대학교 대학원 환경대기학과

## 요약

In this study, the numerical model was developed to Computational Fluid Dynamics (CFD) model for surface boundary input data. In order to develop sunshine model value and land cover map data is required. Also, it was verified against the observational data measured at Seoul Automated Synoptic Observing System (ASOS) located in an urban area. Three-dimensional topography and building configuration as the surface input data of the model were constructed using a Geographic Information System (GIS) data. First, the accuracy of the computing planetary positions suggested by Paul Schlyter was verified against the data provided by Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) and the results showed that the numerical model predicted the Sun's position (the solar azimuth and altitude angles) quite precisely. Then, this model was applied to reproduce the sunshine duration at the Seoul ASOS. The observed and calculated sunshine durations were similar to each other. However, the observed and calculated sunrise (sunset) times were delayed (curtailed), compared to those provided by KASI that considered just the ASOS's position information such as latitude, longitude, and elevation height but did not consider the building and topography information. Using sunshine model value and land cover map data, it is created CFD model input data. Surface input data and WRF boundary data(wind vector, temperature, TKE) is used as an input value at CFD model. shadow effects and land cover data don't consider by Case I. The CaseII is consider only shadow effects. Finally, The CaseIII is consider shadow effects and land cover data. If input data of WRF weather fields and surface boundary data enter, will be accurate CFD model numerical simulation.



# I. 서론

우리나라는 지난 수 십년 동안 급속한 경제 산업의 성장을 이루어 왔다. 이로 인한 도시로의 인구이동이 가속화 되었고, 인구 밀도 증가에 따른 주거와 생활공간에 대한 수요가 급속히 증가하였다. 이를 충족시키기 위해 대규모 고층건물들이 건설되고 건물 밀집도가 높아짐에 따라 복잡한 대규모 도시들이 출현하였다. 도시성장은 도시지역의 토지피복의 변화를 야기하였고 도시지역 주변에서의 기상과 대기환경을 변화시켰다. 대부분의 도시지역 건물과 지표면은 열 수용성이 작은 콘크리트와 아스팔트로 구성되며, 태양으로부터 일사를 받아 건물과 지표면 온도를 상승시킬 뿐만 아니라 이로 인해 도시지역의 기온을 상승시킨다. 이는 바람, 온도, 습도, 난류층 구조등 국지적 기상인자에 직간접적으로 영향을 미친다. 따라서 도시지역의 복잡한 흐름이나 기상요소에 영향을 주는 열적 환경 변화에 대한 조사와 연구가 필요하다.

지금까지 도시지역에 영향을 주는 기상인자들에 관한 선행연구를 살펴보면, 태양에너지에 의한 일조환경을 평가하는 연구들과 열섬분석이나 토지피복을 분석하는 연구들이 진행되었다. 예로 들어, 점 분석법(태양 궤적도법, Solar Chart)과 면 분석법(음영면적 시간환산법)을 이용하여 건물을 높이(층수)와 지붕 형태에 따른 일조시간을 계산하고 일조환경을 평가하는 기법(이덕형 등, 2004), 라이다(light detection and ranging, LiDAR) 자료와 수치지도를 이용하여 도심지 일조환경과 그림자 효과를 분석하는 기법(윤공현, 2005; 신동윤과 김진수, 2009) 등이 있다. 이형석 등(2005)은 지리정보시스템(Geographical Information System, GIS)을 기

반으로 하여 인터 그래프사의 마이크로스테이션(MicroStation V8)과 MTA(MGE Terrain Analyst)를 이용하여 도로 지역에 대한 일조영향을 분석하였다. 도시지역 일조환경 연구들은 대부분 아파트단지, 고층건물, 도로 건설 등 도시개발에 따른 일조 장애 및 일조권 확보를 위한 일조 환경 영향평가를 목적으로 수행되었고 연구에 사용된 자료의 전처리를 위해 고가의 시스템과 복잡한 프로그램을 사용하였다. 건물과 도로와 같이 열원들이 많이 사용되는 지역이 주변 기온상승과의 연관성이나 녹지, 나지, 하천 및 호수 산림들과 같은 토지 피복 인자들의 기온 저감에 대한 관측이나 위성자료 분석을 이용하여 다양한 방법이 연구되어 왔다. 이와 같은 토지피복의 차이가 열섬현상과 같은 도시기상인자에 변화를 일으키는 주요 원인으로 작용한 것으로 연구되었다.(Oke, 1988; Cotton and Pielke, 1995) 杉本와 近藤(1994)는 도시와 교외에서 온도관측과 토지 피복별 지표면 온도 조사를 이용한 지표면 온도 일변화 특성을 분석하였다. 콘크리트나 잔디를 대상으로 지표층 내 기온과 에너지 플럭스 성분을 직접 관측하고 분석한 연구(Kim, 2009), 여름철 수목과 구조물 등의 지표 구성 물질에 따른 열적 효과를 분석한 연구(Tanya et al, 2007), CSU-RAN 모델을 이용한 도시 열환경 특성 연구(홍원화 등, 2007), Landsat 인공위성 열적외선 영상을 이용하여 서울지역의 실제 기온 추정에 관한 연구가 진행되었다(박민호, 2012). 또한 미세규모에서의 관측실험, 풍동 수조 실험을 이용하여 지표면 가열효과가 흐름에 미치는 영향에 대한 연구들이 진행되었다(Uehara et al., 2000; Kovar-Panskus et al., 2002; Kim and Baik, 2005; Richards et al., 2006). 위의 연구를 바탕으로 2차원 도로 협곡에서 지표면 가열에 대한 흐름 영향 연구들이 진행 되었지만 상당히 제한적이

었다(Sini et al., 1996; Kim and Baik, 1999, 2001; Xie et al., 2006, 2007). 최근 CFD(Computational Fluid Dynamilcs) 모델을 이용한 3차원 도시 도로협곡에서의 흐름에 대한 도로 바닥과 건물 옥상 가열 연구가 진행 되었 으며(Kim and Baik, 2010), 이에 따른 도로 협곡에서의 건물 옥상 녹화에 대한 연구가 진행되었다. CFD 모델을 사용한 수치 연구들은 도시협곡에서 상세흐름과 열적 특징을 이해하는데 크게 기여했다. 하지만 기존 CFD 모델을 이용한 수치연구들은 지표 구성 물질과 그림자에 따른 열적 효과를 배제한 수치 모의연구를 진행하였고 열적 효과를 고려함에 있어 건물 옥상이나 바닥에만 열적효과를 고려하여 도시협곡뿐만 아니라 도시 전체적인 흐름이나 온도를 수치모의 하는데 있어 상당한 제약이 있다.

본 연구에서는 도시지역의 상세 흐름이나 기상요소에 영향을 주는 열적 환경 변화를 평가하기 위한 목적으로, 토지피복과 그림자 효과를 고려하여 도시지역 열 환경 변화를 평가 할 수 있는 방안을 강구하고자 한다. CFD 모델은 상세규모 흐름과 온도 분석에 적합하다. 따라서 지표면 구성물질의 온도, 태양의 방위각과 고도를 이용한 일조 차단(그림자 효과)을 CFD 모델과 접합하여 열적 효과를 고려한 도시규모 상세 흐름과 온도 특성을 분석 하고자 한다. 이 논문은 총 4장으로 구성되며, 연구의 배경 및 필요성에 대하여는 상기의 제 1장에서 이미 서술하였다. 제 2장에서는 이 연구에서 개발된 CFD-일조 접합 모델에 대하여 서술하고, 제 3장에서는 개발된 모델을 수치 모의하여 이전 수치연구들과 비교 분석 한다. 마지막 장에서는 이 연구의 전반적인 요약 및 결론에 대하여 서술한다.

## II. 수치모델

### 1. 일조 모델 개발

일조란 태양빛이 내리쬐는 것으로, 태양광선을 총체적으로 지칭하는 의미로도 이해 할 수 있다(금기정 등, 2009). 그리고 태양광선이 구름이나 안개로 가려지지 않고 지상까지 도달하는 것으로도 이해되며, 태양광선이 비친 시간을 일조시간이라고 한다(신동윤과 김진수, 2009). 이 연구에서는 일조 관측의 측면에서 일조의 개념을 태양광선에 의한 음영효과의 유무로 정의하고, 일중 태양의 위치에 따라 주변 장애물에 의해 형성되는 음영(일조차단) 여부를 평가할 수 있는 모델을 개발하였다.

Fig. 1은 이 연구에서 개발한 일조 차단 모델의 알고리즘을 도식적으로 나타낸 것이다. 이 연구에서 사용된 지형자료는 수평 해상도  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 의 GIS 자료로부터 취득한 상세 공간정보(등고선, 건물 정보 등)에 기반하여 초고해상도의 3차원 지표자료를 구축한다(Baik *et al.*, 2009; 이주현 등, 2009; 이영수와 김재진, 2011; 최희욱 등, 2012). 이를 기반으로 고층 건물 등 일조에 영향을 미치는 장애물들을 최대한 상세하고 정확하게 묘사하였다.

다음으로 건물에 정확한 지리적 위치정보(위경도)을 이용하여 대상일에 대해 태양 방위각과 고도각을 산정하고 태양 위치를 결정한다. 여기에서 태양 방위각과 고도각 산정은 Paul Schlyter의 행성위치계산법을 이용하였다(Schlyter, 2010). 이 방법은 TDT(Terrestrial Dynamical Time)를 기준으로 한 일수(Day Number)로부터 근일점 경도, 이심률, 평균근

점이각, 황도 기울기 등 태양 위치를 찾는 데 필요한 태양궤도요소를 계산하고, 이를 이용하여 태양 적경과 적위를 구한 후, 좌표계 변환을 통하여 태양 방위각과 고도각을 산정한다. 각 요소에 대한 계산식 등은 Schlyter (2010)에 자세히 기술되어 있다.

상기에서 구축한 3차원 지표자료, 태양 방위각, 고도각을 적용하여 건물과 지형의 일조차단 여부를 평가하는 방법은 수평계산과 연직계산으로 구분하여 진행된다. 수평계산에서는 건물을 중심격자로 하여 건물과 주변 수평격자 사이의 최소각과 최대각을 Fig. 2와 같은 방법으로 모든 수평격자에 대하여 계산한다. 계산된 최소각과 최대각을 기반으로 태양 방위각을 적용하여 식(1)과 같이 건물의 일조에 영향을 미치는 격자를 탐색한다.

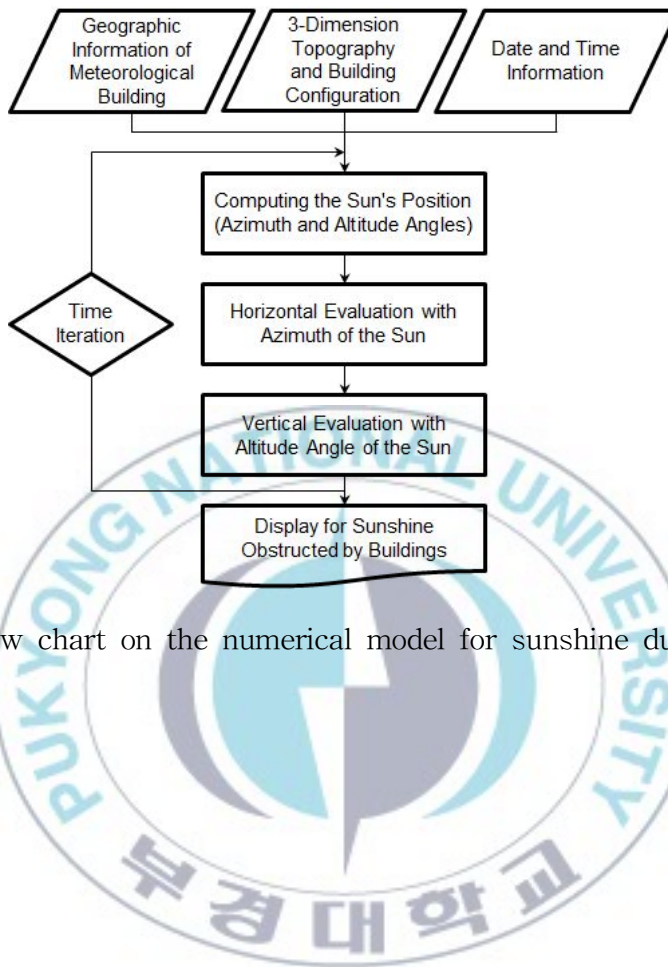
$$\begin{aligned} r_{\min}(i,j) \leq a_{sun} \leq r_{\max} & : \textit{Shadow Grid} \\ r_{\min}(i,j) \leq a_{sun} \leq r_{\max} & : \textit{Pass} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $r_{\min}$ 과  $r_{\max}$ 는 각각 관측지점과 주변 수평격자 사이의 최소각과 최대각이며,  $a_{sun}$ 은 태양 방위각이다.  $i$ 와  $j$ 는 각각  $x$ 와  $y$  방향의 수평격자이다. 즉,  $r_{\min}$ 과  $r_{\max}$  사이에 태양 방위각이 존재하는 격자들은 관측지점의 일조에 영향을 미치는 격자로 판단하고 (Shadow\_Grid), 그 외의 경우에 해당하는 격자들은 영향이 없는 것으로 간주한다(Pass). Shadow\_Grid로 판단된 격자들에 대하여는 다음의 연직계산을 수행한다.

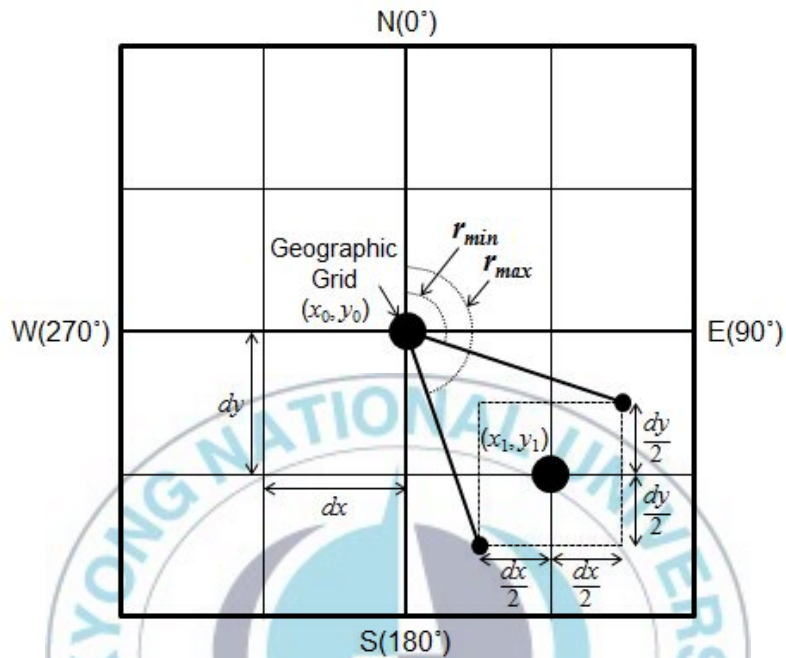
$$\begin{aligned} \theta(i,j) \geq \beta_{sun} & : \textit{Building} \\ \theta(i,j) \leq \beta_{sun} & : \textit{Sunshine} \end{aligned} \quad (2)$$

연직계산에서는 건물과 장애물 사이의 고도각 (Fig. 3)과 태양 고도각을 이용하여 식(2)와 같이 관측지점의 일조차단 여부를 판별한다. 여기서  $\theta$ 는 장애물 고도각이고,  $\beta_{sun}$ 은 태양 고도각이다. 즉, 건물을 기준으로 장애물 고도각이 태양 고도각보다 큰 경우는 해당 격자에 존재하는 장애물에 의해 건물의 일조가 차단되고, 반대 경우는 일조차단이 없는 것으로 판단한다.

마지막으로, 계산시간 간격 (초, 분, 시간 등)에 따른 반복계산을 통하여, 대상일의 일중 태양 방위각과 고도각 변화에 따른 주변 장애물에 의한 건물의 일조차단 여부를 계산한다. 또한 대상지역의 모든 건물과 지형 격자에 계산하여 일중 태양의 위치에 따라 그림자 효과를 나타낼 수 있다. 따라서 이 연구에서 개발한 일조 차단 모델은 상기의 일련 과정을 통하여 음영이 생성되는 장애물의 위치, 일조차단 여부, 일조차단 시간 등을 예측하고 평가할 수 있다.

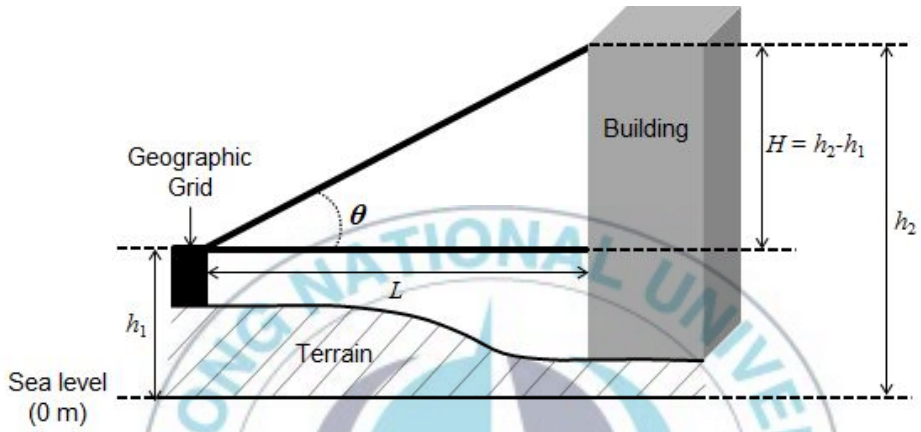


**Fig. 1.** Flow chart on the numerical model for sunshine duration.



**Fig. 2.** Schematic diagram for the algorithm horizontally detecting the buildings which potentially affects sunshine duration at an observatory.





**Fig. 3.** Schematic diagram for the algorithm vertically detecting the buildings which potentially affects sunshine duration at an observatory.

## 2. 일조 모델 검증

이 연구에서는 일조관측을 포함하는 기상청 산하의 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 관측지점 중, 도심지에 위치하여 주변 고층 건물들로 인한 관측소의 일조차단이 우려되는 대구 ASOS 지점을 대상으로 앞의2장에서 개발한 일조 관측환경 평가 모델을 검증하였다. 우선, 관측지점 (35°53'N, 128°37'E)을 중심으로 1 km × 1 km의 수평영역을 설정하고, GIS자료를 기반으로 수평 해상도 10 m, 연직 해상도 1 m ( $x \times y \times z = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ )의 3차원 지표자료를 구축하였다 (Fig. 4). Fig. 4에 보인 바와 같이, 대구 ASOS 지점을 중심으로 한 대상영역은 건물 밀집도가 매우 높고, 관측소 주변에 다수의 고층 건물들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 따라서 태양 고도각이 낮은 일출 직후와 일몰 직전 시간대에는 태양 방위각 상에 위치한 고층 건물들이 관측지점의 일조에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 또한, 일조 관측환경 평가에 있어서 지표자료의 해상도에 따른 예측 정확도를 분석하기 위하여, GIS자료와 동일한 1 m 해상도 ( $x \times y \times z = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ )의 매우 상세한 지표자료에 대해서도 추가적인 검증을 수행하였다.

일조는 구름이나 안개에 영향을 많이 받기 때문에 건물과 같은 장애물에 의한 영향을 평가하기 위해서는 구름이 없는 맑은 날 (전운량 = 0)을 선정하여야 한다. 또한, 지속적인 도시개발 등으로 인해 지형 및 건물 자료가 변화하기 때문에, 모델의 정확한 검증을 위해서는 GIS 자료의 제작 년도 (2008년)가 고려되어야 한다. 2008년 중에 구름이 없는 맑은 날은 총 36일이 관측되었다. 이 연구에서는 장애물에 의한 관측지점의 일조차단 영향을 잘 볼 수 있도록, 태양 남중고도가 낮아서 그림자 길이가 가장

긴 시기인 동지에 가까운 2008년 12월 19일을 대상으로 선정하였다. 시간 간격을 1분으로 하여 00시부터 24시까지 계산하였고, 일출 후부터 일몰 전까지의 일중 시간대를 중점적으로 분석하였다.

태양 위치를 결정하는 태양 방위각과 고도각 계산 결과를 한국천문연구원 (Korea Astronomy and Space Science Institute, KASI)에서 제공하는 시간별 관측 자료와 비교·검증하였다. 태양 방위각은  $0^{\circ}$ 에서  $360^{\circ}$  (Fig. 5a), 고도각은  $-90^{\circ}$ 에서  $90^{\circ}$ 사이의 값으로 나타낸다 (Fig. 5b). 평가 대상일 (2008년 12월 19일 00시부터 24시) 자료를 검증한 결과, Fig. 5에서 보인 바와 같이, 계산된 태양 방위각과 고도각은 관측 자료와 거의 일치하였다. 방위각의 경우, 평균절대오차 (Mean Absolute Error, MAE)가  $0.04^{\circ}$ , 평균제곱근오차 (Root Mean Square Error, RMSE)가  $0.07^{\circ}$ 이었고, 고도각의 경우, MAE가  $0.03^{\circ}$ , RMSE가  $0.05^{\circ}$ 로 나타났다. 상기의 관측 및 계산된 태양 방위각과 고도각을 이용하여 대구 ASOS 지점을 중심으로 한 대상영역에 대한 태양 위치를 도식화하였다 (Fig. 6). 평가 대상일의 일출 시간은 07시 31분이고 일몰 시간은 17시 14분이므로, 일출 후부터 일몰 전까지의 시간대인 08시부터 17까지의 일중 태양의 위치를 나타내었다. 앞에서 기술한 바와 같이, 계산된 태양 방위각과 고도각으로 부터 산정된 일중 시간별 태양 위치는 관측 자료와 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서, 이 연구에서 Paul Schlyter의 행성위치계산법을 기반으로 개발한 일조 관측환경 평가 모델은 대상지역에 적용한 태양 위치 (태양 방위각과 고도각)를 매우 정확하게 계산하고 있음을 알 수 있다.

기상청에서 제공하는 일조 관측 자료는 1시간 평균값으로 0과 1 사이의 값(1시간 동안 일조가 전혀 없는 경우 = 0, 1시간 내내 일조가 있는 경우 = 1)을 갖는다. 본 연구에서는 관측 자료와 비교하기 위하여,

일조 관측환경 평가 모델에 의한 계산결과도 1시간 평균값으로 출력하여 관측자료와 비교·검증하였다. Table 1은 평가 대상일 중에서 일출 후부터 일몰 전까지의 시간대 (08시부터 17까지)에 대해, 대구 ASOS 지점의 일조 관측자료와 계산결과를 나타낸다. 수치 모델의 경우, 지표자료의 해상도가 각각 10 m와 1 m인 경우에 대해 모두 계산하였다. 먼저, 일중 시간대별 일조를 살펴보면, 08시와 09시, 16시와 17시에 1보다 작은 값이 관측되었고, 모델 계산에서도 동일한 결과를 보였다. 지형이나 건물을 고려하지 않고 대구 ASOS 지점의 위치 정보 (위·경도, 해발고도)만을 이용했을 경우의 일출 시간과 일몰 시간이 각각 07시 31분과 17시 14분임을 고려했을 때, 일조가 시작되는 시간은 08시 18분으로 약 47분 지연되었고 일조가 끝나는 시간은 16시 6분으로 약 1시간 8분이 단축되었음을 확인할 수 있다. 또한, 대상일이 구름이 없는 맑은 날이었음을 상기하였을 때, 16시와 17시 사이에도 건물에 의한 일조 차단(6분)이 존재함을 알 수 있다. 이는 태양 고도각이 낮고 그림자 길이가 가장 길어지는 일출 후 오전이나 일몰 전 오후 시간대에 주변 장애물들에 의한 관측지점의 일조차단이 발생함을 의미한다.

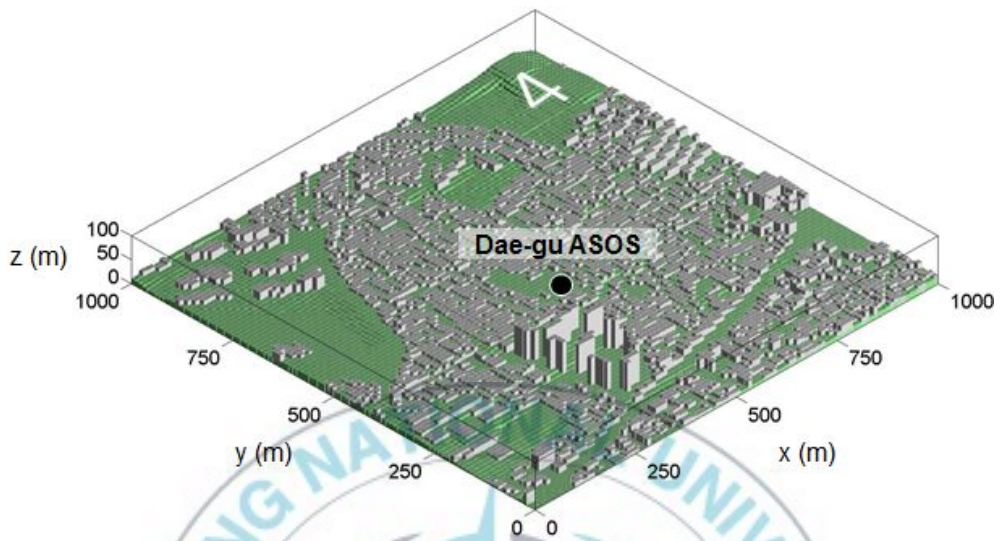
일조 관측환경 평가 모델로부터 관측지점의 일조환경에 영향을 미치는 장애물의 위치를 해당 시간대별로 탐색하였다 (Fig. 7). 3.1절에서 서술하였듯이, 본 연구에서는 태양 남중 고도가 낮은 시기인 겨울 중 하루를 평가 대상으로 선정하였기 때문에, 오전 시간대에는 남동쪽에 위치한 건물들이, 오후 시간대에는 남서쪽에 위치한 건물들이 관측지점의 일조에 영향을 미치는 것으로 평가되었다. 08시에는 태양 고도각이 매우 낮고 대상지역이 서쪽보다 동쪽이 약간 높은 지형이기 때문에, 태양 방위각 상에 존재하는 남동쪽의 많은 건물들이 관측지점의 일조차단을 유발하는 장애물로 평가되었다. 09시에는 태양 고도각이 서서히 커짐에

따라 관측지점과 가까운 일부 건물들에 의해 일시적인 일조차단이 발생하는 것으로 평가되었다 (1시간 평균 관측 일조 = 0.7). 16시에는 관측지점의 남서쪽에 위치한 고층 건물에 의해 일시적인 일조차단이 발생하였고 (1시간 평균 관측 일조 = 0.9), 일몰에 가까워 지는 17시에는 더 많은 건물들이 일조를 차단하는 장애물로 평가되었다.

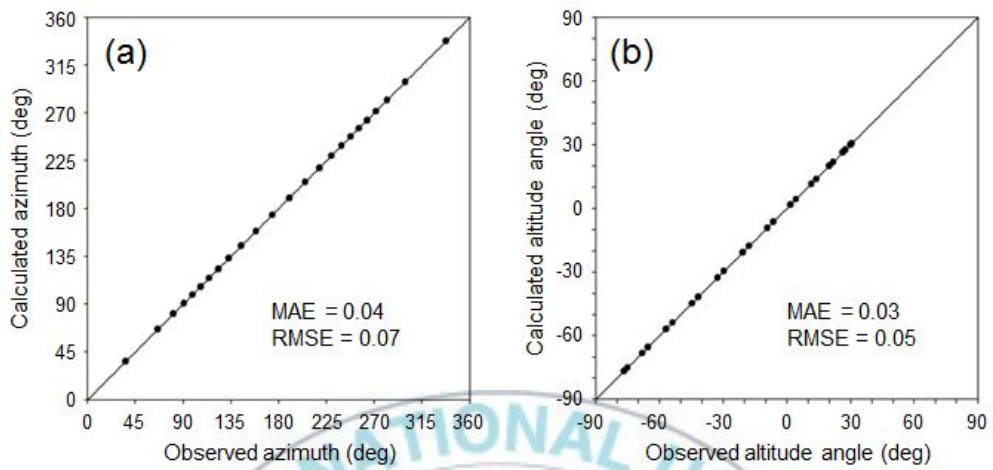


Time (LST)	Observed Sunshine	Calculated Sunshine	
		10 m Resolution	1 m Resolution
0800	0.00	0.00	0.00
0900	0.70	0.75	0.73
1000	1.00	1.00	1.00
1100	1.00	1.00	1.00
1200	1.00	1.00	1.00
1300	1.00	1.00	1.00
1400	1.00	1.00	1.00
1500	1.00	1.00	1.00
1600	0.90	0.28	0.53
1700	0.10	0.18	0.05

**Table 1.** The observed and calculated sunshine index from 0800 LST to 1700 LST on 19 December 2008 at Dae-gu ASOS.

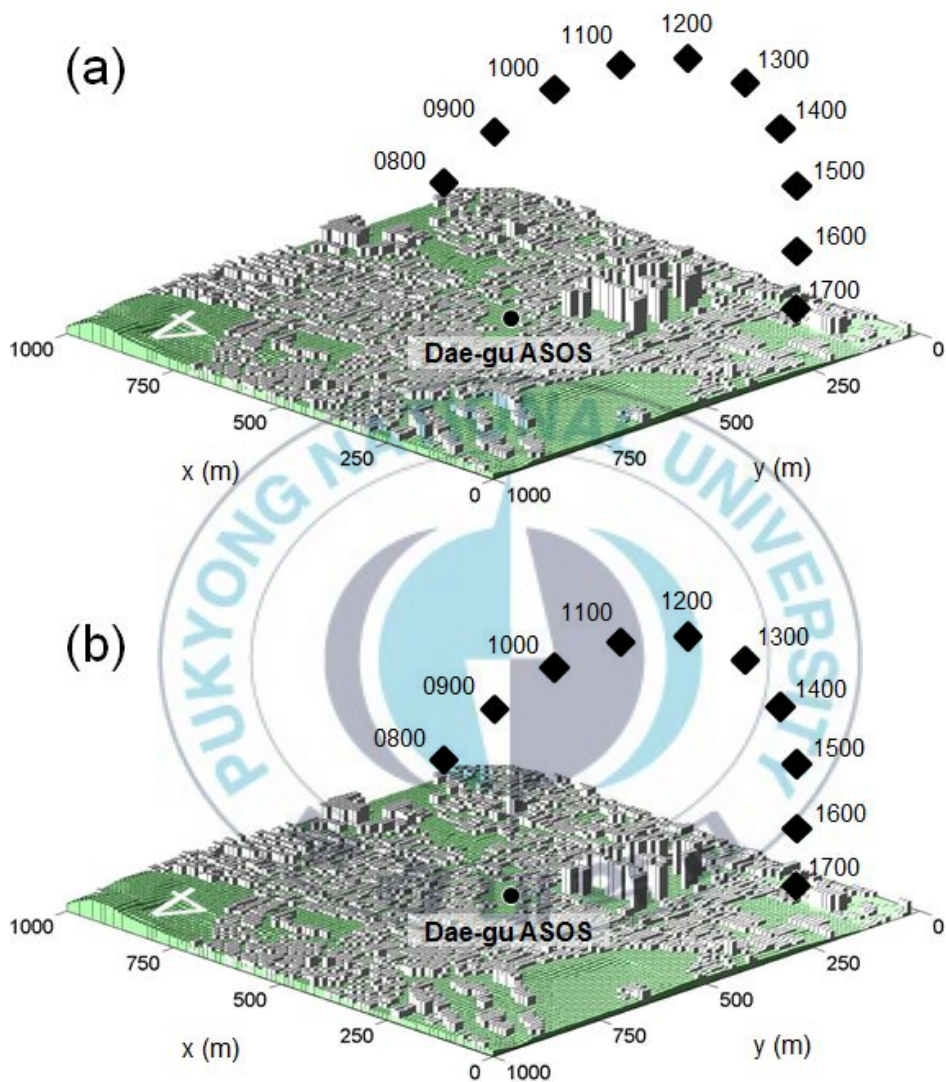


**Fig. 4.** Three-dimensional topography and building configuration for the target area. Dot represents Dae-gu ASOS (Automated Synoptic Observing System).

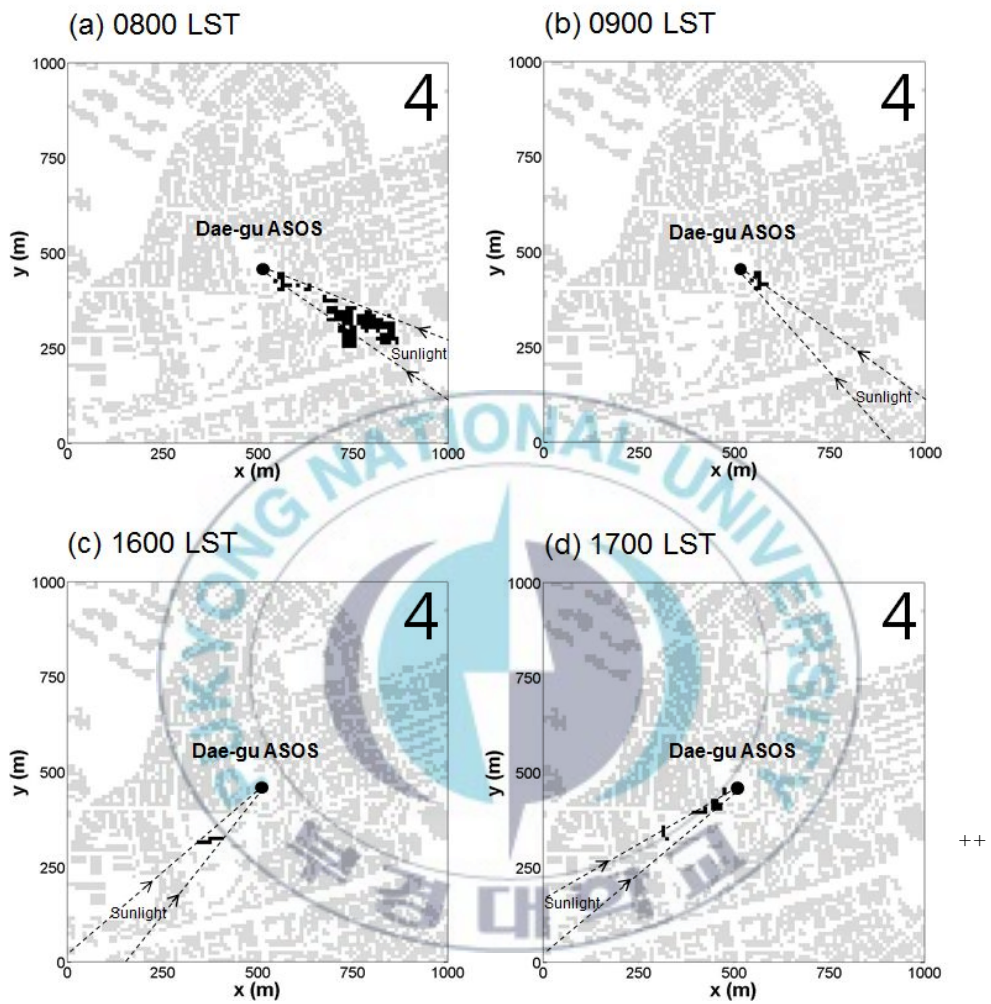


**Fig. 5.** Comparison between the observed and calculated hourly solar angles [(a) azimuth and (b) altitude angles] on 19 December 2008 for the target area. MAE and RMSE indicate the mean absolute error and root mean square error, respectively.





**Fig. 6.** (a) Observed and (b) calculated solar positions from 0800 LST to 1700 LST on 19 December 2008.



**Fig. 7.** Buildings (shaded in black) blocking sunshine toward Dae-gu ASOS.

### 3. CFD 모델

이 연구에서 사용된 CFD 모델은 김재진(2007)이 사용한 것과 동일하다. 이 모델은 3차원 비정수 (nonydrostatic), 비회전 (nonrotating), 비압축 (incompressible) 대기 흐름계를 가정하며, 코리올리 효과를 배제한 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식계에 기초한 모델이다. 난류 모수화를 위하여 재규격화군 (renormalization group, RNG) 이론에 기초한 K- $\epsilon$  난류 종결 방법을 사용하였다 (Yakhot *et al.*, 1992). 지배 방정식계는 유한체적법 (finite volume method)과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘 (Patankar, 1980)을 사용하여 엇갈림 격자계 (staggered grid system)에서 수치적으로 풀이된다. 레이놀즈 평균한 나비에-스톡스 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \delta_{i3} g \frac{T^*}{T_0} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{T' u_j}) + S_h \quad (5)$$

여기서,  $t, x_i, U_i, T, P^*$ 는 각각 시간,  $i$  번째 카테시안 좌표계에서  $i$  번째 평균 속도 성분, 평균 온도, 기준 값으로부터의 압력편차를 나타낸다.  $u_i$  와  $T'$ 은 각각  $i$  번째 평균 속도 성분( $U_i$ )과 평균 온도( $T$ )와의 차이를 나타낸다.  $\rho_0$ 는 공기 밀도,  $g$ 는 중력 가속도,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta,  $T_0$ 는

기준온도,  $T^*$ 는 기준 값으로부터 온도 편차를 나타낸다.  $\nu$  와  $\kappa$  는 각각 운동학 점성, 공기의 열확산을 나타내고,  $S_h$ 는 열의 source/sink 양을 나타낸다. 식(3), (5)에서 레이놀즈 스트레스, 열속은 다음과 같이 모수화 된다.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k, \quad (6)$$

$$-\overline{T' u_j} = \kappa_t \frac{\partial T}{\partial x_j}. \quad (7)$$



## 4. 수치모의 실험 설계

이 연구에서는 일조모델과 CFD 모델을 접합하여 열적 효과를 고려한 도시규모 상세 흐름과 온도 특성을 분석하기 위하여 서울 ASOS (Automated Synoptic Observing System) 지점을 포함하는 서울 종로구 일대를 대상지역으로 하였다 (Fig.8). 일조 관측을 포함하는 기상청 산하의 ASOS 관측지점 중, 도심지에 위치하여 건물과 지형에 의한 그림자 효과를 검증 할 수 있는 서울 ASOS 지점을 포함하는 서울 종로구 일대를 대상으로 일조 모델을 수치모의 하였다. Fig.8에 보인 바와 같이, 서울 종로구 일대는 건물 밀집도가 매우 높고 다수의 고층 건물들과 폭이 큰 도로들이 존재하며, 북서쪽에는 산지, 대상지역의 곳곳의 나지(토양, 운동장) 고루 잘 분포되어있다. 따라서 콘크리트, 아스팔트, 녹지, 산지, 나지등과 같이 지표면 구성에 따른 지표면의 온도 차에 대한 영향을 연구하기에 위해 서울 종로구 일대가 적합하다. 일조는 구름이나 안개에 영향을 많이 받기 때문에 건물과 같은 장애물에 대한 그림자 효과를 고려하기 위해서 구름이 없는 맑은 날을 선정 하여야 한다. 또한, 지속적인 도시개발로 인해 지형 및 건물자료가 변화하기 때문에, 모델의 정확한 검증을 위해서는 GIS 자료의 제작 년도 (2008년-2009년)가 고려되어야 한다. 그리고 지표면 구성에 따른 지표면의 온도차를 고려하기 위해 지표면 가열온도를 최대로 가정할 수 있는 여름철로 선정했다. 따라서 2008년 7월 9일을 대상일로 선정했다.

대상일에 대한 연속적인 초기 경계 입력 자료로 사용하기 위해 WRF 기상장을 사용하였다. 이 연구에서 사용한 CFD-WRF 모델은 Choi

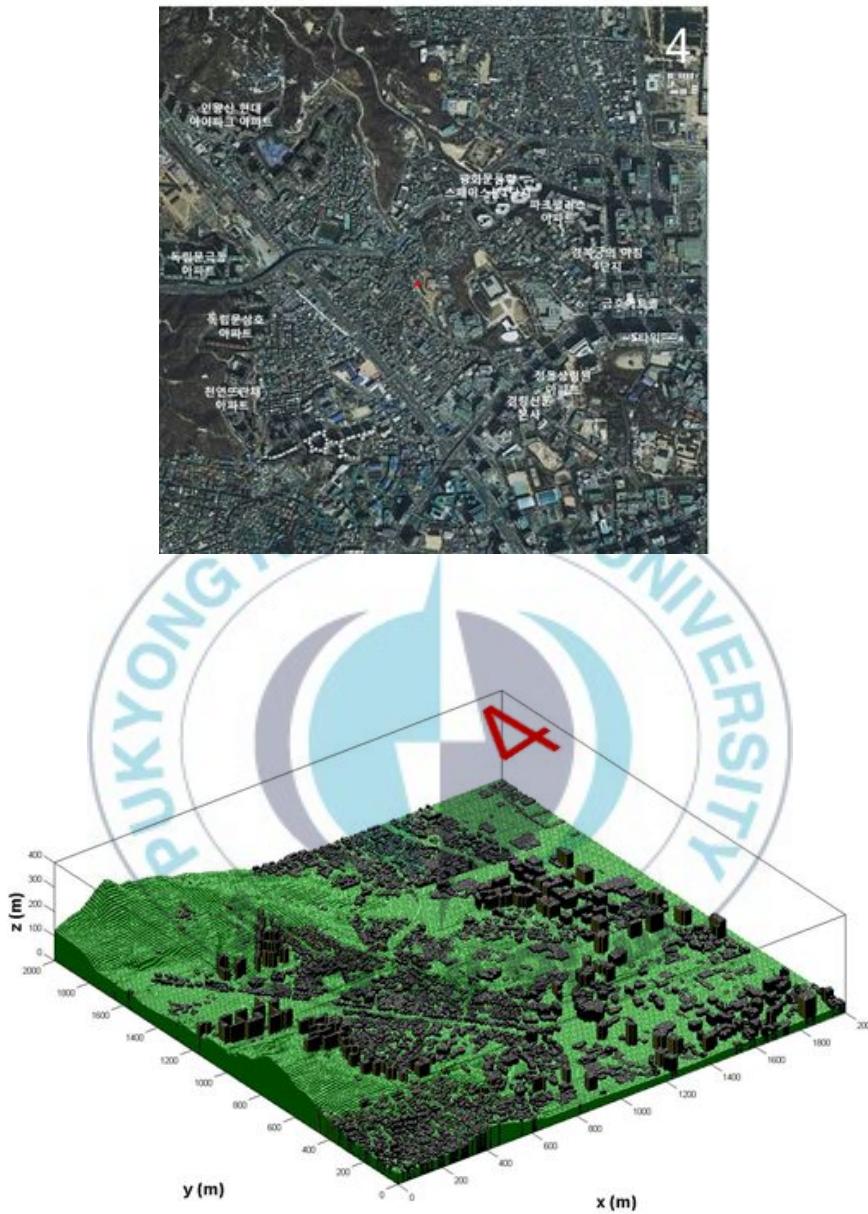
et al,(2012) 사용한 모델과 동일하다. WRF 결과 값은 실질적이고, 연속적인 초기 및 경계 입력 자료로 사용하였다. WRF 모델의 적분시간은 Rynge-kutta 3<sup>rd</sup> order로 하였으며, 미세물리과정은 WSM 6-class graupel scheme (Hong and Lim, 2006)을 사용하였다. 또한 장·단파복사는 각각 RRTM scheme (Mlawer et al., 1997)과 Dudhia scheme (Dudhia, 1996)을 사용하였다. 지표면은 Monin-Obukhov (Janjic) scheme을 적용하였고, 지면과정에 대해서는 Unified Noah Land-Surface Model (Mitchell, 2005)을 사용하였다. 그리고, 경계층은 Mellor-Yamada Janjic TKE scheme (Janjic, 1994)을 사용하였으며, 적운 모수화에 대해서는 Kain-Fritsch Eta scheme (Kain and Fritsch, 1993)을 사용하였다.

WRF 모의 영역은 한반도를 중심으로 27, 9, 3, 1 km 수평해상도를 갖는 4개 영역으로 등격자계를 구성하였고, 각각 179 × 143, 93 × 147, 69 × 69, 60 × 48의 격자수를 갖는다. 연직 층은 27개의 층으로 구성하였다. WRF 모델의 초기 입력자료는 1° 간격의 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) FNL(Final) 재분석자료를 이용하였다. 이 연구에서는 WRF 모의 영역 중 4번째 영역인 수도권 영역 내의 X, Y 격자를 구하고, 각 격자점에서의 바람성분과 난류운동에너지 (Turbulence Kinetic Energy, TKE)를 수평 내삽한 후, CFD 모델의 시간에 따른 초기 조건 및 유입 경계 조건으로 사용하였다. WRF 모델의 연직층은 지형을 따르는 시그마 좌표계로 되어있으며, 이를 CFD 모델의 연직 격자고도로 변환시켜 주었다. 이 때, 35 m 이상의 경우는 WRF 자료를 그대로 사용하고, CFD 연직층에 해당하는 35 m 미만의 경우는 wind profile power law의 지수를 계산하여, 각 시간대별로 예측된 지수를 바탕으로 바람성분을 계산하였다. TKE는 선형 보간법을 사용하여 경계 자료를 구축하였다.

CFD 모델의 지표면 온도 설정은 CFD 모델에서 열 플럭스에 대하여 전혀 고려하지 못하기 때문에 지표면 온도를 가정 하여 사용하였다. 여름철 아스팔트(도로) 온도는 최대 60°까지 가열되며, 콘크리트(건물은 아스팔트에 비해 15° 낮은 온도를 나타내었다(Asaeda et al, 1996). 녹지를 구성하는 수목의 종류에 따라 표면 온도가 25° ~ 36° 나타났다(NHWang et al, 2003). 나지의 표면온도는 34° ~ 37°, 건물과 건물 그림자의 온도 차이는 5° ~ 37° 사이로 나타났다(Kim and Yeam, 2012). 수목의 표면온도와 수목 그림자 부분의 온도 차이는 3° ~ 5° 나타났다(choi et al, 2003).

CFD 모델에 대한 모델 정보는 Fig 9.에서 요약하였다. CFD의 도메인 설정은 각각 x, y, z로 부터 도메인의 크기는 2 km × 2 km × 800m, 격자수는 200 × 200 × 160, 격자 간격은 10m × 10m × 5m 이다. 모의 시간은 3600초 이며 시간간격은 1초이다.





**Fig. 8.** Three-dimensional topography and building configuration for the target area. Dot represents Seoul ASOS (Automated Synoptic Observing System).



모델 정보		
일조 및 CFD 도메인	도면크기	2000 m × 2000 m × 800 m
	격자 수	200 × 200 × 160
	격자 간격 (x, y, z)	10 m × 10 m × 5 m
입력 자료	초기 및 경계자료	WRF data (u, v, w, T and TKE)
	지표면 온도	Building area = 45° Street area = 60° Green area = 33° Soil area = 37°
	그림자 영역 온도	Building area(s) = 40° Street area(s) = 56° Green area(s) = 28° Soil area(s) = 32°
모의 시간	3600s	
시간 간격	1s	

Fig. 9. CFD model domain setup information.

### Ⅲ. 결과 및 토의

일조 모델을 이용하여 관측지점 뿐만 아니라 모든 격자에 대한 그림자 효과를 고려했다. 그림자 효과뿐만 아니라 토지 피복별 온도를 고려하기 위하여 22가지로 분류된 중분류 토지 피복 자료를 사용했다 (Fig.10). 중분류 토지 피복자료와 일조 모델 결과 값을 결합 하여, CFD 모델 입력 자료에 지표면 구축 자료를 적용했다. 또한 지표면 경계 입력 자료는 콘크리트 지역, 콘크리트 음영지역, 도로지역, 도로 음영지역, 녹지 지역, 녹지 음영지역, 토지지역, 토지 음영지역으로 8가지 경우의 차등가열을 가정했다. 실험 Case I 은 그림자효과와 토지 피복을 고려하지 않는 경우를 가정하고 CFD 모델만 수행했다. Case II는 그림자 효과만 고려한 경우를 가정하고 CFD 모델을 수행했다. 또한 Case III는 그림자 효과와 토지 피복별 온도를 고려한 경우를 가정하고 CFD 모델을 수행하였다. 고층건물에 대한 그림자 효과가 나타났으며 토지피복의 종류에 따라 온도가 적용된다. 중규모 토지피복 자료가 건물과 지형을 구축하는 GIS 자료와 해상도의 차이 때문에 약간의 건물에 위치와 도로의 위치가 약간 왜곡되어 그림에 나타났다. 또한 낮은 건물들에 대한 그림자 효과가 잘 나타나지 않았지만 전체적으로 고층 건물에 대한 그림자 효과가 잘 나타나기 때문에 CFD 모델의 지표면 온도자료에 사용하기에는 충분하다.

Fig. 11은 Case I의 기존 CFD 모의 방식으로 그림자 효과와 토지 피복을 고려하지 않는 경우와 Case II의 그림자 효과만 고려한 경우를 가정, Case III의 그림자 효과와 토지 피복별 온도를 고려한 경우를 가정

한 지표온도 입력장들을 나타낸다. 대상지역의 건물을 2차원 적으로 잘 표현 하고 있으며 Case I의 경우 동일한 온도( $45^{\circ}$ )를 설정 하였다. Case II의 경우 건물에 의한 그림자의 온도를 고려하였고, Case III의 경우 위의 8가지 경우에 대한 차등가열을 고려하였다.

Fig. 12은 Case I, Case II, Case III의 경우의 지표면 온도장을 나타내었다. 대체로 건물 밀집지역(콘크리트 지역)에 온도가 높게 나타났다. 특히, 고층 건물이 존재하는 동쪽 건물군과 남동쪽 건물군, 남서쪽 건물 밀집지역이 온도가 높게 나타났다. 도로(아스팔트)의 가정온도로 인해, 도로주변과 도로주변 건물의 대기온도가 높게 나타났다. 동쪽 큰 도로와 고층 건물들이 함께 존재 하여 높은 온도를 나타내고 서쪽에 큰 도로로 인해 높은 온도가 나타났다. Case III의 경우는 다른 케이스 보다 각 지역의 온도의 차이가 확연하게 나타났다.

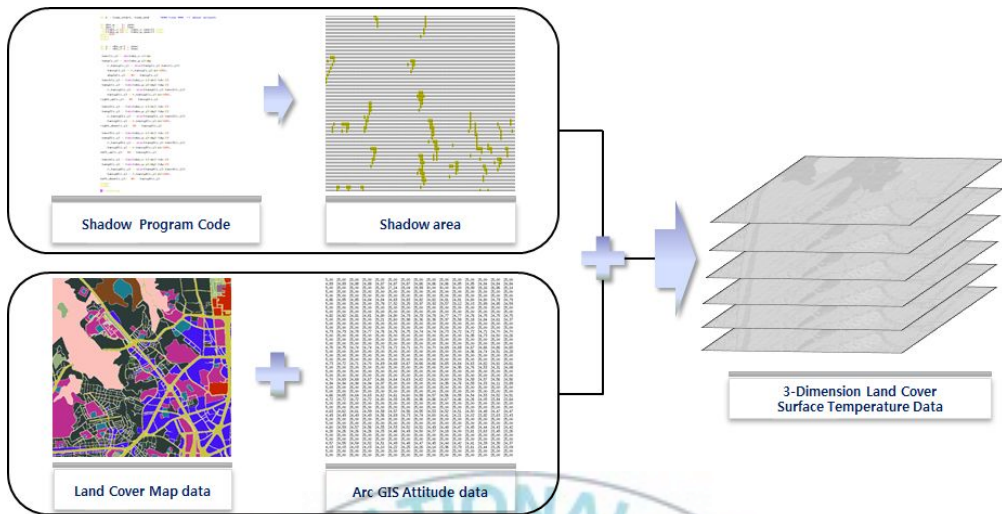
Fig. 13는 Case I, Case II, Case III의 경우의 바람 벡터장이다. 높고 다양한 건물 배치로 인해 복잡한 흐름이 나타났다. 건물 군집에서는 복잡하고 약한 흐름이 나타났고 도로는 양쪽 건물에 의해 한쪽 방향으로 흐름이 이동했다. 또한 북서쪽 산지 지형에서는 들어오는 유입류에 따라 강한 흐름이 나타났다. Fig. 14는 (a)는 Case II, (b)는 Case III의 경우에서 온도차이가 나타나는 지역에 대한 상세 흐름을 살펴보았다. 풍속의 차이는 크지 않았으나 풍향의 변화가 있었다는 것을 나타낸다.

Fig. 15는 Case I, Case II, Case III의 각각의 온도 차이를 나타낸다. (a)는 그림자 효과차이( Case II - Case I), (b)는 그림자와 토지 피복 온도 차이( Case III - Case I), (c)는 토지 피복 온도 차이( Case III - Case I)를 나타낸다. 그림자 효과에 의해 그림자 영역 부근에서 대기

온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 토지 피복별 온도가 대기 온도에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 16은 ASOS 관측 고도에서 관측 대기온도와 각각 실험과 비교하였다. 2008년 7월 09일 14시 ASOS 관측 값은  $32.2^{\circ}\text{C}$  로 나타났다. WRF 모의 값은 관측값 보다  $0.56^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되었고, Case I 은 관측값 보다  $0.25^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되었다. Case II의 경우는  $0.45^{\circ}\text{C}$ 으로 Case I 보다 정확도가 낮아졌다. 흥미로운 부분은 Case III의 온도가  $0.02^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되어 관측 값과 가장 유사한 값을 나타냈다.

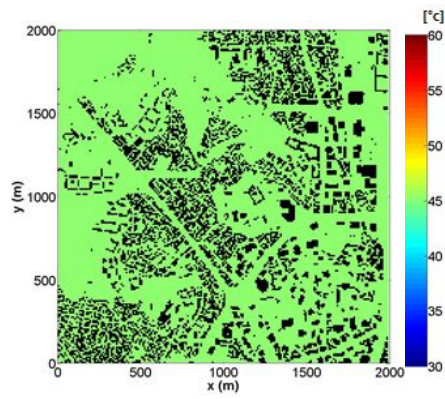




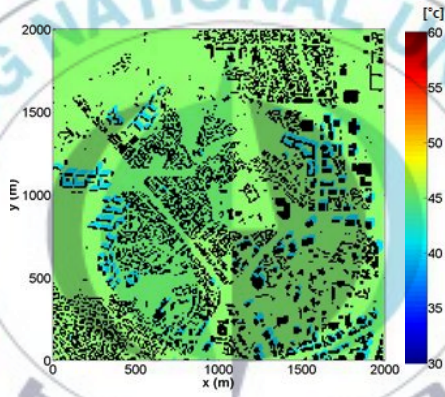
**Fig. 10.** Using sunshine model and land cover map data is created 3-Dimension topography data.



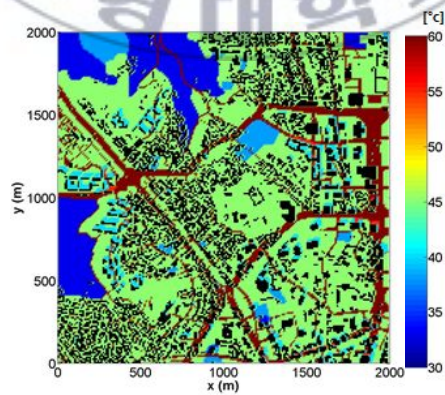
(a) Case I



(b) Case II

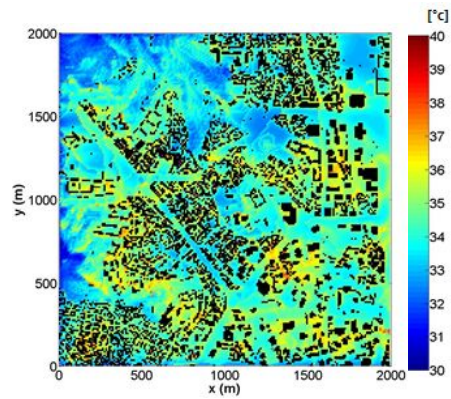


(c) Case III

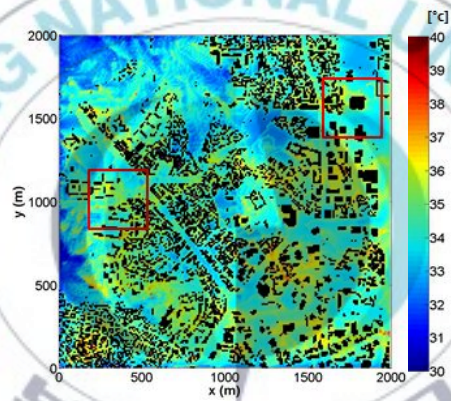


**Fig. 11.** Surface temperature input data by Case I, Case II, Case III.

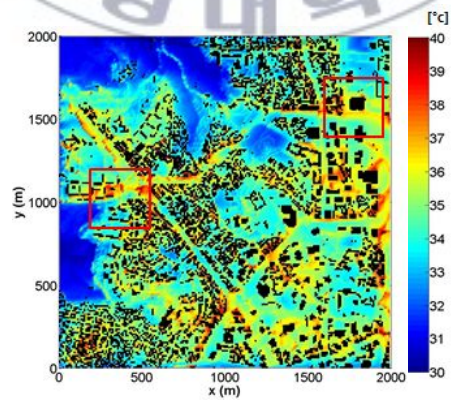
(a) Case I



(b) Case II

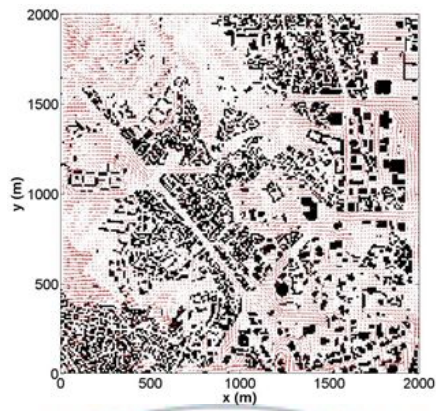


(c) Case III

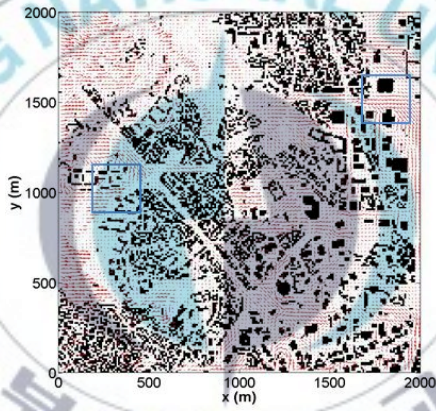


**Fig. 12.** Surface temperature fields by Case I , Case II, Case III.

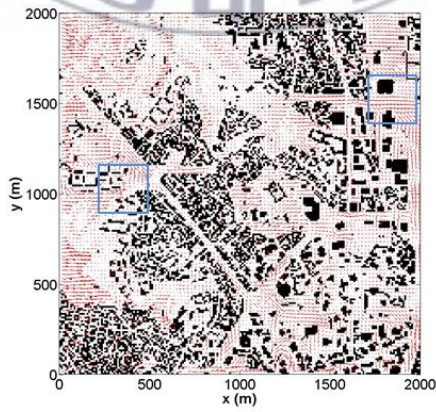
(a) Case I



(b) Case II



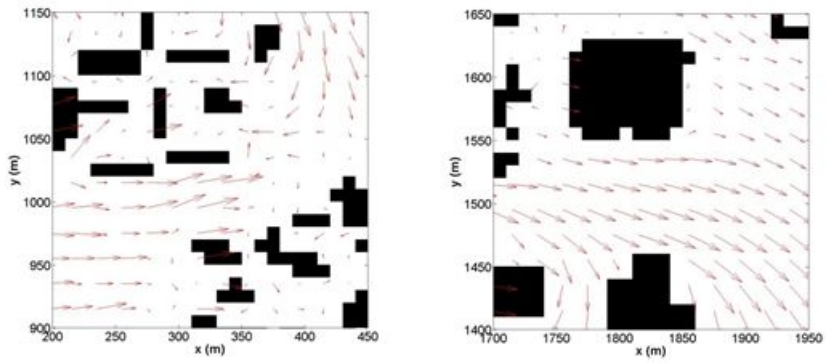
(c) Case III



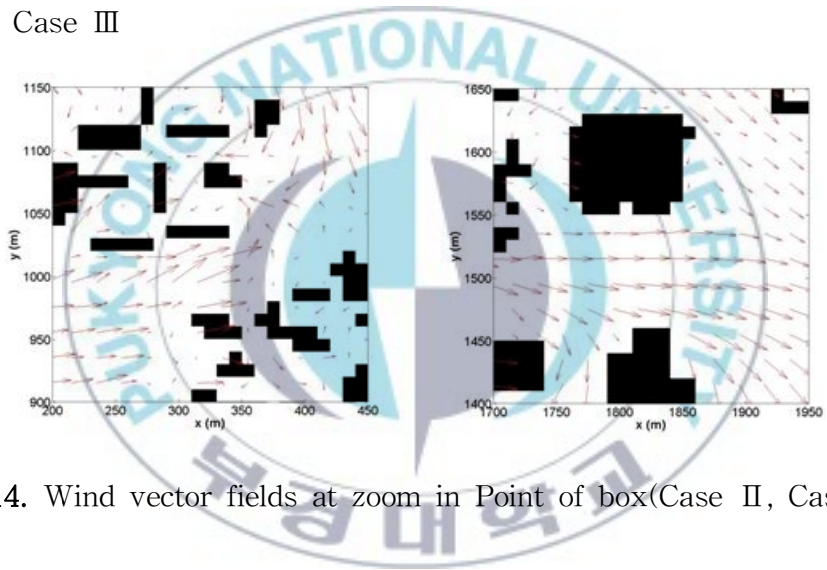
**Fig. 13.** Surface wind vector fields by Case I, Case II, Case III.



(a) Case II

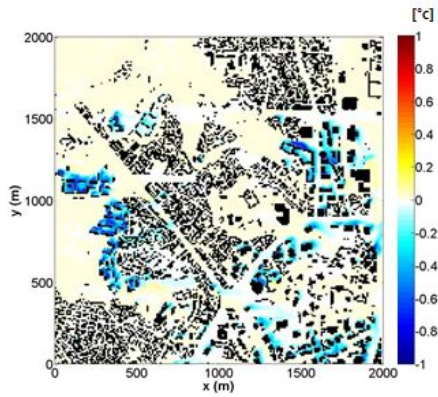


(b) Case III

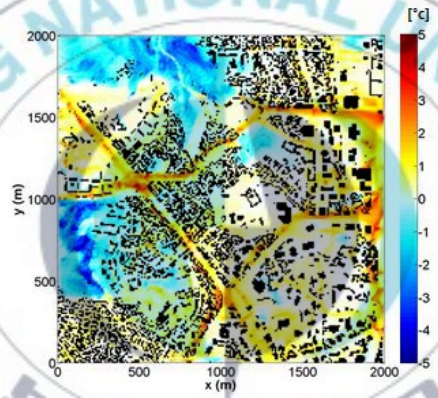


**Fig. 14.** Wind vector fields at zoom in Point of box(Case II, Case III).

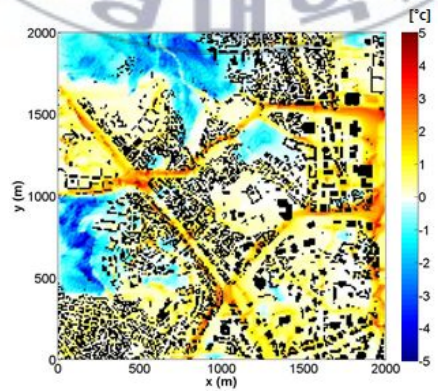
(a) Case II - Case I



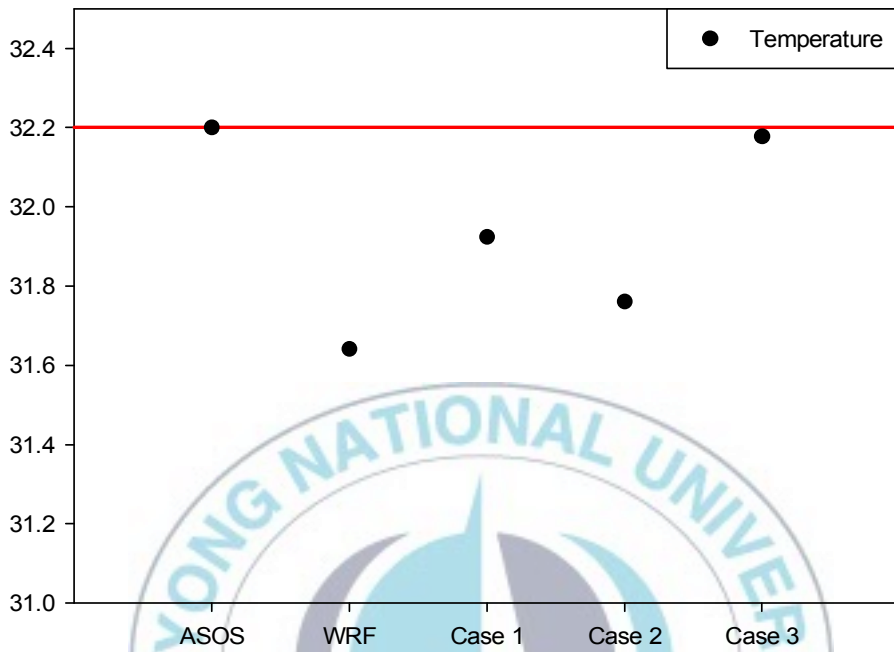
(b) Case III - Case I



(c) Case III - Case II



**Fig. 15.** Case by case at temperature fields difference value.



**Fig. 16.** Comparison with air temperature at ASOS observation value, WRF, Case I, Case II, Case III by CFD model value.

## IV. 요약 및 결론

CFD 모델의 입력 자료로 열적 효과를 고려 할 수 있는 일조모델을 개발 했다. 일조 모델은 일중 태양의 위치에 따라 장애물에 의해 형성 되는 그림자 효과를 계산한다.

대구 ASOS 지점을 관측 자료와 비교 하여 일조모델을 검증했다. 수치 모델은 다음과 같은 일련의 과정을 통하여 주변 장애물들에 의한 관측지점의 일조차단 여부를 평가하도록 구성되었다. 1) GIS 자료로부터 취득한 공간정보에 기반한 평가 대상 관측지점을 중심으로 한 일정 영역의 지형 및 건물 등 3차원 상세 지표자료를 구축한다. 2) 관측지점을 기준으로 평가 대상일의 태양 방위각과 고도각을 산정하여 태양의 위치를 결정한다. 3) 3차원 지표자료에 태양 방위각과 고도각을 적용하여 관측지점의 일조에 영향을 미치는 주변 장애물들을 탐색하고 일조차단 여부를 평가한다. 개발된 모델의 정확성과 유용성을 진단하기 위하여, 본 연구에서는 대구 ASOS 지점을 대상으로 관측 자료와의 비교·검증을 수행하였다. 먼저, 일조 관측환경 평가 모델에 적용된 Paul Schlyter의 행성위치계산법의 정확성을 검증한 결과, 계산된 태양 방위각과 고도각은 관측 자료와 비교하여 대상지역의 태양 위치를 매우 정확하게 산정하였다. 일중 시간대별 일조를 살펴보면, 태양 고도각이 낮고 그림자 길이가 길어지는 일출 후 오전이나 일몰 전 오후 시간대에 1보다 작은 값이 관측되었고, 모델 계산에서도 동 시간대에 태양 방위각 상에 존재하는 주변 장애물들에 의해 관측지점의 일조가 차단되는 것으로 평가되었다.

일조모델과 CFD 모델을 접합하여 열적 효과를 고려한 도시규모 상

세 흐름과 온도 특성을 분석하기 위하여 서울 ASOS지점을 대상지역으로 선정하였다. 또한 구름이나 안개에 영향을 많이 받기 때문에 건물과 같은 장애물에 대한 그림자 효과를 고려하기 위해서 구름이 없는 맑은 날과 지표면 구성에 따른 지표면의 온도차를 고려하기 위해 지표면 가열온도를 최대로 가정할 수 있는 여름철로써 GIS 자료의 제작 년도 (2008년-2009년)가 고려된 2008년 7월 9일을 대상으로 선정했다. 지표면 차등가열을 위해, 그림자 효과와 토지 피복을 접목하여 지표면 경계 입력 자료를 생성 했다. 또한 지표면 경계 입력 자료는 콘크리트 지역, 콘크리트 음영지역, 도로지역, 도로 음영지역, 녹지지역, 녹지 음영지역, 토지지역, 토지 음영지역으로 8가지 경우의 차등가열을 가정했다. 지표면 경계 입력 자료와 WRF 기상장을 입력 자료를 이용했다. 실험 Case I은 그림자효과와 토지 피복을 고려하지 않는 경우를 가정하고 CFD 모델만 수행했다. Case II는 그림자 효과만 고려한 경우를 가정하고 CFD 모델을 수행했다. 또한 Case III는 그림자 효과와 토지 피복별 온도를 고려한 경우를 가정하고 CFD 모델을 수행하였다.

대체로 건물 밀집지역(콘크리트 지역)에 온도가 높게 나타났다. 특히, 고층 건물이 존재하는 동쪽 건물군과 남동쪽 건물군, 남서쪽 건물 밀집지역이 온도가 높게 나타났다. 도로(아스팔트)의 가정온도로 인해, 도로 주변과 도로주변 건물의 대기온도가 높게 나타났다. 동쪽 큰 도로와 고층 건물들이 함께 존재 하여 높은 온도를 나타내고 서쪽에 큰 도로로 인해 높은 온도가 나타났다. Case III의 경우는 다른 케이스 보다 각 지역의 온도의 차이가 확연하게 나타났다. ASOS 관측 고도에서 관측 대기온도와 각각 실험과 비교하였다. 2008년 7월 09일 14시 ASOS 관측 값은 32.2°C

로 나타났다. WRF 모의 값은 관측값 보다  $0.56^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되었고, Case I 은 관측값 보다  $0.25^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되었다. Case II의 경우는  $0.45^{\circ}\text{C}$ 으로 Case I 보다 정확도가 낮아졌다. Case III의 온도가  $0.02^{\circ}\text{C}$  낮게 모의 되어 관측 값과 가장 유사한 값을 나타났다. 정확한 지표경계 입력자료와 기상장이 적용된다면, 보다 더 관측 값에 근사한 수치 모의가 가능 할 것이다.



## 참고문헌

- 금기정, 김종보, 최용길, 김영준, 2009: 도시부 고가구조물에 의한 일조환경 영향분석. *한국도로학회 논문집*, **11**(4), 49-58.
- 김영도, 이규태, 지준범, 이원학, 조일성, 2008: 남한에서 지표면의 태양복사 분포. *한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 272-273.
- 김유하, 조일성, 서화정, 이규태, 지준범, 최영진 2012: 일사 관측환경 개선 및 일사계 비교 관측. *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 70-71.
- 박민호, 2012: Landsat 자료의 통계적 모델링에 의한 기온추정에 관한 연구. *한국지적정보학회지*, **14**(2), 207-223
- 박은태, 강병근, 2007: 친환경 건축물 인증 아파트 단지 일조환경 분석에 관한 연구. *대한건축학회논문집*, **23**(9), 3-13.
- 신동윤, 김진수, 2009: 3차원 도시모델에 의한 일조권 분석. *한국지적정보학회지*, **2**(2), 117-125.
- 양호진, 김재진, 2012: 도시지역에서 건물과 지형이 자동기상관측자료에 미치는 영향. *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 30-31.
- 윤공현, 2005: 도심지에서 그림자효과의 분석. *대한토목학회논문집*, **25**(6D), 937-941.
- 이덕형, 최창호, 이현우, 2004: 건물 일조시간 계산방법(점,면)에 관한 비교 연구. *한국태양에너지학회 논문집*, **24**(3), 9-17.
- 이영수, 김재진, 2011: 도시 지역에서 아파트 단지가 흐름과 확산에 미치는 영향. *대기*, **21**(1), 95-108.
- 이주현, 최재원, 김재진, 서용철, 2009: 도시 재개발이 도시 지역 상세 대기 흐름에 미치는 영향. *한국지리정보학회지*, **12**(2), 69-81.

- 이형석, 김중식, 박준규, 2005: GIS를 이용한 도로의 일조영향 분석. 한국 GIS/RS 공동 춘계학술대회, 419-425.
- 최희욱, 김도용, 김재진, 김기영, 우정현, 2012: CFD-WRF 접합 모델을 이용한 도시 지역 화재 시나리오별 확산 특성 연구. *대기*, **22**(1), 47-55.
- 최동호, 이부용 2006: 하절기 단일 수목의 열환경 관측을 통한 서열완화 효과 해석. *한국태양에너지학회 논문집*, **26**, 4
- 홍원화, 이강국, 서원덕, 2007: 토지이용상태에 따른 도시 기온 특성과 열환경 시뮬레이션. *대한건축학회논문집*, **23**(9), 139-146
- Baik, J.J., Y.S. Kang, and J.J. Kim, 2007: Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, **41**, 934 - 949.
- , S.B. Park, and J.J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model. *Journal of applied Meteorology and Climatology*, **48**, 1667 - 1681.
- Kim, J.J., and J.J. Baik, 2004: A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyon using the RNG  $k-\epsilon$  turbulence model. *Atmospheric Environment*, **38**, 3039 - 3048.
- Kim, J.J., and J.J. Baik, 2010: Effects of street-Bottom and Building-Roof Heating on Flow in Three-Dimensional Street Canyons. *Atmospheric Environment*, **38**, 3039 - 3048.
- K.Niachou, I. Livada and M. Santamouris 2005: A study of temperature and wind distribution inside two urban street canyons in Athens. *International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment"*, 125-131
- Kovar-Panskus, A., L. Moulinneuf E. Savory, A. Abdelqarim J-F. Sini, J.-M. Posant, A. Robins, and N. Toy, 2002: A wind tunnel investigation of the influence of solar-induced wall-heating on the flow regime within a simulated urban street canyon. *Water*,



- Air, and Soil Pollution*, 2, 555 - 571.
- Nyuk Hien Wong, Yu Chen, Chui Leng Ong, Angelia Sia, 2003: Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Building and Environment*, **38**, 261-270
- Oke, T. R., 1988: Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, **11**, 103 - 113.
- Richards, K., M. Schatzmann, and B. Leidl, 2006: Wind tunnel experiments modelling the thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating. *J. wind Eng. Ind. Aerod.*, **94**, 621-636.
- Schlyter, P, 2010: Computing planetary positions - a tutorial with worked examples. Available on-line at <http://www.stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>.
- TAKASHI ASAEDA and VU THANH CA 1996: Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere. *Atmospheric Environment*, **30**(3), 413-427
- Uehara, K., S. Murakami, S. Oikawa, and S. Wakamatsu, 2000: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **34**, 1553-1562.
- 杉本(莊一, 近藤純正, 1994: 仙台市におけるヒートアイランドと各種地表面温度の日変化の観測, 天気, 41, 541-544.

## 감사의 글

저에게 항상 남에게 배려하고, 자기 자신에게 열심히 살라고 말씀하신 사랑하는 아버지, 항상 걱정하시고 따뜻한 말과 응원으로 사랑으로 감싸주시는 사랑하는 어머니, 따뜻한 부모님의 사랑이 항상 감사했습니다. 항상 표현은 잘 못하지만 마음으로는 고마움과 사랑한다는 말을 전하고 싶습니다. 연구실 선후배와 학과 모든 사람들의 도움과 배려로 미흡하지만 석사 논문이 완성되었습니다. 이 논문이 완성되기까지 많은 도움을 주신 분들께 이 자리를 빌어서 감사의 마음을 전합니다. 먼저 학업적, 정신적으로 저에게 많은 가르침과 도움을 주신 김재진 교수님께 고개 숙여 감사드립니다. 언제나 활동적이고 열정적인 교수님의 관심과 배려 덕분에 많이 배우고 성장할 수 있었습니다. 바쁘신 와중에도 학문과 저의 미흡한 점을 지적해주시고 많은 충고를 아끼지 않으셨던 김도용 박사님께 진심으로 감사드립니다. 부족한 논문의 심사위원을 맡아주신 권병혁 교수님과 정형빈 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 그리고 수업과 세미나를 통해 많은 가르침을 주신 변희룡 교수님, 오재호 교수님, 이동인 교수님, 옥곤 교수님께 감사의 말씀 드립니다.

도시대기 연구실에서 많은 밤을 지새우며 연구하고 동고동락한 선·후배에게 감사의 마음을 전합니다. 연구실 들어와서 영혼까지 함께한 희욱이-호진이, 3년 동안 지낸 여러 가지 추억들을 죽기 직전까지 잊지 못할 것 같다. 너희들이 있었기에 석사 논문도 졸업도 할 수 있었던 것 같아서 정말 고맙다. 무슨 일이 생기면 누구보다 앞장서서 해결하고 조언해준 수진이, 연구실에 항상 내편이 되어준 소희, 잘해 주지 못해서 정말 미안

하고 석사논문 완성할 수 있게 도와줘서 정말 고마워. 언제나 묵묵히 힘이 되어준 주현 선배, 지금은 졸업하여 함께하지 않지만 저에게 격려해주고 힘이 되어준 영수 선배와 재원 선배까지 저에게 큰 힘이 되어주었습니다.

대학교에서 함께 배움을 시작한 05학번 동기들 정말로 사랑한다. 원년 멤버이자 항상 같이 있었던 경률이, 항상 옆에서 힘이 되어준 못난 형 종백이형, 마지막까지 함께 학교에 지내진 못했지만 엔돌핀 기호, 내가 모르는 것을 친절히 가르쳐준 엘리트변태 강구, 키도 크고 얼굴도 무섭지만 따뜻한 진현이, 열심히 사는 독한남자 승준이, 석사 마지막까지 졸업동기가 된 거북이 정태, 술마시고 변신하는 폭주 재택이, 공무원 준비로 얼굴보기 힘든 뜰아이 태호, 요즘 너무 행복해 보이는 영재, 졸업한 모든 동기들 보고 싶고 끝까지 같이 가자. 그리고 04학번 친구들 종천이, 민성이, 진우야 옆에서 응원해줘서 고맙다. 원년 멤버 대장 상민행님, 옥곤 교수님 연구실 행님들, 항상 채직질 해주시는 동민행님, 4개월 같이 산 종현이, 정말 예의 바른 진욱이, 잘 따르는 영준이, 귀염둥이 원호 정말 감사합니다. 4호관 선·후배들에게도 고마운 마음을 전하며, 자주 만나지 못하지만 늘 함께인 것처럼 느껴지는 애아빠 두섭이, 연애한다고 정신없는 세원이, 자주 못봐서 미안한 원호, 응원군이 되어준 다른 친구들에게도 고마운 마음을 전합니다. 다시 한 번, 석사 논문이 완성되기까지 주변에서 도움을 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

2013년 8월

김도형

