

우리나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자

Trends and Factors of Ozone Concentration Variations in Korea

김 영 성

한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(2000년 5월 9일 접수, 2000년 11월 20일 채택)

Young Sung Ghim

*Global Environment Research Center,
Korea Institute of Science and Technology*

(Received 9 May 2000; accepted 20 November 2000)

Abstract

Major trends of ozone concentration variations in Korea were investigated by using observation data from around 100 stations for the period of 1991~1997. In addition, important factors regulating those variations were inferred. Three measures such as the number of days exceeding 80 ppb, the 95th percentile of daily maxima, and the annual average concentration were used for the analysis of multi-scale ozone concentration variations. Three areas in the southwest (Sosan, Mokpo, and Cheju) of which monitoring has been operated since 1995 showed the highest annual average concentrations over Yosu; this was noted because of the high annual average in the Yosu area in the early 1990's. Large increases in annual average concentrations were observed along the relatively cleaner areas connecting Kangnung and Kwangju (northeast to southwest), in contrast to polluted areas connecting Seoul and Pusan (northwest to southeast). Both the number of exceedance days and the daily maximum concentration were nearly constant in the Greater Seoul Area in spite of interannual fluctuations associated with year-to-year changes in air temperature. Within the Greater Seoul Area, all three measures usually showed the same trend; they decreased in the middle and west and increased in the east and northeast. All three measures including the number of exceedance days increased largely at Sillim where the average concentration was high but no exceedance days were recorded in the early 1990's. Nationwide ozone concentration variations appear to be determined by the competitive influence of long-range transport and local urban emissions. Within the city including the Greater Seoul Area, changes in emission which accompany changes in population and in the number of vehicles (in the process of urban development) were found to be important components of ozone concentration variations.

Key words : trend analysis, factor estimation, long-range transport, urban development, emission change

1. 서 론

1990년대 초 등장하기 시작한 오존 문제는 중반과 후반을 지나며 빠르게 사회 현안으로 부각되고 있다. 이와 같은 변화의 이면에는, 북태평양 고기압의 이상 발달로 고온과 함께 고농도 오존이 빈번하였던 1994년 여름과, 연이은 1995년 7월의 오존 경보제, 1997년 7월의 오존 예보제 실시가 자리하고 있다. 1994년 여름의 고농도 오존이 학계의 관심을 높이는 중요한 계기가 되었다면 일반 시민의 관심은 주로 경보제와 예보제 때문이다. 이에 따라 정책당국도 CNG (compressed natural gas) 자동차 보급과 VOC (volatile organic compound) 배출 저감을 적극 추진하는 한편, 대기오염 측정망의 확충, 대기영향권역에 기초한 대기환경 관리 등 오존으로 대표되는 2차 오염시대에 적합한 정책 기반을 조성하고자 노력하고 있다(환경부, 2000).

그러나 우리나라 대기환경의 변환에 따른 사회관심의 고조, 정책 당국의 신속한 대응에도 불구하고 우리의 인식과 관심, 대응이 다양한 변수에 의한 여러 층의 변화가 공존하는 오존 농도 변화의 어디까지를 보고 있는지는 별개의 문제이다. 1970년 청정대기법의 틀이 완성된 이후 20년간의 노력에도 불구하고 미국 동부의 오존 고농도 현상이 지속되자 미국 의회의 주선으로 동부지역 37개 주는 1995년 광화학 오염물질 이동을 조사하기 위하여 OTAG (Ozone Transport Assessment Group)을 결성하였다. OTAG의 연구 책임자인 Husar(1998)는 오존오염의 특성을 다음과 같이 요약하고 있다. (1) 한 지역의 오존 농도는 자기 특징적인 지구 규모와 지역 규모, 그리고 도시 규모 변환이 중첩된 결과이다. (2) 오존 농도의 시간 변화는 수년 내지 수백년에 걸친 지구 단위 변화, 연중 변화, 주단위 변화, 3~5일의 종관 규모 변화, 일단위 변화 등 몇 개의 시간단위 변화로 분리할 수 있다. (3) 시간 변화는 오염물질 이동을 매개로 공간 변화와 연결된다. OTAG 영역의 전형적 풍속인 3~5 m/s를 기준으로 할 때 종관 규모 변화는 1,000~2,000 km, 일단위 변화는 25~400 km의 이동을 의미한다.

Duncan and Chameides (1998)는 얼마만한 규모의 변화를 보느냐에 따라 연구의 관점과 주 대상(target)

농도가 달라질 수 있음을 지적하고 있다. 도시규모에서는 고온의 정체된 대기 조건에서 나타나는 단기간의 고농도가 주로 관심의 대상이며 인체에 대한 위해성이 문제가 된다. 지역규모에서는 농도는 다소 낮으나 시간 단위가 길고 궁극적으로는 산림이나 농작물에 대한 피해가 문제가 된다. 지구규모에서는 에어로솔의 냉각기능에 상응하는 오존 자체의 온난화 효과와, 광화학 반응의 OH 라디칼이 메탄, 할로카본 등 다른 온난화 가스에 미치는 영향이 주요 관심의 대상이다.

그림 1은 오존오염으로 유명한 미국의 주요 도시(USEPA, 1998)와 비교한 서울의 오존농도 모습이다. 가장 높은 일최고 농도는 국지변화에 민감하기 때문에 추이를 살피기 위하여 각 측정소별로 연중 2번째로 높은 농도를 취하여 지역별로 평균한 것이다. 따라서 서울은 서울지역 20개 측정소의 평균이다. 해에 따라 차이가 있으나 서울의 오존농도는 LA나 NY 등 미국의 주요 도시에 근접하고 있다. LA 지역은 1988년 이후 현저한 감소를 보이고 있는데 지역 내 오염물질 배출이 감소한 이유도 있지만 LA 권역이 팽창하면서 고농도 지역이 내륙으로 이동한 때문이다(Schere and Hidy, 2000). 미국 내 전반적인 오존의 감소 추세에도 불구하고 휴스톤의 농도는 애틀란타 등 다른 남부 도시들과 같이 생물학적 VOC 배출의 영향이 커져 계속 높은 수준을 유지하고 있다(TNRCC, 2000). NY와 워싱턴 등 북동부 지역은 오하이오 동 중서부 공업지대의 NOx 영향으로 자체 노력만으로는 오존농도 저감에 한도가 있는 것으로 판단하고 있다(OTAG Air Quality Analysis Workgroup, 1997).

오존오염의 모습은 매우 다양하고 영향을 미치는 인자는 더욱 많다. 오존오염의 실태를 조사하고 특성을 분석하여 주요 인자를 추정하는 작업은 오존오염 연구의 첫 단계로써 다른 연구와 정책 수립의 기초가 된다는 점에서 중요하다. 대기환경학회에서도 정용 등(1986) 이래 1990년대에 들어서도 정용승과 장재섭(1991) 등 많은 논문들이 우리나라 오존의 실태와 특성을 분석하고 있다. 그러나 전국을 대상으로 한 연구는 의외로 드물어 서명석 등(1995), 김영성(1996), 허정숙 등(1999)의 논문이 발견될 뿐이다. 김영성(1996, 1999a)은 1990년 초반 100 ppb를 초과하는 고농도 오존의 대부분이 서울, 수도권

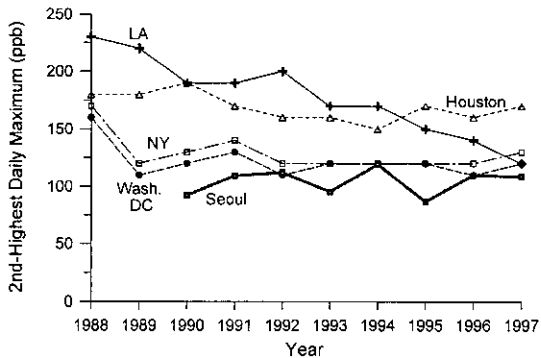


Fig. 1. Trend in annual second-highest daily maximum ozone concentration in Seoul compared with different metropolitan areas in the U.S. notorious for serious ozone pollution.

에서 발생하였음을 지적하였다. 그러나 전병일 등(1995) 이래 많은 연구들이 부산의 고농도 오존 발생을 언급하고 있고, 환경부에서는 1999년 12월, 서울, 수도권에 이어 부산, 대구, 광양만 권역을 오존 혹은 오존과 이산화질소 저감을 위한 대기환경규제 지역으로 지정하였다.

오존오염을 다룬 대부분의 논문이 서울, 수도권을 대상으로 하고 있다. 김영성(1997)은 1990년대 전반 광화문을 가장 오염이 심한 지역의 하나로 지목하였으나, 허정숙 등(1999)이 분석한 1995~1997 자료에 의하면 광화문은 서울 측정소 중 가장 오존농도가 낮다. 오현선과 김영성(1999)은 1990~1997 기간 중 대표적 고농도 오존 사례로써 선정한 3개 사례에서 사례 중 100 ppb를 초과하는 최고농도의 대부분이 광화문을 비롯한 서울 중심과 서부 측정소에서 기록되었음을 보여주었다. 그러나 허정숙 등(1999)과 1994~1997 자료를 분석한 윤성철 등(1999)에 의하면 북동부 쌍문과 구의 등 동부의 농도가 높고 서부 측정소의 농도는 낮다.

본 연구에서는 이와 같이 연구결과들이 차이를 보이는 원인을 알아보고 자료가 가능한대로 시간적, 공간적으로 포괄적 경향을 조사하기 위하여 1991~1997 기간 동안 전국과 서울, 수도권을 나누어 오존농도 변화 추이를 분석하고 주요 인자를 추정하였다. 서울, 수도권을 별도로 살펴본 이유는 (1) 1990년대 전반부터 전국에서 가장 먼저 오존오염이 문제되었고(김영성, 1996), (2) 높은 인구밀도와 차량

들로 배출의 집적도가 높고 변화가 심하며, (3) 권역 내 국지변화를 충분히 조사할 수 있을 만큼 측정소 수가 많기 때문이다. 또한 우리나라의 많은 변화가 서울, 수도권으로부터 비롯되는 예가 많은 만큼 이의 변화로부터 다른 지역 미래의 변화를 알아볼 수 있다는 의미도 있다.

그림 2는 본 연구의 분석에서 1991~1997 기간 동안 일부분이라도 의미있는 통계치를 주었던 측정소들로 서울, 수도권 38개소와 전국 100개소 측정소의 위치이다. 환경부와 국립환경연구원(2000)에 의하면 2000년 1월 현재 전국에 145개 지역 대기오염 측정소가 있으며, 이 중 101개소는 환경부에서, 나머지 44개소는 서울 등 지방자치단체에서 운영하고 있다. 이외에도 국가배경농도 측정소 5개, 지역배경농도 측정소 4개, 도로변 측정소 16개가 운영되고 있어 오존을 측정하는 측정소는 모두 170개에 이른다. 그러나 이들 대부분은 최근 수년 내 측정을 시작한 곳들이다.

2. 조사 방법

1991~1997 기간 동안 서울시에서 운영하고 있는 10개 측정소를 포함한 그림 2의 전국 측정소의 1시간 평균 대기오염물질 측정치를 분석하였다. 먼저 전국의 변화 추이를 조사하고, 춘천을 포함한 서울/수도권의 변화 추이를 측정소별로 별도로 조사하였다. 전국의 변화 추이는 그림 2와 같이 전국의 측정소를 N1~N3과 1~15의 18개 권역으로 나누어 살펴보았다. 이 중 서해안의 서산(N1), 목포(N2)와 제주(N3)는 1995년부터 측정이 시작된 신설 측정지역이다. 이들을 제외하면 서울/수도권(1)부터 시계 바늘 반대방향으로, 청주/천안(2), 대전(3), 전주/군산/익산(4), 광주(5), 여수/광양(6), 마산/진해/창원(7), 부산(8), 울산(9), 포항(10), 대구(11), 김천/구미(12), 원주/충주/제천(13), 강릉(14), 춘천(15) 등이다(이후 청주/천안은 청주로 표기하는 등 서울/수도권을 제외하고 두 개 이상의 지역을 묶었을 때에는 제일 앞의 명칭을 대표로 사용).

연간 추이를 알아보기 위하여서는 적절히 정의된 농도나 초과 수를 조사하는 것이 보통이다(NRC, 1991). 본 연구에서는 우선 오존농도 변화의 전반적 경향을 살펴보기 위하여, 그림 3과 같이 춘천을 포

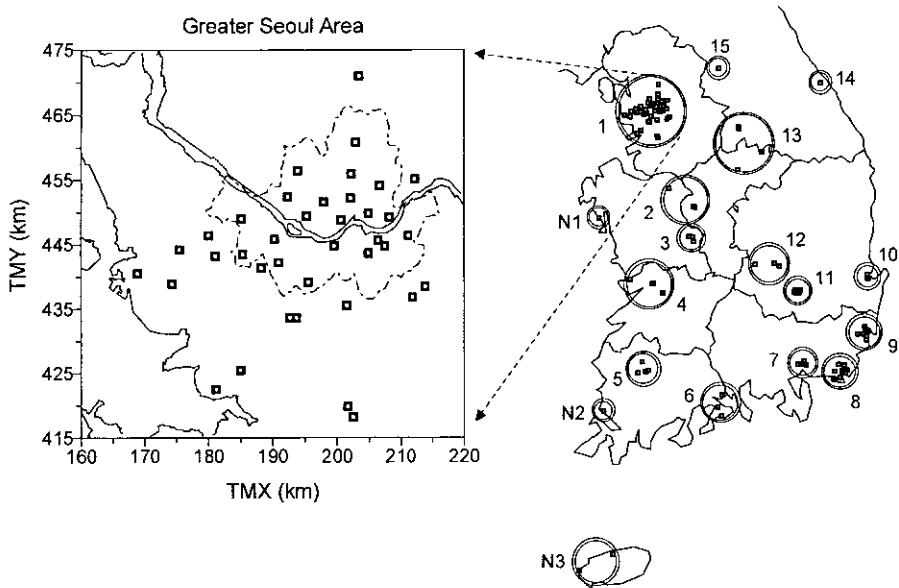


Fig. 2. Distribution of the ozone monitoring stations, denoted by open rectangles, that gave statistically significant results for analyzing the trends of concentration variations during 1991~1997. Nationwide variations of ozone concentration will be investigated by regions represented by double circles and the variations in the Greater Seoul Area will be separately investigated by stations. See the text for the designation of the region numbered by N1 - N3 and 1-15.

함한 서울/수도권과 여타 지역을 나누어 연중 80, 100, 120, 160 ppb 초과일수와 일최고 농도 중 가장 높은 값과 2번째로 높은 값, 백분위수 99%, 95% 값을 조사하였다. 초과일수는 측정소별 초과일수를 지역별로 나누어 평균한 것이며, 일최고 농도도 예를 들어 2번째 일최고 농도는 그림 1에서와 같이 각 측정소별로 연중 2번째로 높은 농도를 구한 후 지역별로 평균한 것이다. 같은 조건에서 추이를 살펴 보기 위하여 그림 3의 경우 1995년 이후에도 신설 측정지역 자료는 여타 지역 평균에 포함시키지 않았다.

초과일수는 먼저 일최고 농도를 구하여 일최고 농도가 각각 80, 100, 120, 160 ppb를 초과하는가를 조사하였는데, 오존시즌인 5월부터 9월까지 총 153일 중 2/3인 102일 이상 일최고 농도가 주어진 측정소에 대하여서만 초과일수를 조사하였다. 따라서 그림 3에서 서울/수도권의 경우, 예를 들어 1992년에 39개 측정소(춘천 포함) 중 30개 측정소에서 초과일수가 조사되었다면 1992년 서울/수도권의 초과

일수는 30개 측정소 평균이 된다. 연중 365일이나 366일 대신 오존시즌 중의 날수만을 점검하여 유효성을 판단한 것은 80 ppb 이상 고농도 오존이 조사의 대상이었기 때문이다. 일최고 농도 역시 초과일수와 같은 방식으로 계산하였으나, 이번에는 최고농도 값 자체가 중요하기 때문에 오전 5시부터 오후 10시까지 16시간 중 2/3인 11시간 이상 측정치가 있을 때만 일 최고농도를 조사하였다. 물론 하루 24시간 중 2/3인 16시간 이상을 유효성 판정의 기준으로 할 수도 있으나 이 경우 낮의 8시간이 결측되었다면 보통의 일변화에서 일최고 농도로서 의미를 부여하기 어려우므로 판정의 효과를 높이기 위하여 낮 시간을 중심으로 기준을 설정하였다.

그러나 오존의 경우도 평균농도를 계산할 때에는 고농도에 중점을 둔 초과일수나 일최고 농도와 달리 저농도부터 고농도까지 모두가 중요하므로 하루 중 낮 시간이나 일년 중 오존시즌을 강조하는 대신 연중 시간수의 2/3 이상 측정치 유무를 기준으로 유효성을 판정하였다.

3. 전반적 경향과 변수 선정

그림 3을 보면 춘천을 포함한 서울/수도권은 1991년부터 7년간 해에 따라 변화가 클 뿐 일관된 추이를 찾기 어렵다. 김영성(1997)에 의하면, 1976~1986 기간 미국 코네티컷주에 비하여(NRC, 1991) 서울/수도권은 특히 30°C를 전후한 고온에서 강우 등의 영향으로 분산이 심하나 그럼에도 그림 3과 같은 변화의 가장 큰 요인은 기온이다. 따라서 그림 4에서는 같은 기간 동안 최고 기온이 30°C를 넘는 날수를 조사하였다. 해마다 기온에 대한 대기화학 반응의 결과가 달라 고온일수와 오존 고농도를 정확히 일치시킬 수는 없으나 서울/수도권의 해에 따른 증감은 주로 기온 때문이며 유사한 경향을 여타 지역에서도 관찰할 수 있다. 그러나 그림 4를 상세히 살펴보면 서울/수도권의 경우 최고 기온이 30°C를 넘는 날수가 미세하지만 1994년이 1997년보다 많음에도

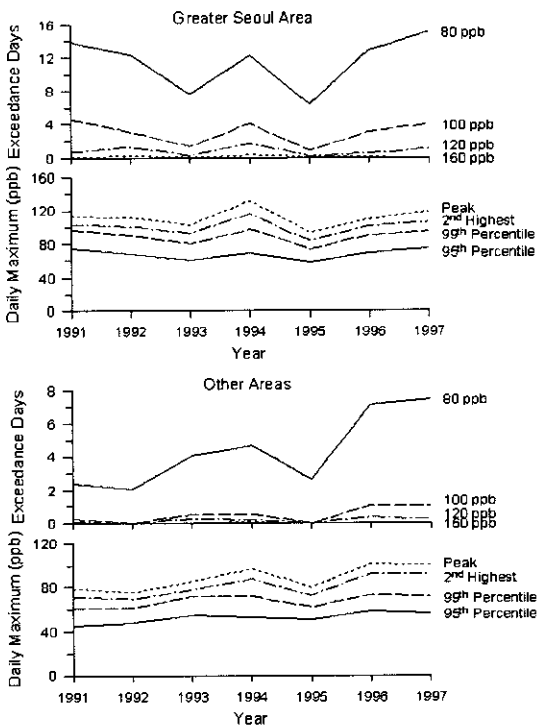


Fig. 3. Trends in various ozone summary statistics for the Greater Seoul Area including Chuncheon and other areas.

80 ppb 초과일수와 95% 일최고 농도는 1995년 이후 계속 증가하여 1997년에는 1994년의 수치를 넘고 있다. 그리고 이와 같은 현상은 1994년의 고온일수가 명확하게 많았던 여타 지역의 경우 더욱 분명하다.

사실 그림 4의 서울/수도권과 여타 지역의 고온일수의 차이에도 불구하고 기온은 오존농도에 중요한 바람, 강우 등 다른 기상 요소보다도 지역 편차가 작은 변수이다(김진영 등, 2000; 김영성 등, 1999). 반면 오존은 다른 어느 오염물질보다 주변환경에 민감하고 특히 우리나라의 경우 낮은 풍속에 복잡한 지형, 고농도 오존 발생에 유리한 여름철에 빈번한 강우 등의 영향으로 지역 편차가 크다. 보통 초과일수, 초과 시간 수 등 초과 수는 평균 농도보다 주변 환경에 민감하며, 평균 농도 계산에서 평균화 시간이 길수록 오염물질 이동의 영향이 커진다. 후자의 현상에 대하여서는 아직 명확히 조사되지 않았으나 미국 북동부 고농도 오존의 경우 1시간 평균보다 8시간 평균에서 중서부 화력발전소 배출 NO_x의 영향이 뚜렷하다거나(Yarwood *et al.*, 1998), 우리나라에서도 춘천에 대한 서울/수도권의 영향이 단기 사례보다는 장기 통계 분석에서 분명하게 나타나는 등(Ghim and Chang, 2000)의 현상으로부터 추정할 수 있다.

본 연구에서는 고농도 현상을 가장 직접적으로 표현할 수 있는 변수로서 80 ppb 초과일수를, 고농도 변화 추이를 알기 위한 변수로서 95% 일최고 농도

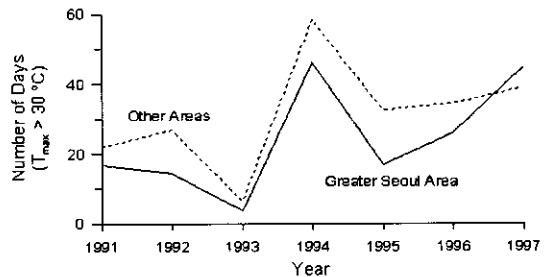


Fig. 4. Variations in average number of days with daily maximum temperature over 30°C for the Greater Seoul Area and other areas. The value for the Greater Seoul Area is an average of the observations from surface weather stations in Seoul, Incheon, Suwon, and Chuncheon; the value for other areas is an average of the observations from 12 surface weather stations including Kangnung, Wonju, Chongju, etc.

를 선택하였으며, 시간적, 공간적으로 큰 규모의 변화를 반영할 수 있는 변수로서 연평균 농도를 선택하여 1991년부터 1997년까지 7년간 우리나라 오존 농도 변화를 살펴보았다. 초과일수는 농도 지표보다 주위 환경에 민감하다는 NRC(1991)의 지적과 평균화 시간이 길수록 이동의 영향이 커진다는 앞의 언급을 종합하면, 본 연구의 오존에 관한 3개 변수는 초과일수, 일최고 농도, 연평균 농도 순으로 큰 규모의 변화, 간접 영향을 나타내게 된다. 아울러 오염물질 배출 변화를 추정하기 위하여 1차 오염물질의 지표로서 CO의 연평균 변화를, 광화학 반응의 영향이 반영되기는 하나 NOx 배출의 지표로서 NO2의 연평균 변화를 조사하였다. CO도 광화학 반응과 무관하지 않으나(예를 들면, Chin *et al.*, 1994) 오염물질 배출이 많은 도시지역에서는 반응성이 낮으므로 본 연구에서는 1차 오염물질의 지표로서 사용하였다.

4. 전국 지역별 변화

4.1 추이 분석

그림 5는 1991년부터 1993년까지 1990년대 초반

과 1995년대부터 1997년까지 1990년대 중후반 우리나라의 지역별 평균 80 ppb 초과일수 분포 및 1991년부터 7년간의 변화율이다. 서산, 목포, 제주는 1995년부터 측정이 시작되었으므로 변화율이 없이 90년대 중후반 평균 초과일수만을 표시하였다. 90년대 초반에는 서울/수도권의 초과일수가 가장 많고, 춘천 등의 초과일수가 비교적 많았으나 90년대 서울/수도권은 거의 변화가 없는 대신 그림 3에서 이미 살펴본 바와 같이 여타 지역은 증가추세가 뚜렷하다. 특히 춘천, 포항, 대전, 여수 등지의 증가율이 높아 90년대 중후반에는 춘천의 초과일수가 가장 많고, 목포, 서산, 서울/수도권이 뒤를 잇고 있다. 1995년부터 측정이 시작된 신설 지역은 기존 오염지역인 북서-남동의 경부축으로부터 멀리 떨어져 있음에도 제주를 제외하고 초과일수가 많다.

그림 6은 1995년대부터 1997년까지 90년대 중후반 평균 95% 일최고 농도와 연평균 농도의 분포 및 1991~1997 7년간의 변화율이다. 초과일수에서와 같이 90년대 초반에는 서울/수도권의 농도가 가장 높았으나 90년대 중후반에는 춘천의 농도가 가장 높고, 서산, 목포, 제주 등 신설 측정지역과 서울/수

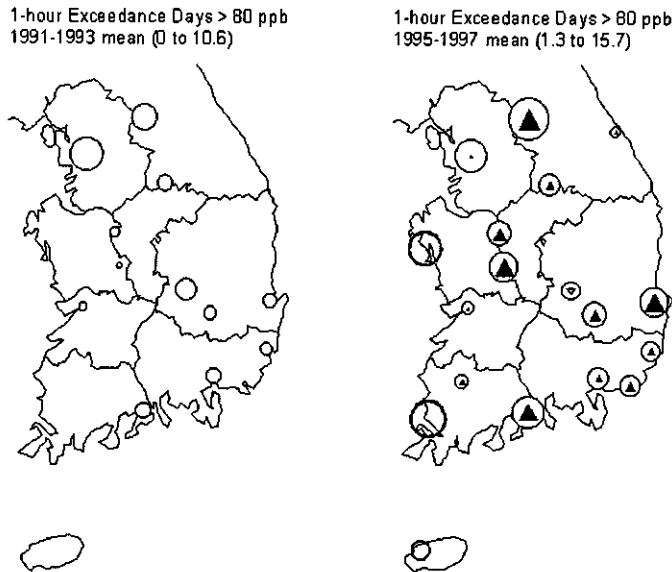


Fig. 5. Average number of days exceeding 80 ppb by region for 1991~1993 (left) and for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997 (right). Shaded circles represent the number of exceedance days; solid and open triangles represent the increase and decrease of the number of exceedance days during 1991~1997. The size of symbols is proportional to the magnitude of parameters. Because the stations in Sosan, Mokpo, and Cheju were operated since 1995, only the average number of exceedance days for 1995~1997 was presented.

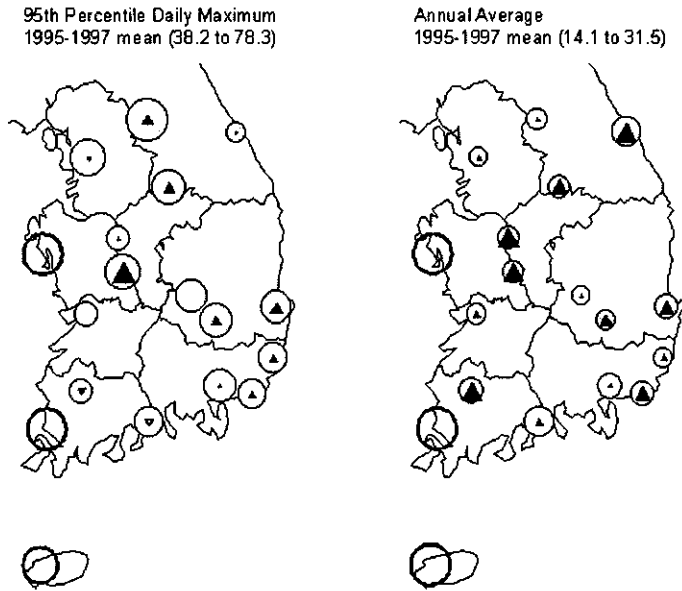


Fig. 6. Ninety-fifth percentile of daily maxima (left) and annual average (right) by region for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 5.

도권, 대전 순으로 농도가 높다. 초과일수의 경우와 달리 일최고 농도에서는 제주의 농도도 높다. 특히 대전의 농도 증가율이 두드러져 90년대 초반에는 농도가 낮았으나 중후반에는 서울/수도권 다음으로 높다.

연평균은 그림 5의 초과일수는 물론 일최고 농도와도 모습이 상당히 다르다. 우선 기존의 서울-부산축 대신 강릉부터 광주까지 북동-남서축의 증가율이 높은 것이 특이하다. 초과일수에서는 목포, 서산이 많고, 일최고 농도에서는 춘천 다음으로 서산, 목포, 제주 순으로 제주도 일최고 농도가 높았으나 연평균에서는 제주, 목포, 서산 순으로 신설 측정지역의 농도가 기존 측정지역보다 높고 그 중에서도 제주가 가장 높다. 이들 신설 측정지역 다음으로는 90년대 초 연평균이 높아 주목받았던 여천이 높고(김영성, 1996, 1999b), 90년대 전반부터 여천과 빈도분포 특성이 유사하였던 강릉, 광주가 다음으로 높다(Ghim과 Chang, 2000). 서울/수도권, 춘천, 마산, 김천의 증가율이 낮으나 연 0.3 ppb 안팎이며 모든 지역의 연평균이 증가한 것도 주목할 만하다.

그림 7은 1995년대부터 1997년까지 90년대 중후반 CO와 NO₂ 연평균 농도 분포와 1991~1997 7년

간 변화율이다. CO의 경우 청주의 증가율이 클 뿐 대부분 지역의 농도가 큰 폭으로 감소하였다. 특히 서울/수도권, 대구, 춘천 등 기존 오염지역의 감소폭이 크고, 90년대 초반 농도가 높았던 광주도 감소폭이 크다. 여수, 마산, 대전 등은 작지만 농도가 증가하였으며, 이에 따라 90년대 중후반 CO 농도는 청주, 대전, 원주 등 내륙도시가 높고 서울/수도권도 아직 높다. NO₂는 1990년대 초반과 유사하나(김영성, 1997) 더욱 명확하게 서울/수도권, 부산, 대구, 김천, 울산, 대전 등 서울-부산 교통축을 따라 농도가 높다. 그러나 농도 증가는 광주가 가장 크고, 대전, 김천, 부산, 포항, 춘천 등의 증가폭이 크다. 서울/수도권은 거의 변화가 없다. 신설 측정지역은 강릉, 여수 등과 함께 CO, NO₂ 모두 가장 낮은 수준이다.

그림 5부터 7까지 오존을 중심으로 1991년부터 1997년까지 7년간 우리나라의 오염물질 농도 변화를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 오존 연평균 농도는 전국적으로 증가하였으며 특히 강릉부터 광주까지 북동-남서축의 증가폭이 컸다. CO는 대부분의 지역에서 감소하였고, NO₂는 지역에 따라 변화가 컸다.
- (2) 서울, 수도권의 초과일수와 일최고 농도는 거

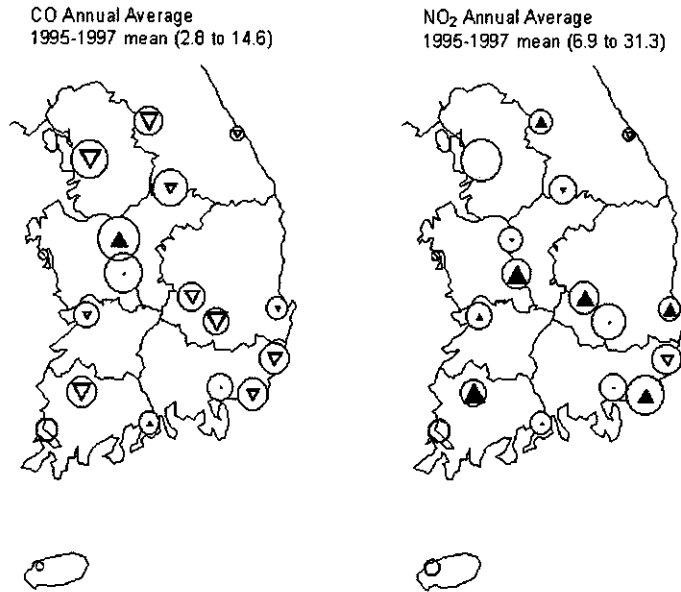


Fig. 7. Annual average CO and NO₂ by region for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 5.

의 변화가 없었고 연평균은 약간 증가하였다. CO는 현저하게 감소한 반면, NO₂는 거의 동일하였다.

(3) 대전은 초과일수, 일최고, 연평균 모두 큰 폭으로 증가하였으며, NO₂ 역시 큰 폭으로 증가하였고 대부분 다른 지역과 달리 CO도 소폭 증가하였다.

(4) 1995년부터 측정을 시작한 제주, 목포, 서산과 기존의 강릉, 여수의 경우, 연평균 오존은 높고, CO, NO₂는 낮았다. 신설 측정지역들은 일최고 농도도 높았고, 목포, 서산, 여수는 초과일수도 많았다. 변화폭은 크지 않았으나 강릉은 CO, NO₂ 모두 감소한 반면 여수는 모두 증가하였다.

4. 2 주요 인자 추정

대부분 나라의 정규 대기질 측정소가 그렇지만 (Demerjian, 2000) 우리나라의 측정소 역시 대개의 경우 대도시나 공단 등 인구 밀집지역에 위치한 까닭에 강한 NO의 영향으로, 인위적 배출의 영향을 받는 대륙의 배경농도로 추정되는 35~40 ppb 보다 연평균 농도가 낮다 (Ghim and Chang, 2000). (4)에서 신설 측정지역인 제주, 목포, 서산과 기존의 강릉, 여수가 CO, NO₂ 등의 오염도가 낮으면서 오존 연평균이 높은 것은 이들 지역이 주요 NO 배출지역

으로부터 떨어져 있어 기본적으로 NO의 영향이 작기 때문이다. 이들 지역의 연평균은 아직 35~40 ppb에는 미치지 못하나 강릉과 여수는 22~23 ppb, 신설 측정지역은 30~31 ppb로 여타 지역의 90년대 초 10~18 ppb, 90년대 중후반의 14~20 ppb보다 높다. 신설 측정지역 중에서도 제주 연평균이 가장 높으나 일최고 농도는 서산, 목포보다 낮고, 초과일수는 그림 5에서 볼 수 있는 것과 같이 높은 수준이 아니다. 또한 강릉은 연평균만 (3개 신설 측정지역과 여수보다는 낮으나) 높은 수준일 뿐 일최고 농도와 초과일수는 전국에서 가장 낮다.

그림 8에서는 이들 5개 측정지역의 오존농도 모습을 보다 상세히 알아보기 위하여 오존농도 빈도 분포를 조사하였다. 서울/수도권이나 90년대 초 광화문과 같이 국지 배출에 의하여 오존농도가 상승할 때에는 밤에는 동일지역의 NO에 의하여 오존이 파괴되어 0 가까이 떨어지므로 빈도 분포는 직선에 근접하거나 아래로 볼록한 형태를 취하게 된다 (Ghim and Chang, 2000; 김영성, 1996). 이동의 영향이 클수록 고농도와 저농도가 함께 줄어 위로 볼록하게 되며 결국에는 인위적 배출의 영향에 따라 대륙의 배경농도인 35~40 ppb나 혹은 여타 농도 범위로 수렴

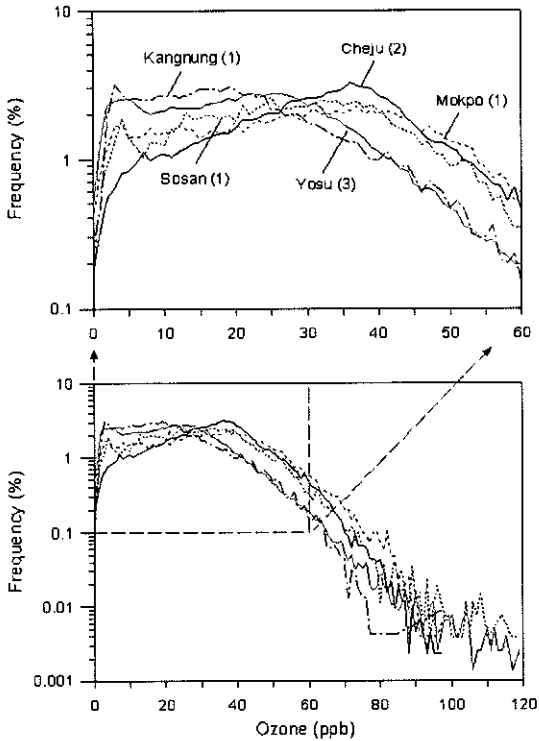


Fig. 8. Frequency distributions of 1-hour ozone concentrations for selected cities, 1995~1997. Ozone concentrations up to 120 ppb were plotted to examine variations in general ozone patterns. Numbers in parentheses indicate the number of monitoring stations.

되게 된다. 김영성(1996)이 여수지역(보다 정확하게는 광양지역)의 오존이 국지배출이 아닌 장거리 이동의 영향일 가능성을 제기한 것은 그림 8과 같은 빈도분포 분석의 결과이며, 이와 같은 사실은 VOC 성분 분석을 통하여서도 확인되었다(김영성 등, 1998).

충분히 예상할 수 있는 결과이기는 하나 그림 8은 5개 측정지역의 빈도분포 모두 국지배출보다 이동의 영향이 큼을 보여주고 있다. 40~60 ppb 범위를 중심으로 살펴볼 때 목포, 서산, 제주가 유사하고 여수, 강릉이 유사하다. 그러나 목포, 서산, 제주 중에서는 제주의 분포가 가장 위로 블록하여 이동의 영향이 크게 나타나 있다. 여수는 이들 지역들 보다 저농도 부분이 많아 국지배출의 영향이 큰 것으로 분석되는데, 이와 같은 현상은 그림 9에서 보는 것

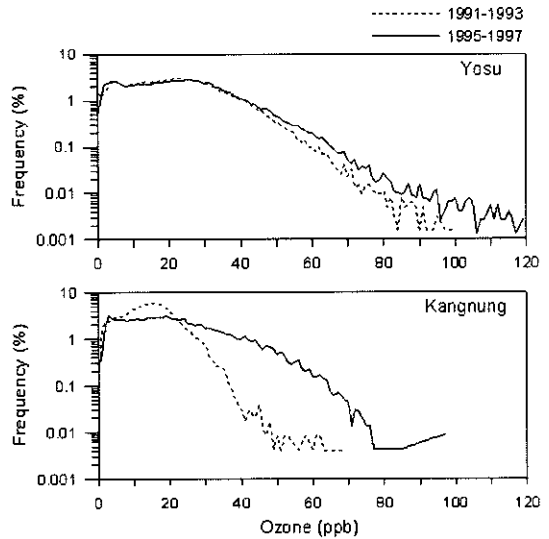


Fig. 9. Changes in the frequency distribution of 1-hour ozone concentrations between 1991~1993 and 1995~1997 in Yosu and Kangnung.

과 같이 90년대 중후반에 보다 뚜렷하다(이동의 영향이 클 때는 일정 농도를 중심으로 위로 블록한 형태이나 국지 배출의 영향이 커질수록 낮에는 오존농도가 높아지고 밤에는 떨어져, 빈도분포에서는 저농도 부분이 늘어나면서 고농도까지 길게 발달하는 모습을 보이게 된다. 빈도분포를 분석할 때에는 소수의 고농도가 길게 이어지는 고농도 부분보다는 전체적인 분포 모습을 관찰할 수 있는 20~80 ppb 정도의 부분을 주로 살펴계 되므로, 고농도가 상용하게 발달함을 전제로 저농도 부분의 변화만을 언급한 것이다). 그림 9는 또한 90년대 강릉의 빈도분포 변화를 보여주고 있는데, 90년대 초에 비하여 중후반 주변 지역의 영향이 크게 증가하였음을 알 수 있다.

Ghim and Chang (2000)은 90년대 초 강릉의 빈도분포가 여수보다 위로 블록할 뿐 아니라 20 ppb 주변의 낮은 농도 범위에서 최고점을 나타낸 것은 한반도 주변 중에서 비교적 깨끗한 북동부의 영향을 받기 때문으로 해석하였다(Akimoto *et al.*, 1996). 실제 오현선과 김영성(1999)은 고농도 오존이 빈번하였던 1994년 여름 서울/수도권에서도 8월 중순 북동부에서 기류가 유입됨에 따라 수일간 오존농도 상승이 지연되었음을 밝힌 바 있다. 이와 같이 본다

면 90년대 중후반 빈도분포를 비교한 그림 8에서는 명확하지 않으나, 강릉은 다른 4개 지역이 한반도 서쪽 중국의 영향을 받고 있는 것과 달리 북동부의 영향을 받기 때문에 기본적으로 농도가 낮아 90년대 중후반 국지배출의 영향으로 고농도 부분이 늘었음에도 불구하고 초과일수와 일최고 농도는 아직 충분히 낮다.

(1)의 변화는 (2)의 서울/수도권의 연평균 증가에서 볼 수 있는 것과 같이 전체적으로 우리나라의 오존오염이 심화되면서 상대적으로 오염이 덜하였던 북동-남서측으로 오염이 확산된 것으로 이해할 수 있다. 오염 확산의 1차적 원인은 CO, NO₂만을 조사한 본 연구에서는 확인할 수 없으나 VOC 등 우리나라의 배출 증가와 함께, 변화의 규모가 전국적이라는 점에서 역시 중국의 광범위한 영향의 가능성을 배제할 수 없다.

(3)의 변화는 대전이 대표적 내륙 도시라는 점에서 특히 주목할 필요가 있다. 역시 내륙도시인 춘천은 90년대 초반 서울/수도권의 영향이 장기적인 것으로 추정하였으나(Ghim and Chang, 2000; 김영성, 1997), 초과일수, 일최고 농도, 연평균 순으로 90년대 증가폭이 커서 서울/수도권의 영향이 점차 가까워짐을 나타내고 있다. 그러나 대전은 상류에 중요한 오염원이 없을 뿐 아니라 CO, NO₂ 모두가 증가하여 상황이 다르다. 따라서 그림 10에서는 정확한 배출량 추정이 어려운 현실 속에서(김진영 등, 1999), 오염물질 배출을 간접적으로 알아보고자, 서울과 대전 등 6대 광역시의 90년대 인구와 차량 등록대수 변화율을 조사하였다(통계청, 1992~1998). 1995년 광역시 지정과 함께 시 영역이 크게 변하여 1995년 이전과 이후를 나누어서 변화율을 산출하였으며, 차량 등록대수는 1993년부터 상세한 자료 이용이 가능하여 90년대 초반 변화율은 1993, 4년만을 대상으로 하였다. 1995년을 기점으로 많은 지역에서 인구와 차량 등록대수의 절대 값이 변하므로 전체 변화율은 절대 값은 고려하지 않고 변화율만을 평균하였다.

대전은 서울과 6대 광역시 중 90년대 인구 증가율이 가장 높았으며 특히 90년대 전반 1991년부터 1994년까지 인구 증가율이 높았다. 차량 증가율 역시 인천, 광주, 울산 등과 함께 높았으며 1995년부터 1997년까지 90년대 중후반에는 차이가 크지는

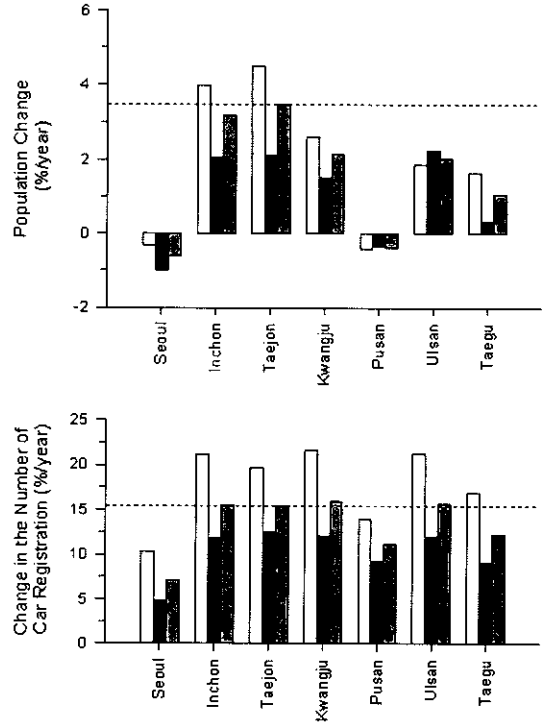


Fig. 10. Average rates of change in population and the number of car registrations. Open bar shows the average between 1991 and 1994 for population and between 1993 and 1994 for the number of car registrations. Solid bar shows the average between 1995 and 1997. Shaded bar shows the average for the entire period.

않으나 서울과 6대 광역시 중 차량 증가율이 가장 높았다. Ghim and Chang (2000)은 우리나라 오존농도 분포를 특징짓는 중요한 요소의 하나로써 내륙으로 진입할수록 낮아지는 풍속을 들고 있다. 대전 역시, 춘천, 전주, 원주 등 다른 내륙 도시와 같이 풍속 0.3 m/s 미만 정체 비율이 연중 20.7%로 높다(서울은 4.8%; 기상청, 1991). 즉, (3)의 대전의 변화는, 대기환경이 취약한 상태에서 오염물질 배출이 크게 증가함에 따라 오존오염의 각종 지표가 높아진 것으로 해석할 수 있다.

그림 10을 보면 대체로 90년대 전반 인구와 차량 증가율이 높다. 규모면에서 그림 10의 대도시들과 직접 비교할 수는 없으나 창원, 구미 등 공업도시의 인구 증가율과 차량 증가율이 대도시보다 높고, 여수도 차량 증가율은 높다. 공업도시들 외에는 원주

가 인구와 차량 증가율이 높다.

5. 서울·수도권 변화

5.1 추이 분석

그림 11은 1991년부터 1993년까지 90년대 초반과 1995년대부터 1997년까지 90년대 중후반 춘천을 포함한 서울/수도권의 측정소별 80 ppb 초과일수 분포 및 1991년부터 7년간의 변화율이다. 90년대 초반에는 의정부(U)부터 방이(P)까지 서울 북, 동부의 초과일수가 비교적 고르게 많은데 비하여 가장 많은 초과일수는 내(N), 광화문(K), 남가좌(Ng) 등 서울 도심과 서부에서 기록되었다. 그러나 90년대 내, 남가좌, 심곡(Sg), 광화문 순으로 주로 도심과 서부의 초과일수가 크게 감소한 반면 대치(T), 쌍문(Sm), 수택(St), 면목(M) 등 서울 동부의 초과일수가 증가하여 90년대 중후반에는 방이, 쌍문, 구의(Ku), 성수(Ss), 길음(Kr), 대치 등 서울 동부와 북동부의 초과일수가 많다. 90년대 초 서울/수도권에서 가장 초과일수가 작았던 신림(Sl)의 증가율이 높아 90년대 중후반에는 중위권까지 초과일수가 많아진 것도 주목할 만하다. 지역 평균이기는 하나 그림 5에서

춘천(Cc) (조운 1개 측정소)의 증가율이 가장 높고 90년대 중후반 초과일수가 가장 많았으나 그림 11 서울, 수도권 측정소 중 춘천 조운은, 증가율의 경우 중위권을 약간 상회하는 정도이고 90년대 중후반 초과일수는 대치에 이어 7번째이다.

그림 12는 1995년대부터 1997년까지 90년대 중후반 평균 95% 일최고 농도와 연평균 농도의 분포 및 1991~1997 7년간의 변화율이다. 90년대 초 광화문(K), 내(N), 남가좌(Ng)의 일최고 농도가 높았으나 남가좌, 심곡(Sg), 내 등 서부의 농도가 감소한 반면 대치(T), 성수(Ss), 수택(St) 등 동부의 농도가 높아져 90년대 중후반 쌍문(Sm), 방이(P), 구의(Ku) 등 서울 북동부와 동부의 농도가 높다. 이와 같은 일최고 농도의 변화는 측정소별로 약간씩 다르고 변화폭이 작을 뿐 그림 11의 초과일수 변화와 매우 유사하다. 또한 전국의 지역별 변화와 달리(그림 6) 서울/수도권의 경우 연평균 변화 역시 초과일수 변화와 유사하다. 연평균에서는 90년대 초 신림(Sl)이 가장 높았고 원시(W), 고잔(Kj) 등 고농도는 높지 않은 채 연평균만 높은 측정소들이 있었으나 역시 동부 및 북동부 측정소의 증가율이 높아 90년대 중후반 신림은 구의, 쌍문에 이어 3위이고, 원시, 고잔

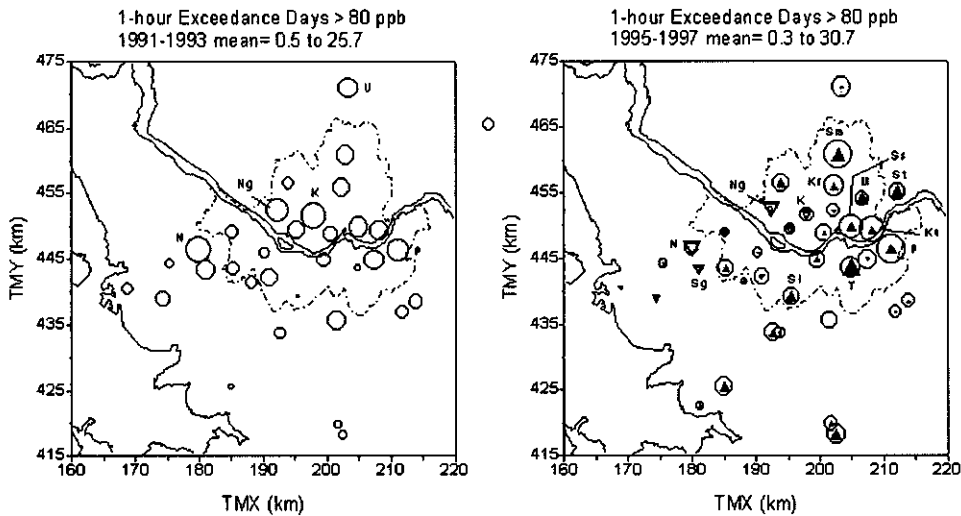


Fig. 11. Average number of days exceeding 80 ppb by region for 1991~1993 (left) and for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997 (right). Shaded circles represent the number of exceedance days; solid and open triangles represent the increase and decrease of the number of exceedance days during 1991~1997. The size of symbols is proportional to the magnitude of parameters. Note that the Choun station in Chuncheon (denoted by Cc in the upper right corner) is located about 70 km east-northeast of Seoul as shown in Fig. 2.

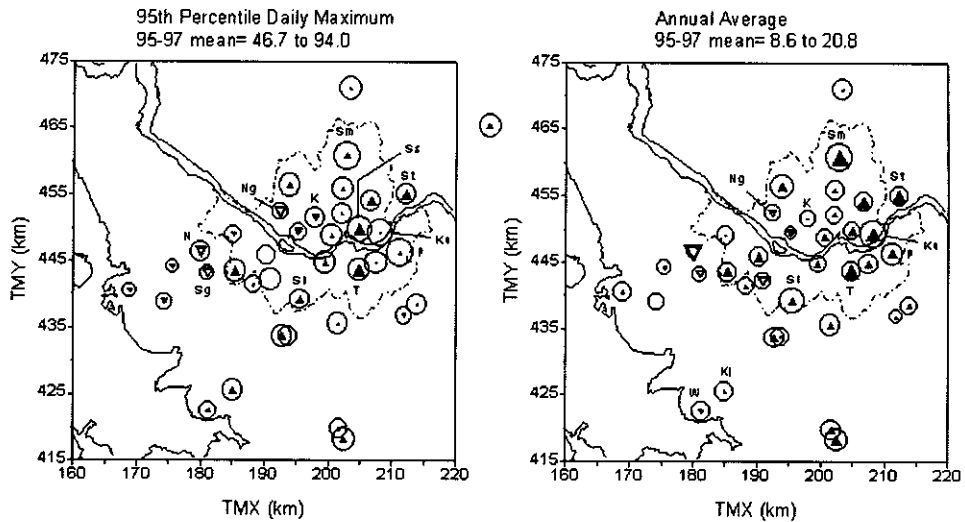


Fig. 12. Ninety-fifth percentile of daily maxima (left) and annual average (right) in the Greater Seoul Area for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 11.

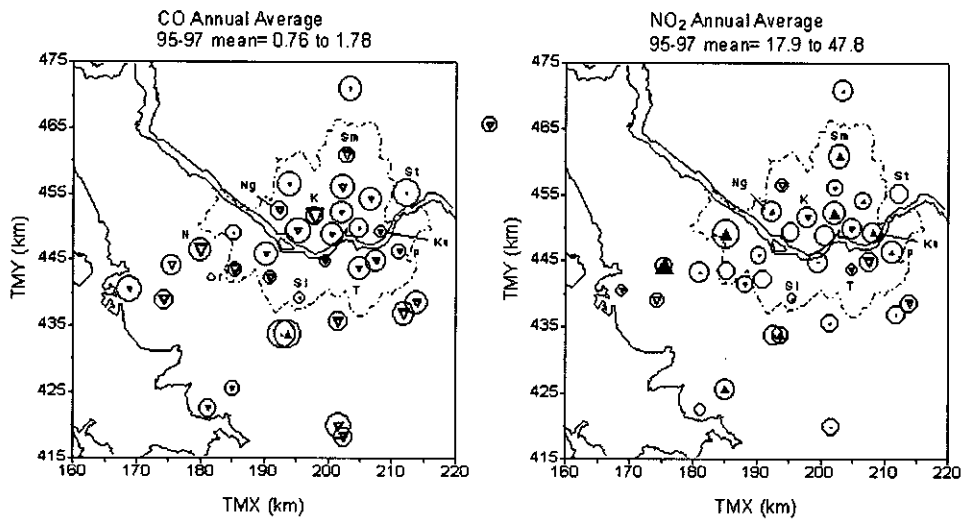


Fig. 13. Annual average CO and NO₂ in the Greater Seoul Area for 1995~1997 along with the rate of change during 1991~1997. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 11.

의 연평균은 중위권 수준이다.

그림 13은 1995년대부터 1997년까지 90년대 중 후반 CO와 NO₂ 연평균 농도 분포와 1991~1997 7년간 변화율이다. CO는 역시 대부분의 측정소에서 농도가 떨어졌고 특히, 광화문(K), 내(N), 오류(Or) 등

서울 도심 및 서쪽의 감소폭이 컸다. NO₂는 측정소에 따라 다르나 90년대 농도가 증가한 측정소가 감소한 측정소보다 2배 가까이 많다. 90년대 초 서울/수도권에서 오염도가 가장 덜하였던 신림(SI)은 CO는 약간 감소하였고, NO₂는 약간 증가하였으나 90

년대 중후반 역시 CO, NO₂ 모두 가장 낮은 수준이다.

90년대 7년간 서울, 수도권 지역의 오염물질 농도 변화를 특징적인 측정소를 중심으로 요약하면 다음과 같다.

(1) 광화문(K)-90년대 초 초과일수와 일최고, CO, NO₂가 높았으나 모두 큰 폭으로 감소.

(2) 내(N), 남가좌(Ng)-90년대 초 초과일수, 일최고, 연평균이 높았고, 내에서는 CO도 높았으나 모두 큰 폭으로 감소.

(3) 방이(P), 쌍문(Sm), 구의(Ku)-90년대 초 초과일수, 일최고, 연평균이 높은 수준이었으나 중후반에는 모두 최고 수준. CO는 계속 낮고, NO₂는 낮았으나 중후반에는 높은 수준.

(4) 대치(T), 수택(Si)-초과일수, 일최고, 연평균 모두 큰 폭으로 증가하여 중후반에는 중상위권. CO는 중후반 현재 중상, NO₂는 중하위권.

(5) 신림(Sl)-90년대 초 초과일수, 일최고가 낮았으나 중후반에는 중위권. 연평균은 계속 높고, CO, NO₂는 계속 낮음.

5.2 주요 인자 추정

서울/수도권에서 가장 특징적인 변화는 (1)~(3)에 요약된, 광화문과 내, 남가좌 등 서부 측정소의 고농도 감소와 방이, 쌍문, 구의 등 동부 내지 북동부 지역의 농도 상승이다. 광화문, 내, 남가좌에서는 오존의 고농도 감소와 함께 최소한 CO 역시 큰 폭으로 감소하여 이들 지역에 오염물질 감소 요인이 있었음을 추정할 수 있다. 그림 14는 오존경보제의에 따라(환경부, 1999) 서울을 북서, 북동, 남서, 남동 등 4개 권역으로 나누어 90년대 7년간 인구밀도의 변화를 조사한 것이다(서울특별시, 1992~1998). 북서부에는 은평, 서대문, 마포, 용산, 중, 종로구들이 포함되는데 그림 11부터 13까지 서울 도심에서 서부로 지칭한 지역이다. 이 지역의 인구밀도 감소가 유독 두드러져 실제 오염물질 감소가 있을 수 있었음을 암시하고 있다. 이와 같은 북서부의 인구밀도 감소는 80년대 후반 이후 진행된 서울 서부지역 1~3종 대기오염물질 배출시설의 경기도 이전과 함께(김영성 등, 1993) 서울 도심부터 서쪽 외곽에 이르는 지역의 오염물질 배출을 감소시킴으로써, 90년대 초반에는 아직 오염도가 높았으나 후반으로 갈

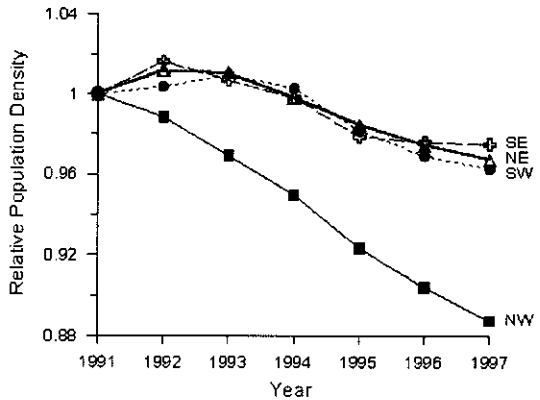


Fig. 14. Change in the relative population density in the regions of Seoul. Administration districts in Seoul were grouped according to the ozone forecasting system.

수록 고농도 오존 발생이 줄어들었을 가능성을 생각할 수 있다. 그러나 그림 14의 다른 세 지역의 인구밀도 변화는 매우 유사하여 이로써 다른 지역의 변화까지를 설명할 수는 없다.

80년대 후반 이후 서울 지역의 큰 변화 중의 하나는 북동부 상계동의 대단위 아파트 단지 건설이다. 이에 앞서 70년대 말부터 강남이라 불리는 한강 이남의 서울에 아파트 단지가 조성되기 시작하였고 80년대 중반에는 서울 동부 천호동에 역시 대단위 아파트 단지가 건설되었다. LNG 등 청정연료를 사용하는 한에 있어 대단위 아파트 자체가 오염물질 배출시설은 아니다. 그러나 고층의 아파트 단지는 교통수요를 유발하여 차량 배출을 증가시킬 수 있으며, 주풍을 고려하여 잘 배치된 건물들이 아니라면 바람을 막아 정체를 유도할 수 있다. 그림 15는 최근 30년간 서울 기상청에서 측정된 풍속 변화이다. 해에 따라 사인곡선(sinusoidal) 형태의 변화를 보이고 있으나 높은 풍속대의 풍속이 저하되면서 평균 풍속이 약간씩 감소하고 있다. 높은 풍속대의 풍속 감소는 80년대 이후 특히 심하다. 특별한 기후 변화가 아니라면 이는 서울의 도시개발과 연관되었을 가능성이 크며, 80년대 이후 급속한 서울 지역의 대단위 고층 아파트 건설도 충분한 한 요인이 될 수 있다.

그림 16은 1997년 서울 기상청의 풍속을 종축으로, 서울의 지역별 AWS(Automatic Weather Station)

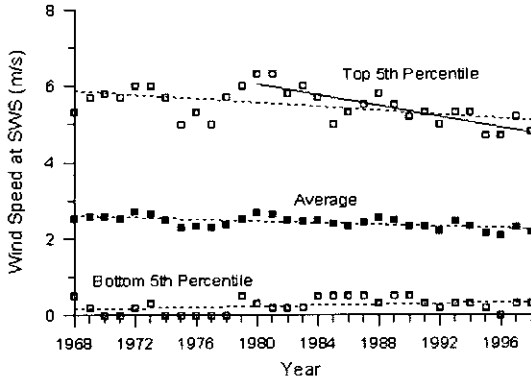


Fig. 15. Trends in wind speed at the Seoul Weather Station.

풍속을 횡축으로 크기별 분포도를 그린 후(rank-order analysis) 각 점들의 최적 합치선의 기울기를 지역별로 표시한 것이다. 1997년 자료를 이용한 것은 AWS 자료 검증 결과 이용이 가능하다고 판단하였기 때문이다. 크기별 분포도의 최적 합치선은 절편이 0이 되도록 하였으므로 기울기가 1보다 작을 수록 그 지역의 풍속은 서울 기상청보다 낮은 경향을 나타내게 된다(김진영 등, 2000). 그림 16의 지역별 AWS의 기울기는 각기, 남산 기슭의 중구(C) AWS의 기울기가 산곡풍에 열섬 효과가 더해지면서 1을 넘는 등 국지 특성이 반영된 결과이다. 그러나 역시 오존예보제의 예에 따라 지역별 평균을 보면 북서(6) 0.90, 남서(5) 0.78, 남동(4) 0.73, 북동(7) 0.71로 동부의 풍속이 낮고 특히 북동부의 풍속이 낮다(괄호 안의 숫자는 측정소 수). 물론 북동부의 경우 대부분의 지역이 북한산 후면 계곡에 위치하여 김진영과 김영성(1999)이 관찰한 것 같은 지형적 영향을 의심할 수 있다. 그러나 북동부의 낮은 풍속이 이 지역의 아파트 건설 때문이든, 풍속이 낮은 지역에 대단위 아파트 단지를 건설한 것이든 대기환경에 대한 고려가 충분치 않은 것임에는 틀림이 없다. 이와 같은 사실들은 결국, 최근 북동부의 빈번한 고농도 오존 발생이 도시개발의 영향일 수 있음을 의미하므로 신중한 검토가 필요하다.

(4)의 대처와 수택의 오염도 변화도 주변 지역의 도시개발과 연관되었을 가능성이 크다. (5) 신림의 변화는 앞서 전국의 지역별 변화에서 비교적 오염이 덜한 북동-남서측의 연평균 농도 상승에 상응

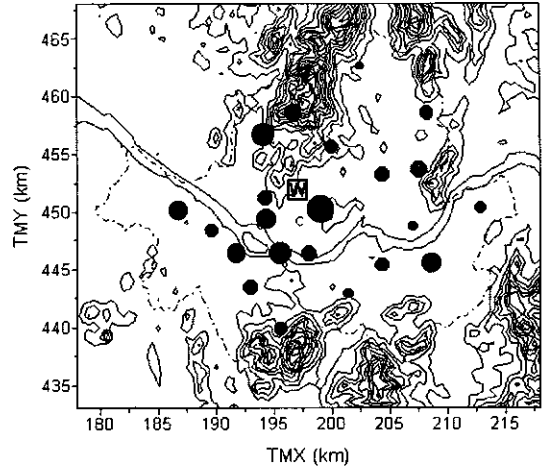


Fig. 16. Slopes of the best-fitted line passing through the origin in the rank-order analysis of wind speeds from the automatic weather station against those from the Seoul Weather Station (denoted by W) for 1997. 'C' denotes the Chung-gu automatic weather station whose slope was 1.08, greater than 1.

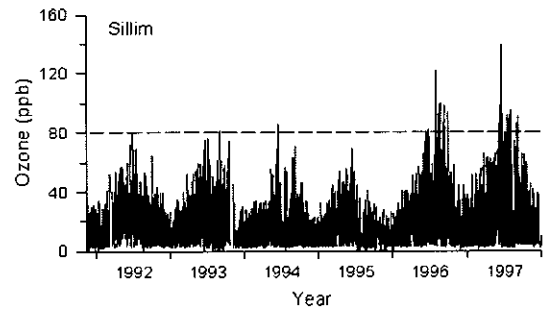


Fig. 17. Variations of ozone concentration in the Sillim station. Horizontal dashed line denotes 80 ppb adopted as a threshold of exceedance in the present study.

하는 서울/수도권의 변화로 볼 수 있다. 그림 17은 측정치가 주어진 1991년 후반부터 1997년까지 신림의 오존농도 변화 모습이다. 서울/수도권의 농도가 크게 높았던 1994년에도 신림의 농도는 아직 높지 않았으나 1996년, 1997년 급격히 높아지고 있다. 이와 같은 오존의 변화가 CO, NO₂ 등 오염물질의 농도가 여전히 낮은 상태에서 진행되고 있다는 점에서 전국의 북동-남서측의 연평균 농도 상승에

상응하는 서울/수도권 지역 내 오존오염의 확산으로 해석할 수 있다.

서울/수도권의 오존농도 변화가 앞서 전국의 지역별 변화와 비교하여 두드러진 것은 북동부 등 많은 측정소에서 초과일수, 일최고 농도, 연평균 농도가 함께 변하고 있다는 사실이다. 그림 5, 6의 지역별 변화를 보면, 대전, 포항과 같이 세 변수가 같은 변화를 보이는 지역도 있으나, 춘천은 주로 초과일수 증가가 크고, 강릉과 광주 등은 주로 연평균 증가가 크다. 흥미로운 것은 춘천의 변화가 서울/수도권의 영향으로 추정되고 강릉, 광주 역시 다른 지역의 영향으로 연평균이 증가한 것으로 해석된 반면 대전은 정체 비율이 높아 불리한 대기환경 조건에서 자체 배출이 증가하여 오존오염이 심해진 것으로 조사되었다는 점이다. 현재로서 90년대 포항 대기환경의 특별한 변화는 알 수 없으나 이와 같이 본다면 포항의 오존농도 역시 외부 영향보다는 자체 배출의 변화에 의하여 상승하였을 가능성이 크다. 서울/수도권의 오존농도 역시 당연히 오염물질의 이동보다 국지적 특성에 의하여 변한다는 사실을 다시 한번 확인할 수 있는 대목이다(김영성과 오현선, 1999). 특히 서울 북동부는 아파트 건설이 먼저든, 낮은 풍속이 먼저든, 낮은 풍속 조건에서 오염물질 배출이 많아지고 오존농도가 높아짐에 따라 초과일수와 연평균 농도가 함께 높아진 것으로 이해할 수 있다.

6. 결 론

최근 Jacob *et al.* (1999)은 2010년 동아시아의 오염물질 배출이 1985년의 3배가 되고 이와 같은 배출 증가로 인하여 미국 서부의 오존농도는 2~6 ppb, 동부는 1~3ppb까지 높아질 수 있음을 주장하였다. 우리나라는 동아시아 변화의 핵심인 중국의 직접 영향권에 위치하고 있다. 중국의 오염물질은 편서풍을 따라 황해를 건너게 되는데, Sillman *et al.* (1993)에 의하면 물 위에서는 혼합고가 낮아 오염물질의 농도가 높은 대신 침적은 거의 일어나지 않아 같은 거리를 이동하더라도 육지 위를 이동할 때보다 풍하지역의 오존 농도가 훨씬 높아질 수 있다.

1990년대 초 이후 많은 사람들의 관심의 대상이 되었던 여수의 높은 연평균이나 1995년부터 측정이

시작된 서산, 목포, 제주의 연평균이 더욱 높은 것은 기본적으로 이들 측정지역들이 주변지역 NO 배출의 영향을 덜 받기 때문이다. NO의 주배출원인 한반도로부터 가장 먼 제주의 연평균이 가장 높은 반면 초과일수는 작고 빈도분포에서 가장 이동의 영향이 크게 나타난 사실들이 이를 뒷받침하고 있다. 그러나 한편으로는 우리나라 전체가 중국의 영향권에 있고 특히 서남해안은 중국의 영향이 크며, 단지 동해안의 강릉 정도에서 한반도 동북부의 영향을 관찰할 수 있는 정도이다. 목포와 서산의 경우 연평균도 높지만 CO, NO₂의 농도가 낮은 상태에서 초과일수와 일최고 농도가 90년대 중후반 춘천을 제외하고는 가장 많거나 높다는 것은 이들 지역들이 중국의 직접 영향권 아래 있음을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 이 경우 제주는 중국의 직접 영향권에서 벗어나게 되며, 제주의 연평균이 가장 높은 또 다른 원인이 될 수도 있으나 별도의 측정과 모델링을 통하여 확인되지 않는 한 가설 이상의 의미는 없다.

90년대 우리나라의 오존 오염은 오염의 심화와 확산으로 요약할 수 있다. 오염의 확산은 주로 그동안 비교적 오염이 덜하였던 북동-남동측의 연평균 농도 증가폭이 크기 때문이다. 이와 같은 변화의 1차 원인은 국내 배출이었으나 변화의 규모가 전국적이라는 점에서 중국의 배출 변화가 배경에 있을 가능성을 배제할 수 없다. 오염의 심화는 주로 서울/수도권과 내륙 도시들에서 관찰되었다. 90년대 초부터 오존오염의 모습을 보였던 서울/수도권은, 초과일수와 일최고 농도 등 고농도 지표의 경우 해에 따라 차이가 있을 뿐 전체적으로 거의 일정한데 비하여 큰 폭은 아니나 연평균 농도가 증가하였다. 뿐만 아니라 장기분석에서 서울/수도권의 영향을 받는 것으로 추정되었던 춘천은, 초과일수, 일최고 농도, 연평균 농도 순으로 증가폭이 커 서울/수도권의 영향이 가까워지는 것으로 나타났다. 대전은 초과일수, 일최고, 연평균이 모두 큰 폭으로 증가하였는데, 대전은 내륙도시로서 정체 비율이 높은 상태에서 90년대 인구 증가율이 서울과 6대 광역시 중 가장 높았고, 차량 증가율 역시 90년대 중후반 가장 높았다.

90년대 서울/수도권에서는 광화문 등 도심부터 서부 지역의 오염 감소와, 동부와 북동부의 오염 증

가가 뚜렷하였다. 이들 변화들은 전국 지역별 변화와 달리 많은 경우 초과일수, 일최고, 연평균이 같은 경향을 보였는데, 지역별 분석에서 대전의 경우와 같이 국지배출의 변화에 의하여 오염이 변하였기 때문으로 생각되었다. 실제 90년대 서울 도심부터 서부지역(오존예보제의 북서부)은 인구밀도 감소가 다른 지역보다 월등하였다. 반면 동부와 북동부는 낮은 풍속조건에 대단위 아파트 단지들이 입주하면서 교통수요가 늘고 차량 배출 등이 증가되어 오염이 심화되었을 가능성이 높다. 서울 동부와 북동부의 풍속이 서부 지역에 비하여 낮은 것은 확인할 수 있었으나 특히 북동부의 경우 지형의 영향 때문인지, 이 지역에 건설된 고층 아파트 때문인지는 분명치 않았다. 그러나 지난 30년간 서울 기상청의 풍속은 상위 5% 풍속이 계속 낮아지고, 서울지역에 대단위 고층 아파트 건설이 본격화되기 시작한 80년대 이후 더욱 감소가 뚜렷하여 아파트 건설이 주변 지역 바람장에 영향을 미쳤을 개연성은 충분하다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 자체 지원으로 수행되었습니다. 측정자료를 제공하여 주신 환경부, 기상청 관계자 분과 자료 수집과 처리를 도와준 오현선 연구원께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

기상청 (1991) 한국기후표. 제 II 권 월별 평년값 (1961~1990).

김영성 (1996) 1991~1993년 사이 우리나라의 오존 농도 변화, 한국대기보전학회지, 12, 55-66.

김영성 (1997) 1990~1995 서울·수도권 지역의 광화학 오염현상, 한국대기보전학회지, 13, 41-49.

김영성 (1999a) 오존 자동측정망 자료 중의 이상치 판정, 한국대기환경학회지, 15, 139-150.

김영성 (1999b) 산업단지 대기질 관리, HAP인가 VOC인가?, 한국대기환경학회지, 15, 513-517.

김영성, 오현선 (1999) 1990~1997 기간 중 서울·수도권 지역의 고농도 오존 사례 연구, 한국대기환경학회지, 15, 267-280.

김영성, 경남호, 조성호, 김홍룡, 박홍목 (1993) 수도권 지역의 대기질 개선을 위한 에너지 소비형태 연구

(1), 한국에너지기술연구소 보고서 KE-93042G.

김영성, 송철환, 심상규, 김용표, 문길주 (1998) 여천 공업단지 봄, 가을 대기 중 휘발성 유기화합물 농도 비교 연구, 한국대기보전학회지, 14, 153-160.

김영성, 김영진, 윤순창 (1999) 고농도 오존일의 강우와 운량, 한국대기환경학회지, 한국대기환경학회지, 15, 747-755.

김진영, 김영성 (1999) 상세한 기상관측 자료를 이용한 1997년 서울·수도권 고농도 오존 사례의 모델링, 한국대기환경학회지 (채택).

김진영, 김영성, 김용표 (1999) 서울·수도권 지역 주요 대기오염물질 배출원 자료 현황 분석, 한국대기환경학회지, 15, 813-826.

김진영, 김영성, 정관영 (2000) 서울·인천 지역 자동기상관측 바람 자료의 특성 분석, 한국기상학회지, 36, 153-166.

서명석, 박경운, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준 (1995) 청정지역과 도시지역의 오존 농도 특성 연구, 한국대기보전학회지, 11, 253-262.

서울특별시 (1992~1998) 서울통계연보.

오현선, 김영성 (1999) 서울·수도권 지역 고농도 오존 사례의 지상 및 중관 기상 특성, 한국대기환경학회지, 15, 441-455.

윤성철, 박은우, 장영기 (1999) 한계농도 누적 오존지표로 본 1990~1997년의 수도권 오존농도 변화, 한국대기환경학회지, 15, 429-439.

전병일, 김유근, 이화운 (1995) 부산지역의 오존 농도 특성과 기상 인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11, 45-56.

정 용, 장재연, 권속표 (1986) 서울시 대기 중 오존의 오염도와 그 영향인자 분석, 한국대기보전학회지, 2, 73-79.

정용승, 장재섭 (1991) 서울·수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5, 169-179.

통계청 (1992~1998) 한국통계연감.

허정숙, 김태오, 김동술 (1999) 오존 대기환경기준의 비교 연구, 한국대기환경학회지, 15, 159-173.

환경부 (1999) 오존경보·예보제, <http://www.me.go.kr> (2000년 3월 접속).

환경부 (2000) 하절기 대도시 오존오염 저감 대책, <http://www.me.go.kr> (2000년 7월 접속).

환경부, 국립환경연구원 (2000) 2000년 2월 대기환경월보.

Akimoto, H., H. Mukai, M. Nishikawa, K. Murano, S. Hatakeyama, C.-M. Liu, M. Buhr, K.J. Hsu, D.A. Jaffe, L. Zhang, R. Honrath, J. T. Merrill, and R.E. Newell (1996) Long-range transport of ozone in the East Asian Pacific rim region, J. Geophys. Res.,

- 101, 1999-2010.
- Chin, M., D.J. Jacob, J.W. Munger, D.D. Parrish, and B.G. Doddridge (1994) Relationship of ozone and carbon monoxide over North America, *J. Geophys. Res.*, 99, 14,565-14,573.
- Demerjian, K.L. (2000) A review of national monitoring networks in North America, *Atmospheric Environment*, 34, 1861-1884.
- Duncan, B.N. and W.L. Chameides (1998) Effects of urban emission control strategies on the export of ozone and ozone precursors from the urban atmosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.*, 103, 28,159-28,179.
- Ghim, Y.S. and Y.-S. Chang (2000) Characteristics of ground-level ozone distributions in Korea for the period of 1990-1995, *J. Geophys. Res.*, 105, 8877-8890.
- Husar, R.B. (1998) Spatial pattern of 1-hour and 8-hour daily maximum ozone over the OTAG region, *A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition*, June 14-18, San Diego, CA, Paper 98-MA2A.01.
- Jacob, D.J., J.A. Logan, and P.P. Murti (1999) Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States, *Geophys. Res. Letters*, 26, 2175-2178.
- NRC (National Research Council) (1991) *Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution*, National Academic Press, Washington, DC.
- OTAG (Ozone Transport Assessment Group) Air Quality Analysis Workgroup (1997) *Final Report, Volume I: Executive Summary*, http://capita.wustl.edu/otag/reports/qaqafinvol_1/animations/v1_exsumanimb.html (accessed in Sep. 1997).
- Schere, K.L. and G.M. Hidy (2000) Forward: NARSTO critical reviews, *Atmospheric Environment*, 34, 1853-1860.
- Sillman, S., P.J. Samson, and J.M. Masters (1993) Ozone production in urban plumes transported over water: Photochemical model and case studies in the north-eastern and midwestern United States, *J. Geophys. Res.*, 98, 12,687-12,699.
- TNRCC (Texas Natural Resource Conservation Commission) (2000) Houston/Galveston nonattainment area. All major emission source categories, <http://www.tnrcc.state.tx.us/air/aqp/ei/rsumhg.htm> (accessed in April 2000).
- USEPA (United States Environmental Protection Agency) (1998) *National Air Quality and Emissions Trends Report*, 1997, EPA 454/R-98-016, Research Triangle Park, NC.
- Yarwood, G., R. Morris, C. Emery, and G. Wilson (1998) Recent advances in regional photochemical grid modeling and application using the OTAG modeling databases, *A&WMA's 91st Annual Meeting & Exhibition*, June 14-18, San Diego, CA, Paper No. 98-MP2B.06.