

지역 대기질 측정망에 나타난 국내 대기오염도의 최근 동향 - 2002년 고농도 사례 및 그 기상 특징

On the Recent Air Pollution Levels Observed in the Regional Air Monitoring Network - High Air Pollution Concentration Episodes and Their Meteorological Characteristics in 2002

김철희* · 박일수 · 이석조 · 김정수 · 진형아 · 성한규
국립환경연구원 대기연구부

(2003년 10월 31일 접수, 2004년 2월 11일 채택)

C.-H. Kim*, I.-S. Park, S.-J. Lee, J.-S. Kim, H.-A. Jin and H.-G. Sung
Air Quality Research Department National Institute of Environmental Research

(Received 31 October 2003, accepted 11 February 2004)

Abstract

We report the high concentration episodes for PM₁₀, SO₂, NO₂, and O₃ in many urban areas Korea during 2002. The high concentration episodes are identified based on the National Ambient Air Quality Standards and the observations obtained from the Regional Air Monitoring Network composed of approximately 160 air pollution monitoring stations located in a number of major or big cities in South Korea including Seoul, Pusan, Daegu, and Incheon cities.

The results show that the twenty cases of high concentration episodes in 2002 consists of both ozone warning episodes (6 cases) and high PM₁₀ concentration cases (14 cases), and one half of the latter are found to occur in association with the Yellow Sand (Asian Dust) phenomena. The most outstanding characteristics of the reported episodes are the excessively high levels of maximum PM₁₀ concentrations during the Yellow Sand period (i.e., exceeding 3,000 µg/m³ in April, 2002) and their variable occurrence frequencies across seasons. The high ozone concentration episode days are mainly resulting from both the high photochemical reactions and poor ventilations. The high PM₁₀ concentration days during non Yellow Sand periods, however, mostly occurred under the influence of synoptic meteorological conditions such as stagnant or slowly passing high pressure centers, and consequently prevailing weak wind speeds over the Korean peninsula. The overall results of our study thus suggest the importance of both synoptic and local meteorological factors for high concentration levels in the major and/or big cities in Korea.

Key words : High concentration Episodes, Yellow Sand, Ozone warning days, High PM₁₀ concentrations, Regional Air Monitoring Network

* Corresponding author
Tel : 018-311-2933, E-mail : cheol@snu.ac.kr

1. 서 론

수도권을 비롯한 대도시의 인구집중과 그에 따른 오염 발생원의 집적, 그리고 교통량의 증가 등으로 우리 나라 대도시의 대기오염 문제는 날로 심각해지고 있다. 이에 따라 대기질 개선을 위한 대책의 수립은 어느 때 보다도 절실히 요구되고 있다. 학계에서도 효율적 대기오염 규제 및 대책을 위한 도시별 대기질에 대한 현황 분석을 위한 목적의 연구를 지금까지 매우 활발하게 수행하였다(Ghim and Chang, 2000; Kim *et al.*, 1999; 나광삼 등, 1998; 한진석 등, 1996). 그러나 대부분의 연구들은 황사와 같은 특정 기간에 대한 단기 사례 분석(김기현 등, 2002; 신혜정 등, 2002; 전영신 등, 1999; 정용승과 윤마병, 1994) 또는 특정 오염물질과 관련된 인자에 대한 연구 등이 주류를 이루었다. 예를 들어 광화학 오존 농도의 연변화 경향(김영성, 2000; 윤정임 등, 1993; 이기원 등, 1993), 시정장에 및 시정거리의 경향분석(김영성, 2002; 오현선과 윤순창, 1996; 박세욱 등, 1994; 백남준 등, 1994a, b; 홍낙기 등, 1993) 등의 많은 선행 연구들은 대부분 하나의 오염물질에 대한 장기적이고 통계적으로 접근한 사례라고 할 수 있다. 이러한 연구들은 결국 오염물질별로 각각 특정 계절과 연관성이 많은 만큼 계절마다 반복되므로 단기 사례 특성 연구, 그리고 그 정량적인 년별 변화 경향 분석이 모두 중요한 의미를 가지게 된다.

이상의 연구와는 별개로 도시별 한해동안의 일련의 고농도 사례의 보고는 적은 형편이다. 따라서 특정 해의 주요 이슈로 부각되었던 고농도 사례의 발생 현황 및 그 해의 총 발생횟수 등은 짐작하기 어려운 점이 많다. 그러므로 최근의 365일간 발생한 주요 고농도 사례를 전체 오염물질에 대해 정성적으로 요약하는 것 또한 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 최근 2002년 전국 대기오염 측정망에 나타난 고농도 오염 사례를 시간적 순서로 살펴보고 우리 나라 대도시의 주요 고농도 사례 및 그 특징을 평가하고자 하였다. 특히 2002년은 여러 국제적 행사가 많았고 행사기간에 대도시 대기질의 관심 또한 높았던 한해로 분류될 수 있다는 점에서 중요하다. 예컨대, 2002년 월드컵이 5월 31일 서울에서 개막식을 시작으로 9개 대도시의 경기장에서 열렸

고, 가을에는 아시아드 경기대회가 부산에서 열려 두 대회 기간 중 교통 혼잡을 완화하고 대기 오염을 저감하기 위해서 자동차 2부제가 실시되는 등 어느 때 보다도 대기오염에 대한 관심과 우려가 많은 해이기도 하였다. 따라서 최근의 우리 나라 주요 대도시의 대기 오염도의 경향을 보다 더 잘 이해하기 위해 2002년 한 해의 고농도 사례를 시간의 순서대로 요약하였으며 각 사례별 특징을 살펴보았다.

2. 지역 대기질 측정망의 주요 대기오염물질 장기 변화 경향

2.1 지역 대기질 측정망

우리 나라 대기환경기준이 설정된 주요 오염물질 즉 SO₂, NO₂, O₃, CO, PM₁₀에 대해 그 실태를 파악하고 대기질 개선 대책 수립에 필요한 기초 자료 확보를 위해 환경부 및 지방 자치단체에서 다양한 측정망을 설치·운영하고 있다. 이 중 지역 대기 측정망(Regional Air Monitoring Network)은 우리 나라 도시지역의 평균 대기질 농도를 파악하여 환경 기준 달성 여부를 판정하기 위한 목적으로 설치·운영중에 있다.

현재 지역대기 측정망은 한반도 전역에 분포되어 있는 약 160여 개의 측정소로 구성되어 있으며(그림 1) 이 중 환경부에서 약 40% (32개 시·군에서 63개 측정소), 지자체단체에서 약 60% (33개 시에서 98개 측정소)를 관리하며 국립환경연구소에서 이들을 모두 취합, 대기 정책 및 오염도 현황 분석에 기초 자료로 연구되고 있다.

2.2 각 대기오염물질의 연변화 추세

2002년 중 대기오염물질의 최고농도 사례 일을 꼽는다면, 단연 황사에 의한 기록적인 PM₁₀의 고농도 사례가 될 것이다. 특히 2002년의 경우, 그 발생 횟수 혹은 일수(그림 2)가 많았다고보다는 매 발현 시 거의 이벤트성으로 영향을 미친 것으로 나타났다. 예를 들어 2002년 4월에는 한 측정소 시간 평균 PM₁₀ 농도가 3,000 µg/m³이 넘는 기록적인 사례가 나타났으며, 또 10년 이상 보고된 적이 없었던 가을황사가 발현하기도 하였다.

반면 2002년 오존 주의보가 발령된 횟수(45회) 혹

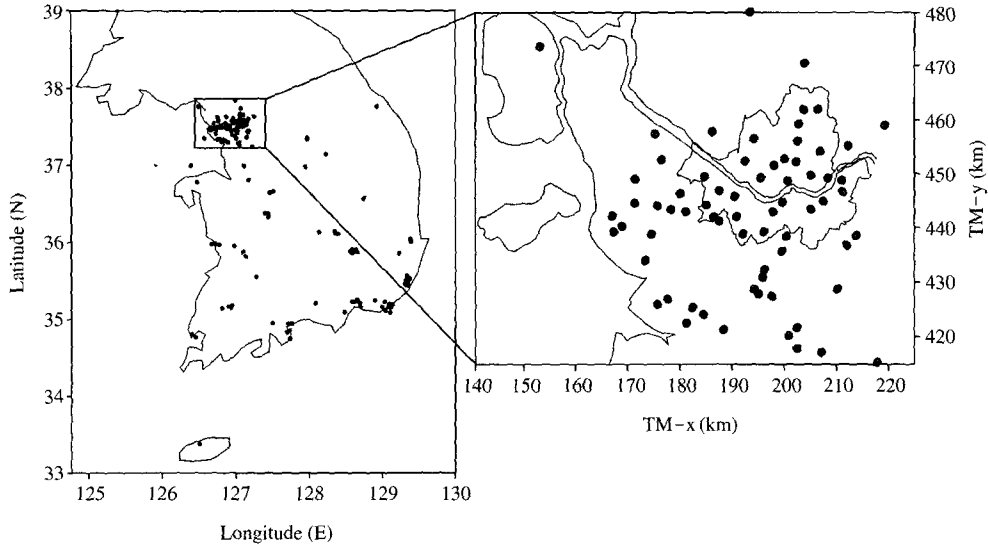


Fig. 1. The locations of air pollution monitoring stations in the Regional Air Monitoring Network of South Korea.

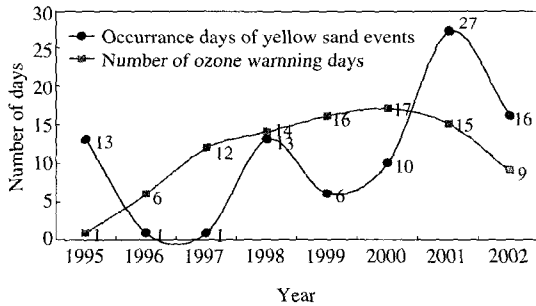


Fig. 2. The annual variations of the occurrence days of Yellow Sand events and number of ozone warning days.

은 일수(9일)는 2002년 이전 5년간(1997~2001년) 모두 그 발령 일수가 10일을 초과한 예년의 상황과는 다소 대조를 보였다(그림 2). 그렇다고 해도 오존 농도가 감소 추세에 있다고 보기에는 다소 무리가 있고 기상 조건의 변화, 여러 국제적 스포츠 행사로 인한 자동차 2부제 등 복합적인 요인들에 의한 일시적인 추세일 수 있으므로 이러한 경향을 정확하게 파악하기 위해서는 더 장기간의 분석이 이루어져야 할 것이다.

2002년 기준, 대기 오염물질의 환경 기준치가 설정된 지역 대기 측정망의 주요 오염물질별 년 변화

경향은 그림 3에 도시하였다. SO₂의 오염도는 1989년부터 공단지인 울산군을 제외하고는 최근까지 꾸준히 감소하고 있는 추세에 있다. 그리고 2001년 역시 계속 감소 추세의 연장선상에 있어 매우 양호한 오염도를 보였다. 반면 NO₂는 1998년에 다소 감소한 것을 제외하고는 꾸준히 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그 변화의 폭은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 2002년 NO₂는 전체 평균 23 ppb로 2001년의 25 ppb에 비하여 소폭 개선된 것으로 나타났다. 그러나 NO₂ 오염도를 상승시킬 수 있는 요인이 다양한 만큼 향후에도 계속 개선될 것으로 전망하기에는 어려워 보인다.

O₃의 증가 추세는 1997년까지 급격히 증가하였다가, 1998년 이후 증가세가 다소 둔화된 자동차 등록 대수(통계청, 2002)의 변화와 유사한 경향을 보였다(그림 3). 도시전체 평균은 2002년 21 ppb로서 2001년과 동일하나 측정소별(총 164개 측정소)로는 10 ppb 이하(0.6%), 10~20 ppb(58.6%), 20~30 ppb(39.6%), 30 ppb 이상(0.6%)으로 나타났다. 따라서 2001년의 0.7, 60.8, 33.8, 4.7%와 비교하면 30 ppb 이상의 고농도 측정소수는 감소하였으나 그 다음 고농도인 20~30 ppb 구간에서 많이 증가한 것으로 나타났다.

PM₁₀의 오염도는 2002년 55개 시·군의 평균값이

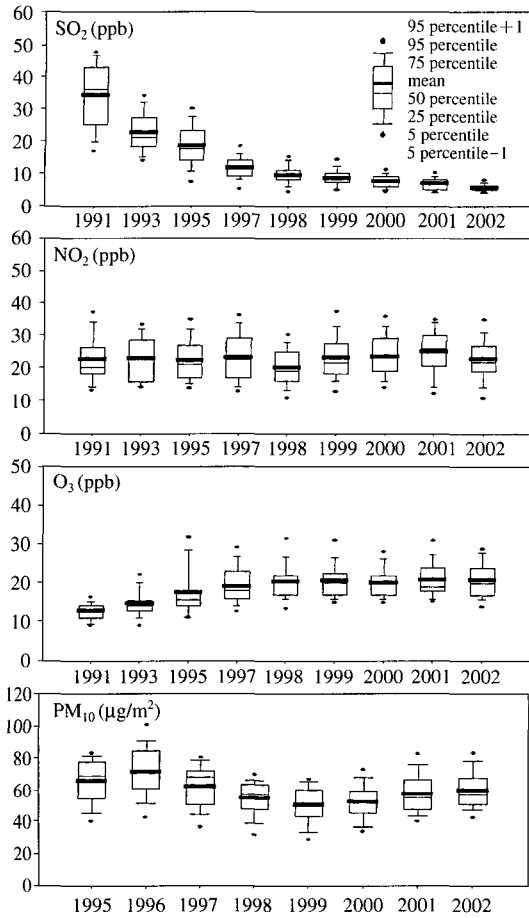


Fig. 3. The annual variations of mean concentrations for SO₂, NO₂, O₃ and PM₁₀.

61 μg/m³으로서, 2001년의 58 μg/m³에 비해 다소 증가하였다. 측정소별 연평균 오염도는 40 μg/m³ 이하 (3.1%), 40~60 μg/m³ (37.9%), 60~70 μg/m³ (21.7%), 70~80 μg/m³ (24.3%), 80 μg/m³ 이상 (11.8%)으로 나타났다. 이는 2001년의 6.1, 46.3, 21.1, 12.9, 13.6%에 비하면 환경기준을 초과하는 고농도의 측정소수가 특히 증가한 것으로 평가되었다 (국립환경연구원, 2002).

3. 2002년 주요 고농도 사례

3.1 고농도 사례의 선정

2002년 고농도 사례일 선정을 위하여 환경정책 기

본법(제10조)에 의해 설정된 환경 기준치(일평균)를 적용, 그 이상을 초과하는 날을 고농도 사례일로 정하였다. 즉 측정소별 SO₂, PM₁₀, O₃, NO₂ 농도를 24시간 산술 평균한 후 이를 해당 도시별 모두 공간 평균을 취하였을 때 각 도시별 오염물질별 일평균 농도가 24시간 환경 기준치를 초과한 경우 본 연구의 사례로 선정하였다.

24시간 환경기준치가 없는 오존 농도의 경우 한 측정소라도 오존 주의보(120 ppb 이상)가 발령한 날은 8시간 오존의 환경기준치에 상관없이 모두 오존의 고농도 사례로 선정하였다. 황사 발생의 경우 결국 PM₁₀농도와 연관되지만 그 발생 원인이 외부에 있어 PM₁₀의 환경기준치 초과 사례와 구분하였다.

이렇게 선정된 2002년 고농도 오염 사례는 총 20 회이며 그 일수는 표 1에 요약하였듯이 총 31일로 나타났다. 이 중 6월 5일~6월 7일, 9월 3일은 오존 주의보 발령과 PM₁₀의 환경기준치 초과가 한 지역에서 동시에 발생하였다. 그러나 발생 오염물질이 달라 서로 다른 사례로 분류하였다.

3.2 2002년 고농도 사례 요약

이상에서 선정된 2002년의 고농도 대기 오염 사례(표 1)를 발생한 시간의 순서대로 정성적으로 요약

Table 1. The selected high air pollution concentration episodes occurred in 2002.

	Period	Air Pollutant	Major City of Episode
1	Jan. 12~13	Yellow-Sand	-
2	Mar. 1~2	PM ₁₀	Seoul metropolitan area
3	Mar. 17~19	Yellow-Sand	-
4	Mar. 21~23	Yellow-Sand	-
5	Apr. 2	PM ₁₀	Seoul metropolitan area
6	Apr. 8~10	Yellow-Sand	-
7	Apr. 12	Yellow-Sand	-
8	Apr. 16~17	Yellow-Sand	-
9	Jun. 4	PM ₁₀	Pusan city
10	Jun. 5~7	O ₃	Seoul metropolitan area
11	Jun. 5~7	PM ₁₀	Seoul city
12	Jun. 29~30	O ₃	Seoul metropolitan area
13	Jul. 25	O ₃	Seoul metropolitan area
14	Sep. 3	O ₃	Pusan city
15	Sep. 3	PM ₁₀	Seoul metropolitan area
16	Sep. 11	O ₃	Seoul metropolitan area
17	Oct. 1	O ₃	Pusan city
18	Oct. 4	PM ₁₀	Pusan city
19	Nov. 11~12	Yellow-Sand	-
20	Dec. 3	PM ₁₀	Pusan city

하면 다음과 같다.

사례 1 (1월 12일~1월 13일)-2002년 첫 황사(겨울 황사) 발현: 전형적으로 봄철 황사와 대조적으로 1월 초부터 발생하였다. 이 황사는 전국적 규모로 발생한 것은 아니다. 일평균 PM_{10} 농도가 12일 서울 ($161 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 대구 ($161 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 등 일부 한정된 지역에서 고농도가 나타났으나 부산 ($115 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 등에서는 환경기준치를 밑돌았다. 시간평균 최고 농도 또한 서울 남가좌동 $372 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대구 이현동 $465 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 여타 다른 황사보다 상대적으로 그 영향이 크지 않은 사례로 평가할 수 있다.

사례 2 (3월 1일~3월 2일)-일평균 PM_{10} 농도 환경기준치 초과 (수도권 지역): 3월 1일 지상 및 상층 기압계가 넓게 정체됨에 따라 일평균 풍속이 매우 낮았으며(예. 서울 : 1.3 m/s) 서울지역 PM_{10} 일평균이 1일 $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2일 $152 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이를 연속 환경기준치를 초과하였다. 측정소의 시간 최고농도는 1일 $364 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 정동)까지 올라가는 등 예년의 황사 사례일에 상당하는 고농도를 보였다. 기타 대도시에서도 환경 기준치에는 미달되었으나 도시 평균 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 평일에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다.

사례 3 (3월 17일~3월 19일)-두 번째 황사 발현: 14일 오후 몽고지역에서 발원한 황사는 17일부터 한반도에 상륙한 사례이다. 그러나 그 피해 지역은 사례 1과 마찬가지로 주로 수도권에 국한되어 나타났다. 17일 서울지역 일평균이 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였고 측정소 시간 평균농도는 최고 $861 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 길음동)까지 측정되었다. 그러나 전국적으로는 대구 등 일부 내륙 지방을 제외하고는 대부분의 도시에서 일평균 PM_{10} 농도가 환경 기준치를 초과하였다.

사례 4 (3월 21일~3월 23일)-세 번째 황사 발현: 3월 19일경까지 머물렀던 기압골의 뒤를 이어 중국 북부 내륙에서 발생한 황사 먼지는 당시 역대 가장 강력한 황사먼지라는 평가를 받았다. 이 사례 기간의 황사 강도를 단적으로 증명하는 것이 22일 측정된 일평균 PM_{10} 농도(서울시 성수동 $1153 \mu\text{g}/\text{m}^3$)인데 지역 대기 측정망 운영이래 역대 가장 높은 측정 농도(당일 기준)로 주목받았다. 이에 따라 서울의 시정거리도 21일(15시) 1 km, 22일(15시) 2 km 등 2002년 들어 최악의 거리를 보였고 일부 초등학교에서는 단축 수업을 하는 등 황사 피해가 사회적인 문제로 대

두되었다.

사례 5 (4월 2일)-일평균 PM_{10} 농도 환경기준치 초과 (수도권 지역): 한반도 상공의 대기 정체 및 약한 지상 평균 풍속(서울 : 평균 1.0 m/s)으로 서울의 PM_{10} 일평균 농도가 $159 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 환경 기준치를 근소하게 초과하였다. 측정소별 시간 평균 농도는 2일 최고 $362 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 면목동)가 측정되었고 타 도시에서도 부산 $149 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대구 $107 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 등 환경 기준치는 초과하지 않았으나 상대적으로 높은 일평균 농도를 보였다.

사례 6 (4월 8일~4월 10일)-네 번째 황사의 발현: 중국 내몽골 지방에서 발원한 황사 먼지는 또 다시 기록적인 PM_{10} 농도를 보여 일평균 $1,510 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 구의동)까지 측정되어 사례 4(4월 22일)의 $1,153 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 성수동)의 역대 최고 기록을 17일만에 갱신하였다. 측정소별 시간평균 농도는 4월 8일 3:00 시 $3,311 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (서울 한남동)까지 측정되어 측정망 사상 유례없는 최악의 대기질을 보였다. 그 피해 규모도 전국적으로 나타나서, 각 도시별 초등학교가 휴교령 혹은 단축 수업을 하였고 항공기 결항 등 사회적 피해가 잇달았다.

사례 7 (4월 12일)-다섯 번째 황사의 발현: 사례 6에서 발생한 황사가 지나간 후 이를 만에 또다시 황사가 상륙하였다. 그러나 서울의 12일 도시 일평균 농도는 $151 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 4월의 다른 황사에 비해 상대적으로 약한 강도를 보였다. 시정거리도 서울 5~8 km, 인천 10 km 내외로서 주로 수도권을 중심으로 나타났다.

사례 8 (4월 16일~4월 17일)-여섯 번째 황사의 발현: 인천을 제외한 대도시 대부분의 지역에서 17일 도시 일평균 PM_{10} 농도가 $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 근접하였으나 서울 정동에서 미세 먼지 농도가 $474 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 상승하였으며 16일 관측된 시정 거리 또한 일 평균 서울 4.0 km, 인천 5.9 km 등으로 나타났다.

사례 9 (6월 4일)-일평균 PM_{10} 농도 환경 기준치 초과(부산 지역): 당일 정체성 해양 고기압이 우세하여 전국에 일시적으로 PM_{10} 의 고농도 현상이 나타났다. 그러나 일평균 PM_{10} 농도는 대도시 중 부산(0.152 ppm)에서만 환경 기준치를 초과하여 시간 평균농도가 최고 $284 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (부산 범천동)로 나타났고, 시정거리도 일 평균 2.1 km로서 매우 낮았다. 그러나 수도권 및 기타 대도시에서는 시정거리가 모두 10 km를

상회하여 큰 지역적 편차를 보였다.

사례 10 (6월 5일~6월 7일)-2002년 첫 오존주의보 발령(수도권 지역) : 6월 5일 구리시(최고 152 ppb), 의왕시(최고 140 ppb) 등 수도권 12개 측정소와 6월 6일 하남시(최고 159 ppb) 등 16개 수도권 측정소에서 오존 주의보가 발령되었고 7일에는 또다시 고양시의 한 측정소에서 발령되었다. 특히 6일 구리시(교문동)에서는 주의보 발령 지속시간이 8시간으로서 예년의 최고 5시간을 넘지 않았던 것에 비하면 매우 이례적인 사례로 기록되었다.

사례 11 (6월 5일~6월 7일)-일평균 PM₁₀ 농도 환경기준치 초과(서울 지역) : 사례 10과 동일한 기간에 대기 정체 및 축적 효과에 따라 6월 6일 서울지역의 PM₁₀ 농도가 일평균 157 µg/m³로서 24시간 평균 환경 기준치를 초과하였고 서울의 시정 거리(15시 3 km)도 낮게 나타나는 등 3일간 오존과 PM₁₀ 모두 환경 기준치를 초과하여 두 오염물질이 복합적으로 수도권의 대기 질을 악화시킨 사례이다.

사례 12 (6월 29일~6월 30일)-두 번째 오존주의보 발령(수도권 지역) : 김포시(사우동 143 ppb), 안양시(안양동 148 ppb) 등을 포함하여 수도권 10개 측정소에서 발령되었고 김포시(사우동 126 ppb)는 다음날인 30일에도 발령되었다.

사례 13 (7월 25일)-세 번째 오존주의보 발령(수도권 지역) : 인천시(계양동 142 ppb, 구월동 135 ppb), 김포시(고촌면 149 ppb) 등 수도권 6개 측정소에서 발령되었다. 평균 풍속이 서울 1.0 m/s, 인천 1.6 m/s로서 수도권 대기의 정체가 다른 오존 발령일(예 : 사례 10 및 사례 12)에 비해 상대적으로 더 심한 것으로 나타났다.

사례 14 (9월 3일)-네 번째 오존주의보 발령(부산 지역) : 이날 발령된 오존 주의보는 부산시 대연동에서 14:00시(126 ppb)부터 2시간에 걸쳐 발령되었고 15:00시 131 ppb까지 상승하였다. 사례 당일 부산지역 일 최고 기온이 29.9°C로서 9월 중 최고치를 보였다.

사례 15 (9월 3일)-일평균 PM₁₀ 농도 환경기준치 초과(수도권 지역) : 사례 14와 같은 날에 수도권에서는 PM₁₀의 일평균 농도가 202 µg/m³까지 상승하였다. 당일 수도권의 평균 풍속이 서울 0.7 m/s, 인천 0.9 m/s 등 모두 1 m/s를 밑돌아 월중 최저 풍속으로 기록되었다. 시간평균 최고 농도는 407 µg/m³(서울 구

의동)까지 상승하였다.

사례 16 (9월 11일)-다섯 번째 오존주의보 발령(수도권 지역) : 수도권인 군포시(당동)에서 두 시간(14:00~16:00)동안 오존 주의보가 발령되었고 최고 농도는 124 ppb로 기록되었다. 이전의 사례와 마찬가지로 높은 기온(서울 최고 기온 29.3°C 등)과 낮은 평균 풍속(서울 일평균 1.7 m/s)이 관측되었다.

사례 17 (10월 1일)-여섯 번째 오존주의보 발령(부산 지역) : 10월 1일과 4일에 부곡동, 대연동 등 5개 지역에서 1시간 환경기준치(100 ppb)를 초과하였으며, 이 중 광안동에서 오존주의보(120 ppb)가 발령되었다. 측정된 농도는 광안동, 대연동 등 주로 부산의 동남 해안가에서 높게 나타났다. 이날 기상 조건은 일 최고기온(25.6°C), 평균풍속(1.6 m/s), 그리고 낮은 혼합고(약 900 m 추정)로서 오염물질의 확산에 불리하게 작용하였다.

사례 18 (10월 4일)-일평균 PM₁₀ 농도 환경기준치 초과(부산 지역) : 10월 4일의 대기의 정체로 인해 부산지역의 일평균 PM₁₀ 농도가 154 µg/m³로 나타났다. 측정소별로는 범천동에서 372 µg/m³까지 측정되었고 시정거리도 10 km 이하로 낮게(15시 6 km) 나타났다. 이외에도 당일 오존 농도가 높게 나타났는데 주의보가 발령되지는 않았지만 덕천동(103 ppb), 부곡동(104 ppb), 대저동(105 ppb) 등에서 시간 평균농도가 상대적으로 높은 수준을 보였다. 그러나 부산 이외의 도시에서는 환경 기준치를 크게 밑돌아 큰 지역적 편차를 보였다.

사례 19 (11월 11일~11월 12일)-7번째 황사(가을 황사)의 발현 : 봄철에 주로 발생하는 황사와 대조적으로 가을철인 11월의 황사가 발생은 황사 보고이래 1991년 이후 처음이라는 기록을 남긴 사례였다. 또 1991년에는 수도권에 국한된 반면 이 사례에서는 전국 규모로서 도시별 전국 55개 측정소(53개 도시 측정 유효) 중 40개 도시에서 일평균 PM₁₀ 농도가 환경 기준치를 초과하였다. 측정된 최고 PM₁₀ 농도는 시간평균 1,005 µg/m³(청주 내덕동)를 기록하였고 전주 등 중서부 지역에서 대부분 시간평균 최고농도가 300 µg/m³ 이상을 보였다.

사례 20 (12월 3일)-일평균 PM₁₀ 농도 환경기준치 초과(부산 지역) : 12월 3일 정체성 고기압에 의해 부산의 도시 일평균 PM₁₀ 농도가 166 µg/m³로 나타났다. 측정소별로는 잠전동, 대저동에서 시간 최고 농도가

모두 215 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 측정되었다.

4. 2002년 고농도 사례의 특징 및 그 경향

2002년의 고농도 오염 사례는 표 2에 나타난 것처럼 황사, 고농도 PM_{10} , 오존의 사례로 요약될 수 있다. 황사 사례(7회), 오존 주의보 발령(6회), PM_{10} 환경 기준치 초과(7회)에 대한 지역별 분포는 수도권에서 8 사례, 부산지역에서 5 사례로서 모두 수도권과 부산의 두 지역에 집중되어 나타났다. 오염물질별로는 PM_{10} (황사 기간 제외)과 오존의 고농도 발생 사례의 비율은 수도권(PM_{10} 4차례, 오존 4차례)과 부산지역(PM_{10} 3차례, 오존 2차례)에서 고르게 발생하였으나 오존 주의보 발령은 수도권에서 여름철에 집중된 반면 부산지역에서는 가을철에 주로 발령되어 두 지역간 계절적으로 매우 다른 특징을 보였다.

반면 도시별 일평균 농도를 기준으로 선정된 2002년 SO_2 , NO_2 의 고농도 사례일은 나타나지 않아 그 오염도가 상대적으로 매우 양호하게 나타났다. 이는 국가 정책에 의한 SO_2 저감 효과 및 NO_2 의 여러 특성에 기인할 수 있다. NO_2 의 증가 경향은 급증하는 차량 증가량에 비해 그 증가폭이 크지 않았는데(그림 3) 이는 NO_x 가 광화학 반응에 참여함으로써 극단적인 증가 현상이 억제될 뿐만 아니라 배출 특성상 출퇴근 시간으로 분산되는 등의 요인이 작용한 것으로 사료된다.

2002년 선정된 고농도 사례의 각 발생 원인별 특징을 요약하면 다음과 같다.

4.1 황사 사례

2002년 고농도 사례의 가장 큰 특징은 역시 황사로 인한 PM_{10} 농도의 기록적인 상승을 꼽을 수 있다. 특히 2002년 황사는 한 측정소에서 시간 평균 PM_{10} 농도가 3,311 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 넘는 최악의 사례(사례 6)가 나타났을 뿐 아니라 10년 이상 보고된 적이 없었던 가을황사(사례 19)가 발현하기도 하였다. 특히 그 강도가 최근에 와서 더욱 심한 이유는 발원지에서의 가뭄이 평년보다 훨씬 심했고 중국 내륙 및 몽골 지역의 사막화가 가속되어 예년에 비해 상대적으로 한 반도에 가까운 지역도 발원지로 부상하였기 때문으로 보고되고 있다.

(사례 1)의 겨울 황사 사례처럼 전국적 규모로 항상 고농도의 미세먼지가 측정되는 것이 아니라, 우리가 느끼지 못하는 먼지 농도 수준으로도 발생할 수 있음을 알 수 있다. 또한 계절적으로도(사례 19)와 같이 가을 황사가 발생하여 결국 여름을 제외하고는 언제든지 황사의 영향을 받을 수 있음을 보여 그 경향이 계절과 점점 무관해지는 것을 확인 할 수 있다. (사례 19)의 경우 2002년과 비교하여 그 측정항목이 상이하여 직접적인 비교는 힘들지만(1991년에는 TSP로 측정됨), PM_{10} 이 평균적으로 TSP의 약 50~70%를 차지한다고 가정할 때, 1991년의 가을 황사(서울 남가좌동에서 TSP 최고 농도 444 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 그 최고 농도가 2002년에 약 13~58% 더 증가(창원 가음정동에서 최고 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)된 것을 알 수 있다.

2002년의 황사 발생 특징을 더 자세히 알아보기 위해, 표 2에 연도별 주요 도시별 연간 총 황사 발생

Table 2. The occurrence days of Yellow Sand events in the major cities for the period of 1992 to 2002.

City	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Seoul	8 (100%)	14 (71%)	0 (-)	13 (85%)	1 (0%)	1 (0%)	13 (77%)	6 (17%)	10 (50%)	27 (33%)	14 (43%)
Pusan	0 (-)	10 (80%)	1 (100%)	5 (60%)	2 (0%)	1 (0%)	7 (57%)	4 (0%)	9 (44%)	21 (33%)	10 (50%)
Daegu	1 (100%)	13 (69%)	1 (100%)	8 (75%)	5 (40%)	1 (0%)	10 (70%)	5 (0%)	8 (50%)	22 (27%)	10 (50%)
Kwangju	5 (100%)	14 (71%)	1 (100%)	7 (86%)	5 (20%)	1 (0%)	10 (80%)	5 (0%)	12 (50%)	21 (33%)	12 (33%)
Daejeon	2 (100%)	16 (69%)	2 (100%)	7 (86%)	1 (0%)	1 (0%)	14 (79%)	5 (0%)	9 (44%)	24 (25%)	13 (38%)

※ The value of parenthesis indicates the ratio (percentage) of number of days occurred only in April to the total occurrence days.

일수와 주요 황사 발생기간인 4월의 발생 횟수를 제시하였다(괄호안은 4월 황사 발생일 비율). 표 2에서 알 수 있듯이 전통적으로 연간 황사발생이 4월에 집중되었으나 최근으로 올수록 연간 4월 황사일수의 비율이 줄어들고 있음을 뚜렷하게 알 수 있다. 이것은 결국 황사가 발생한 기간이 길어졌다는 것을 뜻하며, 실제로 2001년에는 5개월에 걸쳐(1, 3, 4, 5, 12월), 그리고 2002년에는 4개월에 걸쳐(1, 3, 4, 11월) 각각 황사가 산발적으로 발생하여 특정 달 혹은 계절과 무관해지는 경향을 보였다. 또 황사 발생한 당일 850 hPa 기압패턴에서는 한랭 저기압이 만주 지방에 위치한 가운데 강한 북서풍속(예 : 2002년 모든 황사 사례에서 5.0 m/s 이상)에 의해 황사먼지가 이동하는 등 이전의 연구 결과와 일치하는 기압 패턴이 모두 확인되었다.

4.2 광화학 오존 및 주의보 발령

2002년 한해동안 발령된 오존 주의보는 6월 5일을 시작으로 총 7번에 걸쳐 발령되었다. 주로 수도권과 부산 지역에서 모두 광화학 반응에 의한 오존의 생성, 그리고 생성된 오존이 낮은 평균 풍속으로 적은 환기효과가 주요 원인으로 분석된다. 지상 일기도의 패턴에서는 7번의 사례 중(사례 12)를 제외한 6번이 모두 풍속이 매우 약하여, 수도권 평균 약 1.5 m/s 내외(서울의 경우 전 사례기간 1.3~1.4 m/s)로서 생성된 오존이 외부로 이동되지 못하고 축적된 것임을 반증하였다.

오존 주의보 발령 지속시간이 8시간이나 되었던(사례 10)의 경우 역시 이상 고온 현상에 의한 전형적인 광화학 오존 사례로서, 이 날 서울의 일평균 온도가 25°C 이상, 일 최고 기온은 모두 30°C를 상회하였다. 이는 낮은 평균 풍속(서울 5일 1.2 m/s, 6일 1.5 m/s)으로 생성된 오존 농도의 이동 및 희석 효과 또한 매우 적었음을 말해 주고 있다.(사례 12)의 발령일 역시 이상 고온 현상이 연일 나타난 것으로서 서울의 일평균 기온이 이를 연속 25°C 이상 관측되었으며 일 최고기온도 서울에서 29일 32.0°C 등 이상 고온 현상이 연일 발생한 사례였다.

(사례 17)은 10월 초 제 14회 부산아시아게임 기간 중 부산 지역(광안동 14:00시 126 ppb)에서 오존 주의보가 발령된 사례이다. 특히 1일과 4일을 합쳐 오존 농도가 5개 지역에서 1시간 기준(100 ppb)을

초과하는 등 오존 농도의 증가현상이 부산지역에서 두드러지게 나타났다. 특히 대회 기간 중 대기 오염 저감을 위한 자동차 2부제의 시행에도 불구하고 높은 오존 농도가 측정된 것은 부산 지역의 기상 및 지역적 특성이 복합적으로 연관된 것으로 판단된다. 또 10월 중 대기 환경 기준치를 초과한 횟수는 다른 해에 비해 2002년에 급상승하였는데(7개소에서 20회) 그 중 부산에서만 집중적으로 6개소를 기록하여 흔하지 않은 고농도 집중 현상이 나타난 것이 주목할만하다.

4.3 비황사 기간의 PM₁₀ 고농도 사례

비황사 기간 7회에 걸친 PM₁₀ 고농도 사례는 모두 정체성 고기압의 영향으로 국지 수송 및 확산이 적은 사례로서 대부분 종관 기상 조건과 연관되어 나타났다.

한반도를 지배하는 종관 기상상태는 그 시간 스케일이 약 3~5일, 공간 스케일이 수천 km이므로 특정일에 PM₁₀ 농도가 높을 경우 그 전날 혹은 익일에도 상대적으로 높은 PM₁₀ 농도가 많이 측정되었다. 예를 들어(사례 11)은 그 사례 자체가 3일 연속 지속된 사례이며, (사례 2), (사례 5) 및 (사례 20) 등에서도 그 전날 2일 동안 PM₁₀ 농도가 대부분의 평균 농도가 100 µg/m³을 상회하였고, (사례 18)에서도 그 익일에 환경기준치 초과 지역에서 여전히 높은 PM₁₀ 농도가 측정되었다.

한편 특정 종관 기상상태가 한반도를 지배하게 될 때, 우리 나라 대부분의 지역 대기질 측정소가 동일한 종관 기상 조건하에 놓이게 되므로 한반도의 대부분의 측정 자료가 상대적으로 비슷한 시간 경향 그리고 상대적으로 적은 지역적 편차가 나타났다. 2002년의 사례에서도(사례 9)를 제외하고는 PM₁₀ 고농도 사례는 지역적 편차가 적게 나타났다. 특히(사례 15)의 경우 서울, 부산, 대전, 인천 등 우리 나라 주요 대도시의 평균 농도가 모두 100 µg/m³를 상회하여 거의 우리 나라 전역이 동일한 종관 기상 상태에 있었음을 보여 주는 사례로 분석된다. 또한 연간 도시별 확인된 PM₁₀ 농도 변화도 그 주기 및 경향이 전국적으로 매우 유사하였다는 점에서 이는 국지 기상보다는 종관 기상상태에 의해 주로 결정되었음을 반증해 준다.

5. 요약 및 결론

지역 대기 측정망의 측정 농도자료를 이용하여 2002년 한해동안 황사를 포함하여 대기 오염 농도가 높게 나타나는 날을 선정하여 그 특징을 정성적으로 요약하였다. 고농도 사례는 각 측정소별 SO₂, PM₁₀, NO₂ 농도를 24시간 산술 평균한 후 이를 해당 도시에 대해 하나의 값으로 공간 평균을 취하여 그 일평균 농도가 24시간 환경 기준치를 초과한 날로 선정하였다. 일평균 환경기준치가 없는 오존의 경우 주의보가 발령한 날을 오존의 고농도 사례일로 정의하였고 황사가 발생한 날은 PM₁₀의 환경기준치 초과 사례와 구분하였다. 그 결과 황사와 관련된 사례가 7회, 오존 주의보와 관련된 날은 6회, 그리고 황사 현상과 무관하게 나타난 고농도 PM₁₀ 사례가 6회로 나타났다. SO₂, NO₂에 의한 직접적인 고농도 사례는 나타나지 않았다.

총 20번에 걸친 고농도 사례는 모두 기상 조건과 매우 밀접하게 나타났는데 황사가 발생한 경우 850 hPa 혹은 700 hPa의 북서풍의 강한 바람구조를 유도하는 기압패턴이 확인되었고 상층(850 hPa)에서 5 m/s 이상의 강한 바람이 모든 사례에서 확인되었다. 반면 오존 주의보가 발령되었던 날은 높은 기온과 함께 약한 바람을 유도하는 국지 기상과 연관되어 나타났고 도시별 지역적 기상 인자와 밀접히 연관되어 나타났다. 황사 현상과 무관하게 나타난 고농도 PM₁₀ 사례는 종관 기상 상태가 중요하게 작용하여 한반도 상공에 정체성 기압이 형성된 경우 도시별 그 변화 경향과 주기가 거의 일치되는 특성을 보였다.

이러한 특징은 비록 2002년 한해에 국한된 것이 아닌 만큼, 이와 연관된 선행 연구의 결과와 대부분 일치하였으며 특히 황사 발생시의 상층 대기 패턴의 특징, 오존 주의보 발령시의 국지기상 특징, 비 황사 기간 PM₁₀ 고농도 사례일의 종관 기상 특징에 대한 여러 선행 연구 결과들과 그 특징이 다르지 않았다. 그러나 황사 및 고농도 오존 사례와는 달리 PM₁₀ 고농도 사례일에 대한 국내의 분석적 연구는 2002년의 경우 한해의 고농도 사례의 30% 이상임을 고려해 볼 때 향후 보다 더 활발한 연구가 필요할 것으로 보인다.

일반적으로 한 지역의 대기오염도는 여러 요인에 의해 결정되는데 그 주 요인으로 첫째는, 외부 영향으로서 황사와 같이 중국에서 발생한 오염물질이 대상 지역으로 유입되는 경우를 들 수 있다. 두번째는 대상 지역에서 배출량이 비 이상적으로 증가되었을 경우가 있다. 세번째는 배출량이 정상적이더라도 바람이 약하거나 정체성 고기압이 자리잡고 있어 수송 및 확산에 의한 환기 효과가 적어 계속적으로 축적되는 경우, 마지막으로 발생원이 없더라도 오존과 같이 화학 반응에 의해 생성되어 축적되는 경우가 있다. 이 중 대기 오염 저감을 위한 가장 원론적인 대처 방안은 배출량을 줄이거나 정화시키는 방법이 될 것이나 부분적으로만 가능한 것이 현실이며 황사와 같이 오염원이 외부에 있는 경우에는 여러 외교적인 문제와도 연관되게 된다.

따라서 오염물질의 많은 부분의 해석을 위해 기상 조건과의 연관성에 대한 연구는 앞으로도 계속 필요할 것으로 판단된다. 향후의 발생 가능한 고농도 사례 연구 역시 필수적으로 여러 기상 조건과 관련시켜 생각할 수밖에 없다. 그것은 역으로 어느 지역을 오염원으로부터 보호하고자 할 때 해당 지역의 국지적 혹은 종관적 기상 조건은 오염 물질 배출을 규제해야 할 대상 지역의 범위를 판단할 수 있게 하며, 또한 공해 시설의 입지 선정을 위한 기본 정보를 제공해 줄 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원 (2003) 『대기환경연보(2002)』
- 김기현, 김민영, 신재영, 최규훈, 강창희 (2002) PM_{2.5}, PM₁₀, TSP의 시간대별 관측결과에 기초한 황사기간중 분진의 농도 특성에 대한 고찰 : 서울시의 4대 관측점을 중심으로한 2001년 봄철 황사기간에 대한 사례 연구. 한국대기환경학회지, 18(5), 419-426.
- 김영성, 이시혜, 김진영, 문길주, 김용표 (2002) 1980년대와 1990년대 우리나라의 시정 변화. 한국대기환경학회지, 18(6), 503-514.
- 김영성 (2000) 우리 나라의 오존 농도 변화 추이와 주요 인자. 한국대기환경학회지, 16(6), 607-623.
- 나광삼, 김용표, 진현철, 문길주 (1998) 울산 대기중의 입자상, 기체상 물질의 수용성 이온 성분과 휘발성 유기화합물의 농도. 한국대기보전학회지, 14(4),

- 281-292.
- 박세욱, 백남준, 김용표, 문길주, 김영성(1994) 1980~1993년 기간의 서울의 시정 추이. 한국대기보전학회지, 10(3), 203-208.
- 백남준, 김태오, 김용표, 문길주(1994a) 시정장애 현상 원인과 그 규명방법 : 수도권 지역의 시정장애 현상 연구를 위하여. 한국대기보전학회지, 10(1), 1-23.
- 백남준, 이성준, 김용표, 문길주, 조영일(1994b) 서울시의 1993년 가을 스모그 특성 모사. 한국대기보전학회지, 10(2), 137-145.
- 신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Jianzhen Yu, Keith Bower (2002) ACE-Asia 집중관측기간에 제주 고산에서 측정된 대기오염물질의 농도 분포 특성, 18(6), 487-501.
- 오현선, 윤순창(1996) 서울지역의 시정 악화에 영향을 미치는 대기오염 및 기상장의 특성. 한국기상학회지, 32, 131-137.
- 윤정임, 김선태, 김정옥(1993) 광화학 스모그 물질의 시계열 특성에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 9(3), 183-190.
- 이기원, 권숙표, 정 용(1993) 서울시 대기중 오존 오염도의 연도별 변화와 그 영향인자 분석-광화문 지역을 중심으로. 한국대기보전학회지, 9(1), 107-115.
- 전영신, 김지영, 최재천, 신도식(1999) 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어로졸 수농도 특성. 한국대기보전학회지, 15(5), 575-586.
- 정용승, 윤마병(1994) 황사의 사례 분석과 한반도 유입량. 한국대기보전학회지, 10(4), 233-244.
- 한진석, 김병곤, 김신도(1996) 1994년 수도권 지역에서의 시정과 미세 입자상물질 화학 조성과의 관계 해석. 한국대기보전학회지, 12(4), 377-387.
- 홍낙기, 이종범, 김용국(1993) 다변량 해석을 이용한 서울시 하계 스모그의 형태 분류. 한국대기보전학회지, 9(4), 278-287.
- 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.
- Kim, Y.P., K.-C. Moon, J.-H. Lee, and N.-J. Baik (1999) Concentrations of carbonaceous species in particles at Seoul and Cheju in Korea. Atmospheric Environment, 33, 2751-2758.