

OZIPR 모델링 결과의 민감도 분석

이선화^{1,2)} · Lan Jin · 김용표²⁾ *

¹⁾현소속 : 한국정책금융공사, ²⁾이화여자대학교 환경공학과,

(2011년 9월 9일 투고, 2011년 9월 24일 수정, 2011년 9월 29일 게재확정)

A Sensitivity Analysis of the OZIPR Modeling Result for the Seoul Metropolitan Area

Sun-Hwa Lee^{1,2)} · Lan Jin²⁾ · Yong Pyo Kim²⁾ *

¹⁾Present Affiliation: Korea Financial Corporation

²⁾Department of Environmental Science and Engineering EwhaWomans University

(Received 9 September, 2011; Revised 24 September, 2011; Accepted 29 September 2011)

Abstract

To establish area specific control strategies for the reduction of the ozone concentration, the Ozone Isopleth Plotting Package for Research(OZIPR) model has been widely used. However, the model results tend to be changed by various input parameters such as the background concentration, emission amount of NO_x and volatile organic compounds (VOCs), and meteorological condition. Thus, sensitivity analysis should be required to ensure the reliability of the result. The OZIPR modeling results for five local government districts in the Seoul Metropolitan Area (SMA) in June 2000 were used for the sensitivity analysis. The sensitivity analysis result showed that the modeling result of the SMA being VOC-limited region is still valid for a wide range of input parameters' variation. The estimated ozone concentrations were positively related with the initial VOCs concentrations while they were negatively related with the initial NO_x concentrations. But, the degree of the variations at each local district was different suggesting area specific characteristics being also important. Among the five local governments, Suwon was chosen to identify other variance through the period from April to September in 2000. The monthly modeling results show different ozone values, but still showing the characteristics of VOCs-limited region. Limitations due to not considering long range transport and transfer from neighbor area, limitation of input data, error between observed data and estimated data are all discussed.

Keywords : Seoul Metropolitan Area, Ozone, Sensitivity analysis, Nitrogen oxides, Volatile Organic Compounds

* Corresponding author.

Tel : +82-2-3277-2832, E-mail : yong@ewha.ac.kr

1. 서 론

오존은 1995년 오존 경보제의 도입으로 시민들이 느끼는 체감대기오염도의 대표적인 기준이 되고 있다. 1999-2006년 오존 오염도의 변화추이를 살펴보면 환경기준 8시간 평균치를 기준으로 하였을 때 서울 지역의 초과횟수는 매년 235회에서 528회로 늘었고 인천지역의 초과횟수는 매년 27회에서 109회로 늘었다(MOE 2006). 그러므로 오존은 수도권 대기환경 개선을 위해 우선적인 대책이 필요한 오염물질이라 할 수 있다. 복잡한 생성 및 소멸과정을 통해 증가된 지표 부근의 오존은 인간과 생태계 전반에 걸쳐 피해를 야기시킨다. 인체에 대한 피해를 살펴보면 오존의 영향으로 만성 호흡질환, 천식악화, 폐활량 감소, 폐렴, 생체 면역능력의 감소와 같은 현상이 나타날 수 있다. 또한 오존은 기관지를 통해 인체 내부로 유입되어 기관지의 세포 및 조직에 영향을 미치며 기관지 질환과 폐 기능의 악화를 야기시킨다(He et al.,1999). 식물에 대한 피해는 잎이 변색되고 잎 전체에 작은 반점이 나타나며 광합성 기능이 저하되고 영양섭취가 떨어져 생장에 지장을 받는다. 오존은 또 강력한 산화제로서 고무와 식물의 탈색을 초래하는 등의 악영향을 미친다.

광화학반응에 의해 생성되는 2차 생성물로서 오존은 생성전구물질인 질소산화물(NOx)과 휘발성유기화합물(VOCs)이 있다. NOx와 VOCs의 배출량 비에 따라, NOx 또는 VOCs 배출량 저감이 오히려 오존농도의 증가를 초래할 수 있기에(Seinfeld and Pandis,2006) 이러한 전구물질 변화에 따른 오존농도의 변화를 더 잘 관찰하고, 더 정확한 오존저감정책을 만들기 위하여 오존 등 농도곡선으로 추이를 나타내게 해야 한다. 오존은 미세입자와 함께 생성되기 때문에, 서울과 수도권에서의 오존 생성 메커니즘을 이해하는 것은 미세입자 저감에도 중요하다.

수도권 대기환경개선 특별대책의 경우 관리 대상물질의 제어방안에 있어 지역적인 특성이 반영되지 못하고 관리권역 전체를 대상으로 기준이 적용되고 있다. 그러나 Fig. 1에 보인 수도권 지역의 오존대책은 그 생성 메커니즘 특성상 광역 대기환경관리나 통합적 접근과 함께 지역별 상황이 최대한 고려될 수 있어야 한다. NOx와 VOCs의 배출량 비에 대해 지역별, 지방자치단체별 대책의 수립이필요할 뿐만 아니라 한 지역에서 일정한 기간에 따른 오존농도 변화도 관찰하고 분석 할 가치가 있는 것이다.

OZIPR(Ozone Isopleth Plotting Package for Research)은 배출량에 근거하여 정책 제어에 합당한

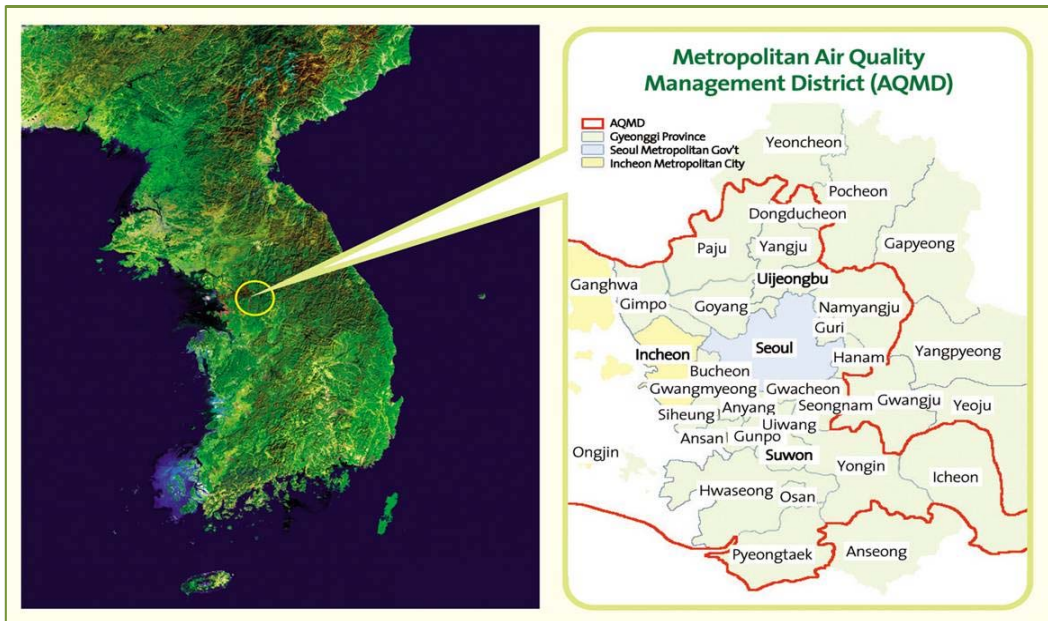


Fig. 1. The modeling domain, the Seoul metropolitan air quality management district(MOE, 2005).

결과 산출은 물론 정책의 정량적 효과 분석도 가능하다. 또한 가장 기본적인 오존 전구물질과 오존 생성에 대한 명확한 상관성을 도출할 수 있고 이는 3차원 모델 입력자료의 한계 극복을 위한 자료로 활용 가능하다 (Park and Kim, 2002; Lee et al., 2011).

Lee et al. (2011)은 OZIPR을 사용하여 CAPSS 배출량과 여러 측정 자료를 사용하여 수도권 26개 지방자치단체를 대상으로 오존 농도 특성을 연구하였다. 그 결과 지역별로 NOx와 VOCs의 배출량 차이 및 비율에 따라 상이한 오존 특성 및 최고 오존 농도를 보였다. 인천시 섬 지역을 제외하고 서울시와 인천시 모두 VOCs 제한으로 판단할 수 있었고, 경기도의 경우 12지역은 VOCs 제한, 12지역은 VOCs 제한과 NOx 제한의 중간 상태인 지역으로 나타났다. 여기서 VOCs 제한이란 한 지역에서 NOx의 배출이 감소하였을 때 그 지역의 최고 오존 농도가 증가되는 현상이고 VOCs 제한과 NOx 제한의 중간 상태라는 의미는 한 지역의 VOCs 배출저감과 NOx의 배출저감이 모두 그 지역의 최고 오존 농도를 감소할 수 있는 현상이다. 거의 모든 모델 결과 값은 측정 값보다 낮게 예측되었다.

수도권 지역의 오존 저감을 위해서는 지방자치단체별로 각 지역의 특성을 최대한 반영하여 NOx와 VOCs의 배출량을 제어해야 하는데, 먼저 선행되어야 하는 것은 모델결과의 신뢰성을 분석하여야 하는 것이다. 모델결과의 유효성과 타당성을 갖고 한계점들에 대한 검토를 진행하였다. 그러나 사용한 배출량이나, 측정 자료들도 그 자체로도 오차를 포함하고 있기 때문에, 이들을 사용한 모델 결과에도 오차가 있을 것이다. 따라서 이러한 입력자료의 오차가 어느 정도 결과에 영향을 미치는지를 파악하는 것이 모델 연구에서 중요한 부분이다. 또한 Lee et al. (2011)의 연구는 모델링 기간이 1개월로 제한되어 있어, 고농도 오존 발생 기간 전체의 추이를 파악하기 힘들다. 따라서 일부 측정소에서 보다 장기간의 모델연구를 수행함으로써, 오존 농도 추이를 파악할 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 1차원 모델인 OZIPR을 이용하여 국지적 규모에서, 지역별 배출량 차이에 근거를 두고 수도권의 지방자치단체별 오존 특성을 알아보고 모델결과의 불확실성을 감안하기 위해 다섯 지

역을 선정하여 중요한 변수인 질소산화물과 휘발성 유기화합물 초기농도 변화에 따른 민감도 분석을 진행한 것이며 그 중수원지역의 월별 오존 최고농도 결과를 관찰하고, 일반적인제한점을 분석하며 모델결과의 신뢰성 검토를 진행하는 것이다.

2. 연구방법

2.1 연구 지역과 시기

연구지역은 서울시 전역, 용진군에서 영흥면만을 포함한 인천시, 경기도 24개지방자치단체이다. 경기도의 경우 지방자치단체별로, 서울시와 인천시의 경우는 행정구역의 분류 방법에 따라 각각 4개 지역으로 나누었다. 본 연구는 기본적으로 2000년 6월을 대상으로 하였다.

서울시 동남부 (SE), 인천 서부 (W), 평택, 수원, 양주 등 5개 지방자치단체의 민감도 분석을 수행하고 결과의 변화와 신뢰성검토를 하였다. 그 중 월별 오존 농도추이를 관찰하는데 수원시를 선정하게 되었고 4월-9월의 변화양상을 살펴보았다. 자세한 내용은 Lee et al. (2011)에 제시하였다.

2.2 모델

미국 환경보호청에서 제공하는 OZIPR은 미국 대기환경기준을 만족시키기 위한 오존 저감정책에 이용된 EKMA(Empirical Kinetics Modeling Approach)를 기초로 하는 프로그램이다. 다양한 기상조건과 배출, 복잡한 화학 메커니즘을 이용하면서도 수학적 계산이 간단하여 다루기 쉬운 상자모델이며, 하루 단위로 모델링을 하기 때문에 장거리 이동 영향을 살펴보기에는 적합하지 않으나 복잡한 대기 화학 반응의 영향을 살펴보기에는 유용하다. OZIPR은 지표에서 혼합층까지의 공기 기둥은 바람을 따라 이동하며 수평적으로는 확장되지 않는다고 가정하는데 본 연구에서는 지역별 모델링을 위해 바람에 의한 이동을 고려하지 않았다. 오염물질의 배출은 지표에서 발생하며 광화학 반응이 일어나는 낮동안 역전층이 높아지면서 상층의 공기가 유입되어 공기 기둥 내에서 혼합되는 것으로 보고 있다. Fig. 2는 OZIPR의 원리를 표현한 모식도이다.

OZIPR의 입력 자료는 NOx, VOCs, CO의 초기농

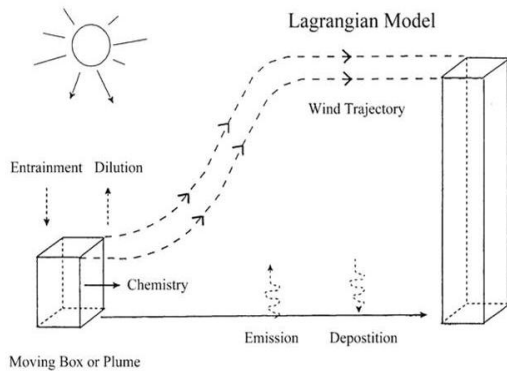


Fig. 2. The schematic diagram of OZIPR(Gery and Corouse, 2002).

도 및 상공과 지표 수송농도, 반응 VOCs 분율과 NO₂/NO_x 비, 기상자료, 시간별 오염물질 배출량이다.

1990년대 이후 대기질 모델에서 주로 이용되는 광화학반응 메커니즘은 CB-IV(Carbon Bond IV mechanism), SAPRC-97(Statewide Air Pollution Research Center mechanism revised in 1999), RADM2 (Regional Acid Deposition Model mechanism-Version 2)이다. 이들 메커니즘의 차이는 축약과정에 있는데 본 연구에서는 탄소 결합구조에 따라 종을 구분하는 CB-IV를 사용하였다.

OZIPR의 경계조건으로는 반응 VOCs 분율, 반응 NO₂/NO_x 비, 상공과 지표의 수송농도와 물질들의 침적속도가 입력된다. 반응 VOCs 분율은 경기개발 연구원의 2000년도 수도권 지역의 CBIV 화학종에 따른 배출량을 이용하여 계산하였고, 배출량에 근거한 결과값을 얻기 위해 초기분율, 상공분율, 지표수송 분율을 동일하게 적용하였다. 반응 NO₂/NO_x 배출 비의 경우 NO 90%, NO₂ 10%로 배출된다고 가정하여 0.1로 하였다(Finlayson-Pitts and Pitts, 1999). 수송농도는 지표수송은 없는 것으로 하였으며 상공에서 수송되는 오존 농도 및 VOCs, NO_x, CO의 농도는 Hong et al.(2005)이 제시한 항공관측 데이터를 이용하여 산출한 값을 사용하였다. 침적속도의 경우 OZIPR에 제시된 기본값을 그대로 적용하였다. 모델링 시간은 오전 8시부터 오후 8시까지로 총 12시간으로 하였으며, 수도권의 위치는 북위 37.57°, 서경 233.03°로 입력하였다.

기상자료로서 혼합고와기온, 기압, 상대습도를 입력하였다. 혼합고 자료의 경우 초기 혼합고와 일 최대 혼합고를 입력하도록 되어 있으며 각각 나타나는 시간이 함께 입력된다. 초기 혼합고는 혼합고의 변화 정도를 크게 하고자 오전 8시에 200 m로 입력하였으며, 최대 값은 Choi and Baek(1998)이 분석한 오산지역의 월별 혼합고를 사용하였다. 최대 혼합고가 나타나는 시간은 오후 3시로 하였다. 기온, 기압, 상대습도는 모두 기상청 기상월보(KMA, 2000) 자료를 이용하였으며 기온의 경우 월 최고 기온을, 기압과 상대습도는 월 평균값을 입력하였다.

VOCs의 초기농도는 Na and Kim (2001)가 제시한 측정치를 사용하였고, NO_x와 CO의 초기농도는 환경부 대기환경 월보(MOE, 2000)를 이용하였다. VOCs는 해당 월에 대한 값을 지방자치단체별로 동일하게 적용하였으며, NO_x와 CO는 서울과 인천은 각각 4지역에 속하는 측정소 값을 평균하여 입력하였고, 측정값이 없는 경기도 지방자치단체의 경우 경기 평균 값을 사용하였다. 앞에서 제시한 모델결과를 기본사례로 정의하고, 입력자료를 변화시켜가면서 민감도분석을 수행하였다.

3. 연구결과

3.1 VOCs 초기농도 증감

5개 지역을 대상으로 VOCs 초기농도를 변화시키면서, 최고 오존 농도 예측 값의 변화를 Tabd 1에 정리하였다. VOCs 초기농도의 변화는 50% 증가, 50% 감소, 100% 감소로 하여 분석하였다. 5지역 모두가 VOCs 초기농도를 감소시켰을 때 오존 최고 농도가 감소하고 VOCs 초기농도를 증가시켰을 때 오존 최고 농도 또한 증가하는 즉, 오존 최고 농도가 VOCs 초기농도 값과 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 그러나 지역마다 오존 최고 농도의 증감 정도는 각각 다르게 나타났으며, VOCs 초기농도를 50% 감소시켰을 때 평택시가 가장 큰 오존 농도 저감효과(26% 감소)를 보였고, 양주군은 오존 농도 5%의 저감을 보여 5지역 중 최소 저감율을 보였다. VOCs 초기농도 50% 감소에 따라 서울 남동부는 15%, 인천 서부는 10%, 수원시는 17%의 오존 농도 저감효과를 확인 할 수 있었다. 한편, VOCs 초기농

Table 1. The variation of the maximum 1-hour ozone concentrations with the increase and decrease of initial VOCs concentrations.

Area	Seoul-SE	Incheon-W	Suwon	Pyeongtaek	Yangju
Ozone Con. (ppb)	60.2	24.6	56.8	80.8	113
50% increased	71.4 (+18%)	27.6 (+12%)	69.3 (+22%)	113 (+40%)	117 (+4%)
100% increased	85.2 (+41%)	31.0 (+26%)	85.1 (+50%)	140 (+73%)	120 (+6%)
50% decreased	51.0 (-15%)	22.1 (-10%)	47.2 (-17%)	59.6 (-26%)	108 (-5%)

도를 50% 증가에서 100% 증가로 증가 정도를 2배 하였을 때 서울 남동부와 인천 서부, 수원시는 2배 이상으로 오존 농도가 증가하였고 평택시와 양주군의 경우 그 이하로 증가하여 VOCs 초기농도의 변화에 따른 오존 변화 또한 지역별로 다르게 나타남이 확인 되었다.

3.2 NOx 초기농도 증감

Table 2는 NOx 초기농도 변화에 따른 모델 예측 값의 민감도 분석 결과를 나타낸 것이다. 변화 정도는 VOCs 초기농도 변화에서와 같이 50% 증가, 50% 감소, 100% 감소로 하여 분석하였다. 5지역 중 4지역이 NOx 초기농도를 증가시켰을 때 오히려 오존 최고 농도는 감소하고, NOx 초기농도를 감소시켰을 때 오존 최고 농도는 증가하는 음의 상관관계를 보였다. 양주시의 경우 유일하게 NOx 초기농도와 오존 최고 농도가 비례하는 결과를 나타내었는데 NOx 초기농도를 50% 증가시키고, 감소시켰을 때 각각 오존 농도 2%, 5%의 증가와 감소를 나타내어 그 변화 정도가 작았으며 NOx 초기농도를 100% 증가시

켰을 경우에는 타 지역과 동일하게 오존 농도가 감소하는 결과를 보였다. 감소 정도는 NOx 초기농도 50%를 감소시켰을 때와 같은 5% 감소를 보였다. NOx 초기농도의 변화에 따른 오존 변화도 역시 지역마다 상이하게 나타났으며 가장 민감한 반응을 보인 지역은 경기도 수원시이다.

위와 같은 민감도 분석 결과 NOx만의 배출량 감소는 오히려 오존 농도를 증가시킬 가능성이 높다는 것이 다시 한번 확인 되었다. 수도권 대기환경관리 기본계획안에 따르면, 2003년 기준 38 ppb의 NO2를 2014년까지 22 ppb로 저감한다는 목표를 수립하고 있으므로, 목표 달성 과정에서 오존 문제가 필수적으로 함께 논의되어야 할 것이다. 배출량 제어를 통한 수도권 지역의 효과적인 오존 농도 저감을 위해서는 전 지역의 VOCs 배출량 저감을 전제로 하고, 지역별 특성을 충분히 반영하여 NOx 배출량 제어기준을 설정하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.3 수원시 월별 오존 농도 변화

경기도 수원시의 경우 2000년도에 경기 지역에서

Table 2. The variation of the maximum 1-hour ozone concentrations with the increase and decrease of initial NOx concentrations.

Area	Seoul-SE	Incheon-W	Suwon	Pyeongtaek	Yangju
Ozone Con. (ppb)	60.2	24.6	56.8	80.8	113
50% increased	49.1 (-18%)	22.8 (-7%)	43.6 (-23%)	64.0 (-21%)	115 (+2%)
100% increased	41.2 (-32%)	21.4 (-13%)	35.5 (-38%)	53.6 (-34%)	107 (-5%)
50% decreased	76.8 (+27%)	26.7 (+8%)	82.0 (+44%)	111 (+37%)	107 (-5%)

가장 많은 오존 경보가 발령된 지방자치단체로 오존월에 해당하는 4월-9월까지 월별로 오존 최고 농도의 변화 양상을 살펴보았다. 면적 121.05km²으로 완만한 경사를 이룬다. 최근 국가통계포털의 2010 인구주택총조사 잠정 집계 결과(KOSIS, 2010)에 따르면 수원시의 인구는 1,065,000명으로 시군구별 최고 인구를 차지하였다.

3.3.1 수원시 오존월별 최고 오존 농도

수원시를 대상으로 OZIPR 프로그램을 이용하여 알아 본 오존월에 따른 최고 오존농도 변화는 Fig. 3과 같다.

4월의 경우 33.6 ppb, 5월 46.6 ppb, 6월 56.8 ppb, 7월 46.6 ppb, 8월과 9월은 각각 61.7 ppb와 37.1 ppb로 나타났다. 월별 오존 농도의 이와 같은 변화 양상은 월별 기온, 기압, 상대 습도 등의 계절적 요소의 변화가 크게 반영된 것으로 여겨지며, 생활 패턴 및 각종 산업체의 운전 패턴 변화에 따른 배출량 자체의 변화 요소도 오존 최고 농도변화에 영향을 준 것으로 생각된다. 8월의 오존 농도가 다른 월보다 높게 예측된 것은 당시 NOx의 농도 측정값이 타 월에 비해 낮았던 것에 기인하고 있는 것으로 판단할 수 있는데 이것은 7월과 9월 NOx 농도를 비교해 본바, 측정 오류가 의심되는 부분이다. 오존월 전 기간에 걸쳐 최고 오존 농도가 환경기준 8시간 평균치 60 ppb보다 낮게 예측되었다 이것은 2000년 당시 오

존 농도 100ppb 이상을 기록하여 경기지역에서 가장 많은 오존 경보가 발령되었던 지역이라는 것과는 대조적인 결과이다. 그 원인을 생각해 보면 배출량 산정을 잘못 되었을 가능성이 있고 자체 배출량보다 장거리 이동이나 인근 지역간 이동에 의한 오염물질 상승이 큰 영향을 미칠 가능성도 있으며 기상, 기후적인 영향이 컸 던 것으로 생각할 수도 있고 OZIPR 결과에 영향을 미치는 많은 측정 자료들의 오류도 오차의 원인으로 고려 되어질 수 있다. 수원시 오존의 변화양상이 월마다 각각 다르게 나타나고 있으나, 4월에서 9월까지 모두 VOCs 제한으로 나타나 수원시 역시 전형적인 도시형 대기 상태를 알 수 있었다. 이 결과만을 보았을 때 수원시의 오존 저감 대책은 VOCs를 감소시키면서 NOx의 농도를 증가시키는 것이 효과적이라고 할 수 있지만 실측 값과의 차이에서 예상 원인이기도 하였듯 자연적인 VOCs의 배출이 많을 수 있기 때문에 이때에는 NOx의 제어가 오존 저감 대책으로 사용될 수밖에 없을 것이다. NOx를 제어할 때 특히 주의할 점은 4월과 9월을 제외한 다른 월의 경우 작은 양의 NOx 농도 변화에도 오존 농도가 급격히 상승할 수 있다는 것이다. 반대로 Park and Kim(2002) 가 서울시에서의 최적 오존 저감대책을 수립하면서 대도시의 경우 인위적인 VOCs의 배출량이 훨씬 더 중요하게 작용한다고 가정하였듯이 수원시에도 그 가정을 적용한다면 자체적으로도 위해성을 가지는 VOCs의

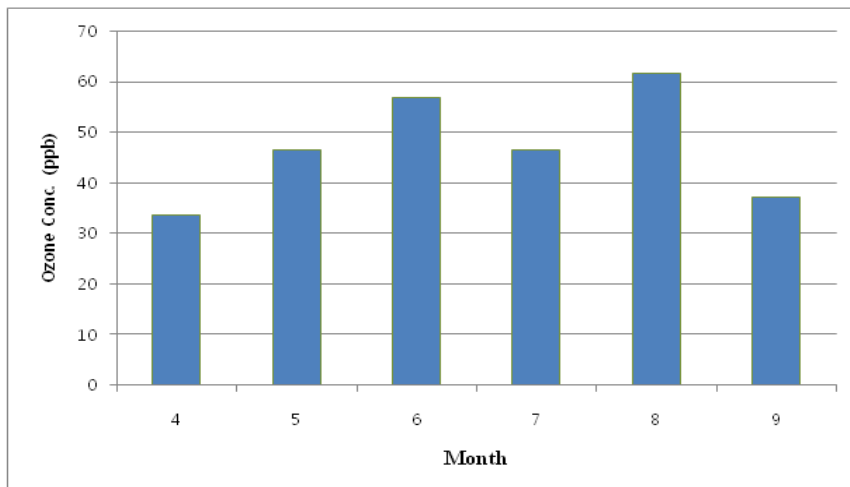


Fig. 3. Monthly variation of the maximum 1-hour ozone concentrations in Suwon.

배출량을 줄이는 것이 효과적이고, 대기오염 전반에 관해서도 중요한 문제라고 볼 수 있다. 또한 그들이 주장 하였던 VOCs 저감에 초점을 둔 오존저감 정책에는 VOCs 배출량에 대한 믿을 만한 예측이나 측정 결과가 우선적으로 갖추어져야 할 것이다.

3.4 결과의 유효성

수도권 오존 저감을 위해서는 지방자치단체별로 각 지역의 특성을 최대한 반영하여 NOx와 VOCs의 배출량을 제어해야 한다는 본 연구의 결과는 장거리 이동 및 지역간 이동에 대한 배제, 입력자료의 한계, 측정 값과의 오차라는 논쟁의 여지가 있는 제한 요소들을 포함하고 있다. 따라서 연구 결과가 유효성과 타당성을 갖고, 실제 수도권 오존정책의 기본 개념으로까지 발전하려면 각 한계점들에 대한 검토는 필수적이다.

3.4.1 장거리 이동

편서풍에 기인한 중국으로부터의 대기오염물질 장거리 이동에 대한 관심은 수도권지역의 대기 환경은 물론 국가적인 차원에서도 높아지고 있는 상황이며 자연히 오존 전구물질인 NOx와 VOCs의 수도권 지역으로의 장거리 이동이 거론 될 수 있다. 그러나 실제 측정 자료에 근거하면 NOx의 경우 1997년 강화 석모도의 월평균 NO₂ 농도가 6.90 ppb 인 것으로 나타나 있으며(NIER, 1999), Lee et al. (2002)이 황해 직선 항로상 대기오염물질을 측정 한 결과에서는 2002년 5월과 6월 모두 대부분의 시료에서 NOx의 농도가 10 ppb 이하로 검출, 평균 5.58 ppb 라고 하여 그 농도가 대기환경기준인 연평균 50 ppb 이하(MOE, 2001)에 비해 매우 낮음을 확인 할 수 있다. 더욱이 위에서 확인한 한반도 서쪽의 NOx 농도는 수도권 대기환경개선 목표인 NO₂농도 22 ppb에 절반 수준의 농도밖에 되지 않는다. 이러한 결과는 VOCs 또한 마찬가지로 지역 배경농도지역 장거리 이동 오염물질 집중조사에 의하면 강화도의 2001년 여름철 총 VOCs 평균 농도가 9.67 ppb인 것으로 기록되어 있고(NIER, 2002), Kim et al.(2000)이 작성한 선박을 이용한 1999년 황해에서의 VOCs 측정 자료에는 황해상의 VOCs 농도가 대부분 8 ppb 이하로 나타나 있다. 이처럼 NOx와 VOCs의 황해상 실제농도가 매우 낮아 장거리 이동을 배제한 본 연

구의 결과 값에 크게 영향을 끼치지 않을 것으로 판단된다. 매우 낮은 농도지만 NOx와 VOCs의 장거리 이동과 오존 자체의 장거리 이동을 고려해야 한다면 OZIPR 입력 자료 중 경계조건의 상공 수송농도를 조절하는 것도 가능 하지만, 민감도 분석의 경험상 이 역시 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

3.4.2 인근 지역간 이동

위에서 언급한 장거리 이동을 비롯하여 인근 지역간의 대기오염물질 이동은 기상, 기후 현상에 수반되는 것으로서 정책적인 제어가 사실상 불가능하다. 더구나 지구적인 규모의 기상현상에 의한 장거리 이동과 달리 지역간 이동은 지형이나 토지 이용도 등의 보다 많은 변수들이 작용하는 국지풍에 의해 이루어지므로 훨씬 복잡한 양상으로 나타난다. 오존은 배경농도와 기상의 영향을 매우 크게 받기 때문에 수도권 정도의 규모에서 지역적 상호 영향 정도는 크게 나지 않을 것으로 짐작해 볼 수 있다는 견해도 존재하며(GRI, 2004), Ghim and Oh(1999)는 많은 연구들이 편서풍의 영향 아래 서쪽으로부터 오염물질이 이동하여 서울 동부에서 오존 농도가 상승할 수 있음을 이야기 하고 있으나 구체적으로 입증된 사실은 오히려 많지 않다고 하며 인근 지역간 오염물질의 연구의 어려움을 표현한 바 있다. 한편, GRI(2004)에서 2000년과 2002년 고농도 오존이 발생한 경우에 대해 수도권 대기질의 지역간 영향 분석을 하여 오존과 NOx 모두 인근 지역으로부터 오염물질이 이동되어 미치는 영향이 매우 크다는 결론을 내렸다. 그러나 연구 대상범위에 근거해 보면 그 결과는 평균적인 의미의 지역간 상호영향 정도를 분석하지 못하고 다만 고농도 발생시의 상호 영향 정도를 분석한 결과일 뿐이며 배출량의 차이에 따라 대기질 모델링 결과 값에 큰 변화를 줄 수 있으므로 정량적으로 일반화가 가능한 결과의 도출이라 하기는 어렵다. 수도권내에서 오존 자체의 이동을 제외한 NOx와 VOCs등의 오존 생성 전구물질의 지역간 이동은 그 시간적인 불일치로 지역 오존 농도 상승에 기여하는 정도가 작을 것으로도 판단할 수 있으며, 오존의 이동은 배출량 제어를 통해 이동량 자체를 저감시키는 것이 최상책일 것이다.

NOx와 VOCs 및 오존 농도 측정이 정확히 이루어진다고 가정 한다면, 본 연구와 같이 지방자치단체

의 배출량만을 고려하는 것이 오히려 해당 지역의 대기오염물질 지역간 이동 여부를 알 수 있게 해준다. 즉, 측정된 값과 모델의 예측 결과 값과의 오차 정도에 따라 지역간 이동에 의해 오염물질 저감 효과가 나타나는 지역과 물질의 농도가 증가하는 지역으로 구분할 수 있게 되어 이러한 결과를 각 지방자치단체의 배출량 제어 기준을 결정할 때 반영할 수 있다.

3.4.3 입력자료의 한계 및 측정 값과의 오차

입력자료의 한계점 중 가장 문제가 되는 것은 배출량 산정방식 차이, 대기오염물질측정에 대한 정보의 부족 및 불확실성이며 이것은 측정 값과의 오차와 연관지어 생각해 볼 수 있다. 우선 본 연구에서 제시된 입력자료의 한계점들과 그 대책을 살펴보면, 배출량의 시간 가중치 적용에서 지적하였듯 시간별 배출량의 산정과 그 정보의 활용의 용이성을 도모해야 할 필요성이 있으며, 월별, 지역별로 동일한 값을 입력하였던 상공 수송 농도는 측정 빈도수 조절 등을 통해 월별, 적어도 계절별 자료는 관측되어야 할 것으로 여겨진다. 가장 기초적인 기상자료라고 할 수 있는 온도와 습도는 지역을 세분화하여 자료 구축이 가능할 것으로 보이고 경기도 '1 지방자치단체당 1 측정망' 운영은 수도권 오존 저감 대책 마련을 위한 연구를 위해 반드시 추진되어야 할 사항이다.

배출량을 비롯한 측정자료의 한계는 본 연구에만 적용되는 한계요소가 결코 아니며, 비단 오존 문제에 한 영향을 미치는 것도 아니다. Kim and Ghim (2001)은 이와 관련하여 어떠한 모델도 완벽할 수 없고, 입력자료 또한 언제나 제한적 이라고까지 했을 정도이다. 배출량 산정방식의 재검토와 측정소 설치 확대 및 측정 빈도수 조절과 같은 대안들을 실천하는 것은 대기환경 개선과 대기정보의 질적, 양적 발전을 위한 연구들과 함께 병행되어야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

민감도 분석결과 NOx와 VOCs 초기농도에 따라 결과 값이 민감하게 변화하였다. 수도권 지역의 효과적인 오존 농도 저감을 위해서는 NOx만의 배출량 감소는 오히려 오존농도를 증가시킬 가능성이 높음

이 확인되었고, 따라서 배출량 제어를 통해 오존 저감 대책을 수립할 때는 전 지역의 VOCs 배출량 저감을 전제로 하고, 지역별 특성을 충분히 반영한 NOx 제어 기준을 설정하는 것이 바람직하다. 현재의 NO₂/NOx의 비가 점차 높아지고 있다. 이러한 추세를 모델예측에 반영하면 향후에 수치상 오차가 보다 적은 결과를 도출해 낼 수 있을 것이다.

수원시 오존월별 오존 농도 변화는 특정한 경향 없이 각 월마다 다른 양상을 보였다. 이것은 기온이나 상대습도 등의 계절적 요소와 함께 생활 패턴의 변화가 영향을 준 것으로 생각된다. 대체로 낮은 최고 오존 농도가 예측된 것은 배출량 자료 산정의 오류, 배출량 이외의 요인 영향, OZIPR 입력자료의 한계 등을 원인으로 생각할 수 있다.

서론에서부터 강조했지만 수도권지역 오존 농도의 정책적인 제어는 배출량에 근거할 수 밖에 없다. 연구 결과의 제한 요소에도 불구하고, 수도권 오존 저감을 위해서는 지방자치단체별로 각 지역의 특성을 최대한 반영하여 NOx와 VOCs의 배출량을 제어해야 하고 NOx배출만 감소하는 것은 오존 농도를 증가시킬 가능성이 높다는 결과의 유효성이 증명되었다. 본 연구의 결과가 의미 있는 것은 할 수 있는 범위에서 실행 가능한 안이며, 그 결과의 확인 또한 가능하기 때문이다. 배출량 산정방식의 재검토와 측정소 설치 확대 및 측정 빈도수 조절 등이 이루어지면 수도권 오존 저감을 위한 보다 정확한 지방자치단체별 NOx와 VOCs 배출 제어량이 결정될 수 있을 것이고, 그 결과에 기반을 둔 정책 집행은 수도권 지역의 오존 문제 해결로 연결될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(RACS_2010-3006)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

Choi, J.S., Baek, S.O. (1998) Estimation of daily max-

- imum mixing height in Pohang, Osan, and Gwangju: Analyze 10 year data from 1983~1992, Korean Journal of Atmospheric Environment 14(4), 379-385.
- Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. N. (1999) Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere Theory, Experiments, and Applications, New York, Academic Press, pp 101.
- Gery, M.W., R.R. Corouse (2002) User's Guide for Executing OZIPR, Atmospheric Research Associates, Inc., Boston, US EPA.
- GRI (Gyeonggi Research Institute) Policy Research (2004) Annual air pollutants emission in the Seoul Metropolitan Area in 2002.
- Ghim, Y.S., Oh, H.S. (1999) Studies of High-Ozone Episodes in the Greater Seoul Area Between 1990 and 1997, Korean Journal of Atmospheric Environment, 15(3), 267-280.
- Hong, Y.D., Lee, S.U., Han, J.S., Lee, S.J., Kim, S.D., Kim, Y.S. (2005) A study on the reduction of photochemical ozone concentration using OZIPR in Seoul area, Korean Journal of Environmental Impact Assessment 14, 117-126.
- He, J. S., Kim, T.H., Kim, D.S. (1999) A Comparative Study on Ambient Air Quality Standard for Ozone, Korean Journal of Atmospheric Environment, 15(2), 159-173.
- Kim, Y.P., Lee, S.B., Na, G.S., Jin, H.C., Yoon, Y.S., Bae, G.N., and Moon, G.Z. (2000) Shipboard Measurement Data of Volatile Organic Compounds in the Atmosphere Over the Yellow Sea in 1999, Korean Journal of Atmospheric Environment 16(5), 553-560
- Kim, J.Y., Ghim, Y.S. (2001) Modeling the 1997 High-Ozone Episode in the Greater Seoul Area with Densely-Distributed Meteorological Observations, 17(1), 1-17.
- KMA (Korea Meteorological Administration) (2000). Monthly report (June) of meteorology, Seoul, Korea.
- KOSIS (Korean Statistical Information Service) (2010). Result of Population and housing census, Daejeon, Korea
- Lee, S.B., Bae, G.N., Kim, Y.P., Jin, H.C., Yoon, Y.S., Moon, G.Z. (2002) Aerosol Characteristics at Tokchok Island in the Yellow Sea, Korean Journal of Atmospheric Environment, 18(4), 305-316.
- Lee, S.H., Jin, L., Kim, Y.P. (2011) A study on the ozone control strategy using the OZIPR in the Seoul Metropolitan Area, Asian Journal of Atmospheric Environment, submitted.
- MOE (Ministry of Environment, Korea) (2006).Annual report of atmospheric environment, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon, Korea.
- MOE (Ministry of Environment, Korea) (2005).Annual report of atmospheric environment in 2004, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon, Korea.
- MOE (Ministry of Environment, Korea) (2001).Annual report of atmospheric environment in 2000, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon, Korea.
- MOE (Ministry of Environment, Korea) (2000) Monthly report (June) of atmospheric environment, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Incheon, Korea.
- Na, K., Kim, Y.P. (2001) Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea, Atmospheric Environment 35, 2603-2614.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2002) Research of long range transport pollutants in background concentration area II - Pollutant monitor of Kanghwa, Tae'an, Geoje, Goseong, Gosan- Final report.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (1999) Investigation of Long Range Transport of Atmospheric Pollution in Northeast Asia and Cooperating Plan of Environmental preserva-

- tion (IV)- Long Range Transporting Event of Atmospheric pollutants and Monitoring Net Operation-, BSG0563-6510-6, Incheon, Korea.
- Park, J.Y., Kim, Y.P. (2002) On the optimum ozone control strategy in Seoul: Case studies using OZIPR, Korean Journal of Atmospheric Environment 18, 427-433.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) Atmospheric Chemistry and Physics-From Air Pollution to Climate Change, 2nd Ed., John wiley& sons Press Inc., USA., pp 52-53& 236-238.