

연구논문

OZIPR을 이용한 서울지역 광화학오존농도 저감방안에 관한 연구

홍유덕 · 이상욱 · 한진석 · 이석조 · 김신도* · 김윤신**

국립환경연구원 대기연구부, 서울시립대학교 환경공학과*, 한양대학교 환경 및 산업의학연구소**
(2005년 4월 20일 접수, 2005년 5월 23일 승인)

A Study on the Reduction of Photochemical Ozone Concentration using OZIPR in Seoul Area

You-Deog Hong · Sang-Uk Lee · Jin-Seok Han · Suk-Jo Lee · Shin-Do Kim* · Yoon-Shin Kim**

Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research

Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

Institute of Environmental and Industrial Medicine, Hanyang University**

(Manuscript received 20 April 2005; accepted 23 May 2005)

Abstract

This study was executed to know the best matrix of photochemical ozone reduction in the metropolitan area. For this object, we used the OZIPR(Ozone Isopleth Plotting Package for Research) model for comparing the effectiveness of VOCs and NOx amount variation about the ozone creation.

Among the various ozone reduction scenarios, 50% reduction of VOCs from organic solvent and road traffic respectively was the best matrix for ozone reduction.

Although it needs more accurate assessment and confirmation of VOCs and NOx emission amount data, according to existing data, the control of VOCs is the best way for photochemical ozone reduction in Seoul.

Key words : OZIPR, Photochemical ozone, VOCs, NOx

1. 서론

1990년대 이후, 경제 성장에 의한 산업활동 증가와 자동차 보급대수 증가로 인해 자동차에서 배출되

는 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds; 이하 VOCs라 함)의 배출량이 증가 추세에 있다. 이와 같은 오존 생성 전구물질

들의 배출량 증가로 인하여 대기중에서 광화학 반응으로 생성된 오존 등 2차 오염물질에 의한 대기오염 문제가 심각해질 것으로 예상된다.

환경부는 서울, 부산, 대구 등 대도시와 수도권인 경기도지역 도시를 비롯한 전국 72개 지역에서 오존정보제를 시행하고 있다. 발령일수 및 횡수를 보면, 1995년에는 1일(2회)에 불과하였으나, 1997년 12일(24회), 1999년 16일(41회), 2000년 17일(52회)로 계속 증가하는 추세이며, 2001년 15일(29회), 2002년 9일(45회), 2003년 17일(48회), 2004년에는 27일(156회)로 기록되었으며, 대상지역도 1997년 6개 지역에서 2000년에는 12개 지역으로, 2003년에는 19개 지역, 2004년에는 34개 지역으로 증가하는 등 오존 오염이 전국적으로 확산되고 있다(국립환경연구원, 2004).

일반적으로 오존 농도의 모사 및 예측, 저감방안을 위한 모형으로 UAM(Urban Airshed Model)이 널리 쓰이고 있다. UAM과 같은 지역규모의 모형 외에 특정 도시 중규모에서 이용되는 규제모형(Regulatory Model)으로는 미국 환경청(EPA)의 EKMA(Empirical Kinetics Modeling Approach) 모형과 OZIPR(Ozone Isopleth Plotting Package for Research) 모형이 있다.

국내에서는 수도권 지역을 대상으로 UAM의 민감도 분석 및 배출량 변화에 따른 오존농도의 영향을 파악한바 있으며(김용국, 1996), 김광진(1998)은 UAM을 적용하여 수도권 지역의 오존농도를 효율적으로 저감할 수 있는 방안을 제시하였다. 박주연과 김용표(2002)는 OZIPR의 민감도 분석과 더불어 초기 농도에 따른 오존 농도 변화를 살펴보았으나, 상공에서 수송된 오존 및 시간별 배출량 자료 부족으로 오존농도의 정확한 산출이 어려웠다.

본 연구에서는 여름철 서울지역의 VOCs 배출원에 대한 구성물질 성분비를 고려한 배출량 자료, NO_x, CO 배출량 자료, 광화학평가측정망 자료, 기상자료 및 RADM(Regional Acid Deposition Model) 화학 메카니즘 등을 이용한 OZIPR(Ozone

Isopleth Plotting Package for Research) 모형을 통해 서울지역의 광화학오존농도를 효율적으로 저감할 수 있는 방안을 알아보려고 한다.

II. 모델 및 입력자료

1. 모델의 개요

OZIPR 모형은 시간별 변화하는 혼합고도를 사용한 Box 모델로서, 오존 농도를 예측하기 위해서 설계되었다. 입력자료로 화학적 물질에 관련된 배출량과 초기 농도, 그리고 온도와 습도, 혼합고, 대기압 등에 대한 기상요소들이 포함된다. OZIPR은 단일 공기 기둥을 가정하여 낮은 대기층의 복잡한 화학적, 물리적 작용을 시뮬레이션한다.

OZIPR 모형은 대기질 상태를 파악 및 예측하는데 간단히 사용할 수 있으며, 효율적인 광화학오존농도 저감방안을 제시할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 VOCs의 배출원에 대한 구성물질 성분비를 고려한 배출량 자료, 기상자료 및 초기 농도에 대한 정확한 입력자료가 필요하다.

2. 기상자료

혼합층 고도를 산출하기 위한 0-Order Jump model은 지표면의 현열 flux로부터 주간의 혼합고 발달을 계산하는 모델로, 혼합고를 산출하기 위한 기본과정은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{(\overline{w'\theta'})_s - (\overline{w'\theta'})_h}{h}$$

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(\overline{w'\theta'})_h}{\Delta\theta}$$

$$(\overline{w'\theta'})_h = -Ce(\overline{w'\theta'})_s$$

여기서 t 는 시간, θ 는 온위이며, $(\overline{w'\theta'})$ 는 현열 flux로서 w' 은 연직풍속의 변동성분, θ' 은 온위의 변동성분이다. 또한 h 는 혼합고, $\Delta\theta$ 는 혼합층 상부에서 온

위의 jump, γ 는 혼합층 상부에서 온위의 기울기, C_e 는 entrainment ration이며, 첨자 s 및 h 는 각각 지표 및 고도 h 에서의 값을 나타낸다(이종범, 1998). 이를 토대로 산출한 2002년 서울지역 계절에 따른 일중 혼합고 변화는 그림 1과 같다. 최대 혼합고는 16시에 생성되는 것을 확인할 수 있으며, 봄에는 1700~1800m, 여름에는 1200~1300m, 가을에는 1600~1700m, 겨울에는 1300~1400m로 나타났다. 즉 봄, 가을, 겨울, 여름의 순으로 최대 혼합고가 높이 형성하는 것을 알 수 있다.

기온의 일변화는 광화학 반응에 있어서 기온은 일사량과 함께 오존 농도 변화에 영향을 주는 것으로 알려져있다. 2002년 서울지역의 기상청 자료에서 여름철 맑은 날의 기온은 새벽 6시경 즉 해뜨기 바로 전이 가장 낮았으며, 이후 꾸준히 증가하여 15시경에 약 28 로 최고 온도를 나타냈다(그림 2).

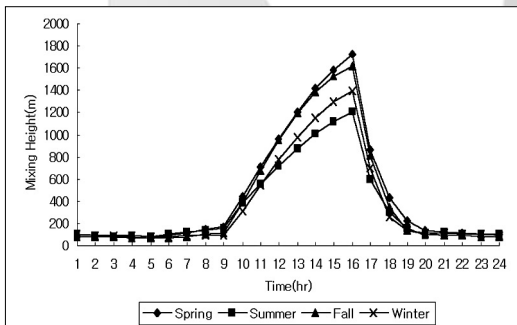


Figure 1. Diurnal variation of mixing height in the summer of Seoul

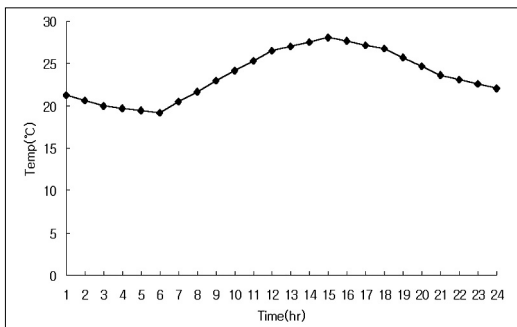


Figure 2. Diurnal variation of temperature in the summer of Seoul

3. 배출량 자료

본 연구는 물질계수법을 이용하여 산출한 2001년 서울지역 배출량(국립환경연구원, 2003)을 이용하였다.

대기보전 정책수립 지원시스템(CAPSS; Clean Air Policy Support System)의 자료에 의하면 서울지역의 VOCs 배출량은 유기용제가 64.3%로 가장 많은 배출을 하고 있으며, 그 다음으로는 도로이동오염원이 26.4%로 나타났다. NO_x의 경우 도로이동오염원이 59.0%, 비산업 연소가 19.6%, 비도로 오염원이 17.4%로 배출량이 많은 것을 알 수 있다. CO는 서울지역에서 전체 배출량의 대부분이 도로이동오염원(89.3%)으로 나타났다.

광화학 반응에 의한 오존 발생은 주로 여름철에 일어나기 때문에 본 연구에서는 여름철의 일평균 배출량에 미국 환경청 EPA에서 제공하고 있는 각 배출원에 따른 시간별 가중치를 고려하여 시간별 VOCs, NO_x, CO 배출량을 산정하였다(그림 3).

시간별 VOCs 배출량에서 유기용제는 오전 5시부터 증가하여 14시경에 배출량이 최고조에 이르며, 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 도로이동오염원은 출근 시간인 8시와 18시에 VOCs 배출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 결과적으로 Total VOCs 배출량은 오전 7시~8시에 급격히 증가하고, 그 이후 꾸준히 증가하여 16시에 배출량이 가장 높은 것으로 나타났다.

또한 시간별 NO_x 배출량은 출·퇴근 시간인 8시와 18시에 가장 높은 것으로 나타났다. 또한 비도로이동오염원은 8시부터 서서히 증가하여 13시경에 최대로 나타나며, 그 이후 배출량이 서서히 감소하는 것으로 나타났다.

시간별 CO 배출량에서 도로이동오염원은 출·퇴근 시간인 8시와 18시에 CO 배출량이 가장 높은 것으로 나타났다. 결과적으로 Total CO 배출량은 도로이동오염원의 추세와 동일하며, 도로이동오염원이 가장 많은 영향을 주는 것으로 알 수 있다.

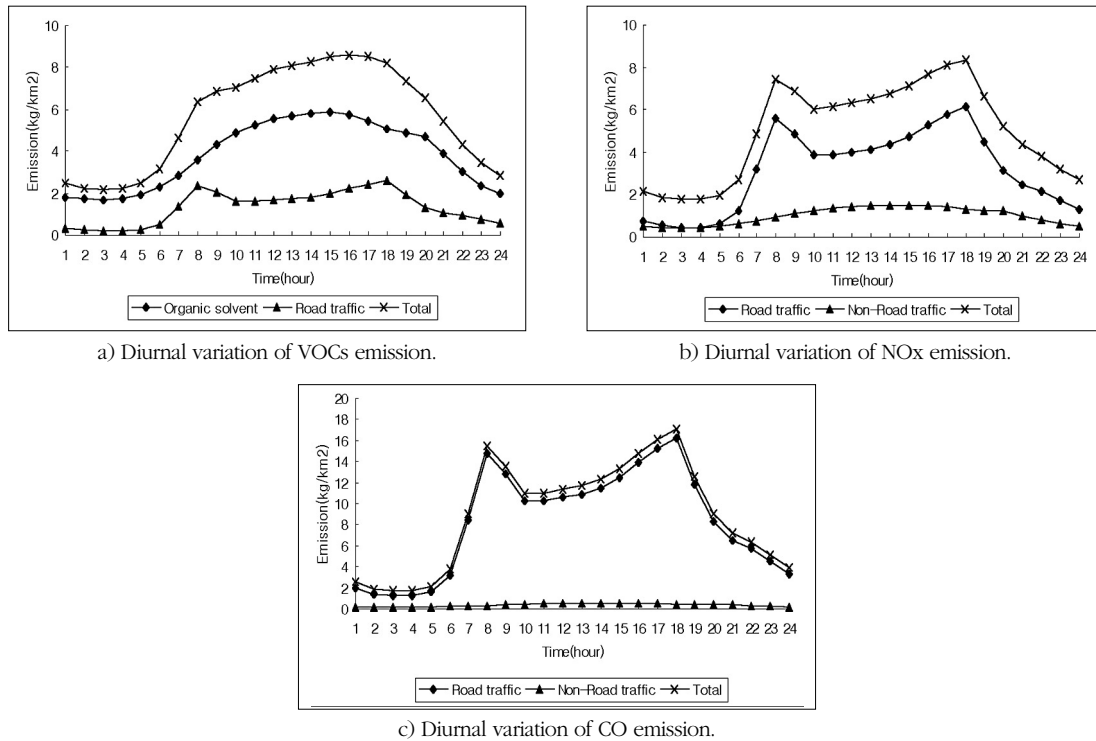


Figure 3. Diurnal variation of VOCs, NOx, CO emission

4. 초기 및 경계 조건

1) 초기 농도

VOCs, CO의 초기 농도는 환경부에서 운영하고 있는 불광동에 있는 광화학평가측정망 데이터 중에서 2002년 여름철(6, 7, 8월) 강수량이 없는 맑은 날에 측정된 데이터를 토대로 구했으며, NO, NO₂ 등 NOx는 서울시에서 운영하고 있는 서울시 전체 지점의 2002년 여름철 시간 평균 데이터를 이용하였다.

2) VOCs 반응성 분율

OZIPR에는 초기 배출된 반응성 분율(Initial Emittted), 상층 및 지상에서 수송되는 반응성 분율(Transport Aloft, Surface)을 입력하도록 되어있다.

표 1에는 VOCs의 주요 배출원에 대한 구성물질 성분비를 제시하고 있다. 에너지 산업연소는 n-butane과 isobutane의 비중이 크며, 비산업 연소와 제조업 연소는 ethane의 비중이 70%로, 에너지 수

송 및 저장은 n-buthane, isopentane, isobutane의 비중이 높은 것으로 조사되었다. 또한 유기용제 사용에서는 Aromatic 계열인 toluene, m,p-xylene, o-xylene의 비중이 높았다. 도로이동오염원과 비도로이동오염원에서는 ethylene, toluene 등 여러 물질이 배출되는 것을 알 수 있다. 폐기물처리에서는 알데히드류가 대부분이었으며, 자연오염원에서는 isoprene으로 조사되었다.

초기 반응성 분율은 배출원의 VOCs 배출량과 구성물질 성분비를 토대로 VOCs를 13가지 그룹으로 나누어 작성하였다. 또한 상층에서 수송되는 VOCs 반응성 분율은 상공 2000m 이상에서 측정된 VOCs 분율(국립환경연구원, 2000~2003)을, 지상에서 수송되는 반응성 VOCs 분율은 고려하지 않아 상공의 VOCs 반응성 분율을 그대로 적용하였다.

초기 반응성 분율(Base)에서 보면 Group 1(TOL)이 53%로 절반 이상을 차지하였으며, Group 2(HC3),

Table 1. VOCs source profile fractions

Compound	Energy industry combustion ^a	Non-industrial combustion ^a	Industrial combustion ^a	Energy transportation and store ^b	Organic solvent ^b	Road traffic ^c	Non-Road traffic ^c	Waste treatment and disposal ^d	Natural sources ^e
acetylene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.00	0.00
ethane	0.07	0.69	0.69	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
propane	0.10	0.18	0.18	0.02	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00
isobutane	0.27	0.05	0.05	0.18	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
1-butene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-butane	0.54	0.05	0.05	0.42	0.00	0.09	0.09	0.00	0.00
cis-2-butene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
isopentane	0.00	0.01	0.01	0.20	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00
1-pentene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
n-pentane	0.01	0.01	0.01	0.09	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
isoprene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
n-hexane	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
benzene	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.07	0.05	0.00
n-heptane	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
toluene	0.00	0.00	0.00	0.01	0.78	0.14	0.14	0.00	0.00
n-octane	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ethylbenzene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.00	0.00
m,p-xylene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.07	0.07	0.00	0.00
styrene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
o-xylene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.04	0.04	0.00	0.00
ethylene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.18	0.00	0.00
propylene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
2-methylpentane	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00
3-methylpentane	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
2,4-dimethylpentane	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00
formaldehyde	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00
acetaldehyde	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00

a : 국립환경연구원(2003), 고농도 오존발생과 광화학오염현상 규명을 위한 연구(I, III)

b : 울산의 휘발성 유기화합물 현황과 정책전망 세미나집(1999)

c : 대기보전학회(1997), 대기환경과 휘발성유기화합물질

d : 국립환경연구원(2003), 유해대기오염물질 관리 시스템 개발 연구(I)

Group 3(HC5)과 Group 4(XYL) 등의 비율이 높았다. 또한 상공에서 수송되는 반응성 분율에서는 Group 5(OLT)와 Group 6(OL2)의 비율이 높았으며,

그 다음으로는 Group 7(ALD)과 Group 1(TOL)이 높게 나타났다. 또한 유기용제 및 도로이동오염원 배출량의 변화에 따른 초기 반응성 분율은 표 2와 같다.

Table 2. VOCs reactivity ratio

VOCs	Transport		Initial Emitted (Base)	Organic solvent		Road traffic		Organic solvent 25%		Organic solvent 50%	
	Aloft	Surface		25%	50%	25%	50%	Road traffic 25%	Road traffic 50%	Road traffic 25%	Road traffic 50%
ETH	0.0956	0.0956	0.0166	0.0193	0.0230	0.0151	0.0133	0.0178	0.0160	0.0218	0.0202
HC3	0.0629	0.0629	0.0883	0.1025	0.1224	0.0800	0.0699	0.0945	0.0844	0.1155	0.1063
HC5	0.0411	0.0411	0.0968	0.1076	0.1226	0.0887	0.0787	0.0993	0.0887	0.1146	0.1039
HC8	0.0015	0.0015	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
OL2	0.1938	0.1938	0.0703	0.0817	0.0975	0.0589	0.0450	0.0696	0.0543	0.0851	0.0684
OLT	0.3692	0.3692	0.0423	0.0491	0.0586	0.0354	0.0271	0.0419	0.0326	0.0511	0.0411
OLI	0.0426	0.0426	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
TOL	0.0600	0.0600	0.5340	0.4911	0.4317	0.5653	0.6037	0.5229	0.5635	0.4619	0.5024
XYL	0.0189	0.0189	0.1364	0.1308	0.1229	0.1396	0.1434	0.1338	0.1377	0.1255	0.1290
HCHO	0.0085	0.0085	0.0006	0.0007	0.0009	0.0007	0.0008	0.0008	0.0009	0.0010	0.0012
ALD	0.0771	0.0771	0.0037	0.0043	0.0051	0.0040	0.0045	0.0048	0.0054	0.0058	0.0068
NR	0.0067	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
ISO	0.0000	0.0000	0.0111	0.0129	0.0154	0.0122	0.0136	0.0144	0.0164	0.0176	0.0207

3) 수송되는 O₃, VOCs, NO_x, CO 농도 및 침적속도

상공에서 수송되는 오존 농도 및 VOCs, NO_x, CO의 농도는 항공관측데이터(국립환경연구원, 2000~2003)를 토대로 산출하였으며, O₃는 45ppb, VOCs는 40ppb, NO_x는 2ppb, CO는 0.3ppm로 나타났다. 또한 침적속도는 OZIPR에 제시된 것을 사용하였다.

III. 모델링 결과 및 고찰

1. 실측과의 비교

본 연구는 광화학평가측정망과 대기오염 자동측정망이 있는 서울 불광동 데이터 중 2002년 여름철(6, 7, 8월) 강수량이 없는 맑은 날의 VOCs, NO_x, O₃ 농도를 시간별로 산술평균하여, 측정망 자료와 모델링 결과를 비교·분석하였다.

오전 8시 VOCs 평균 농도는 250ppbC, O₃은

7ppb, NO는 40ppb, NO₂는 35ppb였으며, 모델 성능을 평가하기 위해 O₃, VOCs, NO_x에 대하여 상관분석을 실시하였다. 그 결과, 최소자승법을 이용하여 회귀식을 구하면 O₃는 $y_c = 1.042x_{obs} + 0.0117$, VOCs는 $y_c = 0.7117x_{obs} + 0.0187$, NO_x는 $y_c = 1.0993x_{obs} - 0.0293$ 이다. 또한 실측값과 계산값의 상관성을 살펴보면 O₃는 $R^2 = 0.88$ (P-value: 0.001), VOCs는 $R^2 = 0.76$ (P-value: 0.001), NO_x는 $R^2 = 0.75$ (P-value: 0.001)로 좋은 결과를 나타냈다.

그림 4에서 점은 실측값을, 실선은 계산값을 나타내고 있으며, VOCs, NO, NO₂ 모두 측정값보다 모델에서 계산된 값이 더 낮은 농도를 나타냈다. 여기서 실측값은 서울지역 중에 불광동이라는 특정지역을 나타낸 것이고, OZIPR로 계산된 값은 서울지역 전체의 평균 농도이기 때문에 다소 차이가 있는 것으로 판단된다. NO에서 NO₂로의 산화가 실측값보다 계산값이 높게 평가됨에 따라 O₃의 증가가 빨리 나타나고, 시간이 흐름에 따라 모델에서의 NO₂의 값이 실측값보다 낮아 O₃ 농도가 실측값보다 높게 나타나

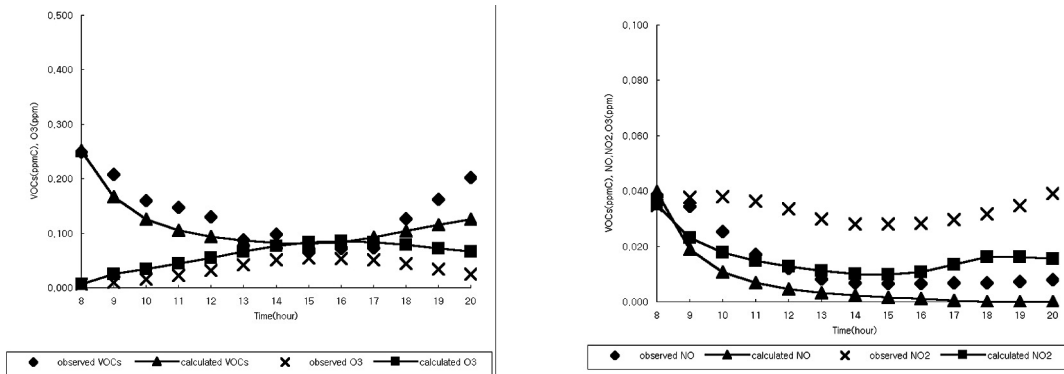


Figure 4. Comparisons of observed and calculated concentration

고 있다. 18시에서 20시까지 NO₂의 실측값과 계산된 값이 차이가 있는데 시간별 NO₂ 배출량이 과소평가된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 전체적인 농도변화는 유사한 양상을 나타내고 있다.

2. 서울지역의 대기질 현황

그림 5는 앞서 OZIPR을 이용하여 나온 결과를 토대로 O₃, PAN, HNO₃, HCHO의 최고등농도선을

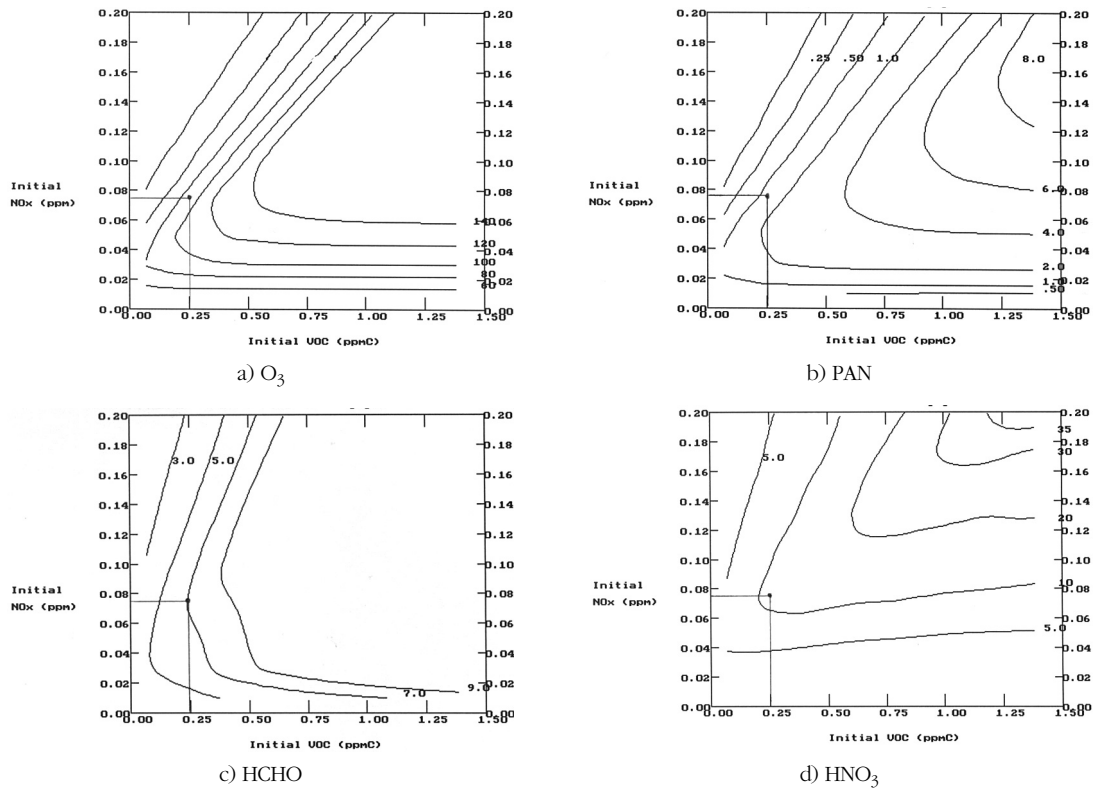


Figure 5. Ozone, PAN, HNO₃, HCHO isopleth using OZIPR in Seoul

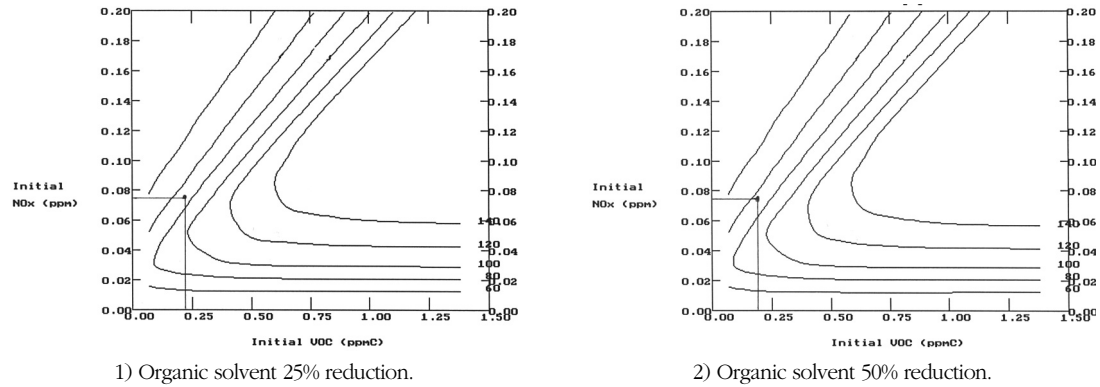


Figure 6. Ozone isopleth by organic solvent reduction

그런 것이다.

본 연구에서 사용한 배출량 자료 및 기상조건(최고 온도 30℃, 최대 혼합고 1200m)에 따라 오존 최고등 농도선을 보았을 때, 초기 농도는 그림에서 보는 바와 같이 VOCs가 0.25ppmC, NOx는 0.075ppm이다. 여기서 VOCs를 증가시키면 오존 농도는 증가하며, 감소시키면 오존 농도 또한 감소한다. 그러나 NOx를 증가시키면 오히려 오존 농도는 감소하게 되며, NOx를 감소시키면 증가하게 되지만 0.05ppm 이하의 농도로 감소하게 되면 오존 농도는 감소하게 된다.

중간 생성물인 PAN을 보면 오존과 비슷한 형태의 등농도선이 나타나는 것을 알 수 있다. OZIPR을 통해서 본 서울지역 여름철 최고 PAN 농도는 약 1.4ppb로 나왔다. 또한 HCHO의 경우 7ppb 정도 나타나는 것을 알 수 있다. PAN과 HCHO 둘 다 VOCs의 초기 농도를 줄이는 것이 NOx의 초기 농도 조절하는 것보다 쉽게 감소하는 것을 알 수 있다. 최종 산물인 HNO₃는 16시에 약 11ppb로 산출되었다.

3. 서울지역 광화학오존농도 저감방안

본 연구는 VOCs 배출량이 가장 많은 유기용제의 배출량과 NOx 배출량이 가장 많은 도로이동오염원의 배출량을 줄였을 때 오존 농도가 어떻게 변하는지에 대해 알아보았으며, 시간별 VOCs 배출량과 VOCs의 반응성 분율을 고려하여 서울지역 광화학오

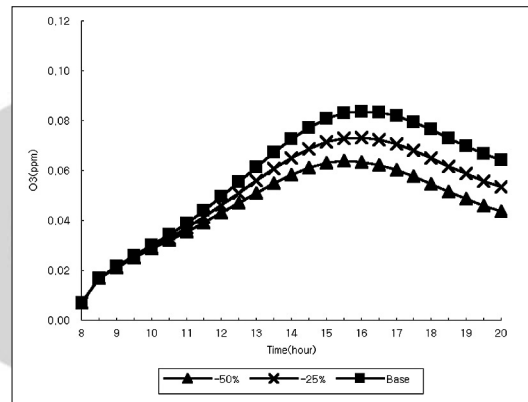


Figure 7. Diurnal variation of O₃ concentration by organic solvent reduction

존농도 저감방안에 대해 알아보하고자 하였다.

1) 유기용제 저감

서울지역에서 최고 온도 30℃, 최대 혼합고 1200m일 때 최고 오존 농도는 84ppb로 나타났으며, 유기용제의 배출량 및 초기 배출 농도를 50% 줄였을 때의 오존은 64ppb로, 줄이기 전에 비해 최고 오존 농도가 24% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 유기용제의 배출량과 초기 배출농도를 25% 줄였을 때의 오존은 73ppb로, 줄이기 전에 비해 최고 오존 농도가 13% 감소하는 것으로 나타났다.

유기용제는 VOCs만 저감되는 것으로, 최고 온도 30℃, 최대 혼합고 1200m의 기상조건 VOCs

0.25ppmC, NOx 0.075ppm에서 NOx의 초기 농도는 그대로 있으며, VOCs의 초기 농도는 좌측으로 이동하여 결국 오존이 감소하는 것을 알 수 있다.

2) 도로이동오염원 저감

VOCs만을 고려한 도로이동오염원의 배출량 및 초기 배출농도를 50% 저감했을 때에는 저감하기 전의 84ppb 보다 적은 74ppb로, 12% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 25% 저감했을 때에는 79ppb로, 6% 감소하는 것으로 나타났다.

VOCs 뿐만 아니라 NOx, CO까지 고려한 도로이동오염원의 배출량 및 초기 배출농도를 50% 저감했을 때에는 104ppb로 저감하기 전의 최고 오존 농도인 84ppb와 비교했을 때, 24% 증가한 것으로 나타났다. 또한 25% 저감했을 때에는 96ppb로, 저감하기 전의 최고 오존 농도와 비교했을 때 14% 증가하는 것으로 나타났다.

3) 유기용제와 도로이동오염원의 VOCs 배출량 저감

유기용제를 25% 저감하고, 도로이동오염원을 25%, 50% 각각 저감하였을 때의 오존 농도 변화에 대해 나타내었다. 여기서는 오직 VOCs 배출량에 관해서만 변화를 주었다. 유기용제를 25% 저감하고 도로이동오염원의 배출량 및 초기 배출농도를 50% 줄였을 때의 오존은 65ppb로, 저감하기 전의 최고 오존 농도(84ppb)에 비해 최고 오존농도가 23% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 도로이동오염원의 배출량과 초기 배출농도를 25% 줄였을 때의 오존은 69ppb로, 줄이기 전에 비해 최고 오존 농도가 18% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 VOCs만 유기용제 50%, 도로이동오염원 50% 저감시켰을 때 56ppb(33% 감소)로 오존 농도의 저감효과가 가장 큰 것으로 사료된다.

4) 유기용제와 도로이동오염원의 VOCs, NOx, CO 배출량 저감

유기용제를 25% 저감하고, 도로이동오염원을 25%, 50% 각각 저감하였을 때의 오존 농도 변화에

Table 3. Ozone variation according to case

Case		Conc. (ppb)	Ratio (%)
Base		84	100
Organic Solvent	25%	73	13 ↓
	50%	64	24 ↓
Road traffic(VOCs)	25%	79	6 ↓
	50%	74	12 ↓
Road traffic (VOCs, NOx, CO)	25%	96	14 ↑
	50%	104	24 ↑
O.S + R.T(VOCs)	25% + 25%	69	18 ↓
	25% + 50%	65	23 ↓
	50% + 25%	60	29 ↓
	50% + 50%	56	33 ↓
O.S + R.T (VOCs, NOx, CO)	25% + 25%	85	1 ↑
	25% + 50%	96	14 ↑
	50% + 25%	73	13 ↓
	50% + 50%	85	1 ↑

대해 나타내었다. 여기서는 VOCs, NOx, CO 모두 변화를 주었다. 유기용제를 25% 저감하고 도로이동오염원의 배출량 및 초기 배출 농도를 50% 줄였을 때의 오존은 96ppb로, 저감하기 전의 최고 오존 농도(84ppb)와 비교하였을 때 오존 농도가 14% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 도로이동오염원의 배출량과 초기 배출 농도를 25% 줄였을 때의 오존은 85ppb로, 줄이기 전에 비해 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. VOCs만 저감시키면 오존 농도의 저감 효과가 크지만, NOx까지 저감시키면 오존 저감효과가 크지 않는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

서울지역의 VOCs 배출원에 대한 구성물질 성분비를 고려한 배출량 자료와 NOx, CO 배출량 자료, 광화학 평가측정망 자료 및 기상자료 등의 2002년 여름철 맑은 날을 대상으로 OZIPR을 적용한 결과, 서울지역에서의 광화학 오염상태 및 오존 전구물질들에 의한 오존 생성의 특성 등을 비교적 잘 표현하고 있는 것으로 나타났으며, OZIPR을 서울지역의

오존농도 예측 및 오존농도 저감을 위한 배출량 제어 정책 수립 등에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

VOCs 배출량만을 저감하면 오존농도의 저감효과가 크지만, NO_x 배출량까지 동시에 저감하면 오존농도의 저감효과가 크지 않는 것으로 사료된다. 유기용제 50%, 도로이동오염원의 VOCs 배출량 50% 저감하였을 때 56ppb(33% 감소)로 오존 농도의 저감효과가 가장 큰 것으로 사료된다.

앞으로 VOCs와 NO_x 배출량 자료의 보다 정확한 산정과 확보가 요구되고 있지만 지금까지의 자료를 토대로 볼 때, 서울지역의 광화학오존농도 저감을 위해서는 유기용제사용을 줄이는 것이 가장 효율적인 것으로 사료된다.

참고문헌

- 국립환경연구원, 1999, 도시지역 광화학반응과 2차 오염물질 생성에 관한 연구(III), 국립환경연구원.
- 국립환경연구원, 2000~2003, 동북아대기오염 감시체계구축 및 환경보전협력사업(I, II, III, IV), 국립환경연구원.
- 국립환경연구원, 2001~2003, 고농도 오존발생과 광화학 오염현상 규명을 위한 연구(I, II, III), 국립환경연구원.
- 국립환경연구원, 2003, 대기보전 정책수립 지원 시스템, 국립환경연구원.
- 국립환경연구원, 2004, 2003년 대기환경연보, 국립환경연구원.
- 박주연, 김용표, 2002, 서울시에서의 최적 오존 저감 대책: OZIPR을 이용한 사례 연구, 한국 대기환경학회지, 18(5), 427-433.
- 서정배, 1999, EKMA를 이용한 수원시의 오존농도 저감방안 연구, 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 2, 78-80.
- 이종범, 김용국, 1998, 우리나라 혼합층고도의 지역 분포 및 계절변화, 한국대기환경학회 춘계 학술대회논문집, 1, 179-180.
- Gery, M., Crouse, R., 1990, User's Guide for Executing OZIPR, Order No. 9D2196NASA, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711, USA.
- National Research Council, 1991, Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution, National Academy Press, Washington, D.C.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1989, User's Manual for OZIPM-4.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1999, A Simplified Approach for Estimating Secondary Production of Hazardous Air Pollutants (HAPs) Using the OZIPR Model, EPA Report No. EPA-454/R-99-054, USA.