

## 도시의 대기오염과 시정감소에 관하여

### On Relationship of Low Visibility to Air Pollution in Cities

정 용 승 · 김 태 군 · 정 재 섭

한국교원대학교 환경과학연구소  
(원고접수: 1991. 10. 18)

Yong-Seung Chung, Tae-Koon Kim and Jae-Sup Chung

Environmental Science Institute, Korea National University of Education  
Khangnae, Chongwon, Choongbook 363-791, Korea  
(Received: 18 October 1991)

#### Abstract

Using data measured in 1989, a study on variations of visibility and air pollution observed in Seoul, Chongju and Choopoongryeong is carried out. Analysis includes on low visibility (<10km) and smog occurring in the Metropolitan Seoul. It was observed that number of days for visibility less than 10km during 1989 was 56.7% (207 days) for Seoul, 45.7% (167 days) for Chongju and 5.8% (21 days) for Choopoongryeong. Chongju is a medium size city (population: a half million) and Choopoongryeong is a rural site. In the urban areas, however, the number of low visibility days was relatively large during the winter but with little seasonal variations. In each month these cities recorded more than 10 days of low visibility.

The visibility reduction due to mist, fog and haze has been occurred with air pollution. In particular, the reduction in a cold season related with an increase in high concentrations of  $SO_x$  and aerosols. This type of low visibility occurring in Seoul is a similar type that is occurring in London, U.K. On the other hand, the visibility reduction during in a warm season is related with high concentrations of  $NO_x$  and other photochemical precursors. The visibility reduction in Seoul during summer is the same type occurring in Los Angeles, U.S.A.

#### 1. 서 론

1970년대 이후 한국은 급속한 공업화와 각종 산업활동의 증대로 대기오염은 점차 증가되고 있으며, 대기오염 증가(예,  $SO_2$ ,  $NO_x$ )의 지표(indicator)로서 시정의 감소를 들 수 있다. 시정의 감소는 주로 대기중으로 배출된  $SO_2$ 와  $NO_x$ 의 2차생성물인 황산염, 질산염과 인위적인 연소활동으로 생성된 유기물입자들에 의한 태양복사의 산란에 의해 야기된다. 황산염, 질산염과 유기물입자는 대개  $2.5\mu m$  이

이하의 작은 입자(fine particle)이다. 특히 높은 상대습도(예, >80%)에서 황산염과 질산염은 수증기를 흡수하여 질량이 증가하며, 이러한 수적들과 함께 수증기는 종종 대기중 작은 입자 질량의 대부분을 차지한다(Covert et al., 1972; Ho et al., 1974; Stelson and Seinfeld, 1981). 이것은 도심지역에서 아침에 미스트를 발생시켜 도시시정을 감소시키는 주요 요인이다.

한편 황산염, 질산염과 같은 작은입자의 산란에 의한 시정감소외에도, 오늘날 자동차 수의 급속한

증대는 서울과 같은 대도시에서 광화학스모그에 의한 시정감소가 있다. 자동차에서 배출되는 NO<sub>x</sub>는 1차적으로 가시광선의 청색영역을 잘 흡수하여 오염된 도시대기의 황갈색(brownish)에 부분적(<10%)으로 기여할 뿐만 아니라(Finlayson-Pitts and Pitts, 1986 ; NAPAP, 1990), NMHC(non-methane hydrocarbons)와 태양복사와의 광화학반응에 의해 O<sub>3</sub>을 비롯한 aldehyde, PAN 등의 여러 산화제들을 생성하는 광화학스모그를 발생시킨다. 특히 광화학스모그 발생시 생성되는 O<sub>3</sub>, PAN, PB<sub>2</sub>N 등의 산화제는 인체와 식물에 매우 유독한 독성물질로 알려졌다(Stoker and Seager, 1976).

이러한 광화학스모그는 오늘날 자동차 대수의 증가로 인한 NO<sub>x</sub>, NMHC의 대기중 농도증대에 원인이 있으며, 온도와 상대습도(>70%)가 높은 따뜻한 계절에 자주 발생한다. 그러나 안개와 같이 상대습도가 높을 때는(>95%), O<sub>3</sub>이 sink되어 광화학스모그가 발생하지 않는다.

미국과 유럽의 대도시와 산업도시에서 저시정(<10km)이 발생하는 빈도가 시골보다 10-20% 많다는 연구보고가 있었다(Landsberg, 1974). 한국의 경우, 대도시 및 중소도시와 시골지역에서 모두 시정이 감소하는 경향이 보고되었다(김해구와 민경덕, 1990).

본 연구는 대도시인 서울, 지방도시인 청주, 시골지역인 추풍령의 시정관측 자료를 이용하여 각 지역 시정의 계절별 변동 및 그 특징을 비교분석하였다. 그리고 서울에서 시정감소를 초래하는 스모그의 계절별 유형 및 특징을 조사하였다.

## 2. 서울, 청주, 추풍령의 시정의 계절별 변동 및 특징

대도시인 서울, 지방도시인 청주, 시골지역인 추풍령의 1989년도 시정관측 자료를 분석하였으며, 이 3지역에서 모두 시정 10km 이하를 저(낮은) 시정으로 분류하였다.

표 1은 1989년 서울, 청주, 추풍령의 매일 오후 3시의 시정을 분석한 월별 시정표이다. 연간 시정이 10km 이하인 저시정 일수가 서울 56.7%(207일), 청주 45.7%(167일), 추풍령 5.8%(21일)로, 대도시인 서울이 지방도시인 청주와 도시화영향을 받지 않은 추풍령보다 저시정 일수가 높게 나타났다. 특히 서울과 청주는 시골지역인 추풍령보다 현저한 시정감소를 보여 주며, 이것은 도시의 대기오염에 의한 시정감소의 심각성을 시사한다.

그림 1은 서울, 청주, 추풍령에서 매일 15시에 관측한 시정 10km 이하의 저시정 일수이다. 서울의

Table 1. The monthly frequencies of visibility observed at 3 : 00 p.m. in 1989.

### Seoul

Visibility \ Month	Month												Total	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
-5km	5	3	0	0	4	2	2	2	0	5	0	6	29	8
-10km	18	15	20	17	12	17	14	8	12	8	20	17	178	48.7
>10km	8	10	11	13	15	13	13	21	18	18	10	8	158	43.3

### Chongju

Visibility \ Month	Month												Total	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
-5km	4	1	1	0	1	0	0	1	3	7	5	7	30	8.2
-10km	14	15	12	11	11	12	11	2	12	13	13	11	137	37.5
>10km	13	12	18	19	19	18	20	28	15	11	12	13	198	54.3

### Choopongryong

Visibility \ Month	Month												Total	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
-5km	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.3
-10km	3	1	0	1	0	2	7	0	1	0	0	2	20	5.5
>10km	28	27	31	29	31	28	24	31	28	30	28	29	344	94.2

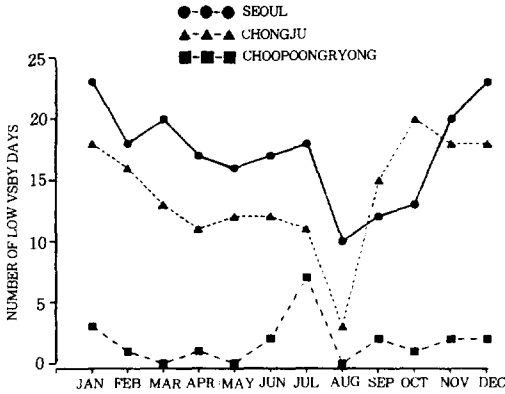


Fig. 1. The number of low visibility (<10km) days observed at 3 : 00 p.m. in Seoul, Chongju and Choopoongryeong in 1989.

저시정 일수는 늦가을-이른봄의 동계에 가장 높게 나타났으나 (월별 20일 이상), 8-10월을 제외하곤 전년을 통하여 월별 15일 이상의 높은 저시정 일수를 기록하였다. 청주의 경우 동계에 15일 이상의 저시정 일수를 나타냈으며, 8월을 제외하고 전년을 통하여 10일 이상의 저시정 일수를 기록하였다. 추풍령은 전년을 통하여 월별 저시정 일수가 3일 이하로 매우 낮았다. 서울과 청주지역에서 겨울철에 저시정 일수가 많았지만, 전년을 통해 뚜렷한 시정의 변동없이 계속적으로 높은 저시정 일수를 보여주고 이것은 미국 동부의 여름철 시정증가와 겨울철 시정감소와 대조를 이룬다(Trijonis, 1982b). 한국의 도시에서 계절별 구별없는 높은 저시정 일수를 보인 것은 전년을 통하여 대기중으로 배출되는 시정감소 precursor 물질들의 농도가 계절별로 뚜렷한 변동없이 높음을 시사한다. 특히 겨울철 높은 저시정 일수는 이 계절의 대기중 precursor 물질의 상대적으로 높은 농도와 낮은 혼합고(mixing height)에 기인한다.

그림 2는 같은 해 서울과 추풍령의 오전 6-12시경에 발생한 시정 10km 이하의 mist 발생일수를 나타낸다. mist는 2.5 $\mu$ m 이하의 작은 수적(droplet) 혹은 황산염과 질산염과 같은 흡습성 입자의 산란에 의해 발생하며, 수평시정이 1km 이상인 경우를 말한다. mist는 상대습도가 80-90%로 상대습도가 100%인 안개(직경 2.5 $\mu$ m 이상) 보다 낮고 일반적으로 희색을 띤다. 서울의 연간 mist 발생일수는 178회로 추풍령의 28회에 비해 6배정도 높게 나타났다. 이것은 대도시인 서울에 황산염, 질산염, 유기입자와 같은 작은입자의 대기중 부유농도가 높아

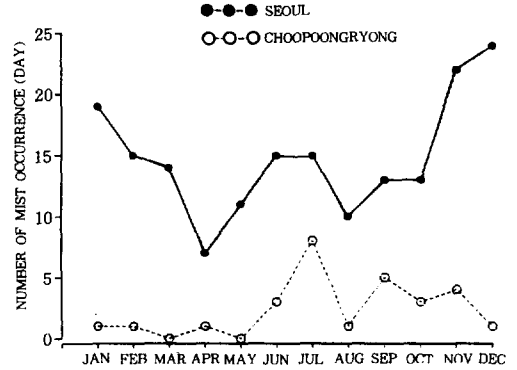


Fig. 2. The monthly frequencies of misty (<10km) days observed during 06 : 00-12 : 00 hours in Seoul and Choopoongryeong in 1989.

이들 흡습성의 작은입자들이 상대습도가 높은 야간-새벽에 수증기를 흡습하여 오전중 저시정을 초래함을 시사한다. 특히 서울의 경우 11-2월의 동계에 전체 발생일수의 45%(80일)로 발생빈도가 높으며, 이것은 동계의 대기중 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, TSP의 높은 대기중 농도에 기인한다.

한편 서울의 6-7월에 월별 15일의 높은 mist 발생일수를 나타낸 것은 이 기간중 대기중 상대습도가 높아(>80%) 주로 흡습성의 작은입자와 수증기(water vapor)의 산란에 의한 것으로 사료된다. 이것은 대기오염 배출원이 적은 시골지역인 추풍령에서도 이 기간중 상대적으로 높은 월별 저시정 일수(8일)를 보인 것에도 수증기가 이 기간중 시정감소의 주요성분임을 제시한다. 이러한 여름철 시정감소는 미국 동부에서 현저하게 나타나고, 이것은 황산염과 수증기에 의한 것으로 보고했다(Trijonis, 1982b). 일반적으로 겨울철 저시정은 겨울철 낮은 혼합고(mixing height)에서 작은입자의 농도증가에 기인하고, 여름철 저시정은 높은 상대습도하에서 대기중 수증기에 의한 것이다. 특히 여름철 저시정은 혼합고가 높아 광역적(regional)으로 나타난다.

그림 3은 오후 3시 시정 10km 이하의 haze 발생일수를 나타낸 것이다. haze는 낮은 상대습도(<70%)에서 건조한 작은입자의 산란에 의해 발생하며, haze 발생시 오염된 도시대기는 황갈색을 띤다. 이러한 haze는 주로 대기중 황산염, 질산염 등의 작은입자의 산란과 NO<sub>2</sub> 가스의 흡수에 의해 발생한다. 서울 지역의 시정 10km 이하의 연간 haze 발생일수는 122일로 나타났으며, 특히 겨울-봄철에 높은 haze 발생일수를 보였고 여름철(6-8월)에는 haze 발생일수가 적었다. 이것은 여름철에 precursor인 황

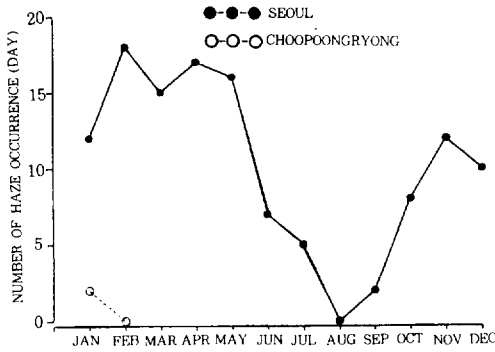


Fig. 3. The monthly frequencies of hazy (<10km) days at 3:00 p.m. in Seoul and Choopongryong in 1989.

산염, 질산염 등의 작은입자의 농도가 적은 것에 기인한다. 또한 시골지역인 추풍령은 haze가 전년을 통해 거의 발생하지 않았다. 이것은 haze가 주로 인위적인 대기오염에 의해 발생하고, 또한 TSP 농도가 높은 겨울-봄철에 발생함을 시사한다.

### 3. 서울의 스모그 유형

1989년 서울의 20개 관측지점에서 관측한 TSP와  $O_3$ 농도의 월평균치와 오후 3시에 관측한 서울의 10km 이하의 월별 저시정 일수를 분석하였다.

그림 4에서 겨울철 저시정은 이 기간중의 높은 TSP 농도에 의해 발생함을 제시한다. 특히 TSP 중의 황산염, 질산염, 유기입자와 같은 작은입자의 산란에 의해 시정감소가 발생한다. 4월달의  $200\mu\text{g m}^{-3}$  이상의 높은 TSP 농도는 황사에 의한 episode에 기인하는 것으로 사료된다. 그러나 89년의 황사현상은 다른 해에 비해 미약했고, 주로 황사입자는 큰입자( $2.5\text{-}20.0\mu\text{m}$ )가 많기 때문에 높은 TSP 농도( $200\mu\text{g m}^{-3}$ )에도 불구하고 4월의 시정감소에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 분석된다.

그림 5에서 5-6월에 월별 최대  $O_3$  농도(16 ppb)를 기록했고 늦은봄-초가을까지 월평균 10 ppb 이상을 기록하였다. 이것은 TSP 농도의 계절별 경향과 반대되며(그림 4), 따라서 봄-가을은 TSP와 부가적으로 광화학스모그에 의한 저시정을 보이는 것을 제시한다. 특히 늦은봄-초가을의 TSP 농도는 현저히 감소하는 반면  $O_3$  농도는 전년을 통해 10 ppb 이상의 상대적으로 높은 농도를 보여준다. 따라서 늦은봄-여름철 서울지역의 저시정은  $\text{NO}_x$ 와 HC 및 강한 태양복사에 의한 광화학스모그에 의해

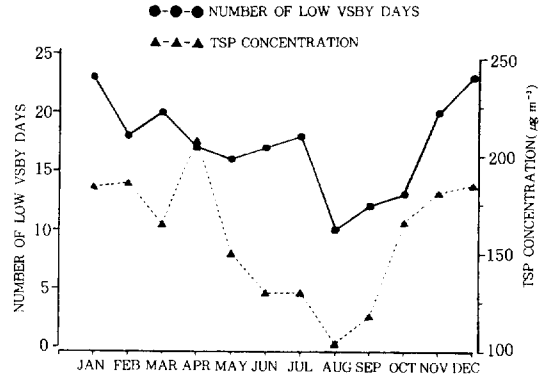


Fig. 4. The monthly frequencies of low visibility (<10km) days and monthly average concentrations of total suspended particulates (TSP,  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in Seoul in 1989.

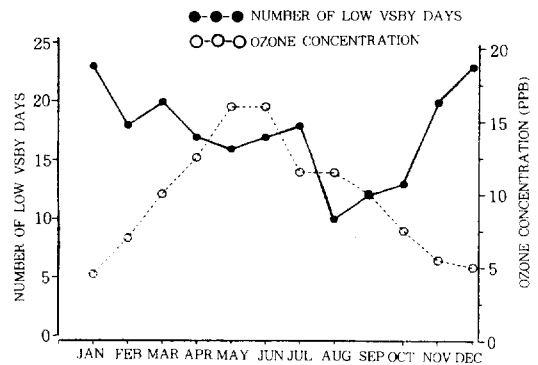


Fig. 5. The monthly frequencies of low visibility (<10km) days and monthly average concentrations of ozone (ppb) in Seoul in 1989.

발생하는 것으로 분석된다. 이러한 광화학스모그 발생시 이들내의 생성물질들(예,  $O_3$ , PAN, aldehyde, oxidants)과 각종 유기입자에 의한 산란과 흡수로 저시정(<10km)이 발생한다.

그림 6에서 서울의 TSP와  $O_3$ 의 계절별 변동을 나타낸 것이다. TSP는 겨울-이른봄에 최대치를 보이며 늦은봄-여름철에 최소치를 보여 준다. 반면,  $O_3$ 는 늦은봄-여름철에 최대치를 보이며 겨울-이른봄에 최소치를 보여 준다. 이것은 서울의 저시정이 겨울철-이른봄에는 주로 건조한 TSP에 원인이 있고, 늦은봄-여름철 저시정은 주로 광화학스모그에 의한 것임을 제시한다.

그림 7은 전년을 통한  $O_3$ 과 광화학스모그의 pre-

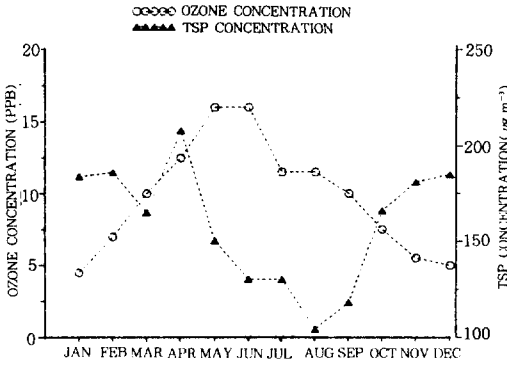


Fig. 6. The monthly average concentrations of ozone and TSP in Seoul in 1989.

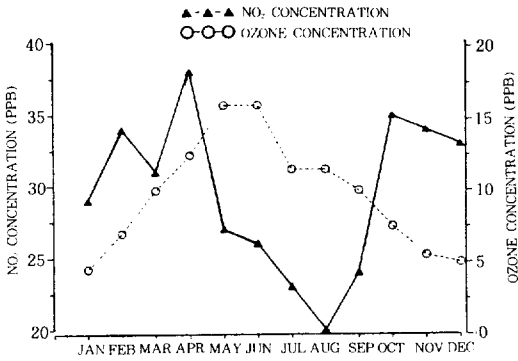


Fig. 7. The monthly average concentrations of ozone and NO<sub>2</sub> in Seoul in 1989.

cursor인 NO<sub>2</sub>의 계절별 변동을 나타내었다. 겨울철-이른봄까지 NO<sub>2</sub> 농도가 높고 O<sub>3</sub> 농도가 낮은 반면, 늦은봄-여름철 O<sub>3</sub> 농도가 높고 NO<sub>2</sub> 농도는 감소하는 경향을 보여 주었다. 겨울철의 적은 일사량과 한랭한 대기조건은 광화학 O<sub>3</sub> 생성이 미약하여 precursor인 NO<sub>2</sub> 농도가 높은 반면, 늦은봄-여름철 광화학반응의 증대로 NO<sub>2</sub>가 sink되면서 O<sub>3</sub> 최대치를 나타내는 것이다. 이것은 늦은봄-초가을의 광화학스모그 발생을 입증한다.

겨울철의 대기오염과 시정장애는 대체적으로 보아 유황과 분진계통의 기체와 aerosol이 활성화되는데 원인이 있으며, 이는 영국의 London형 스모그와 유사한 것으로 사료된다. 또한 늦은봄-초가을에 발생하는 스모그는 높은 기온과 일사량 등 기상조건이 양호할 때 1차 오염물질(precursor)이 2차 오염물질인 O<sub>3</sub>과 PAN, aldehyde와 여러 oxidants 등으로 변화되는 광화학스모그이다. 이는 Los Angeles형

스모그로서, 오염된 도시대기에서 기온이 높고 일사량이 많은 고온건조한 기상조건하에서 발생한다. 여름의 대기는(예, mT 기단) 수분을 많이 포함하고 있으며 수분은 O<sub>3</sub> 형성에 도움이 되며 대기오염(예, NMHC와 NO<sub>x</sub>)의 광화학반응을 증대시킨다. 그러나 상대습도가 95% 이상인 안개나 강수는 O<sub>3</sub>의 습윤침전을 초래케 한다(Chung, 1977).

#### 4. 결 론

1989년도 대도시인 서울, 지방도시인 청주, 도시화 영향을 받지 않은 추풍령의 시정분석 및 그 특징, 그리고 대도시인 서울에서의 계절별 스모그의 특징과 유형을 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 연간시정이 10km 이하인 날수가 서울 56.7% (207일), 청주 45.7(167일), 추풍령 5.8%(21일)로 대도시인 서울이 청주와 추풍령보다 높은 저시정일수를 보였다. 특히 서울과 청주가 시골지역인 추풍령보다 현저한 시정감소를 보여주며 이것은 도시의 대기오염에 의한 시정감소의 심각성을 제시한다.
2. 서울과 청주지역에서 겨울철에 상대적으로 저시정일수가 많았지만, 전년을 통해 계속적으로 10일 이상의 높은 월별 저시정 일수를 보여 주었다.
3. 서울과 추풍령에서 관측한 오전 6-12시의 10km 이하의 mist 분석결과 서울의 mist 발생일수는 178회로 추풍령의 28회에 비해 6배정도 높게 나타났다. 이것은 서울의 높은 황산염, 질산염, 유기입자 등이 상대습도가 높은 새벽에 수증기를 흡수(hygroscopic)하기 때문이다.
4. 서울과 추풍령의 오후 3시의 haze 분석결과, 서울의 시정 10km 이하의 연간 haze 발생일수는 122일로 나타났으며 추풍령은 거의 발생하지 않았다. 특히 서울의 경우 겨울-봄철에 높은 haze 발생일수를 보여 주었다. 이것은 동계의 대기중 높은 TSP 농도에 기인한다.
5. 서울의 겨울철-이른봄 대기오염과 시정장애는 주로 유황과 분진계통의 기체와 aerosol이 활성화되는데 원인이 있으며, 이는 영국의 London형 스모그와 유사하다. 또한 늦은봄-초가을 발생하는 스모그는 높은 기온과 일사량 등 기상조건이 양호할 때 발생하는 광화학스모그에 원인이 있으며 이는 미국의 Los Angeles와 유사하다.

〈감 사〉

초 90-07-00-57)의 연구지원에 의해 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- 김해구, 민경덕 (1990) 한국의 시정의 경년변화와 계절변화. 한국지구과학학회 11 (2), 86-99.
- Chung, Y. S. (1977) Ground-level ozone and regional transport of air pollution. *J. Appl. Meteor.* 16, 1127-1135.
- Covert, D. S., R. J. Charlson and N. C. Ahlquist (1972) A study of the relation of chemical composition and humidity to light scattering by aerosol. *J. Appl. Meteor.* 11, 968-976.
- Finlayson-Pitts, B. J. and J. N. Pitts (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and experimental techniques*. John Wiley, New York. P. 1098.
- Ho, W. W., G. M. Hidy and R. M. Govan (1974) Microwave measurements of liquid water content of atmospheric aerosols. *J. Appl. Meteor.* 13, 871-879.
- Landsberg, H. E. (1974) *The Urban Climate*. Academic Press. P. 250.
- National Acid Precipitation Assessment Program (1990) Acidic Deposition: Visibility; Existing and historical condition-Cause and effect. State of Science and Technology. State of Science and Technology, Report 24.
- Stoker, H. S. and S. L. Seager (1976) *Environmental Chemistry: Air and water pollution*. Scott, Dallas. P. 231.
- Trijonis, J. C. (1982b) Existing and natural background levels of visibility and fine particles in the rural East. *Atmos. Environ.* 16, 2431-2445.