

심포지움 2)

우리나라 미세먼지 현황 및 문제점

김 신 도

서울시립대학교 환경공학부

1. 서 론

지속적인 대기질 개선의 노력으로 인해 TSP, SO₂와 같은 1차 오염물질은 크게 개선되어 장·단기 환경기준의 초과횟수는 대폭 감소되었다. 그러나 미세먼지는 오히려 증가하고 있는 추세로 장기기준을 초과할 뿐만 아니라 단기 기준을 초과하는 사례도 점차 증가하고 있다. 특히 PM₁₀에 대한 대기환경기준이 1995년에 설정되었으나 배출원 관리 등의 대기오염 관련 정책 등은 총부유먼지(TSP)에 입각하여 설정되어 있기 때문에, 입경이 작고 위해성이 큰 PM₁₀의 저감정책은 실효를 보지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 최근에는 1차 오염물질 이외에 2차 오염물질이 대기질을 악화시키는 주요 인자로 주목받고 있다. 특히 2차 오염물질들은 PM_{2.5}의 농도와 밀접한 관련이 있으며, 인체 및 시정에 직접적인 영향을 미치는 것으로 연구 및 보고 되고 있다(Charson et al., 1992; 백남준외, 1996).

최근 서울을 위시한 대도시지역의 미세먼지의 오염도는 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타나고 있으며, 광역화 되는 특성을 보이고 있다. 현재 수도권 대기질 관리 특별대책과 관련하여 다양한 정책적인 접근이 이루어지고 있으나, 충분한 정량·정성적인 추정없이 저감대책이 추진 중이며, 분진과 관련하여 PM₁₀에 대한 저감을 위주로 진행되고 있어 PM_{2.5}에 대한 대책도 필요할 것으로 생각된다. 그러므로 여기에서는 현재 수도권지역의 미세먼지의 분포현황 및 문제점을 논의하고자 한다.

2. 미세먼지 현황 및 문제

2. 1 미세먼지 오염도 파악

청정연료의 사용, 저황유 공급확대, 저공해자동차 보급 등 각종 대기오염 저감정책에 힘입어 대표적인 1차 오염물질인 아황산가스는 개선되는 추세이나(Fig. 1), 자동차의 급속한 증가 및 산업활동의 증가에 따라 미세먼지는 증가추세에 있다. 현재 환경부는 미세먼지 기준을 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울시는 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정하여 운영하고 있으며, Fig. 1의 서울시의 장기간 미세먼지 오염도는 1998년도를 기점으로 하여 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 이와 같은 현상은 자동차의 증가에 기인한 것으로 분석된다. 미세먼지는 스모그 원인물질로 기관기와 폐에 쌓여 천식, 호흡곤란을 일으키며 계절에 따라 변화가 심해 난방기인 겨울철이 대체적으로 높고, 강우량이 많은 여름철에는 낮은 수준을 보이고 있다. 또한 Figure 2의 주요 도시의 계절별 먼지오염도를 보면 황사가 발생하고 비교적 상대습도가 낮은 시기인 겨울 및 봄의 오염도가 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 도시별 오염도는 단연 서울의 오염도가 다른 도시에 비해 높았으며, 2003년도 서울과 인천의 경우 겨울과 봄철의 미세먼지 농도는 환경부기준치를 초과하였다.

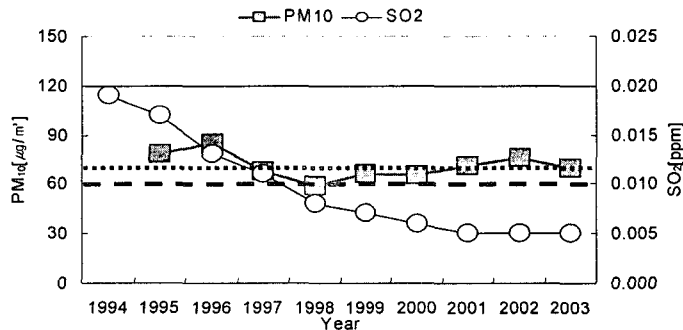


Fig. 1. Variation of PM₁₀ and SO₂ in Seoul(KME, 2004).

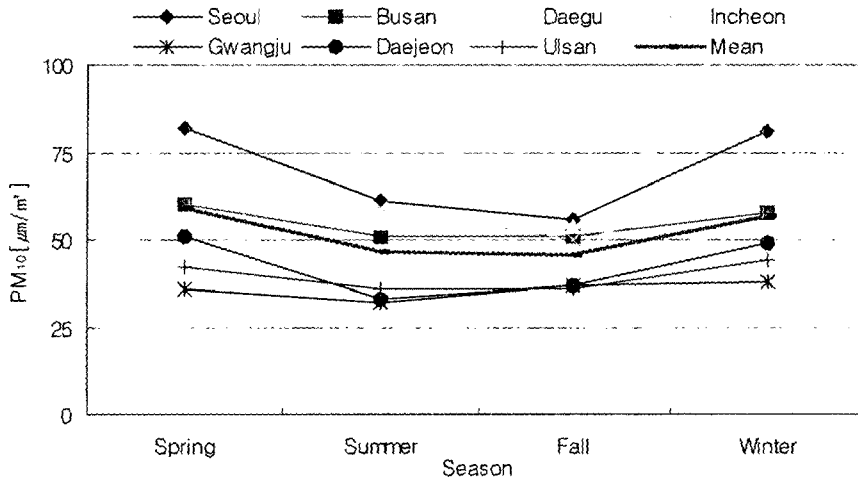


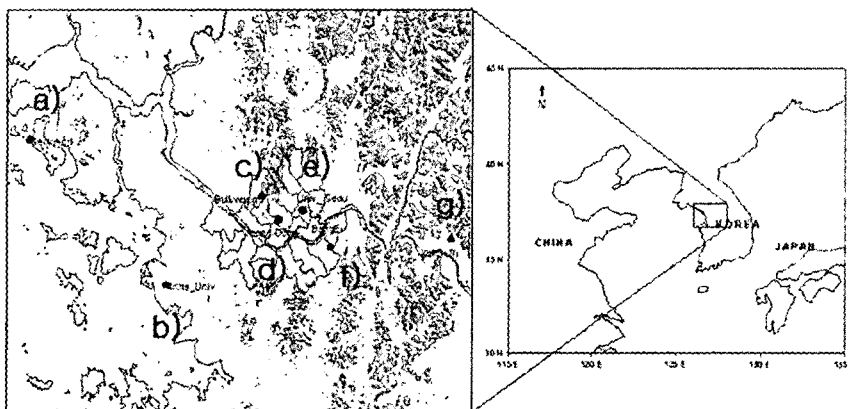
Fig. 2. Seasonal variation of PM₁₀(KME, 2004).

2. 2 수도권지역 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도분포 특성

2.2.1 연구방법

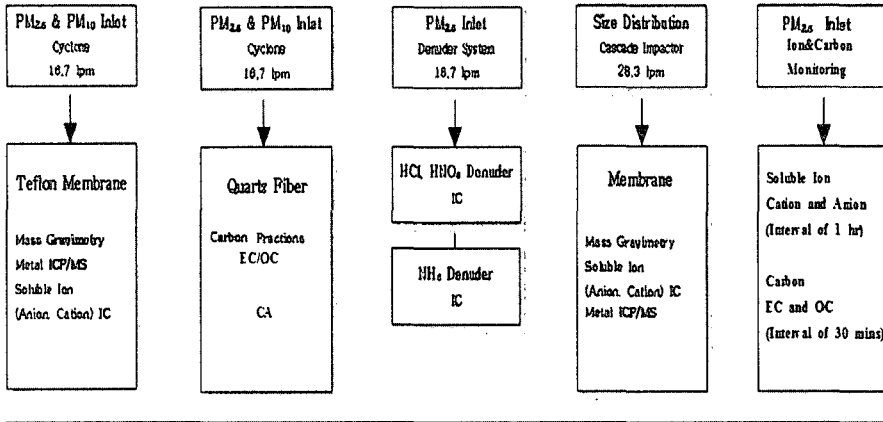
2002년 8월부터 2004년 8월에 걸쳐 총 7회의 집중관측을 통해 수도권지역의 미세먼지의 현황을 파악하였다. 측정지점은 서울을 중심으로 위도상 제일 왼쪽에 위치한 강화도 석모리, 인천 용현동, 서울 불광동, 서울 정동, 서울 전농동, 서울 방이동 지점과 양평군 국수리 지점을 측정지점으로 선정하였다 (Fig. 1).

서울의 인구는 약 1,000만 명으로 우리나라 전체인구의 42%이상이며 대기오염을 악화시키는 주요원인인 자동차의 경우 550만 대 이상으로 전체 등록대수의 44%에 달하고 있으며, 서울시의 경우 하루에 300대씩 증가하고 있다(통계청, 2002; 서울시, 2002). 수도권 지역에 인구 집중현상 및 대기 오염도를 고려할 때 서울 중심의 수도권의 미세먼지 문제를 해결한다면 이와 같은 방법으로 각 지역으로 보급 및



a) Kangwhado Seokmori, b) Incheon Yonghyundong, c) Seoul Bulkwangdong, d) Seoul Jeongdong, e) Seoul Jeonnongdong, f) Seoul Bangieedong, g) Yangpyong Kuksuri

Fig. 3. Description of PM measurement sites.



Soluble ion components: Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺
 Metal components: Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, S, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd
 Analytic instrument: ICP/MS = Inductively coupled plasma/mass spectrometry, IC=ion chromatography, CA = Carbon Analyzer(Sunset)

Fig. 4. Sampling configuration and analysis for PM₁₀ and PM_{2.5}.

확산시킬 수 있는 것이다.

지리적인 입지는 주위에 북한산, 도봉산, 관악산 등의 높은 산이 둘러싸고 있어 풍속이 약한 상태에서는 대기 확산이 잘 안되는 요인으로 작용하고 있다(Fig. 3). 면적은 605.52km²으로, 4계절이 뚜렷하고 연간 기온의 차가 큰 것이 특징이며, 측정 및 분석방법은 Fig. 4와 같다.

2.2.2 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도

2001년도 서울시의 경우 PM₁₀연평균 농도는 71μg/m³으로 다른 광역시에 비해 제일 높은 수준이었고, 서울시기준(60μg/m³)을 11μg/m³, 환경기준(70μg/m³)을 1μg/m³ 초과하고 있었다. 이러한 서울시의 오염은 서울 인근 시도에 광역화되는 현상이 관찰되고 있다(서울시통계연감, 2003). 2002~2003년도 대기 먼지 중 PM_{2.5}의 평균농도범위는 26.2~52.8μg/m³를 나타내었고, 평균농도는 37.7μg/m³(5~95 percentile)으로 미국의 NAAQS 기준치와 비교했을 때 일일기준(65μg/m³ day)보다는 낮지만 년 평균 기준(15μg/m³ year)보다는 2배이상 높은 농도를 보였다. PM₁₀의 평균농도범위는 52.1~65.0μg/m³ 범위를 나타내었고, 평균농도는 57.5μg/m³으로 환경 기준(70 μg/m³ year), 서울시환경기준(60 μg/m³ year)치 보다 낮지만 미국 NAAQS 기준(50 μg/m³ year)보다는 높은 수치를 보여 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 오염도가 높은 편이며 PM₁₀ 보다 PM_{2.5}의 오염도가 훨씬 심한 것을 알 수 있다(Fig. 6).

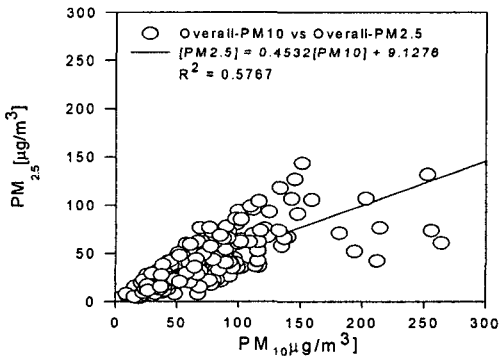


Fig. 5. Scatter plot of overall PM₁₀ versus PM_{2.5} (Aug. 2002 - Jul. 2004).

Fig. 5는 서울 지역의 자동측정망 가운데 PM₁₀과 PM_{2.5}를 동시에 측정하고 있는 지점에서 PM₁₀의 농도와 그때의 PM_{2.5} 농도를 동시에 나타낸 그림이다. 전체적으로 PM_{2.5}는 PM₁₀의 약 45%정도를 차지하고 있는 것으로 나타났으나, 일부지역에서는 PM₁₀중의 PM_{2.5} 분율이 약 80%이상 되는 경우도 발견되고 있다.

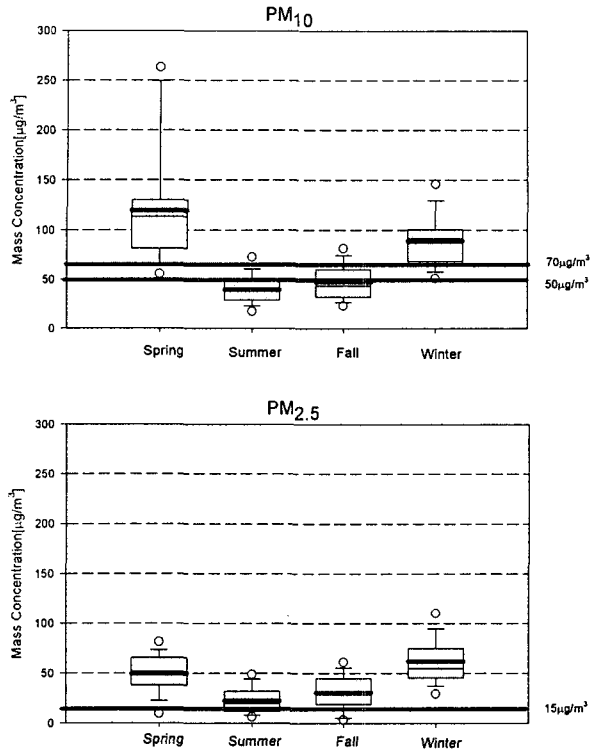


Fig. 6. Seasonal variation of PM₁₀ and PM_{2.5}.

2.2.3 계절 및 지역별 농도분포

PM₁₀과 PM_{2.5}농도는 계절별로 유사한 경향을 보이고 있으며, 평균농도를 살펴보면 PM₁₀은 봄(119.2 µg/m³) > 겨울(95.5 µg/m³) > 가을(46.7 µg/m³) > 여름(39.6 µg/m³) 순으로 나타났고, PM_{2.5}는 겨울(58.6 µg/m³) > 봄(49.4 µg/m³) > 가을(37.1 µg/m³) > 여름(22.7 µg/m³) 으로 서울지역의 계절별 농도 변화 경향이 나타나고 있어, 특히 겨울철 에너지 사용량의 증가와 관계가 있을 것으로 생각된다. 또한, 여름에는 혼합도가 높아 대기의 확산력이 강할 뿐만 아니라, 강우빈도가 늦여름에 편중됨으로 인해 오염된 공기를 세정하는 효과가 있기 때문으로 사료된다. 그러나 겨울철에는 지표면의 냉각효과로 인해 대기가 정체하는 빈도가 높고, 여름과 가을철에 비해 혼합도가 낮아 오염물질의 확산이 어렵다. 최근 수도권지역의 경우 겨울철 고농도 스모그 발생 빈도가 증가하는 추세이다. 도시지역에서 미세입자의 농도의 증감에 영향을 줄 수 있는 요인으로 자동차들과 많은 산업시설들로부터 미세입자의 직접적인 배출은 연중 상대적으로 일정하지만, 난방시설의 운전으로 인한 배출은 겨울철에 가장 높다. 겨울에는 주변의 지역난방으로 인해 직접배출의 영향이 다른 계절에 비해 클 수 있으며, 이 당시 강한 스모그에 의한 영향이 작용한 것으로 사료된다. 봄에 측정된 PM₁₀ 농도에서 전체 측정치의 최대 값이 관측되었으며, 이 당시 중국에서 발생한 강한 황사의 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 PM_{2.5}의 농도는 큰 변화를 보이지 않았는데 그 원인으로 황사 입자는 주로 조대영역의 입자로 구성되어 있기 때문으로 사료된다.

미세먼지의 농도는 일반적으로 임의적인 분포를 나타내며, 여기에는 배출원, 기상조건, 지역조건이 주로 관계가 있다. 통계적으로 특정한 확률분포는 대기기준을 초과하는 농도 빈도의 예측에 이용될 수 있다. 그리고 대기오염물질에 대한 빈도 분포 정보는 대기오염 저감대책 수립을 위해 이용될 수 있다. 이러한 오염물질의 분포특성은 서로 다른 지역에서 대기오염물질의 유사점과 차이점을 찾는 데 유용하게 이용할 수 있다(Lu, 2002). 또한, 오염물질의 측정값을 통해 앞으로 오염물질이 기준치를 초과할 수 있

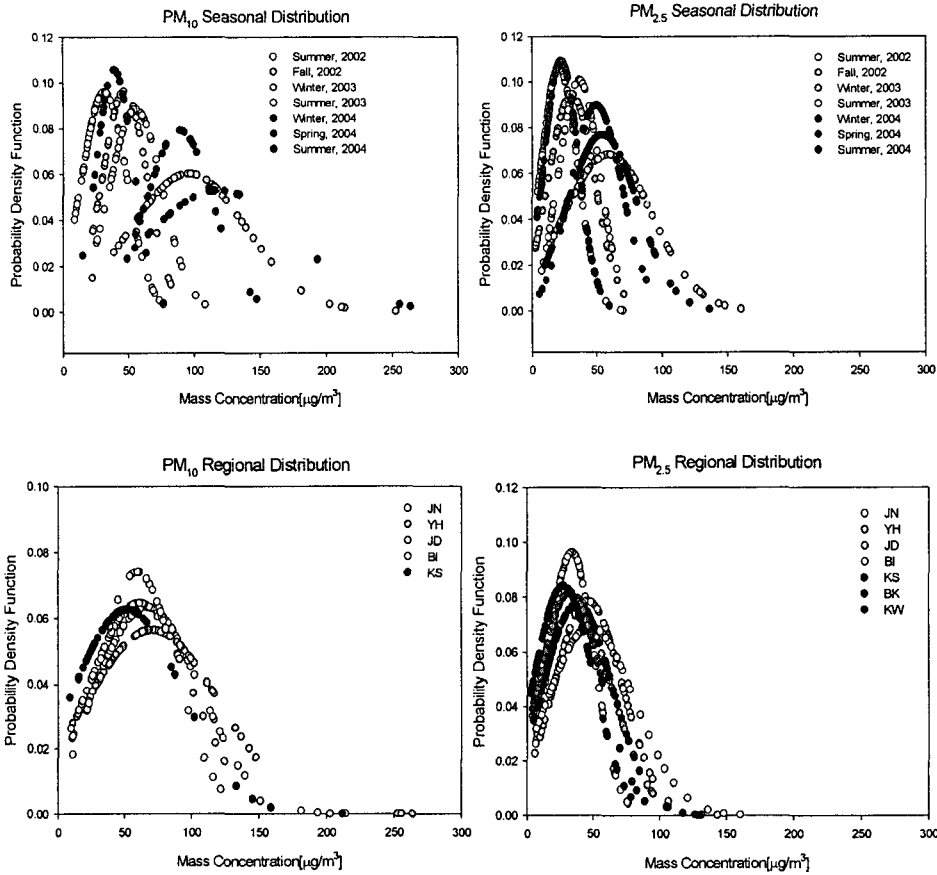


Fig. 7. Variation of P.D.F classed by seasonal and regional differences.

는 확률을 예측하는데 이용될 수 있다. Figure 8(위)에 계절별 농도분포에서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 계절별 농도의 확률밀도함수가 약간 다른 차이가 있는데, PM₁₀의 경우 봄철이 x축의 농도기준에서 가장 오른쪽으로 많이 치우쳐 있으며, 고농도가 출현할 수 있는 빈도가 높고, PM_{2.5}는 겨울철인 것으로 나타났다. 이것은 PM₁₀의 농도는 인위적인 기원뿐만 아닌 자연적인 기원에 의한 영향을 동시에 받고 있으며(황사), PM_{2.5}는 PM₁₀에 비해 인위적인 영향을 훨씬 많이 받고 있는 것을 계절에 따른 분포곡선의 분포형태를 통해 추정할 수 있다. 그러나 지역별 농도를 나타낸 Figure 7(아래)에서는 수도권 지역의 PM₁₀과 PM_{2.5} 확률밀도함수 분포는 거의 차이가 없음을 알 수 있으며, 이것은 개별지역간의 오염수준의 차이가 뚜렷이 나타나지 않음과 동시에 수도권지역의 미세먼지 오염이 광역화 되어 있음을 보여주고 있다.

2.2.4 미세먼지의 화학적 조성

서울의 경우 미세먼지의 성분의 대부분은 탄소화합물, 황산염 및 질산염이며 이중 탄소화합물은 주로 자동차 배출가스 및 2차 유기에어로졸의 형태로 나타나고, 황산염과 질산염 등의 입자상물질들은 아황산가스와 이산화질소 등이 물리화학적으로 변하여 2차적으로 발생하는 것으로 알려져 있다(한진석외, 1996a; 한진석외, 1996b; 강충민, 1997). 이러한 미세먼지의 계절별 화학적 조성을 Figure 8과 Figure 9에 계절별로 살펴보았다

(1) 봄

봄철 서울 전농동에서 측정된 미세먼지의 평균농도는 PM₁₀ 104.7µg/m³, PM_{2.5} 39.0µg/m³으로 관측되

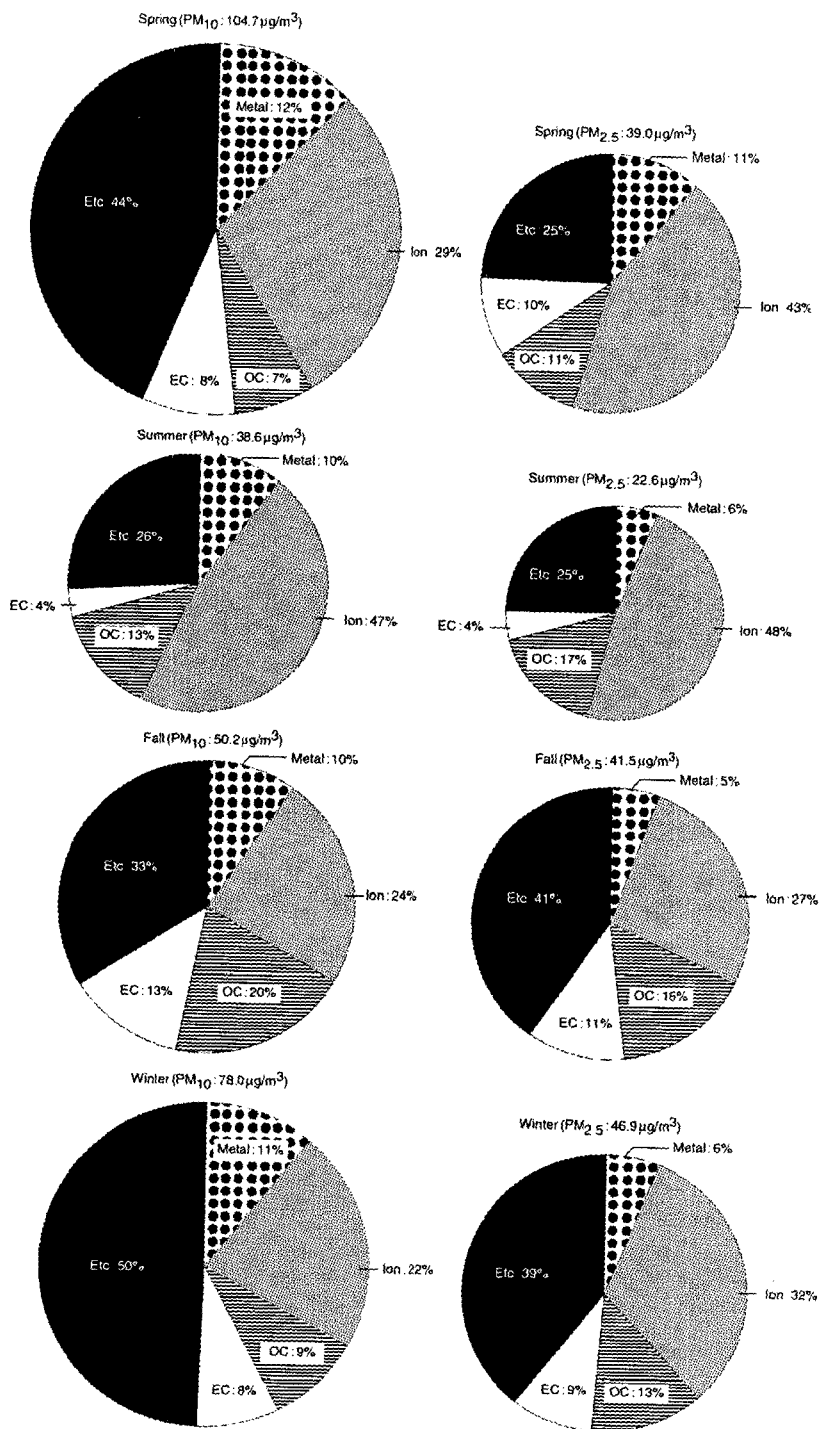


Fig. 8. Seasonal ratio of PM composition.

었다. OC/EC는 PM₁₀ 0.9, PM_{2.5} 1.1이었으며, 이온성분이 주요구성성분으로 나타났다. 특히 다른 계절에 비해 PM_{2.5}영역의 미세입자에 비하여 PM_{2.5}-PM₁₀의 조대입자의 비율이 큰 폭으로 증가하는 현상이 나타났으며, 이것은 중국으로부터 이동된 황사에 의한 영향으로 파악되었다. 황사 출현횟수 또한 중국의 급속한 사막화의 진행으로 인해 매년 증가하는 추세에 있음이 보고 되고 있다(환경부, 2003). 2003년도 우리나라 주요도시의 계절별 미세분진의 농도는 주로 황사가 발생하는 겨울 및 봄철이 가장 높은 경향을 보이고 있어, 잦은 황사의 출현은 우리나라의 미세분진의 농도를 더욱더 가중시키는 영향을 주고 있다.(환경부, 2004) 지형적으로 중국대륙의 풍하방향에 있는 우리나라는 매년 이러한 자연적 및 장거리 이동에 의한 오염물질의 영향으로 인한 막대한 사회적 비용 또한 수차례 보고 된바 있어 앞으로 수도권 대기질 관리에 중요한 요소로 작용할 것으로 생각된다.

(2) 여름

서울 전농동에서 여름철 미세먼지 집중관측은 총 3차례에 걸쳐 수행되었다. 평균농도는 다른계절에 비해 비교적 낮은 수준을 나타내었다(PM₁₀ 37.3~64.4 μ g/m³, PM_{2.5} 21.3~35.7 μ g/m³). 2003년 6월 OC/EC는 PM₁₀ 1.4, PM_{2.5} 1.9로 EC에 비해 OC의 비율이 높게 나타나 광화학 반응에 의한 유기탄소의 생성이 활발히 이루어 졌던 것으로 판단된다. 그리고, 여름철 강한 일사에 의해 오존의 생성이 활발한 것으로 미루어(NO_x/O₃) OC의 대부분이 2차 유기에어로졸로 구성되어 있었던 것으로 사료된다(Cabada et al., 2002). 여름철 강우시와 비강우시에 이온성분비가 큰 폭으로 변하고 있으며, 이것은 입자상 성분을 구성하고 있는 수용성이온성분이 다른 성분에 비해 많이 손실되고 있으며, 유기탄소 또한 큰 폭으로 감소하고 있음을 확인 할 수 있다.

(3) 가을

가을의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 구성비는 PM_{2.5}가 PM₁₀의 약 83% 가량 차지하고 있으며, 전반적으로 탄소성분의 함량이 높으며 PM₁₀의 33%, PM_{2.5}의 29%로 원소탄소에 비해 유기탄소의 비율이 높게 나타났다. 다른 계절에 비해 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 기여도가 상당히 큰 것으로 나타나고 있으며 이것은 8, 9월 달의 장마가 지난 후 감소된 상대습도로 대기가 건조하고 상대적으로 대기 중 오염물질의 양이 증가하고 있으며, 이 현상은 겨울철 까지 이어지며 대기 중 미세분진의 오염농도가 증가하는 경향을 보이고 있다.

(4) 겨울

겨울철 PM₁₀의 농도는 다른 계절에 비해 높은 특성을 보였고, PM₁₀은 78.0 μ g/m³, PM_{2.5}는 46.9 μ g/m³으로 가장 높은 수준이었다. 다른 계절에 비해 PM₁₀-PM_{2.5}의 조대입자 영역의 절대농도가 높은 편이지만, 미세분진의 입경별 분포를 비교해 보면 다른 계절에 비해 미세입자 영역의 농도도 상당히 높은 것을 알 수 있다.

최근 수도권의 미세먼지는 겨울>봄>가을>여름으로 질량농도의 경향을 보이고 있으며, 절대농도에 따라 구성성분 비가 다른 양상을 보이는 것으로 나타났다. 계절적으로 강우시를 배제한 여름철 탄소성분의 비율이 높게 나타나며, 또한 유기탄소의 비율이 원소탄소에 비해 높은 비로 존재하고 있었다. 겨울철의 경우 이와는 달리 원소탄소의 비율이 유기탄소와 유사한 수준으로 성분분석결과만을 통해 그 성분의 기원을 명확히 파악하기는 어렵지만, 주로 1차오염원에 의한 원소탄소에 대한 기여가 높았던 것으로 사료된다. 성분량의 절대 농도비를 통해 여러 연구자들에 의해 연구된 바와 같이 미세먼지의 주요성분이 수용성 이온성분임이 확인되었으며, 탄소성분 또한 주요인자로 작용하고 있었다.

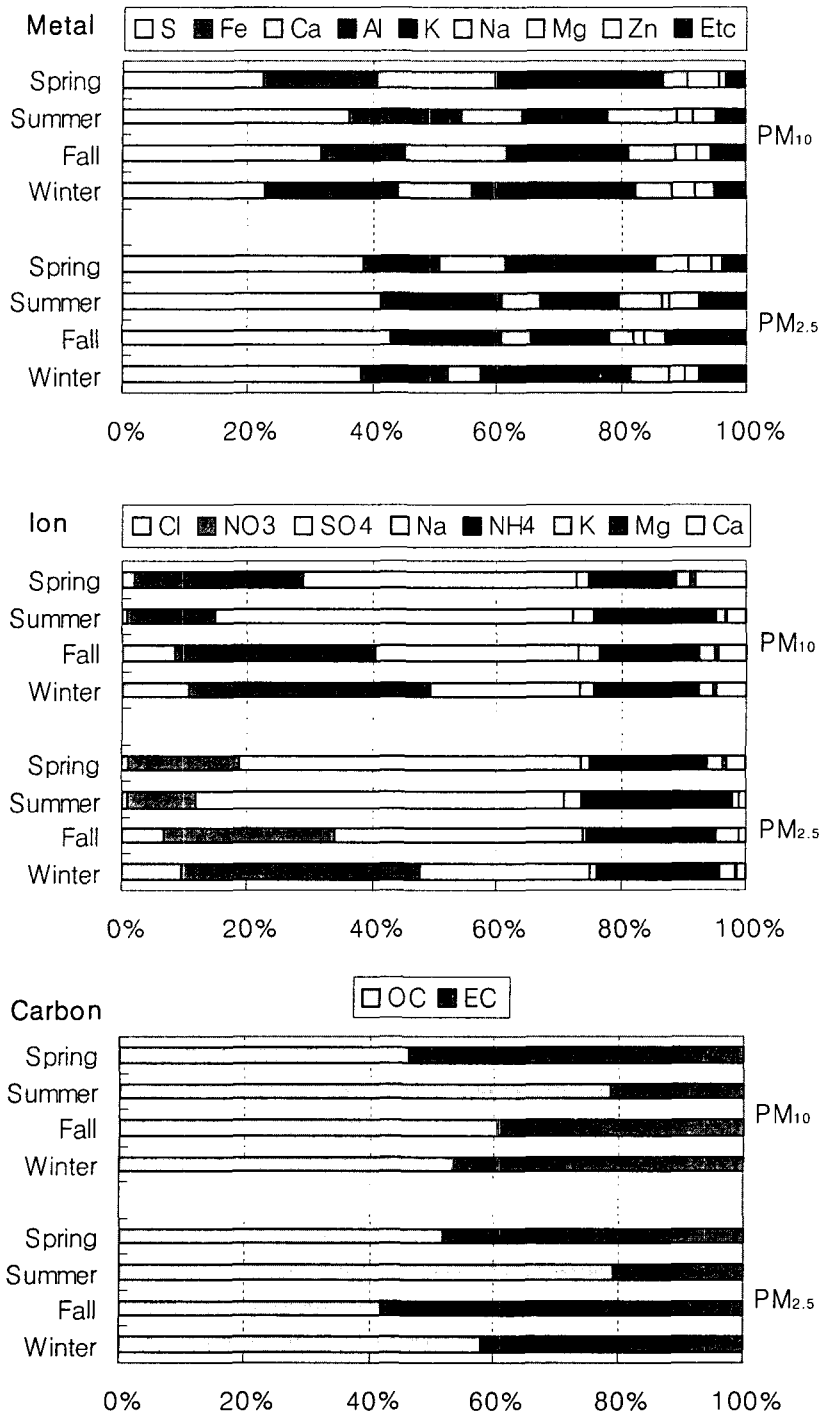


Fig. 9. Composition of metal(upper), ion(middle) and carbon(lower) in PM.

3. 시 정

미세먼지와 시정은 밀접한 관련이 있으며, 일반적으로 대기질을 평가하는데 중요한 인자로 작용하고 있다. 특히 0.1~1 μ m 사이의 미세입자는 빛에 대한 산란효율이 상대적으로 커서, 체감적 대기오염도인 시정거리를 급격하게 감소시키는 것으로 알려져 있고, 최근 수도권을 중심으로 대도시에서 빈번히 발생했던 시정장애 현상은 대기환경기준 항목인 PM₁₀보다 더 작은 미세먼지인 PM_{2.5}의 영향이 큰 것으로 보고 되었다. 따라서 대도시 대기질의 실질적인 개선을 위해서는 PM_{2.5}에 대한 물리적, 화학적 및 광학적 특성을 조사하여 시정장애의 원인을 규명할 필요가 있다. 그러므로 여기에서는 수도권지역의 미세먼지가 시정변화에 미치는 영향을 살펴보았다.

3. 1 시정현황

시정관측은 Optec사 model LPV-2 transmissometer, model NGN-3 nephelometer 광학계에 의해 각각 빛소멸계수(b_{ext}), 빛산란계수(b_{scat})를 실시간으로 측정하였으며, 계절별 평균가시거리와 PM_{2.5} 농도를 비교하여 Figure 10에 나타내었다. 겨울철 가시거리는 약 7.0 \pm 2.5km로 다른 계절에 비해 가장 낮았으며, PM_{2.5}와 가시거리는 반비례하는 경향을 볼 수 있다. 그러나 여름철의 경우에는 이러한 미세입자와 함께 다른계절에 비해 높은 상대습도에 의한 영향을 받아 가시거리가 낮게 나타났다. 그러므로 시정이 PM_{2.5} 미세입자의 증가에 의한 흡수 및 산란 효과에 의한 영향을 받고 있음을 알 수 있다(Fig. 11).

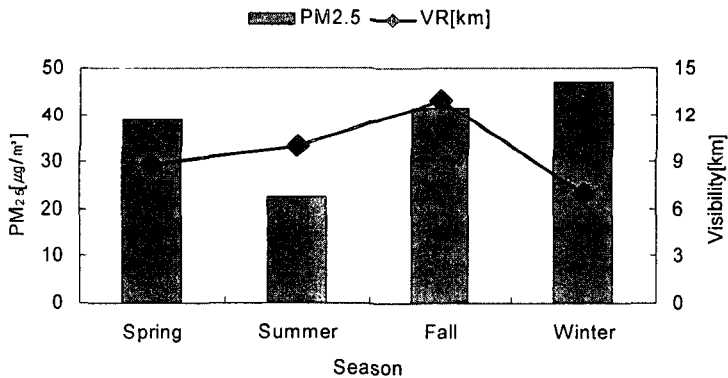


Fig. 10. Seasonal variation of PM_{2.5} and visibility.

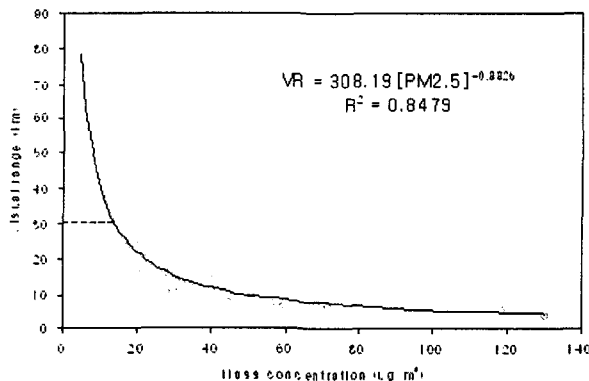


Fig. 11. Relationship of PM_{2.5} and visibility.

3. 2 미세먼지 화학적 조성과 시정

미세먼지의 화학적 구성성분에 대한 시정의 영향을 파악하기 위해 에어로졸의 구성성분에 대한 빛소멸계수의 기여도(light extinction budget)를 계산하여 Figure 12에 나타내었다. PM₁₀의 구성성분을 황산암모늄(NH₄SO₄), 질산암모늄(NH₄NO₃), 유기탄소화합물(OMC), 원소탄소(EC), 미세토양입자(FS), 조대황산암모늄(NH₄SO₃), 해염입자(SS), 미네랄입자(MD)로 재구성하여 빛소멸계수의 기여도를 파악하였다. 각각의 구성성분별 기여도는 27.3, 13.1, 12.3, 25.3, 1.2, 3.7, 0.3, 16.9%를 나타내었고, 시정을 개선하기 위해서는 미세먼지를 구성하는 화학적 성분에 영향을 주는 발생원을 파악하고, 영향인자를 찾아내어 적절한 대책을 강구하여야 할 것이다.

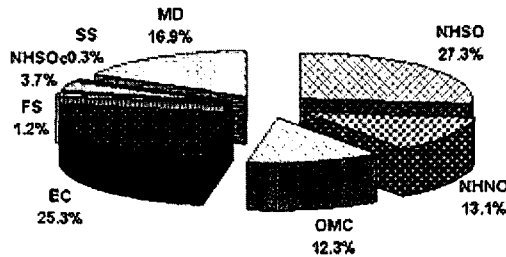


Fig. 12. Light extinction budget for aerosol components.

3. 3 종합

미세먼지에 의한 시정감쇄 현상의 원인 규명을 위해 광학적인 방법을 이용하여 시정인자를 연속적으로 측정된 결과, 수도권 지역의 평균 시정거리는 10km 미만이었으며, 비교적 겨울철에 시정장애 현상의 빈도가 높은 것으로 조사되었다. 시정장애 현상은 미세입자를 구성하는 화학적 조성과도 밀접한 관련이 있으며, 빛소멸계수와 빛산란계수의 실시간 시정자료와 PM_{2.5}중의 유기, 무기탄소 및 이온성분에 대한 연속측정 자료는 시시각각 급변하는 수도권지역의 시정 현상을 규명하는데 기여할 것으로 판단된다.

4. 입경분포

수도권 지역의 미세먼지에 의한 시정악화 현상은 미세먼지의 입경분포와도 밀접한 관련이 있다. 특히 미세먼지의 개수농도 특성은 입경이 작아질수록 증가하며, 시정 및 인체 유해도와도 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 수도권 지역의 미세먼지 입경분포는 미세먼지의 생성원인을 규명하는데 중요한 인자로 활용될 수 있다.

4. 1 입경분포 측정

미세먼지의 입경분포는 SMPS-APS system을 이용하였다. SMPS는 0.005~0.5 μm에 해당하는 입자의 입경에 따른 개수를 측정하고, APS는 0.5~10 μm에 해당하는 입자의 입경에 따른 개수를 측정할 수 있으므로 SMPS(Scanning Mobility Size Analyzer)와 APS (Aerodynamic Particle Sizer)를 결합하여 전 입경에 따른 개수를 측정한다는 것이 SMPS-APS system의 장점이라 할 수 있다. SMPS-APS system은 입경 10 μm이하의 먼지 개수를 실시간적으로 측정할 수 있다는 장점이 있으나 대기에 적용시 정확성에 대한 상세한 검토가 필요하다. 이러한 검토의 가장 기초적 단계로서 미세먼지 농도를 SMPS-APS system에서 도출된 결과와 비교해보았으며(Fig. 13), 비교적 유사한 경향을 보이면서 APS는 PM₁₀보다 높은 영역에 SMPS는 PM_{2.5}와 유사한 영역에 걸쳐 질량농도가 분포하고 있는 것을 알 수 있다.

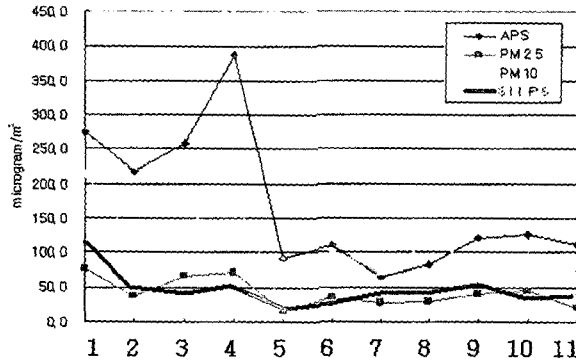


Fig. 13. Comparison of PM₁₀-PM_{2.5} and APS-SMPS.

4. 2 초미세입자 특성

초미세입자의 입경에 따른 개수농도분포를 Figure 14에 나타내었으며, 각종 활동이 활발한 주간이 야간에 비해 개수농도가 높은 특성을 알 수 있다. 측정된 입경범위에서 입경 mode는 약 0.045 μm 와 0.17 μm 에서 peak를 나타내는 이산형(bi-modal) 분포를 보였으며, 계절에 따른 개수농도는 여름철과 겨울철이 높게 나타나고 있다. 이와 같이 먼지의 시간에 따른 입경분포의 변화는 먼지의 동역학 연구와 먼지 모델링의 기본 자료를 제공하는 동시에, 초미세먼지의 오염수준의 판단 및 수도권 먼지 특성을 규명하는 자료로 활용될 수 있다.

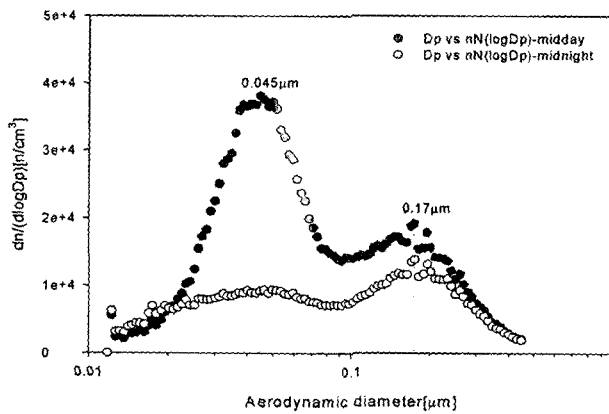


Fig. 14. Particle size distribution of day and night.

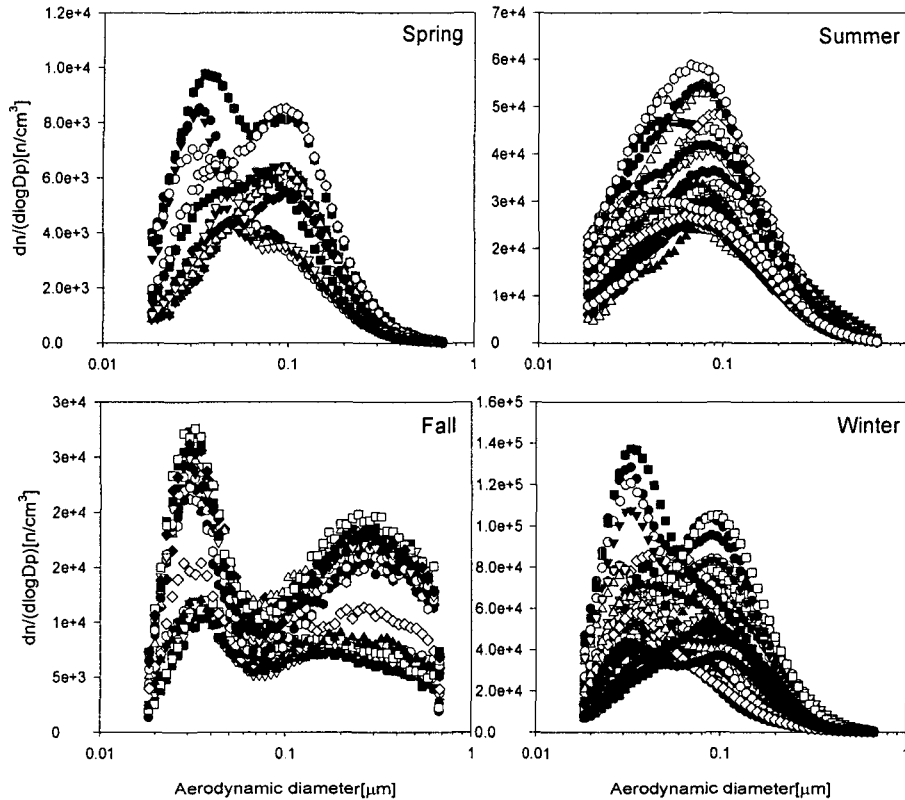


Fig. 15. Seasonal distributions of ultra fine particle.

5. 대기중 미세먼지의 연속측정

대기 중 미세먼지의 생성과정은 매우 복잡한 물리 화학적인 메카니즘에 의해 진행되는 것으로 알려져 있으며, 미세먼지를 구성하고 있는 성분들은 하루에도 시시각각 다양한 농도수준을 보이는 것으로 파악되고 있다. 특히 대기 중 탄소성분과 수용성이온성분은 미세입자를 구성하고 있는 주요성분으로 알려져 있다. 이와 같은 입자상물질 중의 이온성분과 탄소성분을 파악하기 위해 필터를 이용한 일일 측정법(또는 주간과 야간)이 사용되어 왔으나, 여기에는 여러 가지 오차를 유발하는 요인이 잠재하고 있으므로 실시간 및 준연속모니터링 방법에 의한 측정 프로토콜 및 시스템이 개발되어 왔다. 이러한 실시간 모니터링 방법은 도시 대기질의 특성을 파악하는데 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 시각에 따른 오염물질의 변동을 파악하고 필터에 의한 일일 측정법에서 발생하는 오차를 최소화 할 수 있다.

그러므로 PM_{2.5}중의 이온성분과 탄소성분을 실시간으로 측정할 수 있는 시스템을 구축하였으며, 향후 수도권 대기질의 변동 및 특성을 파악하기 위한 자료로 활용하고자 한다.

5. 1 이온연속 및 직접측정 결과 비교

연속측정은 사이클론을 통해 제거된 PM_{2.5}이하의 입자상물질을 확산스크러버를 이용하여 가스상 물질을 제거하고 이온크로마토그래피를 이용하여 1시간간격으로 음이온과 양이온을 분석하였다(Figure 16, Ambient Ion Monitor 9000(URG)). 직접측정은 Cyclone&Denuder system(URG-2000, USA)을 이용하여 PM_{2.5} 및 가스상물질을 포집하였다. 47mm 멤브레인 필터(Zefluor, German Science)에 포집된 시료는 초순수(18MΩ이상)를 이용하여 추출한 뒤에 IC(Dineox-100)를 이용하여 음이온과 양이온을 분석하였고, 측

정은 1일 간격으로 진행하였다. Figure 17는 주요 이온성분으로 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 에 대하여 직접포집(굵은선)과 연속포집(점) 그리고 가스상물질(얇은선)에 대한 측정결과를 나타내고 있다. 연속측정의 경우 1시간 단위의 측정결과를 보여주고 있으며, 직접포집은 1일 측정결과를 나타내고 있다. Figure 18은 측정결과를 확률밀도함수로 변환하여 나타내었다. 비교적 밀도함수의 peak 분포는 비교적 유사한 농도범위에 걸쳐 있음을 확인 할 수 있었다. 특히 필터의 경우 24시간동안 시료를 포집하면서 발생하는 이온성분의 휘발이 크게 작용할 것으로 판단되어, 향후 연속측정과 직접측정의 보다 정확한 평가를 위해서 측정간격을 3시간 간격으로 하여 검토할 예정이다.

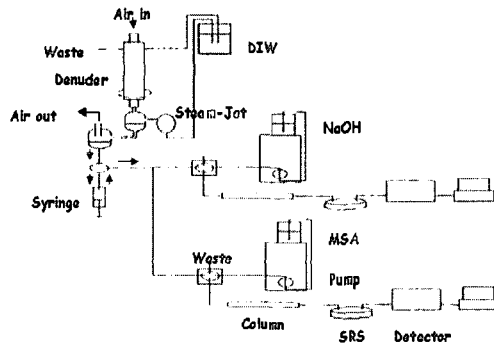


Fig. 16. Schematic diagram of URG 9000 Series Ambient Ion Monitor & ICS-1000.

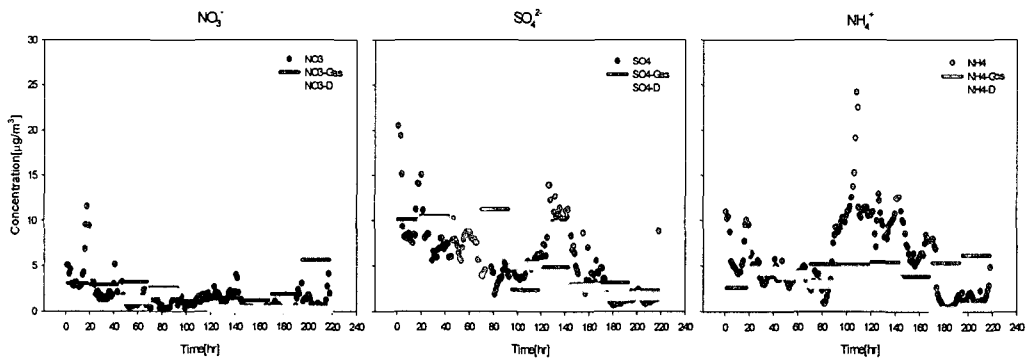


Fig. 17. Variation of major ion concentration(dot: continuous monitoring, bar: direct $\text{PM}_{2.5}$ sampling, thin bar: direct denuder sampling).

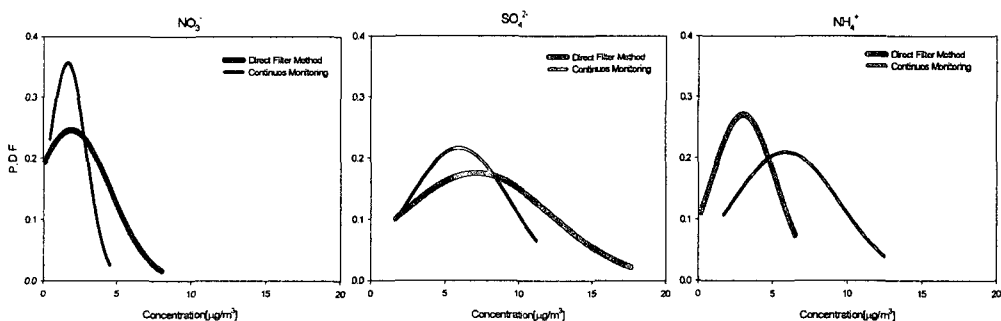


Fig. 18. P.D.F curves compared with direct and continuous method for ion.

5. 2 탄소연속 및 직접측정 결과 비교

탄소연속측정장비(Carbon Analyzer, for field, Senset)는 NIOSH 5040에 기반을 둔 열광학적분석방법(Thermal/Optical Transmittance Method)으로, 실시간으로 OC와 EC를 측정할 수 있다. 장치의 유입 전단에 PM_{2.5} 사이클론 분립기를 설치하여 PM_{2.5}이하의 입자상물질을 포집하였다. 이 분석장치는 단계적으로 온도를 승온 및 강하 시킬 수 있으며, 최근 대기중 입자상 OC와 EC를 분석하는데 광범위하게 적용되고 있으며, Figure 19 에 측정장치의 분석 크로마토그램을 보여주고 있다. 직접측정법으로 직접 포집방법은 Cyclone filter pack(URG-2000)을 이용하여 1일 간격으로 PM_{2.5}를 Quartz(Whatman) 여지에 포집하였으며, 이것을 탄소분석장비(Carbon Analyzer, for lab, Senset)로 분석하였다. 이 분석방법은 포집된 시료를 1.5 inch²의 커팅기를 이용하여 시료를 분취하여 헬륨과 산소가 주입되는 오븐에서 고온으로 연소시킨후 탄소성분을 메탄으로 전환한 후 FID로 검출한다. 매 시료의 분석이 완료된 후 외부 표준가스(CH₄ 5%)가 주입되어 교정을 수행한다.

직접 측정방법에 의한 중복분석결과 Figure 20에서와 같이 R²이 각각 OC 0.967, EC 0.986으로 나타났다. Figure 21은 연속측정결과에 대한 OC와 EC농도 분포를 비교하였고, OC에 대한 연속 및 직접측정결과를 Figure 22에 나타내었고, 직접 및 연속측정장치간의 상관성은 R²이 약 0.73으로 나타났다. 보다 정확한 비교 및 검증을 위해서 이온성분에서와 같이 탄소성분도 측정시간간격을 3시간 간격으로 하여 직접측정과 연속측정 방법을 비교할 예정이다.

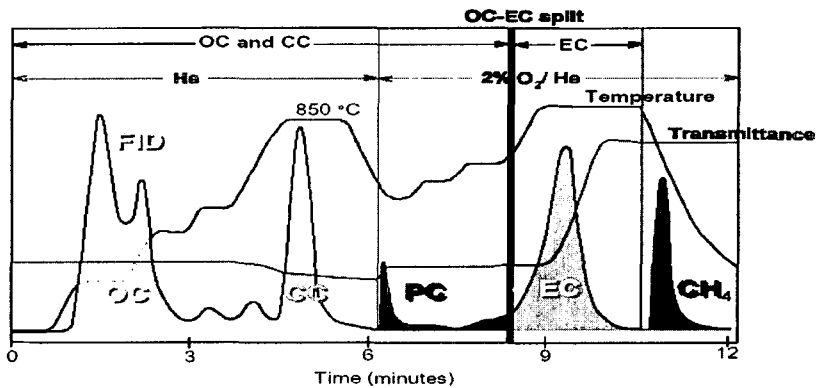


Fig. 19. Thermo-gram for filter sample containing OC, CC and EC.

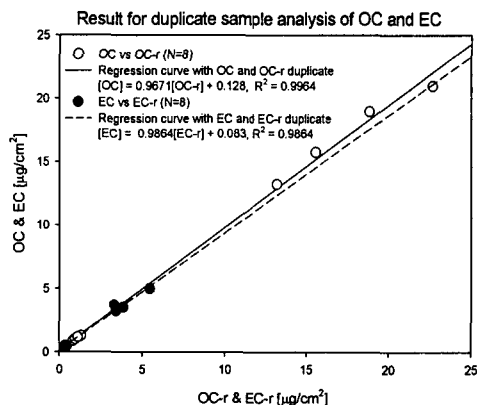


Fig. 20. Correlations between duplicate samples on analysis of carbon compounds.

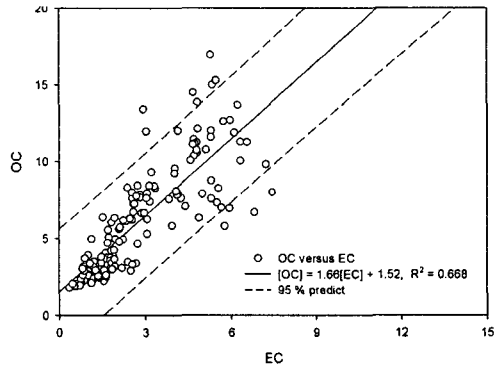


Fig. 21. Scatter diagram of OC and EC by continuous monitoring.

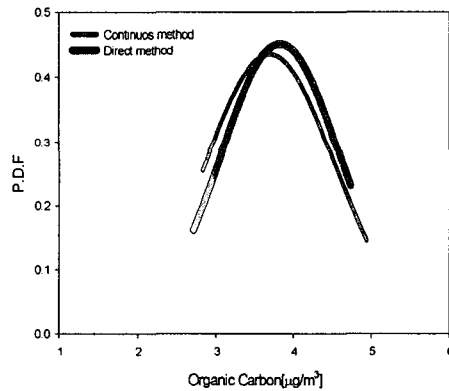


Fig. 22. P.D.F curves compared with direct and continuous method for organic carbon.

참고 문헌

- 1) 환경부, 환경백서, 11-1480000-000586-10 (2004).
- 2) 통계청, 한국통계연감, 제 49호 (2002).
- 3) 서울시, 서울통계연보, 제 42회 (2002).
- 4) 국립환경연구원, 배경농도지역 장거리이동오염물질 집중조사 (2003).
- 5) 환경부, 대도시 대기질 관리방안 조사연구 (2003).
- 6) 강충민, 이혁수, 선우영, 1997년 겨울철 및 여름철 기간 중 서울시 미세입자의 수용성 이온성분 특성, 대한환경공학회지 24(7), (1997).
- 7) 백남준, 이종훈, 김용표, 문길주, 1994년 6월 서울지역 시정장애의 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 12(4), 407-419 (1996).
- 8) 한진석, 김병곤, 김신도, 1994년 수도권 지역에서의 시정과 미세 입자상물질 화학조성과의 관계해석, 한국대기보전학회지 (1996a).
- 9) 한진석, 김신도, 서울시 대기중 입자상 오염물질의 조성에 관한 연구, 한국대기보전학회지 (1996b).
- 10) 김경원, 김영준, 에어로졸의 준실시간 관측에 의한 여름철 도시지역 시정감쇄 현상의 광화학적인

- 특성분석, 한국대기환경학회지, 19(6), 647~661. (2003).
- 10) Charlson, R.J., Schwartz, S.E., Hales, J.M., Cess, R.D., Coakley, J.A. Je, Hansen, J.E. and Hofmann, D.J. "Climate forcing by antropogenic aerosols," Science, 255, 423~430(1992).
 - 11) Cabada J.C., Pandis S.N., Robinson A.L., Sources of Atmospheric Carbonaceous Particulate Matter in Pittsburg, Pennsylvania, J. AWMA. 52, 732-741 (2002).
 - 12) Hsin-Chung Lu, The statistical characters of PM₁₀ concentration in Taiwan area, Atmospheric Environment 36, 491-502 (2002).
 - 13) Kim, J.H., Kim. S.D., Kang. C.H. and Kang G.U. Chemical properties of PM_{2.5} and PM₁₀ at Seoul area during Wintertime. Proceeding The 5th Korean Conference on Aerosol and Particle Technology, 61-62 (2003).
 - 14) Kim K.W., Kim Y.J., and Oh S. J. Visibility Impairment during Yellow Sand Periods in the Urban Atmosphere of Kwangju, Korea, Atmos. Environ., 35-30, 5157-5167 (2001).
 - 15) Malm W.C., Molenaar, J.V., Eldred R.A., and Sisler, J.F. (1996) Examining the relationship among atmospheric aerosols and light scattering and extinction in the Grand Canyon area, J. Geophys. Res., 101, 19,251-19,265.
 - 16) Silvia E. D. Aerosol impacts on visible light extinction in the atmosphere of Mexico City, The Science of the Total Environment, 287, 213-220 (2002).