

오존의 환경기준 초과양상에 대한 연구

김민영¹ · 최여진² · 김기현^{2,*}

¹서울시 보건환경 연구원, ²세종대학교 지구정보과학과 대기환경연구실

The Exceedance Patterns of O₃ Air Quality Standards from 31 Monitoring Stations in Seoul

Min-Young Kim¹ · Ye-Jin Choi² · Ki-Hyun Kim^{2,*}

¹Seoul Metropolitan Government Institute of Health and Environment

²Department of Geoinformation Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

Abstract: In this work, we investigated the ozone data sets that exceeded ambient air quality standards from 31 air quality monitoring stations dispersed across the Seoul metropolitan city during the period covering 1990 and 2000. To specifically describe spatial dependency of high level O₃ occurrence, we grouped our data into four different geographical sectors (NE, SE, SW, and NW). When the results were examined at 24-h scale, we confirmed that the duration for ozone exceedance is much longer in SW than the other three sectors. When we compared the exceedance data in terms of occurrence frequency, the month of maximum frequency differed slightly among different sectors. Examination of long-term exceedance trend indicated that its frequency increased continuously from all sectors over the past years, although slightly opposite patterns existed in their absolute values. Most importantly, its peak occurrence frequency seemed to center in very recent years such as 1998 (NE sector) and 2000 (all pattern sectors except NE). Consequently, we were able to describe the existence of certain patterns of ozone exceedance data sets in terms of both temporal and spatial scales.

Keywords : exceedance, statistics, ozone, criteria pollutant

요약 : 본 연구는 1990년부터 2000년까지 11년의 기간동안 서울지역 대기오염 자동측정망을 중심으로 관측된 오존자료 중 환경기준을 초과한 자료만을 선별적으로 분리한 후 분석에 활용하였다. 이와 같은 분석결과를 토대로 서울시의 4대 권역별 (NE, SE, SW, NW) 기준초과양상을 여러 가지 관점에서 비교해 보았다. 24시간을 주기로 초과농도의 발생 경향을 비교해 본 결과, SW지역이 다른 지역에 비해 오존의 총 발생시간이 더 많은 것을 확인할 수 있었다. 발생빈도를 중심으로 4대 지역에 대한 월별 경향성을 비교했을 때 NW지역에서 여타 지역보다 최고빈도의 발생시기가 약간 뒤처지는 현상이 나타났다. 해를 거듭할수록 오존의 환경기준 초과발생횟수가 증가하는 경향을 감지할 수 있다. 특히 이와 같은 현상은 NE, SE를 포함하는 서울의 동쪽지역에서 두드러지는 것으로 나타났다. 전체 11년동안 초과치의 최고 발생빈도를 지역별로 비교해 보면, NE지역에서 1998년에 그리고 나머지 세지역은 모두 2000년에 나타났다. 이처럼 오존의 환경기준 초과횟수는 최근에 들어 급격히 증가하는 것으로 확인되었다. 이에 반해, 초과농도의 크기에 대한 결과를 보면, 오히려 90년대 초반에 고농도가 집중된 데 반해, 90년대 후반에는 상대적으로 초과농도의 크기가 감소한 것으로 나타났다. 전체 관측기간동안 서울지역에서 관측된 평균 기온자료를 이용하여 오존초과자료와의 상관성을 분석하였다. 그 결과 대체로 크기나 빈도에 상관없이 모두 기온과 일정 수준 이상 양의 상관성을 유지하는 것이 확인되었다. 전반적으로 기온의 변화는 오존의 초과농도발생과 상당 수준 연계되었다는 점을 확인 할 수 있었다.

주요어 : 초과, 통계, 오존, 기준성 오염물질

서 론

최근 고체연료에 대한 사용 규제지역의 확대, 저황유의 사용의무화, LNG 등 청정연료의 공급증가 등과 같은 요인들의 복합적인 영향으로 인하여, 아황산가스, 분진 등을 위시한 일부 1차 오염물질의 농도저감이 체감할 수 있을 정도로 개선되고 있다고 밝혀진 바 있다(Bravo, 2000). 반면 급속한 차량의 증가와 같은 요인들의 영향으로 질소산화물, 비메탄계 탄화수소 등의 배출량이 급격하게 증가하였다. 이러한 부정적인 현상의 영향으로 인해 이들 오염물질과 태양빛(자외선)의 반응을 통해 2차 오염물질의 농도가 급증하는 광화학 스모그의 발생이 점차 가시화되고 있다(Calvert *et al.*, 1993). 광화학 대기오염을 일으키는 옥시단트를 대표하는 오존은 산화력이 매우 강한 물질에 해당한다. 이러한 성분에 고농도로 장시간 노출되면 인체에 심각한 해를 받는 것으로 잘 알려져 있다(Wang, 2001). 오존은 그 자체가 대기질에 대한 주요 기준 항목으로 간주될 뿐 아니라, 동시에 이산화질소, 부유분진, 산성안개, 산성비 등의 2차 대기오염현상에 깊게 관여하고 있다(김유근, 1996). 이와 같은 일반적인 특성 외에도 오존의 환경화학적 중요성은 이산화탄소보다도 훨씬 강력한 온실 효과를 일으킨다는 점에서도 익히 주목을 받고 있다(Coffin and Stokinger, 1977).

최근 많은 국가에서 오존을 대기질 개선 정책의 수립에 대표적인 지표로 채택하고 있다(박찬진, 1999). 우리나라에서도 환경기준치를 정하여 최고농도를 규제하고 있으며, 1995년 7월부터 서울지역을 대상으로 오존경보제가 실시되고 있다(전병일, 1999). 특히 서울시나 경기도를 위시한 대도시 지역에서 오존의 농도가 환경기준치를 초과하는 현상이 빈번하게 발견되고 있어 중요한 사회적 현안으로 대두되고 있다(한진석, 1996). 이러한 문제의 중요성이 월드컵 유치 등과 같이 중요한 국가적 행사와도 맞물려 단순히 환경적 차원의 수준을 뛰어 넘은 긴급한 현안으로 취급되기 시작하였다. 본 연구에서는 서울시내 소재한 광화문, 남가좌, 오류 등 31개 지역의 대기환경 관측망을 통해 지난 90년이래, 관측된 오존의 환경기준치 초과자료를 이용하여, 오존의 초과농도가 발생하는 메커니즘을 규명할 수 있는 기반을 제시하고자 하였다. 이를 위해 이들 성분의 과다발생 현상에 대한 경향성을 여러 가지 시공간적 기준으로 구분하고,

이에 대한 통계적인 분석을 시행하였다.

연구방법

본 연구에서는 2000년 말 시점을 기준으로 환경부와 서울시가 운영중인 서울시내 31개 지역 대기오염 자동측정망을 중심으로 1990년부터 2000년까지 11년 동안 관측한 오존자료 중 대기환경기준을 초과한 오존의 농도자료만을 선택적으로 분리하여 통계적인 경향성을 분석하였다. Table 1에는 모든 측정대상 지점의 목록과, 각 지점의 오존 측정 개시 시점 등에 대한 세부정보를 제시하였다. 먼저 환경부에서 제시하는 오존의 기준치를 살펴보면, 1시간 평균치는 100ppb 이하이고, 8시간 평균치는 60ppb 이하로 규정하고 있다. 참고로 이와 같은 기준들은 일본이나 WHO 등에서 제시하는 설정 기준과 유사하다(환경부, 2000). 이들 측정망에서 오존의 측정은 자외선 광도법(Ultra Violet Photometric Method)으로 이루어졌다(환경부, 2001).

본 연구에서는 관측대상점이 서울시 전역에 산재한다는 점을 감안하여, 오존의 농도기준 초과현상을 보다 체계적으로 설명하기 위해 다음과 같이 접근하였다. 서울시 전체를 방위별 배치에 기초하여 다음과 같이 4개 권역으로 나누었다. 먼저 한강을 기준으로 북과 남으로 나누고, 다시 서울의 도심지역을 기준으로 동과 서를 분리하였다(Fig. 1). 이러한 분류방식을 적용하면, 북동(NE)지역은 구의, 성수, 방학 등 8지역, 남동(SE)지역은 반포, 방이, 천호 등 6지역, 남서(SW)지역은 구로, 화곡, 궁동 등 9지역, 북서(NW)지역은 남가좌, 한남, 이화 등 8지역을 포함한다. 한시간 기준의 초과농도자료를 중심으로 월, 계절, 연도별로 자료 집단을 구분한 후, 각각의 자료집단에 대한 농도자료를 통계적으로 처리 분석하였다. 이와 같은 분석결과를 토대로 4대 권역별 기준초과양상을 여러 가지 관점에서 비교해 보았다. 이차적으로 이와 같은 분석에 병행하여, 8시간 기준에 준한 초과농도 자료를 이용한 비교도 동시에 시도하였다. 8시간 평균 오존농도는 하루 24시간을 3등분하여 오전(1시~8시), 오후(9시~16시), 저녁(17시~24시)으로 나누어 비교해 보았다. 각 구간별로 6시간 이상 측정이 이루어진 자료를 유효측정 8시간 기준에 준하는 것으로 하였다. 마지막으로 기온자료를 이용하여, 오존의 기준 초과 현상과 환경변수와의 관계를 세밀하게 진단해

Table 1. The site code information of 31 air quality monitoring stations located within the city boundary of Seoul. The exceedance data for each station were compared among four different sectors divided on the basis of their geographical locations.¹⁾

Station Code	Station No. ²⁾	Site Name	Site abbreviation	Land-use type ³⁾	Initiation of measurement
					O ₃
(1) Stations at NE sector					
A1	4	Guui	GU	R	PT90 ⁵⁾
A2	7	Seongsu	SS	C	PT90
A3	8	Banghak	BH	R	1 Jan 92
A4	15	Beon-Dong	BD	R	1 Jan 98
A5	17	Sanggye	SG	R	1 Jan 98
A6	19	Myeonmok	MM	R	PT90
A7	20	Sinseol	SS2	R	PT90
A8 ⁴⁾	26	Ssangmun	SM	R	PT90
(2) Stations at SE sector					
B1	6	Banpo	BP	R	PT90
B2	9	Bangi	BI	G	PT90
B3	12	Cheonho	CH	C	1 Jan 98
B4	24	Daechi	DC	R	PT90
B5	25	Jamsil	JS	R	PT90
B6	31	Yangjae	YJ	R	PT90
(3) Stations at SW sector					
C1	1	Guro	GR	I	PT90
C2	2	Hwaguk	HG	R	1 Jan 92
C3	5	Gung-Dong	GD	I	1 Jan 92
C4	13	Sadang	SD	R	1 Jan 98
C5	14	Siheung	SH	R	1 Jan 98
C6	16	Sinjeong	SJ	R	1 Jan 98
C7	23	Mullae	ML	I	1 Jan 92
C8	30	Oryu	OR	R	PT90
C9	28	Gwanak Mt.	GA	R	PT90
(4) Stations at NW sector					
D1	3	Namgajwa	NG	R	PT90
D2	10	Hannam	HN	R	PT90
D3	11	Ehwa	EH	R	1 Jan 98
D4	18	Gwangwhamun	GH	C	-
D5	21	Bulgwang	BG	R	PT90
D6	22	Mapo	MP	R	PT90
D7	27	City Hall	CH	R	PT90
D8	29	Gireum	GE	R	PT90

¹⁾For information concerning geographical locations of those four sectors, refer to Fig. 1;

²⁾The simple numerical numbers designated for each station are original code used by Seoul city;

³⁾The capital letters of G, R, C, and I used for land-use type denote grassland, residential, commercial, and industrial, respectively;

⁴⁾For station A8, measurement data are available only up to the end of the year 1997.

⁵⁾PT demoter "prior to"

보았다. 이와 같은 자료는 오존의 환경기준초과 현상이 어떠한 요인들에 의해 조절되는가를 여러 가지 관점에서 해석할 수 있는 기반을 제공할 것으로 기대된다. 본 연구는 본 연구진이 선행연구의 일환으로

제시한 NO₂와 O₃의 관측지점별 초과농도발생의 경향성 분석과 달리 오존에 국한하여 광역적 경향성을 보다 체계적으로 분석하였다는데 의의가 있다.

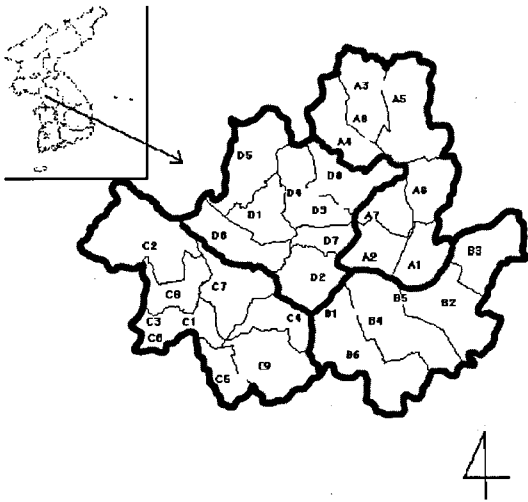


Fig. 1. A map of geographical location of air quality monitoring stations. All of these stations were eventually grouped into: (1) NE: A1~A8; (2) SE: B1~B6; (3) SW: C1~C9; (4) NW: D1~D8.

결과 및 토론

전체적인 경향

전체 관측기간인 1990년도부터 2000년까지 모든 측정망들에서 관측된 오존의 환경기준 초과 경향성을 알아보기 위한 가장 기본적인 접근방법으로, Table 2에 제시한 바와 같이 1시간 기준초과 농도자료를 이용하였다(그리고 이에 덧붙여 8시간 기준초과 농도자료에 대한 분석도 추가하였다). 앞에서 제시한 4대 권역별 비교에 앞서 먼저 개별 측정점들에 대한 기준치의 초과 발생빈도를 우선적으로 분석해 보았다. 전체 연구기간 동안 1시간 환경기준치인 100ppb를 가장 빈번하게 초과한 지역은 A3(N=230, 115.1 ± 13.9ppb)으로 나타났다. 그 뒤를 이어 B2(N=208, 115.1 ± 14.8ppb), C1(N=107, 119.8 ± 24.7ppb)이 따랐다. 빈도에 상관없이 1시간 기준의 환경농도를 초과한 모든 지역에서 산출한 평균농도의 크기를 비교해 본 결과, C1(119.8 ± 24.7ppb, N=107)과 D7(119.6 ± 11.5ppb, N=12)에서 가장 높은 초과농도를 나타냈다. 초과농도의 최저값은 D8(102.5 ± 2.1)으로 확인되었다. 초과자료의 최대 및 최저 평균농도를 감안하면, 전체적으로 초과자료의 차이는 크지 않았다. 실제로 대부분의 지역에서 비교적 균일하게 110ppb를 상회하는 초과농도를 기록하였다.

8시간 기준으로 초과농도의 발생경향을 절대값의 크기와 발생 빈도수를 기준으로 비교하여 보았다. 8시간 기준치는 위에서 설명한 것과 같이 오전, 오후, 저녁으로 구분하였다. 대부분 오후 시간에 초과횟수가 집중적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 오전에 가장 많은 초과횟수를 보인 곳은 C1(N=3, 74.3 ± 13.6ppb)이었으나, 초과횟수가 3회에 그치고 있다. A3은 오후(N=103, 69.9 ± 7.8ppb)와 저녁(N=38, 69.9 ± 9.0ppb) 시간대에 다른 지역에 비해 가장 많은 초과횟수를 보이는 지역으로 나타났다. 초과농도는 오전엔 C1(74.3 ± 13.6ppb, N=3), 오후엔 A1(77.8 ± 95.8ppb, N=95), 저녁 시간대엔 C1(78.7 ± 18.0ppb, N=7) 지역에서 가장 높게 나타났다.

본문에서는 오존의 초과발생 경향을 단순히 관측점별 개별 초과양상을 비교하는 수준에서 탈피하여, 이미 소개한 바와 같이(서울시를) 4대 권역으로 구분한 상황에서 오존오염현상의 양상을 파악하고자 하였다. (또한 각 권역별로 속해있는 각 관측점수가 서로 다르다는 점을 감안하여, 비교적 동일한 조건에서 비교를 피하였다.) 이를 위해, Fig. 2에서 전체 연구기간 동안 초과농도의 발생양상을 4대 권역 기준으로 분류하였다. 1시간 기준의 초과자료를 이용하여 4대 지역 각각에 대하여 초과농도가 존재하는 시간대에 국한하여 시간별 평균값을 계산한 후, 이를 토대로 다시 값을 계산하였다. 이들 자료를 다시 초과농도의 크기와 초과현상의 발생빈도를 중심으로 비교해 보았다. 그 결과 양자간에는 뚜렷한 차이가 현저하게 나타났다.

우선 초과농도의 크기에 대한 결과를 비교해보면, 오히려 90년대 초반에 고농도가 집중된 데 반해, 90년대 후반에는 상대적으로 초과농도의 크기가 감소한 것이 확인된다. 이에 반해, 초과 발생빈도에 대한 경향성을 비교해 보면, 해를 거듭할수록 발생횟수가 증가하는 경향을 감지할 수 있다. 특히 이와 같은 현상은 동측(NE, SE) 지역에서 두드러지는 것이 확인되었다. 초과농도의 크기가 감소하는 현상은 지난 수십여간 주요 오염물질의 농도저감과 같이 대기질 관리가 이루어진 효과를 어느 정도 반영하는 것으로 보인다. 반면 초과농도의 발생빈도가 꾸준히 증가하는 현상은 오존이 여타 오염물질에 비해 관리가 용이하지 않은 2차오염현상의 전반적인 특성을 반영하는 것으로 간주할 수 있을 것이다.

Table 2. A statistical summary of the exceedance data for O₃ measured from all stations during the study period. Results are compared between two different criteria of 1 and 8-hr.

Station code	Station abbr.	O ₃ (1 hour)		O ₃ (8 hour)	
		MEAN±SD(N)	M	MEAN±SD(N)	A
(1) Stations at NE sector					
A1	GU	111.9±10.8 (159)	71.0 (1)	77.8 ±95.8 (95)	66.7±10.5 (9)
A2	SS	112.8±11.4 (179)		69.9 ±8.1 (68)	68.4±5.5 (8)
A3	BH	115.1±13.9 (230)	63.0 (1)	69.9 ±7.8 (103)	69.6±9.0 (38)
A4	BD	113.1±12.1 (50)		67.0 ±6.2 (19)	64.0±2.6 (3)
A5	SG	114.6±12.3 (40)		65.8 ±4.0 (17)	65.4±5.4 (7)
A6	MM	114.3±7.9 (9)		66.5 ±1.9 (6)	64.0 (1)
A7	SS2	107.0±4.2 (2)		61 (1)	71.3±6.5 (3)
A8	SM	116.3±12.7 (45)		70.79 (1)	
(2) Stations at SE sector					
B1	BP	116.6±20.3 (108)	65.0 (1)	68.31±7.4 (55)	67.1±8.9 (10)
B2	BI	115.1±14.8 (208)	62.0 (1)	70.4 ±8.7 (88)	64.8±3.6 (10)
B3	CH	114.3±11.7 (46)		67.0 ±6.9 (17)	
B4	DC	116.9±11.9 (14)		67.7 ±4.0 (7)	69.5±7.8 (2)
B5	JS	117.5±22.5 (41)		74.1 ±11.7 (11)	61.0 (1)
B6	YJ			69.5 ±6.4 (4)	
(3) Stations at SW sector					
C1	GR	119.8±24.7 (107)	74.3±13.6 (3)	72.7 ±16.3 (43)	78.7±18.0 (7)
C2	HG	114.5±14.0 (58)	71.0 (1)	68.4 ±7.8 (34)	66.0±3.2 (4)
C3	GD	115.9±13.6 (61)		69.9 ±9.0 (32)	61.2±0.4 (5)
C4	SD	109.2±9.2 (33)		66.7 ±5.0 (14)	71.2±9.0 (6)
C5	SH	104.7±3.4 (10)		65.7 ±4.5 (7)	
C6	SJ	108.6±8.0 (42)		65.5 ±5.1 (20)	64.2±2.9 (6)
C7	ML	111.3±11.2 (12)		74.6 ±6.6 (5)	63.5±3.5 (2)
C8	OR	115.9±9.3 (7)		69.4 ±5.5 (5)	63.0 (1)
C9	GAS	106.0±2.9 (8)		64.3 ±2.3 (3)	73.6±13.2 (5)
(4) Stations at NW sector					
D1	NGJ	114.1±12.0 (60)		69.3 ±8.8 (43)	
D2	HN	109.8±8.8 (77)	68±7.1 (2)	67.5 ±5.5 (35)	72.3±14.0 (3)
D3	EH	110.0±8.8 (46)	71.0 (1)	65.7 ±5.2 (26)	62.8±2.4 (4)
D4	GHM	-		67.6 ±6.2 (8)	68.5±5.0 (2)
D5	BG	110.4±9.7 (19)		64.4 ±1.5 (5)	
D6	MP	112.0±5.9 (10)		71 ±9.9 (2)	63.0 (1)
D7	CH	119.6±11.5 (12)			
D8	GE	102.5±2.1 (2)			

*For 8-hr basis, the data were measured at three intervals of morning (M: 0AM~8AM), afternoon (A: 8AM~16PM), and night (N: 16PM~0AM).

4대 지역간 24시간 경향비교

서울시의 전체 관측망에서 관측한 오존의 1시간 환경기준 초과치를 이용하여 기준농도초과 양상을 앞서 언급한 관측 구간별로 비교해보았다. 환경기준을 초과하는 발생빈도는 각 지역별 관측점 수로 초과빈도수를 나누어 준 후, 24시간 기준으로 도식하였다 (Fig. 3)이와 같은 부가적인 처리는 4대 구간별 관측점의 숫자의 차이로 인한 편차를 경감하는데 유용한

것으로 나타났다.)

이러한 비교를 시도한 결과, 각 지역별로 오존농도의 초과현상이 발생하는 일 중 시간대에 어느 정도 근소한 차이가 있는 것으로 나타났다. 오존의 총 발생시간은 NE 지역(6, 11~21시, 총 12시간), SE지역(12~20시, 총 9시간), SW지역(1, 2, 9, 11~21시, 총 14시간), NW지역(7, 12~19, 21시, 총 10시간)으로 나타났다. 이처럼 SW지역에서 다른 지역에 비해 더 긴

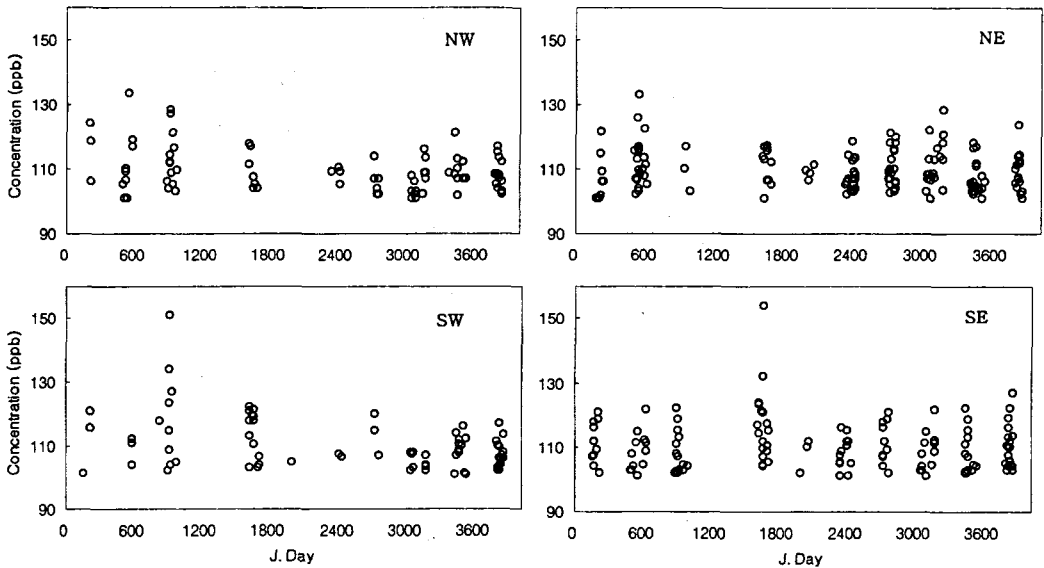


Fig. 2(a). Time-series plot of O₃ exceedance data sets. Daily mean values of concentration were derived using hourly exceedance data sets for a given sector.

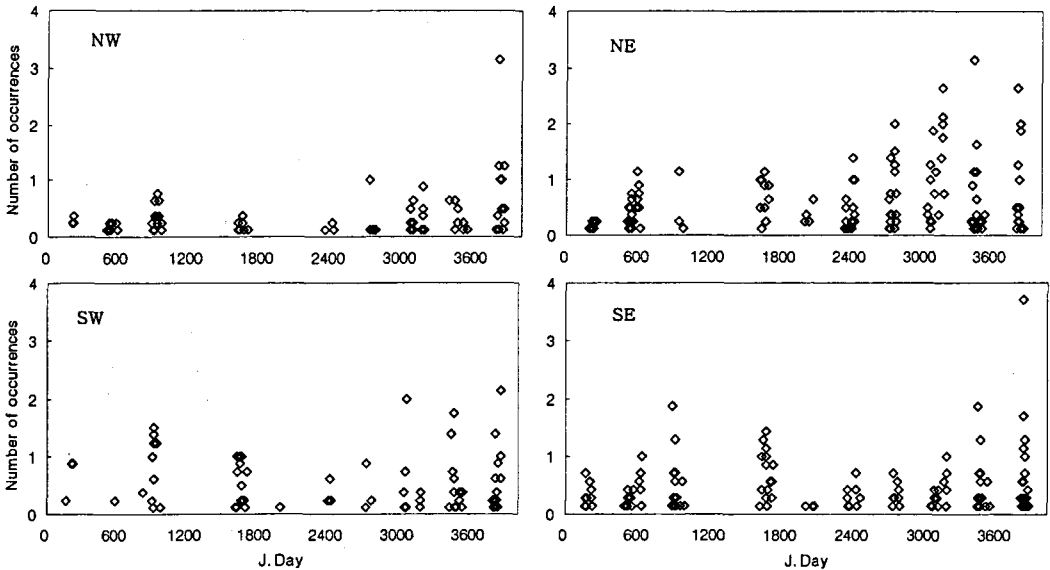


Fig. 2(b). Same as Fig. 2(a) but in frequency.

일 중 초과시간을 유지하는 것은 SW지역에 속해 있는 김포공항과 같은 대규모 면오염원의 영향이 어느 정도 반영된 것으로 사료된다. 국제공항이 인천으로 이전하기 전 보잉747 점보제트기가 김포공항에서 하루 평균 92차례 운행하였다. 이 때마다 김포공항 주변에는 승용차 5천대가 하루 종일 내뿜는 양과 같은 47.7kg 규모의 질소산화물이 배출되는 효과를 보이는

것으로 예측되었다(환경부, 2002). 이와 같은 현상의 원인은 이미 Blacet(1950)과 Haagen-Smit(1953)이 밝힌 바와 같이 오존의 생성과정은 태양복사 또는 질소산화물과 유기물의 역할에 관계한다는 것으로부터 설명하는 것이 가능할 것이다. SW지역의 발생경향에서 또 한가지 유의할 점은 새벽 1~2시 사이에 발생 농도가 증가하는 현상을 들 수 있다. 이러한 시간대

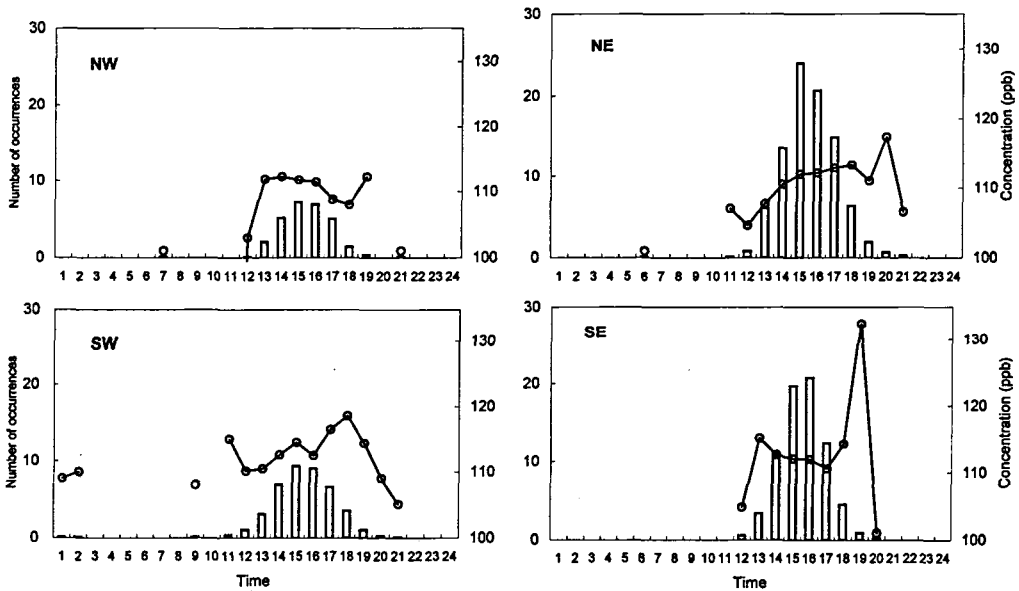


Fig. 3. Comparison of diurnal variation in O₃ exceedance data sets using hourly exceedance data collected for each of four sectors in Seoul. Frequency plot is given as bar chart, while concentration is shown as line chart.

에 오존의 초과현상은 새벽에 발생한 강한 바람으로 기류의 연직혼합이 일어나고, 이로 인해 대기경계층에 잔존해 있던 오존이 유입하여 일시적인 상승을 초래한 것으로 보인다(전병일, 1999). 각 지점별로 하루 중 최고빈도수를 보이는 시간은 NE, SE, NW 지역이 15시이고, SW지역이 16시로 최고빈도가 발생하는 시간은 거의 일정한 경향을 유지하는 것으로 보였다. 또한 이때의 초과농도는 4지역 모두 약 112 ppb로 일정한 수준을 유지하였다.

이들 초과자료를 발생빈도에 상관없이 평균농도를 중심으로 그 경향성을 비교해본 결과, 빈도수에서 보이는 경향성과는 뚜렷하게 차이를 보였다. 우선 그 경향이 대단히 불규칙적이라는 점에 유의할 필요가 있다. 특히 최고농도가 나타나는 시간과 초과빈도의 발생경향을 동일한 관점에서 비교해 보면, SW지역에서는 18시로 상당한 차이가 확인된다. 각 지역에서 하루 중 최고농도를 나타내는 시간은 SE, NW지역에서는 19시, NE 지역에서 20시로 발생빈도의 경향성 비교에서 확인한 것과는 달리, 최고농도의 발생시간은 지역적 편차가 확인된다. 이들의 발생은 상대적으로 훨씬 늦은 오후시간대 또는 이른 저녁 시간대에 집중되는 것으로 나타났다. 참고로 초과자료에 대한 절대농도값의 시간적 경향과는 달리, 일반적인 농도 자료를 보면 최고농도를 나타내는 시점이 지나면 일

사량이 줄어들면서 오존농도가 급격히 하강하는 것이 일반적이다(전병일, 1997; Bravo, 2000). 그런데 초과 자료의 경우, 서울시의 전역에서 대체로 20시를 전후해서 고농도가 지속되고 있으므로, 초저녁시간대에 고농도 오존을 초래하는 원인을 찾아내는 것도 앞으로의 과제로 대두된다.

4대 지역간 월별 및 계절별 경향성의 비교

1시간 초과치를 이용하여 4대 권역에서 월별 환경기준 초과 경향을 앞의 비교방식과 같이 관측점의 숫자로 표준화 한 후 비교해 보았다(Fig. 4). 우선 발생빈도를 중심으로 비교해 보면 NE, SW, NW 지역은 4월에 처음 환경기준을 초과하는 사례가 목격되기 시작한 후, 9월까지 지속적으로 관측되었다. 그러나 SE지역에서는 여타 지역보다 늦은 5월에 처음 초과치가 발견된 후, 9월까지 계속되었다. 각 권역별 최고 초과빈도수가 나타나는 달도 역시 NE, SE, NW지역은 6월이지만, NW지역은 7월로써 약간의 뒤처짐 현상(lagging)이 나타났다. 초과농도의 크기를 중심으로 이러한 경향성을 비교해 본 결과, 초과농도가 최고치를 기록하는 달 또한 각 지역별로 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. NE, SE, NW지역에선 6월, SW지역에서는 7월에 가장 높은 농도를 보였다. 이것은 일반적인 오존의 시간적 발생경향과는 약간의 차

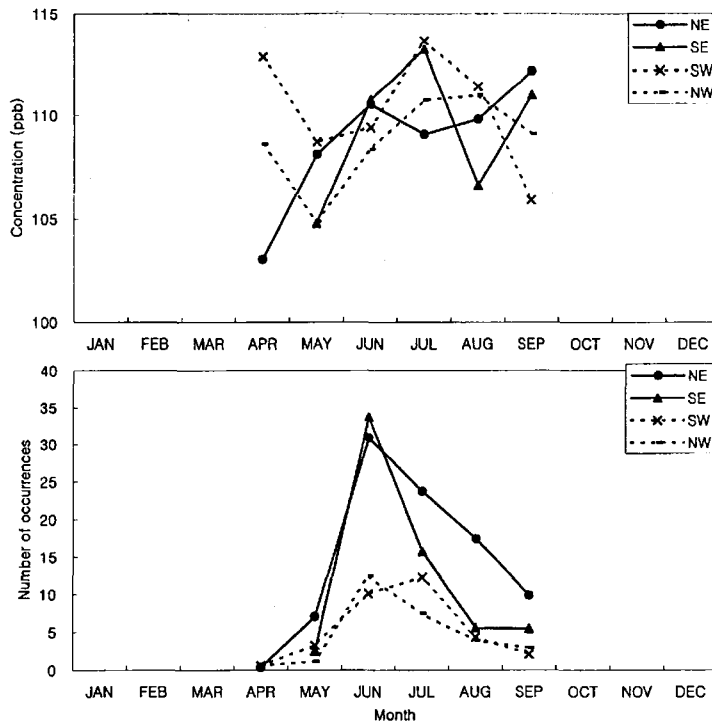


Fig. 4. Same as Fig. 3 but in monthly scale.

이를 보이는 것이다. 일반적으로 오존의 농도는 5, 6월에 최고치를 보이며 7, 8월에는 장마의 영향으로 평균농도가 낮아지는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(Wang, 2001). 이와 같은 결과는 앞서 24시간 일주기 경향성의 비교분석에서 최고농도와 초과빈도와의 관계에서 확인된 바와 같이, 양자간에 뚜렷한 관계가 존재하지 않는다는 사실을 다시 한번 확인시켜주었다.

앞에서 월별 단위로 분석한 자료를 다시 계절별(봄: 3~5월, 여름: 6~8월, 가을: 9~11월, 겨울: 12~2월)로 재분류하고, 이를 정리한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 먼저 초과빈도수를 중심으로 경향성을 비교해 보면, 일반적으로 예측할 수 있는 것과 같이 모든 지역에서 하계동서의 경향성이 뚜렷하다. 또한 동쪽(NE, SE) 지역과 서쪽(SW, NW) 지역의 차이를 더 확연하게 구분 할 수 있다. 빈도의 비교시 동쪽지역이 서쪽 지역에 비해 약 2배 정도 큰 폭의 변화경향을 보였다. 초과농도의 크기를 중심으로(이들의 경향성을) 비교하면, 완전히 다른 결과가 나타난다. 서쪽(SW, NW) 지역은 가을철에 농도가 여름에 비해 감소하지만, 동쪽(NE, SE) 지역은 여름이 지나 가을이 되면

서 농도가 더 증가한다는 것이 특이한 점이다. 동쪽에서 최고농도의 발생이 지연되는 현상은 동쪽지역이 상대적으로 풍하측 특성을 보이는 것과 연계하여 설명 할 수 있을 것으로 보인다. 이와 같이 월별 또는 계절별 자료를 이용하여 오존의 초과농도와 관련한 여러 가지 경향성을 비교해 본 결과, 초과농도와 그 발생빈도간에는 별다른 연계성을 발견하기가 쉽지 않다. 그렇지만, 기준초과농도의 발생빈도는 오존의 일반적인 발생 경향과 상당히 높은 수준의 연계성을 띠는 것으로 나타났다. 반면 초과현상을 농도의 크기를 중심으로 보면, 자체적인 경향성은 발견하기 어렵고, 또한 주변 환경변수와의 연계성도 찾기가 어렵다. 따라서 오존이 기준농도를 초과하여 발생할 경우, 빈도를 중심으로 경향성을 예측하거나 해석하는 것이 보다 보편적인 의미를 지닐 것으로 기대된다.

4대 지역간 연도별 경향성 비교

긴 시간적 관점에서 진행되는 기준초과 현상을 이해하기 위해, 전체 관측기간동안 취합된 자료에 대한 연도별 경향성을 분석해 보았다(Fig. 6). 초과농도의 발생경향에 대한 추이를 보면, 일정 수준이상 규칙적

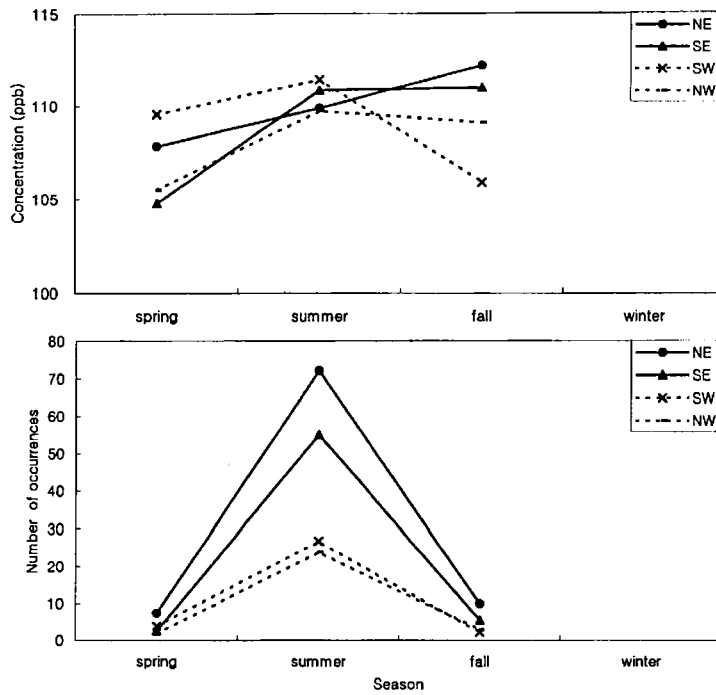


Fig. 5. Same as Fig. 3 but in seasonal scale.

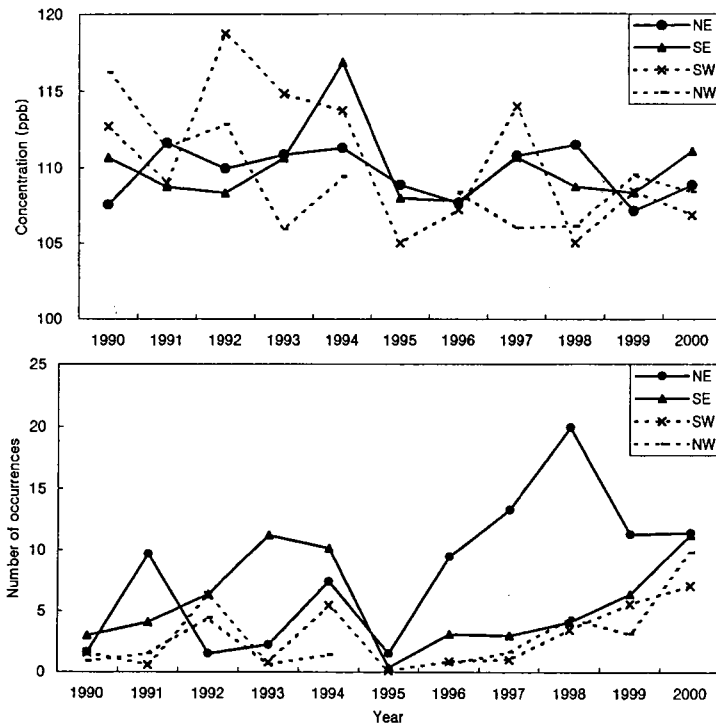


Fig. 6. Annual trend of O₃ exceedance pattern was compared across the period of 1990 to 2000. Both concentration and frequency are compared using the mean values derived by 1hr data sets from four sectors.

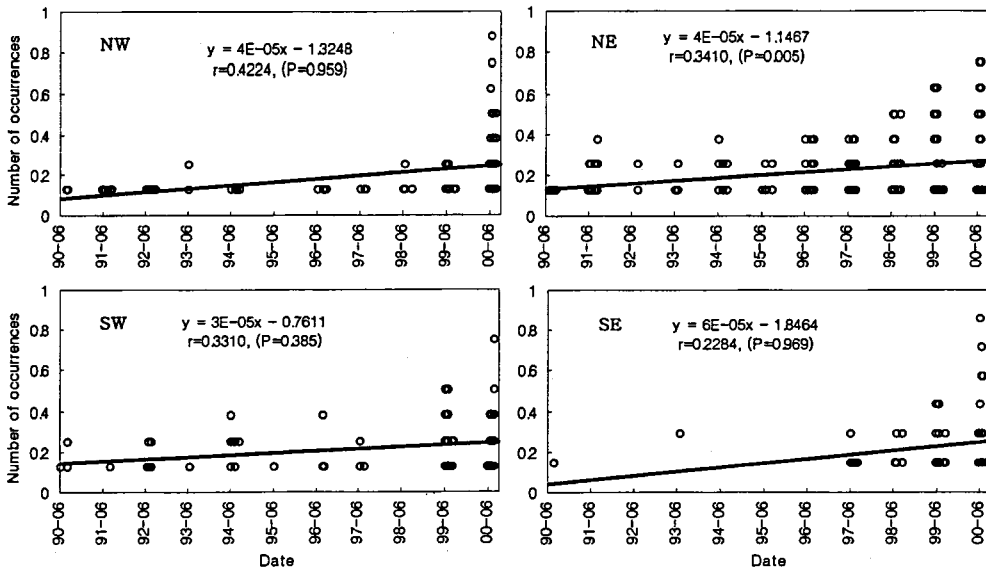


Fig. 7. Long-term trend of O₃ exceedance data was examined in terms of linear regression analysis. Daily mean values of frequency were derived using hourly exceedance data between June and August.

인 경향성을 취한다는 것을 알 수 있다. 초과빈도수는 4지역 모두에서 1995년에 대부분 감소됐지만 1996년 이후부터 최근까지 계속적으로 증가하는 추세를 보인다. 2000년엔 4지역 모두에서 비슷한 초과횟수를 보이고 있다. 전체 11년동안 최고초과치를 보인 연도는 NE지역의 경우 1998년인데 반해, 나머지 세 지역은 모두 2000년으로 나타났다. 이처럼 오존의 환경기준 초과횟수가 최근에 들어 급격히 증가하는 현상은 주목할 필요가 있다. 이러한 현상의 진행추이에서 또 다시 유의할 점은 발생빈도와 초과농도의 절대값 크기간에는 특별한 관계를 발견하기 어렵다는 점이다. 실제로 초과농도의 크기를 중심으로 지역간 자료를 비교해 보면, 상당히 다른 결과가 나타난다. 앞서 빈도중심의 비교와는 달리, 뚜렷한 시공간적 경향성을 확인하는 것이 곤란하다.

Fig. 7는 1시간 초과자료 중 여름철 자료만을 선택적으로 분리하여 연도별로 비교해 본 결과이다. 이와 같은 비교는 오존의 초과농도발생이 1년 중 여름철에 집중적으로 발생한다는 점을 감안한 것이다. 본 분석에서는 여름철만을 택하여, 비교기준을 단일화하므로써, 초과현상의 경향성을 보다 직접적으로 묘사할 수 있게 한다. 여름철 초과빈도수에 대한 그래프를 보면 초과발생이 대부분 증가하는 경향을 보인다. 특히 NE지역에서의 증가폭이 가장 크고, 또한 통계

적인 경향성도 가장 뚜렷한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 동쪽지역이 2차오염이 발생하기 쉬운 풍하지역이란 점과 이 지역에서 광화학오염이 비교적 규칙적으로 발생하였을 가능성을 시사한다.

최근에 오존의 환경기준에 대해서 1시간 초과기준 대신 8시간 초과기준을 활용하는 경우도 강조되고 있다. 8시간 환경기준치인 60ppb를 초과하는 자료만을 이용하여 연도별 경향을 분석해 보았다(Fig. 8). 그 결과는 1시간 기준치를 이용한 결과와 대체로 비슷한 양상이 나타났다. 먼저 초과빈도수에 대한 그래프를 보면 오존의 초과농도 발생은 오후시간대에 집중한다는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 먼저, 1996년에 급격하게 초과횟수의 증가를 보였던 NE지역과 1996년 이후 조금씩 초과횟수가 늘어나던 SE, NW지역 모두 2000년에 이를 때까지 꾸준히 증가하였다. 1998년까지 낮은 초과횟수를 보였던 SW지역도 1999년 매우 높은 초과횟수를 기록하고 있다. 초과농도에 대한 그래프를 보면, 저녁시간대의 농도가 높은 것을 확인할 수 있었다. 저녁시간대에 초과횟수는 그리 크지 않으나 최근에 들어 기준치를 초과하는 횟수가 점점 늘어난다는 것에 유의할 필요가 있다.

기온과 오존과의 상관성

일반적으로 일 최고 오존 농도의 발생은 일사량

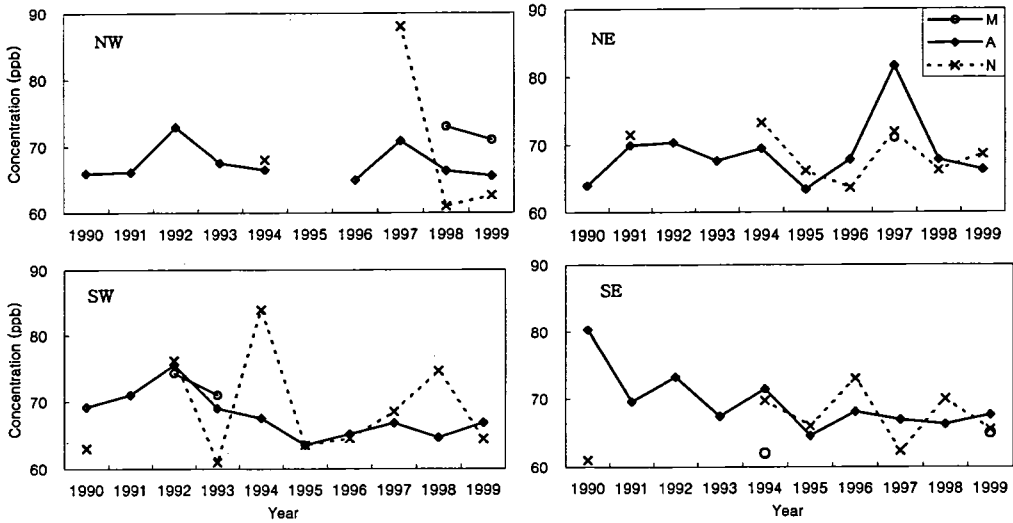


Fig. 8(a). Annual trend of O₃ exceedance data only collected for summer months (June-August) was compared among four sectors using the mean values computed by 8hr basis (M=morning (0AM~8AM), A=afternoon (8AM ~16PM), N=night (16PM~0AM),) between the period of 1990 to 2000.

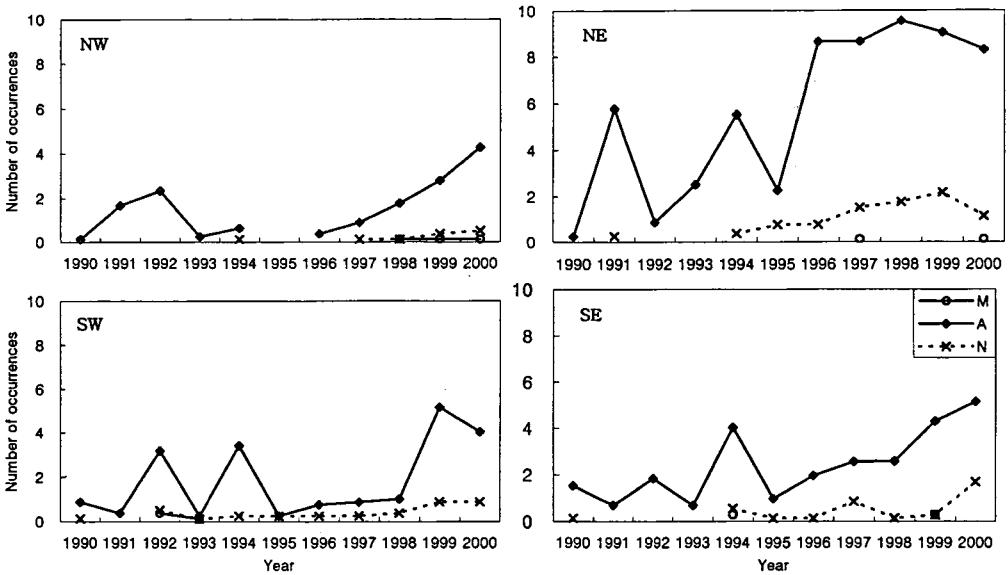


Fig. 8(b). Same as Fig. 8(a) but in frequency.

또는 최고기온의 변동경향과 비슷하게 나타난다(Lin, 2001). 이와 같은 현상은 오존의 발생이 강한 일사량과 고온의 조건에서 광화학 작용이 촉진되므로서 가능하다는 사실을 반영한다고 볼 수 있다. 이와 같은 직접적인 요인 외에도, 최고기온의 증가에 따른 혼합층 고도의 상승으로 생물권 상층의 오존이 지표면 부근으로 유입되는 현상이 용이하게 이루어질 수 있

다는 점도 간과할 수 없다(윤마병, 1994). 따라서 기온의 변화는 오존의 발생경향을 설명하는데 가장 기본적인 환경변수로 간주할 수 있다.

기온의 상승이 오존의 농도를 동반상승 시킬 수 있다는 점을 감안하여, 전체 관측기간동안 서울지역에서 관측된 평균 기온자료를 이용하여 다음과 같이 고농도 오존의 발생을 촉진한 요인들을 설명하기 위

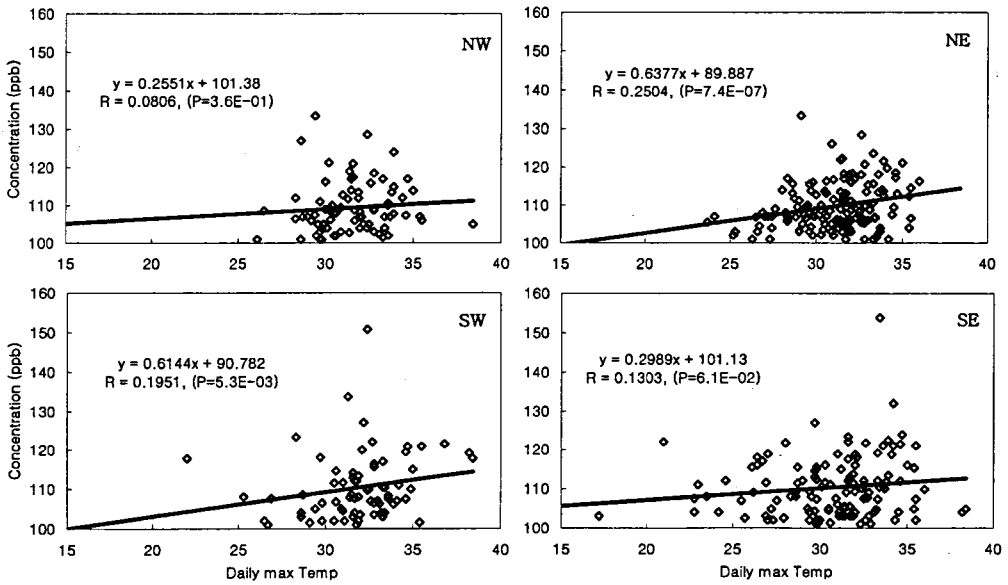


Fig. 9(a). Relationships between ozone hourly exceedance data and daily maximum temperature.

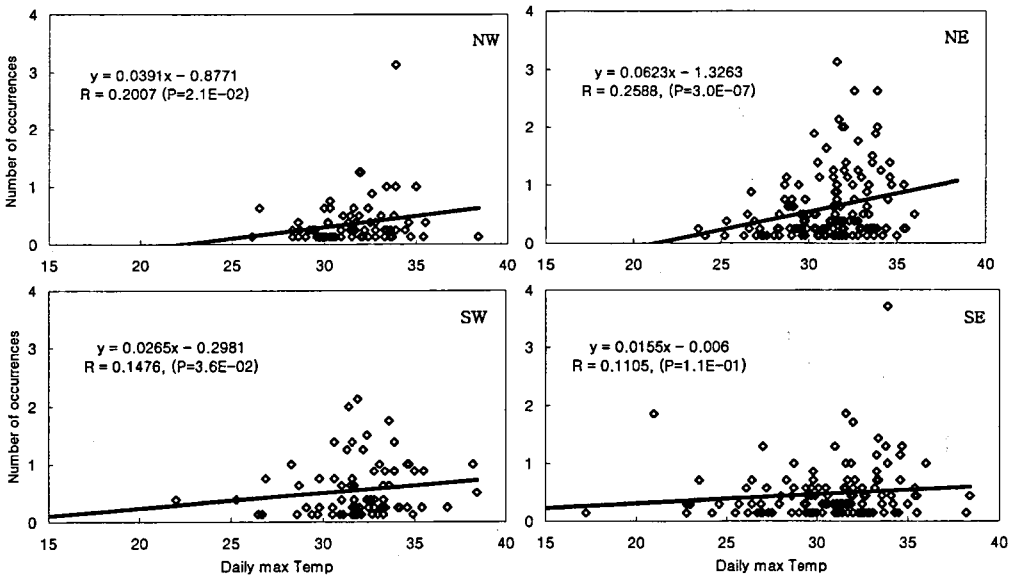


Fig. 9(b). Same as Fig. 9(a) but in frequency.

한 추가적인 분석을 실시하였다. 이를 위하여 가장 우선적으로, 서울시에서 지난 11년 동안 축적된 시간 대별 최고기온과 오존의 1시간 기준 초과자료간의 통계적인 경향성을 분석해 보았다(Fig. 9a, b). 초과 농도의 크기와 빈도를 이용하여 비교 한 결과는 앞서 여러 가지 다른 관점에서 비교한 결과와 달리, 크기와 빈도는(모두 동시에) 기온자료에 대해 일정 수

준 이상 양의 상관성을 유지하는 것이 확인된다. 특히 빈도의 경우, 농도크기와 달리 모든 지역에서 비교적 고르게 양호한 상관성을 유지하는 것이 확인된다. 이러한 결과는 전반적으로 기온의 상승이 오존의 초과농도발생과도 직접적으로 연계될 수 있다는 일반적인 가능성을 확인시켜 준다. 그렇지만 양자간의 관계가 지역별로 다양한 형태를 취하는 점을 감안할

때, 양자간의 관계를 단순하게 기온의 역할만으로 설명하기는 곤란할 것으로 보인다.

요약 및 결론

본 연구에서는 1990년부터 2000년까지 환경부와 서울시에 위치한 대기오염 자동측정망에서 관측한 오존자료를 이용하여, 대기환경기준을 초과하는 오존농도의 시, 공간적 경향성을 다양한 관점에서 비교 분석하였다. 본 연구를 통해 오존의 과다 발생 현상은 다음과 같이 설명할 수 있었다.

환경기준을 초과한 자료의 발생빈도수를 서울시 전역의 31개 관측망에 대해 비교해 본 결과, 방학동, 방이동, 구로동 등의 순서로 오염도가 높은 것으로 판명되었다. 서울시를 동서남북 기준으로 4대권역(NE, NW, SE, SW)으로 구분한 후, 이러한 비교를 한 결과 NE(총 자료수/관측 지점수 = 89.25)지역의 오염이 가장 심각한 것으로 나타났다. 또한 기준초과 농도의 발생은 대부분 오후 시간대에 집중적으로 증가하였는데, 이 시간대에 가장 많은 초과횟수를 보이는 지역은 방학동이었다.

4대 권역별 오염현상의 양상을 비교하고자(각 권역별 관측점수를 감안하여) 동일한 기준에서 초과 발생 빈도에 대한 경향성을 비교하였다. 그 결과, 해를 거듭할수록 발생횟수가 증가하는 경향을 감지할 수 있었다. 특히 이와 같은 현상은 NE, SE 지역에서 두드러지게 나타났다. 이는 동쪽지역이 2차오염의 발생이 용이한 풍하지역이란 점과 이 지역에서 광화학 오염이 비교적 규칙적으로 발생하였을 가능성을 시사한다. 이에 반해, 초과자료를 농도의 크기를 기준으로 비교해 보면, 오히려 90년대 초반에 고농도가 집중된 데 반해, 90년대 후반에는 상대적으로 초과농도의 크기가 감소한 것이 확인된다. 특히 SW지역에서 다른 지역에 비해 일 중 초과농도의 발생시간이 길게 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 SW지역에 속해 있는 김포공항과 같은 대규모 면오염원의 영향이 어느 정도 작용한 것으로 사료된다. 그리고 SW지역의 발생경향에서 또 한가지 유의할 점은 새벽 1~2시 사이에 높은 발생농도를 보인다는 것을 들 수 있다.

초과빈도수는 4지역 모두에서 비슷한 초과횟수를 보였다. 그리고 전체 11년동안 최고초과횟수를 보인 연도는 NE지역(1998년)을 제외하면, 모두 2000년으로 나타났다. 이처럼 오존의 환경기준 초과횟수가 최

근에 들어 더 많이 늘어 난 현상은 여러 관점에서 유의할 필요가 있다. 기온의 상승이 오존의 농도를 동반상승 시킬 수 있다는 점을 감안하여, 전체 관측 기간동안 서울지역에서 관측된 평균 기온자료를 비교 분석에 활용하였다. 대체로 크거나 빈도에 상관없이 모두 기온과 일정 수준 이상 양의 상관성을 유지하는 것이 확인된다. 이러한 결과는 전반적으로 기온의 상승이 오존의 초과농도발생과도 상당 수준 연계되었다는 점을 시사한다. 본 연구의 결과, 오존의 초과농도 발생현상은 시공간적으로 일정수준 이상 뚜렷한 경향성이 존재한다는 점을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- 김유근, 이화운, 전병일, 홍정혜, 1996, 부산 연안역의 오존 농도에 미치는 해풍의 영향, 한국환경학회지, 5(3), 265-275.
- 박옥현, 1985, 부산에서의 기인물질 발생원 특성과 오존 생성, 대한환경공학회지, 7(2).
- 박찬진, 1999, 인천지역의 대기 중 오존 및 먼지 저감에 관한 연구, 환경지리학회지, 5(2), 355-361.
- 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준, 1995, 청정지역과 도시지역의 오존농도 특성 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 253-262.
- 윤마병, 정용승, 1995, 충북 청원군에서 관측된 지표면 부근의 오존, 한국대기보전학회지, 11(1), 85-93.
- 이기원, 권숙표, 정용, 1993, 서울시 대기중 오존오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석-광화문 지역을 중심으로-, 한국대기보전학회지, 9(1), 107-115.
- 이항림, 선우영, 1999, 서울시 및 수도권 지역에서의 오존 농도 예측을 위한 모델개발, 한국환경공학회지, 21(10), 1849-1860.
- 전병일, 1997, 부산연안역의 고농도 오존일의 예측기법개발과 오존농도 수치모의, 부산대학교 박사학위논문, 119p.
- 전병일, 1999, 부산 동삼동 지역의 지표오존농도 특성 연구, 한국환경영향평가학회지, 8(2), 21-29.
- 정용, 장재연, 권숙표, 1986, 서울시 대기중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회지, 2(1), 73-79.
- 정용승, 정계섭, 1991, 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
- 정용승, Liang-Xi Zhong, 1995, 한국의 시골지역에서의 오존농도의 특성, 한국환경과학회지, 4(1), 63-70.
- 조희구, 김해경, 이규태, 1994, 서울의 오존전량 변동과 경향, 한국대기학회지, 30(2).
- 한진석, 김병곤, 김신도, 1996, 오존농도 시뮬레이션과 배출량 변화에 따른 민감도 분석, 환경영향평가, 5(1), 69-77.
- 허정숙, 김동술, 1993, 다변량 통계분석을 이용한 서울시 고농도 오존의 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 207-215.

- 환경부, 2000, 환경백서
환경부, 2001, 환경백서
환경부, 2002, 환경백서
환경부, 2000, 환경통계연감, 제 13호
환경부, 2000, 대기환경연보
환경부, 2001, 대기오염측정자료
- Blacet, F.E., 1952, Photochemistry in the lower atmosphere, *Indust. Eng. Chem.* 44, 1339-1348.
- Bravo, H.A., R.J. Torres, 2000, The usefulness of air quality monitoring and air quality impact studies before the introduction of reformulated gasolines in developing countries. Mexico City, a real case study, *Atmospheric Environment*, 34, 499-506.
- Calvert, J.G., J.B. Heywood, R.F. Sawyer, and J.H. Seinfeld, 1993, Achieving acceptable air quality: some reflections on controlling vehicle emissions. *Science* 261, 37-44.
- Carroll, R.J., R. Chen, E.I. George, T.H. Li, H.J. Newton, H. Schmiediche and N. Wang, 1997, Ozone Exposure and Population Density in Harris County, Texas, *J. American Statistical Association*, 438(92), 392.
- Coffin, D.L., H.E. Stokinger, 1977, Biological effects of air pollutants, *In Air Pollution*, 11, 231.
- Cynthia C.Y., J.J. Danie, M.F. Arlene, 2001, Trends in exceedances of the ozone air quality standard in the continental United States, 1980-1998, *Atmospheric Environment*, 35, 3217-3228.
- Haagen-Smit, A.J., C.E. Bradley, and M.M. Fox, 1953, Ozone formation in photochemical oxidation of organic substances. *Indust. Eng. Chem.* 45, 2086-2087.
- Wang, T., Y.Y. Wu, T.F. Cheung, K.S. Lam, 2001, A Study of surface ozone and the relation to complex wind flow in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 35, 3203-3215.

2002년 11월 23일 원고 접수
2002년 8월 29일 수정원고 접수
2002년 10월 21일 원고 채택