

아산지역의 황사/비황사시 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도특성에 관한 연구

정진도[†] · 황승민* · 최희석**

호서대학교 환경공학과 · *호서대학교 벤처전문대학원 보건환경학과 · **호서대학교 대학원 환경공학과

(2008년 8월 6일 접수, 2008년 10월 29일 채택)

A Study on the Characterization of PM_{2.5}, PM₁₀ Concentration at Asian and Non-Asian Dust in Asan Area

Jin-Do Chung[†] · Seung-Min Hwang* · Hee-Seok Choi**

Department of Environmental Engineering, Hoseo University

**Department of Health Environment, Graduate School of Venture, Hoseo University*

***A Graduate student at Department of Environmental Engineering, Hoseo University*

ABSTRACT : The characterization of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration is considered by analysis of ionic and heavy metal component to measured suspended particle at atmosphere in Hoseo university of Asan area. The variation of concentration is studied at the periods of asian dust occurred. In asian dust, the PM_{2.5} ratio is decreased from 79.7% to 40.1%, whereas the size-classified mean concentration of suspended particle is increased largely. It is found that the PM_{2.5} ratio is decreased relatively because the coarse particle is increased largely according to the analysis of the mass concentration to divide the fine and coarse particle on 2.1 μm basis. It is observed that the Ca²⁺ ion is about 40 magnifications and Na⁺, SO₄²⁻ ion is increased in sequence in coarse particle, whereas the variation of ionic concentration is slightly increased in the fine particle. Furthermore, Mn, Fe, Zn, and Al are increased in sequence as the result of heavy metal component analysis, and Al is shown the most increased as mass concentration.

Key Words : Asian Dust, PM_{2.5}, PM₁₀, Ionic Component, Heavy Metal Component

요약 : 아산 호서대 지역에서 대기 중 미세먼지를 측정하여 PM_{2.5}와 PM₁₀의 이온성분과 중금속성분 분석을 통해 농도 특성을 분석하고 황사 발생에 따른 농도특성 변화를 관찰하였다. 황사시 미세먼지의 입경별 평균농도는 비황사시에 비해 큰 증가를 보였으나, PM_{2.5} 비율은 79.7%에서 40.1%로 감소하였다. 이러한 원인은 2.1 μm를 기준으로 조대 입자와 미세 입자로 구분하여 질량농도를 분석한 결과 황사시 조대 입자가 크게 증가하여 PM_{2.5} 비율이 상대적으로 낮아지기 때문인 것을 알 수 있었다. 황사시 이온 성분 농도의 변화는 미세입자 영역에서 큰 변화를 보이지 않았으나 조대입자 영역에서는 Ca²⁺이온이 약 40배 정도 증가하였고 Na⁺, SO₄²⁻이온 순으로 높은 증가율을 나타내었다. 또한, 중금속 성분의 분석 결과 황사시 Mn, Fe, Zn, Al 순으로 증가폭이 컸으나 질량농도로 보았을 때 Al이 가장 큰 증가량을 보였다.

주제어 : 황사, PM_{2.5}, PM₁₀, 이온 성분, 중금속 성분

1. 서론

기후학적으로 편서풍대에 위치한 우리나라는 서쪽에 위치한 중국으로부터의 에어로졸 및 대기오염물질의 유입 가능성이 매우 크며, 특히 봄철에 중국이나 몽골등지에서 발원한 흙먼지 등이 서풍기류를 타고 유입되는 황사 및 에어로졸에 의해 거의 주기적으로 피해를 입고 있는 실정이다.¹⁾ 발원지에서 배출되는 황사의 양을 100%라 할 때 보통 30%가 발원지부근에 재침적되고, 20%는 주변 지역으로 수송되며, 50%는 장거리 수송되어 한국, 일본, 태평양 등에 침적되는 것으로 알려져 있다.²⁾ 이러한 에어로졸은 대기 중 가스상 오염물질의 응축 및 입자상 오염물질과의 반응을

통하여 2차 오염물질을 생성하며 주요성분은 유기물질과 수용성 이온성분으로 구성되어 있다.

일반적으로 대기 중 에어로졸의 크기는 0.1 μm에서부터 100 μm 이상까지 다양한 크기의 입자가 존재하며, 이 중 2.5 μm 이상의 조대 입자는 대기 중에서 체류 시간이 짧고 호흡시 비강에서 걸러지기 때문에 인체에 대한 피해는 상대적으로 적은 편이다. 그러나 입자 크기가 2.5 μm 이하인 미세입자는 체류 시간이 길뿐 아니라 호흡기를 통하여 흡입시 천식과 안질환, 폐암 등 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다.³⁾

우리나라의 경우 최근 일부 대기환경 규제오염물질의 농도는 하향추세에 있지만, 국민들이 느끼는 체감 오염도는 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 또한 황사 및 미세먼지의 농도 뿐 아니라 황사 중에 포함된 중금속 성분의 농도와 종류에 대한 관심이 높아지고 있다. 일반적으로 황사 성분

[†] Corresponding author

E-mail: jdchung@hoseo.edu

Tel: 041-540-5392

Fax: 041-540-5394

은 Si, Al, K, Ca, Na, Ni 등 광물성 물질과 유기물, 황산염 등으로 구분되며, 광물성 물질은 황사 발원지에서 직접 수송되며 나머지는 이동 과정에서 포함되어진 것으로 분석된다.^{4,5)} 더욱이 황사는 발원지로부터 약 5.5 km의 고도에서 강한 편서풍을 타고 이송되는데 1차 발원지인 경우 보통 2~5일을 이동하여 한반도에 영향을 주나, 2차 발원지인 경우 1~2일 이내에 영향을 주는 것으로 최근 연구에서 밝혀졌다.⁶⁾ 이러한 현상은 환경에 대한 관심을 고조시켜 대기오염문제를 해결하기 위한 기술적, 경제적, 행정적 투자와 병행하여 많은 연구들을 활성화시키는 계기가 되었으며, 대기오염 피해로 인한 건강 및 복지손실을 최소화하고 산업체의 경제적 손실을 최소화하기 위하여 합리적인 평가에 주력하고 있다.

우리나라에서는 1995년에 10 μm 이하의 미세먼지에 대한 환경기준(PM₁₀)을 24시간 평균 150 μg/m³과 연평균 80 μg/m³으로 설정하였으며, 2001년에는 연평균 기준을 70 μg/m³으로 강화하였고, 2007년부터는 50 μg/m³으로 그 기준을 더욱 강화하여 엄격한 대기질 관리를 실행하고 있다. 최근에는 PM₁₀보다 PM_{2.5}에 대한 인체 유해성이 더 심각한 것으로 보고되고 있어 미국 등 일부 선진국에서는 이미 2.5 μm 이하의 미세먼지에 대한 대기환경기준을 설정하여 규제하고 있다.⁷⁾ 이러한 국제정세에 맞춰 국내 에어로졸 및 대기오염물질의 농도 변화를 이해, 예측하기 위해서는 지속적인 관측 및 연구는 필수적이라 할 수 있지만, 국내 각 지역별로 미세입자에 대한 지속적인 연구를 통한 자료 축적이 미비한 실정이다. 또한 충청남도 아산지역은 지리적 특성 때문에 중국으로부터 불어오는 황사의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있으며, 따라서 이 지역에서의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도특성에 관한 연구는 매우 중요한 것으로 생각된다. 이에 본 연구에서는 아산지역 환경대기 중의 미세먼지의 질량농도를 계산하고 황사와 비황사 기간으로 나누어 이온성분 및 무기 이온성분을 분석하여 그 상대적인 분포 특성을 파악하고, 미세먼지의 경향 및 특성을 분석함으로써 지속적으로 조사, 분석 할 수 있는 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 측정 및 분석 방법

2.1. 측정 지점

Fig. 1에 시료 채취 장소를 나타내었다. 시료 채취는 충청남도 아산시 배방면에 위치한 호서대학교 중앙도서관 건물 5층 옥상부지에서 포집하였다. 이 측정 지점은 건물이나 수목 등의 장애물이 없고 지상의 흙, 모래가 날리지 않는 곳이며 그 지역에서 비산먼지의 농도를 채집할 수 있는 곳이다. 측정대상 지역인 호서대학교는 아산시의 동쪽 경계 지역으로 서쪽과 남쪽으로는 산지가 형성되고 있고, 동쪽과 북쪽에는 주거지역이 위치해 있다.

시료 채취는 풍속이 약하고 맑은 날을 대상으로 이루어졌으며 매일 13시부터 익일 13시까지 24시간 연속 측정하였고, 조사 전일 또는 조사당일 비가 오거나 풍속이 10 m/sec 이상인 경우에는 대표값을 나타 낼 수 없으므로 채취하지 않거나 다음날 채취를 실시하였다. 또한 시료의 포집은 24시간을 기준으로 하였으며, 기상 조건 등 부득이한 경우에 있어서는 최소 20시간 이상 포집된 시료를 분석 대상으로 하였다.

입자상 물질 및 중금속 성분들의 시료 채취를 위해 2007년 4월 1일부터 5월 11일까지 황사·비황사 일을 포함하여 총 14개의 시료를 채취하였다. 측정시 기상상태는 기상 측정 장비(Portable AWS NOMAD, Apmkorea Eng. Co., Ltd.)를 사용하여 측정하였다. 측정 기간 동안 풍향은 서풍, 북서풍 계열이 주풍향으로 나타났으며, 평균 풍속은 1.9 m/sec, 평균 상대습도는 46%, 평균 기온은 10.4°C였다.

2.2. 시료 포집 및 분석

시료 포집시 부유먼지의 입경별 농도를 알아보기 위해 high volume air sampler에 6 stage high volume cascade impactor (Model 236, Andersen Co., Ltd.)를 적용하여 포집하였다. 시료 포집에 사용된 cascade impactor의 절단입경은 10.2 μm, 4.2 μm, 2.1 μm, 1.4 μm, 0.73 μm, 0.41 μm이다. 시료 채취 유량은 1.4 m³/min (±1 m³/min)의 유속으로 24시간 연속 채취하는 것을 원칙으로 하였다. 또한 시료채

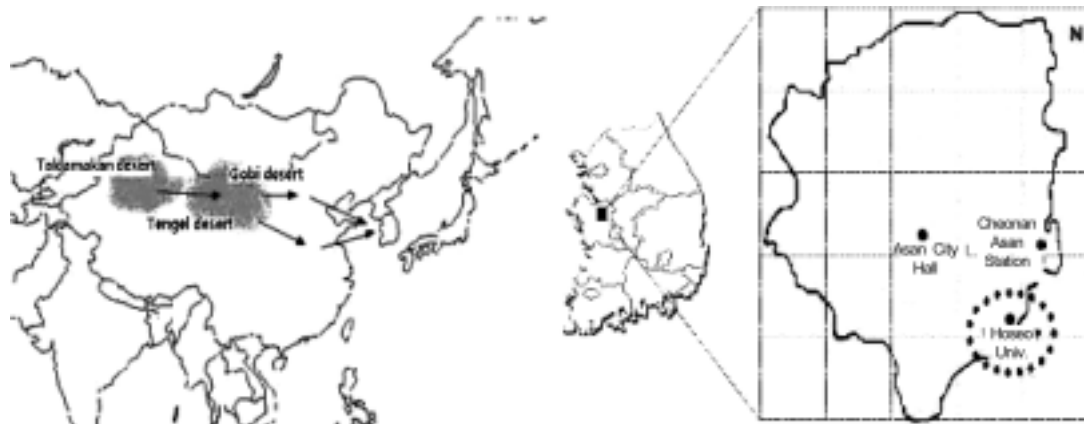


Fig. 1. Location of measurement site, Hoseo University in Asan area.

Table 1. Operation conditions of ICP-OES spectrophotometer

RF power (kW)	1.2
Plasma flow (L/min)	15.0
Auxiliary flow (L/min)	1.5
Nebulizer flow (L/min)	0.75
Wavelength (nm)	Ti : 337.280 Al : 394.401 Fe : 261.187 Zn : 207.908 Cr : 266.602 P : 213.618 As : 193.696 Mn : 257.610 V : 292.401 Ni : 231.604 Pb : 220.353 Se : 196.026

취 전후 필터는 데시케이터 내에서 48시간 항량한 후 무게를 측정하였다.

이온 성분 분석을 위한 전처리는 cascade impactor의 유리섬유 여과지에 의해 포집된 시료 중 2.1 µm를 기준으로 조대입자와 미세입자로 나누어 여과지를 2등분하여 플라 스틱 vial에 넣은 후 초순수 용액으로 전처리 하였다. 또한 수정섬유 여과지(20.3 × 25.4 cm)에 포집된 시료는 47 mm 편지로 절단하여 전처리하였으며, 초음파 추출기와 진탕기(200 rpm)에 각 1시간동안 vial을 넣어 이온성분을 추출한 후 24시간 동안 4°C의 상태에서 보관하였다. Ion chromatography (ICS 90, Dionex Co., Ltd.)를 사용하여 추출된 이온성분을 분석하였으며, 분석한 이온성분의 종류는 Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺의 양이온 5가지와 Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻의 음이온 4가지 성분으로 총 9가지 수용성 이온성분을 분석하였다.

중금속 성분 분석을 위한 전처리에는 질산 전처리법을 이용하였다. 전처리가 끝난 시료는 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, VISTA-PRO, VARIAN Co., Ltd.)를 사용하여 Ti, Al, Fe, Zn, Cr, P, V, As, Mn, Ni, Pb, Se의 12개 중금속 성분을 분석하였다. 분석된 중금속성분의 농도는 공시료 값들에 대하여 보정 하였다. 중금속 분석을 위한 ICP-OES의 측정 조건은 Table 1에 나타냈다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입경별 평균 질량농도

대기 중 입경별 질량농도를 알아보기 위해 cascade impactor를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 질량농도 측정결과를 보면 비황사(NAD, Non-Asian Dust)일 평균 TSP는 59.3 µg/m³, PM₁₀은 53.6 µg/m³로서 현재 대기환경 기준치(하루 평균)인 100 µg/m³ 보다 낮은 농도를 보인 것을 알 수 있다. 그러나 황사(AD, Asian Dust)일 경우 TSP와 PM₁₀은 각각 605.9 µg/m³, 375.8 µg/m³로서 대기 환경 기준을 3배 이상 넘어선 수치를 나타냈다. 아직 까지 우리나라에서는 PM_{2.5}에 대한 규제치가 없지만 미국의 24시간 환경 기준치(15 µg/m³)와 비교했을 때 2.8배가량 높은 42.7 µg/m³의 농도가 측정되었다. 또한 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 비율 PM_{2.5}/PM₁₀(%)은 황사시 40.1%로 비황사시의 79.7%와는 큰 차이가 나는 것을 알 수 있다.

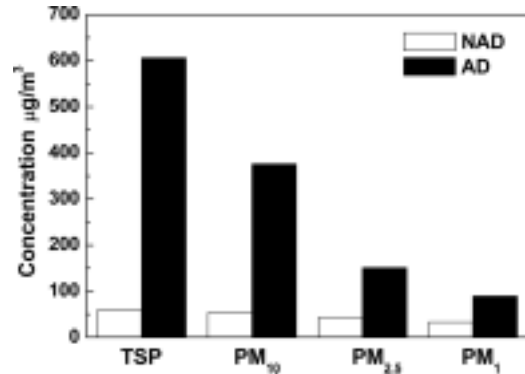
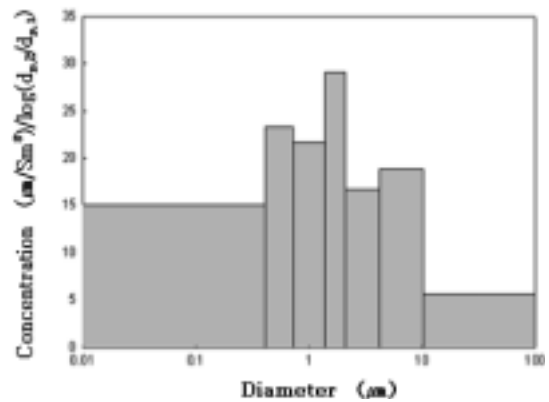


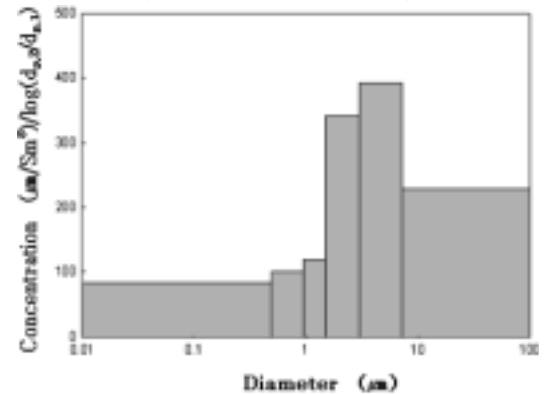
Fig. 2. Comparison of concentrations per diameter between AD (Asian Dust) and NAD (Non-Asian Dust).

3.2. 입자 분포도

Fig. 3은 비황사시와 황사시의 입자 분포도의 결과를 나타낸 것이다. 비황사시에는 1 µm를 기준으로 조대입자와 미세입자 양쪽 모두 농도가 증가했다가 감소하는 전형적인 도심지의 입자분포도인 이산형 분포를 나타내고 있다. 그러나 황사시에는 조대입자 영역으로 갈수록 입자분포가 증가하는 단일분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 살펴본 입경별 평균 질량농도의 PM_{2.5}/PM₁₀(%)의 결과에서도 알 수 있듯이 황사시에는 미세입자와 조대입자의 농도가 모두 증가하지만 미세입자보다 조대입자의 농도가 현저히 증가하는 것으로 생각되어진다.



(a) NAD (Non-Asian Dust)



(b) AD (Asian Dust)

Fig. 3. Mass size distribution of atmospheric particles.

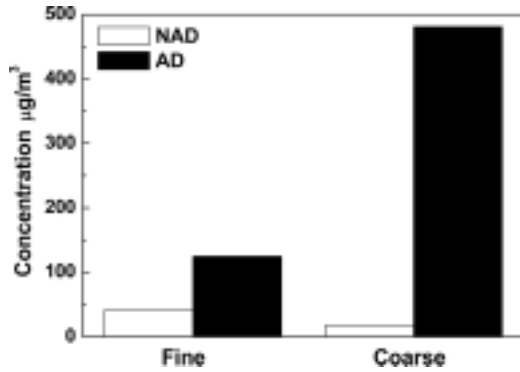


Fig. 4. Mass size distribution of atmospheric particles.

이와 같이 입자의 증가율을 비교하기 위하여 포집된 시료의 먼지 입경 중 2.1 µm를 기준으로 미세입자 영역(fine)과 조대입자 영역(coarse)으로 나누어 황사시와 비황사시의 질량농도의 증가율을 Fig. 4에 나타내었다. 조대입자영역은 비황사시에 17.8 µg/m³의 질량농도를 나타냈으나 황사시에 481.1 µg/m³을 나타내 27.8배의 높은 증가율을 보였으며, 미세입자영역은 비황사시 41.4 µg/m³에서 황사시 124.8 µg/m³로 약 3배 정도의 증가율을 보였다. 그러나, 이러한 결과에 대해서는 부유먼지가 중국으로부터 유입 되어질 때 기상적인 인자, 즉 응축-응집 등에 의한 입자의 입경변화를 고려하지 않으면 안 되며, 앞으로도 이러한 인자를 고려한 지속적인 조사 및 분석이 필요하다고 생각되어진다.

3.3. 이온 성분 분석

황사시와 비황사시의 이온성분 농도를 미세입자 영역과 조대입자 영역으로 나누어 Fig. 5에 나타내었다. 분석한 이온성분은 Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 양이온 5개 성분과 Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ 음이온 4개 성분으로 총 9개의 성분을 분석하였다. 분석결과를 보면 황사시 거의 모든 이온 성분이 미세입자 영역과 조대입자 영역에서 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 미세입자 영역에 비해 조대입자 영역에서 큰 폭의 증가를 보였는데 이는 황사시 부유먼지가 중국으로부터 이송되는 과정에서 공업화된 중국 동부지역을 거치면서 여러 성분들이 흡착되었기 때문이라고 생각되어진다.

총 9개의 이온성분의 분석결과를 보면 조대입자 영역에 있어서 Ca²⁺ 이온성분이 현저하게 증가하였으며, Mg²⁺ 이온은 가장 낮은 증가를 보였다. 특히 황사시 Ca²⁺ 이온농도는 비황사시와 비교하여 37배의 높은 값을 나타내었으며, 이는 토양기원 물질인 Ca²⁺ 이온이 황사시 중국으로부터 이송되는 부유먼지 중에 다량으로 포함되어 있음을 알 수 있다. 또한 음이온성분 중 12.5배의 증가를 나타낸 SO₄²⁻ 이온성분은 화산 폭발 등의 자연발생적인 요인에 의해서 존재하기도 하나, 대부분 자동차와 난방연료의 연소에 의해 인위적으로 발생한다. 따라서, 황사 발생지역과 측정지역의 특성을 고려할 때 SO₄²⁻ 이온성분의 증가는 이송과정 중의 자동차 배기가스가 가장 큰 영향을 끼쳤을 것으로 생각되며, 그 외 요인으로는 황사 발원지 근방의 토양 중에 포함되어 있는 CaSO₄에 의한 것으로 생각되어진다.

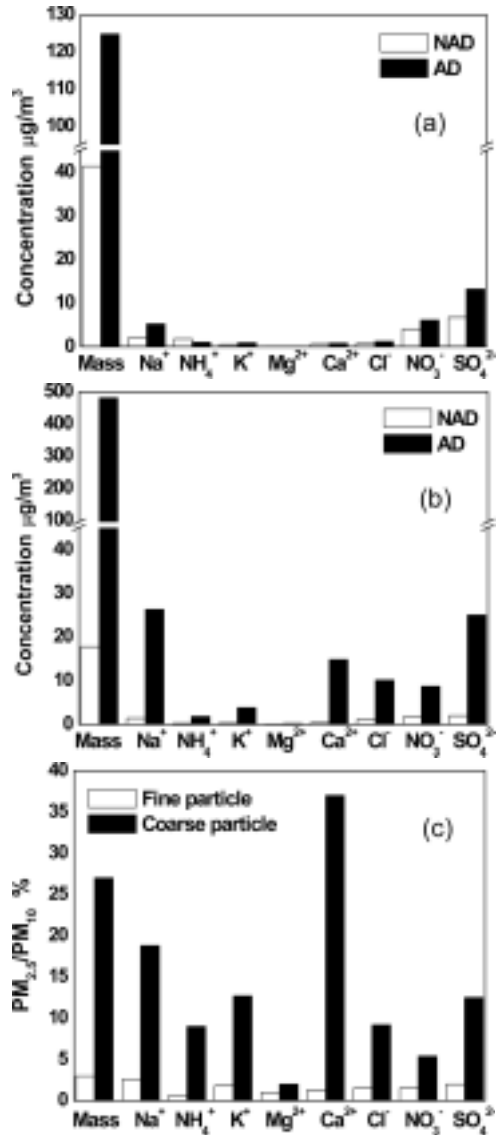


Fig. 5. Comparison of ionic component concentration between AD and NAD. (a) fine particles, (b) coarse particles, and (c) PM_{2.5}/PM₁₀ ratio

3.4. 중금속 성분 분석

Fig. 6에 황사시와 비황사시의 대기 에어로졸 중의 중금속 성분 농도를 나타내었다. 분석한 중금속 성분은 Al, Fe, Cr, Zn, P, V, As, Mn, Ni, Pb, Ti, Se의 총 12개이다. 분석결과 조대입자 영역은 비황사시에 Al, Zn, Ti, Fe, Mn 순으로 나타났고 황사시에는 Al, Zn, Fe, Mn, Ti 순으로 높은 농도치를 나타냈다. 한편 미세입자 영역에서는 비황사시 Al, Zn, Ti, Fe, Mn의 농도 순서를 나타냈고 황사시에는 Zn, Al, Fe, Mn, Ti 순으로 나타났으며, 그 외 다른 중금속 물질들은 아주 낮은 농도를 나타냈다. 이 중금속 성분들 중 가장 높은 농도치를 나타낸 Al 이온은 토양기원 물질로서 황사시 부유먼지에 지각성분들이 많이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.

중금속 성분들이 황사에 어느 정도의 영향을 받는지 알아보기 위해 황사-비황사 기간에 측정된 값에 대한 비(AD/

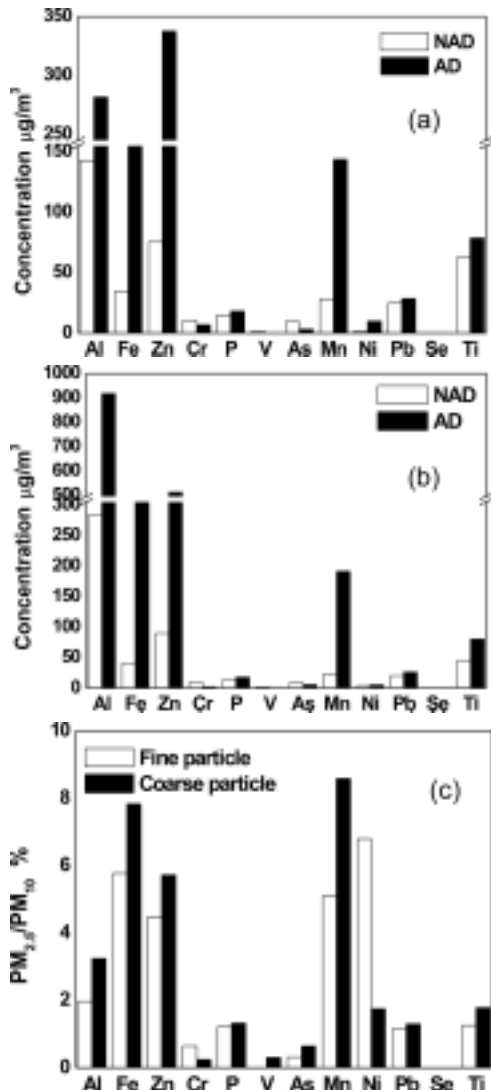


Fig. 6. Comparison of heavy metal component concentration between AD and NAD. (a) fine particles, (b) coarse particles, and (c) PM_{2.5}/PM₁₀ ratio

NAD)를 나타내었다. 중금속 성분에 대한 AD/NAD 비가 1을 넘을 경우 황사의 영향을 받았으며, AD/NAD 비가 1을 넘지 않을 경우에는 황사에 대한 영향이 없는 것으로 생각하였다. 그 결과, 조대입자 영역에서는 Mn 8.6, Fe 7.8, Zn 5.7, Al 3.2의 값을 나타내었으며, 미세입자 영역에서는 Fe 5.8, Mn 5, Zn 4.5, Al 2의 값을 나타냈다. 한편 미세입자 영역에서 Ni의 AD/NAD 값이 가장 높았으나 아주 낮은 농도이며, 그 외 Cr, V, As, Se 등의 이온은 검출이 되지 않았거나 오히려 황사시 보다 낮은 값을 나타내었기 때문에 황사와 연관이 없는 것으로 생각된다.

기존 연구의 발생원 항목 분류에 의하면 토양에 기인한 오염원은 Fe, K, Ca, Al 등이며, 유류 관련 오염원은 Zn, Mn, Pb, Ca, K 등이고 자동차 관련 오염원으로 K, Zn, Pb으로 분류하였다.⁸⁾ 이를 고려하였을 때 본 연구에서 농도가 높았던 Fe, Al 성분들은 지각성분에 의한 것이며, Zn, Mn, Pb 성분들의 경우 황사시 불어오는 기류에 인근 도

로에서 자동차 배기가스 등에 영향을 받았을 것으로 생각된다.

4. 결론

아산 호서대 지역에서 대기 중 미세먼지를 측정하여 PM_{2.5}와 PM₁₀의 이온성분과 중금속성분 분석을 통해 농도 특성을 분석하고 황사 발생에 따른 농도특성 변화를 관찰하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 황사시 미세먼지의 입경별 평균농도는 비황사시에 비해 큰 증가를 보였으나, PM_{2.5} 비율은 79.7%에서 40.1%로 감소하였다. 이러한 원인은 2.1 μm 를 기준으로 조대 입자와 미세 입자로 구분하여 질량농도를 분석한 결과 황사시 조대 입자가 크게 증가하여 PM_{2.5} 비율이 상대적으로 낮아지기 때문인 것을 알 수 있었다.
- 2) 황사시 이온 성분 농도의 변화는 미세입자 영역에서 큰 변화를 보이지 않았으나 조대입자 영역에서는 Ca²⁺이온이 37배 증가하였고 Na⁺, SO₄²⁻이온 순으로 높은 증가율을 나타내었다.
- 3) 중금속 성분의 분석 결과 황사시 Mn, Fe, Zn, Al 순으로 증가폭이 컸으나 질량농도로 보았을 때 Al이 가장 큰 증가량을 보였다. 그 외 Cr, As, Ni, Se, V와 같은 유해중금속 성분은 일반 대기와 비슷하거나 오히려 낮은 농도 분포를 보였다.

참고 문헌

1. Chung, Y. S. and Yoon, M. B., "On the occurrence of yellow sand and atmospheric loadings," *Atmos. Environ.*, **30**, 2387~2397(1996).
2. Xiao, Y. Z., "A core project of the international geosphere-biosphere programme," pp. 6~10(1998).
3. U.S. EPA., National Air Quality and Emissions Trends Report, EPA-454/r-97-013, OAQPS, Research Triangle Park, NC 27711(1996).
4. 전병일, "2002년 부산지역 봄철 황사/비황사시 PM₁₀중의 중금속 농도 특성," *환경영향평가*, **12**(2), 100~101(2003).
5. 이용기, 김종찬, 최승석, 임홍빈, 최양희, 이수문, "황사 현상에 의한 대기오염물질의 농도분포 특성에 관한 연구," *대한위생학회지*, **17**, 71~78(2002).
6. 인희진, 이은희, 박순웅, "2002년 봄철에 관측된 황사사례에 대한 수치모의," *한국대기환경학회 추계학술대회*, pp. 91~92(2002).
7. 최희석, "아산지역에서 관측된 PM_{2.5}, PM₁₀ 농도 특성에 관한 연구," *호서대학교 석사학위논문*(2008).
8. Nitta, H., Ichikawa, M., Sato, M., Konishi, S., and Ono, M., "A new approach based on a covariance structure model to source apportionment of indoor fine particles in Tokyo," *Atmos. Environ.*, **28**(4), 631~636(1994).