

# 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화

## Variations of Ground-level Ozone Concentration in Korea during 1991 to 1993

김 영 성

한국과학기술연구원 환경연구센터, 130-650 서울 청량 사서함 131호  
(1995년 9월 4일 접수, 1996년 3월 2일 채택)

Young Sung Ghim

*Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology,  
P.O. Box 131 Cheongryang, Seoul 130-650, Korea*

### Abstract

One-hour average concentrations of ground-level ozone from around 80 monitoring stations in Korea during 1991 to 1993 were analyzed to examine characteristics of the ozone concentration variations.

Two types of variations were observed: one was for the Capital area typified by Kwanghwamun, and the other was for the south and east seashore region typified by Tongkwangyang. In the Capital area including Seoul, Incheon, Kyonggi-do and Chunchon, mean daily 1-hour maximum was the highest in June following high monthly averages in spring. But frequent precipitation prevented further rise of daily maximum in July and August even though there were frequent episodes of high concentration exceeding 100 ppb. In the south and east seashore region, average concentrations did not fall in winter, and rose starting from early spring. At Tongkwangyang, average concentration was the highest throughout the year, and daily maximum and minimum simultaneously changed owing to small contributions from photochemical reactions. The typical annual variation was spring peak, summer down, and fall rise. Spring peak accompanied an usual observations of background variations at remote sites in the Northern Hemisphere. Rises of average and daily maximum with lower daily minimum in fall were attributable to photochemical reactions.

### 1. 서 론

최근 몇 년 사이 국내외를 막론하고 대류권 오존에 대한 관심이 부쩍 높아지고 있다. 미국에서는 20여년의 노력에도 불구하고 LA를 비롯한 많은 지역에서 오존 농도가 여전히 높다는 사실을 증시하고, 일면 보다 강력한 대기질 개선책을 실시하기 위하여 청정대기법을 개정하는 한편 그동안 정책의 기본이 되었던 자료와 이론들을 재검토하고 있다 (National Research Council; NR-

C, 1991). 우리 나라에서는 80년대를 통하여 꾸준히 추진하였던 고급 연료로의 전환 정책이 경제력이 뒷받침되며 효력을 나타냄에 따라 아황산가스와 먼지 오염이 현저하게 감소하는 대신 차량의 증가와 함께 광화학 오염에 대한 우려가 높아지고 있다.

미국 NRC 보고서 요약에 수록된 다음의 관찰 결과들은 광화학 오염 저감을 위한 그동안의 노력에 대한 평가가 압축되어 있다는 점에서 유의하여 살펴볼 필요가 있다. ① 지난 20년간 일련의 주요 규제 조치와 오염 저감책들에도 불구하고 오존의 대기환경기준을 만족시키고

자 하는 노력은 대체로 실패하고 있다. ② 당해년도에 2번째로 높은 일 최고 1시간 평균 농도 등 오존 추이를 조사하기 위하여 이용되고 있는 주요 척도들이 기상 변화에 너무 민감하여 일정 지역의 오존이 수년간 실제 감소하였는지 판단하기 어렵다. ③ 오존 저감책을 개발하고 시행하기 위하여 청정대기법에 포함된 州단위 실행 계획은 근본 원리가 타당함에도 불구하고 적절한 검증과정이 미비되어 실제로는 심각하게 잘못 실시되고 있다. ④ 현재의 배출 자료들은 VOCs의 인위적 배출을 현저하게 과소평가하고 있으며, 결과적으로 지금까지의 오존 저감책을 오도하였을 수 있다. ⑤ 인위적 VOCs 뿐 아니라 생물학적 (biogenic) VOCs 역시 미국 도시와 전 원 지역의 광화학 오존 생성에 중요한 영향을 미칠 수 있다. ⑥ 현재의 대기질 측정은 VOCs 성분들의 대기 화학을 밝히거나 개개 성분들에 대한 각기 다른 오염원의 영향을 살피기에 적합치 못하다.

모델링과 저감책들에 대한 평가도 신중하다. ⑦ 3차원 혹은 격자 모델이 오존 형성의 물리 화학적 과정을 표현할 수 있는 최선의 현실적 수단이나 화학 메커니즘, 바람장 모델링, 제거 과정 등의 처리에 중대한 불확실성을 내포하고 있다. 뿐만 아니라 미래의 배출 저감 효과를 조사하기 위하여 이같은 모델을 사용할 때에는 배출 자료 등 입력 자료의 불확실성에 대하여도 충분히 검토하여야 한다. ⑧ 현수준의 대기질 모델과 VOCs, NOx의 대기 중 농도에 대한 보다 나은 지식을 토대로 할 때 미국의 많은 지역에서 NOx를 줄임으로써 오존을 효과적으로 감소시킬 수 있다. ⑨ 대체 연료의 사용은 특히 도시 지역의 대기질을 향상시킬 수 있으나 그 정도는 불확실하며 지역과 연료의 종류에 따라서도 달라질 수 있다. 대체 연료만으로는 전국적인 오존 문제를 해결할 수 없으며, 차량 사용 년수의 증가에 따른 배출 증가 등 차량 배출과 관련된 중요한 문제들이 완화된다는 보장도 없다. ⑩ 북미 전체의 오존 형성과 농도를 결정하는 물리, 화학, 기상 요소를 밝힐 수 있는 국가 협동 프로그램의 부족으로 오존 농도를 낮추기 위한 미국의 많은 노력들이 심각하게 저해되고 있다.

광화학 반응에 의하여 생성되는 오존 농도는 기온이 높고 일사량이 많은 여름에 높으며, 오후에 가장 높고 새벽에 가장 낮은 전형적 일변화를 보이며, 연중 월평균 변화보다 하루중 시간 평균의 변화폭이 크다. 그러나 세계적으로 볼 때 대도시와 미국 등을 제외한 많은 지역의 오존 농도는 봄에 높고 여름이나 가을에 낮으며, 일변화가 두드러지지 않을 뿐 아니라 연중 변화보다 크지도 않다. Singh 등 (1980)은 오존 농도의 이같은 계절적 변

화를 지구 대기 중 오존이 가장 밀집된 성층권 오존의 농도 변화와 연관된 것으로 생각하였다. 성층권 오존의 침투 현상은 Chung과 Dann (1985), Wakamatsu 등 (1989), Davies와 Schuepbach (1994) 등에서 계속 관찰되고 있으나 대부분 부분현상으로써 이다. 이에 따라 Oltmans와 Levy (1994), Sunwoo 등 (1994)은 중·장거리 이동의 결과로써 여타 지역의 오존 농도 변화를 설명하고 있으며, Liu 등 (1987)은 겨울의 낮은 광화학 반응에도 불구하고 반감기가 현저하게 길어져 축적된 오존이 북반구 대부분 지역 봄철 농도를 높이는 것으로 보았다.

오존의 발생과 이동, 전환에 관한 정보들은 일변화든 계절변화든 결국 농도 변화로 나타난다. Böhm 등 (1991)은 미국 서부 침엽수림 지대의 일변화를 17개 형태로 구분하고 지역적 계절적 특성을 분석하였으며, Lefohn 등 (1993)은 오존 오염도 감소에 따른 일변화의 차이를 조사하였다.

Fuentes와 Dann (1994)은 캐나다 동부의 오존 농도 변화를 분석하여 국지 배출물의 광화학 반응이 중요한 지역과 다른 지역의 배출물이 이동하며 반응하여 농도가 높아진 지역, 그리고 배출물의 영향이 작은 벽지 (remote site)의 변화들을 구분하였다. NRC 보고서는 광화학 오존 대책이 결코 단순할 수 없음을 보여준 단적인 예이다. 그러나 만일 성층권 오존의 영향으로 지표부근 오존 농도가 지속적으로 높아진다면 그 대책은 광화학 오존의 경우와 같을 수 없으며 더욱 막연하다.

본 논문은 '91년부터 '93년까지 3년간 우리나라 80여 개 고정 측정망 측정 자료를 토대로 우리나라 오존 농도 변화 특성을 조사한 것이다. 우리나라에서 '91년부터 '93년은 특히 서울을 중심으로 광화학 오염의 가능성이 부각되기 시작한 기간이며 (김영성, 1994a, 1994b), 북태평양 고기압이 이상 발달하였던 '94년을 앞두고 평년의 변화를 알 수 있는 기간이다. 광화학 오존의 전형적 변화에 비추어 광화학 오염 가능 지역과 우리나라의 특징적 변화들을 구분하고자 한다. 광화학 반응이 활발하리라 예상되는 여름의 잦은 강우가 오존의 계절적 변화에 미치는 영향도 가능한대로 알아본다.

## 2. 방 법

1991년부터 1993년까지 3년간 우리나라 80여개 고정 측정망에서 측정된 1시간 평균치로부터 측정소별로 3년 단위 월평균과 연단위 월평균들을 계산하였다. 월단위로 하루의 시간대별 평균을 산출하여 월평균 일변화를 조사

하였으며 시간대별 평균중 가장 큰 값을 월평균 일 최고 농도, 가장 작은 값을 월평균 일 최저 농도로 지칭하였다. 통계에 필요한 유효측정 시간의 비율로써 일본은 5/6를 법으로 규정하고 있고(송동웅, 1990), 미국에서는 통상 3/4을 사용하고 있으나(예를 들면, Van Ooy and Carroll, 1995), 본 논문에서는 우리나라 그동안의 관례와 측정치 회수율을 감안하여 2/3를 기준하였다.

Table 1. Percent of months of stations for ozone in which more than 2/3 of hours gave hourly averages and a valid average was available.

Region	Number of stations <sup>a</sup>	1991	1992	1993
Seoul	36	76.6	84.0	95.1
Pusan	16	63.0	69.8	97.4
Kwangju	9	52.8	92.6	96.3
Taegu	9	83.3	91.7	98.1
Taejon	4	93.8	100.0	100.0
Wonju	4	77.1	93.8	97.9
Whole country	78	72.8	84.3	96.5

<sup>a</sup> Estimated from monitoring data and Hong(1990).

즉, 평균에 필요한 총 시간수의 2/3 이상에서 측정치가 주어졌을 때 평균치를 산출하였다. 표 1은 지역별로 월 평균이 가능하였던 달의 백분율이다. '91년의 지역별 편차나 전국 평균 72.8%는 분포도나 추이를 알아보기에 미흡한 것이 사실이나 매년 평균 12% 포인트씩 높아져 '93년의 전국 평균 96.5%는 양호하다.

### 3. 전반적 특성

#### 3.1 농도 분포

그림 1은 가온이 낮아 난방에 의한 오염물질 배출이 가장 많은 1월의 3년 평균 아황산가스과 이산화질소의 농도 분포이다. 측정소들이 대도시나 공업지역 주변에 편중된 까닭에 전체적인 농도 분포도 측정소를 중심으로 치우쳐 있다. 아황산가스의 고농도가 경인지방 보다 춘천쪽에 형성된 것은 연료전환 정책이 서울을 중심으로 실시된 결과로 해석된다. 반면 차량 배출의 비중이 큰 이산화질소는 역시 서울 등 경인지방이 높고 경부선을 따라 부산 등 영남지방에서 다시 높아진다.

그림 2a는 '92년 9월의 월평균 오존 농도 분포이다.

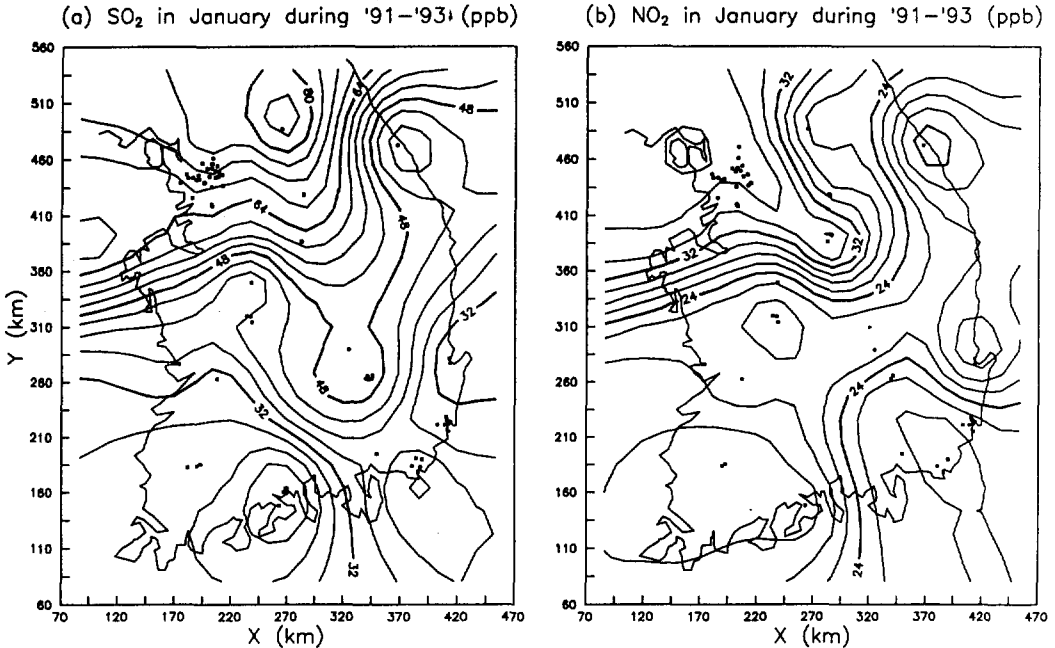


Fig. 1. Concentration distribution of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> in Korea in January during 1991 to 1993. Open rectangles indicate monitoring stations where average concentrations were calculated. Location of the monitoring stations were determined from their Transverse Mercator coordinates by assuming 127° E to be the baseline.

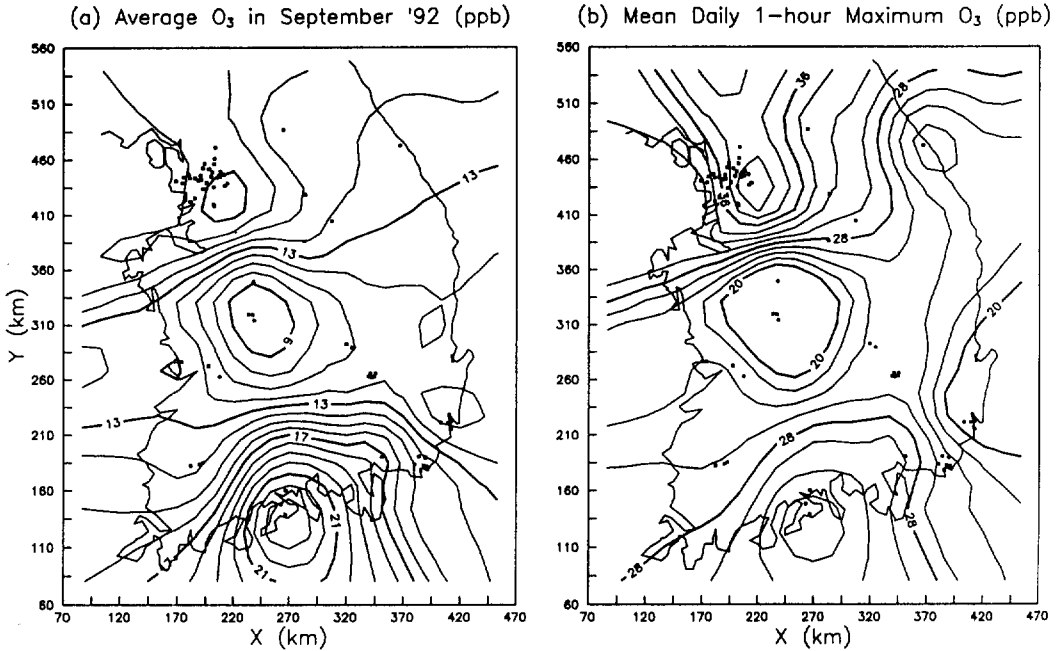


Fig. 2. Concentration distribution of O<sub>3</sub> in Korea in September 1992. Open rectangles indicate monitoring stations where average concentrations were calculated.

아황산가스나 이산화질소와 달리 남해안 중심 동광양, 여천, 여수의 고농도가 두드러진다. 이 지역 석유화학공단과 대규모 제철소 배출을 오존 고농도의 원인으로 볼 수 있으나 그림 1을 볼 때 이들의 배출을 경인지방과 영남지방의 밀집된 오염원 배출에 비할 바는 아니다. 반응성 탄화수소의 배출이 특별히 많은 경우를 생각할 수 있으나 배출이나 대기중 농도 모두 전국 자료가 미비하여 확인할 수 없다. 그림 2b는 '92년 9월 월평균 일 최고 농도 분포이다. 여천의 농도가 여전히 높으나 수도권 농도가 그림 2a보다 2배 이상 증가하여 가장 높다.

### 3.2 지역별 평균 변화

그림 3은 지역별 3년 평균 오존 농도 변화이다. 대체로 봄철 농도가 가장 높고 7, 8월에 낮으며 가을에 다시 높아진다. 일변화를 무시한 평균 변화이기에 여천의 농도가 전반적으로 높다.

여천의 월평균은 1월에도 18 ppb로 낮지 않으며, 이 같은 겨울의 상대적 고농도는 강릉, 울산, 부산 등 동남해안 지방이 동일하다. 반면 춘천, 서울, 대전, 대구 등 내륙 도시들의 겨울 평균 농도는 7~8 ppb로 해안 도시의 절반정도이다. 춘천과 여천을 포함하여 중 동부 도시들이 4월부터 최고 농도에 도달하는데 비하여 서울

부터 광주까지 서부 도시들은 1개월 늦은 5월에 농도가 가장 높아진다. 해안 도시들은 7, 8월에 농도 저하가 뚜렷하여 가을의 2차 상승을 구별하기 쉬운데 반하여 서울, 대전, 광주, 대구, 춘천 등 내륙 도시에서는 봄철 상승만이 분명하다.

### 3.3 전반적 특성 고찰

광화학 반응에 의하여 생성되는 오존 농도의 일변화가 큰 서론에서 언급한 바와 같다. 이는 물론 일차적으로 광화학 반응에 의하여 낮시간에 오존의 최고 농도가 높아지기 때문이다. 그러나 오존의 최고 농도를 현저하게 상승시킬 정도의 오염된 대기조건이라면 밤에도 NO 등 1차 오염물질이 지속적으로 배출되는 것이 보통이고 오존의 추가 생성이 없는 상태에서 NO에 의한 소멸 반응만이 진행되므로 (Seinfeld, 1989) 최고 농도가 높을 때 밤의 오존 최저 농도는 더욱 낮다. 즉, 광화학 반응이 활발한 지역의 오존 농도 일변화는 최고 농도가 높기도 하지만 최저 농도가 낮아 일변화가 크다. 이에 따라 오염된 대도시의 평균 농도는 광화학 반응의 영향으로 최고 농도가 높음에도 불구하고 전원지역보다 오히려 낮을 수 있다 (Fuentes and Dann, 1994).

오존의 일변화가 큰 지역은 광화학 반응이 활발한 지

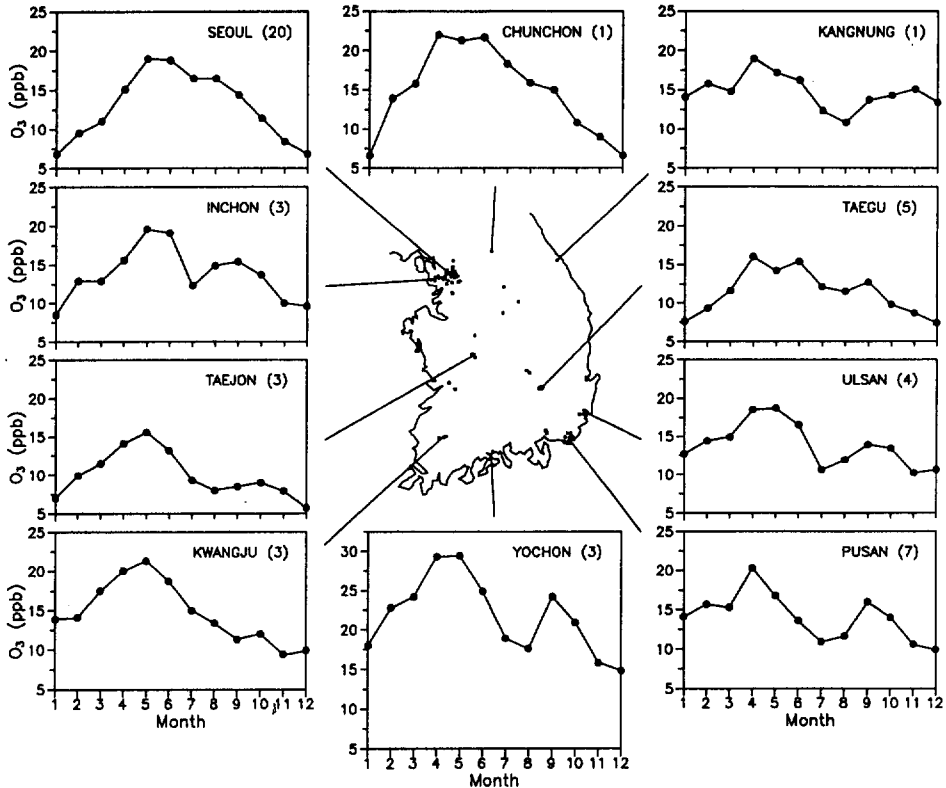


Fig. 3. Monthly average O<sub>3</sub> concentrations in 10 cities during 1991 to 1993. Figure in the parentheses indicates the number of monitoring stations in that city. Representative values of the city were obtained by averaging monthly averages for all stations in that city. Yochon represents the area including Tongkwangyang, Yosu, and Yochon itself.

역이므로 광화학 오염지역으로 분류할 수 있다. 그림 2에서 월평균이 상대적으로 낮고 일 최고 농도가 높은 '92년 9월의 수도권은 평균적으로 광화학 오염의 특성을 지니고 있다. 오염이 적은 지역의 월평균은 보통 봄에 높는데 비하여 오염이 심할수록 오존의 소멸반응으로 봄의 농도는 낮아지는 대신 최고 농도가 높은 여름철 농도가 상대적으로 높아진다 (Lefohn et al., 1992; Sunwoo et al., 1994; Fuentes and Dann, 1994). 그림 3에서 초여름인 6월에 월평균이 높고 겨울에 농도가 낮은 인천, 서울, 춘천의 변화가 광화학 오염에 근사하다. 동쪽보다는 월평균의 상승이 늦은 서쪽이, 해안보다는 겨울에 농도가 낮은 내륙이 광화학 오염의 가능성이 있다.

남해안의 여천지방을 중심으로 남·동해안의 변화는 광화학 반응이 충분치 않은 4월에 농도가 높아질 뿐 아니라 겨울에도 농도가 높다는 점에서 광화학 오염으로부

터 가장 멀다. 남·동해안의 변화가 우리나라 본연의 배경농도 변화이고 서쪽과 내륙에 오염물질 배출이 늘면서 광화학 오염 양상이 나타나기 시작한 것으로 해석할 수 있다. 그러나 그림 1의 일반적 오염 양상을 볼 때 부산과 울산지방에 오염물질 배출이 작다는 것은 생각하기 힘들다. 부산, 울산지방의 여타 오염물질의 농도가 낮지 않음을 감안하면 결국 남·동쪽으로부터 비교적 높은 농도의 오존이 유입되는 것도 가상할 수 있으며 향후 연구가 필요한 부분이다.

#### 4. 지역별 월별 특성

##### 4.1 평균 농도 고농도와 일 최고·최저 농도

표 2는 '91년부터 '93년 사이 측정소별로 월평균 농도와 월평균 일 최고 농도, 일 최고/최저 농도비율을 산출하여 큰 값부터 10개를 발생 장소와 시기와 함께 연도별

Table 2. Highest 10 monthly averages, mean daily 1-hour maxima, and ratios of mean daily 1-hour maximum to minimum for ozone with locations and months of their occurrences during 1991 to 1993.

Average station			Daily Maximum station			Maximum/Minimum station					
ppb	station	month	ppb	station	month	-	station	month			
1991											
34	Nae	wsw19	6	72	Kuui	ese11	6	57	Songjong	s270	9
30	Tokchon	se320	3	68	Nae	wsw19	6	56	Mullae	sw10	10
30	Kuui	ese11	6	65	Mapo	sw3	8	50	Pangi	ese14	10
30	Namkajwa	w6	5	60	Namkajwa	w6	6	41	Nongsong	s268	10
30	Kuro	sw12	5	59	Ssangmun	nne11	6	39	Oryu	sws15	10
29	Kuui	ese11	5	57	Kuui	ese11	5	35	Hannam	se4	10
28	Mapo	sw3	8	56	Songnam	se20	6	35	Panpo	sse7	9
28	Simgok	wsw19	5	56	Nae	wsw19	8	30	Songsu	ese7	11
28	Anyang	ssw19	5	54	Kuro	sw12	8	27	Kwonsun	s34	10
28	Namkajwa	w6	6	54	Anyang	ssw19	5	26	Hannam	se4	9
1992											
42	Kuro	sw12	7	71	KuroKuro	sw12	7	43	Panpo	sse7	9
37	Namkajwa	w6	7	70	Pyulyang	sse16	6	31	Kwanghwamun	o	8
36	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	5	69	Kwanghwamun	o	9	29	Kwanghwamun	o	9
33	Kwangmu	sse320	5	69	Namkajwa	w6	7	25	Kwanghwamun	o	3
33	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	4	64	Namkajwa	w6	6	24	Hannam	se4	9
33	Samil	sse310	5	61	Chamsil	se12	6	24	Hannam	se4	10
31	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	6	59	Kwanghwamun	o	6	20	Kwanghwamun	o	10
31	Samil	sse310	6	59	Chamsil	se12	5	19	PangiPangi	ese14	10
31	Samil	sse310	4	58	Pangi	ese14	7	19	Punghyang	s266	10
31	Namkajwa	w6	6	57	Nae	wsw19	6	19	Chungri	se236	10
1993											
38	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	4	57	Songsu	ese7	6	41	Kwanghwamun	o	7
35	Kwangmu	sse320	4	55	Pyulyang	sse16	4	40	Songnam	se20	9
34	Pugok	se314	5	54	Kwonsun	s34	9	37	Kwanghwamun	o	9
33	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	5	54	Pangi	ese14	9	27	Kwanghwamun	o	8
32	Wonsan	se312	6	54	Ungnam	sse303	5	26	Pyulyang	sse16	9
32	Tongkwangyang	sse299 <sup>b</sup>	3	53	Sobu	ese119	4	26	Chamsil	se12	9
31	Kwangmu	sse320	5	52	Kongdan	se206	4	26	Cholsan	sw14	9
31	Chukdo	se274	9	51	Pugok	se314	5	25	Chamsil	se12	10
31	Ungnam	sse303	6	51	Taemyong	se238	6	24	Choun	ene75	10
31	Ungnam	sse303	5	51	Oryu	sws15	6	21	Pyulyang	sse16	10

<sup>a</sup> The location of monitoring station is expressed with a combination of 16-sectored direction and the distance in km relative to Kwanghwamun. Symbol 'o' indicates Kwanghwamun station.

<sup>b</sup> Tongkwangyang in 1992 indicates Kumho-dong station and that in 1993 indicates Chung-dong station. Since no precise information is available for the location of Chung-dong station, the two locations were assumed to be same.

로 정리한 것이다. 이미 살펴본 바와 같이 일변화를 무시한 평균 농도는 광화문으로 부터 남남동에서 남동 방향으로 약 300 km 떨어진 동광양을 비롯한 남해안 중심부에서 남동해안 지점들이 높으며, 월평균 일 최고 농도는 서울 및 수도권 지점들이 주로 높다. '91년에는 서울 및 수도권 지점들이 평균 농도 고농도군에 많이 포함되어 있으나 표 1에서도 짐작할 수 있지만 '91년에는 평균 농도가 높을 수 있는 남해안 지방의 측정이 충실치 못하였

다. '93년에 남동해안의 울산으로부터 내륙에 이르는 지점에서 일 최고 농도가 높았던 사실도 주목할 만하다.

일 최고 농도가 높은 지역은 일차적으로 광화학 오염을 의심할 수 있다. 그러나 그림 2b에서 볼 수 있는 것과 같이 연중 광화학 오염의 가능성이 가장 덜한 남해안 중심지역도 일 최고 농도는 낮지 않다. 따라서 그림 2에서는 평균 농도에 대한 일 최고 농도로서, 그림 3에서는 연중 농도 상승 시기와 겨울철 농도 저하들을 토대로 광

화학 오염 가능성을 조사하였다. 표 2의 마지막 행은 최고 농도 상승을 고려하되 최저 농도 감소에 초점을 맞추어 일 최고/최저 농도비로써 월별 광화학 오염도를 살펴본 것이다. '92, '93 2년에 걸친 광화학 지점의 잦은 등장이 평균 농도 고농도의 동광양과 대비된다. 평균 농도 고농도가 4, 5, 6월에 주로 나타나는 반면 일 최고/최저 농도 고비율은 9, 10월에 집중되어 있다.

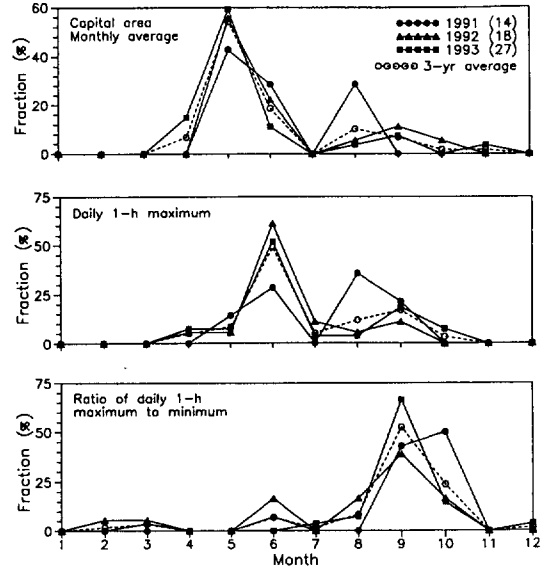
4.2 월별 특성

보편적 시기별 특성을 알아보기 위하여 전국을 서울, 인천, 경기, 춘천을 포함하는 수도권과 기타 지역으로 나누어 3월부터 10월까지 평균이 가능한 지점을 대상으로 월평균과 일 최고 농도, 일 최고/최저 농도비가 연중 가장 높은 달을 조사하였다. 그림 4는 월별 분포이다. 수도권의 월평균이 5월에, 일 최고 농도가 6월에 주로 높아지는데 비하여 비수도권의 월평균은 '91, '92년은 5월에, '93년은 4월에 주로 높아지며, 일 최고 농도도 5월에 높아져 수도권의 농도 상승이 1달 정도 늦다. 비수도권이 집중도가 다소 떨어지기는 하나 일 최고/최저 농도비는 전국에 걸쳐 9월에 보편적으로 높다. 대표적 여름인 7, 8월의 경우 7월은 월평균은 물론 일 최고 농도도 높지 않으며, 8월은 '91년 수도권의 비교적 다수 지점에서 월평균 및 일 최고 농도가 높을 뿐이다.

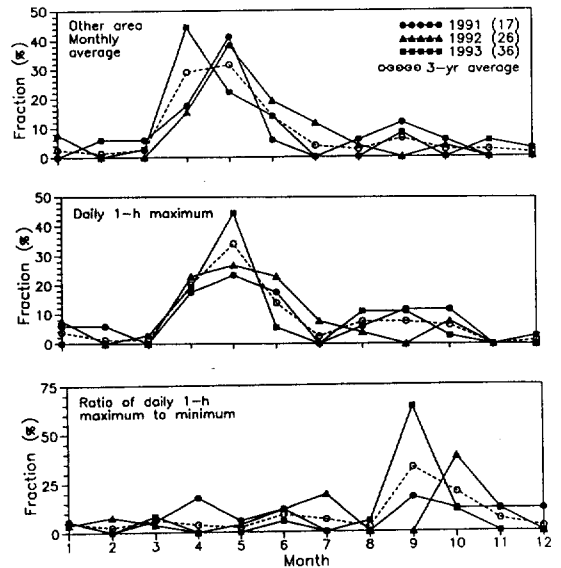
일 최고 농도가 5, 6월에 높아짐에도 일 최고/최저 농도비가 9, 10월에 높아진다면 9, 10월에는 최저 농도가 보편적으로 낮음을 의미한다. 그림 4의 일반적 월별 분포는 표 2의 고농도와 고비율 중심의 월별 분포와 매우 유사하다. 이 같은 사실은 만일 외부 요인에 의하여 월평균 농도가 높아지는 것이라면 그 영향이 전국적임을 의미하며, 9, 10월에 최저 농도를 낮출 수 있는 요인이 존재한다면 그 역시 전국적임을 의미한다. 오염원의 직접적 영향을 받지 않는 북반구의 측정소에서 봄철 최고와 가을철 최저는 보편적이다 (예를 들면, Singh et al., 1980; Oltmans and Levy, 1994). 즉, 우리나라의 많은 변화는 북반구 벽지의 보편적 변화를 배경에 두고 있다. 이같은 전제가 가능하다면 가을에 최고 농도가 높아지는 것은 지역을 막론하고 광화학 반응때문이다. 수도권에서는 일차 오염물질에 의한 야간의 활발한 소멸반응으로 최저 농도가 더욱 낮아져 최고/최저 농도비가 커지는 정도이다.

4.3 수도권 여름

표 2와 그림 4에서 가장 특이한 사실의 하나는 수도권에서도 7, 8월 여름에 일 최고 농도조차 보편적으로 높



(a) Capital area including Seoul, Incheon, Kyonggi-do, and Chuncheon



(b) Other area

Fig. 4. Percent fraction of the number of stations where monthly average, mean daily 1-hour maximum, or ratio of mean daily 1-hour maximum to minimum were the highest in the month. Figure in the parenthesis appearing in the legend is the total number of stations analyzed.

**Table 3. Mean meteorological pattern of days in Seoul when ozone concentration exceeded 100 ppb in the Capital area in comparison with that of the other days during 1991 to 1993.**

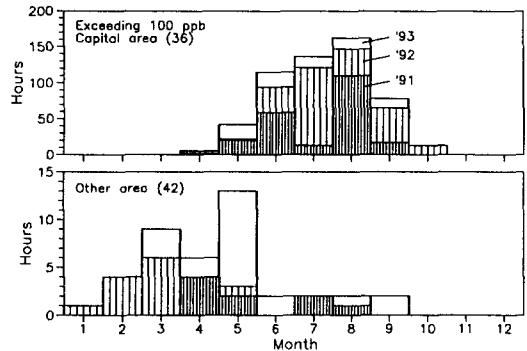
months	number of days <sup>a</sup>	wind speed (m/s)	temperature (°C)	solar radiation (MJ/m <sup>2</sup> day)	precipitation (mm/day)	most frequent wind direction (fraction)
3~4	3 (high) 180	2.28	15.50	17.62	.00	w (23.6%)
		2.72	8.82	12.77	1.76	w (16.8%)
5~6	35 (high) 148	2.17	22.62	19.41	.68	w (28.8%)
		2.61	18.68	14.97	4.93	w (21.1%)
7~8	41 (high) 145	1.81	25.46	17.02	1.14	w (21.8%)
		2.24	23.98	10.80	12.56	ne (34.9%)
9~10	21 (high) 162	1.58	21.72	14.35	1.24	w (25.8%)
		1.95	16.72	11.30	2.78	ne (23.2%)

<sup>a</sup> 'Days (high)' means that any 1-hour average at any station in the Capital area exceeded 100 ppb on those days.

지 않다는 점이다. 장마철인 7월에 오존 농도가 낮은 것은 강우에 의한 오염물질의 세정 효과때문으로 볼 수 있다. 그러나 8월은 강우량이 많기는 하나 일시적 호우가 많아 일사량이 비교적 풍부하고 기온도 높으므로 광화학 반응에 유리하다. 김진영 (1995)은 7, 8월 우리나라 상공을 지나는 바람이 북태평양으로부터 남·서해안으로 유입되어 일본 동부나 북부쪽으로 돌아나가고 있어 상층부 깨끗한 공기의 영향으로 지상의 오존 농도가 저하되는 것으로 분석하였다. 그림 5에서는 그림 4와 같이 수도권과 기타 지역을 나누어 월별로 100 ppb 이상 고농도가 기록된 시간 수를 조사하였다. 100 ppb 이상 고농도는 대부분 수도권에서 발생하고 있으며, 3년을 총괄하여 8월이 가장 많고 7월이 다음으로 많다.

표 3은 그림 5의 수도권 지역에서 100 ppb를 넘었던 날의 서울의 평균 기상을 그렇지 않았던 날의 평균 기상과 비교한 것이다. 먼저 7, 8월을 보면 서울, 인천, 경기, 충청 지역에 위치한 측정소들의 하루 중 어느 1시간이라도 100 ppb를 넘었던 날수는 1991년부터 1993년 사이 총 41일이다. 이같은 41일의 서울 평균 기상은 그렇지 않았던 나머지 145일의 서울 평균 기상에 비하여 낮은 풍속, 높은 기온, 많은 일사량, 하루 평균 1.14 mm의 적은 강우량이 기록되어 있다. 모두 광화학 오존 생성에 유리한 전형적 기상 조건이며 (NRC, 1991), 3, 4월, 5, 6월, 9, 10월의 경우도 동일하다. 3, 4월의 이른 봄에 광화학 오존이 다소 의외이나 고농도가 발생한 3일의 평균 기온이 여타일의 2배에 가깝고, 일사량도 7, 8월의 고농도일보다 많아 가능성은 충분하다. 표 3에서 가장 흥미있는 사실의 하나는 고농도일이 모두 서풍을 주풍으로 하고 있다는 점이다. 서풍이 잦은 3~6월

에도 고농도일의 서풍 비율은 여타일보다 높고 7~10월의 여타일에는 북동풍의 비율이 가장 높는데 반하여 고농도일에는 서풍이 많다. 결국 수도권의 광화학 반응은 이른 봄부터 기상 조건만 형성되면 본격적으로 진행되며, 7, 8월의 강우와 강우 사이 고온의 맑은 날, 풍속이 낮을 때 가장 활발하다.



**Fig. 5. Number of hours exceeding 100 ppb in the capital and other areas during 1991 to 1993. Figure in the parentheses indicates average number of monitoring stations in that area.**

## 5. 지점별 특성

### 5.1 오존 농도의 특징적 변화

그림 6은 표 2에서 '93년에 월평균과 일 최고 농도, 일 최고/최저 농도비가 가장 높았던 동광양, 성수, 광화문의 연간 월평균과 일 최고, 최저 농도 변화이다. 동광양은 세 농도가 거의 유사하게 변하고 있다. 성수는 6월



에 일 최고 농도가 가장 높으나 이때에는 최저 농도도 작지만 올라가 있다. 그러나 9월에 최고 농도가 다시 상승할 때에는 최저 농도가 떨어진다. 광화문의 최고 농도는 5월에 1차 상승한 후 9월에 가장 높는데 최저 농도는 7, 8, 9월에 낮고 최고 농도가 낮은 겨울에 높다. 그림 7은 '93년 동광양과 성수, 광화문의 월평균 일 최대 농도가 가장 높았던 달과 낮았던 달의 평균 일변화이다. 동광양에서는 최고 농도가 높은 달의 농도는 최저 농도부터 높아 마치 오염원으로부터 직접 배출되는 일차 오염물질과 같은 변화를 보이고 있다. 반면 광화문의 일변화에서는 최고 농도가 높은 9월의 최저 농도가 2월의 최저 농도보다도 낮다. 성수의 변화는 광화문과 유사하나 최고 농도가 높은 6월의 최저 농도가 12월보다 높다는 점에서는 동광양과 같다.

4.2항의 월별 특성에서는 봄철의 월평균 농도 상승과 가을의 일 최고/최저 농도비 상승 등 우리나라의 많은 변화가 전국적임을 지적하였다. 광화문의 가장 큰 특징은 봄에서 가을까지 낮은 최저 농도이나 5월에 최고 농도가 높다. 성수는 여름쪽으로 치우쳐 있으나 6월에 최저 농도와 함께 일 최고 농도가 높다. 이들 변화들은 광화학 반응에 의하여 각기 상이한 방식으로 변형된 채 동광양의 봄철 변화와 연관되어 있다. 광화문과 성수의 9월은 모두 최저 농도의 현저한 하락과 함께 최고 농도가

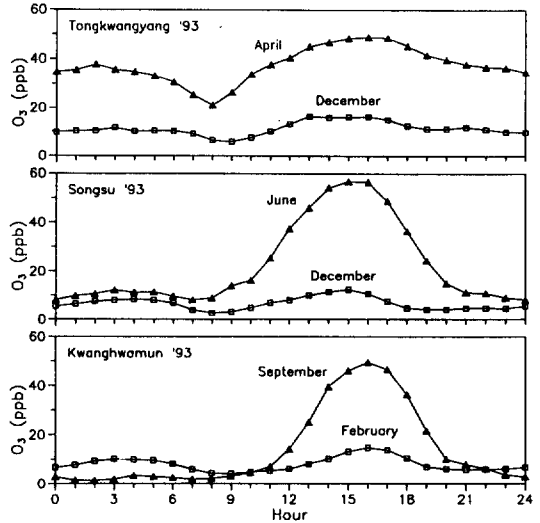


Fig. 7. Hourly average O<sub>3</sub> concentrations at Chung-dong in Tongkwangyang, and Songsu-dong and Kwanghwamun in Seoul in 1993 in those months when mean daily 1-hour maximum was the highest or the lowest.

상승하여 전형적인 광화학 오염의 모습을 보이고 있다. 동광양의 9월도 일 최고 농도와 평균 농도가 상승함에도 최저 농도는 봄철같이 상승하지 못하여 상대적으로 광화학 오염의 징후를 보인다. 그러나 봄철 광화문과 성수의 광화학 반응 양상이 왜 다르게 나타나는지, 배경농도 변화에 의하여 9, 10월 오존 농도가 전반적으로 저하된 가운데 광화학 반응에 의하여 최고 농도가 상승한다면 왜 동광양의 9, 10월 최저 농도는 8월보다 높은 지, 전반적 가능성에도 불구하고 많은 구체적 내용들이 불확실하다.

5.2 오존 농도 빈도 분포

그림 8은 '93년 동광양과 성수, 광화문의 월평균 일 최대 농도가 가장 높았던 달의 1시간 평균 농도 빈도 분포이다. 4월 동광양은 40 ppb 부근이 가장 많은데 비하여 9월 광화문에서는 10 ppb 이하 저농도 부분이 압도적으로 많다. 4월 동광양에서 중간 농도 부분 외에 저농도와 고농도 부분은 NO에 의한 소멸이든 광화학 반응에 의한 생성이든 반응의 결과일 수 밖에 없으나 반응의 효과가 크지 않다. 연중 분포에서는 20 ppb 부분이 가장 많은데 비하여 4월에 40 ppb 부근이 가장 많은 것은 4월에 이 부근 농도의 오존이 유입되기 때문으로 추정할 수 있다. 반면 광화문의 9월은 저농도 부분도 많지만 고

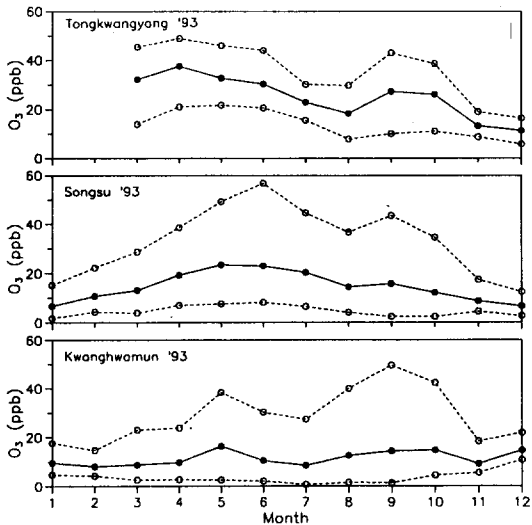


Fig. 6. Monthly average O<sub>3</sub> concentrations with mean daily 1-hour maximum and minimum at Chung-dong in Tongkwangyang, and Songsu-dong and Kwanghwamun in Seoul in 1993.

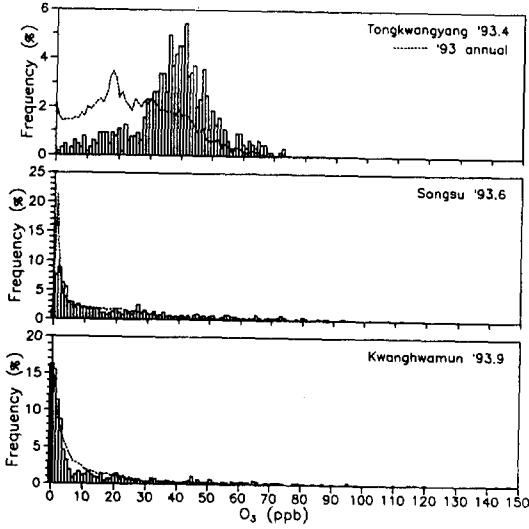


Fig. 8. Frequency distributions of 1-hour average  $O_3$  concentrations at Chung-dong, Tongkwangyang in April, Songsu-dong in June, and Kwanghwamun in September in comparison with annual distributions in 1993.

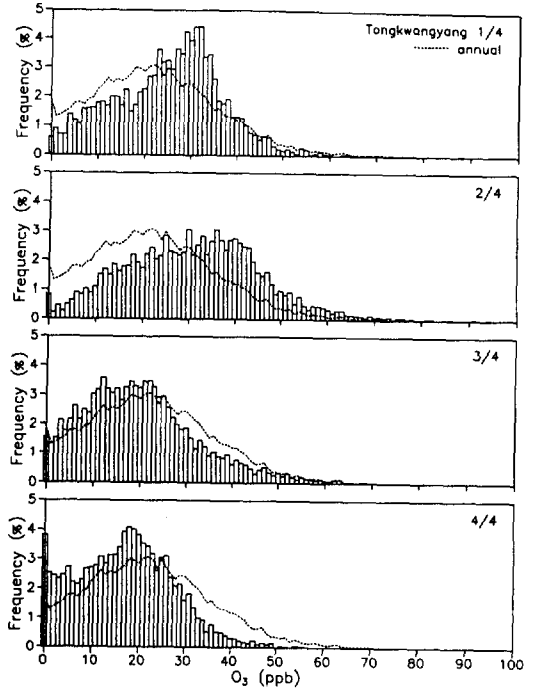


Fig. 9. Quarterly frequency distributions of 1-hour average  $O_3$  concentrations at Tongkwangyang during 1991 to 1993. Tongkwangyang monitoring station was moved from Kumho-dong to Chung-dong in March 1993.

농도도 150 ppb까지 발달하여 전형적인 광화학 반응의 양상을 보여 주고 있다. 9월의 분포도 연중 분포와 크게 다르지 않다. 성수 6월은 고농도 부분이 130 ppb까지 발달하였으나 연중 분포와 비교할 때 저농도 부분이 1/2 이하로 작다. 그림 6에서 6월 일 최저 농도가 높은 이유이며 동광양의 4월과 유사한 부분이다.

그림 9는 '91년부터 '93년까지 3년간 동광양의 분기별 농도 빈도 분포이다. 1/4분기에 30 ppb 부근에서 정점을 이루었던 분포가 2/4분기에는 높은 쪽으로 확장되었다가 3/4, 4/4분기에는 낮은 쪽으로 축소되고 있다. 1/4분기 30 ppb 부근의 비교적 높은 빈도수를 외부에서 유입된 것으로 본다면 2/4분기, 3/4분기의 분포변화는 유입 오존의 영향이 줄어드는 대신 광화학 반응의 영향이 커지는 과정으로 볼 수 있다. 그림에도 그림 8의 성수와 표 2, 그림 4에서 광화분을 제외한 우리나라 많은 지역이 그러하듯 고농도의 발달은 유입 오존의 영향이 뒷받침되는 2/4분기에 더욱 뚜렷하다. 이같은 사실은 봄의 평균 농도 상승이 어떠한 방식으로든 우리나라 오존의 고농도 발생에 영향을 미치고 있음을 의미하며, 서울 등 수도권의 광화학 오염 대책을 위하여 동광양을 비롯한 여천 지방의 오존 농도 변화 연구가 필요함을 의미하기도 한다.

### 5.3 새벽의 농도 상승

고농도는 아니나 우리나라 오존 농도 변화의 특징 중의 하나가 새벽의 농도 상승이다. 그림 7의 4월의 동광양과 6, 12월의 성수, 2월의 광화문들에서도 새벽의 농도 상승을 알아볼 수 있다. 그림 10은 '91년부터 '93년까지 매년 새벽의 농도 상승이 두드러졌던 예들이다. 지역적 공통점을 찾기 힘들며 그림 7에서 동광양은 봄에, 서울은 겨울에 새벽 농도 상승이 비교적 분명했던 것을 감안하면 시기적으로도 공통점이 없다. 바람 방향의 변화로 다른 지역으로 이동하였던 고농도 오존이 되돌아온다면 새벽에도 농도가 재차 상승할 수 있으며, 실제 Zaveri 등 (1995)이 산지를 포함한 복잡 지형에서 전산 실험한 결과를 보면 오후의 1차 정점 이후 2차 정점이 나타나기도 한다. 그러나 새벽 적절한 시간대에 농도가 올라가기 위하여서는 풍향·풍속과 거리 등 이동 관련 변수가 역시 적절히 결합되어야 하나 이같은 결합을 전국에서 기대하는 것은 무리이다.

낮에 생성된 고농도 오존이 혼합층의 변화에 따라 상

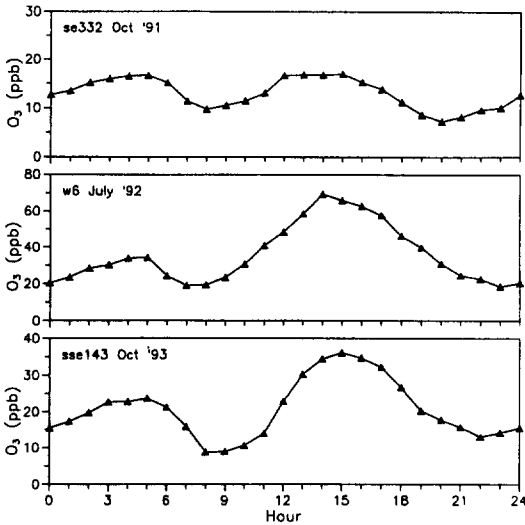


Fig. 10. Predawn rises in mean diurnal variations. Monitoring station is expressed with a combination of 16-sectored direction and the distance in km relative to Kwanghwamun. Se332 is Kwangbok-dong, Pusan, w6 is Namgajwa-dong, Seoul, and sse143 is Tae-hung-dong, Taejon.

층부에 갇혀 있다가 새벽에 수직 혼합에 의하여 지표로 이동함으로써 농도가 높아질 수도 있다 (정용승과 정재섭, 1991; 전병일 등, 1995).

이 같은 변화는 어느 정도 전국적일 수 있으나 보통 일출과 함께 진행되는 수직 혼합이 새벽에 일어날 수 있는 원인에 대하여 먼저 조사되어야 한다. 새벽 농도 상승의 기상 및 대기질 특성으로는 상대적으로 높은 풍속과 낮은 습도, 낮은 NO<sub>2</sub> 농도들이 거론되고 있다 (김진영, 1995). 높은 풍속은 이동을, 낮은 습도는 오존 발생원의 특성을, 낮은 NO<sub>2</sub>는 반응 특성을 나타낼 수 있다. 만일 동광양을 비롯한 남 동해안의 평균 오존 농도 상승이 외부로부터의 유입 때문이고 이의 영향이 전국적일 뿐 아니라 연중 농도 변화에 중요한 역할을 한다면 새벽의 농도 상승도 이와 더불어 논의될 수 있다.

6. 결 론

향후 예상되는 광화학 오염시대에 효과적으로 대응하기 위하여 1991년부터 1993년까지 3년간 우리나라 80여개 고정 측정망 자료를 이용하여 우리나라 지역별 오존 농도 특성을 조사하였다. 크게 두 가지 경향이 관찰

되었는데, 광화문을 중심으로 한 수도권의 변화와 동광양을 중심으로 한 남·동해안의 변화였다.

- 1) 서울, 인천, 경기, 충청을 포함하는 수도권은 봄철 평균 농도 상승의 바탕 위에서 일 최고 농도는 보편적으로 6월에 높았으며 7, 8월에는 빈번한 강우로 100 ppb 이상 고농도 빈도가 높음에도 평균 농도는 높지 않았다. 100 ppb 이상 고농도는 낮은 풍속, 높은 기온, 많은 일사량, 적은 강수량 등 기상만 적합하면 계절에 관계없이 주로 서풍 조건에서 발생하였다.
  - 2) 남·동해안은 겨울철에도 오존 농도가 낮지 않았고 이른 봄부터 평균 농도가 높았다. 특히 동광양은 연중 평균 농도가 가장 높았으며, 광화학 반응의 효과가 작아 일 최고 농도와 최저 농도가 함께 변화하였다. 1/4분기 30 ppb 부근의 높은 빈도와 유사한 조건의 울산, 부산보다 높은 동광양의 농도는 봄철 외부 오존의 유입 가능성을 내포하고 있었다.
  - 3) 우리나라의 월평균 변화는 대체로 봄철 최고와 7, 8월 하락, 가을철 2차 상승구조를 보였다. 봄철 최고와 가을철 최저의 북반구 배경 농도 변화와 같이 볼 때 가을철 2차 상승은 광화학 반응의 결과로 추정되었으며 가을철 최저 농도가 보편적으로 낮다는 점에서도 이를 확인할 수 있었다.
- 결국 잘 알려진 광화학 반응에 관한 연구 결과들을 토대로 고농도 오존유입, 배경농도 변화들의 가설을 열어 전반적 농도 변화를 해석하였으나 많은 구체적 사실들이 불확실하였다. 그러나 지점별로 1년 단위로 살펴볼 때 차이를 보이던 변화들이 지역별로 3년을 총괄할 때 일관성을 보였다. 많은 사실들이 서로 연관되어 있어서 동광양의 농도 변화를 해석할 수 있을 때 서울의 광화학 오염을 정확히 이해할 수 있으며, 새벽 2차 상승원인을 구별할 수 있을 때 오후 최고 농도 상승을 정확히 예측할 수 있으리라 생각되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처 특정 연구와 통상산업부 출연 연구 사업의 일환으로 진행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사드립니다. 측정 자료를 제공하여 주신 환경부 관계자 분들과 자료 수집을 도와준 한국에너지기술연구소 조성호 군, 조언을 아끼지 않은 KIST 환경연구센터의 심상규, 김용표 박사와 김진영 양에게도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 김영성 (1994a) 연료사용 변화에 따른 광화학 오염물질 발생 연구, 한국에너지기술연구소 보고서 KE-93009S, 과학기술처.
- 김영성 (1994b) 수도권 지역의 대기질 개선을 위한 에너지 소비형태 연구 (II), 한국에너지기술연구소 보고서 KIER-941132.
- 김진영 (1995) 여천 동광양 지역 지상 오존 농도와 기상 인자와의 상관성 분석, 석사학위 논문, 서울대학교 대기과학과.
- 송동웅 (1990) 서울시 지역별 대기오염도 분석평가 기초 연구, 한국과학기술연구원 보고서 E1041-4047-6.
- 전병일, 김유근, 이화운 (1995) 부산지역의 오존 농도 특성과 기상 인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11, 45-56.
- 정용승, 정재섭 (1991) 서울 수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7, 169-179.
- 홍성철 (1990) 대기오염 자동측정망 설치 및 운영관리 - 서울시내 대기오염 자동 측정소를 중심으로 -, 대기보전 세미나, 대기측정망과 환경기준, 한국대기보전학회, pp. 55-73.
- Böhm, M., McCune, B. and Vandetta, T. (1991) Diurnal curves of tropospheric ozone in the western United States, *Atmospheric Environment*, 25A, 1577-1590.
- Chung, Y.S. and Dann, T. (1985) Observations of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada, *Atmospheric Environment*, 19, 157-162.
- Davies, T.D. and Schuepbach, E. (1994) Episodes of high ozone concentrations at the earth's surface resulting from transport down from the upper troposphere/lower stratosphere: a review and case studies, *Atmospheric Environment*, 28, 53-68.
- Fuentes, J.D. and Dann, T.F. (1994) Ground-level ozone in eastern Canada: seasonal variations, trends, and occurrences of high concentrations, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 44, 1019-1026.
- Lefohn, A.S., Shadwick, D.S., Feister, U. and Mohnen, V.A. (1992) Surface-level ozone: climate change and evidence for trends, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 42, 136-144.
- Lefohn, A.S., Foley, J.K., Shadwick, D.S. and Tilton, B.E. (1993) Changes in diurnal patterns related to changes in ozone levels, *J. Air Waste Manage. Assoc.*, 43, 1472-1478.
- Liu, S.C., Trainer, M., Fehsenfeld, F.C., Parrish, D.D., Williams, E.J., Fahey, D. W., Hubler, G. and Murphy, P.C. (1987) Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions, *J. Geophys. Res.*, 92, 4191-4207.
- National Research Council (1991) Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution, National Academic Press, Washington, D.C.
- Oltmans, S.J. and Levy, H. II (1994) Surface ozone measurements from a global network, *Atmospheric Environment*, 28, 9-24.
- Seinfeld, J.H. (1989) Urban air pollution: state of the science, *Science*, 243, 745-752.
- Singh, H.B., Viezee, W., Johnson, W.B. and Ludwig, F.L. (1980) The impact of stratospheric ozone on tropospheric air quality, *J. Air Pollution Control Assoc.*, 30, 1009-1017.
- Sunwoo, Y., Carmichael, G.R. and Ueda, H. (1994) Characteristics of background surface ozone in Japan, *Atmospheric Environment*, 28, 25-37.
- Van Ooy, D.J. and Carroll, J.J. (1995) The spatial variation of ozone climatology on the western slope of the Sierra Nevada, *Atmospheric Environment*, 29, 1319-1330.
- Wakamatsu, S., Uno, I., Ueda, H., Uehara, K. and Tateishi, H. (1989) Observational study of stratospheric ozone intrusions into the lower troposphere, *Atmospheric Environment*, 23, 1815-1826.
- Zaveri, R.A., Saylor, R.D., Peters, L.K., McNider, R. and Song, A. (1995) A model investigation of summertime diurnal ozone behavior in rural mountainous locations, *Atmospheric Environment*, 29, 1043-1065.