

1980년대와 1990년대 우리나라의 시정 변화 Visibility Variations in Korea in the 1980s and 1990s

김영성* · 이시혜¹⁾ · 김진영 · 문길주 · 김용표¹⁾

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

¹⁾이화여자대학교 환경학과

(2002년 4월 17일 접수, 2002년 10월 14일 채택)

Y.S. Ghim*, S.H. Lee¹⁾, J.Y. Kim, K.-C. Moon and Y.P. Kim¹⁾

Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

¹⁾*Department of Environmental Science and Technology, Ewha Womans University*

(Received 17 April 2002, accepted 14 October 2002)

Abstract

During the past two decades, primary pollutants in the ambient air have been substantially reduced in Korea by aggressive government efforts such as the switchover to clean fuels and equipment of automobiles with a three-way catalytic converter. However, visibility impairment in Seoul and major metropolitan areas has been a stubborn problem. It is apparent that both directly emitted fine particles mainly from vehicles and secondary fine particles from photochemical reactions could contribute to this visibility impairment. In addition, Korea is located downwind of the prevailing westerlies from China and is influenced by the emissions of air pollutants in China. In order to assess this complicated problem of visibility impairment, the visibility trends for the past 17 years observed at more than 60 stations throughout the country were analyzed. The results showed that visibilities were generally the lowest in the winter morning in comparison with those in the summer afternoon as well as the annual average values. It was believed that primary pollution was principally responsible for visibility impairment in most areas. The visibility in the summer afternoon was lower in clean coastal areas along with a high level of relative humidity due to the inflow of moist air accompanied by sea breeze. Although contributions of secondary particles from photochemical reactions and long-range transport of fine particles to the visibility impairment were probable, their certain evidences were not found.

Key words : visibility impairment, regional characteristics, primary pollutants, photochemical pollution, marine influence

1. 서 론

시정은 육안으로 식별이 쉬워 일반 시민들에게는 체감 오염의 지표로 인식되고 있다. 반면 연구 대상

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-958-5817, E-mail : ysghim@kist.re.kr

으로서의 시정은, 기체부터 고체까지, 인위적, 자연적 원인이 총체적으로 결합되어 나타나는 대기 현상이기 때문에 접근이 까다롭다. 과학적 의미의 시정 장애는 대기 중 기체와 입자가 빛을 흡수하거나 산란시킬 때 나타난다. 그러나 기체의 영향은 미미하여 NO₂가 빛을 흡수하여 시정을 감소시키는 정도이며, 주로 1, 2차 미세입자가 빛을 흡수하거나 산란시킴으로써 시정 장애를 일으키게 된다. 미세입자에 의한 시정 감소는 입자 크기, 화학적 조성에 따라 달라진다. 수분은 입자의 화학적 조성에 따라 입자와 결합하여 크기를 변화시키므로 시정 감소의 중요한 인자이다(Seinfeld and Pandis, 1998).

1980년대까지 서울의 SO₂와 TSP의 농도는 세계에서 가장 높은 수준이었다(WHO/UNEP, 1994). 그러나 정부의 적극적 대기환경정책에 의해 1990년대 초반 SO₂와 TSP의 농도는 급격히 감소하였으며 대신 고농도 오존과 NO₂의 증가가 새로운 문제로 부각되었다. 서울부터 시작된 이러한 변화는 1990년대 중반까지 전국적으로 급속히 진행되었다(김영성, 2000). 지난 20년간 전국에 걸친 이와 같은 변화에도 불구하고 서울을 비롯한 대도시에서 시정 장애는 여전히 심각한 문제로 남아있다. 가장 심각한 서울의 겨울 아침 시정 장애는 시정 관측 자료에 의하면 개선되는 것으로 나타나고 있으나(Ghim *et al.*, 2002) 이와 같은 추세에 동의하는 일반 시민은 많지 않다. 대기 중 원소 탄소의 농도가 5~10 µg/m³으로 비교적 높아(Kim *et al.*, 1999) 시야가 회색을 띠므로써 일반 시민에게 부정적 인상을 주는 것으로 추정할 수 있으나 입증된 것은 아니다.

지금까지 국내에서도 시정에 관하여 적지 않은 연구들이 수행되어 왔다. 백남준 등(1994a, b)은 1993년 가을 서울 KIST에서 시정이 좋은 날과 나쁜 날의 입자 특성을 측정하여, (1) PM₁₀은 시정과 큰 상관성이 없는 반면 1 µm 이하의 미세입자가 시정에 중요하였고, (2) 입자 중 탄소 성분과 황산염, 질산염 등의 기여율이 높았으며, (3) 시정이 나쁠 때 특히 이온 농도의 증가와 함께 입자 산란의 효과가 커짐을 발견하였다. 이와 같은 사실은 이후 한진석 등(1996)에 의하여 다시 한번 확인되었다. 시정 변화 추이에 대하여 박세욱 등(1994)은, 혼합고와 상대 습도의 영향으로 서울의 평균 시정은 아침에 가장 낮고 오후로 갈수록 증가하는 경향을 보이며,

1980년 후반 이후 아침의 시정이 점차 좋아지면서 시정의 일변화 폭이 줄고 있음을 발표하였다. 또한 오현선과 윤순창(1996)은 1980년부터 1993년까지 오염이 덜한 지역에서 시정 저하 폭이 크고, 서울 겨울철의 경우 고기압이 한반도 상공에 위치하여 기단이 정체해 있을 때 뿐 아니라 습한 해양성 기단의 영향을 받을 때 상대 습도가 높아지며 시정이 저하됨을 지적하였다.

많은 사실들이 밝혀졌음에도 막상 이와 같은 인자들이 우리나라의 구체적 대기 환경 속에서 어떻게 작용하여 시정이 다양한 변화를 보이게 되는가는 명확하지 않다. 가장 불확실한 부분은 시정의 일변화에 관한 부분이다. 시정 변화의 원인을 밝히기 위한 연구가 대부분 24시간 혹은 12시간 입자를 채취하여 분석하기 때문에 아침부터 오후에 이르는 시정 변화 과정의 입자 조성 변화를 정확히 이해하지 못하고 있다. 그러나 이와 같은 상황은 아직 미국의 경우도 크게 다르지 않다(Andrews *et al.*, 2000; Demerjian, 2000). 최근 AMS (Aerosol Mass Spectrometer) 등 입자의 질량과 조성을 실시간 측정할 수 있는 방법들이 제안되고 있으나 아직 보편적이지는 않다(Drewnick *et al.*, 2001; McMurry, 2000).

일단, 자동차에서 직접 배출되는 미세입자를 서울 등 대도시의 아침 시정 장애의 주요 원인으로 생각할 수 있다. 이의 영향은 아침의 높은 상대습도와 안정한 대기 상태에서 더욱 커질 수 있다. 또한 수분을 흡수하여 성장한 입자는 기온이 상승하여 상대습도가 낮아져도 수분을 쉽게 방출하지 않아(Seinfeld and Pandis, 1998) 빛 소산에 유효한 크기를 유지함으로써(낮에는 소멸되는 안개와 달리) 오후에도 시정을 방해할 수 있다. 잘 알려진 바와 같이 여름철 오후에는 광화학 반응에 의해 생성된 미세입자가 시정 장애에 기여할 수 있다. 이들 모든 변화의 배경에는 중국에서 배출된 대기오염물질이 이동하며 형성된 2차 오염물질이 자리하고 있다.

복잡한 우리나라의 시정 장애 현상을 어느 정도 정확하게 이해하고 대응책을 강구하기까지는 상당한 시간이 소요될 가능성이 높다. 그리고 우선적으로 우리나라 시정 장애 현실을 정확하게 파악할 필요가 있다. 본 논문에서는 이를 위하여 지난 20년간 전국 60여개 관측소의 시정 변화를 조사하였다. 특

성 변수로써, 1차 오염물질의 영향이 클 것으로 추정되는 겨울 아침 시정과 2차 오염물질의 영향이 있을 수 있는 여름 오후 시정을 선택하여 연평균 시정과 비교하였다. 국지 배출의 영향을 알아보기 위하여 대도시와 청정 지역을 비교하였고, 해안과 내륙 지역으로 나누어 시정 특성을 살펴보았다. 대부분이 산지인 우리나라는 특히 내륙의 풍속이 낮아 인접한 지역 사이에도 대기질 특성이 크게 다를 수 있기 때문에, 주변 지역의 일반 특성과 구분되는 특정 지점의 국지 변화에 대하여서도 알아보았다.

2. 연구방법

1982년부터 1998년도까지 기상청 기상 관측소의 시간별 시정 관측 자료를 분석하였다. 기상청의 시정은 목측(目測)에 의한 것으로 하늘을 배경으로 검은 빛을 띤 수목이나 건물을 구별할 수 있는 최대 거리를 지칭한다 (Seinfeld and Pandis, 1998; USEPA, 1979). 지상 약 1.5 m의 눈 높이에서 수평 방향의 사물을 바라보며, 방향별로 시정이 다를 때에는 최소 시정을 기록한다. 사물의 구별이 어려운 야간에는 주로 전등의 불빛 등을 대상으로 한다 (김유근 등, 1998). 그러나 장비를 이용한 측정과 달리 목측에 의한 측정은 개인의 숙련도나, 특히 빛 공해가 심한 야간에는 배경의 변화에 영향을 받을 수 있으며, 각 측정소마다 목표물의 수와 거리가 제한되어 있어 이에 의하여 최고, 최저 시정이 결정된다는 문제점이 있다.

1997년 이후는 전국의 모든 관측소에서 03시부터 하루 8번, 3시간 간격으로 시정이 관측되고 있다. 그러나 1983년부터 1996년까지 33~34개의 관측소에서는 03시부터 21시까지 하루 4번, 6시간 간격으로 시정이 관측되었다. 1982년도에는 전국의 모든 관측소에서 6시간 간격으로 03시부터 하루 4번 혹은 09시부터 하루 3번 관측이 이루어졌다. 이에 따라 본 논문에서 겨울 아침 시정으로는 전년도 12월과 1, 2월 (3시간 간격 관측에서 06시 자료가 있으면 이를 포함) 09시 평균을, 여름 오후 시정으로는 6, 7, 8월 15시 (3시간 간격 관측에서 18시 자료가 있으면 이를 포함) 평균을 이용하였다.

본 연구에서는 시정의 시간 변화와 공간 분포를

모두 조사하였다. 시간 변화는 1982년 이후 모든 자료를 대상으로 한 반면, 공간 분포는 1990년대 자료만을 대상으로 하였는데, 우리나라의 대기질이 1990년대에 들어 큰 변화를 보임에 따라 1980년대 자료가 현재의 공간 분포를 이해하는데 큰 도움이 되지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 1998년 현재 전국의 관측소 수는 73개이지만, 1990년대 지속적으로 시정 관측이 이루어진 관측소 수는 68개였으며, 1980년대부터 관측이 계속된 관측소 수는 61개였다. 따라서 시간 변화 분석에는 61개 관측소 자료를, 공간 분포 조사에는 68개 관측소 자료를 이용하였다 (그림 1).

강수는 자체가 심각한 시정 장애를 일으킬 뿐 아

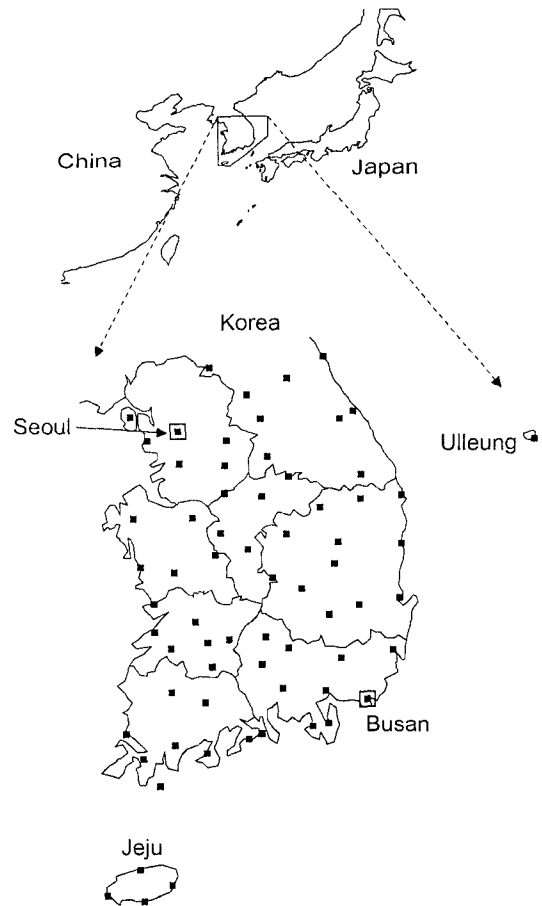


Fig. 1. Distribution of visibility monitoring stations in Korea during the 1990s. Solid rectangles denote monitoring stations.

나라 강수에 수반되는 100%에 가까운 상대습도 역시 시정에 불리하게 작용할 가능성이 크다. 하지만 강수는 대기 중 오염물질을 세정함으로써 시정을 크게 증가시키기도 한다. 강수를 포함시킬 경우 강수의 영향이 너무 두드러질 수 있다고 생각하여 강수일의 시정은 분석 대상에서 제외하였다. 하루 중 어느 한 시간이라도 강수량이 0mm 이상인 날은 모두 강수일로 처리하였는데, 강수량이 거의 없다 하여도 상대습도, 풍속 등 강수 전후 기상 변화가 시정에 미치는 영향이 적지 않을 것으로 판단하였기 때문이다. 대상 기간 동안 연평균 강수일은 전국이 130일, 서울이 143일 정도였다. 전국의 여름철 평균 강수일은 43일, 겨울철 평균 강수일은 29일이었으며, 서울의 여름철 평균 강수일은 50일, 겨울철 평균 강수일은 31일이었다. 서울의 겨울철 강수일은 전체 일수의 약 1/3로 전국 평균과 거의 차이가 없으나, 여름철 강수일은 전체 일수의 50% 이상으로 전국 평균보다 많았다.

3. 전반적 변화

지난 20년간 전국과 서울의 시정 변화 추이를 그림 2에 비교하였다. 전국과 서울 모두 연평균보다 겨울 아침 시정이 낮다. 전국의 시정은 1980년대 크게 저하된 반면 서울의 시정은(1996년 이후 감소에도 불구하고) 1990년대 전반적으로 개선되고 있음이 명확하다. 만약 시정이 대기질의 지표라면, 우리나라의 대기질은 1980년대 급속히 악화되다가 1990년대 그 속도가 크게 완화된 것으로 볼 수 있다. 서울의 경우 1990년대 초반 1차오염이 현저히 감소하였고 1990년대 중반 이후 오존 등 2차오염이 문제가 되고 있는 상황에서(김영성, 2000) 1990년대 시정이 개선되고 특히 중반 이후 그 추세가 뚜렷한 것은, 서울의 평균 시정이 2차오염보다 1차오염과 밀접한 것을 시사하는 것으로 볼 수 있다.

전국과 서울 모두, 시정의 변화는 여름 오후보다, 1차오염의 영향이 강할 것으로 추정되는 겨울 아침에 두드러진다. 1990년대 후반 서울의 여름 오후 시정은 변화가 크지 않은 반면 겨울 아침 시정은 크게 개선되어 두 시정이 거의 비슷하다. 그럼에도 불구하고 서울의 5 km와 10 km 미만 저시정 일수는

1990년대 후반에도 전국 평균의 2배 이상 많다. 반면, 3 km 미만의 최저 시정 일수는 전국 평균과 서울이 크게 다르지 않다.

서울과 전국의 시정 변화 추이가 크게 다름에 따라 서울 외 다른 지점의 변화 추이를 알아보기 위하여 그림 3에서는 서울을 포함한 전국 관측소의 시정 분포를 조사하였다. 각 관측소별로 1990년대 초반 3년과 후반 3년의 겨울 아침 평균 시정과 여름 오후 평균 시정 그리고 이 둘의 차이를 산출한 후 내림차순으로 정리하여 분포 모습을 비교하였다. 그림 2와 달리 1990년대 변화만을 조사한 이유는 이미 설명한 바와 같이 1980년대와 1990년대 우리나라 대기질의 큰 변화 때문이다.

그림 우측의 여름철 오후 시정은 1990년대 초반에 비해 후반 3년 전국적으로 저하되었다. 시정이 가장 좋은 10개 지점과 가장 나쁜 10개 지점의 평

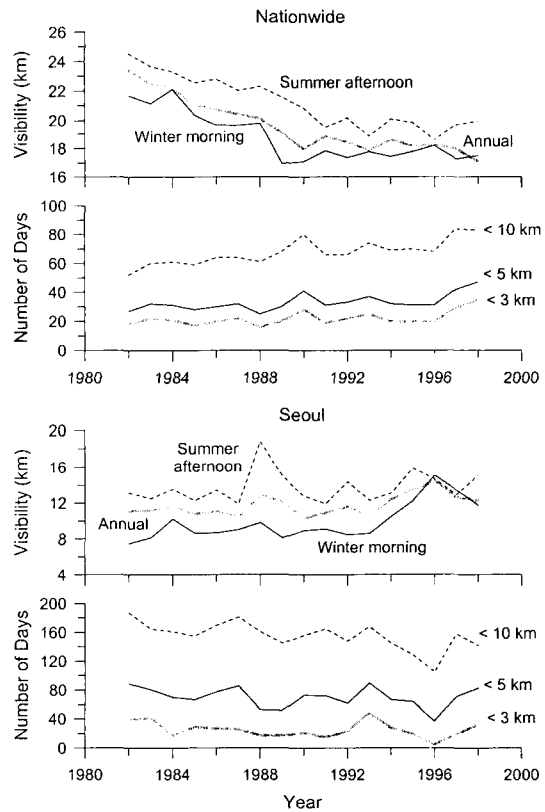


Fig. 2. Visibility trends nationwide and in Seoul.

균 감소율은 모두 약 8%로 비슷하나 좋은 지점의 절대값이 커 감소 폭도 크다. 겨울철 아침 시정은 좋았던 지점들은 저하되고, 나빴던 지점들은 개선되었다. 시정이 가장 나쁜 10개 지점의 평균 증가율은 26%이고, 가장 좋은 10개 지점의 평균 감소율은 5%로, 나쁜 지점의 증가율이 좋은 지점의 감소율보다 크다. 전국 약 80% 지점에서 여름 오후 시정이 겨울 아침보다 좋아 두 값의 차이가 양의 값을 보이고 있다. 두 값의 차이가 음의 값을 보이는 지점은(여름 오후의 시정이 겨울 아침보다 나쁜 지점은) 1990년대 초반과 후반 값이 거의 비슷하나 양의 차이를 보이는 지점은 1990년대 후반 전반적으로 값 차이가 작아졌다.

결국 그림 3은 전국 대부분의 관측소에서 겨울 아침과 여름 오후의 시정 차이가 감소하고 있음을

보여주고 있다. 그러나 주로 겨울 아침의 시정이 좋아짐으로써 차이가 감소하였던 그림 2의 서울과 달리 전국적으로는 겨울 아침 시정이 저하되고 있는 지점도 적지 않으며, 그럼에도 많은 지점에서, 일부는 겨울 아침 시정이 좋아짐으로써, 또 일부는 여름 오후 시정이 저하되면서 두 계절의 시정 차이가 줄고 있다.

4. 공간 분포

그림 3은 1990년대를 지나며 겨울 아침과 여름 오후 모두 관측소 사이의 차이가 줄었음을 보여주고 있다. 이와 같은 변화가 공간 분포에서는 어떠한 방식으로 나타나는가를 알아보기 위하여 그림 4에

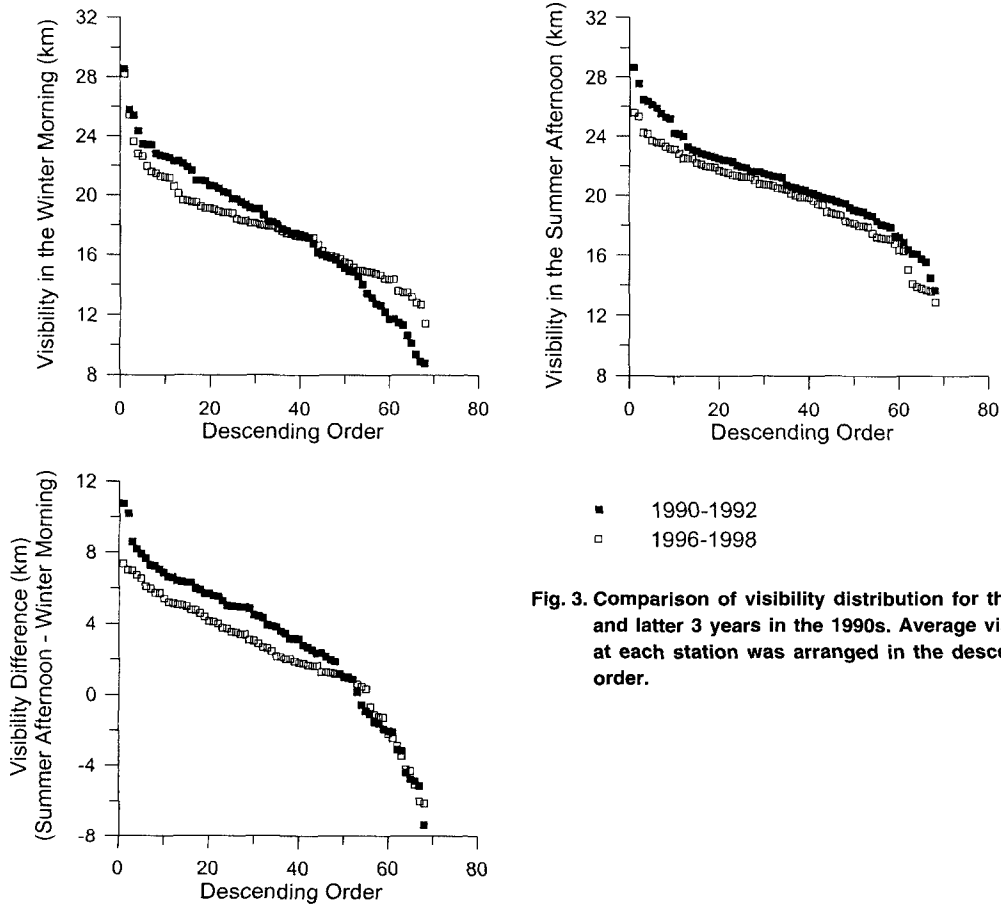


Fig. 3. Comparison of visibility distribution for the first and latter 3 years in the 1990s. Average visibility at each station was arranged in the descending order.

서는 역시 1990년대 초반과 후반 3년을 나누어, 각각 겨울 아침과 여름 오후 시정이 가장 좋은 10개 지점과 나쁜 10개 지점, 그리고 여름 오후 시정이 겨울 아침에 비하여 가장 좋은 10개 지점과 가장 나쁜 10개 지점을 조사하였다.

그림 4(a)는 1990년대 초반 겨울 아침 시정이 수도권을 비롯한 중서부 지방에서 주로 나빴음을 나타내고 있다. 예상할 수 있는 것과 같이 서울, 수도권은 여름 오후 시정 역시 나쁘다. 주목할 만한 사실은 남서해안과 북동해안에서 겨울 아침 시정이 좋은 반면 여름 오후 시정은 북동-남서 내륙 지방에서 주로 좋다는 점이다. 여름 오후 시정은 수도권

뿐만 아니라 남동해안에서도 낮다. 결과적으로 서쪽과 동쪽 해안 모두에서 겨울 아침 시정에 비하여 여름 오후 시정이 나쁜 반면 내륙에서는 보편적으로 겨울 아침 시정에 비하여 여름 오후 시정이 좋다.

서울을 비롯한 수도권 지역에서 겨울 아침과 여름 오후 모두 시정이 나쁜 것은 인위적 오염의 영향일 가능성이 크다. 서울 수도권을 넘어 충청 내륙에서도 겨울 아침의 시정이 낮은 것은 인위적 오염의 영향과 함께 이 지역의 풍속이 낮기 때문으로 추정된다 (Ghim and Chang, 2000). 그러나 남동해안 지역에서 여름 오후의 시정이 낮은 것을 오염의 영향으로만 단언하기는 어렵다. 왜냐하면, 부산, 울산,

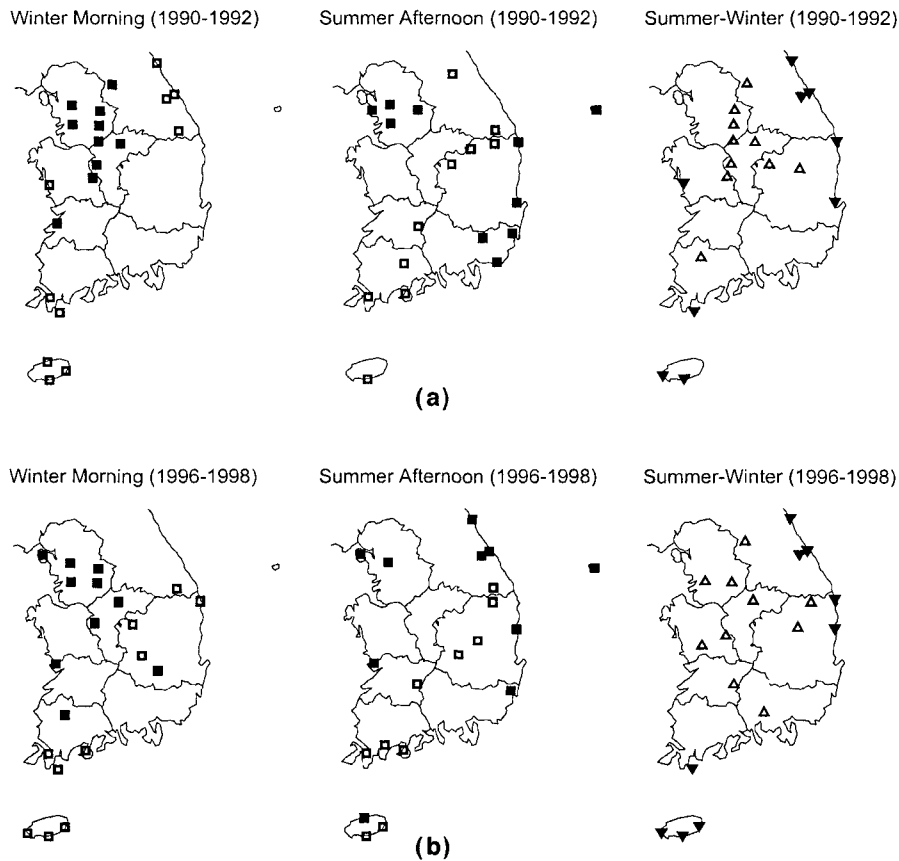


Fig. 4. Distribution of the stations at which the highest and lowest 10 values of the relevant variables occur. The variables are 3-year average visibility in the winter morning, that in the summer afternoon, and the difference between the two. Open symbols denote the locations of the station at which the highest 10 value occur, and solid symbols denote those at which the lowest 10 values occur. (a) Between 1990 and 1992. (b) Between 1996 and 1998.

포항 등 대도시와 공업지역은 그럴 수 있다 하여도 북쪽의 울릉도와 같은 대표적 청정지역 역시 여름 오후 시정이 나쁘기 때문이다. 이에 따라 그림 5에서는 울릉도부터 남동해안에 이르는 여름 오후 시정이 나쁜 지점 중 비교적 청정한 울릉도, 울진과 인위적 오염의 영향이 예상되는 부산, 울산의 시정을 비교하였다.

그림 5를 보면 동일하게 여름 오후 시정이 나쁜 다 하여도 울릉과 울진과 같은 청정지역은 시정의 일변화가 거의 없는 반면 부산, 울산과 같이 오염된 지역은 오후에 좋지 않은 시정이 전국적으로는 가장 나쁜 10개 지점에 포함되었다. 시정에 가장 중요한 변수 중 하나인 상대습도의 변화 역시 울릉과 울진은 일변화 폭이 작은 반면 같은 해안지방임에도 부산과 울산은 변화 폭이 비교적 크다. 결국 울릉과

울진에서 여름철 오후 시정이 낮은 것은 오후가 되어 기온이 올라가도 높은 수준의 상대습도가 유지되기 때문으로 해석된다. 즉, 여름철 오후 해풍과 함께 바다로부터 수분이 유입되면서 상대습도가 그리 떨어지지 않고 이로 인하여 시정이 낮아진다는 것이다.

울릉과 울진의 아침 시정이 높은 것은 이들 지역이 1차오염의 영향이 작은 청정지역임을 다시 한번 확인시켜 주며, 역으로 오염지역의 아침 시정 저하가 주로 1차 오염물질 때문임을 입증하는 것으로 볼 수도 있다. 부산과 울산의 아침 시정은 1차오염의 영향으로 서울에 버금가게 낮다. 부산과 울산 역시 오후에는 바다로부터 수분이 유입되나 각각 도시화와 공업화로 상대적으로 기온이 높아 상대습도가 떨어지고 이에 따라 시정이 높아지나 전국적으로는 다른 지역에 비하여 낮은 수준이다.

그림 4(b)에서는 1990년대 초반 명확하였던 지역적 특성이 완화된 것을 볼 수 있다. 그럼에도 해안과 내륙, 동쪽과 서쪽을 구분지을 수 있었던 지역 특성이 상당 부분 남아있다. 1990년대 후반에도 겨울 아침 시정은 서쪽 지역이, 여름 오후 시정은 해안지방이 여전히 나쁘다.

5. 권역별 특성

그림 2부터 그림 4까지 겨울 아침과 여름 오후를 비교하며 우리나라의 시정 변화를 살펴보았다. 겨울 아침 시정의 감소는 1차오염의 영향이, 청정 해안의 여름 오후 시정의 감소에는 해풍에 의한 습한 공기의 영향이 크다. 그림 6에서는 1990년대 시정의 증가와 감소가 가장 컸던 10개 지점과 1990년대 후반 평균 시정이 가장 좋은 10개 지점과 나쁜 10개 지점을 조사하였다.

그림 6은 북쪽과 북동쪽, 그리고 남쪽의 일부 지점에서 시정 감소가 큼을 보여주고 있다. 이들은 모두 1990년대 초반 청정지역들이었으며 그림 6의 시정 감소에도 불구하고 1990년대 후반 대부분이 여전히 우리나라에서 가장 청정한 지역들이다. 그러나 이 때 청정은 인위적 오염의 영향이 작음을 의미하며 좋은 시정과는 차이가 있다. 예를 들어 국가배경농도 측정소가 위치한 울릉도는 대기질 측면에서

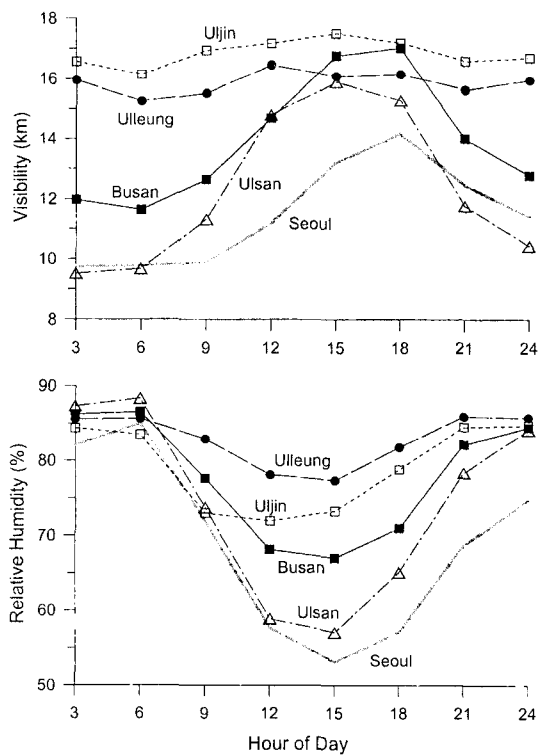


Fig. 5. Diurnal variations in visibility and relative humidity at four stations in the southeastern coast where the visibility was among the lowest in summer in comparison with those in Seoul during 1990-1992.

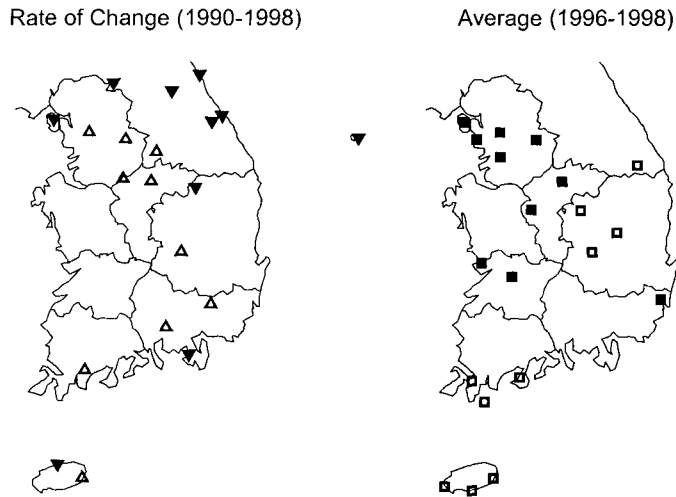


Fig. 6. Distribution of the stations at which the rate of change is the highest and the lowest and at which the visibility is the highest and the lowest. The rate of change was calculated for 1990-1998, and the visibility was calculated for 1996-1998. Ten stations are given in each case. Symbols have the same interpretation as those in Fig. 4.

우리나라에서 가장 청정한 지역의 하나이나(환경부와 국립환경연구원, 2001) 여름철 오후에는(바다의 영향으로) 시정이 가장 나쁜 지역의 하나이다. 이에 따라 그림 6에 의하면 1990년대 후반 시정은 남서해안과 남동부 내륙에서 가장 좋다. 시정 증가가 가장 큰 지점은 서울을 비롯한 내륙 지방이다. 이는 주로 이들 지점에서 아침 시정이 나쁜 반면(그림 4) 1990년대 아침 시정이 나뻐던 많은 지점에서 아침 시정이 크게 개선되었기 때문이다(그림 3). 그러나 그림 2에서 이미 보았던 것과 같이 이와 같은 시정 증가에도 불구하고 서울과 인근 지역은 1990년대 후반 여전히 시정이 가장 나쁜 지점들이다.

그림 4, 6에 나타난 우리나라 시정의 공간 분포는 해안과 내륙, 동쪽과 서쪽 등 지역에 따라 다르다. 지역별 특성을 보다 상세히 살펴보기 위하여 그림 7과 같이 각기 특징적인 6개 그룹을 설정하였다. 북서쪽부터 시계바늘 반대 방향으로, (G)는 서울, 수도권부터 동쪽으로 한강의 상류 지역을 포함하며, (W)는 서해안, (S)는 남서해안, (J)는 제주도, (E)는 동해안을 지칭한다. (M)은 서울을 비롯한 6대 광역시로 도시권역의 특성을 대표한다.

그림 8은 6개 그룹의 지난 20년간 시정 변화이다. 시정 감소는 1980년대 가장 시정이 좋았던 제주

도에서 가장 심각하였지만, 1990년대에는 감소 추세가 크게 완화되었다. 남서해안의 시정 변화는, 폭은 작으나 전체적 모습은 제주도와 유사하다. 1980년대 동해안의 시정은 남서해안과 유사하였으나 남서해안과 달리 1990년대에도 감소가 지속되었다. 이에 따라 (E) 그룹 내 3개 지점이 그림 6에서 1990년대 시정 감소가 가장 큰 10개 지점에 포함되었다. 서울, 수도권의 (G) 그룹은 북서쪽에 위치한데 비하여 대도시들인 (M) 그룹은 전국에 산재해 있음에도 두 그룹의 변화 모습은 거의 같다. 두 그룹의 시정 모두 1980년대에는 감소, 1990년대에는 증가하고 있으나 다른 그룹에 비하여 변화 폭이 작다.

서해안의 시정은 남서해안, 동해안 등 청정한 해안 지역과 오염된 도시 지역 사이에서 중간 정도이나 도시 지역에 가깝다. 조사 기간의 마지막 연도인 1998년에는, 차이는 미세하나 서울, 수도권 (G) 그룹의 시정이 가장 좋고, 대도시의 (M), 서해안의 (W)가 뒤를 잇고 있다. 이와 같은 순서는 1980년대 초 (W), (M), (G)의 순서와 정반대인데, 서울, 수도권과 대도시들은 그동안 대기환경정책의 결과로 시정이 점차 개선되고 있는 반면 오염원에 인접한 서해안과 같은 지역은 아직 오염이 진행되거나 개선이 지연되면서 나타난 현상으로 해석할 수 있다.

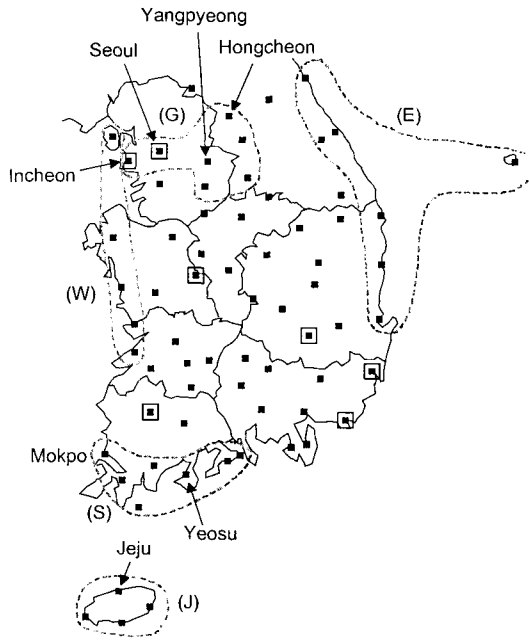


Fig. 7. Grouping the stations. Six groups were defined including group (M) which signifies the group of the stations in major metropolitan areas denoted by open rectangles. The other five groups are (G), the greater Seoul area; (W), the western coast; (S), the southwestern coast; (J) Jeju Island; and (E) the eastern coast.

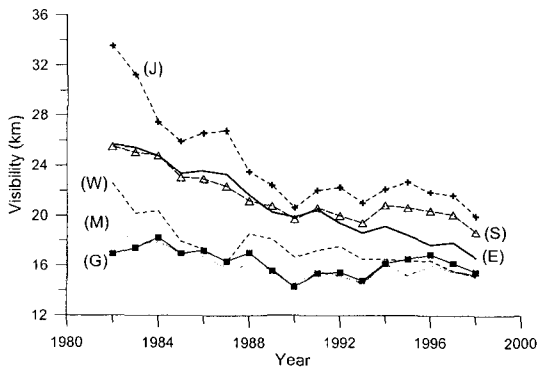


Fig. 8. Variations of the visibility in each group shown in Fig. 7.

6. 국지 변화

그림 8에서 언급한 바와 같이 제주도는 1980년대

시정 감소가 매우 급격하였으나 1990년대에는 감소 추세가 많이 완화되었고, 그럼에도 여전히 다른 그룹에 비하여 시정이 가장 좋은 지역이다. 그러나 그림 6을 보면 제주시는 1990년대 시정 감소가 가장 큰 10개 지점의 하나이며, 1990년대 후반 다른 3지점과 달리 가장 시정이 좋은 10개 지점에도 포함되지 못하였다. 그림 9에서는 제주도 등 4개 그룹에 대하여 제주와 같이 지역 특성과 구분되는 특정 지점의 시정 변화를 살펴보았다.

(M) 그룹의 7개 도시 중 서울의 시정이 가장 낮다. 인천의 시정이 서울 다음으로 낮으며 변화 모습은 서울과 유사하여 1980년대 비슷한 수준을 유지하다 1990년대 증가하고 있다. 그러나 서울과 인천을 제외한 나머지 지점의 시정은 지난 20년간 전반적으로 감소 추세이며 1990년대 후반 약간의 증가를 알아볼 수 있을 정도이다. 이와 같이 볼 때 그림 8 등에서 (M) 그룹의 시정이 1990년대 대체로 증가한 것은 서울, 인천의 증가 추세 때문이다.

서울, 인천은 또한 서울, 수도권의 (G) 그룹에도 포함된다. (G) 그룹의 7개 지점 중 양평과 홍천의 변화가 주목할 만하다. 그림 9를 보면, 양평의 시정은 1980년대 말 서울과 유사한 수준으로 급격히 낮아졌다. 이는 당시 서울의 팽창에 따라 교통량이 늘어난 때문으로 추정되며, 실제 이후 양평의 변화는 서울과 거의 같다. 홍천은 (G) 그룹 중에서도 북동쪽에 위치하여 그림 6과 8에서 지난 20년간 시정 감소가 컸던 북동부의 청정 지역에 가깝다. 하지만 그림 9의 홍천은 대부분의 시정 감소가 1980년대 일어났으며 1990년대에는 자신과 서울 등을 제외한 나머지 지점의 평균 변화와 비슷하다.

그림 4, 6 등을 보면 남서해안은 우리나라에서 가장 시정이 좋은 지역이었으며, 1980년대에는 시정이 저하되었으나 1990년대에는 시정 저하가 지속된 동해안과 달리 제주도와 함께 좋은 시정을 유지하고 있다. 그림 9의 여수와 목포 시정은 1980년대 초에는 여타 지역의 평균보다 높았으나 시정 저하가 계속되어 목포는 1980년대 초반, 여수는 1990년대 후반 이후 평균보다 낮아졌다. 목포는 대도시는 아니나 (S) 그룹 내에서는 전형적인 도시 지역이다. 여수는 대규모 석유화학단지를 포함하며, 1990년대 중반까지는 오존의 평균 농도만이 높았으나 1990년대 후반에는 고농도 발생도 빈번한데, 차량 증가가 주

요 원인으로 추정되고 있다(김영성, 2000). 전원지역인 다른 지점들과 구별되는 이들 지점의 이와 같은 특성들로 인하여 시정 변화 역시 차이를 보이는 것으로 해석된다.

유사한 현상은 제주도에에서도 발견할 수 있다. 제

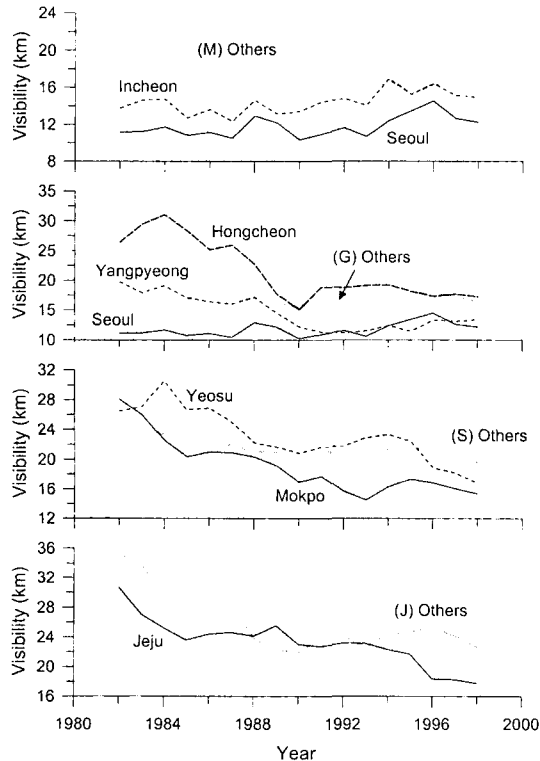


Fig. 9. Distinct variations at several stations in comparison with the variations of the remaining others for Groups (M), (G), (S) and (J). See Fig. 7 for grouping.

주시는 제주도에에서 가장 큰 도시이다. 1990년대 후반 5년간 제주도에에서는 차량등록 대수가 약 40% 증가하였고, 대부분 차량 이용은 제주시에 집중되어 있다(제주도, 2000). 이에 따라 제주시의 시정은 1990년대 후반 급격히 감소하였고, 그림 6에서 볼 수 있는 것과 같이 그 속도는 전국에서 가장 큰 것 중의 하나였다.

7. 검토 및 결론

우리나라의 시정 연구는 서론에서 언급한, 1990년대 중반, 시정장애 원인 분석에 대한 백남준 등(1994a, b), 한진석 등(1996)과, 시정 변화추이 분석에 대한 박세욱 등(1994), 오현선과 윤순창(1996) 이후 뚜렷한 연구결과가 드물다. 윤순창과 이강웅(1998)이 1995년 가을 서울대학교 구내 측정을 토대로 시정이 나쁠 때 질산염의 증가가 특히 두드러짐을 보고한 것이 눈에 띄는 정도이다.

지난 수년간 시정의 가장 큰 이슈 중의 하나는 서울, 수도권 지역의 오후 시정 악화였다. 아침의 시정 장애가 오후까지 지속되는 경우가 빈번하고 여름철 고농도 오존 발생이 사회 현안이 되면서 광화학 스모그가 여름철 오후 시정 장애의 주요 원인으로 자주 거론되고 있다. 1990년 중반 이후 중국으로부터 미세먼자 장거리 이동에 대한 연구가 진행되면서(이종훈 등, 1997a, b), 이 역시 어떠한 형태로든 시정 장애에 기여할 것임을 쉽게 예상할 수 있다.

본 연구에서 다시 한번 확인된 중요한 사실은 1990년대 중반 이후 뚜렷한 서울, 인천 등 서울, 수도권 핵심 지역의 시정 개선이다. 표 1은 그림 6의

Table 1. Average visibility during 1996-1998 and average rate of change during 1990-1998 by groups of stations shown in Fig. 6.

Group	Average (1996-1998, km)			Average rate of change (1990-1998, km/year)		
	Average	Winter morning	Summer afternoon	Average	Winter morning	Summer afternoon
(M) Metropolitan areas	15.6	15.2	17.5	0.08	0.28	0.04
(G) Greater Seoul area	16.2	15.6	19.1	0.20	0.62	0.21
(W) Western coast	15.7	15.5	17.5	-0.23	-0.16	-0.35
(S) Southwestern coast	19.7	19.6	21.4	-0.06	-0.05	-0.04
(J) Jeju Island	21.2	22.4	19.7	-0.05	-0.02	-0.01
(E) Eastern coast	17.4	19.4	15.3	-0.41	-0.35	-0.37

권역별 1990년대 후반 평균 시정과 1990년대 평균 시정 변화이다. 그림 2에서는 1996년 이후 변화 경향이 바뀌어 추이를 짐작하기 쉽지 않으나 통계로 살펴본 1990년대 서울을 비롯한 수도권 지역의 시정은 겨울 아침만큼은 아니나 여름 오후에도 좋아지고 있다. 그러나 그림 9에 의하면 다른 대도시에서는 아직 이와 같은 경향이 뚜렷하지 않으며, 이에 따라 대도시 그룹의 시정 개선 효과는 서울, 수도권만큼 크지 않다.

광화학 스모그의 지표는 여름철 오존이다. 1990년대 전반에는 주로 서울, 수도권에서만 고농도 오존이 발생하였으나 1990년대 후반 서울, 수도권의 오존은 큰 변화가 없는 반면 여타 지역에서는 고농도 오존 발생 증가가 뚜렷하였다(김영성, 2000). 오존에 관한 한 서울, 수도권은 1990년대 내내 우리나라에서 가장 오염이 심하였고 확산의 중심이었다. 그러나 1990년대 서울, 수도권의 시정은 1996년 이후의 변화에도 불구하고 표 1에서 볼 수 있는 것과 같이 악화와 개선 중에서 선택한다면 개선 쪽이다. 최소한 오존 등 광화학 오염과 추이가 같지는 않다. 뿐만 아니라 서울, 수도권을 비롯한 대부분 지역에서 여전히 1차오염의 영향이 큰 겨울 아침의 시정이 가장 나쁘다. 일부 청정 해안에서 여름 오후 시정이 겨울 아침 시정보다 나쁘나 이는 여름철 오후 바다로부터 수분이 유입되면서 상대습도가 높기 때문이다.

1990년대 서울, 수도권과 대도시 지역에서 겨울 아침 시정이 좋아지고 있다고 하여도 지난 20년간 청정 지역의 시정 저하가 뚜렷한 것은 교통량 증가 등으로 인하여 1차오염이 확산된 때문으로 해석된다. 겨울 아침 시정이 서쪽 내륙에서 유독 나쁘고(그림 4), 서해안의 시정이 다른 해안보다도 전반적으로 나쁜 것은(그림 8, 표 1), 우리나라 서쪽 지역의 풍속이 동쪽보다 낮아 1차오염에 취약하기 때문으로 추정되고 있다. 그럼에도 만일 중국으로부터 오염물질 이동의 영향이 있다면 우리나라 동쪽 지역보다는 서쪽이 크고, 오염물질 배출이 많은 도시 지역보다는 청정지역이 클 것이라는 점에서 오염물질 장거리 이동의 영향의 가능성은 여전히 있다.

또한 그림 3은 1990년대 우리나라 여름철 오후 시정이 전반적으로 저하되었음을 보여주고 있다. 오후에는 혼합도가 높아 1차오염의 영향이 작으므로

오후의 시정 악화는 해안과 같이 특수한 경우가 아니라면 광화학 반응의 영향을 배제할 수 없다. 이와 같은 경우 (1) 환경부의 대기오염 측정망이 주로 도시 지역에 집중되어 있는데 비하여 기상청의 시정 관측은 전국에 고루 분포되어 도시 외 지역의 변화 경향을 관찰할 수 있었고, (2) 도시 지역의 시정이 주로 1차오염에 지배되고 있는데 반하여 도시 외 지역에서는 도시지역 1차오염 확산의 영향과 함께 여름철 오후에는 광화학 반응의 효과가 나타난 것이라는 가설을 생각할 수 있다.

표 1의 평균 추이에도 불구하고 그림 2와 그림 9 등에서 1996년 이후 서울의 겨울 아침과 평균 시정이 감소하고 있는 것도 유의할 필요가 있다. 이와 같은 경향은 본 논문에 제시하지는 않았으나 유사한 모습이 2000년까지도 이어지고 있다는 점에서 더욱 그러하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업(과제번호 2000-N-NL-01-C-184)과 한국과학기술연구원 자체 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고 문헌

- 김영성(2000) 우리나라의 오존농도 변화 추이와 주요 인자, 한국대기환경학회지, 16(6), 607-623.
- 김유근, 손건태, 박진, 배주현, 김영주, 이수현, 손영실(1998) 부산지역 시정의 장기변동경향 및 시계열 분석, 한국기상학회 가을학술발표회.
- 박세욱, 백남준, 김용표, 문길주, 김영성(1994) 1980-1993년 기간의 서울의 시정변화 추이 분석, 한국대기보전학회지, 10(3), 203-208.
- 백남준, 김태오, 김성주, 김용표, 문길주(1994a) 서울시의 1993년 가을철 시정 및 입자 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(1), 32-40.
- 백남준, 이성준, 김용표, 문길주, 조영일(1994b) 서울시의 1993년 가을 스모그 특성 모사, 한국대기보전학회지, 10(2), 137-145.
- 오현선, 윤순창(1996) 서울지역의 시정악화에 영향을 미치는 대기오염 및 기상상의 특성, 한국기상학회

- 지, 32, 131-138.
- 윤순창, 이강용 (1998) 서울지역의 시정장애에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(3), 229-235.
- 이중훈, 백남준, 심상규, 김용표 (1997a) 제주도 고산에서의 1994~1995년 여름 입자상 탄소농도 측정, 한국대기보전학회지, 13(3), 179-191.
- 이중훈, 김용표, 문길주, 김희강, 정용승, 이종범 (1997b) 우리나라 청정지역에서 측정된 PM_{2.5} 입자의 특성, 한국대기보전학회지, 13(6), 439-450.
- 제주도 (2000) 2000 통계연보, URL <http://www.jeju.go.kr/~cheju/data/> (2002년 1월 접속).
- 한진석, 김병곤, 김신도 (1996) 1994년 수도권 지역에서의 시정과 미세 입자상물질 화학조성과의 관계 해석, 한국대기보전학회지, 12(4), 377-387.
- 환경부, 국립환경연구원 (2001) 대기환경연보(2000), 행정간행물 등록번호 11-1480000-000532-10, 과천.
- Andrews, E., P. Saxena, S. Musarra, L.M. Hildemann, P. Koutrakis, P.H. McMurry, I. Olmez, and W.H. White (2000) Concentration and composition of atmospheric aerosols from the 1995 SEAVS experiment and a review of the closure between chemical and gravimetric measurements, J. Air Water Manage. Assoc., 50, 648-664.
- Demerjian, K.L. (2000) A review of national monitoring networks in North America, Atmospheric Environment, 34, 1861-1884.
- Drewnick, F., J.J. Schwab, O.V. Hogrefe, and K.L. Demerjian (2001) Preliminary results of the measurement of ambient aerosol composition during the PMTACS-NY 2001 using an Aerosol Mass Spectrometer, Eos. Trans. AGU, 82(47), Fall Meet. Suppl., Abstract A11B-05.
- 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.
- Ghim, Y.S., J.Y. Kim, S.-G. Shim, and K.-C. Moon (2002) A commentary on air pollution monitoring programs in Korea, J. Korean Soc. Atmos. Env., 18E, 21-28.
- 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.
- McMurry, P.H. (2000) A review of atmospheric aerosol measurements, Atmospheric Environment, 34, 1959-1999.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, Wiley-Interscience, New York, NY.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1979) Protecting Visibility: An EPA Report to Congress, Research Triangle Park, NC, Chapter 3.
- WHO/UNEP (World Health Organization/United Nations Environment Programme) (1994) Air pollution in the world's megacities, Environment, 36, 4-13, 25-37.