

UAM-V를 이용한 부산지역 고농도 오존사례 수치모의 Numerical Simulation of Ozone using UAM-V on Summer Episode in the Costal Urban Area, Busan

김 유 근* · 오 인 보 · 황 미 경
부산대학교 대기과학과
(2002년 4월 9일 접수, 2002년 10월 16일 채택)

Yoo-Keun Kim*, In-Bo Oh and Mi-Kyoung Hwang
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
(Received 9 April 2002, accepted 16 October 2002)

Abstract

Temporal and horizontal distributions of surface ozone concentrations covering the Busan metropolitan area were simulated by UAM-V (The Variable grid Urban Airshed Model) that was run with meteorological inputs taken from MM5 for ozone episode day (18 July 1999). UAM-V underestimated the daily maximum ozone concentration about 14 ppb on average at all monitoring sites within Busan area comparing with observed value, but the correlation between observed and simulated values showed quite significant ($R = 0.896$, $p < 0.01$ on average). Higher concentrations of ozone occurred near the city center and industrial areas (western side of city) with high levels of anthropogenic source in the morning, and transport of ozone and its precursors by sea breeze developed in the afternoon contributed to elevated ozone levels in downwind rural areas. Particularly in slightly downwind area of city center, the highest daily maximum ozone concentration (≥ 120 ppb) was simulated by UAM-V at 1400 LST. Consequently, local environments including emission distributions and land-sea breeze circulation influenced ozone distributions in the Busan metropolitan area.

Key words : Surface ozone, UAM-V, MM5, Land-sea breeze circulation

1. 서 론

부산은 우리나라 최남동단에 위치한 연안도시로 약 380만 명의 인구가 살고 있으며 도시화가 급속히 이루어지고 있는 국내 제2의 대도시이다. 최근

조사결과 오존농도가 지속적으로 증가하고 있는 추세로 1999년에는 138 ppb의 고농도 발생과 8시간평균 기준농도인 60 ppb를 27회 초과하는 오존오염현상이 일어나 이에 대한 정확한 실태와 원인분석이 요구됨을 부각시켰다.

일반적으로 연안도시의 경우 내륙도시와는 다르게 여름철 주로 발생하는 국지순환인 해풍에 의해 다수의 고농도 오존 발생을 경험하게 된다. 뚜렷한

* Corresponding author
Tel : +82-(0)51-583-2652, E-mail : kimyk@hyowon.cc.pusan.ac.kr

해륙풍순환으로 생기는 오전의 대기정체현상은 오후의 오존의 광화학 생성과 축적에 기여하게 되며 (Liu *et al.*, 1994; Liu *et al.*, 1990), 해풍의 유입은 인근 내륙으로 오존 및 전구물질들을 수송하여 풍하층에 오존농도를 상승시키게 된다 (Zhang *et al.*, 1998). 또한 수면의 약한 오존침적제거 영향과 (Entwistle, 1997), 해풍역전으로 인한 연직혼합의 제한은 고농도 오존 발생에 깊은 관련을 가지고 있다 (Lu and Turco, 1994).

따라서 연안도시 및 인근지역의 고농도 현상을 이해하기 위해서는 해륙풍 순환으로 인한 도시바람장의 변화와 도시규모의 오존수송 및 배출원 환경을 고려한 수평농도분포의 변동 파악이 무엇보다도 중요하다 볼 수 있으며, 이를 위해 3차원 관측을 통한 다양한 사례분석과 신뢰성 있는 광화학 수치모델링을 통한 검증이 요구된다. 하지만 현재 부산지역은 부족한 대기질 및 기상 관측자료로 인해 상급연구의 필요 연구의 수행이 상당한 어려움 실정이며, 특히 대부분의 대기질 측정망이 도심에 집중되어 있어 지역의 농도장 변화를 고찰하고 그 원인을 해석하는데 많은 문제점이 있다. 따라서 부산지역의 경우 광화학 수치 모델을 이용한 연구의 접근이 보다 중요하다고 볼 수 있다. 이에 따라 최근 부산지역을 대상으로 광화학 수치모델을 통한 오존농도 변동의 평가가 이루어졌는데, 김영주 (1999)가 UAM-IV 적용 및 민감도 분석을, 김수현 (2000)은 MM5와 UAM-IV의 접합하여 고농도 오존사례일의 농도변화를 모사하였다. 하지만 공간적인 농도분포변화를 정확히 고려하지 못했으며 상세 배출량 자료를 포함한 입력자료의 부정확성 등으로 인해 제한된 결과를 제시하고 있다.

따라서 본 연구에서는 고농도 오존 사례일의 오존의 시·공간적 분포 변화와 고농도 발생원인을 파악하기 위해 보다 상세한 입력자료 구성을 통해 국지순환에 따른 단거리 수송현상을 광화학 수치모델을 통해 진단하였다. 모델은 현재 미국과 유럽지역에서 도시지역 오존오염평가를 위해 폭 넓게 활용되고 있는 UAM-V (The Variable grid Urban Airshed Model) (SAI, 1996)를 사용하였으며 기상장은 MM5 (NCAR/PennState Fifth Generation Model) (Grell *et al.*, 1994)를 이용하여 생성시켰다.

2. 지형적 특성 및 배출원 환경

부산은 한반도의 남동단에 위치해 있고 약 760 km²의 면적을 가지고 있는 제1의 항구도시이다. 지형적 특성은 그림 1에 나타나듯이 소반도와 섬 그리고 만입이 발달하는 리아스식 해안이 존재하며, 배후에는 고도 500 m 내외의 구릉성 산지가 독립적으로 분포하고 여기서 뻗어 나온 산악은 완만한 경사로서 해안에 몰입하고 있는 형태이다. 배출원 환경

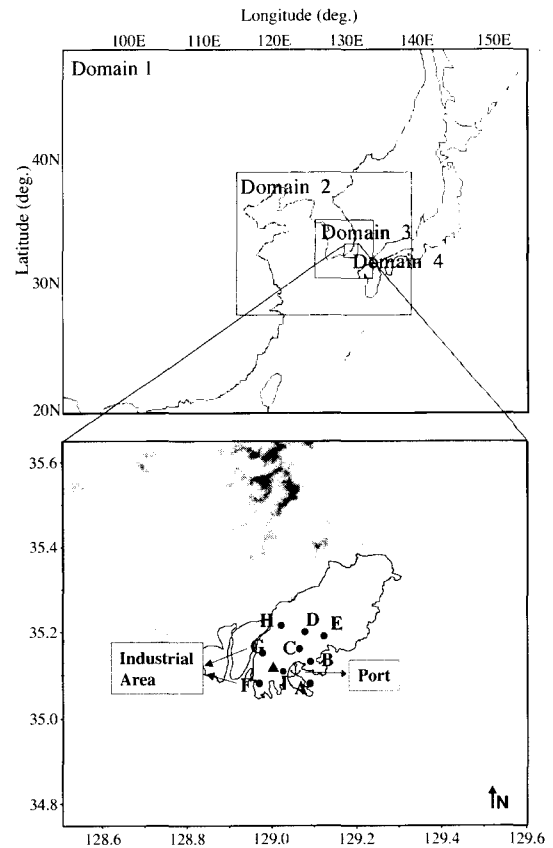


Fig. 1. Map depicting the four horizontal MM5 grids, and topographical feature and location of monitoring sites in the Busan metropolitan area. ● : Air-quality monitoring stations operated by the Environmental Protection Administration (A: Dongsam, B : Daeyeon, C: Beomcheon, D: Yeonsan, E: Jaesong, F: Sinpyeong, G: Gamjeon, H: Deokcheon, I: Kwangbok) ▲ : BWS (Busan weather station).

을 살펴보면, 우선 주요 도로와 상업지역이 해안선과 골을 따라 형성되어 있으며(김유근 등, 2001), 서쪽 외각에는 산업시설인 사상공단과 신평공단이 위치해 있다. 특히 상당량의 NO_x(전체 NO_x 배출량의 11.4%, 이화운 등, 1999) 배출원인 부산항이 남동쪽 해안을 따라 형성되어 있는 것이 특징이다.

이러한 부산의 국지 배출원 환경은 남풍계열의 해풍이 존재할 때 연안인접지역의 Fumigation현상을 초래할 수 있으며 오존 및 전구물질을 포함한 오염된 기체가 내륙으로 수송되어 풍하측 오존 농도상승에 영향을 줄 수 있는 조건으로 볼 수 있다.

3. 모델링 방법

3.1 UAM-V의 개요

UAM-V는 기존의 UAM에 비하여 grid nesting 기능 등이 보완된 지역규모의 오일리안 대기확산모델로서 대기에서의 물리적, 화학적 과정을 모사하며 화학적으로 반응성 물질과 비반응성 물질의 농도를 계산하는 3차원 광화학 격자모델이다(SAI, 1996). 모델은 대기확산과 물질별 연속방정식에 기본을 두었으며 이 방정식은 수치적인 항에서 표현되는 방출, 수송, 확산, 화학반응, 제거과정의 질량보존을 표현하며 기본 방정식은 식 1과 같다.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{\partial(uC_i)}{\partial x} - \frac{\partial(vC_i)}{\partial y} - \frac{\partial(wC_i)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left[K_x \frac{\partial C_i}{\partial t}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[K_y \frac{\partial C_i}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_z \frac{\partial C_i}{\partial z}\right] + S_i + R_i + D_i + W_i \quad (1)$$

여기서 C_i는 시간(t)와 3차원 공간(x, y, z)의 함수로 오염물질 i의 농도를 나타내며 u, v, w는 x, y, z 방향의 풍속, K_x, K_y, K_z는 수평, 연직방향의 난류확산계수를 의미한다. 또한 S_i, R_i, D_i, W_i는 오염물질의 배출합, 화학반응합, 건성침적 제거합, 습성침적 제거합을 각각 나타낸다. UAM-V는 이류/확산 방정식을 풀기 위해 유한차분법을 사용하며 각 단계로 나누어 실행되고, 화학반응 메커니즘은 유기화합물의 탄소결합구조를 기초로 화학종을 분류하여 반응 단계를 정리한 CB-IV(Carbon Bond Mechanism, Version IV)에 몇 가지 화학 반응식이 추가된 새로

운 건성침적 알고리즘이 사용되었으며, 본 연구에서는 습성침적은 고려되지 않았다.

3.2 대상 기간과 영역

본 연구에서는 부산 및 인근지역의 오존농도 수치모의를 위해 부산지역에 고농도 오존이 발생한 1999년 7월 18일을 중심으로 3일간(17~19일)을 모델링 기간으로 선정하였다. UAM 수행시 초기 17일 24시간은 오염물질의 이류 및 확산이 충분히 이루어지도록 하는 초기적응 시간(spin-up period)으로 처리하였다(SAI, 1996). 18일의 경우 부산지역 8개 대기질 측정소(광복동은 결측)에서 측정된 일최고 오존농도의 평균이 80 ppb를 넘었으며, 4개 측정소에서는 환경기준인 100 ppb를 초과하는 고농도가 나타났다. 모델링 기간의 오존농도 변동과 기상환경은 4장에 자세히 기술하였다.

모델링 영역은 그림 1과 같이 부산을 중심으로 한 100×100 km (34.75°N~35.65°N, 128.51°E~128.61°E)를 영역으로 오염물질의 유입, 유출에 따른 모델링 오차를 최소화하고, 상호 영향을 포함하기 위해 울산지역과 경남 마산·창원이 포함되었다. 모델링 격자는 총 50×50개로 구성되며 간격은 2km로 하였다.

3.3 입력자료

3.3.1 기상 자료

UAM-V의 기상입력자료는 중규모 모델 MM5로부터 얻어진 매 시간 기상자료(기온, 바람장, 습도, 고도별 기압, 연직 확산계수)로 구성되며, 연직으로는 18 m (sigma=0.998)에서 3.5 km까지 8층의 결과자료가 사용되었다. MM5 모델링은 NCEP(National Centers for Environment Prediction)에서 제공하는 6시간 전지구 재분석자료(GDAS, Global Data Assimilation System)를 사용하여 수행되었다. nesting은 그림 1과 같이 54 km에서 18 km, 6 km, 2 km까지 세 번 이루어졌으며 모델의 외부경계조건을 생성하기 위해 two-way interacting nested grid system을 적용하였다. 또한 모델의 초기 입력 값의 균형을 맞추기 위해서 24시간 spin-up시간을 두었으며, 하층대기의 수치모의 정확성 향상을 위해 대기경계층내의 물리과정을 보다 상세히 모사할 수 있는 MRF-PBL

(Hong and Pan, 1996) 옵션을 사용하였다. 아울러 모델결과의 향상을 위해 부산지역 내 AWS 관측자료 (u, v-wind, temperature)를 이용한 observational (station) nudging을 수행하였다.

3.3.2 배출량

대상영역의 배출량 입력자료인 면 오염원과 점 오염원의 NO_x, CO, THC의 배출량을 그림 2에 나타내었다. 그림의 표기는 일 배출량 기준으로 하였으

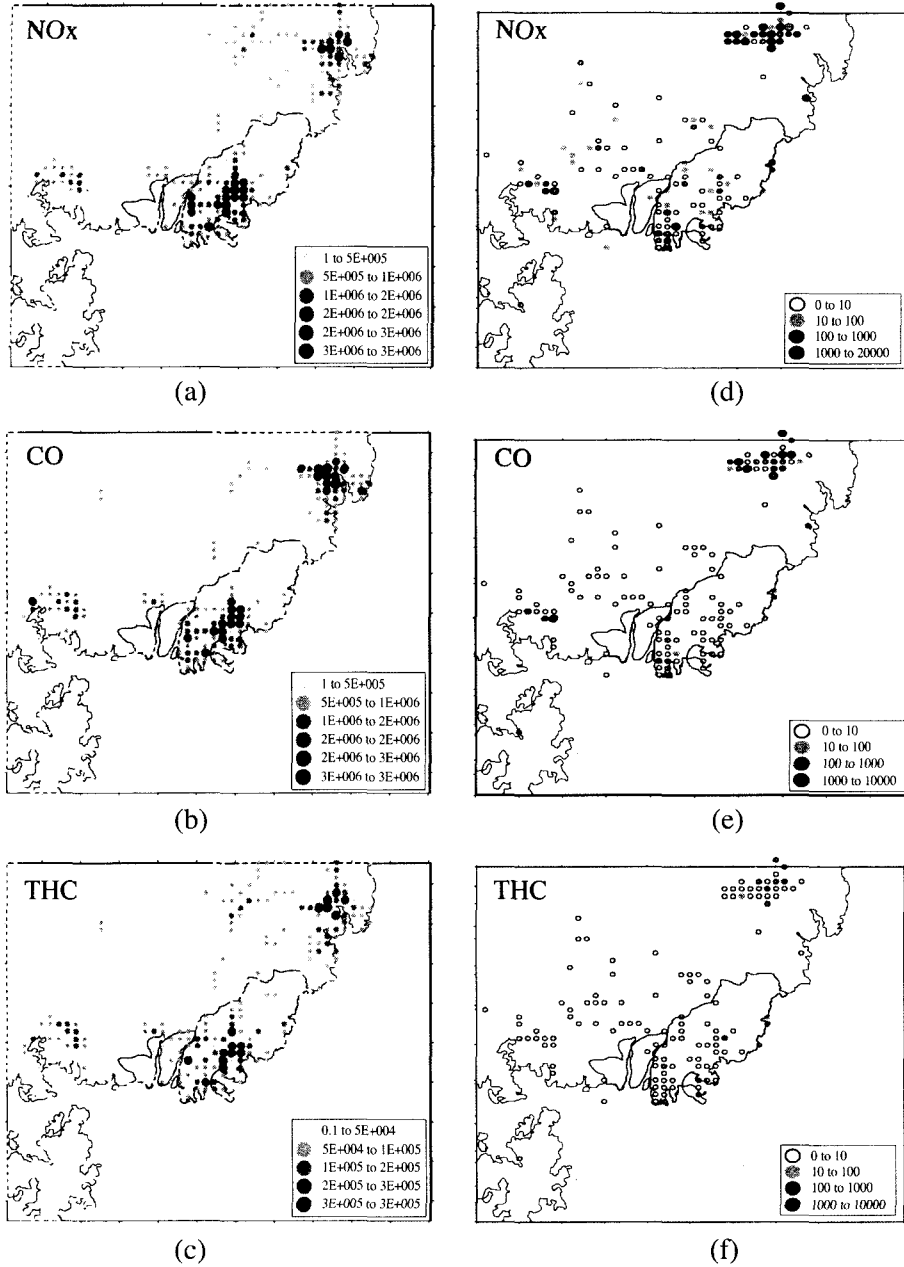


Fig. 2. Horizontal distributions of area emission (a, b, c) and point emission (d, e, f) in the Busan metropolitan area.

며 단위는 gmole이다. 먼 오염물질 배출량의 경향은 부산, 울산, 마산, 창원 등의 도심지를 중심으로 높은 값을 나타내었다. 특히 부산지역은 남포동과 서면지역의 중심지의 간선도로를 따라 높은 배출량을 보였으며 울산과 창원의 도심지와 공업지역을 중심으로 많은 배출량이 분포하고 있음을 볼 수 있다.

그리고 산정된 배출량은 CO>NO_x>VOC의 순으로 나타났으며 VOC 화학종의 배출량에 대해 PAR 61.7%로 가장 높은 비율을 차지하였고 TOL 18.5%, OLE 12.8%, XYL 7.1%, ETH 0.007%를 각각 나타내었다. 또한 점 오염원은 공단지역에서 높은 배출량을 나타내었다. 특히 울산지역의 울산공단과 창원의 남서쪽에 위치한 창원공단 등을 중심으로 NO_x와 CO 모두 1000 gmole 이상의 많은 배출량을 보였다. 부산지역의 경우 부산도심보다 사상공단과 신평·장림공단지역에서 높은 배출량을 보였으며 점오염원의 경우 NO_x와 CO의 배출량이 THC 배출량의 100배 이상 많은 배출량을 나타내었다. 배출량산정의 상세한 방법은 부산광역시(2002)에서 수행한 부산광역시 대기환경개선 실천계획 수립 보고서에 제시되어 있다.

3.3.3 초기 및 경계조건

대기오염물질의 초기조건은 대상영역에 위치한 대기오염 측정소의 NO₂, CO, O₃자료를 바탕으로 하여 내·외삽하여 부족한 초기치 자료를 생성시켰다. 또한 가정된 초기 상태를 제거하기 위해 충분한 모사 시간을 확보하여야 하므로, 고농도발생일 하루 전 이른 아침부터 모델을 수행하여 초기조건에 의해 발생하는 오차를 줄였다. 그리고 상부와 측면 경계조건은 측정을 통한 실측농도를 입력하는 것이 바람직하나 측정자료의 부족으로 SAI(1996)에서 제공하는 수치와 인근 지역의 지상 오염물질 농도 자료, 상층관측 오존농도 자료(부산광역시, 2002) 등을 참조하여 계산하였다.

4. 모델링기간의 대기환경 특성

그림 3은 모델링 기간중의 8개 관측지점별 오존농도의 변화를 나타낸 것이다. 고농도 오존 발생일인 7월 18일의 경우 일 중 큰 오존농도 변화 폭을 나타내었는데, 오전 차량이 집중되는 출근시간에 20

ppb 이하의 낮은 농도가 나타나며 오후(1300~1600 LST)에는 재송동을 제외한 모든 지점에서 80 ppb 이상의 고농도를 보여 광화학 반응에 의한 오존농도 상승이 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 범천동(107 ppb), 대연동(121 ppb), 감전동(123 ppb), 연산동(103 ppb) 지점에서는 100 ppb 이상의 아주 높은 농도를 보였으며, 각 지점의 8시간 평균치 역시 범천동(73 ppb), 대연동(86 ppb), 감전동(85 ppb), 연산동(68 ppb), 신평(66 ppb) 지점에서 60 ppb 이상의 고농도를 기록하였다. NO₂와 CO의 경우 그림으로 나타내지 않았지만 오존과는 달리 특징 있는 일 변화를 보이지 않았으며 모델링 전 기간 동안 각각 20 ppb와 800 ppb 전후의 농도 수치를 유지하였다.

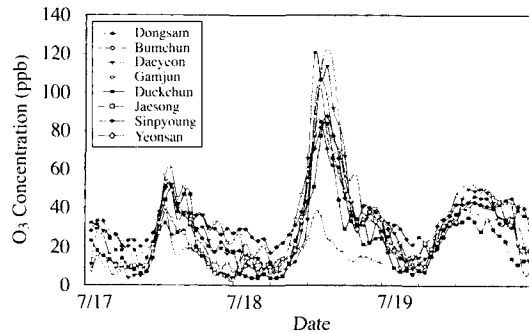


Fig. 3. Hourly ozone concentrations at each monitoring site in Busan, 17 ~ 19 July 1999.

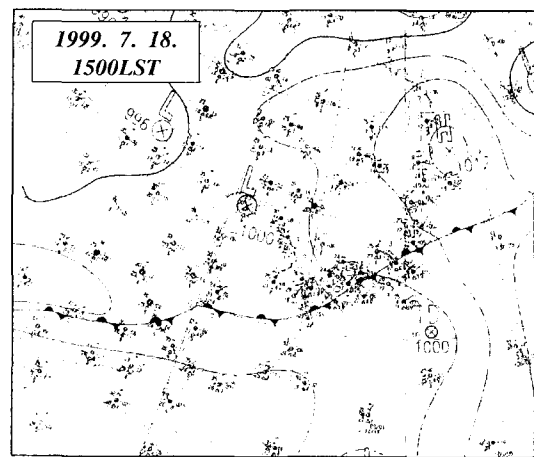


Fig. 4. Surface weather map for 18 July 1999.

모델링 기간의 기상조건을 살펴보면, 그림 4는 고농도 오존이 발생한 7월 18일의 1500 LST의 지상 일기도로, 부산지역은 고기압의 후면 가장자리에 위치하고 있으며, 약한 중관장의 영향하에 있음을 알 수 있다.

지상의 기상조건을 기상청(그림 1)에서 관측된 자료를 바탕으로 살펴보면(그림 5), 기온은 사례일인 18일에 평균 기온은 24.7°C, 일 최고 기온은 29°C로 3일 중 가장 높은 값을 나타내었으며(일사량은 1100 LST~1200 LST에 2.87 MJ m⁻²로 7월 17일, 19일보다 0.5 MJ m⁻² 이상 높은 값이 나타남), 풍향의 경우 남서풍계열만이 뚜렷했던 17일과 북서풍계열만이 뚜렷하게 나타난 19일과 달리, 사례일은 야간의 육풍과 주간 해풍이 뚜렷하게 나타나는 국지순환을 보였다. 이러한 국지순환은 오존의 고농도를 유발할 수 있는 기상조건으로 기존 여러 연구에서 이미 밝혀진 바 있다(오현선과 김영성, 1999; 김유근 등, 1996; 전병일 등, 1994). 사례일의 풍속은 일평균

2.1 m s⁻¹로 17, 19일에 비해 약하게 나타났으며, 특히 0800 LST에 0.3 m s⁻¹의 아주 약한 풍속을 보여 오전 중 오존전구물질의 국지적 축적에 적합한 대기정체 조건이 형성되었음을 알 수 있다. 아울러 그림 5에 MM5 모델링을 통해 산출된 기온과 풍향, 풍속 결과를 제시하였는데 풍향과 풍속의 경우 다소 오차가 있음을 알 수 있으나 일 변화경향은 전반적으로 잘 묘사하였다. 특히 기온의 경우 3일 동안 모델치와 관측치가 0.845 (p<0.01)의 높은 상관율을 나타내었다.

결과적으로 사례일인 18일은 NO₂와 CO 농도의 큰 변화가 없는 것으로 미루어 볼 때, 고기압의 영향과 27°C 이상의 높은 기온, 오전 중의 약한 풍속 및 해륙풍 순환의 복합적인 기상학적 영향으로 고농도가 형성되었음을 알 수 있다.

5. 수치모의 결과 및 분석

5.1 기온과 바람장

그림 6은 사례일을 대상으로 MM5 수치모의 결과로부터 얻은 지표부근(약 18 m)의 기온과 바람의 수평분포를 나타낸 것으로, 바다와 산악의 복합적 영향에 의해 시·공간적으로 다른 분포가 나타남을 알 수 있다. 새벽인 0600 LST에는 대상영역내 전체적으로 21~23°C의 온도범위를 나타내었으며 해양과 그 부근을 중심으로 상대적 높은 기온 분포를 보였다. 특징적으로 도시 전체에 거의 동일한 기온 분포가 나타나고 산악이 많이 분포하고 있는 도시 외곽 지역과 1~2°C 정도의 기온 차를 보였다. 결과적으로 바다에서 육지로의 양의 온도경도와 함께 육풍이 뚜렷이 나타남을 알 수 있다. 바람의 경우 산 정상에서 평지로 부는 산풍이 약하게 발생함을 볼 수 있으며 복잡한 산지의 지형 효과가 잘 고려되어 산악의 골을 따라 수렴된 공기괴가 해양으로 빠져나가고 있는 것이 잘 묘사되고 있다.

이후 일출과 함께 육지가열이 시작되어 해양과 내륙간의 온도경도가 바뀌면서 점차 육지의 기온이 상승하게 되며 1000 LST에는 해풍이 해안선 부근을 중심으로 발달함을 볼 수 있다. 한 낮인 1400 LST에는 야간과 비교해 수평적으로 약 6°C의 큰 온도차이를 나타내며 도시를 포함한 내륙지역에 고

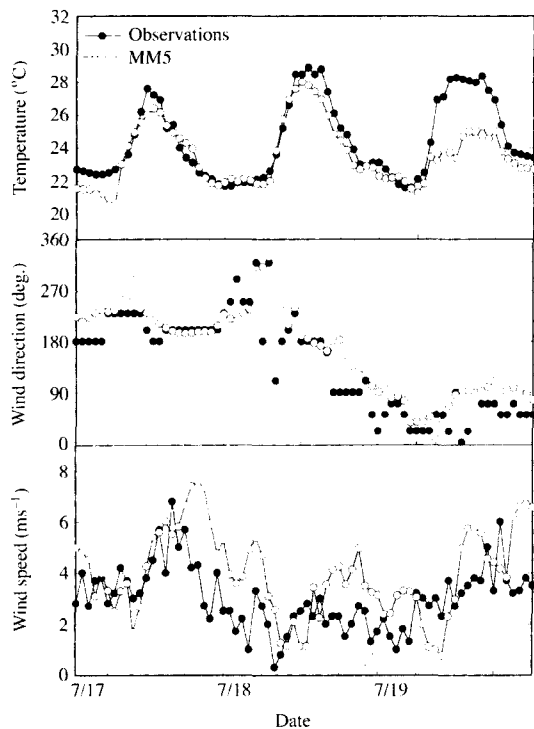


Fig. 5. Comparison of observed and simulated values for meteorological factors, 17~19 July 1999.

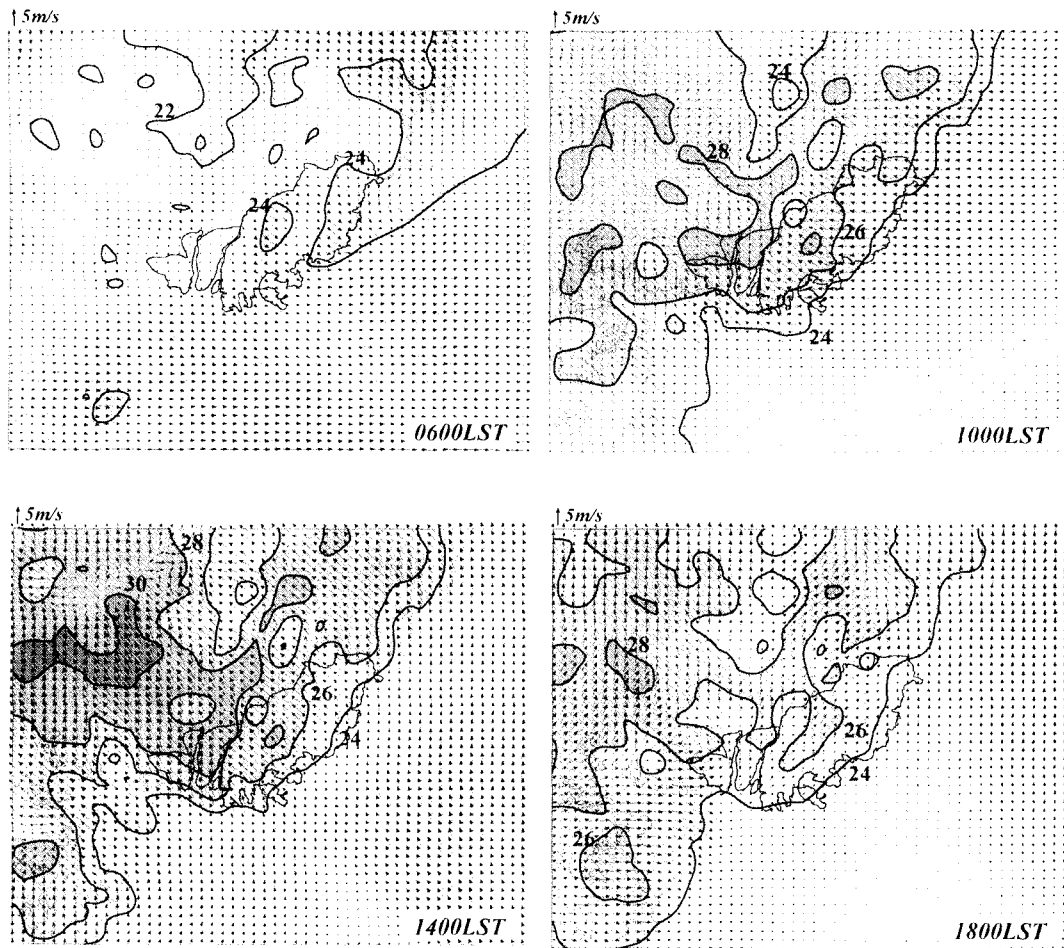


Fig. 6. Horizontal distributions of simulated air temperature and winds from MM5 on 18 July 1999.

온현상과 복잡한 지형으로 인한 기온변동이 크게 나타났다. 또한 부산 연안의 모든 지역에서 해풍이 강하게 발달하여 산악을 따라 내륙 깊은 지역까지 남동풍계의 강한 바람이 유입되고 있음을 볼 수 있다. 즉 사례일은 도시지역에 30°C에 가까운 높은 기온과 함께 해륙풍의 순환형태가 뚜렷이 나타났음을 알 수 있으며, 이는 오존 및 전구물질 수송과 관련해서 그 영향이 있음을 고려할 수 있다.

5.2 오존농도 예측

5.2.1 일변화

사례일인 18일과 다음날의 8개 측정소 평균된 오

존과 NO₂ 일변화를 그림 7에 관측자료와 비교하여 나타내었다. UAM-V로 모사되어진 오존 농도는 측정결과와 0.896 ($p < 0.01$)의 높은 상관을 나타내었으며 관측치 변화와 마찬가지로 출근시간(0800LST 부근)에 낮은 농도와 오후에 상승하는 경향을 잘 묘사하고 있다. 하지만 야간과 새벽에는 관측치와 비교적 큰 오차(최대 19 ppb)가 있음을 알 수 있는데, 이는 야간의 화학반응에 의한 오존제거와 재생성, 야간 역전층 상부에서의 갇혀진 오존의 하향 혼합 등 오존 농도를 결정짓는 과정을 잘 고려하지 못하는 것으로 사료된다(Hogrefe *et al.*, 2001). NO₂의 경우 역시 오전과 저녁시간에 고농도를 보이며 관측

값과 유사한 변동 경향을 나타내었으나, 측정치보다 평균 10 ppb 정도 높게 계산되었으며 오존보다는 측정치와 낮은 상관($R = 0.621, p < 0.01$)을 나타내었다. CO의 경우 측정치가 100 ppb 간격의 해상도를 가짐으로 인해 모델결과와 정확한 비교는 어려우며 이로 인해 실제로 0.334 ($p < 0.05$)의 낮은 상관을 보였다. 전반적으로는 관측값보다 평균 0.173 ppm 과대 평가되는 결과가 나타났다.

모델결과를 보다 자세히 진단하기 위해 표 1과 그림 8에 측정소별로 모델결과와 실측정치를 비교하였다. 표 1에 제시된 지점별 상관분석결과 신평과 재송동 지점을 제외하고 0.80 이상의 높은 상관을 보였으며 관측지점 중 대연동이 0.97의 가장 높은 상관을 나타내었다. 그림 8은 부산지역 내 주요 4개

지점을 대상으로 수치모의 된 결과의 일 중 오존농도 변동과 측정치를 비교한 그림으로, 선택된 지점은 해안에 인접해 있으며 비교적 청정지역으로 볼 수 있는 동삼동과 도심지를 지나고 산악의 골을 따라 위치한 대연동, 범천동, 연산동 지점이다. 분석결과 측정치와 모델결과가 전 지점에서 잘 일치함($R = 0.88, p < 0.01$)을 보였으며 전반적으로 모델결과가 측정치와 비교하여 4개 지점 평균은 3.4 ppb, 최대값은 14 ppb 정도 과소 평가하는 결과가 나타났다. 하지만 동삼동 지점의 경우 계산된 일최고 농도가 약 30 ppb 정도 과소 평가하는 비교적 큰 오차를 나타내었는데, 이는 정확히 단정할 수 없지만 동삼동

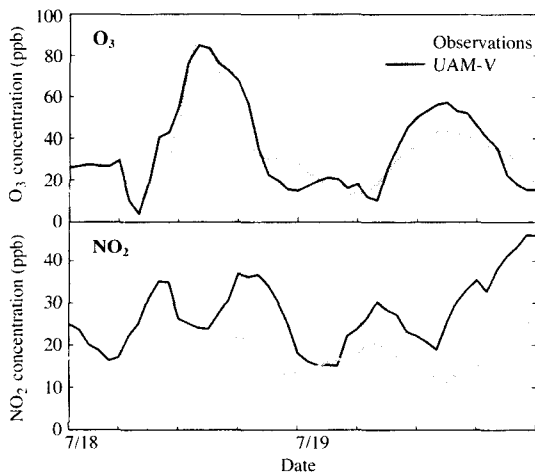


Fig. 7. Diurnal variations of the observed and simulated ozone and NO₂ concentration.

Table 1. Comparison of observed and simulated ozone concentrations on 18 July 1999.

Site	Daily ozone mean (ppb)		Correlation coefficient for hourly values ($p < 0.01$)
	Observed value	UAM-V	
Dongsam	32.1	28.6	0.89
Daeyeon	40.0	38.3	0.97
Beomcheon	38.9	42.5	0.83
Jaesong	16.3	39.3	0.76
Yeonsan	35.5	50.7	0.83
Sinpyeong	41.6	34.4	0.70
Gamjeon	45.3	42.0	0.86
Deokcheon	37.4	45.0	0.84

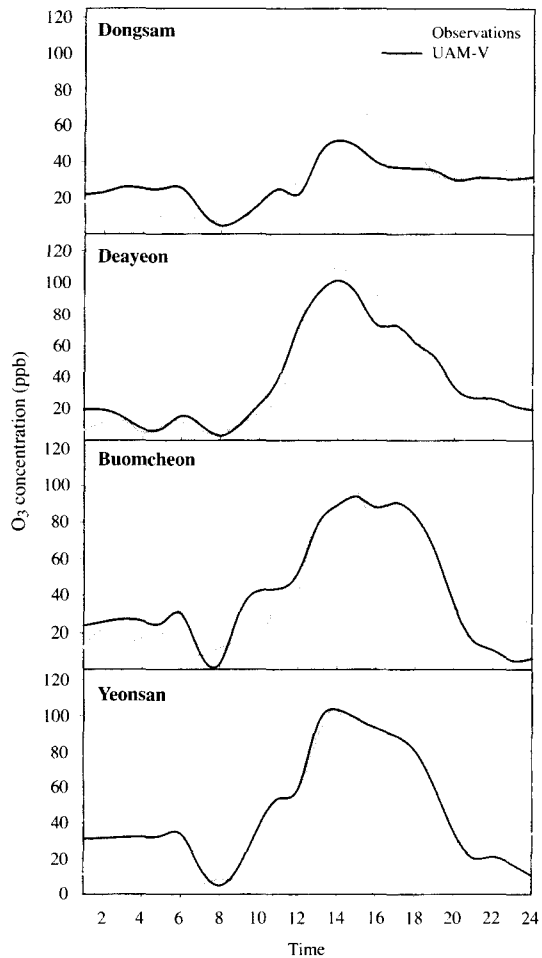


Fig. 8. Diurnal variations of the observed and simulated ozone in each monitoring site on 18 July 1999.

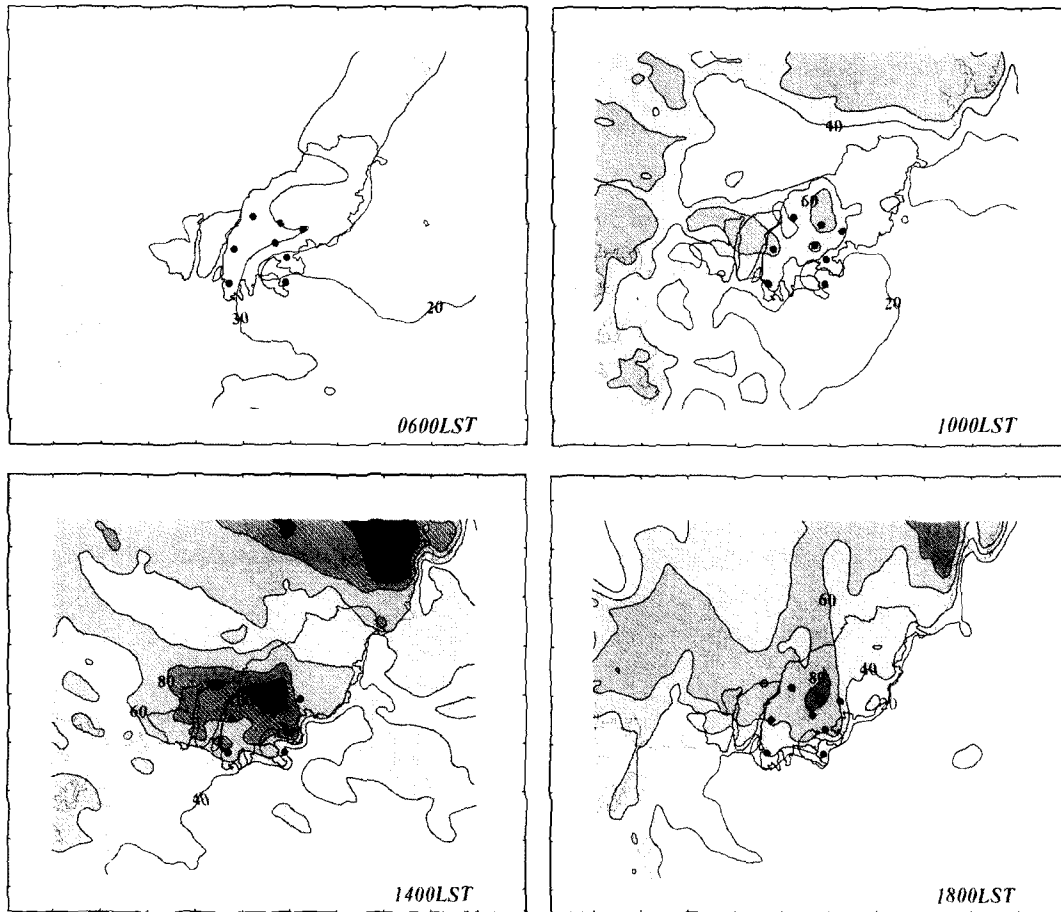


Fig. 9. Horizontal distributions of the simulated ozone concentrations from UAM-V on 18 July 1999.

지역과 근접해 있는 선박 배출원의 영향과 자연배출원이 고려되지 못한 것이 주된 원인으로 사료된다.

결론적으로 연안도시의 해륙풍 순환계가 잘 발달한 사례일의 오존농도를 수치모의 한 결과, 국지적으로 차이는 있지만 일 중 오존농도의 변동을 비교적 정확히 재현함을 알 수 있었다.

5.2.2 수평분포 변화

오존의 일변화 뿐만 아니라 수평적인 오존의 분포를 파악하는 것은 도시지역 오존오염의 공간적인 범위와 영향을 고찰하는데 매우 중요하다. 그림 9는 수치모의된 오존농도의 수평분포를 0600 LST에서 1800LST까지 4시간 간격으로 나타낸 것이다.

0600LST의 경우 약 20~40 ppb 정도의 낮은 농도가 전체적으로 나타났으며, 특히 부산 동쪽 연안에 저농도가 뚜렷이 나타나는 특성을 보였다. 이는 그림 6의 바람장에서 알 수 있듯이 부산지역에서 방출된 다량의 NO_x 가 야간에 존재하는 육풍에 의해 인근 동쪽 해양으로 유입됨을 보여주는 결과이다. 즉 도시와 인접한 해양의 경우, 국지 배출원이 존재하지 않지만 야간에 NO와의 화학반응을 통해 오존농도가 감소할 수 있으며 이는 육풍이 발달될 때 더욱 뚜렷할 수 있다.

일출 후 1000 LST에서는 내륙지역의 기온 상승과 함께(그림 6) 도시 내 범천동, 감전동, 연산동 지역을 중심으로 농도가 상승함을 볼 수 있으며, 여전

히 인근 해양에는 20 ppb 이하의 낮은 농도역이 존재함을 알 수 있다. 1400 LST에는 도시 내 형성되어 있는 골을 따라 풍하측에 위치한 연산동 지역을 부근으로 고농도역 (≥ 120 ppb)이 뚜렷이 나타나고, 부산의 북서방향으로 수십 km 떨어진 풍하측 지역에 80~90 ppb의 높은 농도가 분포함을 살펴볼 수 있다. 즉 해풍의 유입과 함께 도시외각 풍하측으로 고농도역이 확장했음을 보여주는 결과이다. 1800 LST에는 내륙의 고온역이 남아있는 지역과 유사하게 약 60 ppb의 오존농도가 산악지역을 제외하고 균질하게 분포하고 있으며, 도심에 발생한 오존오염의 영향이 보다 원거리로 확대됨을 확인할 수 있다.

결과적으로 해륙풍 순환에 의해 오존 및 전구물질이 수송·확산되어, 국지배출이 많은 도심 뿐만 아니라 풍하측에 위치한 도시 인근 외각 지역에 높은 오존농도가 나타남을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 부산지역 고농도 오존 사례일(1999년 7월 18일)의 시·공간적 오존농도 분포변화를 광화학 수치모델인 UAM-V를 이용하여 수치모의하였다.

수치모의 결과 지점별 차이는 있지만 측정치의 일변화 경향을 잘 재현하였으며, 상호간의 상관도 분석에서도 재송동을 제외한 전 지역에서 평균 0.8 이상의 높은 상관을 보여 수치모의 결과의 타당성을 알 수 있었다. 수평분포의 경우, 야간에는 인근 해양에 20 ppb 이하의 낮은 오존농도 분포를 보였으며 오후에는 도시의 풍하측 지역을 중심으로 120 ppb 이상의 고농도가 모사되어 오존 및 전구물질의 수송이 해륙풍 순환과 크게 연계되어 있음을 알 수 있었다.

결론적으로 부산지역 고농도 오존일을 대상으로 한 수치모의 결과 오존 농도의 시·공간적 변동을 잘 모사하였으며, 해풍으로 인한 오존 및 전구물질의 수송이 도심 풍하측으로의 고농도역을 형성시킴을 알 수 있었다. 하지만 UAM-V의 기상입력자료로 사용한 MM5 결과가 연안인접지역에 형성되는 해풍역전이나 Fumigation현상 등의 소규모 대기현상을 충분히 고려하지 못하는 점과 배출원 입력자

료의 오차, 대상영역 내 측정망 부족으로 인한 경계 조건의 부정확성 등에 의해 생성되는 여러 오차가 존재할 수 있으며 이는 앞으로 해결해야 될 문제이기도 하다. 또한 향후 자연배출량의 정확한 산정 결과와 아울러 충분한 오존 전구물질의 측정자료가 모델에 고려된다면 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 김수현 (2000) UAM을 이용한 부산지역 고농도 오존일의 수치모의, 부산대학교 대학원 석사학위논문.
- 김영주 (1999) 부산지역에서의 UAM 적용 및 민감도 분석, 부산대학교 대학원 석사학위논문.
- 김유근, 이화운, 오인보 (2001) 부산지역의 오존오염, 한국환경과학회지 봄 학술발표지, 10, 32-34.
- 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜 (1996) 부산 연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, 한국환경과학회지, 5, 265-275.
- 이화운, 김유근, 원경미, 조인숙 (1999) 연안의 선박오염배출을 포함한 부산지역의 대기오염물질 배출량 산정, 한국대기환경학회지, 15, 587-598.
- 오현선, 김영성 (1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 중관 기상 특성, 한국대기환경학회지, 15, 441-455.
- 전병일, 김유근, 이화운 (1994) 해풍이 부산지역의 대기오염농도에 미치는 영향, 한국환경과학회지, 3, 357-365.
- 부산광역시 (2002) 부산광역시 대기환경개선 실천 계획 수립-최종보고서.
- Entwistle, J., K. Weston, R. Singles, and R. Burgess (1997) The magnitude and extent of elevated ozone concentrations around the coasts of the British Isles., *Atmospheric Environment*, 31(13), 1925-1932.
- Hogrefe, C., S.T. Rao, P. Kasibhatla, W. Hao, G. Sistla, R. Mathur, and J. McHenry (2001) Evaluating the performance of regional-scale photochemical modeling system: Part II-ozone predictions, *Atmospheric Environment*, 35, 4175-4188.
- Hong, S.-Y. and H.-L. Pan (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Monthly Weather Review*, 124, 2322-2339.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D. Stauffer (1994) A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.

- Liu, C.M., S.C. Liu, and S.H. Shen (1990) A study of Taipei ozone problem, *Atmospheric Environment*, 24, 1641-1472.
- Liu, C.M., C.Y. Hung, S.L. Shieh, and C.C. Wu (1994) Important meteorological parameters for ozone episodes experienced in the Taipei Basin, *Atmospheric Environment*, 28, 159-173.
- Lu, R. and Turco R.P. (1994) Air pollutant transport in a coastal environment. Part I: two-dimensional simulations of sea-breeze and mountain effects, *Journal of Applied Meteorology*, 33, 127-137.
- Atmospheric Science, 15(15), 2285-2308.
- Systems Applications International, SAI (1996) User's guide to the variable-grid urban airshed model (UAM-V) SYSAPP-99-95/27r2, Systems applications international, San Rafeal, California, U.S.A.
- Zhang, J., S.T. Rao, and S.M. Daggupaty (1998) Meteorological processes and ozone excesses in the Northeastern United States during the 12-16 July 1995 Episode, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 776-789.