

연구논문

## 서울, 강화, 서산, 광주, 제주지역에서의 장기간 대기오염 및 시정 변화경향에 대한 연구 : 1990년 1월~2001년 7월

한진석 · 문광주 · 공부주 · 홍유덕 · 이석조 · 전영신\*

인천시 서구 경서동 종합환경연구단지 내 국립환경연구원 대기화학과, 기상청 기상연구소\*

(2004년 6월 30일 접수, 2004년 8월 12일 승인)

### Long-term Trends of Visibility and Air Quality in Seoul, Ganghwa, Susan, Gwangju, Jeju

J. S. Han · K. J. Moon · B. J. Kong · Y. D. Hong · S. J. Lee · J. Y. Shin\*

Dept. of Atmospheric Chemistry, National Institute of Environmental Research,  
Meteorological Research Institute, Korea Meteorological Administration\*

(Manuscript received 30 June 2004; accepted 12 August 2004)

### Abstract

Visibility impairment was known as an indicator of the increased air pollution. In many previous studies, it is known that both directly emitted fine particles mainly from vehicles and secondary aerosols from photochemical reactions could contribute to this visibility impairment in addition to the meteorological condition. Furthermore, the visibility showed different change patterns according to the geographical condition.

In order to research into the influence of these factors on visibility, this study analyzed the visibility at 15:00, observed from 1990 to 2001 in Seoul, Ganghwa, Susan, Gwangju, Jeju. As a result, the visibility was increased in Seoul except the rainfall period, but in Susan, Gwangju, Jeju, it decreased with the relative humidity (RH). Especially, in Seoul, the number of low visibility days was larger than other sites and variations of the visibility were sensitive to the concentration of air pollutants, such as TSP, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>. The visibility impairment was mainly observed in meteorological condition of RH<50% and relatively stationary front. Therefore it is inferred that photochemical smog could lead to the low visibility in Seoul. On the other hands,

in Ganghwa and Susan, when RH was 60~70%, the low visibility observed under the influence of the transports of air pollutants from nearby cities as well as humid air mass from coastal region. And in Jeju, sea fog and humid air mass caused the visibility impairment when the RH was larger than 80%.

Finally, during the observational period, some cases of low visibility phenomena were simultaneously observed in the vast region including Seoul, Susan, Ganghwa. It not only includes the visibility aggravation by Asian Dust, but also could be caused by the movement and diffusion of flying dust or secondary aerosols. Moreover, the result shows that these phenomena could be mainly influenced by meteorological factors covering the wide regions.

Key words : Visibility impairment, Primary pollutants, Meteorological condition, Long-term trends, Vast regional visibility aggravation

## I. 서 론

시정장애는 대기오염도를 체감할 수 있는 대표적인 현상이므로, 일반인들에게 대기오염 증가의 지표로 인식되고 있다. 그러나 시정은 기상 조건(윤순창 등, 1996) 뿐만 아니라, 각종 기체상 및 입자상 대기오염물질과 같은 자연적, 인위적 요인들(이종훈 등, 1995; 최정숙 등, 1993; 정용승 등, 1992)의 복합적 작용으로 나타나는 현상으로 알려져 있고(백남준 등, 1994a; 국립환경연구원, 1997), 또한 기존 연구결과에서 이러한 요인들 외에도 지형적 조건에 따라 시정변화경향이 다르게 나타나고 있음을 확인한 바 있다(김해구 등, 1990; 김영성 등, 2002). 이와 같이 매우 다양한 요인들이 총체적으로 결합되어 나타나는 시정에 대한 각 인자들의 기여도를 판단하기 위해서는, 이러한 여러 인자들이 각각 시정에 영향을 미치는 메카니즘을 정확히 알고, 그 영향을 배제하거나 최소화하여 변화 경향을 살펴볼 필요가 있다. 시정에 영향을 미치는 주요 인자로는 입자와 기체의 산란 및 흡수계수에 영향을 미치는 NO<sub>2</sub> 농도와 입자상 물질 내 탄소성분의 농도, 입자상 물질의 입경분포(김신도, 1992), 광화학 반응으로 2 $\mu$ m 이하의 미세한 이차 에어로솔을 생성하는 1차 가스상 대기오염물질의 농도(최정숙 등, 1993;

Sequeira *et al.* 1998)와 같은 대기질 관련 인자들과, 입자의 성장을 유발하여 입자 산란에 영향을 미치는 상대습도(이종훈 등 1995), 광화학 반응을 유발할 수 있는 기온조건(최정숙 등, 1993), 대기 중 오염물질의 농도에 영향을 미칠 수 있는 혼합고(박세욱, 1994)와 같은 기상 관련 인자들이 알려져 있다.

이러한 인자들이 시정에 미치는 영향에 대한 연구는 90년대 초반까지 꾸준히 수행되어 왔다. 그러나 기존의 연구들은 주로 특정 지역에서 다양한 인자들 중 일부에 대해서만 시정과의 상관성을 살펴보았기 때문에, 보다 종합적이고 총체적인 시정감소 원인을 파악하기에는 미흡하였다.

본 연구에서는 90년대 전반에 걸친 장기간 시정변화 경향을 파악하기 위해 우선 강우와 안개, 습도와 같은 기상인자가 시정에 영향을 미치는 정도를 파악하였다. 그리고 이러한 기상인자의 영향을 최소화한 시정의 경년변화로부터, 대기오염도와와의 상관관계를 살펴보았다. 이때 도시지역과 청정지역을 모두 대표할 수 있도록 선정된 서울, 강화, 서산, 광주, 제주 다섯 지역을 선정하여, 이를 지역에 대한 개별적 시정변화 특성뿐만 아니라, 지역간 시정변화경향을 비교하여 광역적 시정변화 거동 또한 파악하고자 하였다.

## II. 연구 방법

본 연구에서는 1990년 1월부터 2001년 7월까지의 기상청 기상 관측소의 목측 시정자료를 분석하였다. 목측은 오전 3시부터 3시간 간격으로 하루 8회 관측되었다. 단, 강화의 경우, 1997년 이전에는 오전 3시부터 6시간 간격으로 하루 4회 관측된 결과를 사용하였다. 대기오염도 자료는 국가 대기질 측정망의 시간평균 자료를 사용하였다. 이때 기상 관측소에 인접해 있고, 대기오염도 측정자료가 많은 측정망 지점의 자료를 사용하였는데, 강화, 서산, 제주의 경우 각 지역의 대기질 측정망이 설치된 97년, 95년, 94년 이후의 대기질 측정자료만을 분석하였다.

시정과 대기오염도의 시간변화 뿐만 아니라 공간분포를 파악하기 위해, 기상 및 대기오염도 관측지점으로 도시지역인 서울과 광주를 비롯하여

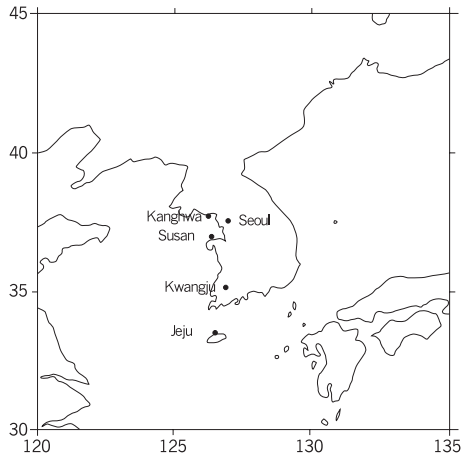


Figure 1. Location of the observatories used in this study

Table 1. Historical changes of the number of observation

Period	Observation Hour	Visibility(km)
1982~1997*	3, 9, 15, 21 hr	continual value
1982~present or	3, 6, 9, 12, 15,	continual value
1997~present*	18, 21, 24 hr	

\* : Ganghwa

비교적 청정한 지역인 서산, 강화, 제주의 다섯 지점을 선정하였다. 이때 한반도의 지형적 특성상 동부와 서부의 기상조건이 크게 달라, 시정에 차이를 나타낼 것을 고려하여(김영성 등, 2002; 이해구 등, 1990), 다섯지역 모두 한반도 서부의 비슷한 경도 상에 위치하도록 선정하였다. 특히, 서울에 인접한 비교적 청정한 지역으로 강화와 서산을 선정하여, 서울의 도시오염원이 이들 인접지역의 시정에 미치는 영향을 파악하도록 하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 시정과 상대습도의 시계열 분석

시정에 영향을 미치는 인자들은 시정거리를 계산하는 Koschmeider(1924) 식으로 알 수 있다.

$$\text{시정거리(VR)} = 3.912/b_{\text{ext}}$$

$$b_{\text{ext}} = b_{\text{sg}} + b_{\text{ag}} + b_{\text{sp}} + b_{\text{ap}}$$

여기서  $b_{\text{ext}}$ 는 소멸계수이고,  $b_{\text{sg}}$ 와  $b_{\text{ag}}$ 는 각각 기체산란 및 흡수계수를 의미하며,  $b_{\text{sp}}$ 와  $b_{\text{ap}}$ 는 각각 입자산란 및 흡수계수를 나타낸다.  $b_{\text{sg}}$ 는 일반적으로 Rayleigh 산란계수인  $0.120 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ 이 사용되고,  $b_{\text{ag}}$ 는 Hodgkinson(1966) 이론에 따라  $\text{NO}_2$  가스의 농도로부터  $3.3[\text{NO}_2]_{\text{ppm}} \times 10^{-4}$ 으로 계산된다. 이때  $b_{\text{sp}}$ 는 입자의 입경분포와 밀접한 관련이 있어 상대습도에 따라 민감하게 변화하고,  $b_{\text{ap}}$ 는 입자 내 원소탄소성분과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(국립환경연구원, 1994; 한진석 등, 1996; 백남준 등, 1994b). 이와 같은 시정거리의 정의로부터 상대습도가 시정에 영향을 미치는 주요 인자임을 알 수 있으므로, 시정의 변화와 함께 습도의 변화경향을 고려하고, 그 영향 정도를 파악할 필요가 있다.

우선 각 지역별 시정거리와 상대습도의 장기간 변화경향을 파악하기 위해 전체 측정자료를 이용한 이들의 월평균 시계열을 살펴보았다. 그 결과

전체 측정기간에 대한 평균 시정은 서울이 11.2km, 강화 14.7km, 서산 16.6km, 광주 15.3km, 제주 18.5km 순으로 나타났다. 이때 서울의 경우, Figure 2에서와 같이 시정은 연간 4.31%씩 증가한 반면, 상대습도는 연간 0.43%씩 감소하는 것으로 나타나, 습도감소에 따른 시정개선이 일부 발생한 것으로 나타났다. 기존의 연구에서 김해구(1990)는 1973년부터 1986년까지의 서울의 저시정 발생빈도의 경년변화에서 저시정 빈도가 꾸준히 증가하여 86년경 총 저시정 발생빈도는 73년의 약 1.7배로 나타났음을 확인했고, 박세욱(1994)에 의해 수행된 1908년부터 1993년까지의 서울지역 시정에 대한 연구에서는 서울의 연평균 시정은 1980년대 중반부터 10~12km로 악화되었고, 이러한 시정감소추세는 1990년대에 들어서는 더 이상

감소하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과들을 고려했을때 현재 서울은 세계적인 대도시인 뉴욕, 동경에서와 같은 시정개선 경향을 나타내고 있으며, 이러한 시정개선의 원인으로는 1990년부터 서울시에서 수행된 대규모 공장시설의 이전과 배출허용기준의 강화, 자동차연료의 원천정화와, 가정연료의 LNG 전환 등 서울지역 내 대기오염 감소를 위한 노력에 의한 것으로 추정된다(최정숙 등, 1993; 김해구 등, 1990; 백남준 등, 1996). 광주의 경우, 시정이 연간 1.42%씩 증가하였고, 상대습도는 0.47%씩 감소하여 서울과 매우 유사한 경향을 나타냈다. 강화의 경우, Figure 3에서와 같이 92년 이전과 94년 이후의 기간에서는 시정이 각각 연간 1.21%, 0.12%씩 증가하였고, 상대습도는 0.65%, 0.71%씩 감소하여, 서울과 유사

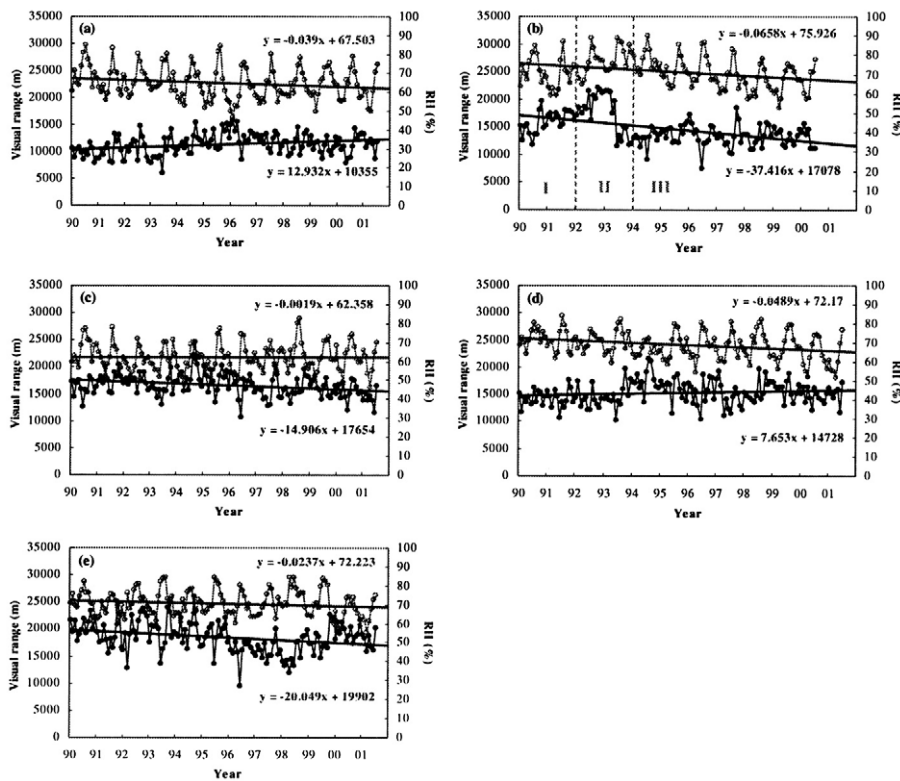


Figure 2. Time series of monthly mean visual range(filled circle) and relative humidity(open circle) ((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju)

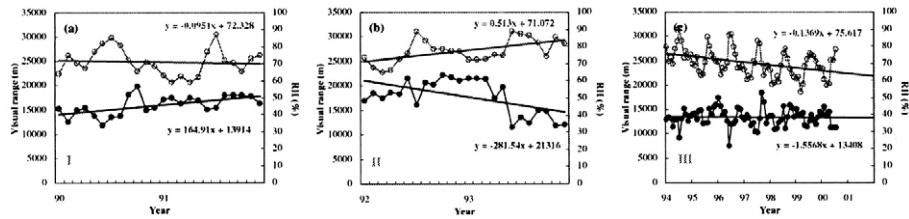


Figure 3. Partial time series of monthly mean visual range(filled circle) and relative humidity(open circle) in Ganghwa ((a) from 1990 to 1991, (b) from 1992 to 1993, (c) from 1994 to 2001)

한 변화 경향을 나타냈지만, 92년부터 94년 사이에는 시정이 연간 1.02%씩 감소하고, 상대습도는 1.24%씩 크게 증가하였다. 이러한 시정의 급격한 감소는 이 지역에서의 상대습도의 급격한 상승에 기인한 것으로 추정된다(국립환경연구원, 1994). 서산과 제주의 경우, 앞의 세 지역과는 구별되었는데, 시정이 각각 연간 0.53%, 0.58%씩 감소하였고, 이때 상대습도도 함께 0.04%, 0.29%씩 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 상대습도가 감소함에도 불구하고, 시정이 감소하고 있어, 이들 지역에서는 습도 외의 요인의 영향을 받아 시정감소가 발생하고 있음을 짐작할 수 있다.

## 2. 강우가 시정에 미치는 영향

앞에서는 전체 시정 측정자료로 부터 장기간 변화경향을 살펴보았는데, 이때 강우는 그 자체와 수반되는 높은 상대습도가 시정에 불리하게 작용할 수 있을 뿐만 아니라, 대기 중 오염물질을 세정하여 시정을 증가시키기도 하는 것으로 알려져 있다(김영성 등, 2002). 이와 같이 강우가 시정에 미치는 영향을 파악하기 위해, 강우시 측정시정을 포함하는 경우와 배제한 두 경우의 시정변화를 비교하였다. 그 결과, 강우기간을 배제했을 때 평균시정이 서울의 경우 6.3%, 강화는 5.9%, 서산 6.9%, 광주 5.2%, 제주 11.3%만큼 증가하여, 다섯지역에서 모두 5%이상의 시정증가를 나타내

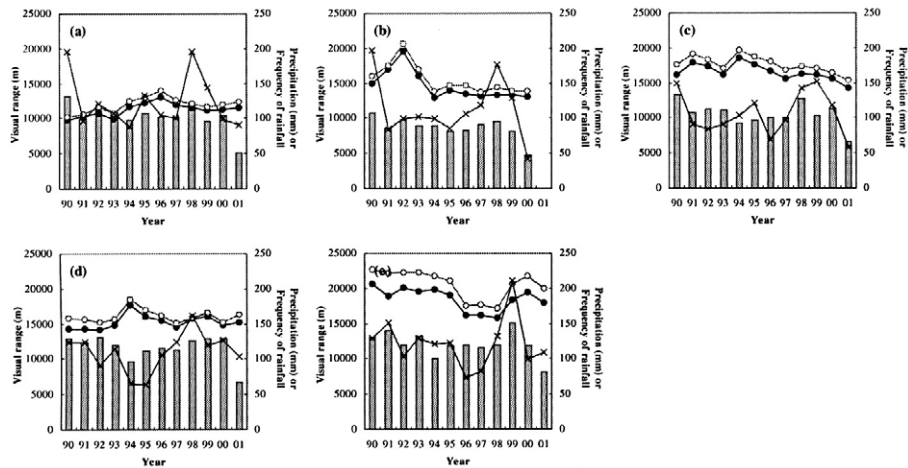


Figure 4. Annual mean visibility including rainy days(filled circle) or not(open circle), precipitation (cross) and frequency of rainfalls(filled column)((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju)

었다. 이때 다른 지역에 비해 가장 많이 시정이 증가한 제주의 경우, 강우에 의한 시정감소가 전체 시정감소의 상당부분을 차지하고 있음을 알 수 있었다. 시정과 강우량, 강우빈도의 연변화 경향에서는 대부분의 지역에서 강우량 및 강우빈도의 변화에 따라 시정이 민감하게 변화하지 않았으나, 제주의 경우에는 95년 이후에 강우량 및 강우빈도의 증가에 따라 시정이 개선되는 경향이 나타나, 강우 자체에 의한 시정감소와 함께 대기 오염물질의 세정에 의한 시정증가가 함께 나타나고 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이와 같이 강우가 미치는 영향들을 배제한 시정의 변화경향을 파악하기 위해 강우일의 시정은 분석 대상에서 제외하였다.

### 3. 습도가 시정의 일변화에 미치는 영향

안개 및 습도가 시정에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 지역별 시정과 습도, 온도의 일변화 경향을 살펴보았다. 일반적으로 시정은 오전 중에는 대기 중의 안개와 부유분진 등의 입자가 빛의 산란과 흡수현상을 일으키고, 혼합층 고도가 낮은 관계로 낮은 시정이 나타나는 반면, 오후에는 오전에 비하여 혼합층고도가 발달하여 그 지역 내의 오염물질과 부유분진의 농도가 낮아지고 상대습도가 낮아지면서 안개가 소산되어 호전된 시정을 나타내는 것으로 알려져 있다(이종범 등,

1996). 본 연구에서 시정의 일변화는 Figure 5에서와 같이 제주를 제외한 네 지역에서 15시에서 18시경에 시정거리가 최대였고, 오전 6시에서 9시 사이에 최저시정을 나타내었다. 이러한 시정의 일변화는 온도에 비례하고, 습도에 반비례하는 것이다. 단 제주의 경우, 오전 9시에 최대 시정을 나타냈는데, 이는 온도 및 습도의 일변화가 매우 적고, 해륙풍의 영향으로 오전에도 강한 바람이 부는 이 지역의 기상특성에 영향을 받은 것으로 생각된다.

이때 습도가 높고 안개가 주로 발생하는 오전 9시경과 습도가 가장 낮은 15시경에 대한 시정과 상대습도의 경년변화는 Figure 6과 같이 나타났다. 각 지역의 평균 시정의 일변화 폭은 광주 8.0km, 서산 4.0km, 강화 3.7km, 서울 2.1km, 제주 0.9km 순으로 나타났고, 평균 습도의 일변화 폭은 서산 29.4%, 광주 28.9%, 서울 23.6%, 강화 19.3%, 제주 6.8% 순으로 나타났다. 이때 서산과 광주의 경우, 15시 시정은 상당히 좋으나, 습도의 증가에 따른 입자 성장 등으로 인해 시정이 감소하는 Potential이 상당히 큰 것으로 나타났다. 서울의 경우, 이미 습도 외의 여러 다른 요인들로 인해 시정이 크게 악화된 상태이므로 상대적으로 습도의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났고, 이와는 반대로, 시정이 가장 좋은 제주의 경우, 습도 증가의 영향을 받아 시정 감소를 유발하는 원인물질들이 거의 존재하지 않기 때문에 습

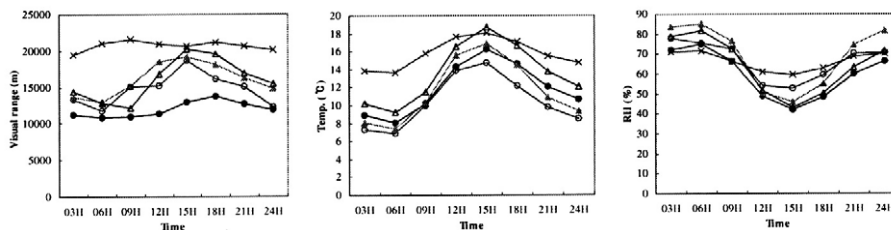


Figure 5. Mean diurnal variation of (a) visibility, (b) temperature and (c) relative humidity in Seoul(filled circle), Ganghwa(open circle), Susan(filled triangle), Gwangju(open triangle), Jeju(cross): Rainy days are excluded

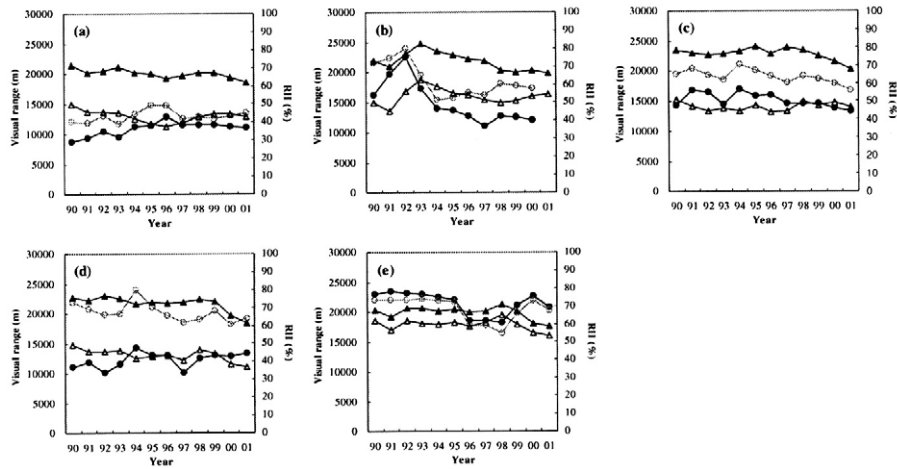


Figure 6. Annual mean visibility(circle) and relative humidity(triangle) at 9hr(filled) and 15hr(open) excluding rainy days ((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju)

도의 변화에 큰 영향을 받지 않는 것으로 보인다. 이와 같이 그 정도에 차이는 있지만 모든 지역의 시정이 습도의 영향을 받는 것으로 나타났다.

#### 4. 저시정 빈도의 장기간 변화 경향

기상조건에 의한 영향을 최소화하여 장기간 시정 변화 경향을 알아보기 위해, 강우시를 제외한 15시 시정자료를 이용하여 장기간 시계열을 Figure 7에 나타내었다. 그 결과 전체 일평균자료를 이용한 시정의 장기간 변화경향과 차이를 나타내었다. 특히 광주의 경우 전체 자료를 사용했을 때 시정이 연간 1.42%씩 증가하는 것으로 나타난 반면, 15시 측정 자료에서는 연간 0.55%씩 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 전체 일평균 자료를 사용한 경우 오전 중의 습도 감소에 따른 시정개선효과가 지배적으로 반영된 반면, 15시 자료에는 이러한 습도감소의 영향보다는 오염물질의 광화학 반응과 같은 인위적 요인들에 의한 시정 감소효과가 더 크게 반영되기 때문에 나타난 것으로 생각된다. 즉, 광주의 경우 낮시간 동안 오염물질의 광화학반응에 의한 시정감소가

현저히 나타나고 있음을 짐작할 수 있다.

각 지역에서의 시정변화 경향을 보다 자세히 살펴보기 위해, 네 개의 시정범위(5km이하, 5~10km, 10~20km, 20km이상)에 대한 발생일수의 경년변화를 Figure 8에서 살펴보았다. 서울의 경우, 시정거리가 10km 미만의 저시정 빈도수가 다섯 지역 중 가장 높게 나타났고, 강화는 92년부터 94년 사이 급격한 시정감소가 발생하여 고시정 빈도가 1/10 수준으로 감소하였고 저시정 빈도는 30회 이상으로 증가하여 꾸준히 유지되었다. 서산과 광주의 경우, 94년 이후 저시정 빈도수가 점차 증가하였고, 제주의 경우, 저시정 빈도가 20회 이상 꾸준히 나타났다. 이때 광주의 경우, Figure 2에서 강우를 포함한 전체 측정자료를 이용한 시계열 분석 시에는 시정이 증가하였으나, 기상인자의 영향을 배제한 시정의 경년변화에서는 오히려 시정이 악화되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 각 지역에서 습도가 저시정 발생에 미치는 영향 정도를 살펴보기 위해 여섯 개의 습도범위에서의 저시정 발생빈도를 조사한 결과 Figure 9와 같이 나타났다. 서울과 광주의 경우, 상대습도가 50% 미만일때 저시정 빈도가 최대로 나타나,

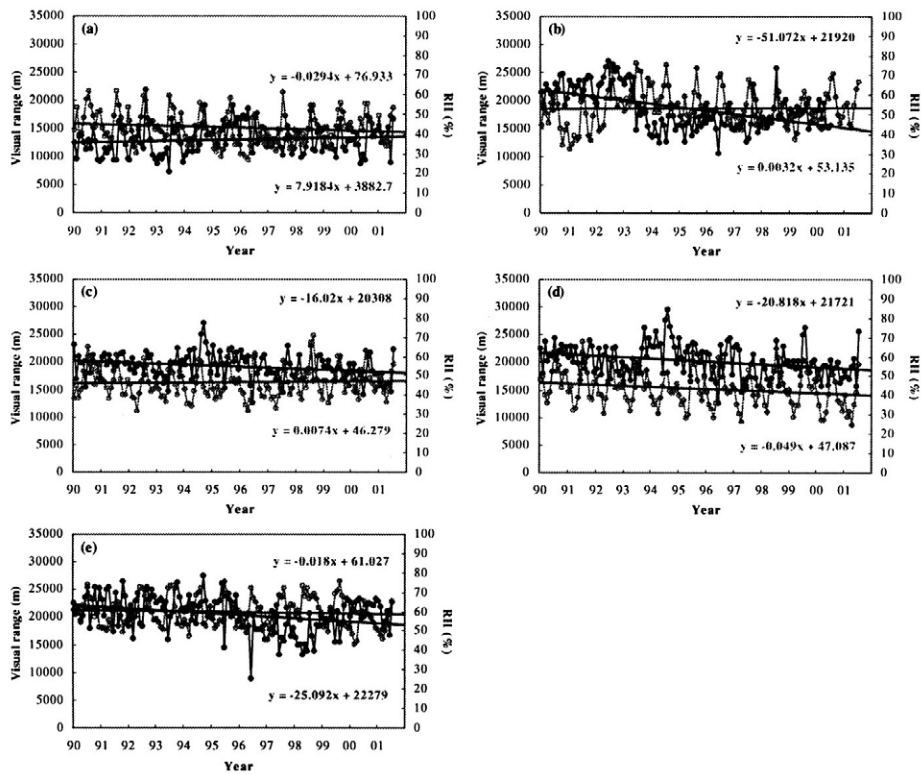


Figure 7. Time series of monthly mean value of 15hr visual range(filled circle) and relative humidity(open circle) ((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju) : Rainy days are excluded

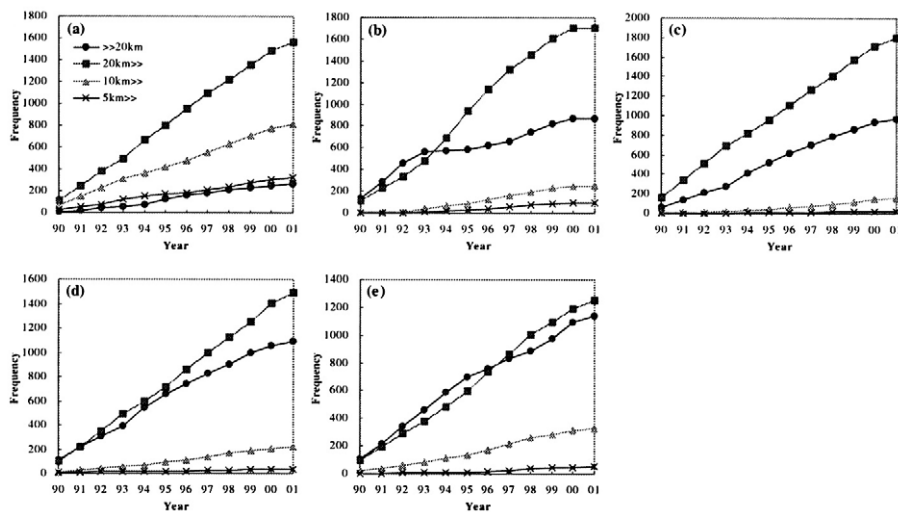


Figure 8. Accumulated annual total frequency of each visibility range using 15hr visibility ((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju) : Rainy days are excluded



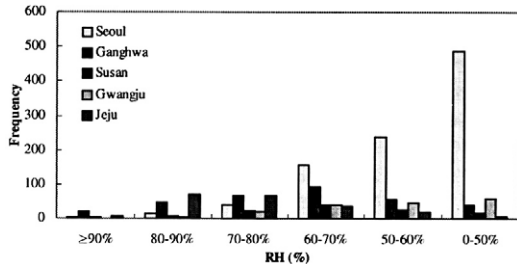


Figure 9. Total frequencies of low visibility days for each RH range using 15hr visibility : Rainy days are excluded

Table 2. Total average of wind speed within 4 ranges of visibility (m/s)

Period	Observation Hour			Visibility(km)	
<5km	2.43	2.11	2.58	2.36	2.01
5~10km	2.37	2.05	2.35	2.24	2.50
10~20km	2.55	2.16	2.15	2.22	2.76
>20km	2.44	2.23	2.20	2.31	2.68
Total Avg.	2.44	2.14	2.32	2.28	2.49

주로 대기오염물질이나 광화학 스모그에 의한 시정감소가 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 강화와 서산의 경우에는 상대습도가 60~70%일 때 저시정 빈도가 최대로 나타나, 대기 중 응결핵으로 작용하는 부유분진이나 대기오염물질이 증가가 시정감소에 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 마지막으로 제주의 경우, 80%이상의 높은 습도조건에서 저시정 빈도가 최대이므로, 해무나 연무(mist)와 같은 액적 생성(Lewis et al 2003)이 시정 감소의 주 원인으로 추정되었다. 이때 Table 2와 같이 각 시정범위에서의 평균 풍속을 살펴본 결과, 서울과 강화, 제주의 경우, 10km 미만인 저시정 범위에서 풍속이 최소로 나타나, 비교적 정체된 기상조건 하에서 저시정이 발생한 것으로 나타난 반면, 서산과 광주의 경우 시정이 5km 미만일때 풍속이 최대로 나타나, 강한 바람에 의한 대기오염물질의 이동이 시정감소에 영향을 미쳤을 것으로 추정되었다. 각 시정범위별 평균풍속의 차이는 제주와 서산에서 0.74m/s, 0.43m/s로 크게 나타나, 이 지역들에서는 풍속이 시정에 미치

는 영향이 타 지역에 비해 큰 것으로 나타났다.

## 5. 대기오염도와 저시정 빈도의 경년 및 계절변화

1차 대기오염물질들이 시정에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 이들 물질들의 농도와 10km 미만의 저시정 발생빈도의 연변화 경향을 Figure 10에 나타내었다. 그 결과, 서울의 경우, 93년부터 97년 사이에 시정이 TSP와 NO<sub>2</sub> 농도에 반비례하고, O<sub>3</sub> 농도에 비례하여 나타나, 이 시기에 국지적 오염원이 시정에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 그러나 그 외 다른 지역들에서는 이러한 1차 대기오염물질의 농도와 시정간에 뚜렷한 상관성을 나타내지 않아, 이들 지역에서는 국지적 오염원보다는 기상조건이나 장거리 이동된 이차오염물질이 시정에 더 큰 영향을 미치고 있는 것으로 추정되었다.

Figure 11에서와 같이 시정과 대기오염도의 계절별 변화 경향을 살펴보면, SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>가 높은 겨울철에 최저 시정을 나타낸 서울의 경우, 이러한 국지오염원의 영향을 받아 시정이 감소하는 것으로 보이며, TSP가 가장 높은 봄철에 최저시정을 나타낸 광주의 경우, 주로 황사 및 부유분진의 영향으로 시정이 감소하는 것으로 추정된다. 나머지 지역들은 모두 대기오염도가 가장 낮은 여름철에 최저 시정을 나타내어, 1차 대기오염물질 보다는 강우빈도나 습도와 같은 기상조건에 더 큰 영향을 받고 있음을 짐작할 수 있다(Tsai et al 1999).

## 6. 광역적 시정감소 사례 분석

지금까지는 각 지역의 시정변화 경향을 개별적으로 분석하였는데, 광역적으로 발생하는 시정감소 현상을 살펴보기 위해 전체 측정기간 중 서울, 강화, 서산 세 지역에서 동시에 10km 미만의

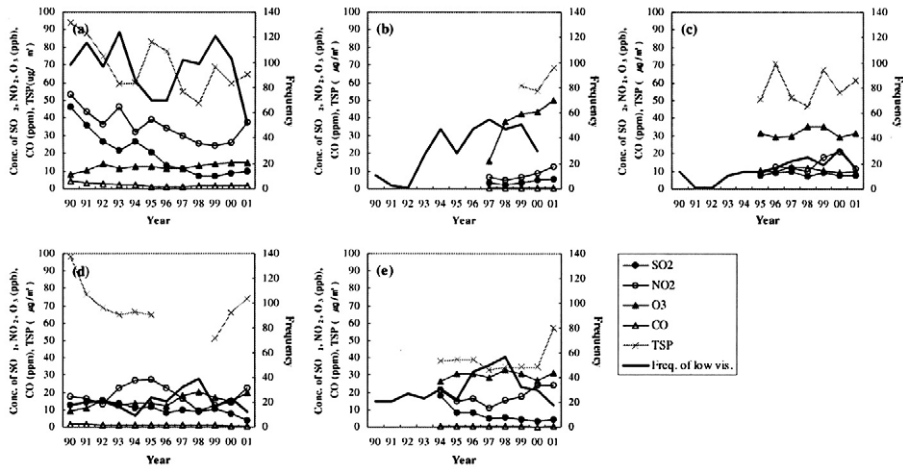


Figure 10. Annual total frequency of low visibility(<10km, 15hr) days(thick line) and the concentration of air pollutants, such as SO<sub>2</sub>(filled circle), NO<sub>2</sub>(open circle), O<sub>3</sub>(filled triangle), CO(open triangle), TSP(cross) ((a) Seoul, (b) Ganghwa, (c) Susan, (d) Gwangju, (e) Jeju) : Rainy days are excluded

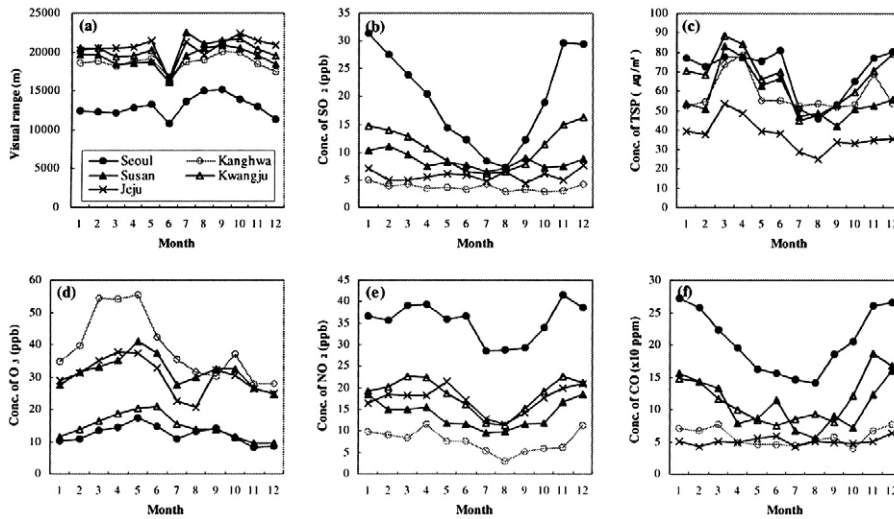


Figure 11. Monthly mean visibility and concentration of air pollutants at Seoul(filled circle), Ganghwa(open circle), Susan(filled triangle), Gwangju(open triangle), Jeju(cross) ((a) 15hr visibility, (b) SO<sub>2</sub>, (c) NO<sub>2</sub>, (d) TSP, (e) O<sub>3</sub>, (f) CO) : Rainy days are excluded

저시정(visibility)이 관측되는 사례에 대한 분석을 수행하였다. 전체 측정기간 중 년도별 광역적 시정감소 사례의 발생일수는 Table 3과 같이 나타났다. 광역적 저시정 사례는 93년 이후 꾸준히 발생하고 있

으며, 계절에 상관없이 전년에 걸쳐 발생하는 것으로 나타나, 주로 봄철에만 관찰되는 황사에 의한 시정감소와는 구분되는 것을 알 수 있다. 이러한 사례에 대해 지역간 시정 및 기상인자들의 상

Table 3. Annual frequencies of vast regional visibility aggravation days.

Frequency of episode	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	Total
Spring	-	-	-	-	2	-	1	-	5	-	3	11
Summer	-	-	-	1	-	2	1	2	-	1	2	9
Autumn	1	-	-	1	2	2	-	-	3	1	-	10
Winter	1	-	-	-	1	2	2	1	1	1	1	10
Total	2	-	-	2	5	6	4	3	9	3	6	40

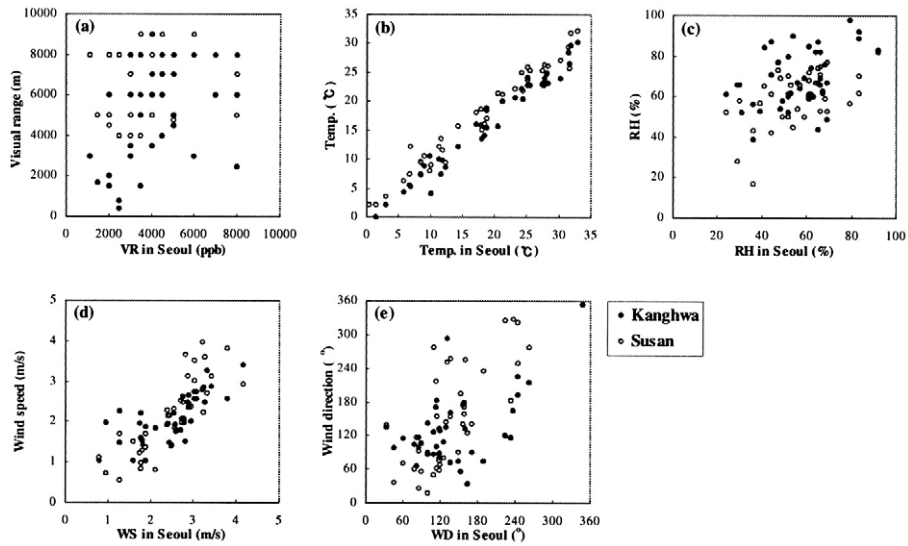


Figure 12. Correlations of visibility and meteorological factors among Seoul, Ganghwa(filled circle), and Susan(open circle) for expanded low visibility cases ((a) 15hr Visibility, (b) Temperature, (c) Relative humidity, (d) Wind speed, (e) Wind direction)

관관계를 살펴본 결과, 세 지역에서의 시정(0.48, 0.59), 상대습도(0.79, 0.77), 온도(0.91, 0.99), 풍속(0.69, 0.65) 및 풍향(0.68, 0.64)이 모두 0.48이상의 양의 상관관계를 나타내어, 이러한 현상이 주로 광역적으로 거동하는 기상인자의 영향을 받아 나타나는 것임을 짐작할 수 있었다. 또한 지역간 대기오염도의 상관관계에서는 세 지역에서의 SO<sub>2</sub>(0.00, 0.18), NO<sub>2</sub>(0.04, 0.14)의 상관성은 낮게 나타난 반면, TSP(0.40, 0.48)와 O<sub>3</sub>(0.42, 0.54)의 경우 상관계수가 0.4 이상으로 SO<sub>2</sub>나 NO<sub>2</sub>에 비해 상관성이 있는 것으로 나타나, 주로 대도시 주변에서 비산먼지나 비교적 광역적으로 발생하는 광

화학 반응의 영향으로 시정감소가 발생한 것으로 추정된다. 즉, 비교적 청정한 교외지역에서도 대도시 오염원의 영향을 받아 시정이 함께 감소하는 것으로 나타났다(Cheng *et al* 2000; Doyle *et al*, 2002). 이때 광역적 시정감소 사례 시, 세 지역에서의 대기오염성분 농도와 기상인자 변화 경향을 살펴보기 위해, 2000년 3월과 4월, 6월과 7월 동안 시정관측결과와 함께 시정에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 나타난 TSP 농도와 상대습도의 시간별 측정결과를 Figure 14와 같이 비교하였다. 그 결과 크게 세가지 유형의 광역적 저시정 발생 사례가 관찰되었다. 첫 번째 유형은 2000년

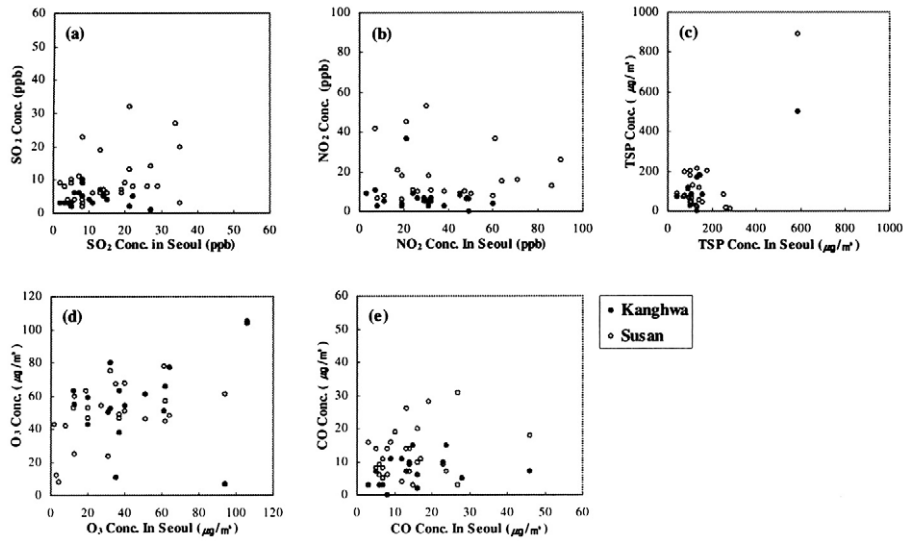


Figure 13. Correlations of air pollutants among Seoul, Ganghwa(filled circle), and Susan(open circle) for expanded low visibility cases ((a) SO<sub>2</sub>, (b) NO<sub>2</sub>, (c) TSP, (d) O<sub>3</sub>, (e) CO)

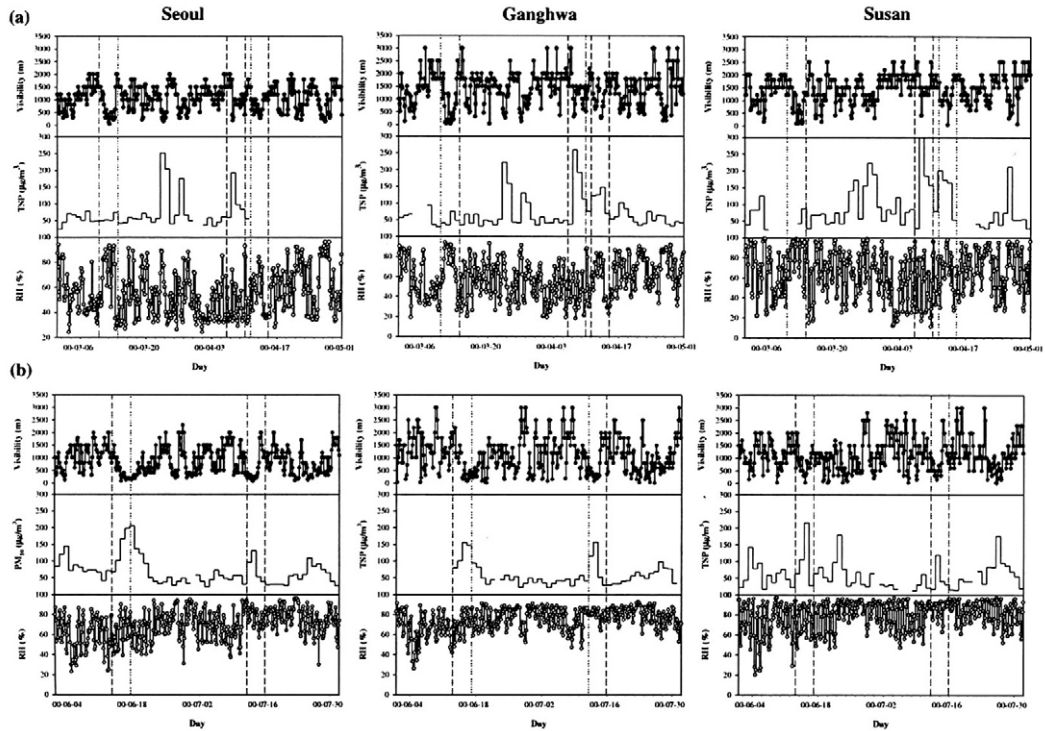


Figure 14. Episodic analysis of expanded low visibility cases using visibility, the concentration of TSP, and relative humidity in Seoul, Ganghwa and Susan ((a) from March to April 2000, (b) from June to July 2000)

3월 12일경과 같이 세 지역에서 미세입자의 농도는 낮지만 상대습도가 급격히 증가한 경우이고, 두 번째 유형은 4월 7일경과 같이 습도는 비교적 낮았지만 미세입자의 농도가 급격히 증가한 경우이다. 마지막으로 3월 23일과 27일, 4월 13일, 6월 15일, 7월 13일경에는 미세입자 농도와 습도가 함께 증가한 경우에 광역적 저시정이 발생하였다. 첫 번째 경우는 넓은 지역에 걸친 안개발생과 같이 광역적 기상조건의 변화에 영향을 받은 것으로 보이고, 두 번째는 황사나 광화학 반응과 같은 광역적 오염원 생성에 의한 시정감소로 추정된다. 그리고 마지막 유형은 이러한 두 가지 시정감소요인이 함께 작용한 것으로 생각되며, 이때 대기 중 미세입자가 높은 습도의 영향을 받아 성장하면서 시정악화효과를 가중시키기 때문에 앞의 두 경우에서보다 시정감소의 정도가 더 심하고 비교적 뚜렷이 관찰되었다. 또한 2000년 3월 23일과 27일, 4월 7일 경에는 황사가 관측되어 황사도 이러한 광역적 저시정 발생의 주요 원인 중 하나이고, 황사에 의한 시정악화는 기상조건에 의해 더욱 심각해질 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들을 종합해 볼 때, 광역적 시정감소의 경우, 대도시와 같은 큰 오염원 주변의 넓은 지역에 걸쳐 유사한 기상조건과, 유사한 경로로 생성 및 이동되는 비산먼지나 황사, 이차 에어로솔의 영향으로 발생하는 것으로 추정된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 90년대 전반에 걸쳐 서울, 강화, 서산, 광주, 제주 다섯 지역에 대한 장기간 시정 변화를 파악하기 위해 1990년 1월부터 2001년 7월까지의 기상청 목측 시정자료를 분석한 결과, 전체 측정기간에 대한 지역별 평균시정은 서울 11.2km, 강화 14.7km, 서산 16.6km, 광주 15.3km, 제주 18.5km순으로 나타났다. 이때 강우 및 안개에 의한 영향을 배제하기 위해 강우일을 제외한

15시 시정자료로부터 장기간 변화경향을 살펴본 결과, 서울에서는 상대습도 감소와 함께 시정이 개선된 반면, 서산, 광주, 제주에서는 상대습도와 시정이 모두 감소하는 것으로 나타났다. 특히 10km 미만의 저시정 발생빈도의 경우, 서울에서 가장 높게 나타났고, 나머지 지역에서도 94년 이후로 증가하는 추세를 나타내었다.

시정과 기상인자 및 대기오염도와의 상관성을 살펴본 결과, 서울의 경우, 시정이 TSP, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>와 같은 대기오염물질의 농도에 민감하게 변화하였고, 난방연료의 사용이 많아 일차오염물질의 배출이 가장 많은 겨울철에 시정이 가장 나쁘게 나타난 반면, 광주의 경우에는 황사가 발생하고 TSP 농도가 가장 높은 봄철에 시정이 최저로 나타났다. 이러한 서울과 광주의 경우, 주로 습도가 50%미만이고, 비교적 정제된 기상조건 하에서 저시정이 관찰되어, 대기오염물질과 광화학 스모그의 영향을 받아 시정이 감소하는 것으로 추정되었다. 이와는 달리, 강화, 서산, 제주에서는 대기오염도가 가장 낮은 여름철 시정이 가장 나쁘게 나타나, 이들 지역에서는 대기오염도 외의 다른 요인에 의해 시정이 영향을 받고 있음을 짐작할 수 있었다. 이 중 강화와 서산의 경우, 습도가 60~70%사이에서 저시정 빈도가 높아, 인접 도시오염원으로부터 이동해 온 대기오염물질과 인근 해양으로부터의 다습한 공기의 유입이 시정감소에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 제주의 경우에는, 습도가 80% 이상일때 저시정이 주로 관측되어, 해무 및 연무가 저시정의 주 원인으로 추정되었다.

관측기간 중 서울, 서산, 강화에서 동시에 저시정이 관측되는 광역적 저시정 사례가 93년 이후 지속적으로 관찰되었는데, 이 사례는 계절과 상관없이 전년에 걸쳐 고르게 발생하여 황사에 의한 광역적 시정감소와는 구별되었다. 그리고 주로 넓은 지역에 걸쳐 광범위한 거동을 하는 기상인자의 영향으로 비산먼지나 이차 에어로솔과 같

은 대기오염물질들이 이동, 확산하면서 발생하는 것으로 추정되었다.

이와 같이 시정에 영향을 미치는 주요 인자인 기상요소들은 넓은 지역에 걸쳐 광범위한 거동을 하고, 대기오염물질도 국지적 오염원 외에 광화학 반응이나 먼지의 비산, 황사, 오염물질의 장거리 이동과 같은 광역적인 오염물질의 생성과 이동현상이 발생할 수 있다. 따라서 시정감소의 억제와 개선을 위해서는 각 지역에서의 개별적인 개선 노력과 함께 주변지역 및 인접국가와의 협력 등 좀더 포괄적이고 광범위한 시각에서의 대책마련이 필요할 것으로 생각된다.

## 사 사

본 연구는 국립환경연구원과 기상연구소간의 공동연구 협력체제 구축을 통한 기상 자료 및 대기오염측정망 자료 공유를 통해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 김신도, 김종호, 이정주, 1992, 겨울철 서울도심의 대기중 부유분진의 특성, 한국대기보전학회지, 8(2), 105-111.
- 김영성, 이시혜, 김진영, 문길주, 김용표, 2002, 1980년대와 1990년대 우리나라의 시정 변화, 한국대기환경학회지, 18(6), 503-514.
- 김해구, 민경덕, 1990, 한국의 시정의 경년변화와 계절변화, J. Kor. Ear. Sci. Soc., 11, 86-99.
- 국립환경연구원, 1994, 수도권지역의 시정장애현상규명을 위한 조사연구(I)-시정감소 원인 물질 및 메카니즘 규명.
- 국립환경연구원, 1997, 수도권지역의 시정장애 현상 규명을 위한 조사 연구 종합보고서, 국립환경연구원.
- 박세옥, 백남준, 김용표, 문길주, 김영성, 1994, 1980~1993년중의 서울의 시정 추이, 한국대기보전학회지, 10(3), 203-208.
- 백남준, 김태오, 김성주, 김용표, 문길주, 1994a, 서울시의 1993년 가을철 시정 및 입자 특성 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(1), 32-40.
- 백남준, 김태오, 김용표, 문길주, 1994b, 시정장애 현상 원인과 그 규명방법 : 수도권 지역의 시정장애현상 연구를 위하여, 한국대기보전학회지, 10(1), 1-23.
- 백남준, 이종훈, 김용표, 문길주, 1996, 1994년 6월 서울지역 시정장애의 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 407-419.
- 윤순창, 이강웅, 1998, 서울지역의 시정 장애 요인에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(3), 229-235.
- 이종범, 김용국, 백복행, 1996, 서울과 춘천의 장기간 시정 변화경향, 한국대기보전학회지, 12(4), 473-478.
- 이종훈, 백남준, 김용표, 문길주, 1995, 1993년 8월의 서울지역 시정 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 291-298.
- 정용승, 김태군, 정재섭, 1992, 도시의 대기오염과 시정감소에 관하여, 한국대기보전학회지, 8(1), 1-6.
- 최정숙, 정용승, 1993, 서울의 대기오염과 시정감소, 한국대기보전학회지, 9(1), 51-60.
- 한진석, 김병곤, 김신도, 1996, 1994년 수도권 지역에서의 시정과 미세 입자상물질 화학조성과의 관계해석, 한국대기보전학회지, 12(4), 377-387.
- Lewis, J., D. Koracin, R. Rabin, J. Businger, 2003, Sea fog off the California coast: Viewed in the context of transient weather systems, Journal of Geophysical Research, 108(D15): 4457.
- Doyle, M., S. Dorling, 2002, Visibility trends in the UK 1950-1997, Atmospheric Environment, 36: 3161-3172.

- Hodkinson, R. J., 1966, Calculations of color and visibility in urban atmospheres polluted by gaseous NO<sub>2</sub>, *Air Water Poll. Int. J.*, 10, 137.
- Koschmieder, H., 1924, Theorie der horizontalen Sichtweite, *Beitr. Phys. frei. Atmos.*, 12(33-53), 171-181.
- Tsai, Y. I., M. T. Cheng, 1999, Visibility and aerosol chemical compositions near the coastal area in Central Taiwan, *The Science of the Total Environment* 231: 37-51.
- Cheng, M. T., Y. I. Tsai, 2000, Characterization of visibility and atmospheric aerosols in urban, suburban, and remote areas, *The Science of the Total Environment* 263: 101-114.
- Sequeira, R., H. L. Kim, 1998, The effect of meteorological parameters and aerosol constituents on visibility in urban Hongkong, *Atmospheric Environment*, 32(16), 2855-2871.