

1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구

Studies of High-Ozone Episodes in the Greater Seoul Area between 1990 and 1997

김 영 성 · 오 현 선
한국과학기술연구원 환경연구센터
(1998년 3월 4일 접수, 1999년 5월 11일 채택)

Young Sung Ghim and Hyun Sun Oh
Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology
(Received 4 March 1998; accepted 11 May 1999)

Abstract

To investigate the characteristics of high-ozone occurrences in the Greater Seoul Area (GSA), three high-ozone episodes were selected, for which the ozone warning for concentrations above 120 ppb might be issued. The selection was on the basis of morning wind directions and speeds, and daily maximum ozone concentrations measured between 1990 and 1997. The episodes chosen to meet selection criteria were seven days in July 1992, nine days in July 1994, and three days in August 1994, as respectively characterized by southwesterly, easterly, and calm winds in the morning. However, more than 80% of high-ozone days in the GSA were associated with calm winds and the concomitant accumulation of local emissions in the morning, rather than being due to transport of ozone or its precursors. This is believed to be the primary reason why ozone concentrations in the GSA varied in a completely different manner even between adjacent monitoring stations. Several premises for initiating research studies for resolving these local variations of ozone concentrations in the GSA are also discussed.

Key words : High ozone episodes, climatic wind rose, calm wind. Greater Seoul Area

1. 서 론

최근 수년 이래 광화학 오존에 대한 관심이 높아지면서 서울·수도권 지역을 중심으로 고농도 오존 사례 연구가 시도되고 있다. 1990년 초·중반 활발하였던 오존 농도 변화 특성 조사가 광화학 오존의 일반적 특성을 이해하기 위한 것이라면 고농도 오

존 사례 연구는 구체적 사례에서 광화학 오존의 일반적 특성이 어떠한 방식으로 구현되는가를 살피기 위한 것이다. 고농도 오존 사례 연구는 크게 고정 측정망 자료나 현장 조사 자료 등 실측 자료를 이용하는 방식과 모델을 이용하는 방식 등 두가지 방식을 생각할 수 있다. 고정 측정망 자료를 이용한 사례 연구는 잘 관리된 기존 자료를 이용할 수 있다는 점에서 편리하나 광화학 오존을 위하여 특별

히 설계된 측정망이 아니라면 고농도 오존 사례를 정확히 규명하기 어려운 것이 보통이다 (Radian Corp., 1991). 현장 조사 자료는 이상적이나 많은 경험과 노력이 필요하며 무엇보다도 고농도 사례를 예견하여야 한다는 것이 큰 단점이다. 모델링은 주어진 입력 조건에서 오존 농도 상승 과정과 결과를 일목 요연하게 보여주나 자료 준비와 모델링 과정의 제한점이 결과에 그대로 반영된다는 어려움이 있다.

표 1은 그동안 대기보전학회에 발표된 고농도 오존 사례 연구들이다. 정용승과 정제섭 (Chung and Chung, 1991)을 제외하고는 대부분 최근 2~3년내 이루어진 연구들이다. 또한 김용국 등 (Kim *et al.*, 1996a)과 Kim 등 (1998)이 각각 UAM (Urban Airshed Model)과 CIT (California Institute of Technology) 모델로 사례 분석을 시도하였을 뿐 다른 연구들은 고정 측정망 자료를 이용하고 있다. 지역을 제한하지 않았으나 모든 연구가 서울, 수도권에 대상으로 하고 있어 아직은 광화학 오염에 대한 관심이 서울·수도권에 집중되고 있음을 보여 주고 있다. 풍

향을 언급하지 않은 한진석 등 (Han *et al.*, 1996)을 제외할 때 정용승과 정제섭 (1991) 등 많은 연구가 서풍에 의한 오존 혹은 광화학 반응물의 이동을 이야기하고 있다.

만일 고농도 오존이 주로 서풍 조건에서 발생한다면 서울, 수도권의 고농도 오존 저감을 위하여 서울 서쪽의 오염원을 관리할 필요가 있다. 그러나 김영성 (1997)은 서울, 수도권에서 서쪽에서 동쪽으로의 오염물질 이동이 오존 농도 상승에 지속적으로 중요하지 않다고 주장하고 있다. 물론 김영성 (1997)의 주장은 광화학 오존의 일반적 특성을 조사하는 가운데 도출된 것이므로 표 1의 Kim 등 (1998)이나 김지영 등 (Kim *et al.*, 1996b)의 사례가 반영된 것으로 볼 수도 있다. 그러나 이와 같은 사실은 사례 선택에 따라 고농도 오존의 원인 규명과 저감을 위한 조치가 달라질 수 있음을 보여주고 있다.

표 1은 우리나라의 고농도 오존 연구가 각 그룹들이 임의로 선정한 사례를 토대로 진행되고 있음을 보여주고 있다. 그러나 미국 등부에서는 1988, 1991, 1993, 1995년 각 7월의 고농도 오존 사례를

Table 1. High ozone episodes previously studied in the Korea Air Pollution Research Association.

Source	Ozone Episode (yymmdd)	Peak 1-h Concentration (Date)	Remarks
Chung and Chung (1991)	890603, 29; 890714; 890806, 13; 900606, 900730; 900807, 15, 26, 30	173 ppb (900830)	Exceeding 80 ppb. High concentrations usually occurred under the influence of warm and moist southeasterly/southwesterly airflows at the back side of high pressure system. (900830) High concentrations resulted in the downwind side of the sea breeze owing to the channeling effect of Han River.
Han <i>et al.</i> (1996)	940608-09	128 ppb (940608)*	Photochemical smog associated with high pressure system.
Kim <i>et al.</i> (1995)	940611-16	164 ppb (940615)*	(940611) Along with the sea breeze, ozone concentration increased from the west and moved to the east.
Kim <i>et al.</i> (1996a)	940711-13	141 ppb (940712)**	UAM showed northwesterly wind and high concentration in the southeast of Seoul. High concentration is also observed in Chunchon due to polluted air from the Seoul area.
Kim <i>et al.</i> (1998)	940721-29	188 ppb (940722)*	(940724) CIT model showed peak concentration in the southwest of Seoul due to easterly in the morning, following westerly in the west seashore and weak winds in Seoul in the afternoon.
Kim <i>et al.</i> (1996b)	950613, 17; 950707, 22	167 ppb (950702)	Exceeding 100 ppb. (950722) High concentration at Pulkwang due to convergence of southeasterly wind. It moved to the northeast side of Seoul as wind changed to westerly.
Lee and Bang (1997)	970612-18	144 ppb (970615)	Higher daily maximum and later maximum time in the eastern part of Seoul due to northwesterly winds associated with sea breeze

* Specified in the current analysis

이용하여 오존 농도 상승의 원인을 조사하고, 고농도 오존 사례의 기상 조건이 반복될 경우를 가상하여 오존 농도를 가장 효과적으로 낮추기 위한 방법을 모색하고 있다(OTAG, 1997). 이들 고농도 사례들은 1993년 7월의 고농도가 주로 남동부에 집중된 데 비하여, 1995년 7월에는 뉴욕을 중심으로 한 북동부와, 중서부의 미시간 호 주변, 남동부의 조지아, 알라바마 지역이 고루 높게 나타나는 등 각기 다른 특징을 지니고 있다. Cassmassi(1998)는 최근 1시간 평균 0.12 ppm으로부터 8시간 평균 0.08 ppm으로 환경기준이 바뀌면서 8시간 평균에 대한 관심이 높아지자 LA 지역을 대상으로 평균화 시간이 변할 때 고농도 사례가 어떻게 변하는가를 분석하고 있다.

우리나라 역시 복수의 특징적 고농도 사례를 선정할 수 있고, 이와 같은 고농도 사례 선정이 공감을 얻을 수 있다면, 다수의 연구자들이 이들 고농도 사례를 연구함으로써 이에 대한 이해를 촉진시킬 수 있고, 환경정책 역시 이들 고농도 사례를 기초로 수립될 수 있을 것이다. 본 논문의 1차적 목적은 미국 EPA(Environmental Protection Agency) 지침서의 절차에 따라(USEPA, 1991) 1990년부터 1997년까지 춘천을 포함하는 서울, 수도권 지역의 35~38개 대기질 측정소 및 서울 기상청의 측정 자료를 이용하여 대표적인 고농도 사례를 선정하기 위한 것이다. EPA의 고농도 사례 선정은 도시규모의 UAM 모델링을 위한 것으로 오존이나 VOC, NO_x 등 광화학 반응물의 유입 여부를 바탕으로 하고 있어 서울, 수도권 지역에서 논란이 되고 있는 오염물질의 이동에 의한 오존 농도 상승 여부를 판단할 수 있는 근거가 될 수도 있다. 고농도 사례를 분류하는 가운데 서울, 수도권 지역 고농도 발생의 특성들이 부각될 수 있으며, 이에 따른 고농도 사례 연구의 전제 조건들에 대하여서도 알아보고자 한다.

2. 고농도 사례 선정 방법

미국 EPA 지침서의 고농도 사례 선정은 기본적으로, 풍향, 풍속과 고농도의 수준을 고려하여 기상 조건이 편중되지 않도록 복수의 사례를 선정한다는 것이다(USEPA, 1991). 다음은 본 연구의 고농도 사례 선정 절차이다. EPA 지침서가 1990년 청정대기법에 기초하였기 때문에 대상 기간을 설정할 때

1987~1989년 기간을 반드시 포함하도록 하는 등 1988년 미국의 고농도 사례가 특별히 강조되어 있으나 본 연구의 사례 선정에서는 대상 기간에 대한 언급을 삭제하여 우리나라에도 적용이 가능하도록 일반화하였다.

① 수년간 일 최고 오존농도가 기준치를 초과한 날을 선택하여 오전 7시부터 10시까지의 평균 풍향과 평균 풍속을 구한다.

② 평균 풍속이 1.5 m/s 미만인 경우는 정체(0)로 분류하고, 1부터 8까지 8방위 풍향으로 풍배도를 작성한다.

③ 0부터 8까지 9개 영역에서 고농도 오존일 농도가 높은 것부터 정렬한다.

④ 다른 영역에 비하여 빈도수가 월등히 많거나 농도가 높은 고농도 오존일을 포함한 영역 3개를 지정한다.

⑤ 지정된 각 영역 내에서 농도가 높은 것부터 고농도 사례 3일씩을 선택한다.

⑥ 9개의 사례 중에서 대상 영역 내 고농도 오존의 발생시간 수, 고정 측정망의 자료 결측율, 별도의 현장 조사 실시 여부 등을 고려하여 기상 조건이 중복되지 않도록 3개 정도의 사례를 선택한다.

오전의 풍향, 풍속 자료를 이용하는 것은, 오전에 바람을 따라 유입된 오염물질이 일사량 증가와 함께 광화학 반응을 통하여 오존을 생성시킨다는 EKMA의 경우와 동일하다(USEPA, 1989). 정체와 이동을 구분하는 기준 풍속 1.5 m/s는 풍향이 일정할 때 하루 약 130 km를 이동할 수 있어 전형적인 도시 규모 이동에 상응하는 풍속이다. 따라서 고농도가 1.5 m/s 미만 조건에서 발생한다면 도시 규모 광화학 오염에 의하여 상승한 것이므로 도시 규모 대상지역의 오염물질을 관리함으로써 오존 농도를 저감할 수 있으며, 고농도가 1.5 m/s 이상 조건에서 발생한다면 현재 대상지역 바깥에 위치한 다른 지역으로부터 오염물질이 이동하여 오존 농도가 상승한 것이므로 현재 대상지역의 오염물질 관리만으로는 불충분하며 광역 오염 관점의 대책이 필요함을 의미한다.

본 연구에서는 춘천을 포함한 서울, 수도권 지역에서 1990년부터 1997년까지 오존 경보가 발표되는 120 ppb 이상 오존농도 발생일을 대상으로 서울 종로구 송월동의 기상청 관측자료를 이용하여 고농

도 사례를 선택하였다. 춘천 조운 측정소를 제외하면 본 연구의 대기질 측정소는 대략 60km×60km 영역에 분포되어 있다. 본격적 분석에 앞서 다음과 같은 점들을 점검할 필요가 있다. 첫째, EPA의 사례 선정은 EKMA의 예에서 이미 보아온 것과 같이 오전의 풍향, 풍속을 토대로 오후의 고농도 특성을 규정짓는 것으로부터 출발된다. 너무 단순화시킨 것으로 생각할 수 있으나 당일 오전의 기상 특성이 100 혹은 120 ppb 이상 고농도 상승에 직접적으로 중요한 것이 사실이고, 단순하지만 체계화시킨 중간 과정을 거쳐 최종 단계에서는 대상 지역의 기상 특성 등이 종합적으로 고려될 수 있으므로 중간 과정의 결과를 너무 확대 해석하지 않는 한 큰 문제는 없을 것으로 판단된다.

둘째, 서울, 수도권 영역에서 1.5 m/s를 기준으로 정체를 판단하는 것이 타당한가에 대한 의문이 제기될 수 있다. 그러나 이 의문은 상당히 까다로운 몇가지 새로운 문제들로 이어진다. 마지막 문제는 1.5 m/s를 어떠한 풍속으로 대체할 것인가가 될 수 있다. 대안으로써 우리나라 기상청에서 사용하는 0.3 m/s를 생각할 수 있다. 그러나 이와 같은 대안은 1 m/s를 밑도는 풍향을 세밀하게 구분한다는 것을 의미하므로 극지 변화가 심한 대도시 풍향, 풍속의 경우 대기질 측정소 위치의 측정 자료를 이용하지 않는 한 오히려 오차를 증폭시킬 수 있다. 또한 풍속이 낮을수록 지형지물의 영향을 많이 받으므로 설사 측정소 위치의 측정 자료를 이용하더라도 이때의 풍향이 주변 지역의 오염물질 이동 현상을 얼마나 대표할 수 있는지는 문제도 제기될 수 있다.

현재로써 대기질 측정소 위치의 풍향, 풍속 자료는 가능하지 않지만, 만일 가능하더라도 유효한 결과를 얻기 위하여서는 어느 정도 풍속 이상에서 풍향을 분석하여야 한다. 결국 1.5 m/s 대신 어떤 풍속을 이용할 것이냐는 문제에 다시 부딪히게 된다. 본 연구에서는 당장 대안이 명확치 않으므로 미국 EPA에서 제시한 1.5 m/s 기준을 그대로 이용하였다. 최소한 서울 이외의 지역에 대하여 인근 지역의 기상 관측소 풍향, 풍속 자료를 이용하는 방안 역시 본 연구에서는 유보하였는데, (1) 본 연구의 1차적 목적이 고농도 사례 선정인데 비하여 대상 기간 중 고농도 오존 발생이 주로 서울 지역에 집중되어 있어 서울을 중심으로 논의가 전개될 가능성이 크고

(김영성, 1997), (2) 기상 변수의 공간 변화 역시 사례별 오존 농도 변화와 함께 추후 사례 분석에서 상세히 취급되어야 할 부분으로 판단되었기 때문이다. 즉, 본 연구의 사례 선정과정에서 서울, 수도권 고농도 오존의 발생 특성이 부각될 수 있으나 이상과 같은 여러 전제들로 인하여 조심스럽게 분석될 예정이다.

3. 서울 · 수도권 지역의 고농도 사례

3.1 고농도 오존일의 특성

춘천을 포함한 서울, 수도권 지역에서 1990년부터 1997년까지 120 ppb 이상 오존농도 발생일은 총 105일로 표 2에서 볼 수 있는 것과 같이 1992년과 1994년이 각각 1/4씩 약 절반을 차지하고 있다. 서울, 수도권 지역 1개 이상의 측정소에서 120 ppb 이상의 고농도 오존이 측정된 날의 오전 7~10시까지의 평균 풍속 및 평균 풍향을 이용한 풍계도는 그림 1과 같다. 고농도 오존일의 오전 풍향은 동풍이

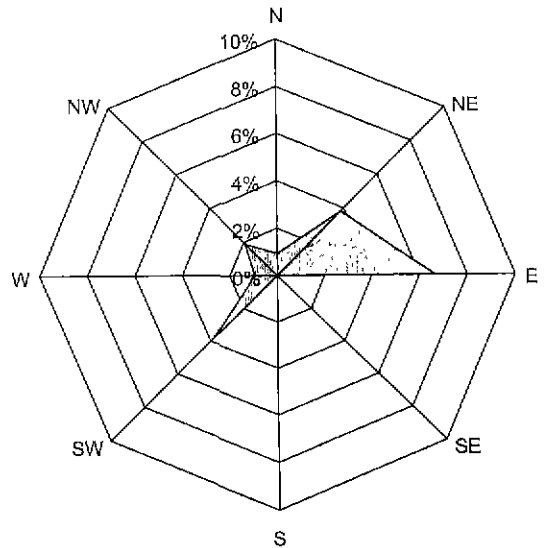


Fig. 1. Wind rose for high-ozone days in the Greater Seoul Area for the period of 1990~1997, based on morning (07:00~10:00) average wind direction. This wind rose accounts for 18% of the high-ozone days. Calm conditions, for which morning-average wind speed is less than 1.5 m/s, not shown in the figure, occur 82% of the high-ozone days.

Table 2. Number of high-ozone days in the Greater Seoul Area for the period of 1990~1997.

Year	Number of Days	Year	Number of Days
1990	10	1994	24
1991	12	1995	2
1992	26	1996	8
1993	9	1997	14

가장 많고 다음으로 북동풍과 남서풍이 비교적 빈번하다. 그러나 전체적으로는 풍속 1.5 m/s 미만의 정체가 전체 고농도일의 82%를 차지하여 가장 빈번한 동풍의 발생빈도도 7%를 넘지 못하고 있다.

서울지역 여름철 평균 풍향은 그림 2와 같이 오전 7~10시에는 육지에서 바다로 향하는 동풍이 우세하며, 그림 1의 고농도 오존일의 풍향에도 이와 같은 서울지역 풍향의 일반적 특성이 반영된 것으로 볼 수 있다. 그러나 오후 14~17시 이후에는 해풍이 발달하여 서풍이 중심을 이룬다. 평균 풍속은 오전에는 2 m/s 이하로 약한데, 고농도일에는 풍속이 더욱 낮아져 1.5 m/s 미만이 절대 다수인 80%를 넘은 것으로 해석된다(김영성, 1997).

표 3은 8방위 풍향과 정체 조건의 고농도일을 농도가 높은 날부터 정렬한 것이다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 정체 조건의 고농도 발생 빈도가 압도적으로 많을 뿐 아니라 농도도 높다. 표 3에는 각 고농도일에 최고 농도가 기록되었던 측정소가 표시되어 있다. 엄밀히 이야기하면 서울 기상관측소의 풍향, 풍속으로 대표된 서울, 수도권이 1.5 m/s 미만 정체 조건일 때 해당 측정소의 오존 농도가 높았다는 것을 의미할 뿐 그 측정소 주변이 1.5 m/s 미만의 정체 조건이었음을 의미하지는 않는다. 그러나 서울, 수도권이 정체 조건일 때 상위 11개 고농도 중 광화문의 고농도 발생이 4건으로 가장 많은 것은 광화문의 농도빈도분포가 전형적인 국지배출 특성을 보인다는 사실과 함께(김영성, 1997) 고농도가 기록된 측정소 주변도 정체 조건이었을 가능성을 암시하고 있다. 실제 김진영 등(1999)이 1997년 서울지역 24개 자동기상관측(AWS, Automatic Weather Station) 풍속 자료를 서울 기상청 풍속 자료와 비교한 결과를 보면 국지 기상을 측정된 AWS 자료가 기상청 자료보다 21% 정도 낮다. 물론 자료를 상세히 살펴보면 서울 기상청 풍속 자료가 0에 근

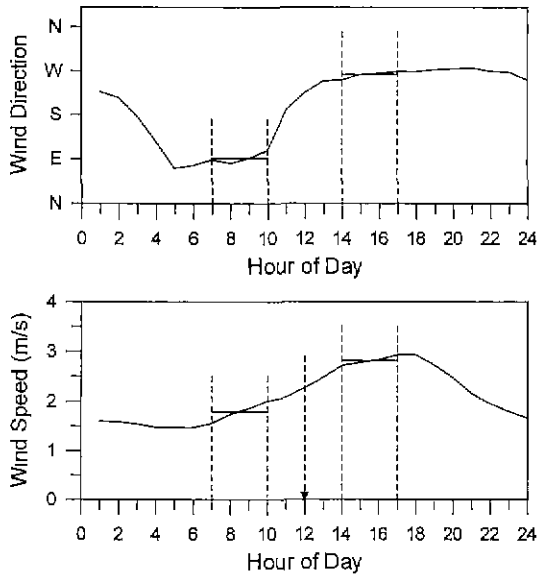


Fig. 2. Average diurnal variations of wind direction and speed in Seoul July and August between 1990 and 1997. In the current analysis, morning (07:00~10:00) average wind direction and speed were used as criteria for determining the transport effect on ozone increases in the afternoon. Average wind direction and speed from 14:00 to 17:00 were used as a representative wind direction and speed in the afternoon. Wind speed at noon was also used as a representative wind speed of the day in order to compare the data for the Eastern U.S. cities.

접할 때에는 국지 풍속이 다소 높아 절편이 양의 값을 가지나 충분히 작은 값이고, 대부분의 풍속 범위에서 국지 풍속은 서울 기상청 풍속보다 낮으며, 따라서 서울 기상청의 풍속이 정체라면 대기질 측정소의 풍속도 정체거나 정체에 근접할 가능성이 높다.

여타 풍향 조건에서의 고농도 발생이 당일 1~2개 측정소에 그친 반면, 정체 조건의 고농도 발생일에는 97년 6월 15일 11개 지점에서 120 ppb 이상을 기록하는 등 고농도 오존의 범위도 넓다. 정체 조건 고농도 발생을 연도별로 살펴보면, 역시 1992년과 1994년이 많아 표 2의 전체 고농도 발생일과 같은 분포를 보이고 있으나, 전체 고농도 발생일 중 정체 조건 발생일의 비율은 1994년이 가장 낮다.

Table 3. Distributions of high-ozone days for 8 wind directions plus calm conditions in descending order.^a

Date	Peak Conc	Station name	# of Stations ^b	Date	Peak Conc	Station name	# of Stations ^b
N				NE			
930819	132	Sinsol	1	900821	182	Uijongbu	1
				920905	138	Kwanghwamun	1
				910623	125	Ssangmun	1
				920809	122	Namgajwa	1
E				SW			
940726	171	Simgok	1	920723	175	Pangŭ	2
961022	167	Simgok	1	920707	133	Kuro	1
940725	157	Nae	2	920708	131	Mapo	1
940903	143	Songnam	2	960815	121	Choun	1
940727	142	Simgok	1				
940813	132	Pupyong	1				
940614	122	Oryu	1				
W				NW			
930617	130	Songsu	2	970801	137	Choun	1
				940719	134	Pangŭ	1
Calm (Wind Speed < 1.5 m/s)							
Highest 11				Annual Frequency			
940823	322	Kwanghwamun	5	Year	# of Days		
940824	243	Kwanghwamun	2	90	9 (90%) ^c		
920706	240	Kuro	4	91	11 (92%)		
940717	227	Panpo	4	92	21 (81%)		
900802	206	Chamsil-1	5	93	7 (78%)		
920915	201	Kwanghwamun	1	94	17 (71%)		
920904	197	Kwanghwamun	1	95	2 (100%)		
920705	190	Kuro	3	96	6 (75%)		
910816	189	Mapo	7	97	13 (93%)		
940722	188	Kwonsun	2	Sum	86 (82%)		
940723	182	Nae	4				
Most Pervasive High-Ozone Day							
970615	147	Kwonsun	11				

^a No high-ozone days exist for wind directions from SE and S.

^b Total number of stations where ozone concentrations were recorded at 120 ppb or higher in GSA on the same day.

^c Percent to total number of high ozone days. See Table 2

그림 3은 측정소별 120 ppb 이상 고농도 발생을 8 방위 풍향과 정체 조건으로 구분하여 살펴본 것이다. 광화문 뿐 아니라 쌍문, 방이의 고농도 역시 주로 오전의 1.5 m/s 미만 풍속의 정체 조건에서 비롯되고 있음을 보여주고 있다. 측정소 위치별 풍향 분포는 뚜렷한 특성을 찾아보기 힘들다. 그러나 남서쪽의 부평, 심곡, 오류, 철산 등 4개 측정소의 풍향 조건의 고농도 발생이 동풍 조건에서 발생하고 있고, 동쪽의 방이와 춘천의 조운 등 2개 측정소의 풍

향 조건의 고농도 발생이 북서, 남서 등 서풍 조건에서 발생하고 있어 서울이 주변 지역 고농도 발생의 원인이 될 수 있음을 보여주고 있다.

결국 표 3과 그림 3은 서울, 수도권 특히 서울의 고농도 발생이 절대적으로 정체 조건에서 발생함을 말하고 있다. 정체 조건에서 고농도가 발생함은 광화문으로 대표되는 서울 지역 대부분이 다른 곳으로부터의 오염물질 이동이 아닌 국지 배출에 의하여 오존 농도가 상승함을 의미한다. 그림 4는 이와

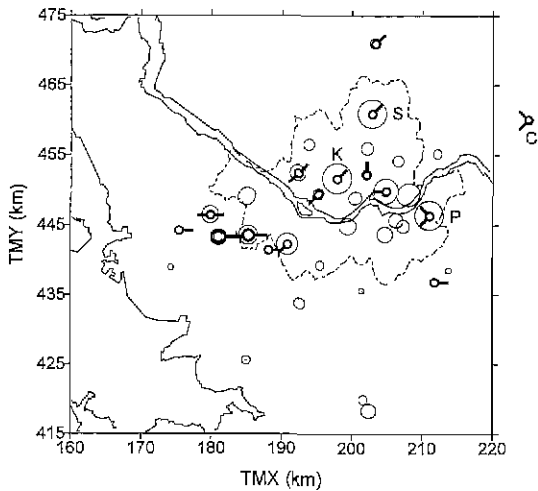


Fig. 3. Number of high-ozone days for the period 1990~1997. Shaded circle represents number of high-ozone days under calm conditions. Open circle with bar represents number of high-ozone days with wind direction pointed by bar. Size of a circle indicates the number of high-ozone days, relative to 20 high-ozone days under calm conditions at Kwanghwamun with a circle denoted by K. S and P indicate the locations of Ssangmun and Pangni stations, respectively, with 19 high-ozone days under calm conditions. Note that Choun station denoted by C in the upper-right corner is located about 70 km north-northeast of Seoul. At Choun, three high-ozone days occur with northwesterly, southwesterly and calm condition.

같은 사실을 다시 한번 확인하기 위하여 서울, 수도권 지역의 풍속에 따른 일 최고 농도 변화를 미국 동부의 여타 도시들과 비교한 것이다. 이때의 풍속은 미국 동부 도시들과 같이 정오의 값을 이용하였는데, 그림 2를 보면 정오의 풍속은 육풍에서 해풍으로의 전환점에 위치하여 일 평균치에 근접하고 있다. 그림 4는 풍속을 0~2, 2~4, 4~6, 6m/s 이상의 구간으로 분류하고 각 구간에 포함된 일 최고 오존농도의 평균값을 0~2m/s 풍속의 평균일 최고 오존농도에 대한 상대적인 비로 나타낸 것이다.

바람이 강할수록 오존 농도가 저하된다면 국지 배출이 오존 농도 상승의 주요 원인일 가능성이 높다. 서울, 수도권의 경우 6m/s 이상의 분율이 2%에 불과하여 풍속이 강할 때 대표성 있는 오존 농도를

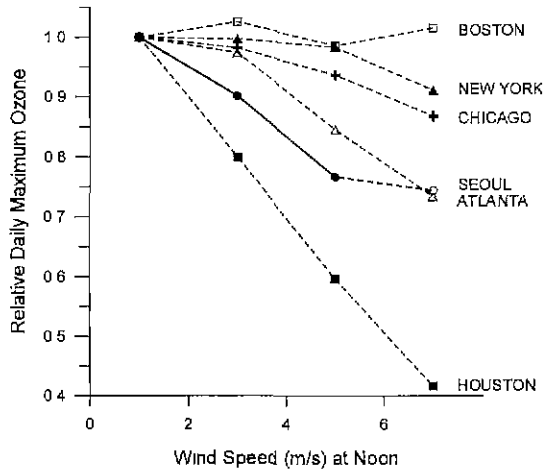


Fig. 4. Relative decline of ozone concentrations with wind speed in the GSA, compared with different metropolitan areas in the Eastern U.S. (Husar and Renard, 1997). Data for 1990~1997 were used for the GSA and data for 1986~1995 were used for the eastern U.S. cities. Strong decline indicates the influence of local sources, while weak decline suggests transported ozone. In the GSA, strong winds over 6 m/s occur only 2% of the time. Due to their limited occurrences, relative decline representative of that category is highly uncertain, thus denoted by the dashed line instead of the solid line.

정확히 추정하기 어렵다. 그러나 5 m/s까지의 경향만을 본다면 휴스턴에는 미치지 못하나 역시 풍속이 낮아 자체 배출에 의한 오존 상승으로 유명한 애틀랜타보다도 오존 농도 감소폭이 커 국지 배출의 영향이 큼을 나타내고 있다.

3.2 사례 선정

표 3에서 빈도수가 비교적 많은 북동풍, 동풍, 남서풍에서 각 3일씩 9일과 정체 조건에서 3일 등 12일을 선정하였다. 당초 EPA 지침서에서는 1차 선정 대상으로 9일을 제시하였으나 북동풍과 남서풍의 고농도 오존일이 4일씩 동일하여 함께 선정함에 따라 3일이 늘었다. 그림 5는 고농도 사례의 1차 대상으로 선정한 12일이 속한 각 달의 서울, 수도권 지역 측정소에서 관측된 오존 농도 변화이다. 기간 내 고농도 수준과 고농도 오존일의 지속성, 대상 지역

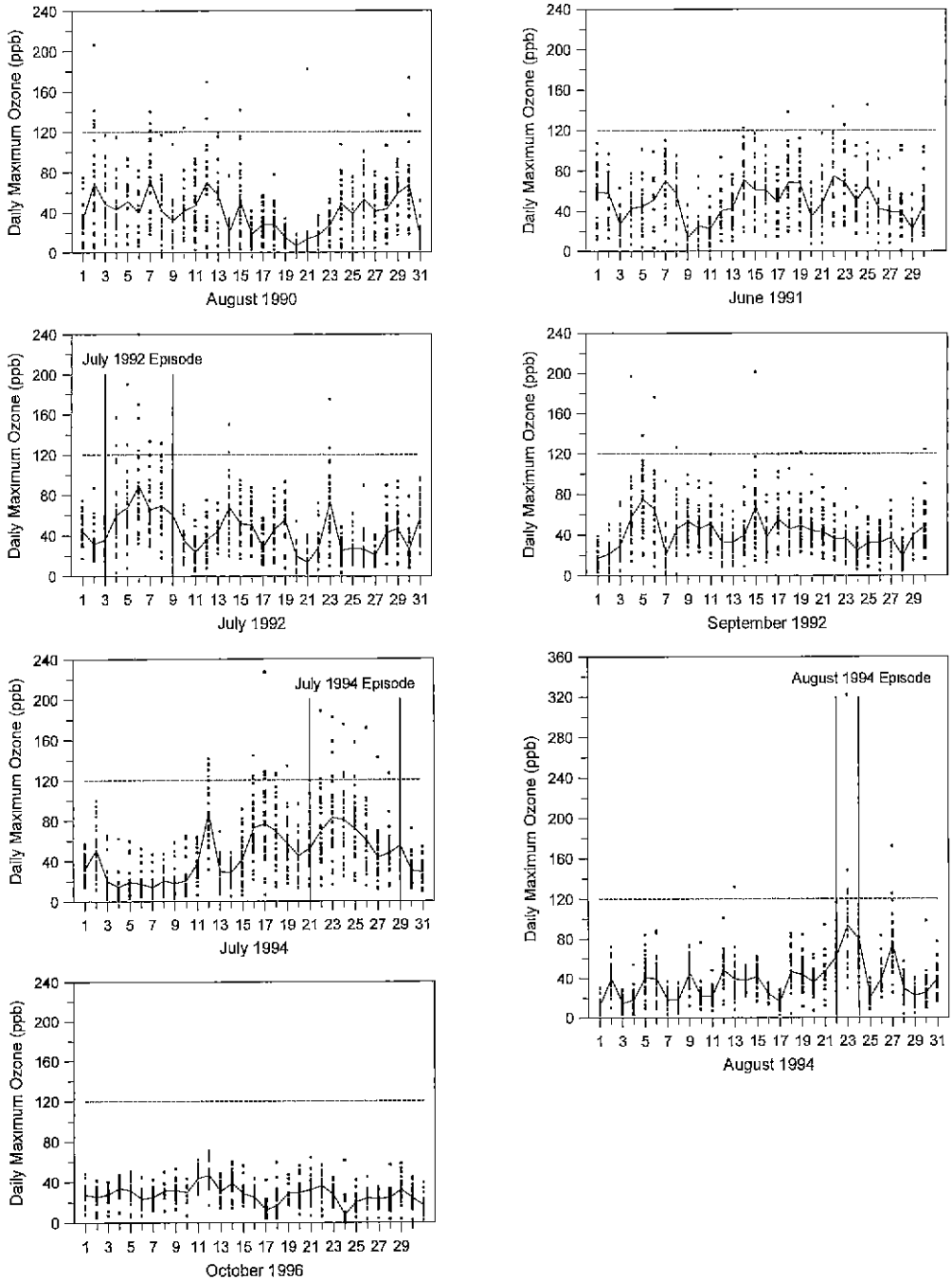


Fig. 5. Daily-maximum ozone concentrations at the stations in GSA for months containing the top 3-ranked high ozone days in each regime of wind directions of northeast, east, southwest and calm conditions. Solid circles represent daily-maximum concentration at the station, and solid line represents mean daily maximum concentration over the domain. Periods for three selected episodes are indicated by July 1992, July 1994, and August 1994 Episodes.

Table 4. (a) Ozone statistics for the July 1992 Episode.

	920703 (Fri)	920704 (Sat)	920705 (Sun)	920706 (Mon)	920707 (Tue)	920708 (Wed)	920709 (Thu)	Total
Peak 1-h(ppb)	100	157	190	240	133	131	120	240
Number of Stations ^a								
> 80 ppb	1	6	8	14	7	10	6	52
> 100 ppb	0	4	4	7	3	6	1	25
> 120 ppb	0	2	3	4	1	1	0	11
> 140 ppb	0	1	1	3	0	0	0	5
> 160 ppb	0	0	1	2	0	0	0	3
Number of Hours ^b								
> 80 ppb	5	24	26	49	31	29	14	178
> 100 ppb	0	10	15	26	14	13	6	84
> 120 ppb	0	4	7	12	2	1	0	26
> 140 ppb	0	2	4	8	0	0	0	14
> 160 ppb	0	0	2	5	0	0	0	7
Peak 8-h(ppb)	67	115	135	162	118	102	105	162
Number of Stations ^a								
> 60(ppb)	1	5	7	12	8	8	7	48
> 80(ppb)	0	2	3	5	2	2	1	15
> 100(ppb)	0	1	1	3	1	1	1	8
> 120(ppb)	0	0	1	1	0	0	0	2
> 140(ppb)	0	0	0	1	0	0	0	1

^a Number of stations exceeding thresholds from total 36 stations

^b Total number of hours exceeding thresholds at all stations over the domain.

Table 4. (b) Ozone statistics for the July 1994 Episode.

	940721 (Thu)	940722 (Fri)	940723 (Sat)	940724 (Sun)	940725 (Mon)	940726 (Tue)	940727 (Wed)	940728 (Thu)	940729 (Fri)	Total
Peak 1-h(ppb)	119	188	182	175	157	171	142	126	172	188
Number of Stations ^a										
> 80 ppb	5	11	16	15	11	7	1	2	4	72
> 100 ppb	2	6	8	7	4	2	1	1	1	32
> 120 ppb	0	2	4	4	2	1	1	1	1	16
> 140 ppb	0	1	3	1	1	1	1	0	1	9
> 160 ppb	0	1	1	1	0	1	0	0	1	5
Number of Hours ^b										
> 80 ppb	9	28	61	59	34	17	7	5	10	230
> 100 ppb	5	9	31	22	9	7	5	2	5	95
> 120 ppb	0	3	11	9	3	4	3	1	5	39
> 140 ppb	0	2	6	4	2	4	2	0	4	24
> 160 ppb	0	1	1	2	0	3	0	0	2	9
Peak 8-h(ppb)	82	100	129	136	92	131	113	82	142	142
Number of Stations ^a										
> 60 ppb	3	5	17	16	14	3	1	2	5	66
> 80 ppb	1	1	6	6	3	1	1	1	1	21
> 100 ppb	0	0	4	3	0	1	1	0	1	10
> 120 ppb	0	0	1	1	0	1	0	0	1	4
> 140 ppb	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

^a Number of stations exceeding thresholds from total 38 stations.

^b Total number of hours exceeding thresholds at all stations over the domain

Table 4. (c) Ozone statistics for the August 1994 Episode.

	940822 (Mon)	940823 (Tue)	940824 (Wed)	Total
Peak 1-h (ppb)	116	322	243	322
Number of Stations ^a				
> 80 ppb	6	23	15	44
> 100 ppb	1	13	7	21
> 120 ppb	0	5	2	7
> 140 ppb	0	2	1	3
> 160 ppb	0	1	1	2
Number of Hours ^b				
> 80 ppb	18	90	60	168
> 100 ppb	2	38	24	64
> 120 ppb	0	15	8	23
> 140 ppb	0	10	4	14
> 160 ppb	0	8	4	12
Peak 8-h (ppb)	81	225	155	225
Number of Stations ^a				
> 60 ppb	8	23	20	51
> 80 ppb	1	11	8	20
> 100 ppb	0	1	1	2
> 120 ppb	0	1	1	2
> 140 ppb	0	1	1	2

^a Number of stations exceeding thresholds from total 38 stations.
^b Total number of hours exceeding thresholds at all stations over the domain

내 고농도의 밀집도 등을 고려하여 1992년 7월의 7일, 1994년 7월의 9일, 1994년 8월의 3일을 최종적으로 선정하였는데, 1992년 7월은 오전의 남서풍, 1994년 7월은 오전의 동풍, 1994년 8월은 오전의 정체 조건을 대표하는 것으로 보았다. 표 4와 5는 각 사례별 오존 농도 분포와 기상 특성을 살펴본 것이다.

3.3 고농도 사례 분석

3.3.1 1992년 7월 사례

7월 3일부터 9일까지 7일간 계속되며 기간 동안 11개 측정소에서 26시간이 1시간 오존 농도 120 ppb를 초과하였다. 7월 3일 1시간 최고 농도 100 ppb부터 상승하기 시작하여 7월 6일 240 ppb로 최고치를 기록한 후 하락하는데, 다른 농도 지표도 유사하다. 통상의 오존 농도가 오염물질의 축적에 따라 월요일부터 금요일까지 상승한 후 토요일, 일요일 등 주말에 하락하였다가 주중에 다시 상승하는 것으로 보고되고 있는데 비하여 (OTAG, 1997), 표 4(a)는 주말에 계속 상승한 후 월요일에 최고치를

Table 5. Meteorological characteristics of three high-ozone episodes along with average meteorology in July and August for the period of 1990 and 1997.

Episode	Date	Mean Wind Direction		Mean Wind Speed (m/s)		Maximum Temperature (°C)	Mean Cloud Cover (Fraction)	Solar Radiation (MJ/m ²)	Precipitation ^a (mm)
		Morning	Afternoon	Morning	Afternoon				
July 1992	920703 (Fri)	NNE	SW	0.6	1.3	22.5	1.00	11.26	18.4
	920704 (Sat)	WSW	W	0.8	2.9	28.3	0.99	11.05	2.1
	920705 (Sun)	WSW	W	1.4	3.3	31.3	0.53	20.51	-
	920706 (Mon)	ENE	W	1.2	4.0	32.4	0.11	22.60	-
	920707 (Tue)	SW	WSW	2.2	4.5	30.6	0.23	21.22	-
	920708 (Wed)	SW	W	3.3	3.7	31.5	0.10	24.82	-
	920709 (Thu)	ENE	WSW	0.9	3.0	30.3	0.74	14.53	-
July 1994	940721 (Thu)	NNW	NW	1.2	3.2	35.5	0.40	17.46	-
	940722 (Fri)	E	WNW	1.1	2.4	35.5	0.40	12.54	-
	940723 (Sat)	E	NNE	1.2	1.3	38.2	0.16	19.03	-
	940724 (Sun)	E	ESE	1.4	0.9	38.4	0.08	22.75	-
	940725 (Mon)	ESE	NE	1.7	1.3	36.8	0.08	20.02	-
	940726 (Tue)	ESE	E	1.7	2.1	37.1	0.28	21.08	-
	940727 (Wed)	E	E	2.3	1.5	36.0	0.59	16.43	0.0
	940728 (Thu)	E	SE	1.6	1.0	35.9	0.40	16.58	0.0
940729 (Fri)	ESE	SW	1.1	1.0	35.6	0.64	13.04	1.9	
August 1994	940822 (Mon)	E	E	1.9	1.9	31.7	0.24	22.33	-
	940823 (Tue)	E	NW	1.2	2.7	31.6	0.39	13.39	-
	940824 (Wed)	ENE	NW	0.9	3.0	31.5	0.46	16.36	-
Average in July and August		E	W	1.9	2.9	29.4	0.65	12.03	18.6

^a A hyphen indicates no precipitation.

기록하여 예외적이다. 그러나 이와 같은 주중 변화는 이어지는 표 4(b)에서도 그리 명확하지 않아, 보다 많은 경우를 토대로 추후 검토할 과제 중의 하나이다.

표 5는 1992년 7월 사례가 다른 두 사례에 비하여 빠른 풍속 조건에서 형성되었음을 보여주고 있다. 특히, 1992년 7월 초를 특징적인 고농도 사례의 하나로 부각시킨 7일과 8일 오전의 남서풍 풍속이 2.2 m/s와 3.3 m/s로 7, 8월 오전의 평균 풍속 1.9 m/s보다 빠르며, 오후의 풍속도 첫날인 3일을 제외하고는 최소한 평균 풍속 이상이다. 그러나 1시간 최고 농도가 190 ppb와 240 ppb로 기간 중 오존 농도가 가장 높았던 5, 6일 오전의 풍속은 각각 1.4 m/s와 1.2 m/s로 처음 이틀보다 빠르나 1.5 m/s 미만이다. 이와 같이 분다면 처음 이틀간 광화학 반응물이 축적되어, 다음 이틀간 활발한 광화학 반응으로 오존 농도가 최고값을 기록한 후, 7, 8일의 높은 풍속 조건에서 광화학 반응물이 소산되며 오존 고농도 사례가 소멸된 것으로 해석할 수 있다.

기간 내 전반적으로 서풍이 많은데, 7, 8월 오전의 평균 풍향이 동풍인데 비하여 4, 5일과 7, 8일 오전의 풍향이 각각 서남서, 남서풍임을 비롯하여 오후에도 서풍 계열의 바람이 지배적이다. 오존 농도가 상승하기 시작한 첫날 온도도 그리 높지 않고 이틀째까지 구름이 하늘을 덮은 가운데 강우까지 기록된 사실이 특이하다. 참고로 1992년 7월 초 고농도 오존 사례에서는 오전의 정체 조건에서 남가좌(2), 화곡(3), 구로(3), 밤이(2)들이, 남서풍 조건에서는 마포, 구로들이 120 ppb 이상 고농도를 기록하였는데, 이때 ()안의 숫자는 고농도 일수이다.

3. 3. 2 1994년 7월 사례

7월 21일부터 29일까지 9일간 계속되며 기간 중 16개 측정소에서 39시간이 오존 농도 120 ppb를 초과하였다. 기간 내 1시간 최고 농도로는 이틀째인 22일 188 ppb가 기록되었으나 8시간 평균 농도는 4일째인 24일 136 ppb로 가장 높고, 1시간 농도 120 ppb 이상 시간 수는 3일째에 가장 많은 등 여러 농도 지표들이 각기 다른 변화를 보이고 있다. 1시간 및 8시간 최고 농도는 26일 다시 한번 상승한 후

마지막날 재 상승하는 양상을 보이는데 비하여 일정 농도 이상 측정소와 시간 분포는 전반 상승 후 마지막에 재 상승하는 이중 구조이다.

1992년 7월 사례의 풍향이 주로 서풍 계열인데 비하여 1994년 7월 사례에서는 특히 오전에 동풍이 많고 오후에도 처음 이틀과 마지막 날을 제외하고는 동풍 계열이다. 오전 풍속은 27일을 제외하고는 평균 풍속 이하이기는 하나 25일부터 28일까지 4일간 정체 조건 기준인 1.5 m/s 보다는 빨라 아주 낮은 것은 없지만, 오후 풍속은 며칠을 제외하고는 오전 풍속에도 못미칠 만큼 낮아 특이하다. 온도는 1994년 여름의 성격을 반영하듯 기간 내내 35°C를 웃돌고 있고, 특히 많은 농도 지표들이 고농도 특성을 보였던 23일과 24일에는 온도가 38°C를 넘었을 뿐 아니라 운량도 16%와 8%로 낮아 광화학 반응에 이상적 조건이었음을 나타내고 있다. 1994년 7월 고농도 오존 사례에서 120 ppb를 넘었던 측정소를 살펴보면, 오전 정체 조건에서 구로(2), 오류(2), 반포, 권선(3), 심곡, 내(3)들이, 오전 동풍 조건에서 오류, 심곡(2), 내들이 기록되고 있으며, ()안의 숫자는 고농도 일수이다.

3. 3. 3 1994년 8월 사례

표 5의 오전 풍속에서 볼 수 있는 것과 같이 1992년 7월 사례에서는 7일 중 5일이, 1994년 7월 사례에서는 9일 중 5일이 오전의 정체 조건에서 고농도가 형성되는 등 풍향 조건의 고농도 사례에서도 정체 조건의 비율이 매우 높다. 그럼에도 1994년 8월 22일부터 24일까지 3일을 제 3의 사례로 선정한 이유는 이 기간 중 23일과 24일 양일에 걸쳐 322 ppb와 243 ppb 등 지난 8년간 가장 높은 농도들이 기록되었고,¹⁾ 대상지역 내 다수의 다른 측정소에서도 120 ppb 이상 고농도가 나타났으나(표 3), 200 ppb를 넘는 고농도는 광화학 측정소에 국한되어 매우 국지적이기 때문이다(그림 5). 즉, 정체 조건의 특성이 잘 나타나 있을 뿐 아니라 국지 영향이 큰 대표적 측정소로 추정되는 광화학의 고농도 특성을 조사할 수 있는 전형적 사례로 인식되었기 때문이다.

표 4(c)의 160 ppb 초과 측정소 수와 시간 수는

1) 이상치의 가능성에 대하여서는 김영성(1999)에서 점검하였으며, 이들 고농도를 비롯한 해당 기간의 서울, 수도권 농도 변화 및 기상 변화에 대하여서는 오현선과 김영성(1999)를 참조할 수 있다.

기간 내 160 ppb를 초과하는 고농도가 광화문에 국한되었음에도 이와 같은 고농도가 상당 시간 지속되었음을 보여 주고 있다. 그러나 8월 23일 초과 시간 빈도 분포에서 광화문에 국한된 160 ppb 초과 시간수 8을 제외하여도 120 ppb 초과 시간수가 7이 되어 앞의 두 사례의 여타 일들과 비교하여 결코 적지 않다. 결국 8월 23일은 광화문을 제외하여도 서울, 수도권 외의 오존 농도가 전체적으로 상당한 수준이었음을 의미한다.

8월 22일과 23일 이틀동안 120 ppb를 초과한 측정소는 이를 모두 120 ppb를 초과한 광화문을 비롯하여, 서울 동부의 성수, 잠실, 방이, 그리고 서쪽의 삼곡, 내 등으로 고루 분포되어 있다. 표 5의 22일과 23일 오전 풍속에서 볼 수 있는 것과 같이 이들은 모두 정체 조건에서 비롯된 고농도들이다. 그러나 표 5의 기상 자료에서 표 4(c)의 고농도 현상을 설명할 만큼 특이한 현상을 발견하기는 쉽지 않다. 농도가 특히 높았던 8월 23일을 집중적으로 살펴보아도 풍속이 오전과 오후 모두 7. 8월 평균보다 다소 낮으나, 온도가 31°C를 약간 넘고 평균 운량이 약 40%로 그리 맑지도 않아 평범하다. 즉, 표 5의 기상 조건이 보여주는 한 8월 23일은 서울, 수도권 지역에서 고농도 오존이 나타날 특별한 이유가 없으며, 광화문에서 322 ppb까지 상승할 이유는 더욱 없다. 배출을 추정할 수 있다면 지역을 국한시킨 상자 모델을 이용하여 해석을 시도할 수도 있다. 우리와 대기환경이 유사한 유럽에서 EUMAC (European Modeling of Atmospheric Constituents)의 일환으로 시도되고 있는 수평거리 수 백 m 격자 크기의 미세 기상과 대기질 모델링도 정체 조건의 국지 배출의 영향을 상세하게 취급할 수 있다는 점에서 참조할 필요가 있다 (Moussiopoulos *et al.*, 1997).

4. 고농도 사례 연구의 전제 조건

서울, 수도권 지역 오존 고농도 발생의 가장 큰 특징의 하나는 수 km 내 인접한 측정소 사이에서도 그림 3에서 볼 수 있는 것과 같이 고농도 발생 양상이 전혀 다르다는 점이다. 김지영 등 (1996b)은

95. 7. 22 불광동에서의 고농도 발생, Kim 등 (1998)은 94. 7. 24 내동에서의 고농도 발생을 시간에 따른 국지 바람장 변화를 고찰함으로써 성공적으로 설명하였음에도 불구하고 더 많은 지점에서의 농도 변화는 영역 내 전체 바람장 변화와 거의 무관하였다. 만일 대체적 경향으로 충분히 고농도를 예측할 수 있다면 현재의 해상 능력으로 결코 취급이 쉽지 않은²⁾ 이 정도의 변화를 무시할 수 있다. 그러나 94. 8. 23의 예에서 볼 수 있는 것과 같이 그림 3과 표 3은 영역 내 전반적 변화와 별도로 국지 변화에 의하여 고농도가 발생할 수 있음을 강하게 암시하고 있다. 결국 서울, 수도권 지역 내 인접한 측정소 사이의 변화를 구별할 수 있어야 서울, 수도권 지역의 고농도 발생을 이해하고 대처할 수 있다는 추론이 가능하다.

그러나 국내의 현실 여건은 이와 같은 연구를 진행하기에 매우 불리하다. 다음은 우선 생각할 수 있는 연구에 필요한 전제 조건을 정리한 것이다.

첫째, 상세한 국지 바람장을 확인할 측정치가 주어지지 않고 있다. 김지영 등 (1996b)은 서울 지역에 설치된 23개 자동기상관측(AWS) 자료를 이용하였다고 보고하고 있으나 외부로 자유롭게 공개되는 자료가 아니다. Sunwoo 등 (1997)은 서울 지역 대기질 측정소에서 측정된 풍향, 풍속 자료를 이용한 것으로 보고하고 있으나 역시 외부로 공개되지 않고 있다. 만일 AWS와 고정 측정소 등 40여개 지점의 풍향, 풍속 자료를 자유롭게 이용할 수 있다면 해석적 접근이든, 예측적 접근이든 지금보다 훨씬 상세하게 서울 지역의 바람장 변화를 이해할 수 있음은 물론이다. 최근 김진영 등 (1999)이 서울, 인천지역을 대상으로 1996년과 1997년 2년간의 AWS 자료를 점점한 결과에 의하면 1997년 자료는 소수의 이상치를 제외하면 이용할 만하다. 그동안 대기질 측정소의 풍향, 풍속 자료를 점점하여 이용 가능성이 판명된다면 정체 기준 농도를 1.5 m/s 보다 낮추어 서울, 수도권 내 측정소별 오염물질 이동 조사도 시도할 수 있다.

둘째, 배출원 자료를 광화학 모델링에 적합한 형태로 정비하여 데이터베이스화 하여야 한다. 현재

2) 예를 들어 UAM의 경우, 주요 모델 체계와의 불일치 가능성 때문에 2km 이하의 격자 사용은 권하지 않고 있다(USEPA, 1991)

발표되고 있는 배출원 자료는 자료 자체의 부정확성보다 정비체계의 미비에 따른 수정, 보완 작업의 어려움이 더욱 심각한 문제이다(김진영 등, 1998). 대부분의 조사가 일과성으로 진행됨에 따라 조사는 언제나 처음부터 시작하여 비슷한 수준에서 종료된다. 그러나 미국의 예에서도 볼 수 있는 것과 같이 배출원 자료는 ① 복수의 연구팀이, ② 가능한 부분부터, ③ 협동 작업으로 정비하여야 하며, ④ 지속적으로 수정, 보완되어야 한다(NRC, 1991). 당장의 결과를 기대하기 보다는 점, 선, 면오염원 등 오염원별 특성을 감안하여 자료 정비체계를 갖추어야 한다.

셋째, 고정 측정소에서 측정되는 NO 자료를 공개하여야 한다. NO가 환경기준 물질이 아니므로 공개할 필요가 없다고 생각할 수 있으나 광화학 오존의 반응물으로써 NO는 질소산화물의 배출을 가능할 수 있는 핵심 물질이다. 최소한 연구자들에게 만이라도 자료가 제공되어야 한다.

마지막으로 사소한 사항일 수 있으나 오존 주의보 발령이 120 ppb 이상으로 지정되어 일정 농도 초과를 계산하는 일반적 관례와 다르다. 이에 따라 본 연구에서도 표 4에서는 일반 관례에 따라 '초과'를, 나머지 자료에서는 '이상'을 기준으로 농도를 분류하였는데 특별한 이유가 없다면 일반 관례를 따르는 것이 나을 것으로 생각된다. 그밖에 대기 중 휘발성 유기화합물 농도 측정, 광화학 모델링에서 수 km 이내로 격자 간격을 줄이고자 할 때 예상되는 수평 확산계수의 조정, 점오염원 배출물의 처리 등은 적절한 지원과 함께 연구자들이 노력하여 해결하여야 할 부분들이다.

5. 결 론

1990년부터 1997년까지 서울, 수도권 내 대기질 측정소와 서울 기상청의 측정 자료를 이용하여 오전의 풍향, 풍속, 일 최고 오존 농도를 토대로 1992년 7월, 1994년 7월, 1994년 8월 등 고농도 사례 셋을 선정하였다. 1992년 7월 3일부터 9일까지 7일간의 고농도 사례는 특히 오후 풍속이 비교적 빠르고 서풍 계열 바람이 주류를 이루었다. 1994년 7월 21일부터 29일까지 9일간의 고농도 사례는 기온이 35°C 이상이고 오후에도 풍속이 낮으며 동풍 계열

바람이 많았다. 1994년 8월 22일부터 24일까지 3일은 오전의 정체 조건에서 농도가 상승한 대표적 사례로 23일, 24일 양일에 걸쳐 광화문에서 322 ppb와 243 ppb가 기록된 반면, 기온은 31°C를 약간 넘고 온량이 40%에 이르러 기록적인 고농도를 뒷받침할 만한 기상 현상은 발견되지 않았다.

오존 주의보가 발령되었을 120 ppb 이상 고농도는 전체의 82%가 오전 풍속 1.5 m/s 미만의 정체 조건에서 발생하였다. 정체 조건에서 발생한 고농도가 풍향 조건의 고농도보다 농도가 높을 뿐 아니라 고농도의 범위도 넓었다. 서울 남서쪽의 심곡 등 4개 측정소의 고농도가 동풍 조건에서, 서울 동부의 방이와 춘천 조운의 고농도가 서풍 계열의 풍향 조건에서 발생하는 경향을 보여 서울이 주변 지역 농도 상승의 원인이 될 수 있음을 암시하였으나 뚜렷하지는 않았다. 결국, 서울, 수도권의 광화학 오존 농도는 정체 조건에서 국지 배출에 의하여 상승하며, 특히 서울이 그러하였다. 정오의 풍속을 기준으로 풍속에 따른 일 최고 농도의 상대적 변화를 미국의 주요 도시들과 비교한 결과 서울, 수도권의 농도 감소는 국지 배출의 영향이 큰 것으로 알려진 남부 도시들과 유사한 수준이었다.

본 연구에서 제시된 고농도 사례들은 향후 오존 농도 상승 원인 조사와 저감 대책 연구에 기준 사례로써 이용될 수 있다. 그러나 이를 위하여서는 무엇보다도 정체 조건에서 국지 배출에 의하여 비롯되는 서울, 수도권 지역의 복잡한 국지 변화를 재현할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 고농도 사례 연구의 전제 조건으로 미세 규모 바람장 구성을 위한 풍향, 풍속 측정자료의 이용, 배출 자료 체계 정비, NO 측정치 공개 등을 거론하였다. 이 중에는 NO 측정치 공개와 같이 쉽게 개선이 가능한 부분도 있으나, 배출 자료 체계 정비는 절대적으로 장기적 투자가 필요한 부분이다. 정체 조건의 수 km 이내 국지 변화 모델링 역시 난제 중의 하나이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김병곤, 한진석, 황동진, 최덕일 (1995) 수도권 지역에서 고농도 오존사태에 대한 연구. 한국대기보전학회 추계학술대회, 11, 10-11. 조선대학교, 논문 번호 E-5.
- 김영성 (1997) 1990~1995 서울·수도권 지역의 광화학 오염현상, 한국대기보전학회지, 13, 41-49.
- 김영성 (1999) 오존 자동측정망 자료 중의 이상치 판정, 한국대기환경학회지, 15, 139-150.
- 김용국, 이증범, 김태우 (1996a) 광화학 확산모델에 의한 수도권 지역의 대기질 모사. 한국대기보전학회 춘계학술대회, 4, 12-13. 전국대학교, 논문 번호 F-4.
- 김지영, 조하만, 김 산, 정순화, 남재철 (1996b) 서울의 지상오존농도 분포 및 이와 관련된 지상 바람장 추정, 한국대기보전학회 춘계학술대회, 4, 12-13. 전국대학교, 논문 번호 F-5.
- 김진영, 김영성, 김용표 (1998) 수도권 지역 주요 대기오염 물질 배출원 자료 현황 분석, 한국대기환경학회지 (심사 중)
- 김진영, 김영성, 정관영 (1999) 서울·인천 지역 자동기상 관측 바람 자료의 특성 분석, 한국기상학회지 (준비 중).
- 오원선, 김영성 (1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 중관 기상 특성, 한국대기환경학회지 (심사 중).
- 이증범, 방소영 (1997) 1997년 6월 수도권 지역의 오존 Episode 사례 분석, 추계학술대회, 11, 14-15, 동신대학교, 논문 번호 E-3.
- 정용승, 정재섭 (1991) 서울 수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지 7, 169-179.
- 한진석, 박일수, 김병곤, 김정수, 서홍원, 나진균, 최덕일 (1996) '96년 서울에서의 스모그 현상 사례 연구 (6/8~6/13), 한국대기보전학회 추계학술대회, 10, 18-19, 호서대학교, 논문 번호 C-7.
- 한진석, 김병곤, 신찬기, 조병환 (1995) 광화학확산모델에 의한 오존농도 시뮬레이션과 배출량의 민감도 분석, 한국대기보전학회 추계학술대회, 11, 10-11, 조선대학교, 논문 번호 F-6.
- Cassinassi, J.C. (1998) Comparison of meteorological criteria characterizing 1-hour and 8-hour average ozone episodes in the South Coast Air Basin. A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14-18, San Diego, CA, Paper No. 98-TAB.11P.
- Kim, J.Y., Y.S. Ghim and Y.P. Kim (1998) Photochemical modeling of July 1994 episode in the Metropolitan Seoul Area. A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition, June 14-18, San Diego, CA, Paper No. 98-WPD 03P.
- Husar, R.B. and W.P. Renard (1997) Ozone as a Function of Local Wind Speed and Direction : Evidence of Local and Regional Transport, OTAG Technical Report [URL <http://capita.wustl.edu/OTAG>].
- Moussiopoulos, N., P. Sahn, R. Kunz, T. Vögele, Ch. Schneider, and Ch. Kessler (1997) High-resolution simulations of the wind flow and the ozone formation during the Heilbronn ozone experiment, *Atmospheric Environment*, 31, 3177-3186.
- NRC (National Research Council) (1991), *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*. National Academy Press, Washington, D.C.
- OTAG (Ozone Transport Assessment Group) (1997) Air Quality Analysis Working Group Final Reports, Vol. I Executive Summary, Vol. II : Summary and Integration of Results, Vol. III : Summaries of Individual AQAWG Analyses [URL <http://capita.wustl.edu/OTAG>].
- Radian Corp. (1991) Enhanced Ozone Monitoring Network Design and Siting Criteria Guideline Document, Final Report to U.S. Environmental Protection Agency Under Contract No. 68DO0125. Research Triangle Park, NC.
- Sunwoo, Y., K.J. Kim and K.A. Lee (1997) Characteristics of urban ozone behavior in Seoul, Korea. A&WMA's 90th Annual Meeting & Exhibition, June 8-13, Toronto, Ontario, Canada, Paper No. 97-PA111.02.
- U.S. Environmental Protection Agency (1989) Procedures for Applying City-Specific EKMA, EPA-450/4-89-012, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC
- U.S. Environmental Protection Agency (1991) Guideline for Regulatory Application of the Urban Airshed Model, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.