

## MM5-CMAQ 모델 시스템을 이용한 양산지역 봄, 여름 고농도 오존일의 발생과정별 기여도 평가

김유근 · 박상현<sup>1)\*</sup> · 강재은 · 송상근

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, <sup>1)</sup>(주)한국종합기술  
(2008년 2월 29일 접수; 2009년 10월 8일 수정; 2009년 11월 17일 채택)

### Numerical Simulation and Process Analysis Using the MM5-CMAQ in Yangsan on High Ozone Days during Spring and Summer

Yoo-Keun Kim, Sang-Hyun Park<sup>1)\*</sup>, Jae-Eun Kang, Sang-Keun Song

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-732, Korea

<sup>1)</sup>Environment Division, Korea Engineering Consultants Corporation, Seoul 143-715, Korea

(Manuscript received 29 February, 2008; revised 8 October, 2009; accepted 17 November, 2009)

#### Abstract

The relative contributions of physical and chemical processes to the production of ozone ( $O_3$ ) were evaluated based on an integrated process rate (IPR) analysis using the MM5/CMAQ in a downtown (i.e., Yangsan\_U) and suburban area (i.e., Ungsang) on high ozone days during spring and summer in 2006 (28 April and 8 August 2006). The IPR includes a horizontal advection (HADV) and diffusion (HDIF), a vertical advection (ZADV) and diffusion (VDIF), a dry deposition (DDEP), and a chemistry (CHEM). The VDIF in Yangsan\_U was found to be the most dominant contributor (29.5% in spring and 32.1% in summer) to high  $O_3$  concentrations, followed by the HADV and ZADV. In contrast, the contributions of the HADV (40.3% in spring and 32.3% in summer) in Ungsang were significantly higher than those of VDIF and ZADV. Moreover,  $O_3$  production due to the chemical effect in the two areas (especially in Ungsang) during summer was found to be moderately higher than that during spring.

**Key Words :** Ozone, MM5/CMAQ, Process analysis, Contributions

#### 1. 서론

대도시에서의 오존오염이 여전히 정체 또는 악화됨에 따라 정부는 수도권을 대상으로 광화학 대기오염 생성과정 규명과 저감대책 수립을 위한 연구 사업을 실시한 바가 있다. 연구를 통해서 수도권 지역의 고

농도 오존발생시 주요 원인물질 및 발생 기구를 상당수 규명하였고, 미국 환경청의 3차원 광화학 수치모델인 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) 모델을 이용하여 저감 대안별 오존 감소효과를 평가함으로써 수도권 오존농도의 효율적 제어방법을 제시하였다(국립환경과학원, 2006).

고농도 오존발생에 대한 분석을 위해 수치모델을 활용한 많은 연구가 수행되어 왔으나(김 등, 2003; 이 등, 2005; 전 등, 1997; Lee 등, 2007), 앞서 제시한 수

\*Corresponding Author : Sang-Hyun Park, Environment Division, Korea Engineering Consultants Corporation, Seoul 143-715, Korea  
Phone: +82-2-2049-5305  
E-mail: babopsh@empal.com

도권 오존 연구에서는 고농도 오존의 특성을 분석하는데 있어서 CMAQ 모델 내의 Process analysis 과정을 활용하여 발생과정에 대한 이해를 정량적으로 쉽게 파악할 수 있게 하였다.

CMAQ 모델 내의 Process analysis는 오존발생 과정에 대한 기여도 분석방법으로 모델 예측시 각 발생과정별 기여도를 산출하여 모델의 예측과정과 각 과정의 상대적인 중요성에 대한 정보를 파악할 수 있게 하며, 모델 자체 또는 입력 자료에서 야기되는 모델 예측치의 차이점을 이해하고, 결과를 해석하는 데 유용하게 사용된다(문 등, 2005). 이러한 Process analysis를 적용하여 Huang과 Fung(2005)은 홍콩의 고농도 오존 사례에 대해 광화학 반응 생성량과 수송량을 평가한 바가 있으며, Jose 등(2003)은 스페인의 수도 마드리드를 대상지역으로 고농도 오존 사례의 광화학 반응 생성량과 연직확산 및 수송량을 정량적으로 분석하여 발생원인을 해석하였다.

본 연구의 대상지역인 양산은 고농도 오존 발생빈도가 인근에 위치한 부산 및 울산과 유사하거나 높은 수준에 있어(양산시, 2007), 인근 주요도시로부터의 수송영향을 비롯하여 계곡지형 내에서의 신도시 조성 및 산업단지 발달로 인한 국지적 광화학 반응 생성 영향 등 오존농도 증가에 있어 다양한 발생과정이 예상됨

으로 CMAQ 모델 내 Process analysis 과정을 적용하여 오존 발생과정별 기여도 평가 결과를 분석하고자 하였다. 분석대상 사례일은 지역 내 봄철과 여름철 대기질 실측정기간 중 오존농도가 대기환경기준치를 초과한 날(고농도 오존일)로, 계절차이에 따른 고농도 오존일의 오존농도 상승시 발생과정별 기여도 차이를 비교하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 대상지역과 사례일 선정

Fig. 1은 양산시의 지리·지형적 특성과 배출환경, 그리고 기상 및 대기질 측정지점을 나타낸 것이다. 양산시는 산지지형으로 인해 양산도심(Yangsan\_U)지역과 웅상(Ungsang)지역으로 나누어지며, 두 지역을 각각 기여도 평가의 대상지역으로 설정하였다. 두 지역 내 대기질 측정지점과 기상 관측지점은 각각 한 곳으로 대기오염물질의 공간적 특성분석을 위해 이동측정차량을 이용하여 계절별 대기질 측정을 실시한 바 있다. 봄과 여름철 측정기간 중 기존 대기질 측정지점과 함께 해당일의 이동측정지점(A, B)에서 시간별 오존농도가 1시간 또는 8시간 기준치를 초과하였다. 따라서 본 연구에서는 대기환경기준치를 초과한 날인

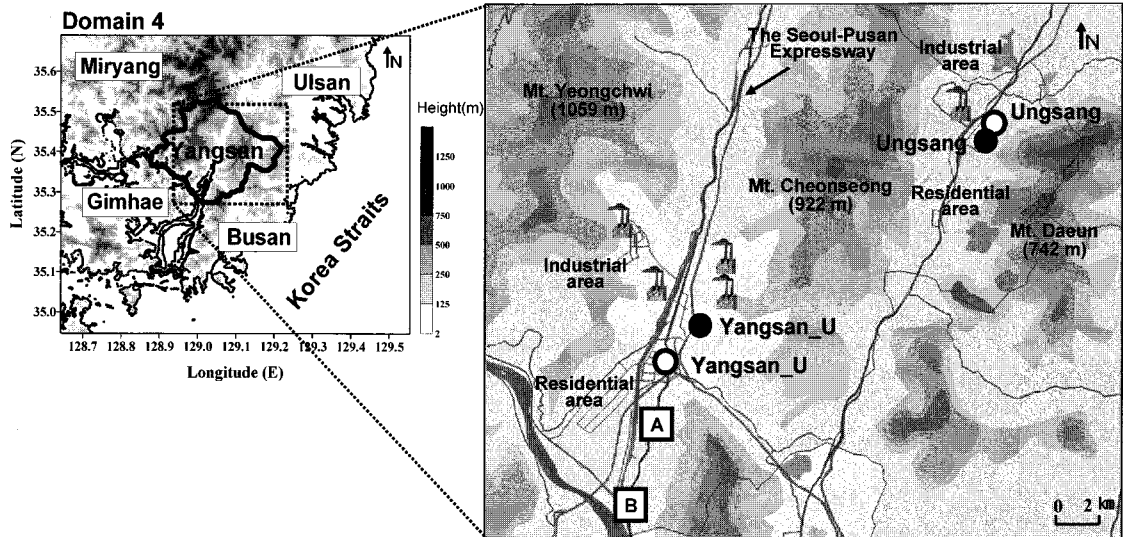


Fig. 1. Topographical features and the locations of meteorological (open circles) and air pollution monitoring sites (shaded circles), and mobile air quality measurement sites (A and B) in the Yangsan city.

2006년 4월 28일(8시간 기준 60 ppb 초과일)과 2006년 8월 8일(1시간 기준 100 ppb 초과일)을 고농도 오존일로 정의하여 각각 봄철과 여름철 고농도 오존일의 사례일로 선정하였다.

## 2.2. 모델 적용

대상지역 내 오존농도의 수치모의 및 발생과정별 기여도 평가를 위해 기상장 모델은 Mesoscale Meteorological Model version 5(MM5)를(Grell 등, 1995), 대기질 모델은 CMAQ을 사용하였다. MM5의 초기 기상장 입력자료는 기상청에서 제공되는 수치결과자료인 Regional Data Assimilation Prediction System(RDAPS)을 이용하였다. 대상지역이 상세히 포함되는 최종모델 영역(domain 4)은 인근 도시로부터의 오염물질 수송영향을 고려하기 위해 부산과 울산을 포함하여 설정하였으며(Fig. 1 참조), 1 km 격자간격으로 구성하였다. 이를 수치모의하기 위해 3번의 nesting을 수행하였으며, 모형의 외부경계조건을 생성하기 위해 two-way interacting nested grid system을 적용하였다(Dudhia 등, 2003).

CMAQ 모델은 MM5의 domain 3을 coarse domain으로 최종모델 영역인 domain 4를 fine domain으로 하였으며, 수평격자 거리는 각각 3 km와 1 km, 연직 격자수는 총 13층으로 설정하였고, 모델 수행시 화학 메커니즘은 CB-IV를 사용하였다. 배출량 자료는 국립환경과학원에서 제공한 2004년 대기정책지원시스템의 Clean Air Policy Support System(CAPSS)을 사용하였다. MM5와 CMAQ 모델 수행시 적용된 주요 내용은 Table 1과 같다.

기여도 평가는 양산도심과 용상에 위치한 기존 대기질 측정지점과 함께 두 지점을 각각 포함하는 양산

도심 전체와 용상 전체 영역에 대해서 수행하였다. 양산도심 전체와 용상 전체에 해당하는 수평영역은 각각  $10 \times 10$  km와  $6 \times 6$  km이며, 연직영역은 측정지점의 높이를 고려하여 모델의 2번째 층( $\sigma=0.980$ )에 해당하는 지상에서부터 약 100 m까지이다. Table 2는 CMAQ의 Process analysis 과정을 나타내는 변수들로, 보다 다양한 발생과정들이 있으나 본 연구에서는 일정 수준 이상을 차지하는 변수들에 대해 분석하였다.

## 3. 사례일 분석 및 수치모의 결과

### 3.1. 봄철 고농도 오존일(2006년 4월 28일)

2006년 4월 28일은 이동측정지점인 A 지점과 기존 대기질 측정지점인 양산도심과 용상 지점에서 측정된 오존농도가 8시간 기준치인 60 ppb를 초과한 고농도 사례일이다. Fig. 2는 고농도가 나타난 28일을 중심으로 전·후의 양산도심과 용상, 그리고 A 지점에서의 오존 및 NO<sub>2</sub> 농도변화를 나타낸 것이다. 양산도심 지점에서의 일최고 오존농도는 27일에 61 ppb(1800 LST)에서 다음날인 28일에 75 ppb(1500 LST)로 증가하였으며, 29일에는 58 ppb(1300 LST)로 감소하였다. 28일의 8시간평균 최고 오존값은 68 ppb로 일중 5회 초과되었고, NO<sub>2</sub> 농도는 오존농도의 변화와 역상관

Table 2. Codes of Process analysis in the CMAQ

Code	Process description
HADV	Horizontal advection
ZADV	Vertical advection
DDEP	Dry deposition
HDIF	Horizontal diffusion
VDIF	Vertical diffusion
CHEM	Chemical production

Table 1. The configuration of the MM5/CMAQ for the numerical modeling

	Domain 1	Domain 2	Domain 3	Domain 4
Horizontal grid	139 × 139	88 × 82	52 × 49 (49 × 46)*	82 × 82 (79 × 79)*
Resolution (km)	27	9	3	1
Vertical grid	23 layers (13 layers)* Grell cumulus scheme			
Physical option	MRF PBL scheme			
	RRTM longwave radiation scheme			
	Mixed phase moisture scheme			

\*The numbers in parenthesis denote information of the CMAQ configuration

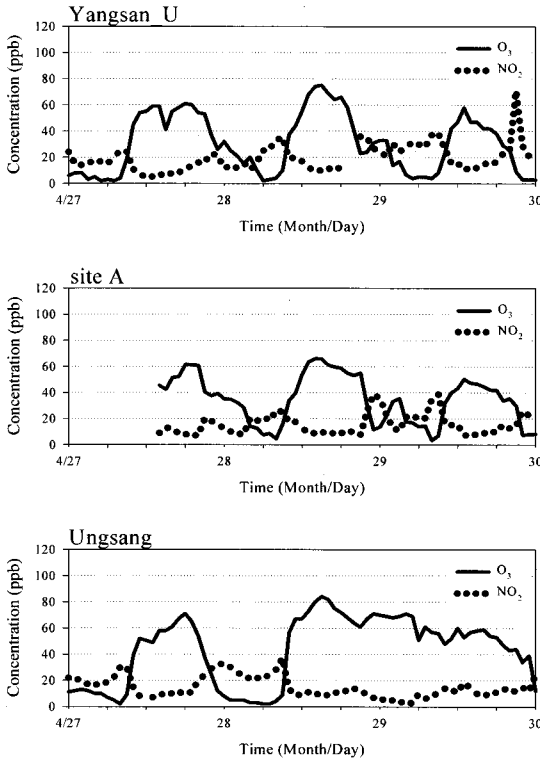


Fig. 2. Hourly variations of  $O_3$  and  $NO_2$  concentrations at Yangsan\_U, site A, and Ungsang from 27 to 29 April in 2006.

분포를 보였다. A 지점은 양산도심 지점과 인근에 위치하고 있어 유사한 농도변화를 보였으며, 일최고 오존농도는 양산도심 지점보다 낮은 66 ppb이고, 8시간 기준치는 일중 2회 초과하였다. 웅상 지점에서의 일최고 오존농도는 27일에 71 ppb에서 28일에는 84 ppb까지 증가하였으며, 29일에는 71 ppb로 감소하였다. 즉 웅상 지점의 일최고 오존농도는 양산도심 및 A 지점보다 높은 수준을 유지하였다. 고농도 사례일인 28일의 8시간평균 최고 오존값은 75 ppb로 다른 지점보다 높은 값을 가졌으며, 기준치는 일중 10회 초과하여 야간시간대까지 고농도 수준이 지속되는 특징을 보였다. 즉 늦은 오후까지 지속된 고농도 현상으로 웅상 지점에서의  $NO_2$  농도변화는 양산도심 및 A 지점과 달리 야간의 농도증가 분포가 약화되었음을 알 수 있다.

Fig. 3은 고농도 오존 발생시(28일 1500 LST)의 지상 일기도이다. 등압선 분포를 보면 대상지역은 우리나라

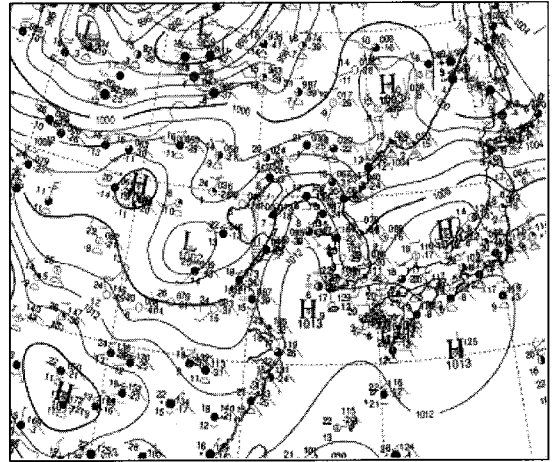


Fig. 3. Surface weather map for 1500 LST on 28 April 2006.

남서쪽에 중심을 둔 고기압 가장자리의 영향을 받고 있어, 다소 흐린 대기 상태가 예상된다. 또한 대상지역은 남풍 및 남서풍의 종관기류가 발달되는 조건하에 있어 일중 국지규모의 기상조건 발달은 약할 것으로 보인다.

Fig. 4는 고농도 사례일의 양산도심과 웅상 지점에서의 기온과 풍속, 그리고 풍향의 일변화를 관측값과 함께 모델값을 비교하여 나타낸 것이다. 기온 관측값의 경우 양산도심과 웅상 지점의 분포변화가 유사하며, 일최고 기온은 양산도심 지점에서 19.4°C, 웅상 지점에서 20.1°C로 웅상 지점이 보다 높으나 두 지점 모두 계절적 기상조건으로 인해 오존의 광화학 생성반응이 활발한 30°C 이상의 상대적 고온조건을 갖지는 않았다. 풍속 관측값의 경우 양산도심의 일최대 풍속은 1600 LST의 7.7 m/s인데 반해, 웅상 지점의 일최대 풍속은 2300 LST의 5.2 m/s로 두 지점의 일중 풍속변화가 차이를 보였다. 또한 오존 농도의 증가분포를 가진 오후 시간대(1200~1800 LST)의 평균 풍속은 양산도심 지점에서 6.4 m/s, 웅상 지점에서 4.0 m/s로 웅상 지점의 풍속값이 양산도심 지점보다 낮았다. 풍향 관측값의 경우는 종관풍 발달이 예상되는 조건하에 두 지점 모두 남풍 및 남서풍이 지배적인 조건을 보였다(특히, 오후 시간대). 즉, 두 지점 모두 유사한 기류 영향하에 있으며 지형적 조건에 의해 일중 풍속변화가 차이를 가진 것으로 보여진다. 또한 비교적

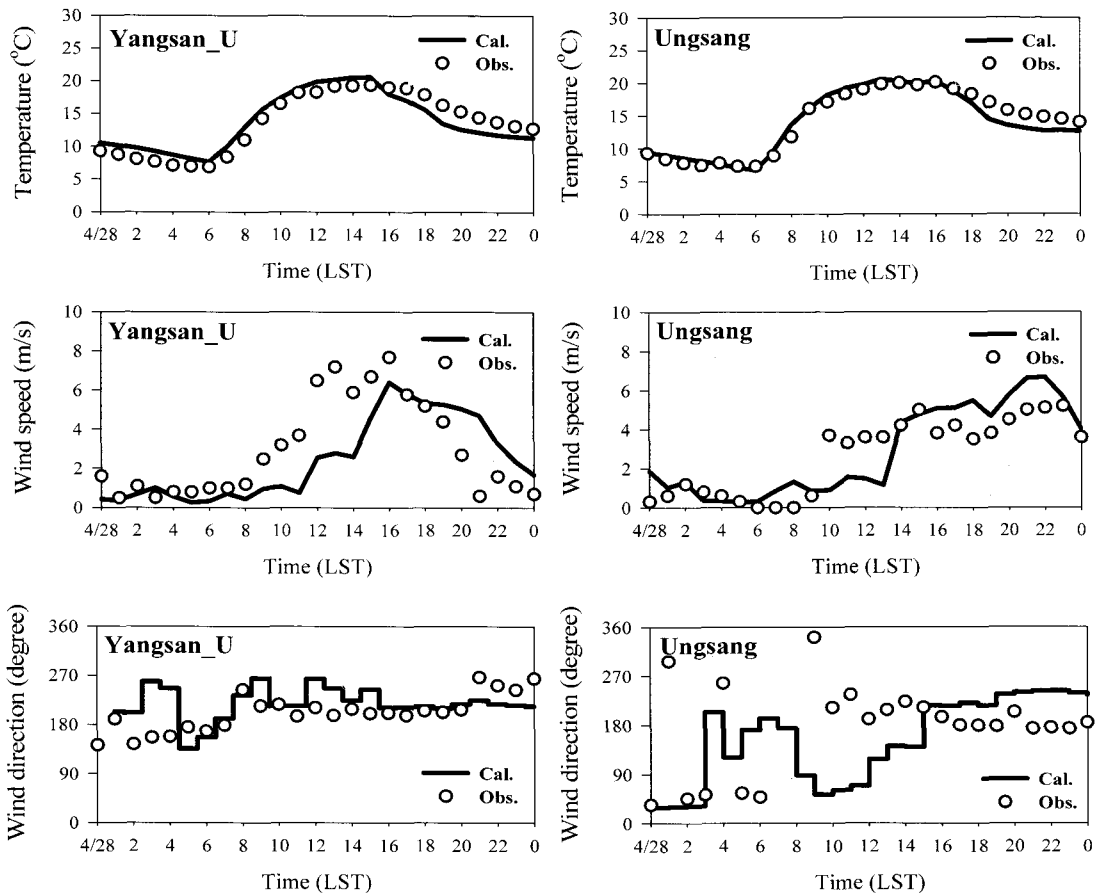


Fig. 4. Comparison of hourly variations between the observed and predicted meteorological variables (temperature and wind speed and direction) at Yangsan\_U and Ungsang on 28 April 2006.

낮은 일최고기온과 다소 강한 남풍 및 남서풍의 조건을 통해 해당 고농도 사례일의 오존농도 변화는 지역 내 배출된 오존 전구물질들의 광화학 반응 생성의 영향보다는 지역적 규모의 수송 영향(인근 도시로부터의 오존 및 전구물질의 수송 영향)이 크게 작용할 것으로 추정된다.

한편 관측값과 모델값(MM5 수행결과)의 비교에서, 기온은 모델값과 관측값의 일변화 경향이 유사하게 모의되는 결과를 보였다. 풍속의 경우는 모델값과 관측값의 일최대 풍속 발생시간이 다소 차이를 보였으나 일최대 풍속값과 각 지점별 특징적인 일중 변화 모습은 반영되어 나타났다. 풍향의 경우는 일중 오후의 지배적인 남서풍 풍계가 관측값과 유사하게 모의되었음을 알 수 있다.

### 3.2. 여름철 고농도 오존일(2006년 8월 8일)

여름철 고농도 오존 사례일인 2006년 8월 8일은 양산도심과 웅상 지점, 그리고 해당일의 대기질 이동측 정지점인 B 지점 모두에서 오존의 1시간 기준치인 100 ppb를 초과하였다. Fig. 5는 사례일을 포함한 전후의 각 측정지점별 오존과 NO<sub>2</sub>의 농도변화를 나타낸 것이다. 양산도심 지점에서의 일최고 오존농도는 사례전날인 7일에 62 ppb(1400 LST), 사례당일인 8일에 102 ppb(1400, 1500 LST), 사례 다음날인 9일에 87 ppb(1400 LST)로 봄철 사례일보다 높은 농도수준을 보였으며 발생시간대가 유사하였다. B 지점에서의 일최고 오존농도는 7일 93 ppb(1500 LST), 8일 115 ppb(1400 LST), 9일 89 ppb(1500 LST)로 양산도심 지점보다 높은 농도수준을 유지하였다. 웅상 지점의

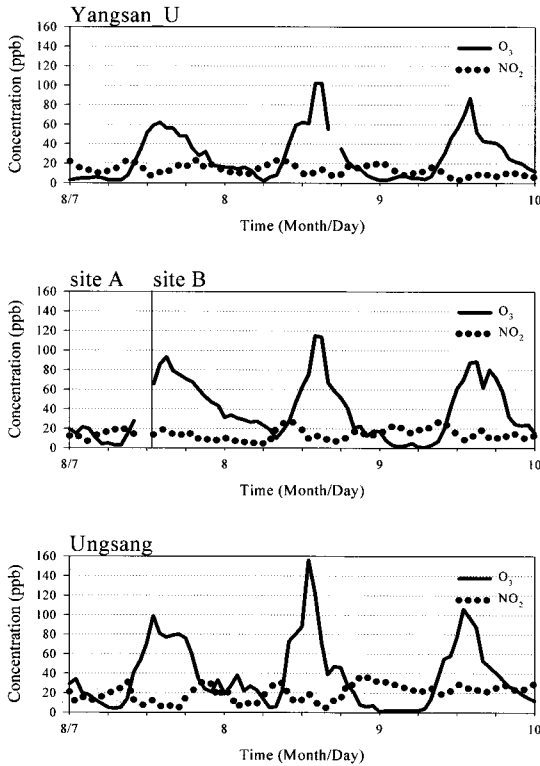


Fig. 5. Hourly variations of  $O_3$  and  $NO_2$  concentrations at Yangsan\_U, site B, and Ungsang from 7 to 9 August in 2006.

일최고 오존농도는 7일에 99 ppb(1300 LST)에서 8일에 120 ppb를 초과하였으며(실시간 공개자료에서(환경관리공단, 2006) 120 ppb를 초과하여 오존주의보 발령되었으나 통계자료에서는 missing data 상태), 9일에는 106 ppb (1300 LST)로 양산도심 및 B 지점보다 높은 농도수준을 유지하였다. 즉, 전 지점 모두 봄철 사례보다 높은 일최고 오존농도 수준을 보였으며, 고농도 발생시간이 지점별로 유사함을 알 수 있다. 본 사례일의  $NO_2$  농도값은 봄철보다 감소된 농도수준을 보이나 각 지점별 농도변화는 증가된 일사량의 영향 등으로 광화학 반응이 활발해짐에 따라 오존농도와 역상관 분포가 봄철 사례보다 뚜렷하다.

Fig. 6은 고농도가 발생된 2006년 8월 8일(1500 LST)의 기상일기도이다. 우리나라는 발달된 고기압의 직접적인 영향하에 있어 맑은 대기상태가 예상된다. 또한 등압선 간격이 넓어 대상지역은 약한 종관풍

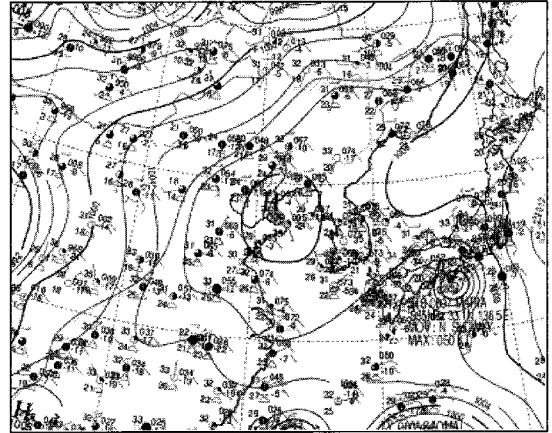


Fig. 6. Surface weather map for 1500 LST on 8 August 2006.

의 조건하에서 일중 주야간 풍향반전과 풍속발달의 차이를 가지는 국지풍 발달을 예상할 수 있다.

Fig. 7은 고농도 사례일(8일)의 양산도심과 웅상 지점에서의 기상요소(기온, 풍속, 풍향) 일변화를 관측값과 함께 모델값을 비교하여 나타낸 것이다. 기온 관측값의 경우 양산도심 지점과 웅상 지점의 분포가 유사하며, 일최고 기온값은 양산도심 지점이 34.7°C, 웅상 지점이 35.5°C로 봄철 사례와 비교시 높은 기온조건을 가졌다. 풍속 관측값에 있어 일최대 풍속값은 양산도심 지점이 5.5 m/s(1500 LST), 웅상 지점이 2.9 m/s(1700 LST)이며, 해당사례일의 고농도 오존이 발생된 1300~1500 LST의 평균 풍속값은 양산도심 지점이 4.2 m/s, 웅상 지점이 2.7 m/s로 나타났다. 즉, 봄철 사례와 비교시 약한 풍속조건을 가지며, 웅상 지점이 상대적으로 일중 보다 약한 풍속 조건하에 있음을 알 수 있다. 풍향 관측값의 경우 농도증가 분포시 양산도심 지점에서는 남풍이 지배적이나 웅상 지점에서는 동풍 및 북동풍 계열(약한 풍속조건하)의 분포를 보였다. 이는 봄철 사례와 달리 국지규모의 기상조건이 발달됨에 따라 지점별 풍향 및 풍속 분포 변화가 차이를 가지게 된 것으로 설명된다. 즉 여름철 고농도 사례에 있어 양산도심 지점은 약한 종관풍하에 있으나 지형적 조건(남서-북동 방향으로의 계곡지형 내 위치)으로 인해 국지규모의 남풍이 발달됨에 따라 풍상측으로부터의 오존 및 전구물질의 수송영향이 일부 예상되며,

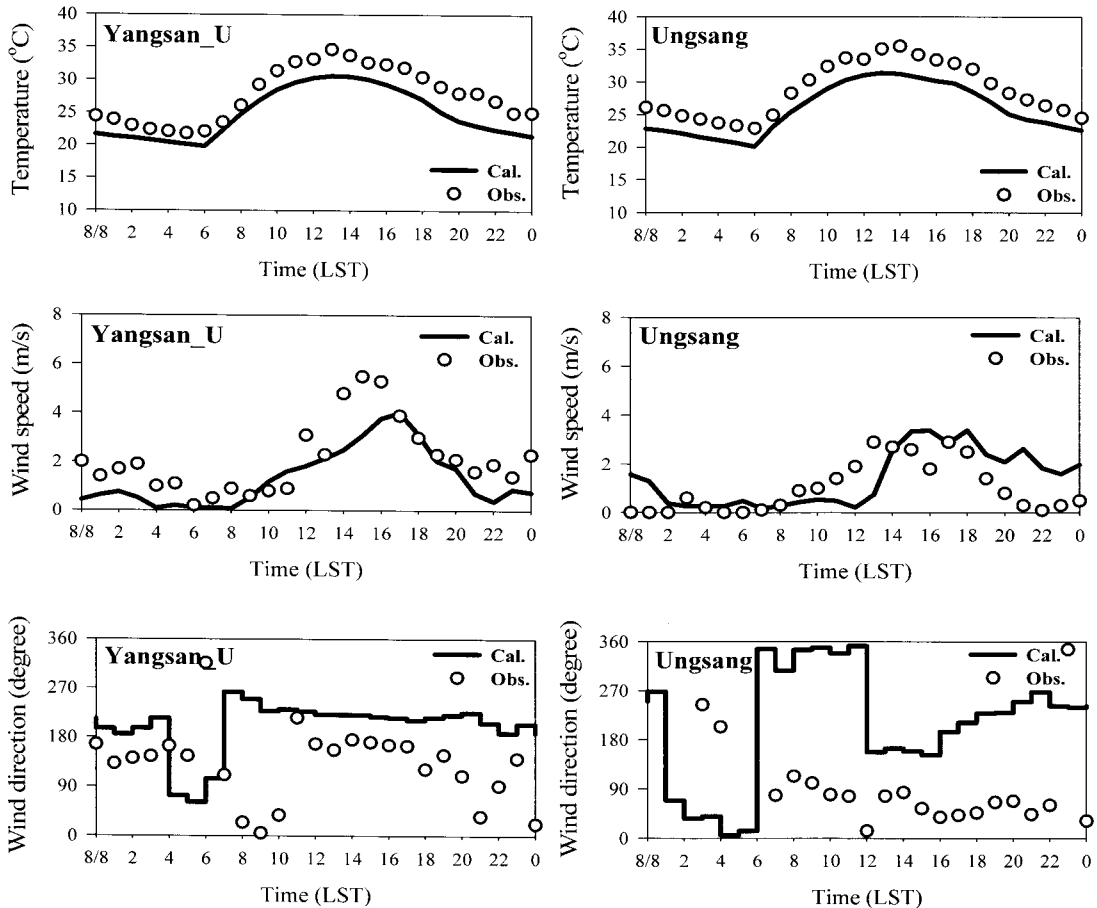


Fig. 7. Comparison of hourly variations between the observed and predicted meteorological variables (temperature and wind speed and direction) at Yangsan U and Ungsang on 8 August 2006.

웅상 지점은 고온과 함께 약한 풍속으로 인해 국지적 광화학 생성 반응이 활발할 것으로 예상되는 기상조건을 가졌다.

한편 MM5의 수치모의 결과값을 관측값과 비교시, 기온의 경우는 양산도심과 웅상 지점 모두 모델값이 일중 약 2°C 낮게 묘사되어 여름철 도시화 효과가 충분히 반영되지 못한 결과로 보여지나, 일변화 경향은 관측치와 유사한 분포를 보였다. 풍속의 경우는 봄철 사례와 유사하게 최대풍속의 발생시간은 차이를 가지나 각 지점별 일변화 특성은 유사하게 모의되었다. 풍향의 경우는 약한 풍속조건을 가진 웅상 지점에서 일중 변화모습이 차이를 보였으나 비교적 높은 풍속조

건을 가진 양산도심 지점에서는 일중 남풍 및 남서풍의 변화가 반영된 결과를 보였다.

#### 4. 기여도 평가

고농도 오존현상이 나타난 두 사례일에 대해 양산도심과 웅상 지점, 그리고 두 지점을 포함하는 양산도심영역(Yangsan\_U area)과 웅상 영역(Ungsang area)에서의 오존발생과정별 기여도 평가결과를 분석하였다.

Fig. 8은 봄철 사례일인 2006년 4월 28일의 양산도심과 웅상 지점 각각에서의 오존농도(관측값과 모델값) 및 오존 발생과정별 기여도 일변화를 나타낸 것이다. 오존농도의 일변화를 보면, 두 지점 모두 대체로

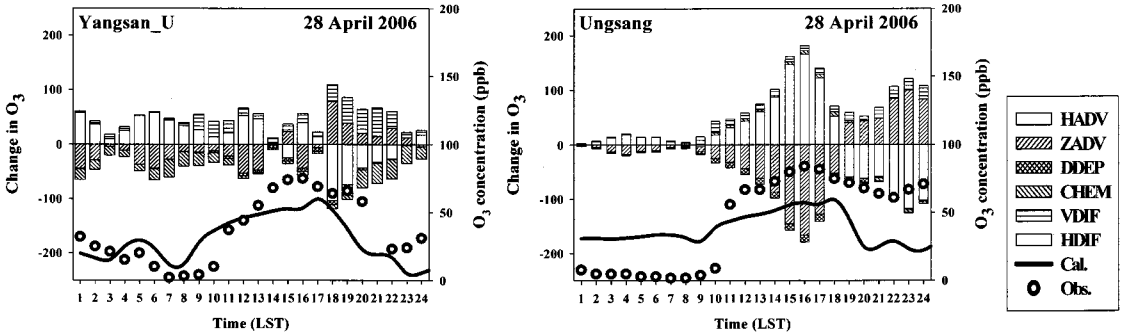


Fig. 8. Hourly change in O<sub>3</sub> concentrations calculated from Process analysis using the CMAQ at Yangsan\_U and Ungsang on 28 April 2006 (Obs.: observed value and Cal.: calculated value).

모델값이 관측값보다 낮게 묘사되는 결과를 나타내었으나 고농도가 발생하는 주간의 농도변화 모습에서는 각 지점별 변화경향이 일정부분 반영된 것으로 보인다. 양산도심 지점에서의 일중 오존발생과정별 기여도 변화를 보면, 일출 이전 0500 LST경의 오존농도 상승은 수평이류의 기여도 증가와 함께 나타났으며 1500 LST 이전의 점차적인 농도상승 역시 수평이류의 기여도가 가장 크게 나타났다. 그러나 이후로는 수평이류가 음의 기여도로 바뀌며 오존농도의 감소분포를 보였고, 연직이류와 연직확산이 야간 농도상승에 일부 기여하는 것으로 나타났다. 웅상 지점에서의 기여도 변화에서도 일출이후부터 수평이류의 기여도가 점차 증가함에 따라 오존농도가 증가되는 모습을 보였으며, 이러한 웅상 지점의 수평이류 기여 정도는 양산도심 지점과 비교시 최고 2배 정도의 높은 분포를 가졌다. 이후로는 양산도심과 유사하게 수평이류가 시간에 따라 음의 기여도 분포를 보이면서 농도가 점차 감소되는 분포를 보였으며, 연직이류의 기여도 증가가 야간의 농도상승에 가장 크게 기여하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 양산도심 영역과 웅상 영역의 각각에 대해서 고농도 사례일(4월 28일)의 농도 증가가 나타난 0900 LST부터 1600 LST까지의 발생과정별 평균 기여량 분포를 나타낸 것이다. 해당시간 동안 증가된 총 오존농도는 양산도심 영역에서 30.8 ppb, 웅상 영역에서 25.6 ppb로 양산도심 영역에서 보다 증가하였다 (+5.2 ppb). 양산도심 영역에서의 농도상승은 연직확산(전체의 29.5%)과 수평이류(전체의 23.5%)의 기여도 순으로 나타났으며, 웅상 영역에서는 지점별 분석

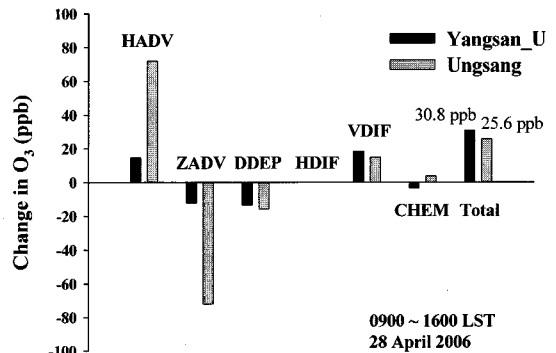


Fig. 9. Relative change in mean O<sub>3</sub> concentrations calculated from Process analysis in and around Yangsan\_U and Ungsang during the day (e.g., 0900 to 1600 LST) on 28 April 2006.

에서와 같이 수평이류의 기여도(전체의 40.3%)가 가장 높은 것으로 나타났다. 즉, 봄철 고농도 사례일의 오존농도 상승에 가장 크게 기여한 것은 양산도심 지역의 경우 인근 높은 산으로 인한 상층으로부터의 수평유입과 인근 도시 및 지역 내 배출원으로부터의 수평수송 영향으로 보여지며, 웅상 지역의 경우는 앞서 풍향조건과 함께 고려했을 때, 풍상측인 부산지역으로부터의 수평수송 영향이 지배적인 것으로 설명된다.

Fig. 10은 여름철 사례일인 2006년 8월 8일의 양산도심과 웅상 지점 각각에서의 시간별 오존농도(관측값과 모델값) 및 발생과정별 기여도를 나타낸 것이다. 관측값과 모델값의 오존농도 일변화를 비교해 보면, 양산도심 지점에서는 일변화 분포가 유사하게 묘사되



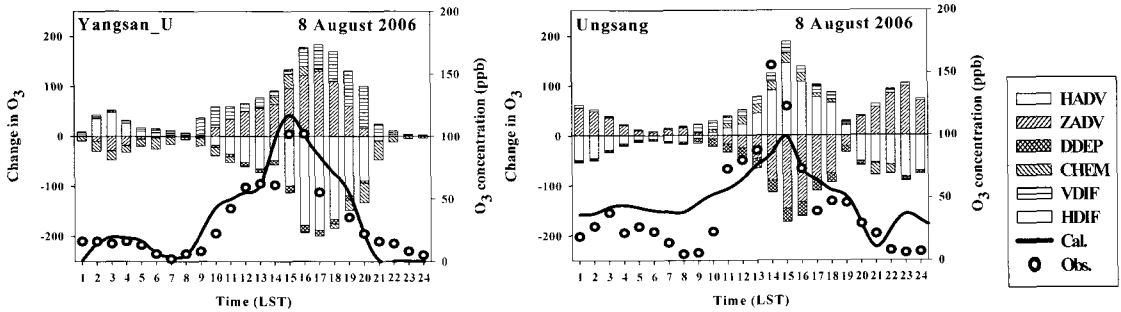


Fig. 10. Hourly change in O<sub>3</sub> concentrations calculated from Process analysis using the CMAQ at Yangsan\_U and Ungsang on 8 August 2006 (Obs.: observed value and Cal.: calculated value).

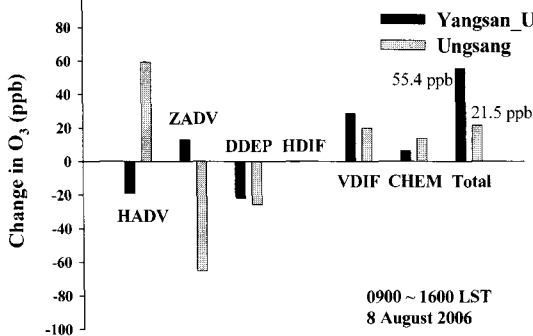


Fig. 11. Relative change in mean O<sub>3</sub> concentrations calculated from Process analysis in and around Yangsan\_U and Ungsang during the day (e.g., 0900 to 1600 LST) on 8 August 2006.

있으며, 웅상 지점에서는 야간에 다소 높게 주간에 다소 낮게 모의되었으나 농도변화의 경향은 유사하게 모의되었다. 양산도심 지점에서의 발생과정별 기여도의 시간별 변화를 보면, 일출 이후부터 연직이류의 기여도가 점차 증가함에 따라 농도가 상승하는 모습을 보이며, 봄철 사례와 다르게 일최고 농도가 나타나는 1400 LST 전후로는 광화학 반응에 의한 기여도가 증가된 것을 확인할 수 있다. 또한 봄철 사례의 이후부터 일정부분 기여하던 수평이류는 본 여름철 사례의 농도상승에 음의 기여도 분포를 보였다. 반면 웅상 지점에서는 수평이류가 농도상승에 가장 크게 기여하는 모습을 보이며, 광화학 반응에 의한 기여도는 양산도심 지점보다 이른 일출 이후부터 일몰 이전까지 지속적으로 농도상승에 기여하는 분포 특징을 보였다. 또

한 양산도심 지점에서 농도상승에 가장 크게 기여한 연직이류 기여도는 웅상 지점에서는 농도상승시 음의 기여도 분포를 보였다. 즉, 여름철 사례의 경우 두 지점에서의 일중 기여도 분포 변화가 큰 차이를 보이며, 이는 앞서 기상조건에서 언급된 바 있듯이 약한 종관 풍하에서 국지적 규모의 기상조건이 발달됨에 따라 두 지점간의 기상조건 차이가 크게 반영된 것으로 보여진다.

Fig. 11은 양산도심과 웅상의 해당 영역 각각에 대해 여름철 고농도 사례일인 2006년 8월 8일(0900~1600 LST)의 발생과정별 기여량의 평균 분포를 나타낸 것이다. 해당시간 동안 양산도심 영역과 웅상 영역은 각각 55.4 ppb와 21.5 ppb의 오존농도가 증가하였으며, 봄철 사례와 유사하게 양산도심 영역에서 보다 많은 농도가 증가하였다(2배 이상, +33.9 ppb). 양산도심 영역에서의 농도상승은 연직확산의 기여도(전체의 32.1%)가 가장 높았으며, 다음으로는 연직이류와 광화학 반응 순으로 나타났다. 웅상 영역에서는 수평이류의 기여도(전체의 32.3%)가 가장 높아 봄철과 유사한 결과를 보였으며, 광화학 반응의 기여도가 양산도심보다 다소 높음을 알 수 있다. 이에 따라, 여름철 사례에서는 두 지점 모두 광화학 반응의 기여도가 일정부분 차지하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 양산도심 지역의 경우 봄철 사례보다 연직 확산 및 이류의 기여도가 증가하여 일사량 증가에 따른 활발한 대류활동 조건이 반영된 것으로 보인다. 웅상 영역에서는 봄철과 유사하게 인근도시로부터 예상되는 수평수송 영향이 지배적이었으며 특징적으로 앞서 기상조건에서 알 수 있었듯이 고온과 약한 풍속조건하에서

의 광화학 반응이 지속적으로 기여하였음을 알 수 있다.

## 5. 결론

양산지역 내 오염물질의 공간적 분포를 이해하기 위해 계절별 대기질 이동측정을 실시한 바 있으며, 본 연구에서는 해당기간 중 발생된 봄철과 여름철의 고농도 오존일에 대해 농도상승의 발생과정 차이를 비교하고자 광화학 대기질 모델인 CMAQ 내의 Process analysis 과정을 적용하여 오존농도 예측시의 발생과정별 기여도 평가결과를 분석하였다.

봄철 고농도 오존 사례일(2006년 4월 28일)은 양산시 내 위치한 양산도심과 웅상, 이동측정지점인 A 지점 모두에서 오존의 8시간 기준치를 초과한 날이며, 웅상 지점의 일최고 오존농도가 양산도심 및 A 지점보다 높은 수준을 보였다. 해당일(0900~1600 LST)의 오존농도 증가에 따른 발생과정별 평균 기여량 평가 결과, 양산도심 영역에서는 연직확산(전체의 29.5%)과 수평이류(전체의 23.5%)가 농도상승에 크게 기여하는 것으로 나타났으며, 웅상 영역에서는 수평이류의 기여도(전체의 40.3%)가 지배적인 것으로 나타났다. 즉 본 고농도일의 오존 농도상승에 있어 양산도심 영역의 경우는 인근 높은 산과 함께 상층(잔류층 포함)으로부터 확산되는 오존 및 전구물질의 유입과 함께 외부도시로부터의 수평수송 영향이 일정부분 차지한 것으로 보여지며, 웅상 영역의 경우는 앞서 풍향조건과 함께 고려시 풍상측인 부산지역으로부터의 수송 영향이 크게 기여한 것으로 보인다.

여름철 고농도 오존 사례일(2006년 8월 8일)은 양산도심과 웅상, 해당일의 이동측정지점인 B 지점 모두에서 오존의 1시간 기준치인 100 ppb를 초과한 날로, 전전전전전전전전봄철 사례보다 높은 일최고 오존농도 수준을 보였으며, 전전별 고농도 발생시간이 1400~1500 LST로 유사하였다. 사례일(0900~1600 LST)의 오존농도 증가에 따른 평균 발생과정별 기여량 평가 결과에서 양산도심 영역은 연직확산의 기여도(전체의 32.1%)가 가장 높았으며, 이는 봄철 사례보다 증가되었다. 다음으로 연직이류와 광화학 반응의 기여도를 일부 볼 수 있었다. 웅상 영역에서는 수평이류의

기여도(전체의 32.3%)가 가장 높아 봄철과 유사한 결과를 보였으며, 광화학 반응의 기여도는 양산도심보다 다소 높았다. 봄철과 달리 두 영역 모두에서 광화학 반응의 기여도가 일정부분 차지하고 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 양산도심 영역의 경우는 봄철 사례보다 연직확산 및 연직이류의 기여도가 증가됨에 따라 일사량 증가로 인한 활발한 대류활동 조건이 반영된 것으로 보이며, 웅상 영역의 경우는 봄철 사례와 유사하게 인근도시로부터의 수평수송 영향이 지배적이었고 고온과 약한 풍속조건하에서의 광화학 반응이 농도상승에 지속적으로 기여하였음을 알 수 있었다.

이렇듯 양산시 내 위치한 두 영역은 봄철과 여름철 고농도 오존 발생시 발생과정별 기여도의 차이를 보였으며, 이는 지형 및 기상조건, 그리고 배출환경의 차이 등에 따른 것으로 보인다. 이후 고농도 오존 발생의 보다 정확한 발생과정을 이해하기 위해서는 다양한 지점에서의 대기질 측정 및 기상관측은 물론 오존의 연직관측 및 분석이 반드시 병행되어야 할 것이며, 보다 다양한 사례에 대한 광화학 모델링 수행을 통한 고농도 오존 발생과정의 특성을 파악하는 것이 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

## 참고 문헌

- 국립환경과학원, 2006, (대도시 대기질 관리방안 조사 연구 V) 광화학 대기오염의 생성과정 규명과 저감대책 수립, 국립환경과학원, 789.
- 김유근, 오인보, 황미경, 2003, UAM-V를 이용한 부산지역 고농도 오존사례 수치모의, 한국대기환경학회지, 19(1), 1-11.
- 문난경, 이영수, 강영현, 김영하, 2005, 환경영향평가시 대기확산모델의 적용에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원, 153.
- 양산시, 2007, 양산시 대기오염 특성분석 및 대기환경 개선방안 수립 최종보고서(1차년도), 양산시, 484.
- 이화은, 최현정, 이강열, 2005, 객관 분석에 의한 복잡지형의 대기유동장 수치모의와 모델에 의한 자료질 조

- 절효과, 한국대기환경학회지, 21(1), 97-105.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1997, 부산연안역에서 국지풍모델을 이용한 오존농도의 수치모의, 한국환경과학회지, 6(4), 335-350.
- 환경관리공단, 2006, 전국실시간대기오염도, <http://www.airkorea.or.kr/>.
- Dudhia, J., Dave, G., Kevin, M., Wei, W., Cindy, B., 2003, PSU/NCAR Mesoscale Modeling System tutorial class notes and user's guide: MM5 modeling system version 3, National Center for Atmospheric Research(NCAR).
- Grell, G., Dudhia, J., Stauffer, D., 1995, A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Tech. notes, NCAR/TN-398+STR.
- Huang, J. P., Fung, J. C. H., 2005, Numerical simulation and process analysis of typhoon-related ozone episodes in Hong Kong, *J. Geophys. Res.*, 110, D05301.
- Jose, R. S., Perez, J. L., Pleguezuelos, C., Camacho, F., Gonzalez, R. F., 2003, MM5-CMAQ Air Quality Modeling process analysis: Madrid case, *Air Pollution X(Ecology and the Environment volume 53)*, 840.
- Lee, S. H., Kim, Y. K., Kim, H. S., Lee, H. W., 2007, Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula, *Atmos. Environ.*, 41(21), 4451-4465.