

# 복잡지형에서의 지표면 거칠기에 따른 오존 농도 수치모의 Air Quality Modeling of Ozone Concentration According to the Roughness Length on the Complex Terrain

최 현 정 · 이 화 운\* · 성 경 희

부산대학교 대기과학과

(2007년 3월 14일 접수, 2007년 7월 11일 채택)

Hyun-Jung Choi, Hwa Woon Lee\* and Kyoung-Hee Sung

Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan, Korea

(Received 14 March 2007, accepted 11 July 2007)

## Abstract

The objective of this work is the air quality modeling according to the practical roughness length using the building information as surface boundary conditions. As accurate wind and temperature field are required to produce realistic urban air quality modeling, comparative simulations by various roughness length are discussed.

The prognostic meteorological fields and air quality field over complex areas of Seoul, Korea are generated by the PSU/NCAR mesoscale model (MM5) and the Third Generation Community Multi-scale Air Quality Modeling System (Models-3/CMAQ), respectively.

The simulated  $O_3$  concentration on complex terrain and their interactions with the weak synoptic flow had relatively strong effects by the roughness length. A comparison of the three meteorological fields of respective roughness length reveals substantial localized differences in surface temperature and wind fields. Under these conditions, the ascended mixing height and weakened wind speed at night which induced the stable boundary stronger, and the difference of simulated  $O_3$  concentration is 2~6 ppb.

**Key words** : Air quality modeling, Roughness length,  $O_3$  concentration

## 1. 서 론

실질적인 오염예측에의 적용을 위해서는 실지형을 대상으로 지형과 지표면의 특성을 충분히 고려하여 난류유동을 포함한 지면 가까이의 복잡한 대기 유동

장의 양상을 수치 해석적으로 풀어야 한다. 특히 국지지형 내에서 지면근처의 난류유동을 포함한 보다 자세한 유동장 해석을 위해서는 지형효과나 해양, 육지의 특성의 차이 외에도 지면마찰, 건축물 등 지형지물의 효과로 인하여 발생하는 다양한 바람장에 대한 평가도 중요하다. 즉, 지표면의 구조물에 의한 정보로부터 산출된 지표면 거칠기(roughness length) 자료에 의해 운동량, 열 속, 수증기 속 등과 같은 지표

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)51-510-2291, E-mail : hwlee@pusan.ac.kr

면과 대기의 교환과정에 대한 모사를 비교하고, 대기 오염물질의 확산과정에 대한 평가를 하고자 한다. 이를 위해서는 고분해능의 격자 간격을 갖는 수치 모형을 다루어 지형과 토지이용도에 대한 정확한 자료가 초기자료로 입력되어야 한다. 특히, 이를 적용한 도심규모 바람장의 발산 수렴, 수송 구조의 특성에 관한 진단은 바람장에 의해 확산, 수송되는 물질의 이동 및 축적을 좌우하는 요소들의 하나로 작용할 것이라는 점에서 중요한 의미를 갖는다.

복잡한 도시지역에서 표출되는 다양한 국지순환계를 입력 자료로 대기질 예측과 함께 고농도 발생의 원인을 찾고 그것을 검증하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(Pielke and Uliase, 1998; Kumar and Russell, 1996). 이순환 등(2002)은 대기확산 모형을 이용한 수치실험을 통하여 한반도 남서해안의 도시화에 따른 지표의 변화가 오염물질 확산과 대기질의 변화를 유도할 수 있음을 보고하였다. 또한, Sistla *et al.*(1996)은 혼합층 고도와 바람장이 오존 농도에 영향을 미치는 것에 대하여 수치모의 하였다.

본 연구의 대상 지역인 서울과 수도권 지역은 80년대 이후 급속히 발전하면서 꾸준히 도시화가 진행되어 왔다. 이 지역의 토지이용은 농경지와 삼림 등의 면적이 현격히 줄어들었고, 건물과 아스팔트와 같은 대단위 인공건축물들이 들어서게 되었다. 대지와 도로의 점유율이 47%를 차지하는 고밀도형 대도시 형태를 갖고 있으며, 지형조건의 특성상 대기오염물질의 확산이 용이하지 않아 국지적으로 정체될 뿐만 아니라, 고밀 도시지역에서 배출되는 오염물질 배출량은 적정 환경용량을 훨씬 초과하는 수준을 보이고 있다(서울시정개발연구원, 2000). 또한 도시화에 따른 각종 지표 구조물은 지표면의 지면 마찰을 가속화하여 국지적으로 풍속을 현저히 약화시키고 불규칙한 난류를 발생시키며 도시의 환기 능력을 저하시키는 요인으로 작용하게 되었다.

본 연구는 다양하고 복잡한 도심의 지형과 토지피복이 혼재하고 있는 대표적인 지역인 수도권역을 대상으로 국지규모의 기상해석을 위한 중규모 기상장 모델에 보다 실제적인 지표면 경계조건을 제공하여, 이 지역 대기질 모델에 의한 O<sub>3</sub> 농도의 예측에 있어 지표면 거칠기 조건의 변화가 미치는 영향을 검증하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 수치 모델

본 연구에 사용된 기상모델은 미국 기상연구소(U.S. National Center for Atmospheric Research)와 펜실베이니아 주립대학(Penn Stat. Univ.)이 공동 개발한 모델인 MM5(Mesoscale Meteorological Model version 5)이며, 모델은 고분해능을 요구하는 물리과정을 지원하고 있다(Dudhia, 1993).

대기질 수치모의에 사용된 모델로는 미국 환경국(US Environmental Agency)에서 개발한 Models-3/CMAQ(Third Generation Community Multiscale Air Quality Modeling System, Byun and Ching, 1999)으로 수행하였다. Models-3/CMAQ의 경우 모델링 영역의 규모가 다양하며, 여러 가지 오염물질을 동시에 고려될 수 있다. CMAQ은 6개의 전처리 과정과 1개의 화학·수송 모델(CCTM, CMAQ Chemical Transport Model)로 구성되어 있다. 화학처리과정으로는 CB-IV를 사용하였다.

### 2.2 입력 자료

#### 2.2.1 기상장 초기 및 지표 경계자료

본 연구에 사용된 모델의 초기 및 경계 입력자료는 3시간 단위 KMA/RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)를 사용하였다. 기상 모델의 지표경계조건은 실제 대기상태에 가까운 모델 결과를 유도하기 위하여 환경부 지리 정보시스템(EGIS)의 해상도 90 m(3-seconds)인 지형고도자료(이하 KDEM)를 모델 내 fine domain에 안정적으로 내삽하였다(이화운 등, 2005). 이러한 상세 지표면 자료는 지형고도자료의 해상도에서 동시에 고해상도화 되었을 때 가장 안정적이고 효과적일 수치모의가 될 것이다. 현재 환경부에서는 Landsat TM 위성영상과 SPOT 위성영상을 합성하여 한반도 위성영상지도를 제작하여, 시가지/건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 습지, 나지, 수역의 7개 분류항목으로 구성된 지상해상도 30 m급의 대분류 토지피복지도(축척 1:50,000, KLU)를 제작하였으며, 본 연구에서는 안정적으로 모델 내에 이를 적용하여 수치모의 하였다(Lee *et al.*, 2006).

2. 2. 2 대기질 배출량 자료

상세영역의 배출량 자료는 대기보전 정책수립 지원 시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)에서 산정된 배출량을 사용하였다. CAPSS는 매년 교통량 자료, 기타운송 자료, 업체별 조사 자료, 정유사 관련 자료, 오염도 및 기상관측 자료, 행정구역별 에너지 통계 자료, 일반 통계 자료 등을 배출원 분류코드(SCC: Source Classification Codes)를 근거로 정의한다. 사용된 CAPSS 배출량은 전국을 1 km × 1 km 격자 별로 산출한 2001년도 배출량 자료이다. 배출원은 각각 점, 선, 면 오염원과 자연 오염원을 포함하는 10개의 대분류로 이루어져 있으며, 1년 평균 배출량을 ton 단위로 기술하고 있고 월 별, 요일 별, 시간 별 배출계수가 주어진다. 이 배출량은 각각의 배출원을 중심으로 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC 물질에 대해 연간 격자 별 총 배출량으로 산출하고 각각의 화학물질을 세분화하였다. CMAQ 내 SMOKE로부터 CB-IV에 의한 VOC종별 배출량을 산출하고 월 별, 요일 별, 시간 별 분배계수를 적용하여 시간 별 배출량 입력 자료를 작성하였다.

2. 2. 3 지표 구조물 자료

도시지역의 건축 구조물이 풍속과 불규칙한 난류에 미치는 영향을 세밀하게 파악하기 위하여서는 미세규모의 많은 기상인자가 포함되어야 하고, 그러한 기상인자를 측정하는 관측망을 이루는데 많은 어려움이 있다. 도시 지역의 대부분을 차지하는 건물에 대한 3차원의 정보는 도로 교통 등의 시설물관리시스템, 구축, 도로계획, 택지개발, 도시계획 등 여러 분야에 필요하다. 현재 항공사진, 고해상도 위성영상 자료, LIDAR 자료, 수치사진측량 시스템 등의 보급과 분석 알고리즘의 발전으로 인하여 도시지역 건물에 대한 모델링 방안이 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 수치지도와 지형 공간 정보시스템(GIS: Geographic Information System) 자료를 이용한 도시 지역 건물자료의 실용화 측면에서 다양한 경험적 연구를 진행하였다. 이로써 수치지도에 높이 자료로써 GIS 자료를 활용할 수 있는지에 대한 가능성, 정확도 평가를 하겠다는 점에서 의의를 지니며, 건물 분류에 관한 사례조사, 서울 및 수도권 특색에 맞는 분류 파라미터의 추출, 분류 파라미터에 대한 가능성 평가 및 모델 수행으로 연구를 진행한다.

Table 1. Land amount in use at Seoul area (Source from 2005, Seoul, department of building planning).

Category	Amount in use (%)
Residence	32.217
Apartment	1.381
Business section	2.633
Industry section	2.827
Road	10.009
Forest	32.213
River	4.040
Parking place	14.648
A large scale apartment	0.019
A large scale building	0.001
A large scale factory	0.012
Total	100.000

본 연구에서 중요한 요소로 인식되고 도심의 용도별 사용면적과 도심에 존재하는 건물의 최고층 자료는 기상장 모델 내에서 도시의 모습을 구현하기에 적절한 거칠기(roughness) 데이터베이스 갱신문제로 집약되었으며, 이를 위해 다양한 자료로부터 건물개체에 대한 정보를 서울시 GIS 포털서비스에서 제공받을 수 있었다.

표 1은 2005년에 작성된 서울지역의 토지이용 점유현황이다. 범주에 있는 점유율에서 도로, 숲, 강, 주차장을 제외하면서 실제 건물이 존재하는 점유율은 약 39.9%로 나타났다. 또한 GIS에 의해 얻어진 서울의 건물 높이 자료는 표 2와 같으며, 이는 도심에 존재하는 각 건물에 있어서 최고층이 1층부터 69층인 건물의 수만을 나타낸 것이다. 이로써 도심의 용도별 사용면적과 도심에 존재하는 건물의 최고층 자료로 서울의 도심 거칠기(roughness)를 산출하였다. 이 값은 구별로 추출된 총 건물 높이들의 자료에 토지 점유율에서 실제 건물이 존재함으로 인해서 발생하는 값인 약 39.9%를 환산한 값으로 나타내었다. 한 예로 강남의 건물의 평균 높이는 건물의 한 층을 2m로 환산하여 각 건물의 최고층에 따른 건물의 높이를 환산하여 더한 후, 건물의 총 수에서 데이터상에 오류가 난 동의 수를 뺀 값으로 나누어 주었다. 즉, ((1층(2 m)) × 1,996 + 2층(4 m) × 5,439 + ...)/(23,691 - 26) = 8.315이며, 이렇게 구한 서초구와 노원구, 송파구는 각각 7.383, 7.233, 7.090이다. 이때 이들의 평균 높이에 건물의 존재 비율인 0.399를 곱하면 이 그룹에 대한 도심 건물의 거칠기가 환산된다. 환산된 결

**Table 2. Distribution number of buildings driven from GIS and roughness length at Seoul.**

Area	Floor									Total buildings	Error buildings	Avg. building height (m)	Roughness length (m)
	1	2	3	4	5	6	...	...	69				
A	12,621	8,471	3,755	2,547	1,154	361				29,409	91	4.387	1.75
B	8,475	8,959	3,481	2,046	1,292	438				25,379	37	4.959	1.97
C	9,035	11,426	3,952	1,882	896	195				27,825	55	4.529	1.807
D	7,067	10,221	4,166	2,156	742	129				25,099	78	5.001	1.995
E	2,981	13,318	5,150	3,460	1,321	186				26,815	21	5.413	2.159
F	13,186	13,241	5,222	2,655	1,103	243				36,259	68	4.526	1.805
G	6,174	15,743	4,419	2,639	1,202	130				30,805	39	4.906	1.957
H	18,996	15,039	5,307	3,031	1,191	232				44,402	134	4.243	1.692
I	10,439	12,912	3,713	2,760	986	85				31,245	31	4.437	1.770
J	4,050	5,736	2,706	2,200	809	123				16,429	78	6.019	2.401
K	4,360	4,070	2,002	1,670	867	152				14,604	227	7.233	2.885
L	14,175	15,593	5,499	4,245	1,923	220				42,160	348	4.552	1.816
M	8,737	12,889	4,887	2,801	1,201	264				31,321	60	4.778	1.906
N	9,689	11,186	5,354	3,017	1,895	472				32,476	89	5.191	2.071
O	3,266	9,073	3,772	2,447	1,217	193			1	20,904	49	5.986	2.388
P	6,422	10,027	4,023	3,955	1,898	296				27,887	105	5.924	2.363
Q	6,203	9,729	3,068	2,314	1,522	158				23,869	69	5.627	2.245
R	2,703	9,568	2,480	1,369	669	108				17,267	63	5.089	2.030
S	12,148	12,724	4,065	2,468	1,011	179				33,660	56	4.854	1.936
T	8,397	14,104	3,988	2,709	1,046	227				31,003	87	4.789	1.910
U	4,928	16,799	5,855	3,854	1,795	616				34,679	83	5.479	2.186
V	2,297	5,742	3,312	2,504	2,570	993				18,877	117	7.383	2.945
W	1,968	5,439	4,820	3,798	3,846	1,563			1	23,691	66	8.315	3.317
X	1,996	8,641	4,112	3,742	4,177	514				24,449	26	7.090	2.823
Y	3,459	9,700	3,542	2,488	1,935	264				22,219	30	5.810	2.312
Total	183,772	270,350	102,650	68,757	38,268	8,341	...	...	2	692,733	2,107	5.461	2.171

(A: Jongrogu, B: Junggu, C: Yongsangu D: Sungdonggu, E: Kwangjingu, F: Dongdaemoongu, G: Joongranggu, H: Sungbuckgu, I: Kangbuckgu, J: Dohonggu, K: Rowongu, L: Eungpyunggu, M: Seodaemoongu, N: Mapogu, O: Yangchungu, P: Kangseogu, Q: Gurogu, R: Keumchungu, S: Youngdeungpogu, T: Dongjakgu, U: Kwanakgu, V: Seochoгу, W: Kangnamgu, X: Songpogu, Y: Kangdonggu)

과 값에서 서울지역의 건물에 의한 거칠기는 평균 2.10 m의 값을 가지고 있으며, 강남, 서초, 노원, 송파 구에서 가장 높은 평균 거칠기 그룹 값인 2.93 m를 나타내었다(표 2).

현재 MM5에서 초기치로 제공되고 있는 도심의 거칠기 값인 0.5 m(USGS, U.S. Geological Survey)보다 위에서 계산된 서울의 실제 거칠기 값은 약 4배가 높은 것으로 나타났다. Boucouvala and Bornstein (2003)은 Los Angeles를 대상으로 MM5를 이용한 수치모의에서 도심의 거칠기 값을 4~5 m로 환산한 바 있다.

### 2.3 모델링 영역 및 물리 과정

모델의 동지적자 도메인은 그림 1에 나타내었으며, 그 중심은 38°N, 126°E이다. 기상장 모델의 연직

간격은 지형을 따르는 33개의 sigma층이며, 분석에 사용된 MM5의 다양한 물리과정 중 구름 모수화 과정(cloud physics and precipitation processes)과 강수 과정(precipitation processes)은 각각 상승·하강운동 그리고 보상운동을 고려하는 모수화 방법(Grell *et al.*, 1995)과 Reisner 2 (Reisner, Rasmussen and Bruntjes, 1998)를 사용하였다. 그리고 복사과정은 명시적 구름(explicit cloud)과 장파 및 단파복사의 상호작용을 충분히 고려한 구름-복사 방안(Cloud-radiation scheme)을 사용하였다. 또한 경계층을 묘사하는 물리식으로 상대적으로 경계층 내에서 강한 혼합을 발생시키는 MRF 경계식(planetary boundary layer, Hong and Pan, 1996)을 사용하고, 수분모수화 과정(Explicit Moisture Scheme)으로 Reisner Graupel Scheme (Reisner *et al.*, 1998)을 사용하였다. 복사과정

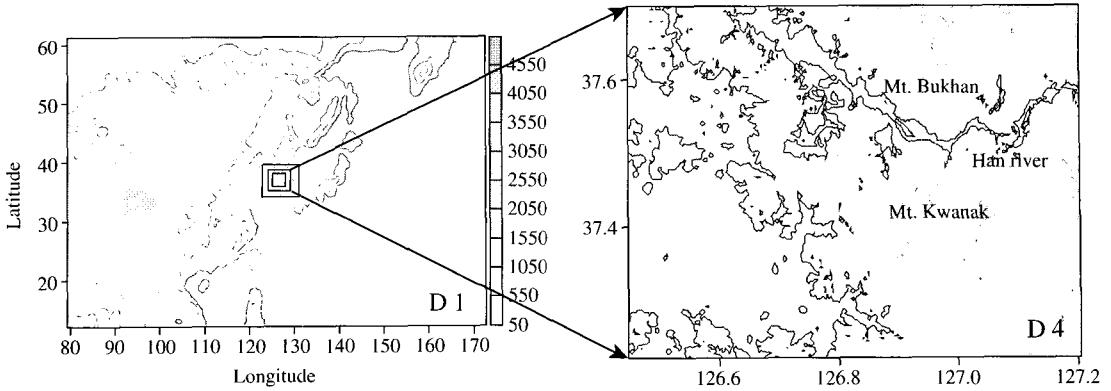


Fig. 1. The coarse and nested grid domains used in this study.

(Radiation scheme)으로 RRTM long wave scheme (Mahrer and Pielke, 1997)을, 지표 모수화 과정 (surface scheme)으로는 Pleim-Xiu Land-Surface scheme (Pleim-Xiu Land-Surface Model coupled to the Pleim-Xiu PBL and combined land-surface and PBL model)이 선택 되어졌다.

2.4 사례일 분석 및 실험설계

본 연구에서의 수치실험은 다양한 지표면 거칠기 조건이 오염물질의 수평, 연직 수송 및 축적 과정에 미치는 영향을 비교하기 위하여, 서풍계인 종관풍의 영향이 비교적 약해지면서 동풍계열의 바람이 도심의 남동쪽에서 수렴이 유도되면서 나타나는 대표적인 고농도 사례일 기간인 2005년 6월 9일~6월 11일을 선정하여 모델링을 각각 수행하였다. 이때 상층풍은  $5 \sim 7 \text{ ms}^{-1}$ 의 서남서 (WSW)풍 우세하며 시간에 따라 순전 (veering)하고 있음을 나타내어, 다소 약한 종관풍의 영향으로 국지적인 순환이 표출될 수 있는 가능성이 있는 날로 선정된 사례일이었다. 이러한 지역을 대표하는 바람장에 대한 조사는 대기오염 물질의 수송 및 확산 예측을 위한 중요한 자료가 되어, 풍향과 풍속을 통해 대기오염물질의 정체 및 확산 정도를 파악할 수 있기 때문이다 (김시완 등, 1996).

모델링 영역에 대한 격자정보는 표 3, 4에 나타난 바와 같다. 이를 통해 모델링 영역에 대해 고해상도화된 지형과 지표면에서 대기질에 영향을 미치는 지표면 거칠기의 영향을 비교하기 위하여 수도권 실정에 맞는 지표면 자료의 거칠기 (roughness length)의

Table 3. The MM5 grid system of the horizontal dimensions for model integration in Fig. 1.

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

Table 4. Configurations for CMAQ.

	Coarse domain	Fine domain
Horizontal resolution	30 km	1 km
Horizontal grid	144 × 124	70 × 55
Vertical grid	6	14
Simulation period	120 hours	120 hours
Emissions type	ACE-Asia	CAPSS
Chemical mechanism		CB-IV
MM5 input domain	Domain 1	Domain 4

파라미터를 세분화하고 구분하여 다양한 도시규모에서 일어나는 대기질 모델링의 중요한 입력 자료로 사용하였다 (표 5). 우선 수도권지역의 도심에 대한 지표면 거칠기를 MM5 USGS에서 제공하는 초기치인 0.5m에 대한 사례를 Run 1 case라 하고, 서울지역의 건물 규모를 최고층 높이 자료와 점유율 자료로 새롭게 산출된 (표 2) 도심 평균 거칠기 값인 2.1m에 대해 30% 규제된 사례를 Run 2 case, 도심의 평균 거칠기를 실제적으로 고려한 사례를 Run 3 case로 파라미터들을 순차적으로 적용함으로써 분류에 안정성

**Table 5. Description of MM5-CMAQ numerical experiment.**

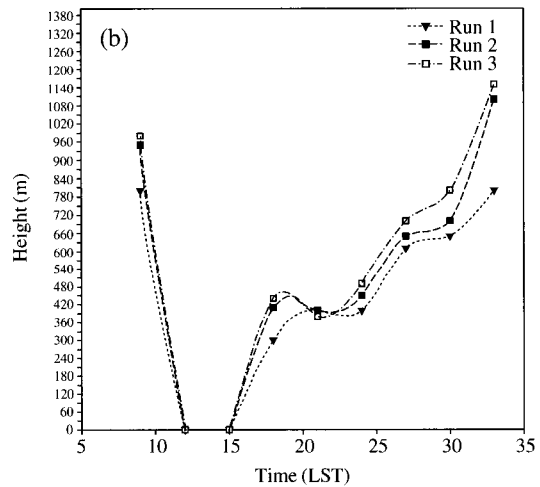
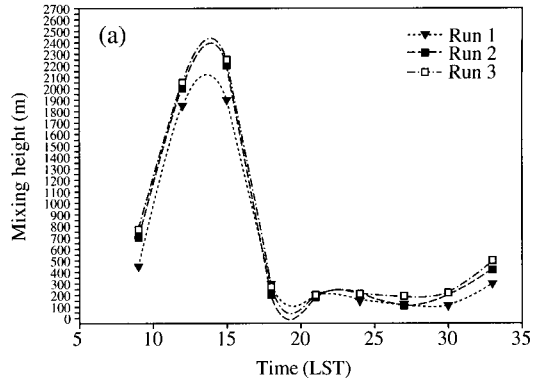
Runs	KDEM	KLU	Roughness		
			Length_0.5	Length_1.5	Length_2.1
1	YES	YES	YES		
2	YES	YES		YES	
3	YES	YES			YES

을 도모하였다.

### 3. 모델링 결과

그림 2(a)는 각 사례에 대하여 일사가 강해지는 시간대에 성장한 혼합층을 서울의 대표적인 상업 복잡지역인 강남 지역(37.80°N, 126.42°E)에서 수치모의의 한 결과이며, 이후 현열 속의 감소에 따라 대류를 약화시켜 혼합고도도 감소하게 되는 일변화가 나타나고 있다. 한편, 상대적으로 적은 혼합이 일어나는 지표근처의 야간에 나타나는 안정층은 오염물질들을 잡아 두는 역할을 하기 때문에 지표근처에서의 오염물질 농도에 영향을 주며, 이러한 야간 안정경계층에서의 고도를 예측하는 것은 중요하다. 주로 야간에 육지에서 발생하므로 야간경계층(nocturnal boundary layer: NBL)이라고도 부른다. 본 연구에서는 Beyrich and Weill (1993)가 제안한 thermal height scale 방법으로 야간 경계층을 결정하였으며, 대류 경계층과의 연속성을 고려하였다(현유경 등, 2002). 같은 지점에서 이를 근거로 산출한 야간경계층의 높이를 그림 2(b)에 나타내었다. 지형적으로 분지 지역으로 파악되는 강남지역 일대는 같은 고도에서 주위보다 온도의 변화 폭이 크다. 이것은 주로 부피효과에 의한 것인데 분지 지역의 공기로 수송되는 에너지 속이 주위의 공기로 수송되는 에너지 속보다 더 작은 부피의 공기 속으로 들어가기 때문에 나타나며, 이는 분지의 온도변화를 크게 증폭시킨다(Stull, 1992). 또한, 분지에서의 야간 냉각에 대한 연구에서 분지바닥에 한랭한 공기를 축적하여 큰 복사 냉각율과 관계 깊은 한랭한 공기호를 형성하며, 분지바닥의 경계층에서 야간냉각과 주간 가열을 강화시킴을 분석하였다(Kondo, 1995).

혼합고의 경우 Run 3에서 가장 높게 성장하고 있



**Fig. 2. Simulated mixing height (a) and NBL (Nocturnal Boundary Layer) (b) in case study.**

었으며, 같은 시간대의 Run 2보다는 60m의 차이를 나타내고 있었다. 이는 가열에 의한 열적 난류효과와 거칠기 길이의 차이에서 오는 기계적인 난류효과가 가중된 결과로 볼 수 있다. 이때 Run 1과의 차이는 350m로 나타났다. 한편, 야간 안정경계층의 경우 새벽과 야간 시간대에서 Run 3에서 가장 높게 모사하고 있으며, Run 2와의 차이는 30m, Run 1과는 180m의 차이를 나타내었다.

그림 3은 지상 10m에서의 유적선을 각 Run에 대하여 나타낸 그림이다. 1100LST의 경우 일사가 강해지기 시작되면서 Run 1에서 나타나지 않았던 다양한 유적선의 패턴이 거칠기 조건의 변화에 의해 국지적이 규모들이 상세히 나타나고 있는 것을 볼 수 있다.

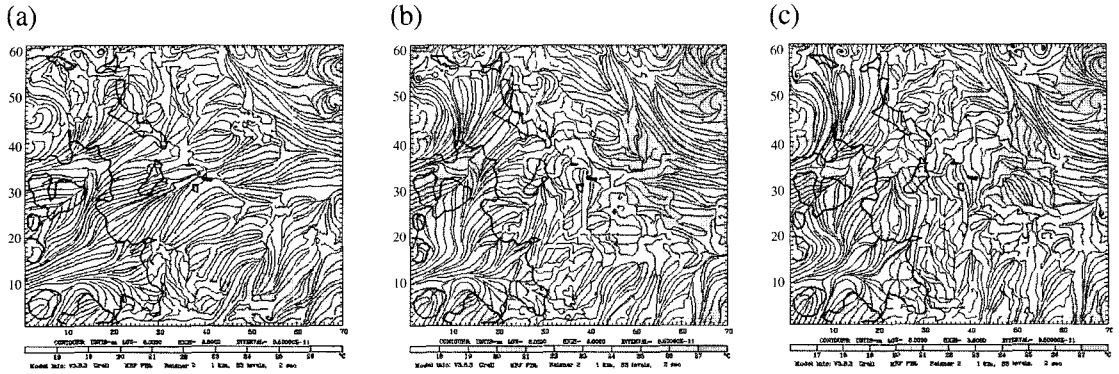


Fig. 3. The horizontal wind stream at 2005/06/12/1100LST ((a): Run 1, (b): Run 2, (c): Run 3).

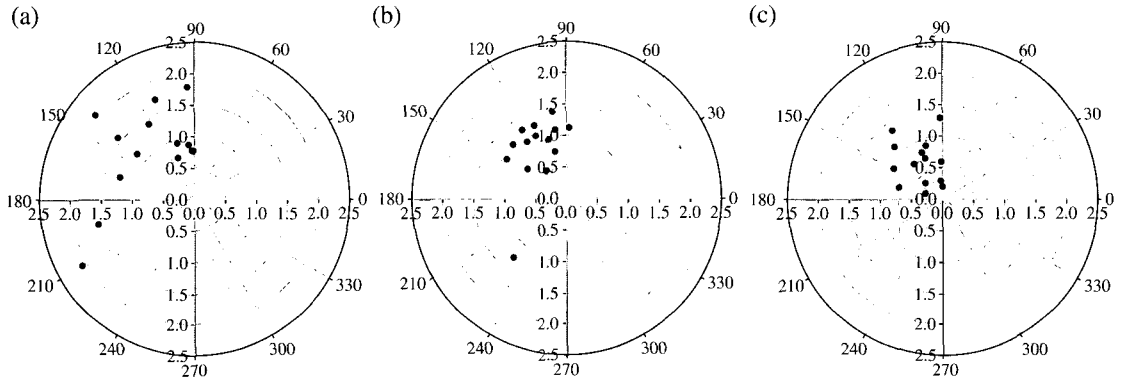


Fig. 4. The wind speed distribution in each Run for 2005/06/11/1900 ~ /12/0800LST ((a): Run 1, (b): Run 2, (c): Run 3).

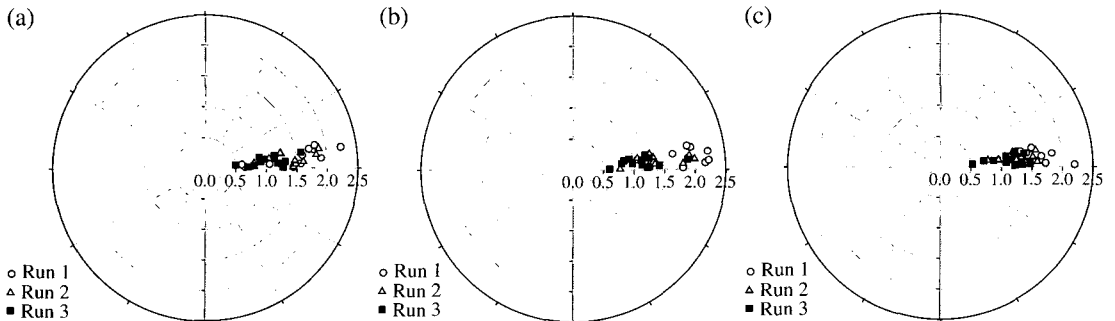


Fig. 5. RMSD analysis between simulated and observed ozone concentrations in each Run case ((a): Sinsuldong, (b): Daechidong, (c): Chunhodong).

Run 1에 비해 해안에서 침투하여 내륙에서 다양하게 변화되고 있는 Run 2와 3의 유적선은 이후 오염물질의 이류와 확산과 관련된 수송과 수렴의 패턴을 이

해하는 데 도움을 주리라 사료된다.

한편, 상대적으로 적은 혼합이 일어나는 지표근처의 야간에 나타나는 안정층은 오염물질들을 잡아 두

는 역할을 하기 때문에 일몰 후부터 다음날 일출까지(2005년 6월 11일 1900~6월 12일 0800LST)의

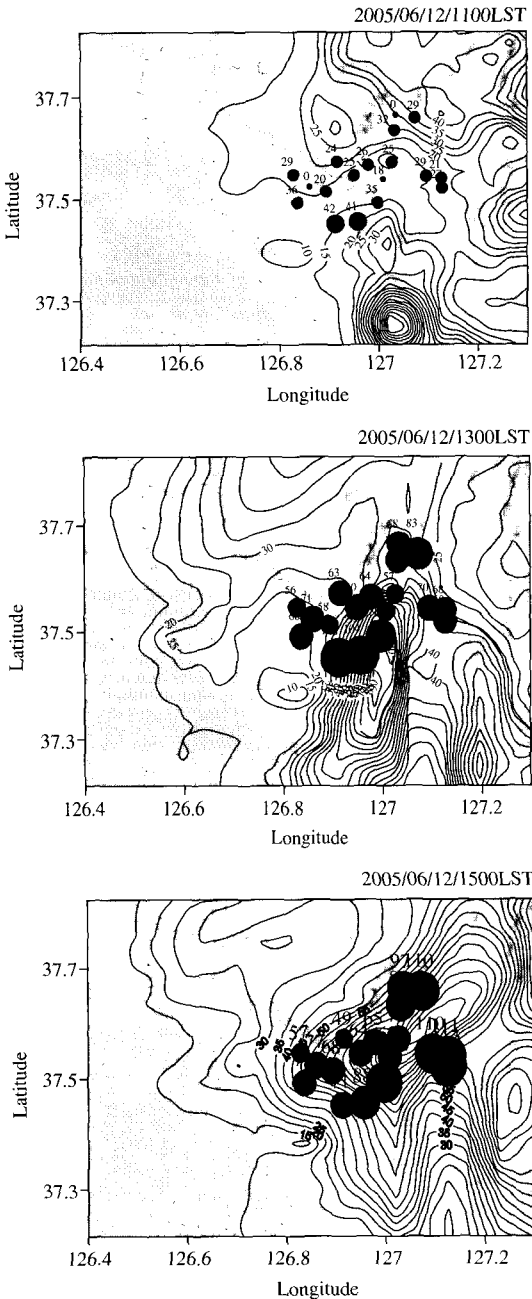


Fig. 6. Horizontal distributions of ozone concentration simulated by Run 3 and observed ozone concentration at air quality stations (●).

풍향·풍속자료의 변화를 각 Run에서 살펴보기 위하여 강남 지점에서 산출된 모델 결과에서 비교하여 보았다(그림 4). 매시 풍향·풍속에 대한 모델 결과는 대부분 북서풍이 지배적인 가운데, Run 1의 경우 0.5~2.5 ms<sup>-1</sup>의 풍속을 모사한 반면, Run 2, 3에서는 각각 0.5~1.5 ms<sup>-1</sup>, 0.1~1.3 ms<sup>-1</sup>로 Run 3에서 가장 약화된 풍속을 모사하고 있다.

모델 결과와 관측된 O<sub>3</sub> 농도에 대하여 도심의 3개(신설동, 대치동, 천호동)의 대기질 관측소에서 비교하였다(그림 5). 이들 지역은 지표면상 건물 높이 효과에 영향을 비교적 많이 받게 된 지역이며, 모델상에서 지표면 조건이 새롭게 강화된 도심지역로 입력되어져 모델링 되어짐으로 인해 바람장의 정체와 meandering 효과 등으로 O<sub>3</sub>이나 그 전구물질들의 trapping이 주간과 야간에 유도될 수 있는 지역으로 사료된다. 각각의 Run 들에 대해 RMSD 값을 지점별로 plotting한 분석에서 관측된 오존 농도의 분석에 있어서도 Run 3가 가장 유의한 그룹으로 모사되어지고 있었으며, 다음으로는 Run 2, 1의 순으로 나타났다.

서울을 비롯한 수도권에서도 같은 날 100 ppb에 가까운 고농도 지역을 다 수 확인 할 수 있었다. 수치모의 결과 중 Run 3에 대하여 관측값의 분포도를 그림 6에 나타내었다. 전반적으로 도심에서 배출된 O<sub>3</sub> 전구 물질이 해풍전선을 타고 내륙으로 유입되고 있으며, 배출량이 높은 인천지역에서 유입되어오는 O<sub>3</sub>이 산지아래에서 정체되어 쌓여 있다가 서울의 남

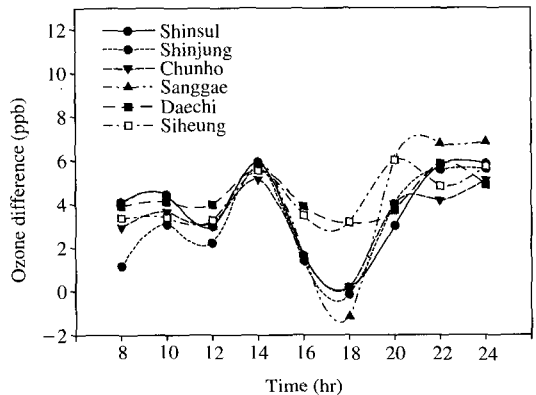


Fig. 7. Difference ( $\Delta_{\text{Run 3}-\text{Run 2}}$ ) of simulated ozone concentration between Run 3 and Run 2 in each station.



동쪽으로 빠져나가고 있다. 이들은 앞서 제시된 유적선의 패턴에서도 예측할 수 있었다. 일사량이 점차 증가하는 1300LST의 종관장과 해풍의 결합으로 비교적 강하게 유입되는 서풍계의 영향이 서울의 도심의 풍하층으로 O<sub>3</sub> 농도를 이미 서울의 전역에서 고 농도를 나타내고 있으며 이후 1500LST에서 최대 농도를 나타내고 있다.

그림 7은 일출부터 자정까지(0800LST~2400LST) 지점별로 Run 2와 Run 3간의 수치모의된 O<sub>3</sub> 농도차이를 나타낸 결과이다. 거칠기 차이로 유도되는 두 모델링 간의 농도차이는 2~6 ppb이며 일사가 강해지면서 혼합고의 차이가 강화되고, 야간의 안정층의 차이가 강화되어 나타나는 시간대에서 두 모델링 결과의 차이가 뚜렷이 나타나고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 다양하고 복잡한 도시의 지형과 토지피복이 혼재하고 있는 대표적인 지역인 수도권역을 대상으로 국지규모의 기상해석을 위한 중규모 기상장 모델에 보다 실제적인 지표면 경계조건의 제공을 목적으로 두고 있으며 이 지역 대기질 모델에 의한 O<sub>3</sub> 농도의 예측에 있어 지표면 거칠기 조건의 변화가 미치는 영향을 검증하므로써 오염물질의 예측을 비교하고자 하였다.

본 연구에서는 수치지도와 GIS 자료의 실용화 측면에서 다양한 경험적 분석을 제공하여 수치지도에 높이 자료로써 GIS 자료를 활용할 수 있는지에 대한 가능성, 정확도 평가를 하였다. 이는 점에 의의를 지닌다. 또한 수도권 실정에 맞는 Land-use 자료의 roughness length의 파라미터를 세분화하고 구분하여 다양한 도시규모에서 일어나는 광화학 오염 모델링의 중요한 입력 자료로 사용하였다.

지표면 거칠기 자료의 변화에 따른 O<sub>3</sub> 농도의 변화를 보면 강화된 도심경계에서의 풍속은 O<sub>3</sub> 농도의 차이에서도 그대로 반영되고 있었다. 관측값과의 비교에서는 일사가 강해지는 낮시간대의 강화된 혼합고의 모사와 새벽과 야간시간대의 모사에 대한 향상으로 인한 O<sub>3</sub>의 확산과 축적과정을 잘 유도하고 있음을 나타내고 있었다. 관측값과의 유의성이 높았던 Run 3에 대해 Run 2와의 예측 농도와의 차이는 2~6

ppb로 나타나고 있었다.

이상의 결과들은 도시에서의 대기 순환, 수렴, 발산 구조 등을 보다 정확하고 실제적으로 파악하여 오염물질의 확산을 가정했을 때, 오염도가 높을 우려가 있는 지역에 대한 상세한 판단 및 토의를 가능하게 하며, 지역별 대기오염현상의 분석력 향상, 지역별 대기환경 측정 지점의 유의성 평가, 광화학 대기오염물질의 지역적 편중성 평가에 도움을 주리라 기대한다.

#### 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 김시완, 박순용, 이보람(1997) 종관기상장에 따른 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO 그리고 O<sub>3</sub> 농도의 변화, 한국기상학회지, 33(2), 273-287.
- 서울시정개발연구원(2000) 서울시 대기오염 특성연구, 120 pp.
- 이순환, 이화운, 김유근(2002) 복잡지형에서 도시화에 따른 대기확산에 관한 수치시뮬레이션, 한국대기환경학회지, 18(2), 67-83.
- 이화운, 최현정, 이강열(2005) 상세한 하부 경계조건과 관측값 객관분석이 복잡지형의 대기흐름장 수치모의에 미치는 효과, 한국기상학회지, 41(1), 73-87.
- 현유경, 김경일, 하경자(2003) 열적 구동에 의한 대기 안정 경계층의 고도 추정과 바람특성 분석, 한국기상학회지, 39(2), 187-206.
- Beyrich, F. and A. Weill(1993) Some aspects of determining the stable boundary layer depth from sodar data, Boun.-Layer Meteor., 43, 65-83.
- Boucouvala, D. and R. Bornstein(2003) Analysis of transport patterns during a SCOS97-NARSTO episode, Atmospheric Environment 37(2), S73-S94.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching(1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. EPA Report N. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Washington, DC. CARB, 2003.
- Dudhia, J.(1993) A nonhydrostatic version of the Penn state-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and

- simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea., Rev.*, 121, 1493-1513.
- Grell, G.A., J. Dudhia and D.R. Stauffer (1995) A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 107.
- Hong, S.Y. and H.L. Pan (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Monthly Weather Rev.*, 124, 2322-2339.
- Kondo, H. (1995) The thermally induced local wind and surface inversion over Kanso plain on calm winter night, *J. Appl. Meteor.*, 34, 1439-1448.
- Kumar, N. and A.G. Russell (1996) Comparing prognostic and diagnostic meteorological fields and their impacts on photochemical air quality modeling, *Atmos. Environ.*, 30, 1989-2010.
- Lee, H.W., H.J. Choi, K.Y. Lee, S.H. Lee, and K.H. Sung (2006) *The Effect of Using Detailed Land-use Conditions for the Photochemical Modeling of Seoul, Korea*, *JKM*, 42, 2, 57-73.
- Mahrer, Y. and R.A. Pielke (1977) The effects of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model, *Mon. Weath. Rev.*, 105, 1151-1162.
- Pielke, R.A. and M. Uliasz (1988) Use of meteorological models as input to regional and mesoscale air quality models-limitations and strengths, *Atmos. Environ.*, 32, 1455-1466.
- Reisner, J., R.J. Rasmussen, and R.T. Bruintjes (1998) Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model, *Q. J. R., Meteorol. Soc.* 124B, 1071-1107.
- Sistla, G., N. Zhou, W. Hao, J.-Y. Ku, and S.T. Rao (1996) Effects of uncertainties in meteorological inputs on urban airshed model predictions and ozone control strategies, *Atmos. Environ.*, 30, 2011-2025.
- Stull, R.B. (1992) *An introduction to Boundary layer Meteorology*, Kluwer academic publisher, 666 pp.