

부산지역 시정악화의 원인 분석

김 유 근·문 윤 섭·배 주 현·곽 진*
부산대학교 대기과학과·*부산대학교 환경시스템학과
(1999년 3월 16일 접수)

The Analyses of Causes of Visibility Impairment in Pusan

Yoo-Keun Kim, Yun-Seob Moon, Joo-Hyun Bae, and Jin Kwak*

Dept. of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Pusan, Korea

*Dept. of Environmental System, Pusan National University, Pusan, Korea

(Manuscript received 16 March, 1999)

After analyzing the correlation between air pollution and visibility, TSP and NO_2 is responsible for poor visibility in Pusan. After analyzing the correlation between meteorological factors and visibility, general pattern of humidity has clear negative correlation. The variation of wind speed has a positive correlation.

In order to investigate the cause of poor visibility in Pusan area, the Andersen sampler and PM-2.5 are used to collect and analyze aerosol. This study was carried out to monitor the visibility using Forward scattering meter and to find out the characteristics and the cause of good visibility case and poor visibility case by measuring and analyzing a variety of parameters, such as particle size distributions, chemical compositions, and meteorological conditions in Pusan. According to the analysis of intensive sampling, NO_3^- , NH_4^+ ion concentration increased together with the mass concentration around $0.5\sim 2.5\mu\text{m}$ approximately during the case of poor visibility. NH_4NO_3 , NH_4Cl , and NaCl were thought to be the major components of fine particles.

Key words : visibility impairment, Andersen sampler, PM-2.5, Forward scattering meter

1. 서 론

최근 대도시를 중심으로 점점 악화되어 가는 대기오염의 심각성은 주민들의 건강문제, 건축물의 부식 등으로 그 정도가 심화되고 있다. 천천히 감지하게되는 건강상의 문제 등과는 달리 눈에 띄게 나빠지고 있는 시정감소 현상은 일상생활에서 쉽게 감지될 수 있는 형태의 오염지수라고 볼 수 있다. 실제로 미국에서는 dv 라는 시정지수를 사용하기도 한다.¹⁾

이러한 시정장애의 직접적 원인은 입자상 물질과 가스분자의 빛의 산란과 흡수 때문이며, 상대습도는 그 자체가 원인은 아니지만 상대습도가 높을 경우에는 입자들, 특히 황산염의 입자들이 수분을 누적하여 빛을 산란시킬 수 있어 시정장애에 간접적 원인이 된다.²⁾

지역별 시정장애를 유발하는 원인물질들을 분석한 연구들로는 Wolff *et al.*,³⁾ Pryor *et al.*⁴⁾ 등 국외에는 다수 있으며, 국내의 경우도 국립환경연구원⁵⁻⁷⁾이 수도권 지역의 시정악화 원인을 규명하기 위해 1994년부터 1996년까지 3년 동안 수행한 바가 있다. 이 연구에서 수도권 지역의 시정감소 주요 원인물질은 황산염, 질산염, 탄소입자 및 유기탄소화합물로서 이들 물질의 산란과 흡수가 주요 원인인 것으로 추정하였다.

하지만 부산의 경우 수도권과는 다른 지형적 특성을 갖고 있기에, 부산지역 고유의 시정악화 원인을 찾고자 하며, 이에 자료 고찰은 물론, 시료분석을 통해 정확한 원인을 규명해 보고자 한다. 특히, 본 연구에서는 대기오염에 의한 시정장애 효과가 주 관심이므로 주로 안개(시정 1 km 이하)를 제외한 연무와 박무(시정 1 km 이상 10 km 이하)에 중점을 두고 그 원인을 밝히고자 하였다.

2. 시정악화의 원인 추정

시정과 대기오염물질과의 상관성 분석은 많은 연구에 의해 이루어져 왔다. 특히 정용승 등⁸⁾은 저시정이 대기오염 물질과 밀접한 관계를 가지고 있으며, 추운 계절의 시정장애와 대기오염은 주로 TSP, SO_2 , NO_2 등에 의해 생성되고, 따뜻한 계절은 주로 광화학 스모그에 의한 것이라고 주장하였다.

Fig. 1은 부산의 광복동 자동관측망에서 측정된 1994년에서 1997년 7월까지의 SO_2 , TSP, O_3 , NO_2 , CO 농도의 일변화와 시정의 일변화를 동시에 나타낸 것이다. 해마다 약간의 차이는 보이고 있지만 대체로 TSP, NO_2 의 농도가 시정악화에 끼치는 영향이 상당히 큼을 알 수 있었다.

Fig. 2에서는 1994년 1월에서 1997년 7월까지의 대기

오염물(CO, NO₂, O₃, SO₂, TSP)의 관측치와 시정값의 시계열 분포를 살펴보았다. 여기서 TSP(—×—) 및 NO₂(—■—)의 농도변화가 시정과 뚜렷한 음의 변화를 보이고 있어, 결국 부산의 경우도 질산염이 악시정에 끼치는 영향이 큰 것으로 추정되었다. 이는 김현주⁹⁾의 관악산에서의 화학 분석에 의하면, 평상시에는 SO₄²⁻가 가장 큰 농도를 나타내었으나 시정이 악화된 경우에 NO₃⁻의 농도 변화가 큰 것으로 보아 관악산에서의 시정악화에 가장 큰 영향을 미치는 성분은 질산염인 것을 증명해 보인 바가 있기 때문이다.

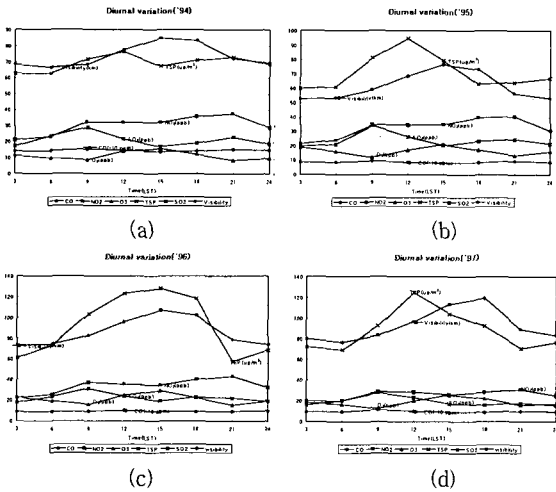


Fig. 1. Diurnal variation of visibility, SO₂, TSP, O₃, NO₂ and CO concentrations at Kwangbokdong of Pusan, for (a)1994, (b)1995, (c)1996, and (d)1997.

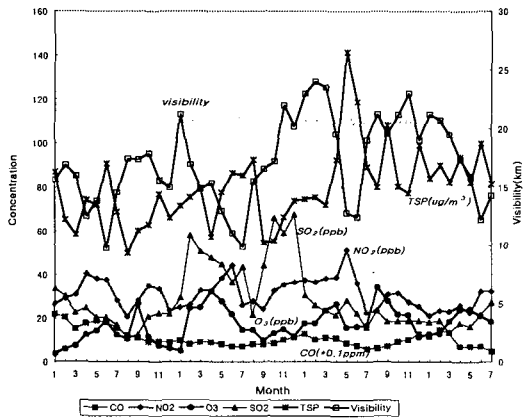


Fig. 2. Time series of visibility and concentration of air pollutants in Pusan from Jan., 1994 to Jul., 1997.

Fig. 3은 0900 LST와 1800 LST의 기온과 시정의 시계열 변화를 나타낸 것이다. 1994년에서 1997년까지 계절적 특성에 따라 기온이 여름은 높고 겨울은 낮은 일반적인 패턴을 나타내고 있으며, 시정은 이와 반대의 패턴으로 여름은 악시정을, 겨울엔 좋은 시정의 값을 보이고

있다. 이는 여름의 높은 온도가 도시지역에 스모그를 유발시키는 물질인 2.5 μm이하의 산성 에어로졸 생성을 활발히 진행시키는 작용을 하기 때문이다.

또한 Fig. 4는 시정과 풍향의 0900 LST와 1800 LST의 시계열 변화를 살펴본 것이다. 동계에는 겨울 동안의 시베리아 기단의 영향을 받아 북서풍이 주풍을 이루며, 하계는 북태평양 기단의 영향에 의해 남동풍이 부는데, 북서풍일 때 호시정을 남동풍이 불 때는 저시정을 보이는 특성을 보인다. 이는 아마도 부산 저시정의 경우는 중국에서 배출한 오염물질에 의한 입자들의 영향이라기보다는 바다에서 유입되는 해염입자인 Na⁺ 등의 영향이 클 것으로 사료된다.

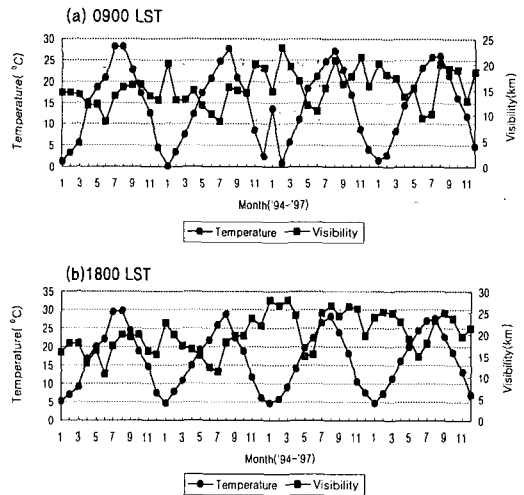


Fig. 3. Time series of visibility and temperature at (a) 0900 LST and (b) 1800 LST in Pusan(1994~1997).

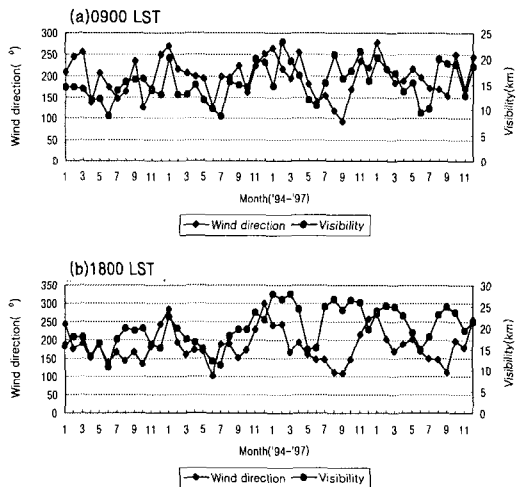


Fig. 4. Time series of visibility and wind direction at (a) 0900 LST and (b) 1800 LST in Pusan(1994~1997).

Fig. 5는 습도 범위별 시정 누적 빈도 분포를 나타낸 그래프이다. 분포의 연속성을 보기 위해, 자료를 3km 이동평균(moving average)한 그래프를 굵은 실선으로 나타내었으며, 여기서 습도가 상승함에 따라 저시정 일수가 많아짐을 볼 수 있다. 누적빈도 50%선을 살펴보면, 상대습도 50%이하는 시정이 18.5 km, 51~60%는 14.5 km, 61~70%는 11.5 km, 71~80%는 10 km, 81~90%는 7 km이다. 특히 상대습도 80%를 넘기면서 시정이 급격히 악화됨을 알 수 있었다.

Fig. 6은 일사량과 시정을 Koschmieder¹⁰⁾가 제안한 식($V_r=3.9/h_{ext}$)에 의해 환산된 전체소광계수와의 상관성을 살펴본 것이다. 일사량의 경우는 수직적 개념의 투과도와는 깊은 상관성이 있었지만, 수평적 개념의 시정과 는 분명한 상관성을 찾아 볼 수 없음을 이 그래프를 통해서 알 수 있었다.

본 연구에서는 장기간의 자료를 검토하여 얻은 가장 적절한 상태의 호시정일과 악시정일을 선택하여, 여러 기상요소와 대기오염물질들의 사례에 따른 비교분석을 시도하였다. 사례 1은 1996년 7월7일에서 8일까지는 시정이 계속해서 20 km를 넘는 좋은 시정이 계속된 날의 경우이고, 사례 2는 1996년 6월 15일과 16일로 시정이 5 km이하의 악시정이 계속되었던 날을 선정하였다. 시정의 사례연구로는, 정길란¹¹⁾과 김현주⁹⁾가 시정 상태에 따라 사례들을 선정하여 화학성분 등을 분석한 바가 있다.

Fig. 7은 이러한 사례일의 기상요소와 오염물질 요인

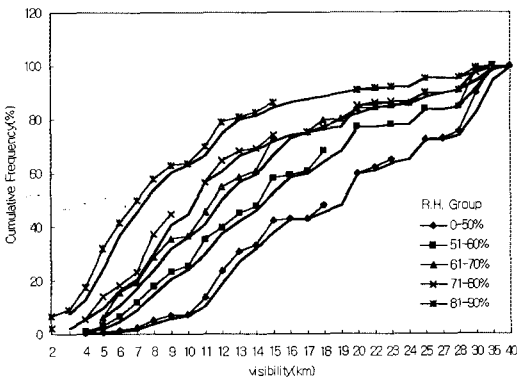


Fig. 5. Cumulative frequency distribution of visibility at 0900LST in Pusan.

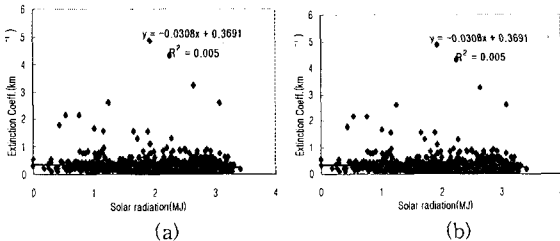


Fig. 6. Extinction coefficient versus solar radiation at (a) 1200 LST and (b) 1800 LST in Pusan(1994~1997).

들의 48시간 평균값을 각각 상대적으로 비교한 것인데, 상대습도의 경우는 시정이 나빴던 날이 16.25 %나 높았고, TSP가 88.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높은 차이를 보였으며, SO_2 가 8.3 ppb, NO_2 가 8.69 ppb, O_3 가 7.88 ppb 높게 나타났다. 또한 악시정의 경우 풍속이 1.21 ms^{-1} 정도로 더 약하게 나타났고, 풍향은 북풍계열인 호시정의 경우와는 달리 남동풍 계열을 나타내었다.

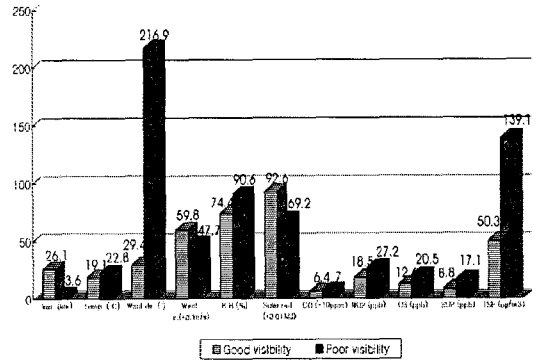


Fig. 7. The comparison between case1(good visibility; Jul. 7~8, 1996) and case2(poor visibility; Jun. 15~16, 1996) for various meteorological elements and air pollutant concentrations in Pusan.

3. 시료 분석에 의한 시정악화의 원인 규명

3.1. 관측 및 분석 방법

목적 자료 분석에서 얻어진 결과에 의하면, 부산지역에서 가장 악화된 시정값을 보이는 계절은 여름이며, 오전 9시경임을 알 수 있었다. 보다 정밀한 원인 규명을 위해 본 연구는 1998년 여름동안 시정이 가장 나빴던 날과 좋았던 날의 시료채취와 분석을 행하였다. 시료채취 및 관측지점은 부산광역시 수영구 광안동에 소재한 부산보건환경연구원 옥상으로 지면에서 약 10m 정도 높이에 위치하고 전방 100m 앞에는 1995년 기준으로 하루 약 52,000여대의 차량이 통행하고 있는 수영로가 있는 주거지역이다.

본 연구에서 사용한 시정의 정량적 기기 측정은 forward scattering meter(Belfort Model 6230 visibility sensor)를 이용하였다. 이 기기는 투광부로부터의 크세논 후레쉬 램프에서 pulsed beam light를 측정 대상 공간 속으로 투사하고 입자가 45° 각도에서 바라보는 수광부로 빛을 산란시킨다. 즉, 산란 매개체에서 산란된 빛 중에 전방으로 산란된 빛을 수광부에서 검출하며, 이 빛의 양은 산란계수에 비례한다.

Forward scattering meter는 총 소멸계수의 구성항목 중 거의 대부분을 차지하는 입자에 의한 산란계수만을 측정하며, 일정 부피내의 시정을 측정하는 점측정방법(point measurement technique)이므로 오차를 유발할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 수분 동안 측정 한 값을 평균하여 측정치로 한다. 또한 설치장소에 광실(sampler set)을 가질 필요가 없기 때문에 안개나 비 등의 시정장애현상의 측정범위로 넓게 할 수 있는 장점을

가지고 있다. 본 연구에서는 이 기기값의 정확성을 기하기 위해 영점보정과 스판보정을 시행하였다.

Fig. 8은 본 실험 기간동안(1998년 7월11일~8월 30)의 사례일을 선택하기 위해 측정된 forward scattering meter의 시정값을 대청동 소재의 지방기상청 목측 시정자료와 비교하여 검증하였는데, forward scattering meter의 높은 시정 측정값을 제외하고는 상당히 일치함을 보여주었다. 시료채취기간은 평균 시정 3.7 km를 보인 1998년 8월 21일부터 23일 동안과 평균시정 14.7 km를 보인 8월 24일부터 26일까지이다. 두 사례 모두 맑은 날이며 평균풍속 1.4~1.68m/s, 상대습도 72.9~75.6%, 주풍향은 남서풍으로 기상학적인 요소들은 비슷하나 시정만이 현저한 차이를 보였고, 이 두 사례에 대해 Andersen Particle Fractionating Sampler (KANOMAX Model 3351)와 PM-2.5 Filter Pack(URG-2000-30)을 사용하여, 24시간씩 총 4번의 시료를 채취하였다.

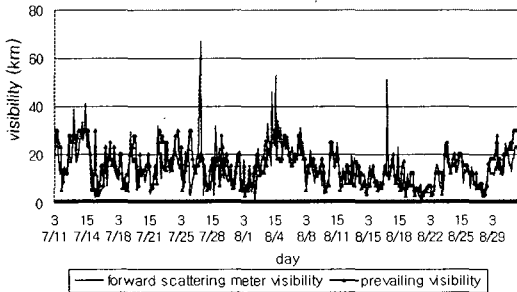


Fig. 8. Time series of prevailing visibility and forward scattering meter visibility in Pusan(Jul. 11 ~ Aug. 30, 1998).

본 연구에서 사용한 Andersen sampler는 그 포집되는 부유 입자상 물질의 입경 범위가 0.43~10 μm (동역학적 직경 : aerodynamic diameter)이며, 8개의 각 stage별 관성충돌에 의해 포집되는 입경 범위는 신상은¹²⁾이 제시한 바 있다.

그리고 PM-2.5를 사용하여, 대기중에 부유하는 2.5 μm 이하의 미세입자를 테프론(Teflon) 여지에 포집하여 3개의 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-)과 5개의 양이온(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+)을 분석하였으며, 음이온 성분 분석은 이온크로마토그래피(Waters com. Model 600E System Controller)로 분석하고, NH_4^+ 를 제외한 양이온들은 원자흡광광도계(AA/AE Spectrophotometer Model Perkin-Elmer 5100)에 의해 분석하였다. 그리고 NH_4^+ 는 흡광광도계(U/V Spectrophotometer Model UVIDEC-505)를 사용하여 대기오염 공정시험법상의 인도페놀법에 의하여 비색분석하였다.

그 외 시정에 영향을 주는 요인을 측정하기 위해 자동기상관측기(Atmospheric Weather Station)를 이용하여 기상요소(기온, 습도, 풍향, 풍속 등)를 관측하였다.

3.2. 결과 및 고찰

본 조사기간동안의 미세입자(2.5 μm 이하) 농도와 화학

분석 결과는 Table 1에 요약한 바와 같다. 악시정 사례 기간동안의 PM2.5 농도가 호시정 사례보다 최대 25.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이나 높았으며, 이는 시정 악화에 미세입자의 영향이 매우 큼을 의미한다. 그리고 이온 성분들의 농도 수준은 비슷하나 특히 질산염의 농도가 시정이 좋았던 사례일 보다는 훨씬 높게 나타났다. 그 다음으로 황산염 등이며, 양이온의 경우는 암모늄염의 농도가 악시정일 때 특히 높았다.

Table 1. Summary of concentration of ion components measured by PM-2.5(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Date	PM2.5	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
case1	59.6	11.24	13.60	5.33	0.92	2.05	1.12	0.01	5.42
case2	47.2	10.15	12.30	4.77	1.24	2.20	1.32	0.01	5.12
case3	34.3	8.65	4.22	2.46	0.94	1.80	1.20	0.01	4.86
case4	44.3	9.20	5.25	3.80	1.60	1.70	1.23	0.01	3.42

* case1 : 8/21 0900 LST~8/22 0900 LST,
 case2 : 8/22 0900 LST~8/23 0900 LST,
 case3 : 8/24 0900 LST~8/25 0900 LST,
 case4 : 8/25 0900 LST~8/26 0900 LST

2장에서 부산의 경우, 악시정일때는 바다에서 유입되는 입자의 영향을 많이 받을 것으로 사료했으며, 역시 실험 결과 또한 Na⁺와 Cl⁻ 등 해양성 기원으로 추정되는 해양성 입자의 영향을 받고 있음을 분명히 규명할 수 있었다.

보다 자세한 입경별 영향력을 살펴보기 위해, Andersen Sampler에서 포집된 결과를 Fig. 9에 나타내었는데 특히, 악시정인 경우 0.73~2.15 μm 입경에서 높은 질량농도 분포를 보였다. 하지만 시정이 좋았던 기간동안은 다소 일정한 분포를 보였고, 악시정인 사례보다는 약간 조대 영역인 4.6 μm 와 8.45 μm 에서 최대치들을 보이기도 하지만 대체로 고른 분포였다. 이 분석 결과로써, 미세입자 영역의 성분들이 시정 악화를 유발시킴을 분명히 밝힐 수 있었다.

미세입자물질의 평균 양이온과 음이온의 농도비를 살펴보면 Fig. 10과 같다. 악시정 사례 기간동안은 NO₃⁻이온이 45%로 가장 많이 차지하고 있으며, 그 다음 SO₄²⁻이온(37%), Cl⁻이온(18%) 순으로 나타났다. 하지만 호시정 사례의 경우는 SO₄²⁻이온이 50~56%로서 가장 높은 비율을 차지하고, 그 다음이 NO₃⁻이온(28~29%), Cl⁻이온(16~21%) 순으로 나타났으며, 이는 부산 지역도 서울과 비슷하게 악시정의 원인이 음이온 중 NO₃⁻이온의 영향이 상당히 큼을 알 수 있으며, 이는 앞장에서 추정 한 결과와 일치하였다.

양이온 성분은 거의 농도 차를 보이고 있지 않으나, 그 중 NH₄⁺이온이 악시정에 끼치는 영향이 상당히 큼을 알 수 있는데, 이 이온은 유기물질의 분해와 비료 등과 같은 농업 활동이나 가축의 분뇨 등에서 주로 배출되며, 최근 연구에 의하면 비농업지역의 경우에는 인구밀도나 교통량 등과 관련이 있다고 밝혀진 바가 있다.¹³⁾

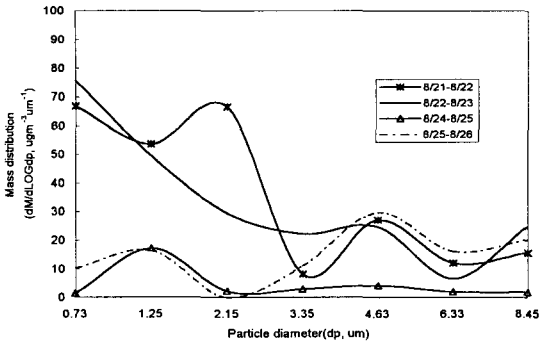


Fig. 9. Particle size distribution by Andersen sampler.

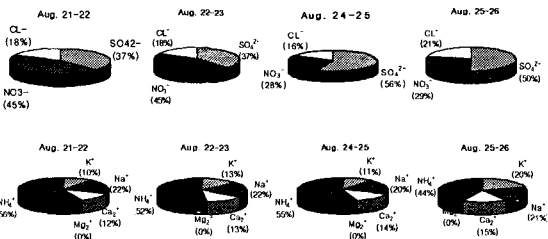


Fig. 10. The ratio of ion components of PM2.5 at Gangandong of Pusan(Aug. 21 ~26, 1998).

입경별로 이온 분석이 동시에 이루어진다면, 발생원의 추적 등의 더 자세한 정보를 제공받을 수 있지만 Andersen sampler의 경우 적어도 1주일 정도는 시료채취 하여야 만이 화학 분석을 할 수 있다. 그러나 본 실험 기간 동안 1주일 정도 같은 시정치가 계속된 사례는 없었기에, 각 입경별로의 이온 분석을 시행하지 못하였다. 다만 PM2.5 분석 결과와 Andersen sampler의 입경분포로서 추정해보면, 부산 지역의 시정 감소 현상시 영향을 미치는 0.5 ~2.5µm 입경 영역에서 입자들의 성장과 증가는 수용성 이온성분 중 NH₄NO₃와 NaNO₃, NH₄Cl, NaCl 등에 의해서 주도되고 있고, 특히 NH₄NO₃의 영향이 가장 큼을 알 수 있었다.

4. 결 론

부산지역의 시정악화에 영향을 끼치는 요인을 찾기 위해 목측 자료 분석은 물론, 시료채취를 통한 화학 분석 연구가 이루어 졌다.

먼저, 목측자료의 분석에 의하면 시정과 높은 상관성을 보이는 요인들로 기온, 습도, 풍향, 풍속, TSP와 NO₂이며, 특히 부산지역의 경우 시정과 풍향의 상관성이 높은 것으로 보아 해륙풍에 따른 비인위적인 요소의 영향도 큰 것으로 나타났으며, 가장 큰 시정장에 현상의 주 원인물질은 NO₂ 배출로 인한 질산염 등과 같은 미세입자와 바다에서 유입되는 해염입자(Na⁺ 등)의 영향이 클 것으로 생각된다.

또한 화학분석 실험에 의해 앞에서 추정된 원인물질

을 규명해 보았으며 그 결과, 부산지역의 시정 감소 현상시 영향을 미치는 물질은 0.5~2.5µm 입경의 NO₃⁻, NH₄⁺ 이온이 증가하는 특징을 보였으며 이온 성분들간의 몰분율을 감안할 때 미세입경 영역에서 입자들의 증가는 수용성 이온성분 중 NH₄NO₃와 NaNO₃, NH₄Cl, NaCl 입자의 증가와 성장에 의해서 주도되고 있음을 알 수 있었다.

부산지역은 이처럼 자동차 배출에 따른 NO₂ 등의 전구물질로 인하여 시정이 악화되지만 바다를 끼고 있는 지형적 특성 때문에 바다에서 유입되는 비인위적인 요인들에 의해서도 시정이 악화되온 부산지역의 특징적인 시정악화 현상의 원인으로 볼 수 있다.

참 고 문 헌

- Shannon, J., E. C. Trexler, JR., and R. Sonnenblick, 1997, Modeling visibility for assessment. Atmos. Env., 31, 3719~3727.
- NPS VISIBILITY PROGRAM, 1994, Visibility Protection, IMPROVE Newsletter, 3, 4, 8pp.
- Wolff, G. T., R. J. Countess, P. J. Groblicki, M. A. Ferman, S. H. Cadle, and J. L. Muhlbaier, 1981, Visibility-Reducing Species in the Denver, Brown Cloud-II. Atmos. Env., 15, 2485~2496.
- Pryor S. C., R. Simpson, L. Guise-Bagley, R. Hoff, and S. Sakiyama, 1997, Visibility and Aerosol Composition in the Fraser Valley During Reveal, Air & Waste Manage. Assoc., 47, 147~156.
- 국립환경연구원, 1994, 수도권지역의 시정장애현상 규명을 위한 조사연구(I), 국립환경연구원보, 16, 61~92.
- 국립환경연구원, 1995, 수도권지역의 시정장애현상 규명을 위한 조사연구(II), 국립환경연구원보, 17, 95~106.
- 국립환경연구원, 1996, 수도권지역의 시정장애현상 규명을 위한 조사연구(III), 국립환경연구원보, 18, 103~129.
- 정용승, 김태군, 정재섭, 1992: 도시의 대기오염과 시정감소에 관하여, 한국대기보전학회지, 8(1), 1-6.
- 김현주, 1997, 시정악화를 유발하는 원인물질의 측정과 분석, 서울대학교 석사학위 논문, 50pp.
- Koschmieder, H., 1924, Beitr. Phys. frei. Atmos., 12, 33.
- 정길란, 1996, 관악산에서 시정과 대기오염농도 및 기상 요소의 측정 및 분석, 서울대학교 석사학위논문, 56pp.
- 신상은, 1985, 대기중 황산염의 입경분포에 관한 연구, 건국대학교 석사학위논문, 21pp.
- 강병욱, 이학성, 김희강, 1997, 청주지역 산성 가스상 물질과 미세입자의 계절 변동 특성, 한국대기보전학회지, 13(5), 333~343.