

황사의 오염원분류표 개발을 위한 개별입자분석

Individual Particle Analysis for Developing a Source Profile of Yellow Sands

강승우·김동술

경희대학교 환경·응용화학부 환경학 및 환경공학전공 및 환경연구소

(2000년 8월 24일 접수, 2000년 10월 11일 채택)

Seung-Woo Kang and Dong-Sool Kim

Department of Environmental Science and Engineering School of Environment and Applied Chemistry and Institute for Environmental Studies, Kyung Hee University

(Received 24 August 2000; accepted 11 October 2000)

Abstract

To quantitatively estimate mass contribution of long-range transported yellow sand, their sources should be separated independently from various local soil sources having similar elemental compositions. While it is difficult to estimate total mass loadings of pure yellow sand by traditional bulk analysis, it can be clearly solved by an particle-by-particle analysis. To perform this study, two yellow sand samples and three local soil samples were collected by a mini-volume sampler. These samples were then analyzed using a scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive x-ray analyser (EDX) was used to obtain basic chemical information of individual yellow sand particles. A total of 19 elements in a single particle were measured to develop a source profile with newly created homogeneous particle classes (HPCs) as chemical variables. The present study showed that the yellow sand samples as well as three local soil samples were characterized with reasonably well created HPCs. Finally the mass fraction of each HPC in each sample was calculated and then compared each other.

Key words : SEM/EDX, yellow sands, individual particle analysis, receptor model

1. 서 론

대기 중 부유분진의 발생원은 자연적 발생원과 인위적 발생원으로 나눌 수 있다. 자연적으로 발생하는 분진은 토양기원입자, 해염입자 및 화산분출 활동에 의해 대기로 방출된 입자 등이 주종을 이룬다. 특히 바람에 의해 토양에서 배출된 입자의 양이 자연발생 분진양의 대부분을 차지하고 있으며, 이

양은 인위적 발생량 보다 많다(Joussaume, 1990).

지구 지표면의 약 10%를 차지하는 황토(loess)는 사막에서 발생하는 먼지폭풍으로 시정을 악화시키고, 흙비를 내리게 하며, 기관지 질환을 유발하는 등 인간의 건강 및 물질에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 이 중 0.1~10 μm 크기의 분진은 장거리 이동이 가능하다(Zhang, 1982; Duce *et al.*, 1980; Prospero and Carlson, 1972). 아프리카의 사하라 사막의 모래입자가 6,000의 대서양을 건너 남아메리카까지 이동하

는 현상은 이미 잘 알려져 있다(Chung, 1985). 이와 같은 장거리 이동현상은 지구규모로 일어나는 자연 현상이지만, 특히 황사현상은 동북아시아 및 한반도 대기에 직·간접적으로 영향을 주고 있다(국립환경연구원, 1998).

지역대기질 개선을 위한 관리정책을 수립하거나, 대기환경기준을 설정할 때, 비록 자연적 현상이지만 황사에 대한 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다. 황사는 일종의 토양기원오염원으로서, 우리나라에 미치는 황사만의 영향력 즉, 기여도를 추정하기 위해서는 지역적으로 고유한 토양분진의 영향을 분리추정하여야 한다. 하지만, 지역 토양과 황사의 화학적 성분은 유사하여 이를 통계적으로 분리하기란 커다란 어려움이 따른다. 또한 대기 중 분진에는 도로상의 비산분진과 같이 화학적으로 토양분진과 유사한 분진이 존재하기 때문에 분석상의 어려움은 가중된다(김동술, 1990). 따라서, 황사현상을 정량적으로 연구하기 위해서는 이를 유사 오염원과 차별화 될 수 있는 황사만의 고유한 변수 또는 확인자(marker)를 개발하여야 한다.

본 연구는 황사의 영향을 정량적으로 파악하기 위해 확인자 개발에 주력하였으며, 이를 위해 우선 황사시료를 채집하고 SEM (Scanning Electron Microscopy)과 EDX (Energy Dispersive X-ray Analyser)를 이용하여 개별입자분석을 수행하였다. 또한, 지역토양입자의 개별입자분석도 병행하여 황사와 더불어 비교·분석하였으며, 인위적으로 창출된 입자군(particle class)에 입각하여 황사의 오염원 분류표(source profile)를 작성하고자 하였다.

2. 연구대상지역의 현황 및 분석방법

2. 1 시료의 채집

황사기간 중 대기환경분진을 채집하기 위해서 PM-10 mini-volume portable sampler (Air Metrics Co., Model 4.1)를 이용하였다. 이 장비는 SEM/EDX 분석시 분진의 과다한 부하를 피할 수 있으며, 크기가 작고 가벼우며, 저소음이고 전지의 사용이 가능해 이동이 손쉬운 장점이 있다(Air Metrics, 1995). 채취기의 유량은 5 l/min으로 4시간 동안 가동하였다. 전자주사현미경을 이용한 입자별 분석은 전량분석(bulk analysis)과는 달리 입자의 특성을 여지와 함께 분

석해야 하기 때문에, 분진의 화학적 조성과 바탕이 상이한 여지를 사용하는 것이 중요하다. 본 실험에 사용된 여지는 Teflon membrane filter (diameter 47 mm, pore size 0.2 μm, Costar Co.)로, 채집 후 데시케이터에서 3~4일간 충분히 건조시킨 후 칭량하였다.

시료채취장소는 경희대학교 수원캠퍼스 자연과학대학 옥상 5층으로 주변의 장애물 또는 물리적 환경에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 곳이다. 시료의 채집시기는 1998년 4월 16일과 1999년 1월 25일 이틀로서 황사 기간 중이었으며, 시간대별로 수원지방 기상청에서 확인하였다. 그림 1은 서울시 광화문지역의 대기오염 자동측정망 자료(환경부, 2000)에 입각하여 도식한 것으로, 2차 시료채집기간 중 PM-10의 농도변화를 보여주고 있다. 같은 기간 중에 서울을 포함하여 전국적으로 극심한 황사현상이 발생하였다. 비록, 이 황사채취장소가 황사연구시 최적 장소는 아니었지만, 본 연구의 핵심과제를 수행하기에는 무리가 없었다.

한편, 황사와 국내의 지역토양분진을 서로 비교·분석하기 위해 총 3곳에서 흙을 채취하였다. 시료의 채집장소는 경희대학교 근처, 제주도 대기오염 자동측정장소가 있는 고산지역, 그리고 강원도 속초시 까치봉 근처였다. 이들 채취장소는 인적과 차량통행이 없는 지점으로 밭이나 과수원을 피하였으며, 식물 등이 없는 나대지의 흙을 채취하였다. 토양분진을 채취하고 분석하는 방법은 다양하며, 토양분진의 분석은 중금속 분석방법에 따라 샘플링의 방법도 다양하다(A.M. URE, 1995). 하지만, 이 방법들은 모두 전량분석에 입각한 분석법들이기 때문에 개별입자분석을 위한 토양분진의 채집방법을 개발할 필요가 있었다. 또한, 토양분진을 일반 대기환경에서 채집할 경우 타 오염원의 영향을 수용할 가능성도 있었다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 채취장소에서 흙을 일정량 채집하고, 실험실로 운송한 후, 우선, 표준체 (standard sieve)로 이용하여 처음에는 2 cm 체로 거르고, 1 cm, 500 μm, 270 μm 순으로 체로 걸렀다. 이 거른 흙을 일반 대기환경과 동일한 조건에서 여지 상에 채집하기 위해, 50 cm × 50 cm × 100 cm의 상자 내에서 다시 200 μm 체로 거르면서 mini-volume portable sampler를 가동하여 20분 동안 채집하였다.

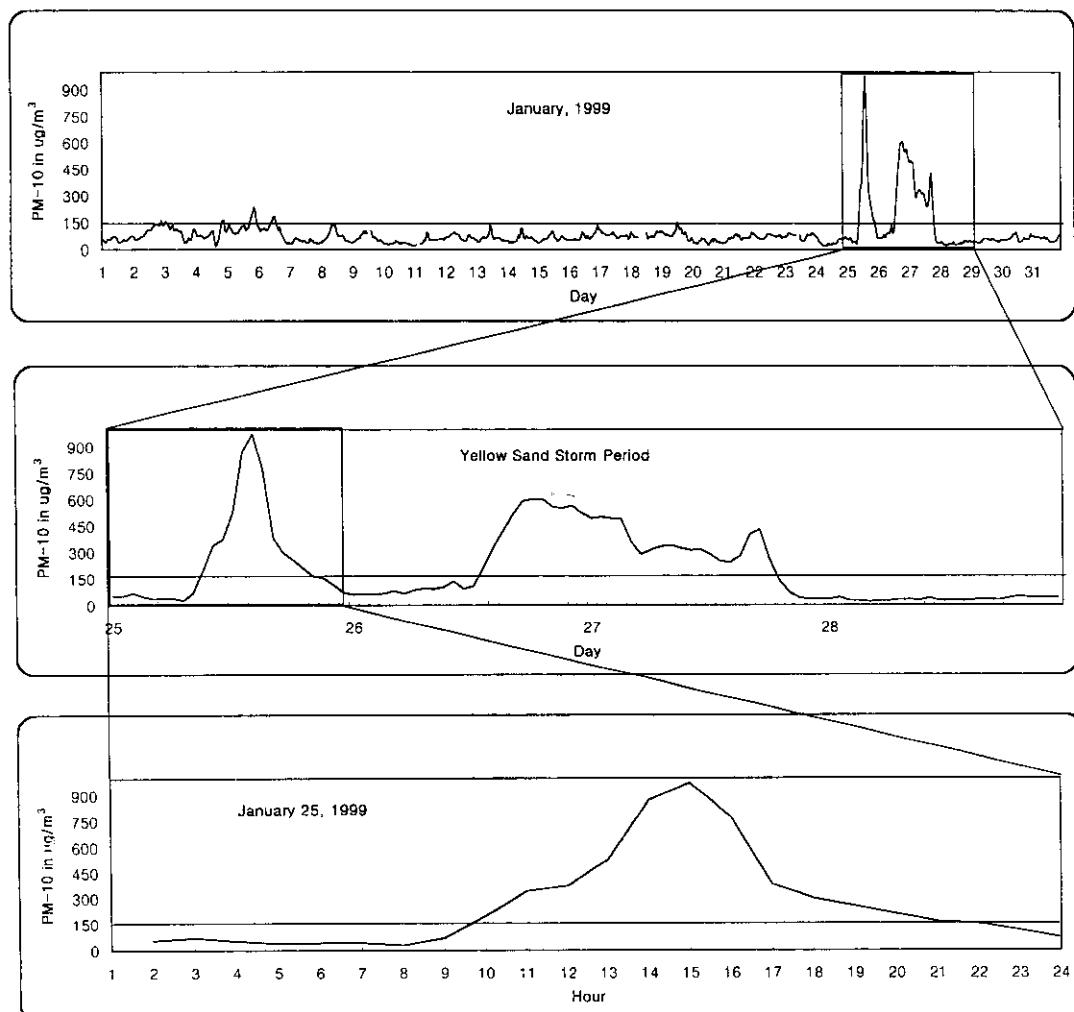


Fig. 1. Patterns of PM-10 concentration at Kwanghwamun site in Seoul during the yellow sand storm periods. Raw data obtained from the Ministry of Environment.

2. 2 시료의 전처리 및 물리적 분석

SEM 분석시, 절연체인 입자에 전하가 쌓이면 상이 찌그러지거나, 입자가 전자빔에 의해 타버려 재비산 되기 때문에 이를 방지하기 위하여 시료를 전도체인 물질로 코팅하였다. 코팅된 시료는 표면으로부터 이차전자와 역산란 전자의 방출이 커지고, 열에 강해지고, 입자의 부착력이 높아지며, 전하가 감소되거나 없어지기 때문에 더 나은 영상 분석을 수행할 수 있다(Lee, 1993). 본 연구에서는 분진여지를 건조시킨 후 Au로 코팅하였으며, 코팅 두께는

약 20 nm로 하였다.

개별입자분석에 사용된 SEM은 영국 Leica사의 Cambridge StereoScan 440으로 작동조건은 가속전압 20 kV, working distance 25 mm이고, 배율은 영상분석시 한 화소(pixel)가 차지하는 면적을 통일하고, 황사입자의 입경분포를 5,000배, EDX분석은 3,000배로 전체 분석에서 고정하였다. 분석할 황사입자와 토양분진의 대표성을 확보하기 위해 대기 공정시험법의 원형굴뚝측정점 선정법을 응용하였으며, 한 시료당 40개의 측정점에서 SEM을 조사하였

다. 측정점 선정에 관한 구체적 방법은 다음 문헌을 참고할 수 있다(김수환과 김동술, 1999). 본 연구에서는 각 측정점에서 광학직경(optical diameter)이 1 μm 이상 모든 입자를 개수하였다.

황사와 지역토양분진의 확인자로서 입자의 물리적 특성은 중요한 역할을 한다(한광인, 1995). SEM은 광학직경을 공기역학직경으로 환산하는데 필요한 물리적 변수와 형상정보를 제공한다(Casuccio and Janocko, 1983). SEM의 출력화면은 일정형식의 파일로 저장할 수 있으므로, 입자의 영상분석은 시간과 비용을 절약하기 위해 EDX에서 화학적 분석을 수행한 후, personal computer에서 수행하였다. 그림 2는 영상전환과정을 보여주고 있다. 즉, 초기에 도출된 Tiff 파일모드를 256 grey level 영상으로 단순화시키고 binary 영상으로 변환한 후, image tool program을 이용하여 분진 입자의 면적이 차지하는 총 화소수에 한 화소당 면적을 곱해 분진의 투영면적과 둘레를 산출하였다.

입자의 물리적 직경은 입자를 구형이라 가정하고 산출된 면적에 입각하여 계산하였으며(Terry, 1995), 공기역학직경 계산에 필요한 각 입자의 밀도는 개별입자의 intensity 분율에 각 원소의 고유밀도를 곱하여 개별입자의 밀도를 산출하였다. 각 입자에 대한 질량은 입자를 구형이라 가정하고 공기역학직경으로 부피를 구한 후, 밀도를 곱하여 계산하였다.

2.3 시료의 화학적 분석

입자의 개별분석 중 화학적 분석에 사용된 EDX는 SEM의 보조장치로 연결된 영국 Oxford사의 ISIS Link 400을 사용하였다. EDX분석으로 모든 입자를 분석하기에는 한계가 있었다. 또한, 현재 본 실험실을 비롯한 국내 EDX의 분석기술상 3 μm 미만의 입자들을 분석할 때 많은 불확실성이 존재하는 단점을 가지고 있었다. 본 연구에서는 시료당 40장의 SEM 영상을 확보한 후, 3 μm 이상의 입자만을 선정하고 EDX 분석을 수행하였다. 선정된 EDX의 분석 변수는 Na,

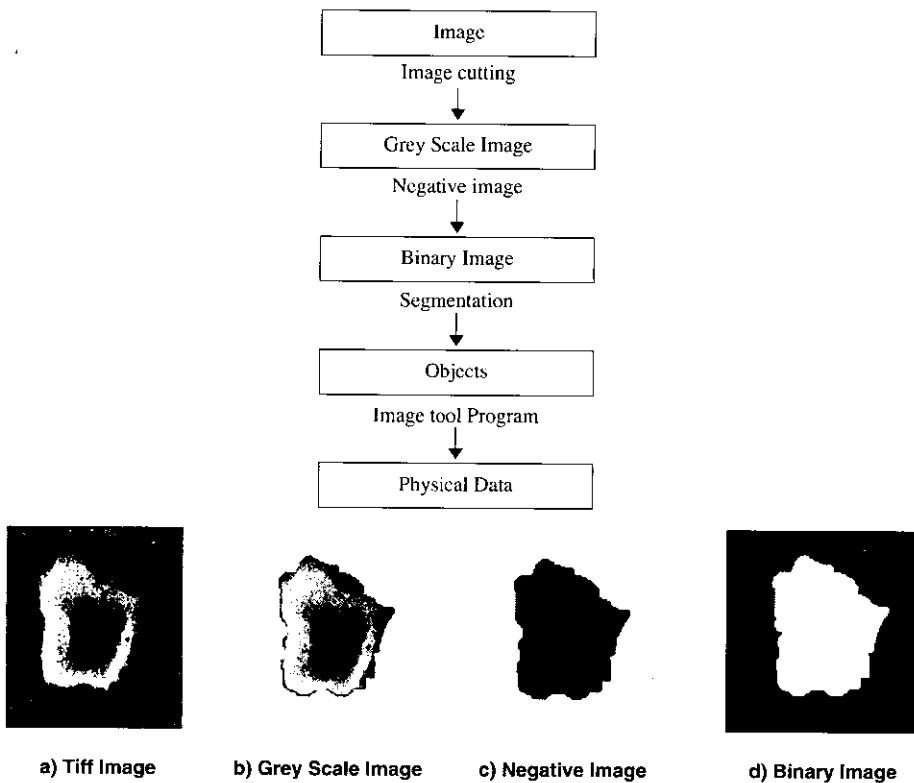


Fig. 2. Flow chart for step by step image analysis with image samples.

Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Pb 등 총 19개이었다.

각종 분석장비에서 얻어진 자료는 주변 배경(background)에 의한 잡음(noise)을 항상 가지고 있다. X-선 분석법 역시 이러한 잡음을 가지고 있으므로, 본 연구에서 후속될 통계분석이 용이하도록 이러한 잡음을 제거되어야 한다. 우선, 한 원소에 대한 x-선 count가 총 x-선 count의 제곱근의 두 배보다 작을 경우, 즉 95% 확률에 속하지 않을 경우 해당 원소의 x-선 count를 0으로 간주하였다(Crewe and Lin, 1976). 한편, x-선 count수가 입도에 따라 치우쳐 있으므로 최소한의 대칭형 분포로 만들기 위해 log 변환을 시도하였다. 또한, 각 원소 변수의 경우, 잡음제거 과정 중에 많은 0값이 생기므로 $\log(1+x)$ 변환을 수행하였다. 변환전의 x-선 count값은 1을 더한다고 하더라도 전체 값에 영향을 받지 않을 정도로 충분히 큰 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 황사의 입경분포 결과

황사의 입경분포를 파악하기 위해, 98년 4월 16일 황사시료(Y-1)와 99년 1월 25일 황사시료(Y-2)를 조사하였다. 우선, SEM 영상을 통해 개별입자의 개수와 입경분포를 구하였다. 개별입자의 개수는 Y-1의 경우 608개였으며, Y-2의 경우 1,206개가 조사

되었다. 그림 3은 입경분포도를 log scale로 표시한 것이다. 그 결과 Y-1의 평균 광학적경은 $2.6 \mu\text{m}$ 이었으며, Y-2는 $2.4 \mu\text{m}$ 로 Y-1이 Y-2보다 다소 크게 조사되었다. 한편, 공기역학적경의 경우 Y-1은 $3.6 \mu\text{m}$, Y-2는 $3.5 \mu\text{m}$ 로 조사되었다.

3.2 황사와 지역토양의 물리화학적 특성

황사의 입경분포 분석 결과에 따라, 황사입자와 지역토양과의 비교는 PM-10에 국한하여 비교 분석하였다. 본 연구에서 조사된 시료의 주요 원소는 Na, Mg, Al, Si, Br이었으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 황사의 경우, Na, Al, Si의 농도가 국내 토양입자 보다 높았으며, Mg는 모든 시료에서 농도가 비슷하였다. 한편, 속초와 제주지역의 토양입자에서는 Br 성분이 검출되었다. 이는 수원은 내륙이며, 속초와 제주는 해안지역이라는 지역특성 때문이라고 사료된다.

‘둘레 (perimeter)/공기역학적경’은 일종의 perimeter fractal 분석법으로, 둘레 외각선을 이루는 실제 입자의 투영도에 입각하여 입자의 “거칠도”를 시각적으로 간단히 표현할 수 있는 변수이다. Fractal 선이나 면의 특징은 자기유사도(self similarity)로서 거칠기의 정도를 나타내므로, 값이 크다는 의미는 표면의 굴곡이 심하고 거칠이 크다는 것을 의미한다(Kindratenko et al., 1994; Reist et al., 1989). 따라서, 수원토양입자와 황사입자만 비교할 때, 황사입자들이 수원

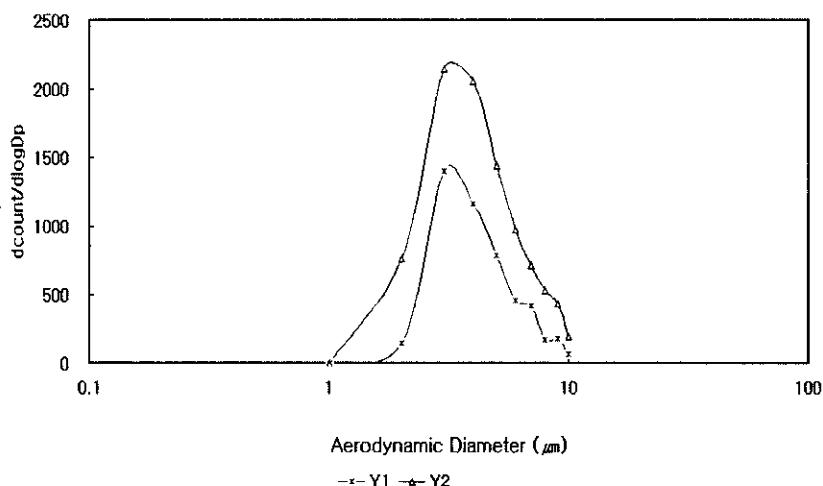


Fig. 3. Size distribution of 2 yellow sand samples in terms of aerodynamic diameter.

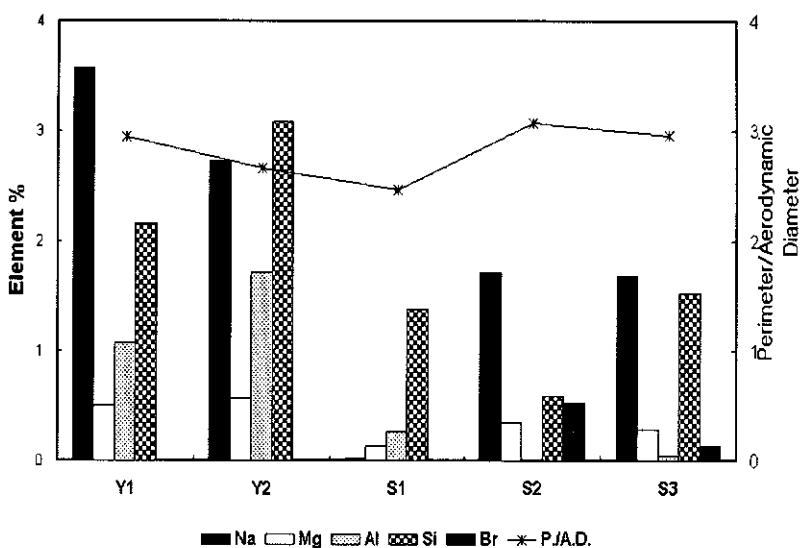


Fig. 4. Comparison of inorganic concentrations and a fractal parameter among samples.

토양입자보다 자기유사도 값들이 높기 때문에 황사만이 가지고 있는 독특한 변수로 사료되었으나, 지역의 혼소성을 배제하고 속초와 제주지역의 토양을 추가로 분석한 결과, 위의 사실을 재확인할 수는 없었다. 따라서, fractal 분석법으로 황사와 지역 토양입자를 비교할 때, 이 방법이외의 fractal 분석법의 개발이 필요하였다.

3.3 오염원분류표의 개발과정과 연구결과

일반적으로 현미경적 방법은 오염원의 정성적 확인에 이용되어 왔으며, 특히 SEM/EDX는 짧은 시간 안에 크기 변수와 화학적 조성을 포함하여 개별 입자에 대한 방대한 정보를 제공한다. 이러한 정보를 이용하여 개별입자를 유사한 집단으로 묶어, 오염원 확인자로서 입자군(particle class)이라는 화학적 변수를 창출한다면 새로운 오염원분류표를 개발할 수 있다(김동술과 Hopke, 1990). 본 연구에서 오염원분류표의 창출과정은 다음과 같이 수행되었다.

첫째, 본 연구는 시료 당 약 150개 입자에 대해 EDX로 분석하였으며, 2개 황사 시료와 3개 지역토양 시료를 대상으로 수행하였다. 둘째, EDX 분석 후, 모든 자료는 잡음제거과정과 로그 변환과정을 거쳐 전처리하였다. 셋째, 새로운 오염원분류표를 만드는 과정에서 가장 중요한 과정은 새로운 입자군

을 정의하고 창출하는 과정이다. 우선, 군집분석법을 이용하여 화학적으로 유사한 입자군을 일차적으로 도출하고 분류하였다. 이와 같은 일차적 분류는 군집분석 특성상 객관성이 결여될 수밖에 없었다. 따라서, 화학적 및 통계적으로 순수한 ‘순수 입자군’(homogeneous particle classes)을 정의할 필요가 있었다. 예를 들면, 화학적으로 유사하다고 할지라도 군집분석에서 높은 Si을 포함한 입자는 낮은 Si을 포함하는 입자와 완전히 달리 분류될 수 있다. 본 연구에서는 모든 입자군에 대하여 화학원소의 존재 유·무에 따라 유사성 여부를 판별하였다. 즉, 모든 입자의 구성성분이 같은 원소일 때 해당 입자군을 순수하다고 정의하였다. 이에 따라 변수로 19개 화학성분이 있다면, 입자군은 $2^{19}-1$ 개의 조합이 만들어 질 수 있다. 예를 들면, Al, Si, Mg의 단지 3개의 원소가 있을 때 가능한 입자군은 Al, Si, Mg, Al-Si, Al-Mg, Si-Mg 및 Al-Si-Mg 등 7개의 입자군이 형성된다.

우선, 19개 화학원소를 변수를 이용하여 응집위계 군집분석법을 응용한 후, 각 원소의 값을 내림차순으로 배열하면서 같은 배열순을 가진 입자군을 동일한 입자군으로 분류하였다. 이와 같은 과정을 통해, 독립된 개별입자의 화학적 정보를 새로운 입자군 정보로 변환할 수 있었다. 각 시료에서 도출된

입자군의 수는 S-2에서 20개로, 가장 많았고, S-1은 7개로 가장 적었다.

황사입자와 지역토양에 대한 PM-10 오염원분류표를 표 1에 제시하였다. 황사시료 Y-1에는 14개, Y-2에는 15개 입자군이 창출되었으며, 각 입자군에 대한 질량분율이 제시되었다. 각 시료의 질량분율은 Y-1의 경우 Na-Si-Mg 입자군이 0.385, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.203, Na-Al-Si-Mg 입자군이 0.112로 높게 조사되었다. 또한, Y-2의 경우, Si-Al-Na-Mg 입자군이 0.283, Al-Si-Na-Mg 입자군이 0.269, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.152로 높게 조사되었다. 따라서, Na-Si-Al-Mg 입자군이 황사오염원에서 공통적으로 높게 조사되므로 대표적인 입자군이라 할 수 있었다.

한편, 지역토양의 경우, 시료 S-1(수원)은 7개 입자군, 시료 S-2(속초)는 20개 입자군, 시료 S-3(제주)는 15개 입자군으로 분류되었다. S-1은 Si 입자군이 0.515, Si-Mg 입자군이 0.231으로 높게 조사되었고, S-2는 Na-Si-Mg 입자군이 0.205, Mg 입자군이 0.104, Na-Mg 입자군이 0.100으로 각각 조사되었으며, S-3은 Na-Si-Mg 입자군이 0.204, Si-Na-Mg 입자군이 0.123, Na-Si 입자군이 0.120으로 높게 조사되었다. 각 지역토양 입자군에는 공통적으로 높게 조사된 입자군이 없으므로, 지역마다 특징적인 입자군이 존재한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 황사와 해안지역토양 입자군에서 Na-Si-Mg 입자군이 모두 높게 조사되었다.

본 연구를 통해 입자군이라는 변수를 창출할 경우, 화학적으로 유사한 오염원을 독립적으로 완벽하게 분리할 수 있었다. 하지만, 이러한 수용방법론을 현장에서 응용하기 위해서는 다음과 같은 개선책이 마련되어야 한다. 우선, 인위적으로 창출된 입자군의 수를 합리적으로 감소시킬 필요가 있다. 즉, 창출된 변수의 수가 증가할수록 수용모델의 해상력은 증가하지만 모델의 신뢰도는 감소할 수 있기 때문에 오염원분류표의 화학종 (chemical species)을 합리적으로 체계화하고 규격화할 필요가 있다. 이를 위해서는 '순수입자군'에 대한 정의를 본 연구에서 수행한 것보다 더욱 구체화 되어야 한다. 또한, 이러한 방법론을 실용화하기 위해서는 개별입자에 대한 지역별, 광역별 오염원분류표가 확보되어야 한다.

Table 1. PM-10 mass fractions for 2 yellow sand samples and 3 local soil source samples.

Sources Classes	Y-1	Y-2	S-1	S-2	S-3
Al-Na-Si	0.012				
Al-Na-Si-Mg	0.017				
Al-Si			0.096		
Al-Si-Na-Mg		0.269			
Br-Mg				0.057	
Br-Na-Mg				0.045	
Br-Na-Si-Mg				0.026	
Br-Si-Na-Mg				0.014	
Mg			0.063	0.104	
Mg-Na				0.005	
Na				0.046	
Na-Al-Si-Mg	0.112	0.014			
Na-Br				0.063	
Na-Br-Mg				0.075	
Na-Br-Si-Mg				0.070	
Na-Mg				0.100	
Na-Mg-Br				0.038	
Na-Si	0.039			0.029	0.120
Na-Si-Al	0.013	0.003			
Na-Si-Al-Mg	0.203	0.152			
Na-Si-Br				0.010	
Na-Si-Br-Mg					0.090
Na-Si-Mg	0.385	0.033		0.205	0.204
Na-Si-Mg-Al		0.013			
Si			0.515		0.049
Si-Al			0.026		0.021
Si-Al-Mg		0.054			0.022
Si-Al-Mg-Na	0.008	0.014	0.032		
Si-Al-Na		0.021	0.037		
Si-Al-Na-Mg	0.047	0.283			0.030
Si-Br					0.020
Si-Br-Mg					0.024
Si-Br-Mg-Na				0.022	
Si-Br-Na-Mg					0.070
Si-Mg	0.020	0.018	0.231	0.015	0.084
Si-Mg-Na	0.015	0.009			0.040
Si-Na	0.047	0.006		0.008	0.072
Si-Na-Al-Mg	0.017	0.073			
Si-Na-Br-Mg					0.030
Si-Na-Mg	0.065	0.038		0.042	0.123
Si-Na-Mg-Br				0.024	
Classes number	14	15	7	20	15

4. 결 론

본 연구에서는 SEM/EDX를 이용하여 황사 및 지역토양분진의 개별입자분석을 수행하였다. 이 과정에서 황사의 광학적 및 공기역학적 평균 입경분포를 구할 수 있었으며, 개별입자에 대한 화학적 특성을 파악할 수 있었다. 또한, 이를 정보에 입각하여

토양관련 오염원을 분리 확인할 수 있는 방법을 개발하였으며, 새로이 창출된 화학변수 '입자군'에 입각하여 오염원분류표를 작성할 수 있었다. 본 연구를 통해 다음과 같은 구체적 결론을 얻을 수 있었다.

우선, 황사의 입경분포 결과, 평균 광학직경은 2.5 μm 로 추정되었으며, 공기역학직경은 3.6 μm 로 추정되었다. 한편, EDX 분석결과 황사의 주요원소는 Na, Mg, Al, Si였으며, Na, Al, Si의 농도가 국내 토양 입자보다 높게 조사되었다. 특히, 속초와 제주의 토양입자에서는 Br 성분이 검출되어, 내륙인 수원지역의 토양과는 차별적인 지역특성을 보였다. 한편, Perimeter fractal 분석을 수행한 결과, 황사와 지역토양간에 커다란 차이를 확인할 수 없었다. 황사와 국내지역토양에 대한 오염원분류표를 작성한 결과, 황사시료 Y-1에서는 Na-Si-Mg 입자군이 0.385, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.203, Na-Al-Si-Mg 입자군이 0.112로 높게 조사되었으며, 황사시료 Y-2는 Si-Al-Na-Mg 입자군이 0.283, Al-Si-Na-Mg 입자군이 0.269, Na-Si-Al-Mg 입자군이 0.152로 높게 조사되었다. 한편, 각 지역토양분진의 오염원분류표에서는 공통적으로 높게 나타나는 입자군이 없었으며, 지역 특성에 따라 주요 입자군의 종이 다르게 존재하였다.

본 연구에서 개별입자분석과 새로이 창출된 입자군 변수를 이용할 때, 화학적 성분이 유사한 토양관련 오염원을 완벽하게 분리할 수 있었다. 이러한 수용방법론을 이용할 경우, 우리 나라에 미치는 황사의 영향을 정량적으로 추정할 수 있을 것으로 사료되었다.

참 고 문 헌

- 국립환경연구원(1998) 동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(III), 국립환경연구원.
- 김동술(1990) 황사의 양적 추정을 위한 기초연구, 한국대기보건학회 6(1), 11-12.
- 김동술, P.K. Hopke(1990) 분진의 크기별 분류에 의한 입자군 보존의 개발 법칙 개발, 대한환경공학회, 12(3), 9-19.
- 김수환, 김동술(1999) 실내공기 중 석면섬유의 분류 및 확인을 위한 전문가 시스템의 개발, 한국대기환경학회, 15(6), 703-712.
- 한광인(1995) SEM 영상분석에 의한 토양 분진의 분류, 경희대학교 대학원 환경학과 석사논문.
- 환경부(2000) 대기오염 자동측정망 자료.
- Air Metrics(1995) Mini-vol portable sampler operation manual, Air Metrics.
- A.M. URE(1995) Methods of analysis for heavy metals in soils, *Heavy Metal in Soils*. Edited by B.J. Alliway, Blackie Academic, U.K., 58-61.
- Casuccio, G.S and P.B. Janocko(1983) The use of computer controlled scanning electron microscopy in environmental studies, Journal of the Air Pollution Control Association, 33(10), 937-943.
- Chung, Y.S.(1985) Air pollution detection by satellites; the transport and deposition of air pollutants over oceans, Atmospheric Environment, 20(4), 617-630.
- Crewe, A.V. and P.S.D. Lin(1976) The use of backscattered electrons for imaging purposes in a scanning electron microscope, Ultramicroscopy, 1, 231-238.
- Duce, R.A., C.K. Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero, and J.T. Merrill(1980) Long-range atmospheric transport of soil dust Asia to the North Pacific; Temporal variability. Science, 209, 1552-1524.
- Joussaume, S.(1990) Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, J. Geophys, 95(D2), 1909-1941.
- Kindratenko, V., J.M. Van Espen, B.A. Treiger, and R.E. Van Grieken(1994) Fractal dimension classification of aerosol particles by computer controlled scanning electron microscopy, Environmental Science & Technology, 28, 2197-2202.
- Lee, R.E. (1993) *Scanning Electron Microscopy and X-ray microanalysis*, PTR Prentice-Hall Inc.
- Prospero, J.M. and T.N. Carlson(1972) Soil aerosols as tracers of long-range transport. *Atmospheric Tracer Technology and Applications*, edited by Jody Heiken, 332-340.
- Reist, P.C., M.T. Hsieh, and P.A. Lawless(1989) Fractal characterization of the structure of aerosol agglomerates grown at reduced pressure, Aerosol Science & Technology, 11, 91-99.
- Terry, K.W.(1995) Particle size distribution of airborne dusts using a scanning electron microscope, Aerosol Science and Technology, 23, 475-478.
- Zhang De'er(1982) Analysis of dust rain in the historic times of China, Kexue Tonggao, 27(5), 294-297.