

## OZIPR을 이용한 부산지역 고농도 오존 사례 모사

도 우 곤 · 이 화 운\* · 정 우 식\*\*  
부산광역시 보건환경연구원, \*부산대학교 대기과학과,  
\*\*인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터  
(2007년 6월 11일 접수; 2007년 7월 23일 채택)

### A Numerical Simulation of High Ozone Episode Using OZIPR in Busan

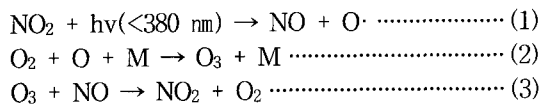
Woo-Gon Do, Hwa Woon Lee\* and Woo-Sik Jung\*\*  
Busan Metropolitan City Institute of Health and Environment, Busan 614-806, Korea  
\*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea  
\*\*Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gyeongnam 621-170, Korea  
(Manuscript received 11 June, 2007; accepted 23 July, 2007)

To investigate the effect of NO<sub>x</sub> and VOCs(volatile organic compounds) on the generation of high ozone episode, examined the hourly variations of ozone, NO<sub>x</sub> and VOCs concentrations, and calculated the ozone isopleth about maximum ozone concentrations using OZIPR which was presented by U. S. EPA at three sites in Busan. There was some difference by the sites, but decreasing VOCs concentration was effective for reduction of ozone at 22 July, the episode day of 2005. In the year 2006, the episode day was 8 August and the variations of NO<sub>x</sub> and VOCs concentration was little than variation of ozone. So it was estimated that the photochemical production of ozone was low than transportation of ozone. And the result of the OZIPR modeling was that decreasing VOCs concentration was effective for reduction of ozone.

Key Words : Ozone isopleth, VOCs, NO<sub>x</sub>, OZIPR

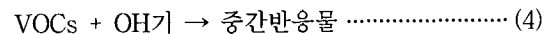
#### 1. 서 론

대기 중의 오존은 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 휘발성유기화합물(VOCs)과 일산화탄소(CO) 등 전구물질들 간의 상호 반응을 통하여 생성된다. 일반적으로 오존은 강한 태양복사의 존재 하에 식(1)~식(3)과 같은 반응을 통하여 발생한다.



즉, NO<sub>2</sub>는 광해리 반응을 통하여 산소원자 O를

만들고, O는 산소분자 O<sub>2</sub>와 급격히 반응하여 오존을 생성시키게 된다. 이러한 반응은 매우 짧은 시간에 일어나게 되며 NO에 의한 오존 소멸반응과 평형을 이루게 되어 오존농도의 균형을 가져온다. 그러나 대기 중에 VOCs가 존재하게 되면 식(4)와 같은 반응이



추가적으로 발생하게 되고, 이 중간반응물들이 식(3)의 반응에서 오존 대신 NO를 NO<sub>2</sub>로 산화시키게 되며 오존의 생성과 소멸의 균형을 파괴하여 지표 오존농도 증가의 원인이 된다.

대도시 지역의 경우 풍부한 NO<sub>x</sub>와 VOCs 배출원이 존재하며, 이에 따라 오존생성량에도 큰 변화가 나타난다. "NO<sub>x</sub>-sensitive" 조건은 VOCs/NO<sub>x</sub>가 높은 경우로써 NO<sub>x</sub> 농도의 증가에 따라 오존의 생

Corresponding Author : Woo-Sik Jung, Department of Atmospheric Environment Information Engineering/Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gyeongnam 621-170, Korea  
Phone: +82-55-320-3932  
E-mail: wsjung1@inje.ac.kr

성량이 증가하게 되는 경우이며 “VOCs-sensitive” 조건은 VOCs/NOx가 낮은 경우로써 VOCs 농도가 증가함에 따라 오존생성량이 증가하게 되는 경우이다<sup>1)</sup>. 따라서 대도시지역의 효과적인 오존 농도 저감을 위해서는 NOx, VOCs 배출환경에 따른 제한인자의 분석이 필수적인 과정이라 할 수 있다.

고농도 오존에 관한 연구는 수도권을 중심으로 기상요인과, 전구물질들의 수송 효과에 관한 연구가 대부분이다. 오 등<sup>2)</sup>은 수도권 지역의 고농도 오존일에 대한 통계적인 분류를 실시하고 각 패턴별 기상학적 특성을 분석하였고, 손<sup>3)</sup>은 수도권 지역의 고농도 사례일에 대한 광화학적 분석을 실시하였다.

부산지역의 오존 농도는 다른 대도시와 비교하여 높은 평균 농도를 보이고 있으며, 매년 2~3회씩 발령되던 오존 주의보(오존 1시간 평균농도 0.12 ppm 이상)발령 횟수도, 2006년에는 9회로 급격히 증가하는 등 고농도 오존의 발생 빈도가 점차적으로 증가하고 있으며<sup>4)</sup>, 또한 오존생성의 원인이 되는 NOx, VOCs 배출량도 해마다 증가하고 있다<sup>5)</sup>. 따라서 VOCs와 NOx의 제한인자 분석을 통한 배출량의 저감효과에 관한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 EPA(미국환경보호청)에서 제공하고 있는 오존농도 예측 프로그램인 OZIPR(Ozone Isopleth Plotting Package for Research)을 이용하여 2005, 2006년 부산지역의 고농도 오존사례를 모사하고 NOx, VOCs의 배출저감이 오존 농도 감소에 미치는 영향을 파악하여 효과적인 저감방안을 알아보고자 하였다.

## 2. 연구대상지점 및 사례일 선정

### 2.1. 대상지점 선정

2006년 말 현재 부산광역시에는 17개 지점에 도시대기 측정소(오존 및 기준성 대기오염물질 측정)가 설치되어 있으며 5개 지점의 광화학 측정소(56개 오존 전구물질 측정)를 설치, 운영 중에 있다(Fig. 1, Table 1). NOx와 VOCs간의 상호관계를 분석하기 위해서 동일지점에서의 NOx와 VOCs의 측정 자료가 필요하나 측정소의 배치가 그렇지 않으므로, 본 연구에서는 측정소간의 인접거리와 주변 환경의 유사성을 바탕으로 도시대기 측정소와 광화학 측정소

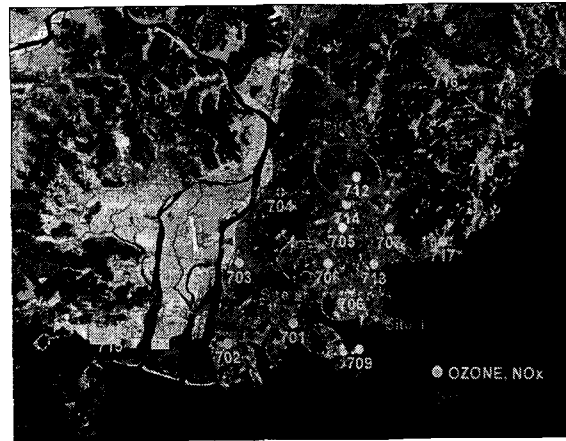


Fig. 1. The locations of ozone, NOx and VOCs monitoring sites in Busan. Site 1, 2 and 3 denote the investigating sites.

Table 1. List of air quality monitoring sites in Busan

Ozone and NOx monitoring site		VOCs monitoring site	
Station id	Name	Station id	Name
701	Gwangbok-Dong	901	Daeyeon-Dong
702	Jangnim-Dong	902	Danggam-Dong
703	Gamjeon-Dong	903	Deokcheon-Dong
704	Deokcheon-Dong	904	Jangjeon-Dong
705	Yeonsan-Dong	902	Jeonggwan-Myeon
706	Daeyeon-Dong		
707	Jaesong-Dong		
708	Jeonpo-Dong		
709	Dongsam-Dong		
710	Gijang-Eup		
711	Daejeo-Dong		
712	Bugok-Dong		
713	Gwangan-Dong		
714	Bokcheon-Dong		
715	Noksan-Dong		
716	Yongsu-Ri		
717	Jwa-Dong		

Table 2. The maximum ozone concentration at episode day

Episode day	Maximum ozone concentration(ppm)		
	Site 1 (706)	Site 2 (708)	Site 3 (712)
2005. 7. 22	0.121	0.116	0.106
2006. 8. 8	0.111	0.086	0.105

가 인접한 3개 지점을 연구 대상지점으로 선정하여 각각의 지점에 대하여 도시대기 측정소의 오존 및 NOx 농도와 광화학 측정소의 VOCs 농도 자료를 이용하여 분석하였다. 연구 대상으로 선정된 3개 지점은 Site 1(도시대기 : 706(대연동) 광화학 : 901(대연동))과 Site 2(도시대기 : 708(전포동) 광화학 : 902(당감동)), 그리고 Site 3(도시대기 : 712(부곡동) 광화학 : 904(장전동))으로 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 사례일 선정

부산지역의 광화학 측정소는 2004년부터 설치되기 시작하여, 시험가동을 마치고 2005년 1월부터 대기질자료를 공식적으로 대기환경월보에 게재하기 시작하였다. 따라서 광화학 측정소의 VOCs 자료를 분석에 활용하기 위하여 본 연구에서도 2005~2006년간의 고농도 일(도시대기 측정소 1개 지점 이상에서 0.1 ppm/hr 을 초과한 날)을 대상으로 사례일을 선정하였다

2005년 고농도일(1개 지점 이상에서 0.1 ppm/hr 을 초과한 날)은 총 15일로 나타났으며 5월 12일부터 9월 19일까지 매일 1회 이상 나타났다. 대상지점으로 선정된 측정소의 경우 2005년 7월 22일에 3개 지점 모두 0.1 ppm을 초과하는 농도를 보여 본 연구의 사례일로 선정하였다(Table 2).

2006년의 경우는 2005년과 달리 10월까지 고농도 일이 발생하였으며, 8월에 비교적 많은 빈도를 나타내어 총 19일로 나타났다. 대상지점으로 선정된 3개소 모두 0.1 ppm/hr 을 초과한 경우는 없었으나, 8

월 8일에 706과 712의 2개 지점에서 0.1 ppm 을 초과한 것으로 나타나 사례일로 선정하였다(Table 2).

## 3. 연구 결과

### 3.1. OZIPR

EPA에서 제공하는 OZIPR은 단일 공기 기둥을 가정하여, 저층대기에서의 복잡한 화학, 물리적 작용을 계산하는 상자모델이다. 또한 특정 오존농도(예 : 0.12 ppm)를 얻기 위해 전구물질의 배출감소에 요구되는 종류와 양을 자동적으로 예측하는 EKMA(empirical kinetics modeling approach)방식을 사용하고 있다. 입력 자료로는 NOx, VOCs, CO의 초기 농도 및 수송농도 자료와, 반응 VOCs 분율, NO<sub>2</sub>/NOx의 비 등의 대기오염도 자료와 혼합고, 기온, 상대습도 등의 기상자료, 시간별 오염물질 배출량 자료 등을 필요로 한다<sup>6)</sup>. OZIPR을 국내에 적용한 사례로는 박과 김<sup>7)</sup>, 이와 김<sup>8)</sup>, 홍 등<sup>9)</sup>이 서울을 대상으로 오존 저감대책을 수립하기 위하여 OZIPR을 적용한 바가 있다.

본 연구에서는 각각의 대상 지점에 대하여 사례일별로 NOx와 VOCs의 초기농도에 따른 일 최고 오존 등농도 곡선(ozone isopleth)을 분석하고, NOx와 VOCs의 배출량 감소에 따른 오존농도의 감소율을 도출하였다.

각 사례일별 OZIPR의 입력 조건은 Table 3과 같다. 초기 농도 자료는 해당지점별 도시대기 측정소와 광화학 측정소의 NOx와 VOCs의 오전 8시 농도 자료를 입력하였으며, 대상지점에서의 VOCs 와 NOx의 배출이 고농도 오존의 형성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수송되는 오염물질은 없는 것으로 가정하였고, VOCs 분율은 EPA의 자료를 이용하였다<sup>10)</sup>. 기상자료 중 혼합고는 시간별 자료를 확보하기가 곤란하여 1,000 m로 일정하게 하였으며, 앞에서 상층의 수송되는 오염물질의 농도가 없는 것으로 가정하였으므로 본 연구에서는 큰 영향은

Table 3. Input conditions for OZIPR model

Air quality data	Transportation Initial concentration VOCs fractions	None Ozone, NOx and VOCs monitoring site EPA data
Meteorological data	Mixing height Temperature, Relative humidity	1000 m Ozone, NOx and VOCs monitoring site
Emission data	CAPSS 2004	
Simulation time	08:00 ~ 20:00	
Chemical mechanism	CB-4(Carbon Bond IV)	

없을 것으로 판단된다. 기온 및 상대 습도는 도시대기 측정소의 자료를 사용하였으며, 대기오염물질 배출량 자료는 2004년 부산광역시의 구별 배출량<sup>6)</sup>을 시간으로 환산하여 입력하였다.

3.2. 사례일별 오존 및 전구물질농도 변화

광화학 측정소에서는 56개의 오존 전구물질을 측정하고 있으며 물질별로 농도의 차이가 다양하게 나타난다. 따라서 본 연구에서는 사례일별 오존 및 NOx 농도 시간변화와 비교하기 위하여 POCP (photochemical ozone creation potentials)를 고려한 물질별 오존 생성 기여율을 계산하고 오존 생성 기여율 1, 2위 물질들을 중심으로 농도변화를 살펴본다<sup>11)</sup>.

$$\text{오존 생성 기여율} = (\text{오염물질의 기여도} / \text{오염물질의 기여도 합계}) \times 100 \quad (5)$$

$$\text{오염물질의 기여도} = \text{ppb} \times (\text{분자량} / 22.4\text{m}^3) \times \text{오염물질별 POCP} \quad (6)$$

3.2. 1 2005년 사례일

사례일인 2005년 7월 22일은 대상지점 3곳에서 모두 0.1 ppm 초과가 발생하였다(Fig. 2). 최고농도는 모두 13시에 나타났고 오전 시간대에는 낮은 농도를 유지하다가 10시부터 농도가 상승하기 시작하였으며, 최고 농도를 보인 후 완만하게 감소하는 모습을 보였다. Site 1과 Site 2의 NOx 농도는 오전에 비교적 높은 농도를 보였으며, 출근시간대에서 최고 농도를 보이고 오존농도가 증가하면서 급격히 감소하여, 광화학반응에 의한 NO의 소멸과 NO<sub>2</sub> 농도의 평형상태가 지속되는 것으로 나타났으나, Site 3에서 NOx 농도는 Site 1, Site 2와 비교하여 오전부터 비교적 낮은 농도를 유지한 것으로 나타났다.

2005년 사례일인 7월 22일의 광화학 측정소(901

(대연동), 902(당감동), 904(장전동))의 오존 전구물질 측정자료를 바탕으로 시간대별로 POCP를 고려한 광화학 오존 생성 기여율을 산정하였으며, 산정 결과 상위 1, 2위안에 들었던 물질들의 시간대별 농도변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 연구 대상지점인 3개 지점 모두 toluene과 m,p-xylene의 오존 생성 기여율이 가장 높은 것으로 나타났으며, 다음으로 propylene과 o-xylene이 비교적 높은 오존 생성 기여율을 보이는 것으로 나타났다. 오존 생성 기여율 상위 물질들의 시간에 따른 농도변화에서도 지점별로 다소 차이가 나타났다. 즉, NOx의 경우와 다르게 Site 1, Site 3의 경우에 오전 중으로 비교적 높은 농도를 유지하다가 최고 오존농도 시간대 이후로 급격하게 감소하였고, Site 2의 경우에는 최고 오존농도 시간대를 전후하여 농도가 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. Site 2의 경우 주변 배출원의 영향이 있었던 것으로 판단할 수 있다. 최고 오존농도가 나타난 시간대와 전구물질들의 농도 변화를 살펴볼 때 Site 1의 경우에는 NOx와 VOCs 물질이 오존 생성에 고르게 기여하고 있음을 알 수 있으며, Site 3의 경우에는 NOx의 변화에 비해 VOCs의 농도변화가 크게 나타나 VOCs가 오존에 미치는 영향이 컸음을 짐작할 수 있다.

3.2.2. 2006년 사례일

2006년의 사례일인 8월 8일은 조사대상 지점 중 Site 1과 Site 3에서 일 최고농도가 0.1 ppm을 초과한 경우이다(Fig. 4). 최고 농도 발생시간은 13, 14시로 나타났으나, 2005년의 사례와는 다르게 새벽시간대부터 비교적 높은 오존 농도를 보였다. 따라서 NOx 농도의 경우도 오전부터 비교적 낮은 농도를 유지하였으며, 일중 농도 변화가 크게 나타나지 않았다.

2006년 사례일인 8월 8일의 광화학 측정소의 오존 전구물질 측정자료를 바탕으로, POCP를 고려한

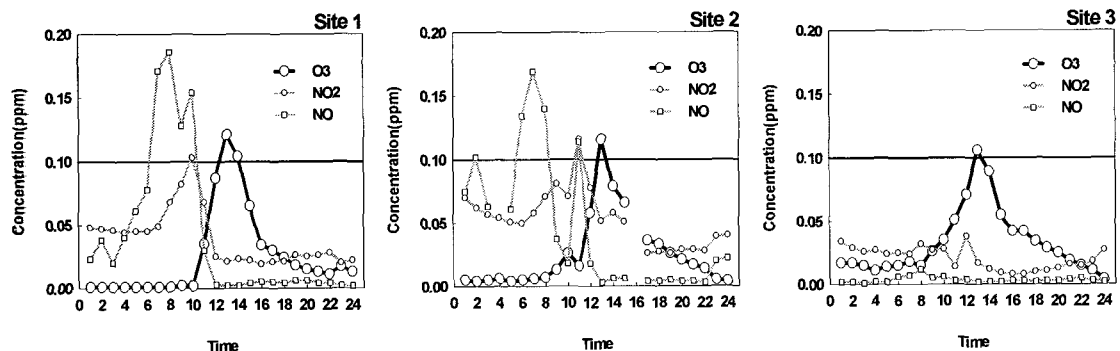


Fig. 2. Hourly variation of ozone, NO<sub>2</sub> and NO at July 22, 2005.

OZIPR을 이용한 부산지역 고농도 오존 사례 조사

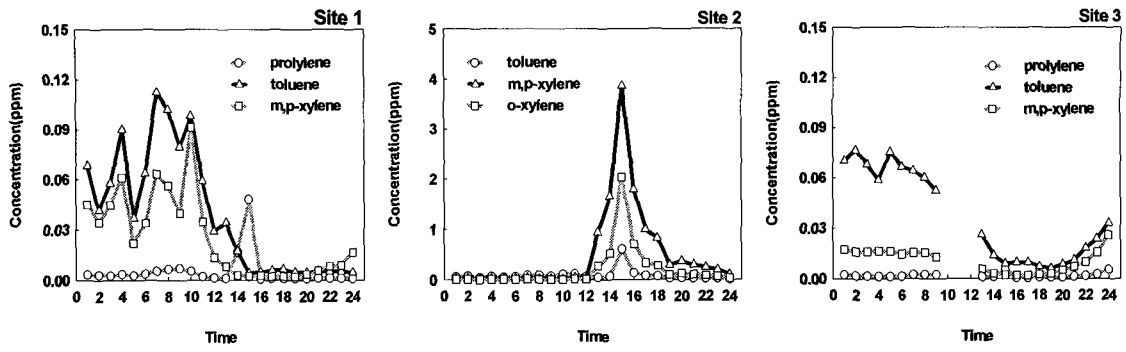


Fig. 3. Hourly variation of high rank component of ozone formation contribution at July 22, 2005.

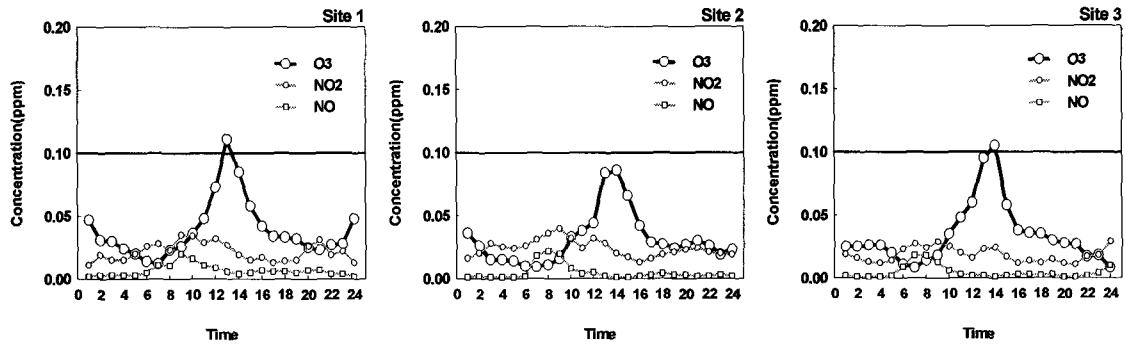


Fig. 4. Hourly variation of ozone, NO<sub>2</sub> and NO at August 8, 2006.

광화학 오존 생성 기여율을 산정하였으며, Fig. 5에 나타내었다. 2006년의 경우도 조사대상 지점인 3개 지점에서 모두 toluene과 m,p-xylene의 오존 생성 기여율이 가장 높게 나타났으며, 2005년의 사례일과는 다르게 n-butane, 1, 2, 3-trimethylbenzene 등이 다음으로 높은 오존 생성 기여율을 보이는 것으로 나타났다. 전반적으로 오존 생성기여율 상위 물질의 시간별 농도변화는 2005년의 사례와 다소 다르게 비교적 낮은 농도가 일중으로 유지되는 것으로 나타났다. Site 2에서는 2005년의 경우와 유사하게

최고 오존농도 시간대 이후로 급격히 농도가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 주변 배출원의 영향으로 판단되어진다. 전반적으로 2006년 사례일의 경우 NO<sub>x</sub>, VOCs의 농도변화가 적은 것으로 나타나, 광화학적 오존생성 이외의 다른 원인이 고농도 오존을 유발한 것으로 판단된다.

3.3. OZIPR 모델링 결과

3.3.1. 2005년 사례일

Fig. 6은 2005년 사례일인 7월22일을 대상으로

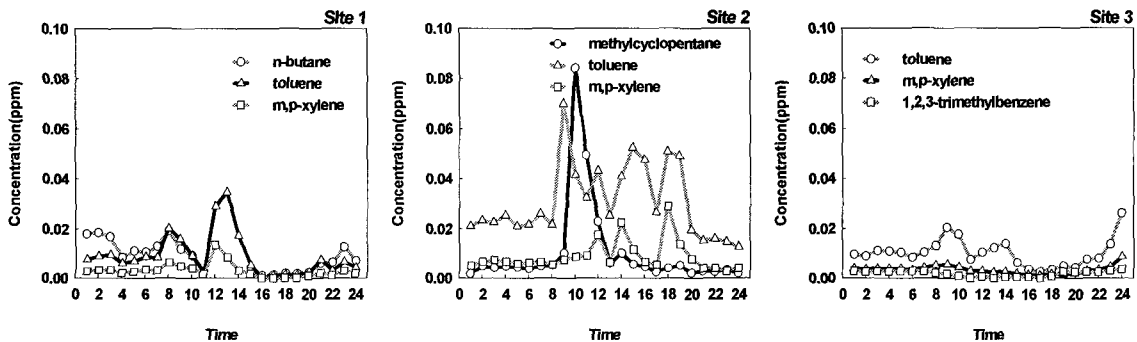


Fig. 5. Hourly variation of high rank component of ozone formation contribution at August 8, 2006.

Site 1의 도시대기 측정소와 광화학 측정소의 오전 8시 VOCs 농도와 NOx 농도를 초기농도로 설정하고 Table 4의 입력조건에 대한 OZIPR 모델링 수행 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6을 보면 오존 최고농도는 0.13 ppm으로 실제 최고농도 보다 다소 높게 나타났으나, NOx와 VOCs 모두 오존의 형성반응에 영향을 미치는 것으로 나타나 두 물질들 중 어느 것이라도 감소시킬 경우 오존 농도는 감소되는 것으로 나타났으며(Fig. 6 왼쪽), 이는 최고 오존농도 시간대 이후 급격하게 감소하는 VOCs와 NOx의 일농도 변화에서도 예상을 할 수 있다. 그러나 NOx와 VOCs의 배출량을 각각 10%로씩 감소시킬 경우 NOx보다는 VOCs 배출량의 감소가 오존농도 저감에는 더욱 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 6 오른쪽).

Fig. 7은 2005년 사례일에 대한 Site 2에서의 오

존 최고 등농도를 나타낸 것이다. 오존 전구물질들의 일변화(Fig. 3)에서 최고 오존 농도를 보인 시간대에 전구물질의 농도가 급격하게 증가하였다가 감소하여 VOCs의 영향이 NOx 보다 큼을 짐작할 수 있으며, 이는 오존 최고 등농도 곡선의 계산결과에서도 나타났다. 즉 초기농도에서 VOCs 농도를 감소시킬 경우 오존 농도가 감소하는 것으로 나타났으나, NOx 농도를 감소시키면 오존 농도 저감효과가 없는 것으로 나타났다(Fig. 7 왼쪽). 예측 최고 오존농도는 0.114 ppm으로 실제 농도보다 약간 높게 계산되었으며, 배출량 저감에 따른 오존 농도변화를 살펴보면 NOx 배출량이 50%까지 감소할 경우 오존농도가 0.2 ppm까지 증가하는 것으로 나타나, 오존농도의 감소를 위해서는 VOCs 배출량의 감소가 효과적인 것으로 분석된다(Fig. 7오른쪽).

내륙지역인 Site 3에서 2005년 사례일의 최고 오

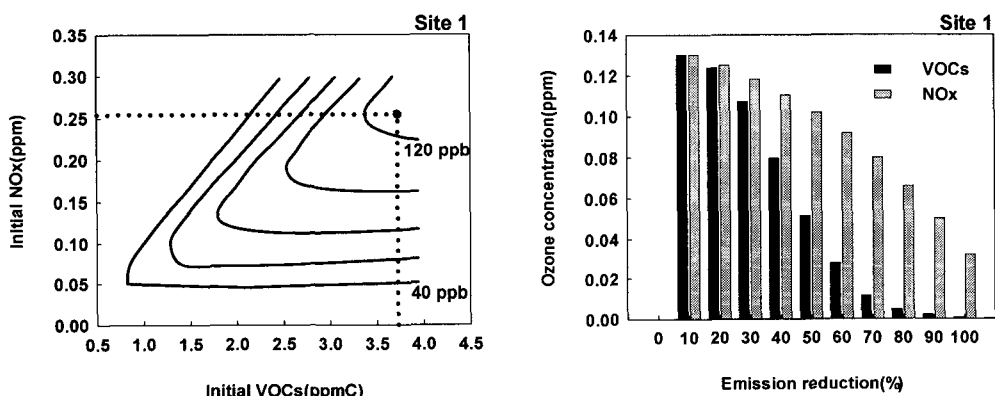


Fig. 6. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 1. Initial NOx concentration is 0.254 ppm, initial VOCs concentration is 3.726 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.130 ppm.

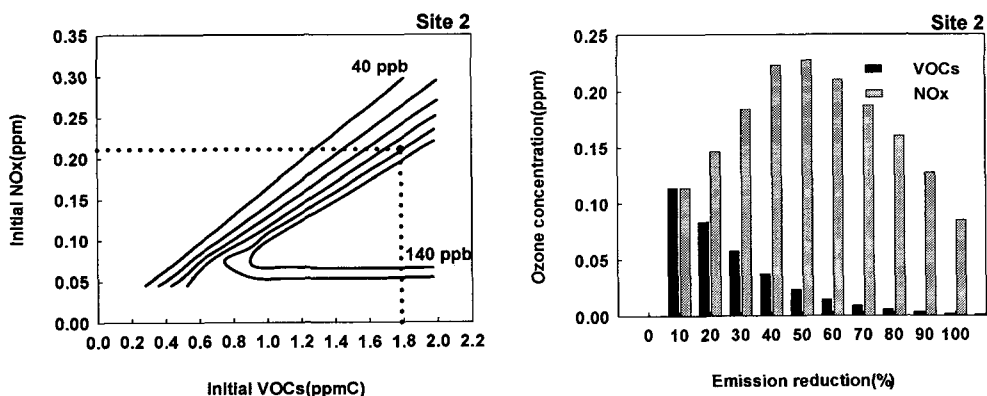


Fig. 7. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 2. Initial NOx concentration is 0.211 ppm, initial VOCs concentration is 1.785 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.114 ppm.

존 등농도 곡선 계산결과는 Fig. 8과 같다. 최고 오존농도는 0.125 ppm으로 실측치 보다 다소 높게 계산되었으며, NOx와 VOCs 배출량 감소에 따라 두 경우 모두 오존 농도는 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 8의 오른쪽 그림에서 보듯이 NOx 배출량을 감소시키는 것이 VOCs 농도를 감소하는 것 보다 오존 농도 감소의 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

조사 대상 3개 지점에서 모두 0.1 ppm을 초과한, 2005년 사례일 7월 22일의 경우 NOx와 오존생성 기여율 상위 물질들의 일 중 농도변화가 비교적 크게 나타났다. Site 1의 경우 오전 중으로 NOx와 VOCs의 농가 비교적 높았으며 최고 오존농도 발생 시간대를 전후로 NOx와 오존생성 상위 물질의 농도가 급격하게 감소하여 NOx와 VOCs가 고르게 오존생성에 기여하였음을 예상할 수 있다. Site 2의 경우에는 오전 시간으로 NOx 농도가 비교적 높았으나 최고 오존농도 시간대 이후로 농도가 급격히 감소하였으며, VOCs는 낮은 농도를 유지하다가 최고 오존 농도 시간대에 일시적으로 농도가 크게 증가한 이후 다시 감소하였다. 이는 주변의 배출원의 영향이 있었음을 예상하게 하며, 일시적으로 증가하였다가 감소한 VOCs 농도는 오전부터 비교적 일정한 농도수준을 유지한 NOx 보다 고농도 오존의 생성에 더 많은 영향을 미친 것으로 판단된다. Site 3

의 경우 NOx 농도는 오전부터 비교적 일정한 수준을 보였으나 VOCs 농도는 오존 최고 농도 시간을 전후로 급격하게 감소한 것으로 나타나 앞의 두 지점과는 다른 일변화 패턴을 나타내었다. OZIPR 모델링 결과를 살펴보면 Site 1, Site 2는 전구물질의 일변화 패턴에서 예상할 수 있듯이 VOCs의 농도감소가 오존농도 감소에 효과적인 것으로 나타났다, Site 3의 경우는 NOx 농도 감소가 오존농도 감소에 더 효과적인 것으로 나타났다. 이는 Table 4에서 알 수 있듯이 Site 3의 초기 NOx 농도가 다른 두 지점에 비해 낮았기 때문으로 판단된다.

3.3.2 2006년 사례일

2006년 사례일 8월 8일은 오존농도의 일변화에 비교하여 NOx, VOCs의 농도 일변화는 낮게 나타났다. Site 1에서의 도시대기 측정소 NOx 농도와 광화학 측정소의 VOCs 농도를 초기농도로 하여 Table 4의 계산조건을 적용하여 OZIPR 모델링을 수행한 결과는 Fig. 9와 같다. 최고 오존농도는 0.132 ppm으로 계산되었으며, VOCs와 NOx 초기농도에서 VOCs 농도를 감소시키는 것이 오존 농도의 감소에 효과적인 것으로 나타났다(Fig. 9 왼쪽). 배출량 저감에 따른 오존농도 감소효과를 살펴보면 VOCs 배출량을 감소시킬 경우 오존농도는 감소하

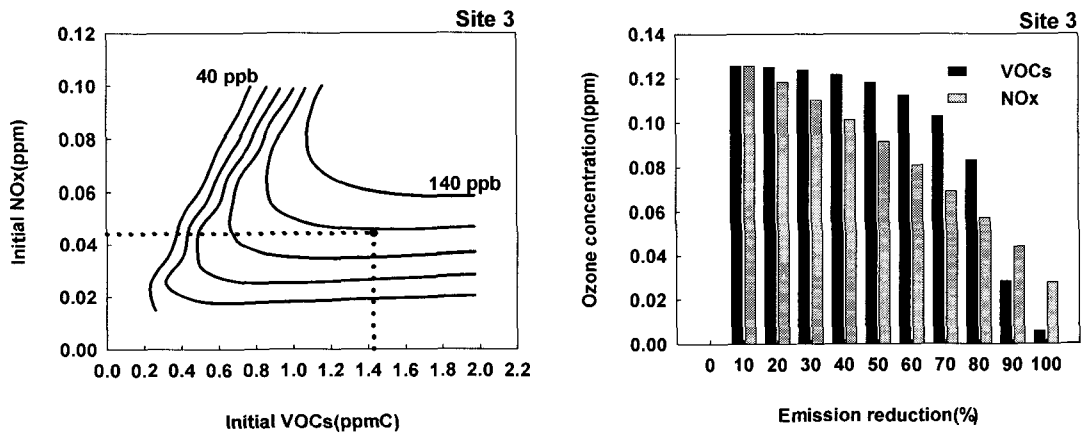


Fig. 8. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 3. Initial NOx concentration is 0.044 ppm, initial VOCs concentration is 1.428 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.125 ppm.

Table 4. The results of OZIPR modeling at each site at July 22, 2005

		Site 1	Site 2	Site 3
Initial concentration	NOx	0.254 ppm	0.211 ppm	0.044 ppm
	VOCs	3.726 ppmC	1.785 ppmC	1.428 ppmC
Calculated ozone concentration		0.130 ppm	0.114 ppm	0.125 ppm
Limited condition		VOCs	VOCs	NOx

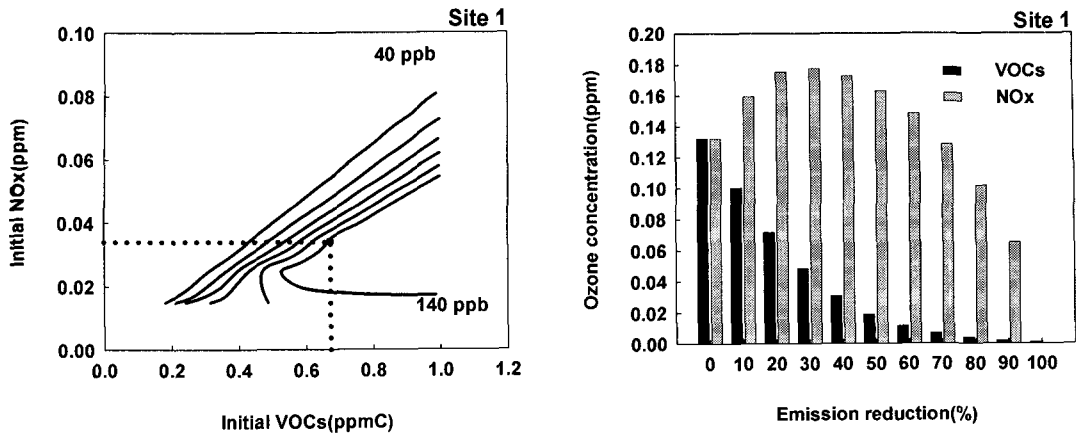


Fig. 9. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 1. Initial NOx concentration is 0.034 ppm, initial VOCs concentration is 0.673 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.132 ppm.

는 것으로 나타났으나 NOx 배출량은 30% 감소 시 까지 오존농도는 증가하였으며 이후 40% 감소 이상에서 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 9 오른쪽).

2006년 사례일에 대한 Site 2에서의 OZIPR 모델링 결과는 Fig. 10과 같다. 계산결과 오존 최고농도는 0.108 ppm으로 계산되었으며, 초기농도조건에서 오존 최고 등농도 곡선상으로 VOCs 농도감소가 오존농도 저감에 효과적임을 알 수 있다(Fig. 10 왼쪽) 배출량 감소에 따른 오존 농도변화에서도 Site 1과 유사하게 VOCs 농도 감소가 오존 농도를 감소시키며, NOx 배출량 감소시 40%까지는 오존농도가 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 10 오른쪽).

Fig. 11은 Site 3에 대한 OZIPR 모델링 결과를

나타낸 것이다. 최고 오존농도는 0.138 ppm으로 계산되었으며, NOx와 VOCs의 초기농도 상태에서는 VOCs 농도가 감소될 경우 오존농도의 감소를 가져오는 것으로 나타났다(Fig. 11 왼쪽). 배출량 저감효과에서도 VOCs 배출량의 감소가 오존농도의 감소에 효과적인 것으로 나타났으며 초기농도에서 NOx 배출량의 경우 약 30%감소 시까지는 오존농도가 비슷한 농도를 유지하다가 이후부터 감소하였으나, 오존 농도 감소효과는 비교적 적은 것으로 나타났다(Fig. 11 오른쪽).

2006년 사례일인 8월 8일의 경우 전반적으로 오존농도의 일변화에 비하여 NOx와 VOCs의 농도변화는 적은 것으로 나타나, 광화학적 오존의 생성보

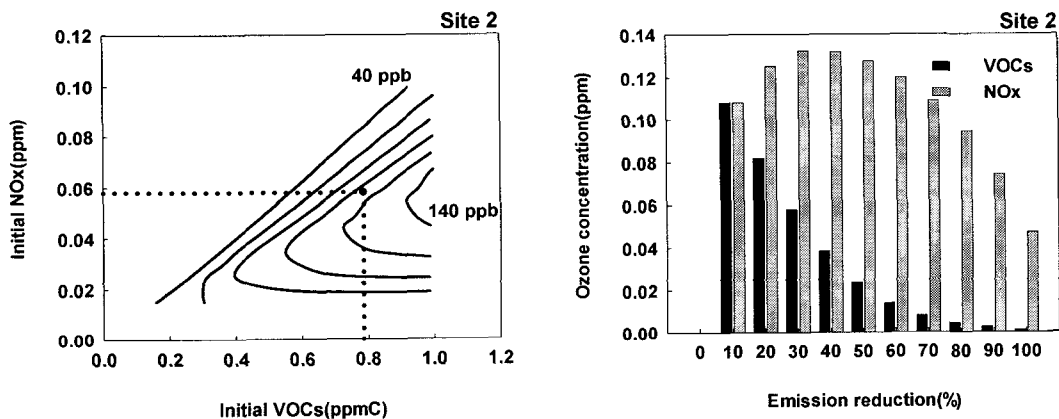


Fig. 10. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 2. Initial NOx concentration is 0.058 ppm, initial VOCs concentration is 0.786 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.108 ppm.



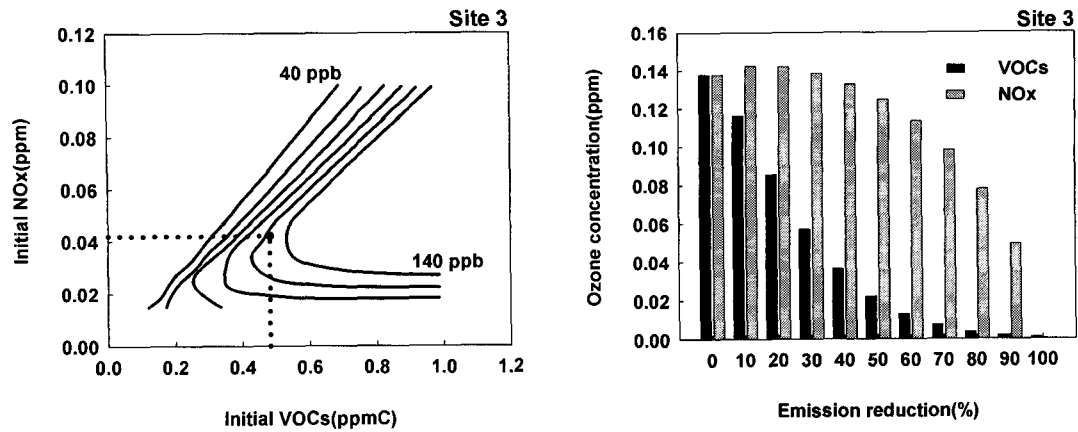


Fig. 11. Isopleth profile of peak ozone concentration(left) and effect of NOx, VOCs emission reduction(right) at Site 3. Initial NOx concentration is 0.042 ppm, initial VOCs concentration is 0.482 ppmC and maximum ozone concentration is calculated 0.138 ppm.

Table 5. The results of OZIPR modeling at each site at August 08, 2006

		Site 1	Site 2	Site 3
Initial concentration	NOx	0.034 ppm	0.058 ppm	0.042 ppm
	VOCs	0.673 ppmC	0.786 ppmC	0.482 ppmC
Calculated ozone concentration		0.132 ppm	0.108 ppm	0.138 ppm
Limited condition		VOCs	VOCs	VOCs

다는 수송, 이류 등에 의한 고농도 오존의 생성을 예상할 수 있었다. 그러나 최고 오존농도 발생시간대를 전후하여 오존생성 기여율 상위 물질들의 농도 변화가 NOx의 농도 변화에 비교하여 높게 나타났으며, 이는 NOx 보다는 VOCs가 오존생성에 더 많이 기여한 것으로 예상할 수 있다. OZIPR 모델링 결과 3개 지점에서 모두 VOCs 농도감소가 오존농도 감소에 효과적인 것으로 나타났으며, 조사대상 3개 지점에서의 초기 NOx, VOXs 농도 분포는 유사한 것으로 나타났다(Table 5).

#### 4. 결 론

부산지역의 NOx와 VOCs의 오존농도 생성에 미치는 영향으로 파악하기 위해서는 동일 지점에서의 NOx, VOCs 측정자료가 필요하며, 따라서 서로 인접해 있고 주변 환경이 유사한 도시대기 측정소(706 대연동, 708 전포동, 712 부곡동 측정소)와 광화학 측정소(901 대연동, 902 당감동, 904 장전동 측정소) 3개 지점(Site 1, 2, 3)을 대상으로 오존, NOx, 오존생성 기여율 상위물질들의 농도변화를 분석하고 미국 환경보호청에서 제공하는 OZIPR 모델을 이용하여 오존 최고 등농도곡선을 계산하였다. VOCs 농도

는 광화학 측정소에서 측정되는 오존 전구물질 농도를 이용하였고, 따라서 광화학 측정소가 정상가동을 시작한 2005년과 2006년을 대상으로 3개 조사 대상 지점에서 고농도(0.1 ppm/hr 초과)가 발생한 2005년 7월 22일과 2006년 8월 8일을 사례일로 선정하였다.

2005년 사례일인 7월 22일의 경우 NOx와 오존생성 기여율 상위 물질들의 농도변화가 비교적 크게 나타났다. Site 1의 경우 최고 오존농도 발생 시간대를 전후로 NOx와 오존생성 상위 물질의 농도가 급격하게 감소하여 NOx와 VOCs가 고르게 오존생성에 기여한 것으로 예상되며, OZIPR 모델링 결과에서도 NOx, VOCs 농도 감소 모두 오존농도를 감소시키는 것으로 나타났으나, VOCs 농도의 감소가 NOx 농도 감소보다 비교적 효과적인 것으로 나타났다. Site 2의 경우 최고 오존농도 시간대를 중심으로 오존 생성 기여율 상위 물질의 농도가 NOx에 비하여 급격하게 증가하였다 감소한 것으로 나타났으며 이에 따라 VOCs 농도의 감소가 오존농도 감소에 효과적인 것으로 나타났다. Site 3의 경우는 초기 NOx 농도가 VOCs에 비교하여 다른 지점들보다 낮았으며, 따라서 NOx 농도의 감소가 오존농도의 감소에 효과적인 것으로 나타났다.

2006년 사례일인 8월 8일의 경우 전반적으로 오

존농도의 일변화에 비하여 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 농도변화는 적은 것으로 나타나, 광화학적 오존의 생성보다는 수송, 이류 등에 의한 고농도 오존의 생성을 예상할 수 있었다. 그러나 최고 오존농도 발생시간대를 전후하여 오존생성 기여율 상위 물질들의 농도 변화가 NO<sub>x</sub> 농도변화 보다 크게 나타났으며, 이는 NO<sub>x</sub> 보다는 VOCs가 오존생성에 더 많이 기여한 것으로 예상할 수 있었고, OZIPR 모델링 결과 3개 지점에서 모두 VOCs 농도 감소가 오존농도 감소에 효과적인 것으로 나타났다.

도시대기 측정소와 광화학 측정소가 인접한 대연동, 전포동, 부곡동 지점에서의 2005년, 2006년 고농도 오존발생 일에 대한 NO<sub>x</sub>와 VOCs 영향을 살펴 보았으며 대도시인 서울 등에서의 연구결과<sup>8,9)</sup>와 유사하게 "VOCs limited"인 것으로 나타났으나, 2005년 사례일의 Site 3(부곡동 지점)에서는 NO<sub>x</sub>에 의해 오존농도가 감소하는 것으로 나타나, 일자별 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 초기농도 분포에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 지점별로 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 기여도에 차이가 나는 것은 고농도 일의 기상조건과 지역별 배출환경의 차이도 반영된 것으로 사료되나 향후 좀더 세밀한 연구가 필요하며, 부산지역 전체에 대한 제한 인자의 분석을 위해서는 오존 전구물질의 측정지점이 증가 되어야 할 것으로 판단된다. 일부 사례일에 대한 분석결과 VOCs 농도 감소가 오존 농도 감소에 비교적 효과적인 것으로 예상할 수 있었다. 전구물질 농도 측정 지점의 확대와 이를 통한 NO<sub>x</sub>와 VOCs의 상호 관계에 관한 연구가 지속적으로 필요하며, 이를 바탕으로 지역별 오존 제한인자의 파악과 배출량 제어 기초 자료로 활용 가능 할 것이다.

### 참 고 문 헌

- 1) Sillman S., 1999, The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmos. Env.*, 33, 1821-1842.
- 2) 오인보, 김유근, 황미경, 2005, 수도권지역 오존 오염 패턴과 기상학적 특성, *한국대기환경학회지*, 21(3), 357-365.
- 3) 손장호, 2006, 2004년 여름 서울에서 발생한 고농도 오존 사례의 광화학적 분석, *한국대기환경학회지*, 22(3), 361-371.
- 4) <http://www.ihe.busan.go.kr/>
- 5) 국립환경과학원, 2005, 연도별 배출량 추이 (1999-2003), 109-128pp.
- 6) Gery M. W., Crouse R. R., 2002, User's guide for executing OZIPR, U. S. EPA.
- 7) 박주연, 김용표, 2002, 서울시에서의 최적 오존 저감 대책 : OZIPR을 이용한 사례연구, *한국대기환경학회지*, 18(5), 427-433.
- 8) 이선화, 김용표, 2005, OZIPR을 이용한 수도권 오존 저감대책 연구, *한국대기환경학회 2005 추계학술대회 논문집*, 310-311.
- 9) 홍유덕, 이상욱, 한진석, 이석조, 김신도, 김윤신, 2005, OZIPR을 이용한 서울지역 광화학오존농도 저감방안에 관한 연구, *한국대기환경학회 2005 추계학술대회 논문집*, 104-105.
- 10) <http://www.epa.gov/ttn/chief/emch/speciation/index.html/>
- 11) 환경부, 국립환경과학원, 2006, 대기환경연보 (2005), 71-101pp.