

오존최대농도지표를 이용한 오존단기예측모형 개발 Development of a Short-term Model for Ozone Using OPI

전 의 찬 · 김 정 옥¹⁾

동신대학교 환경공학과, ¹⁾서울대학교 환경대학원

(1998년 11월 11일 접수, 1999년 11월 11일 채택)

Eui Chan Jeon and Jung Wk Kim¹⁾

Department of Environmental Engineering, Dongshin University

¹⁾Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

(Received 11 November 1998, accepted 11 November 1999)

Abstract

We would like to develop a short-term model to predict the time-related concentration of ozone whose reaction mechanism is complex. The paper targets Seoul where an ozone alert system has recently been employed.

In order to develop a short-term prediction model for ozone, we suggested the Ozone Peak Indicator (OPI), an equivalent of the potential daily maximum ozone concentration, with precursors being the only limiting factor, and

we calculated the Ozone Peak Indicator as $OPI = \left\{ \frac{(O_3)_{max} \cdot (H_{eff})_{max}}{(Rad)_{max}} \right\}$ to preclude the influence of mixing height

and solar radiation on the daily maximum ozone concentration. The OPI on the day of the prediction is to be calculated by using the relation between OPI and the initial value of precursors. The basic prediction formula for

time-related ozone concentration was established as $O_3(t) = \left\{ \frac{(OPI) \cdot Rad(t-2)}{H_{eff}} \right\}$, using the OPI, solar radiation

two hours before prediction and mixing height.

We developed, along with the basic formula for predicting photochemical oxidants, "SEOM" (Seoul Empirical Oxidants Model), a Fortran program that helps predict solar radiation and mixing height needed in the prediction of ozone pollution. When this model was applied to Seoul and an analysis of the correlation between the observed and the predicted ozone concentrations was made through SEOM, there appeared a very high correlation, with a coefficient of 0.815.

SEOM can be described as a short-term prediction model for ozone concentration in large cities that takes into account the initial values of precursors, and changes in solar radiation and mixing height. SEOM can reflect the local characteristics of a particular and region can yield relatively good prediction results by a simple data input process.

Key words : ozone, short-term model, ozone peak indicator, empirical oxidant model, Seoul

1. 서 론

최근까지 우리나라의 주요 관리대상 오염물질은 황산화물(SOx)과 분진(TSP) 등 이었으며, 대부분의 연구와 정책개발이 이들 물질을 대상으로 이루어진 바 있다. 그러나, 최근 연료전환 등으로 황산화물 등은 극적으로 감소하고 있는 반면, 자동차의 급격한 증가로 질소산화물과 휘발성유기화합물 등 원인물질이 증가하고 있으므로, 이들의 대기 중 광화학반응으로 발생하는 광화학산화제의 관리대책에 대한 중요성이 대두되고 있다. 1997년 말 현재 우리나라의 자동차 등록대수는 1,040만대를 넘어섰는데, 이것은 1980년의 자동차 등록대수의 약 20배를 초과하는 것이다.

정부에서도 광화학스모그 현상과 오존에 대한 중요성을 인식하여, 1983년 7월 원인물질인 질소산화물 및 탄화수소와 광화학산화제인 오존 등에 대한 환경기준을 추가하고, 이를 감시하기 위하여 1997년 12월말 현재 전국 47개 도시에 117개소의 대기오염자동측정소를 운영하고 있다. 또, 서울시에서는 광화학산화제의 대표적인 물질인 오존의 대기중 농도가 일정 기준 이상으로 높게 나타날 경우, 시민들에게 신속하게 경보를 발령하여 인체 및 생활환경상의 피해를 최소화하기 위하여, 1995년 7월 1일부터 '오존경보제'를 도입한 것을 시작으로, 1997년 현재 5개 광역시 및 수도권지역에 확대 실시하고 있다.

이러한 대기오염경보제를 효율적으로 운영하는데 필수적인 단기에측모형의 수립이 오존의 경우에는 대단히 어렵다. 왜냐하면, 다른 대기오염물질들은 대기 중에서의 화학적 변화를 무시할 수 있으므로, 바람에 의한 이류(移流)와 난류 확산만을 고려하여 예측모형을 수립하면 되지만, 오존의 경우에는 60개가 넘는 반응물질간의 160개 이상의 광화학반응을 고려하여야 하기 때문이다.

그동안 우리나라에서 수행된 오존 예측모형과 관련된 연구들을 살펴보면, 오염도 현황 및 오존과 영향인자들 사이의 관계 분석(윤마병, 1995; 전병일, 1995; 정 용, 1986), 다중회귀모형과 판별분석모형 등 통계모형의 개발(이기원, 1989; 김화일, 1987; 박옥현, 1984), 그리고, 수치모형의 민감도 분석(한진

석, 1995) 등이 대부분이다. 그러나, 개발된 통계모형들은 오존 농도에 영향을 미치는 인자들에 대한 설명이 불충분하고, 광화학반응에 따른 시간 지연 효과를 고려하지 않고 있거나, 미래의 오염도 예측 시 필요한 인자를 추정할 수 없어서, 모형의 예측 성능이 떨어지는 결함이 있다. 또, 외국의 경우도, 미국을 중심으로 1970년대 초부터 많은 수치모형들이 개발되어 사용되고 있으며, 대표적인 모형에는 미국 환경청에서 개발한 PBM(Schere and Demerjian, 1984)과 ROM(Chang *et al.*, 1987), System Application, Inc에서 개발한 UAM(Morris and Myers, 1990), 미국대기연구센터에서 개발한 RADM(Chang, 1987), 그리고 CALTECH에서 개발한 CIT모형(McRae and Seinfeld, 1983) 등이 있다. 그러나, 이러한 모형들은 현실적으로 우리나라에서 작성하기 어려운 상세한 입력자료를 필요로 하고 있으므로, 현재까지 오존경보제에 제대로 활용되지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 예측모형의 예측 성능을 높이고, 현실적으로 입력자료를 확보할 수 있는 모형을 개발하기 위하여, 대기오염자동측정망의 자료로서 추정할 수 있는 오존최고농도지표(OPI; Ozone Peak Indicator)를 개발하여 오존 단기에측모형을 개발하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구는 인구 1,000만명이 넘는 우리나라의 최대 도시인 서울을 대상으로 하였는데, 서울은 1997년 말 현재 자동차 등록대수가 220만대를 넘어섰으며, 우리나라 전체 차량의 30%에 가까운 자동차가 운행되고 있는 곳이다.

본 연구에서 개발한 오존최대농도지표(OPI)는 혼합고와 일사량의 변화가 없는 가상적인 조건에서, 즉, 원인물질만이 제한인자로 작용하는 조건에서, 원인물질의 양 및 그 비에 따라 발생할 수 있는 예측일의 오존 최대 농도이다. OPI는 일 최대 오존 농도를 최대 일사량으로 나누어주고, 최대 유효혼합고를 곱해주어 산출하였다. 그리고, 3차원 적합 기법인 표면 적합 기법을 이용하여 OPI와 원인물질들의 오전 6~9시 사이의 평균값인 질소산화물 초기치 및 탄화수소 초기치 사이의 관계를 추정하였다. 이러한 과정을 통하여 원인물질 초기치를 확보할

경우, 그날의 OPI를 산출할 수 있으며, 예측일의 시간별 오존 농도는 그날의 오존 최대농도 지표를 기준으로 혼합고와 일사량의 영향을 고려하여 산정하였다(전의찬, 1997). 오존 농도 예측에 사용되는 시간별 일사량은 태양상수를 기준으로 여러 가지 감쇄 요인을 고려하여 예측하였으며, 시간별 혼합고는 안정도를 고려하여 추정하였다.

오존 특성을 분석하기 위한 자료는 환경부 및 서울시에서 운영하고 있는 20개소 대기오염자동측정소의 시간별 측정자료를 이용하였다. 기상자료는 기상청 서울측후소의 일 기상자료와 대기오염자동측정소 관측자료를 이용하였고, 3시간 간격으로 측정된 풍속 및 기온 등은 내삽하여 시간별 측정치로 환산하였다.

이렇게 개발된 예측모형은 검증과 이용에 용이하도록 전산모형으로 작성하고, 대상지역인 서울시에 적용하여, 모형의 예측성능을 평가하였다. 예측모형의 예측성능은 예측치와 1993년도 시간별 오존 농도 측정치 사이의 상관관계 분석과 평균값 분석, 산포도 및 분산도 분석, 그리고 적합성 검정을 통하여 평가하였다. 또, 개발된 예측모형과 다중회귀모형에 의한 예측 결과를 오존 농도 측정치와 상관관계를 분석하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 오존최대농도지표

오존 발생의 원인물질에는 질소산화물과 휘발성 유기화합물이 있으며, 이들의 절대량뿐 아니라, 비에 따라서 일 최대 오존 농도가 결정된다는 것이 여러 연구(전의찬, 1997; Fox, 1984; Whitten, 1980; Haggens-Smit and Fox, 1954)에 의하여 밝혀졌다. EKMA모형에서는 원인물질 자료와 광화학반응모형을 이용하여, 일 최대 오존 농도를 추정하고 있지만, 우리나라의 경우에는 광화학반응모형의 중요한 입력자료인 휘발성유기화합물에 대한 정보(종류별 시간별 농도 등)가 거의 없으므로, 이와 같은 방법을 이용하기 어려운 실정이다. 따라서, 현행 대기오염자동측정망으로부터 정보를 얻을 수 있는 질소산화물과, 휘발성유기화합물의 지표물질 중 하나이며, 비교적 풍부한 측정자료를 확보하고 있는 탄화수소를 이용하여, 원인물질들의 양 및 비에 따른 잠재적인 일

최대 오존 농도를 추정하였는데, 이것이 '오존최대농도지표' 즉, OPI라는 오존 지표이다.

OPI는 원인물질만이 오존의 제한인자로 작용할 경우의 일 최대 오존 농도에 해당하는 값으로, 혼합고와 일사량이 오존 농도에 미치는 영향을 제외하기 위하여 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$OPI = \left\{ \frac{(O_3)_{max} \cdot (H_{eff})_{max}}{(Rad)_{max}} \right\} \quad (1)$$

여기서, $(O_3)_{max}$ 는 일 최대 오존 농도, $(H_{eff})_{max}$ 는 혼합고 예측치중 최대값, 그리고 $(Rad)_{max}$ 는 일 최대 일사량이다.

전의찬(1996)이 분석한 바와 같이 원인물질중 질소산화물은 오전 8~9시에 최대값을 나타내며, 최대값과 최소값의 비가 2에 가까울 정도로 시간별 변화가 크다. 그리고, 탄화수소는 오전 6~8시에 비교적 큰 값을 보이나, 최대값과 최소값의 비가 1.2 정도로서 시간별 변화가 질소산화물에 비하여 매우 작은 편이다. 또, 일산화질소는 7시간의 시차에서, 이산화질소는 5시간의 시차에서 오존과 높은 상관관계를 나타내고 있다. 탄화수소의 경우는 7시간의 시차에서 오존과 높은 상관관계를 나타내고 있다.

먼저, 어느 날의 일 최대 오존 농도와 측정되었거나 이론적으로 계산된 일 최대 혼합고 및 최대 일사량을 기준으로 식 (1)과 같이 일별 OPI값을 산정하고, OPI값과 그날의 질소산화물 및 탄화수소 초기치 사이의 관계를 도출하였다. 그리고, 이러한 OPI값과 원인물질 초기치사이의 관계가 미래에도 적용될 것으로 가정하고 원인물질 초기치에 의하여 예측일의 OPI를 산출토록 하였다. 여기서, 질소산화물 및 탄화수소의 초기치로서, 오존 최대 농도가 나타나는 시각인 오후 3시의 농도와 가장 큰 상관관계를 갖고 있는 7시간 시차를 갖는 오전 7~9시의 농도값들을 사용하였는데, 이 시간이 원인물질들이 최대값을 갖는 시기이다.

NOx 초기농도($NOx_{initial}$) 및 THC 초기농도($THC_{initial}$)에 따라 OPI를 예측할 수 있는 모형을 구성할 때, 이들 두 원인물질들은 그 양 뿐 아니라 비에 따라서도 OPI에 미치는 영향이 달라지므로, 3차원 적합 방법을 이용하여 식 (2)와 같은 OPI 예측모형을 구성하였다. 여기서, 3차원 적합이란, 각각 독립인 두 설명변수(여기서는, 초기 NOx 및 THC

농도값)와 종속변수(여기서는, OPI값) 사이의 관계를 가장 잘 설명하는 함수를 구하여, 설명변수로서 종속변수를 예측하는 방법이다.

$$OPI = \text{SUFFIT}\{(\text{NOx}_{\text{initial}}, \text{THC}_{\text{initial}})\} \quad (2)$$

여기서, $\text{NOx}_{\text{initial}}$ 는 초기 NOx 농도이며, $\text{THC}_{\text{initial}}$ 는 초기 THC 농도이다.

SUFFIT는 3차원 적합함수인데, 먼저 독립적인 두 설명변수의 시계열 자료(초기 NOx 및 THC 의 농도값)를 기준으로 일정한 간격의 동간격 시계열 자료를 작성하고, 그림 1에서 보는 바와 같이 한쌍의 설명변수 시계열 자료에 해당하는 OPI값을 연결할 때 나타나는 표면(Surface)을 가장 잘 설명하는 함수이다. 본 논문에서는 미국 Research Systems사의 IDL (Interactive Data Language) Ver. 4.0을 사용하여, 식 (3)과 같은 형태의 최적 표면 적합함수(surface fitting function)를 구하였다.

$$OPI = \text{SUFFIT}\{(\text{NOx}_{\text{initial}}, \text{THC}_{\text{initial}})\} = \sum C_{j,i} \{ \text{NOx}_{\text{initial}} \}^i \cdot \{ \text{THC}_{\text{initial}} \}^j \quad (3)$$

식 (3)에서 $C_{j,i}$ 는 $\{j, i\}$ 배열로서 주어지는 3차원 적합 함수의 계수인데, 서울지역을 대상으로 산출한

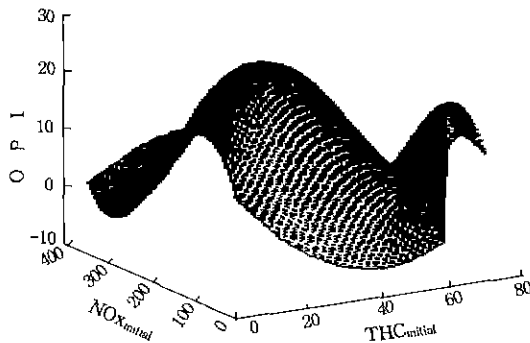


Fig. 1. OPI surface with $\text{NOx}_{\text{initial}}$ and $\text{THC}_{\text{initial}}$.

Table 1. Coefficients of surface fitting function in Seoul.

| $C_{j,i}$ | $j=0$ | $j=1$ | $j=2$ | $j=3$ |
|-----------|-------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $i=0$ | 19.2507 | -0.216703 | 0.000527096 | $-2.17357 \cdot e^{-7}$ |
| $i=1$ | -0.746017 | 0.0544103 | -0.000301837 | $4.51298 \cdot e^{-7}$ |
| $i=2$ | -0.00434176 | -0.00112879 | $7.86991 \cdot e^{-6}$ | $-1.35286 \cdot e^{-8}$ |
| $i=3$ | 0.000177657 | $4.97900 \cdot e^{-6}$ | $-4.94502 \cdot e^{-8}$ | $9.73864 \cdot e^{-11}$ |

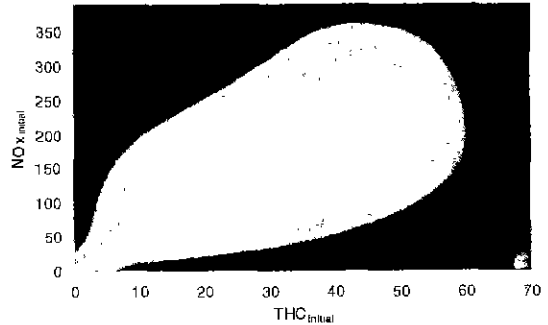


Fig. 2. OPI contour with $\text{NOx}_{\text{initial}}$ and $\text{THC}_{\text{initial}}$.

결과는 표 1과 같으며, 차수가 높아질수록 계수가 급속하게 작아지는 것을 볼 수 있다. 그림 1은 서울지역을 대상으로 NOx 초기농도 및 THC 초기농도와 OPI와의 관계를 3차원 표면 그림으로 나타낸 것이며, 그림 2는 농도의 크기를 색으로 나타낸 것이다.

3.2 예측모형의 기본식

복잡한 오존의 농도 변화를 예측하기 위하여, 오존은 대기라는 광화학 반응로에서 원인물질을 원료로 태양복사를 에너지원으로 하여 발생한다고 가설로부터 출발하였다.

오존이 생성되는 광화학 반응로의 에너지원인 태양 복사는 같은 시각의 오존 농도보다 2시간 후의 오존 농도와 밀접한 관계를 갖고 있음이 밝혀졌다. 또, 일사량만을 고려하여, 오존 농도를 계산하더라도 측정된 오존 농도와 상관계수 0.8에 가까운 높은 상관관계를 갖게 되는 것으로 분석되었다(전의찬, 1996). 따라서, 일사량을 오존 농도와 2시간의 시차를 두고 정비례 관계에 있는 변수로 설정하였다.

혼합고는 반응로의 크기를 결정하는 인자 중의 하나이다. 즉, 같은 조건에서는 혼합고가 커질 경우, 오존 농도가 작아지게 되고, 반대로 혼합고가 작아지면 오존 농도가 커지게 되는 것이다. 전의찬(1996b)은 일사량을 오존 농도와 정비례 관계에 있는 변수로, 혼합고를 반비례 관계에 있는 변수로 설정하고, 오존 농도를 계산한 결과 측정된 오존 농도와 상관계수 0.826의 높은 상관관계가 있으며, 일사량만 고려할 때보다 일사량과 혼합고를 함께 고려할 때, 예측성능이 더 우수한 예측모형을 수립할 수

있음을 밝혔다.

이러한 분석 결과를 중심으로, 시간별 오존 농도를 예측하기 위한 예측모형의 기본식을 식 (4)와 같이 수립하였다. 그리고, 태양 일사량이 제한인자로 작용하는 상기 식에서, 일출과 일몰 시 발생하는 편차를 보정하기 위하여, 일출 시에는 일출 1시간 전의 오존 측정 농도를, 일몰 시에는 하루 전 일몰 1시간 후의 오존 측정 농도를 식 (4)의 결과에 더하도록 하였다.

$$O_3(t) = \left\{ \frac{(OPI) \cdot Rad(t-2)}{H_{eff}} \right\} \quad (4)$$

여기서, OPI는 Ozone Peak Indicator, RAD(t-2)는 예측시간 2시간 전의 일사량, 그리고 H_{eff} 는 혼합고의 영향 정도를 고려한 수정혼합고 $H_{eff} = \left\{ \frac{H_{max}}{1000} \right\}^{0.4}$ 를 의미한다.

3. 3 예측모형의 개발

3. 3. 1 예측모형의 구성

식 (4)와 같은 기본식을 이용하여, 오존의 시간별 농도를 예측할 수 있는 예측모형 SEOM (Seoul Empirical Oxidants Model)을 개발하였다.

SEOM에서는 입력자료 중 원인물질의 농도로는 오전 7~9시의 질소산화물 및 탄화수소 농도를 입력하도록 하였고, 모형내에서 이들 값을 이용하여 초기치를 계산도록 하였다. 최대 오존 농도 지표인 OPI는 원인물질의 초기치를 이용하여, 사용자의 선택에 따라서 3차원 적합함수를 이용하여 산출하거나, 자료 배열에서 직접 읽어들이도록 하였다. 일사량은 외부에서 입력자료로 입력하거나, SEOM 모형 내에서 계산하도록 하였는데, 모형 내에서의 계산 과정은 3. 3. 2항에서 기술하였다. 혼합고는 SEOM 모형 내에서 안정도에 따라서 계산하거나, 외부에서 입력자료로 입력하거나, 또는 예측일의 최소혼합고와 최대혼합고, 그리고 다음날 아침의 최소혼합고 정보를 갖고 있다는 가정하에, PBM (Photochemical Box Model)모형에서 사용하는 특성곡선에 따라 산출할 수 있도록 하였다.

SEOM은 입력자료 부분, 모형 내에서 계산한 변수(일사량, 혼합고 등), 그리고 시간별 오존 농도와

시간별 그래프를 출력하도록 작성하였고, 환경기준 및 경보 발령 기준과 비교하여, 경고 및 오존경보를 발령의 여부를 출력도록 하였다.

SEOM모형의 계산과정 흐름도는 그림 3과 같다.

3. 3. 2 일사량 및 혼합고 예측

예측일의 일사량 자료를 확보하지 못한 경우에도, SEOM을 적용할 수 있도록 하기 위하여, 예측장소의 위치(위도, 경도)와 예측일시, 운량에 따른 일사량을 그림 4와 같이 모형 내에서 예측토록 하였다.

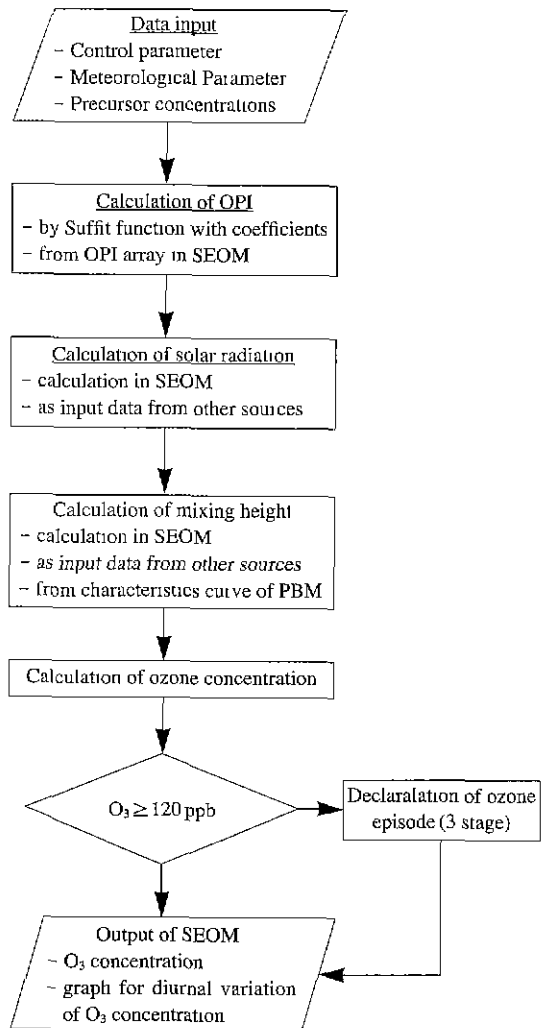


Fig. 3. Flow diagram of SEOM.

수평면에 대한 직접 일사량은, 대기권 내의 공기 분자에 의한 산란, 에어로졸에 의한 산란 및 흡수, 수증기 및 오존에 의한 흡수, 기타 질소, 산소 등에 의한 흡수에 의하여 감쇄를 고려하여 계산토록 하였다. 이때 사용된 태양상수(I_{sc})는 Frohlich와 Wehrli(1981)가 제시한 값을 사용하였다.

혼합고는 안정도에 따라서, 중립 경우에는 Blakkadar와 Tennekes(1968)가 제시한 상사이론(similarity theory)을 이용하여 산정하였으며, 안정일 경우에는, Zilitinkevich(1970)가 제시한 방법에 따라서 계산토록 하였다. 만약 안정상태의 혼합고가 중립상태에서의 혼합고보다 클 경우에는 중립상태의 혼합고로 대체토록 하였다. 대기가 불안정할 때에는, Carson과 Smith(1974)의 혼합고 성장율식을 이용하여 혼합고를 산정하였다.

모형의 평가에는 1993년도 서울지역 대기오염자 동측정망의 오존 측정 농도와 예측모형에 의한 오존 예측 농도를 이용하였다. 그림 5는 계절별 오존 측정 농도와 모형에 의한 예측 농도를 나타낸 것이다. 이 그림들은 SEOM에 의하여 예측 농도를 구할 수 있는 시간(일출 2시간 후부터, 일몰 후 2시간까지)만을 비교한 것이다.

3.4 예측모형의 평가

모형의 평가는 상관관계 분석, 평균값 분석, 산포도 및 분포도 분석을 이용하였다. 상관관계 분석은 두 변수 사이에 일정한 관계가 있는 지를 분석하는 통계 기법의 하나로, 상관계수에 의하여 상관관계의 강약과 관계의 방향을 알 수 있다. 1993년의 자료 중, SEOM에 의하여 예측 가능한 총 1696시간 자료에 대한 오존 예측 농도와 측정 농도의 산점도는 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 오존 측정 농도와 예측 농도는 강한 양의 선형관계(linear relationship)를 갖고 있었으며, 상관계수 0.82, 선형회귀식의 기울기 0.72, y절편 0.012로서 SEOM의 예측 성능은 우수한 것으로 평가되었다.

평균값은 자료 집단의 성격을 하나의 수치로 표현할 수 있는 통계기법으로, 산술평균과 중앙값을 이용하여 평균값을 분석하였다. 표 2는 오존 측정 농도와 SEOM에 의한 예측 농도의 평균값을 분석한 것인데, 산술평균치는 측정 농도가 예측 농도에 비하여 약 5% 정도 높게 나타나고 있고, 중앙값은 예측 농도가 측정 농도에 비하여 약 5% 정도 높게 나타나고 있다. 또, 오존 측정 농도 및 예측 농도의 백분율(percentiles)을 살펴보면, 백분율값 30% 이하의 저농도에서는 측정 농도가 높게 나타났고, 70% 이상 고농도에서는 예측농도가 높게 나타났다.

산포도는 자료의 흩어진 정도를 분석하는 것으로서, 오존 측정 농도와 예측 농도의 산포도를 분석한 결과는 표 3과 같다. 표 3을 살펴보면, 최대값은 예

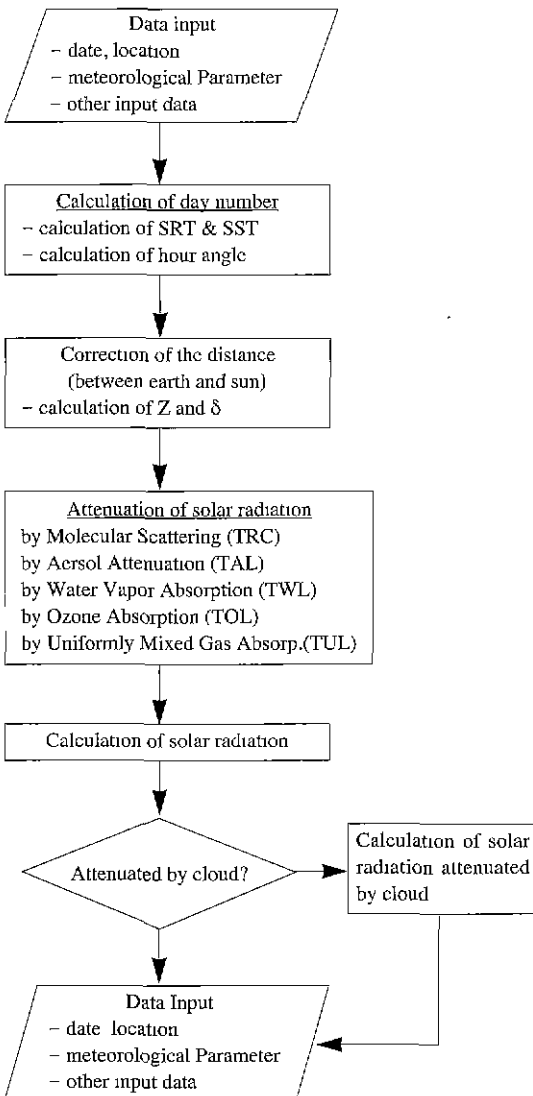
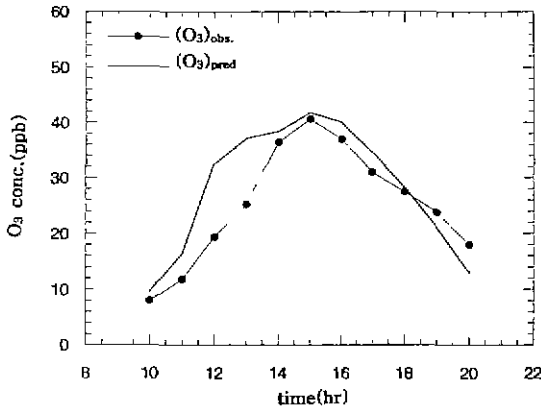
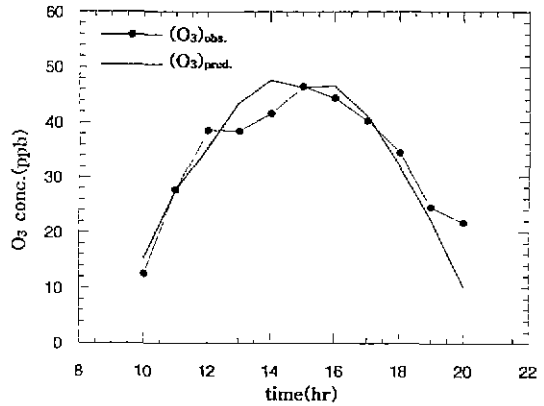


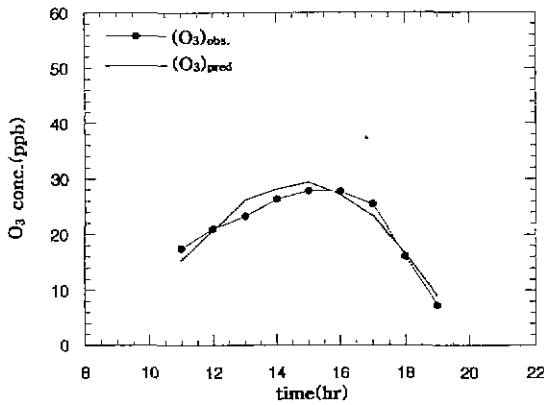
Fig. 4. Flow diagram of subroutine for calculation of solar radiation.



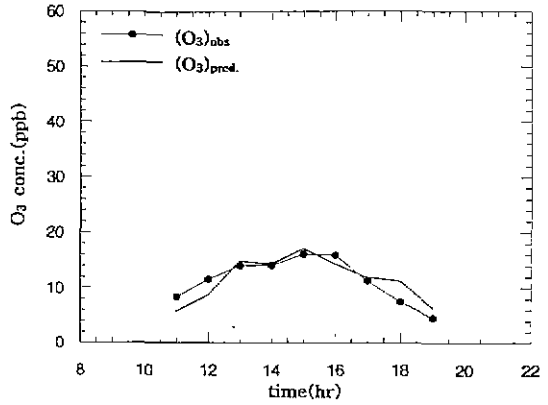
(a) May 18, 1993



(h) Aug 11, 1993



(c) Oct. 6, 1993



(d) Feb 19, 1993

Fig. 5. Comparison of observed and predicted ozone concentrations.

Table 2. Average analysis of observed and predicted ozone concentrations (ppb).

| Concentration | Mean | Median | 10% value | 30% value | 70% value | 90% value |
|-------------------------|-------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Observed concentration | 23.48 | 21.15 | 9.40 | 16.0 | 27.50 | 40.53 |
| Predicted concentration | 22.53 | 20.29 | 6.34 | 13.11 | 28.34 | 42.13 |

Table 3. Variance and standard deviation of observed and predicted ozone concentrations.

| Concentration | Maximum (ppb) | Minimum (ppb) | Variance | Standard deviation |
|-------------------------|---------------|---------------|----------|--------------------|
| Observed concentration | 83.8 | 3.5 | 157.2 | 12.54 |
| Predicted concentration | 86.6 | 0.886 | 202.5 | 14.23 |

측 농도가 측정 농도에 비하여 2.8ppb 컸으며, 최소 값은 측정 농도보다 예측 농도가 2.6ppb 작았는데, 이것은 오존 최대 측정 농도의 3%를 약간 넘는 수준이다. 그리고, 표준편차의 경우에는 예측 농도가 1.69ppb 더 크게 나타났다.

분포도는 왜도와 첨도를 이용하여 분석하였으며, 분석 결과는 표 4와 같다. 왜도(skewness)는 측정 농도와 예측 농도 모두 양의 값을 갖고 있으며, 측정 농도의 경우가 약간 더 크게 나타났다. 이것은 오존 측정 농도 및 예측 농도 모두 정규분포에 비

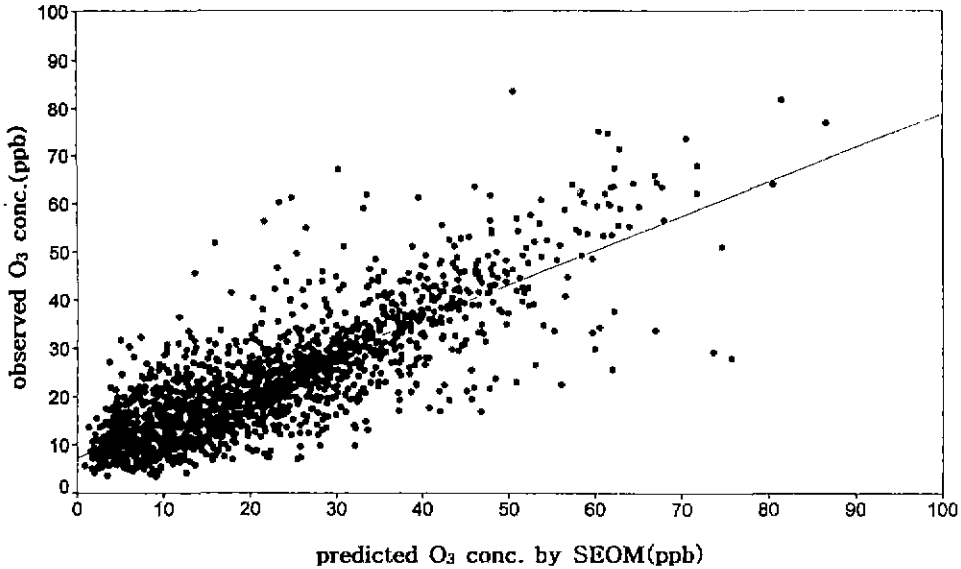


Fig. 6. Scatterplot of observed and predicted ozone concentrations (1993).

Table 4. Skewness and kurtosis of observed and predicted ozone concentrations.

| Distribution | Skewness | Kurtosis |
|-------------------------|----------|----------|
| Observed concentration | 1.179 | 1.803 |
| Predicted concentration | 0.932 | 0.830 |

하여 왼쪽으로 치우친 모양을 나타내고 있으며, 측정 농도의 경우가 더 치우쳐 있음을 나타내는 것이다. 첨도(kurtosis)는 오존 측정 농도가 예측 농도에 비하여 약간 크게 나타났는데, 이것은 측정 농도의 분포 형태가 예측 농도에 비하여 더 뾰족한 모양을 하고 있음을 나타내는 것이다.

SEOM의 예측 성능을 통계모형 중 가장 많이 사용되는 다중회귀모형과 비교하기 위하여, 단계적 선택법(stepwise selection method)으로 다중회귀모형을 작성하였다. 단계적 선택법은 독립변수의 추가와 제거를 적절히 조화하여 최선의 회귀식을 도출하는 방법으로, 변수 선택이 경우에는 p-값 5%, F-값 3.84로 하였고, 변수 제거의 경우에는 p-값 10%, F-값 2.71로 하였다.

단계적 선택법으로 작성된 다중회귀모형은 식(5)와 같다.

$$O_3 = 0.202 (NO_2/NO) + 0.082 \text{ Rad} - 3.805 \quad (5)$$

상기 식에서, 대기오염물질의 단위는 ppb이며, (NO_2/NO) 는 오염물질 사이의 비(比)이다. 또, 일사량의 단위는 0.01 MJ/m^2 이다.

1993년 시간별 평균값 중 SEOM에 의해 예측가능한 1696시간의 오존 측정 농도와 예측모형들에 의한 예측 농도의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과, 다중회귀모형에 의한 예측 농도도 측정농도와 상관계수 0.878을 높은 상관관계를 보였으나, SEOM의 예측 농도는 상관계수 0.973을 나타내서, SEOM이 다중회귀모형에 비해서 우수한 예측 성능을 갖고 있는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

최근 서울지역과 5개 광역시 및 수도권지역에 오존경보제가 시행되고 있으나, 이러한 경보제의 시행에 필수적인 예측모형의 개발과 관련된 부분은 충분치 못하거나 많은 제약점을 갖고 있는 실정이다. 본 연구에서는 서울지역을 대상으로, 오존 단기예측모형의 예측성능을 향상시키고, 현실적으로 입력자료의 확보가 가능하고 실제 오존농도 예측에 적용할 수 있는 단기예측모형을 개발하고자 하였다.

이를 위하여, 원인물질만이 제한인자로 작용할 경우의 잠재적인 일 최대 오존 농도에 해당하는 오존 최대농도지표(OPI)를 개발하였다. OPI는 원인물질인 질소산화물과 탄화수소 초기농도를 이용하여 3차원 fitting기법으로 산정하였는데, 시간별 오존 농도를 예측하기 위한 기본식은 OPI와 2시간간의 일사량, 그리고 혼합고를 이용하여 수립하였다. 개발된 모형을 실제 어느 지역의 오존 오염도 예측에 적용할 수 있도록, 기본식의 구성인자인 일사량과 혼합고도 함께 예측할 수 있는 전산프로그램인 SEOM을 개발하였다.

이 모형을 서울지역에 적용하고 상관관계, 평균값, 산포도 및 분포도를 분석하였는데, SEOM에 의한 오존 예측 농도는 측정 농도와 상관계수 0.815의 매우 강한 상관관계를 나타냈으며, 기타 분석방법에서도 SEOM의 예측 성능이 비교적 우수한 것으로 평가되었다. 또한, 다중회귀모형을 작성하여, SEOM의 예측성능과 비교한 결과, 다중회귀모형보다 SEOM이 우수한 예측 성능을 갖고 있는 것으로 분석되었다.

SEOM은 160개 이상의 화학반응이 그 생성에 관계하는 오존 농도를, 원인물질 초기치와 일사량 및 혼합고도의 변화를 고려하여 산출하는 대도시형 오존 단기에측모형이다. SEOM은 어느 지역의 지역적 특성을 반영할 수 있으며, 간단한 입력자료에 의하여 비교적 우수한 예측 결과를 얻을 수 있는 모형이다.

SEOM에서는 바람에 의한 이류가 오존 오염도에 미치는 영향을 고려하지 못하였는데, 앞으로 바람의 영향을 고려할 수 있다면, 서울의 특정 지역에 대한 오염도를 산출할 수 있을 것이다

참 고 문 헌

김양균(1985) 대기오염경보체제 구성을 위한 조사연구. 국립환경연구소.
 김화일(1987) 서울시 광화학 스모그의 영향인자 분석에 관한 연구, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
 박옥현(1984) 간단한 대기확산 모델과 통계학적 방법을 병용한 도시 대기오염의 예측, 대한환경공학회지, 6(2).
 윤마병, 정용승(1995) 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존, 한국대기보전학회지, 11(1).

윤정임,(1993) 시계열분석을 이용한 광화학 스모그 물질의 변화특성조사, 서울대학교 환경대학원 석사학위논문
 이기원, 권숙표, 정 용(1989) 서울시 대기중 오존오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회지. 9(1).
 이진순(1993) 자기 회귀모형을 이용한 광화학산화제 농도의 단기에측 방법에 관한 연구. 서울대학교 환경대학원 석사학위논문.
 전병일, 김유근, 이화은(1995) 부산 지역의 오존 농도 특성과 기상 인자에 관한 연구. 한국대기보전학회지 11(1).
 전의찬, 정진희, 조규탁, 이진순(1994) 대기질 측정방법의 효율화 방안 에 관한 연구, 서울시정개발연구원
 전의찬, 정진희, 조규탁, 김성미(1994) 서울시 대기오염 특성 연구. 서울시정개발연구원.
 전의찬(1996) 광화학산화제에 대한 기상요소의 영향 분석 및 예측모형 수립, 대한환경공학회 1996년도 추계학술대회 발표집 129-131.
 전의찬(1997) 광화학산화제최대농도지표를 이용한 오존 단기에측모형 개발, 한국대기보전학회 1997년도 추계학술대회 요지집, 93-95
 경용, 장제연, 권숙표(1986) 서울의 대기중 O₃의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회지, 2(1)
 정용승, 정재성(1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구. 한국 대기보전학회지, 7(3)
 한진석 김병곤(1995) 광화학박스모델에 의한 오존농도 시뮬레이션과 배출량의 민감도 분석, 한국대기보전학회 추계학술대회 요지집.
 水野建樹(1984) 광화학 오염에 관련된 대기저층에서의 오존동태에 관한 연구 공해자원연구소보고, 30.
 Blackadar. A K. and H. Tennekes (1968) Asymptotic Similarity in Neutral Barotropic Planetary Boundary Layers, J. Atmos. Sci., 25, 1015-1020
 Carson, D.J. and F.B Smith (1974) *Thermodynamic model for the development of a convectively unstable boundary layer in Turbulent Diffusion in Environmental Pollution*, edited by F.N. Frenkiel and R.E. Munn, Advances in Geophysics, Vol. 18A. Academic Press, New York, 111-24
 David Fairley (1993) Photochemical Model Bias, J Air and Waste Management Association. 43.
 Frohlich, C. and C Wehrli (1981) *Spectral Distribution of Solar Irradiance from 25000 nm to 250 nm, World Radiation Center, Davos, Switzerland, Private Communication.*
 Iqbal, Muhammad (1983) *Intn oduction to solar Padiation*, Ca-

- nada: Academic Press
- Isidorov, Valeri A. (1990) *Organic Chemistry of the Earth's Atmosphere*, Library of Congress.
- Kondratyev, K YA. (1969) *Radiation in the Atmosphere*. New York:Academy Press.
- Letohn, Allens *et al* (1993) Changes in Diurnal Patterns Related to Changes in Ozone Levels, J. Air and Waste Management Association, 43.
- McRae, G J. and J H. Seinfeld (1983) Development of a Second-Generation Mathematical Model for Urban Air Pollution-II. evaluation of Model Performance. *Atmospheric Environment* 17(3).
- Miller, A A and T W Sager (1994) Site Redundancy in Urban Ozone Monitoring, J. Air and Waste Management Association, 44.
- Morris, R.M. (1990) *User's Guide for the Urban Airshed Model*. U.S. EPA.
- Post, K. (1981) Ozone Formation and the Special Distribution of Precursor Emissions in Sydney, *Atmospheric Environment*, 15.
- Savidson A. (1983) Update on Ozone Trends in California's South Coast Air Basin, J. Air and Waste Management Association, 43.
- Scheer, K.L. and K.L. Demerjian (1984) *User's Guide for the Photochemical BOX MODEL (PBM)*, National Technical Information Service.
- Seinfeld, J.H. (1986) *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*, John Wiley and Sons.
- Stockwell, W R , P. Middleton, and J S Chang. 1990 (1976) The RADM2 chemical mechanism for regional air quality modeling J. Geophys. Res. 95D:16343-16367. Tiao, G.C., Some Empirical Models for Losangeles Photochemical Smog Data. J. of Air Pollution Control Association, 26
- Wispelaere C D. (1984) *Air Pollution Modeling and its Application III*, Newyork: Plenum press.
- Whitten, G Z. (1980) The Carbon-Bond Mechanism: A Condensed Kinetic Mechanism for Photochemical Smog, *Environment Sci. Technol.*, 14.
- Zilitinkevich, S.S (1970) *Dynamics of the Atmospheric Boundary Layer*, Leningrad. Gidrometer, 291.