

SEM/EDX를 이용한 디젤 분진의 입자별 분석 A Study on Individual Diesel Particles by SEM/EDX

김 혜 진 · 이 종 태 · 김 동 술
경희대학교 환경학과 및 환경연구소
(1998년 11월 9일 접수, 1999년 1월 10일 채택)

Hye-Jin Kim, Jong-Tae Lee and Dong-Sool Kim
*Department of Environmental Science and Institute of
Environmental Science Kyung Hee University*
(Received 9 November 1998; accepted 10 January 1999)

Abstract

Scanning electron microscopy (SEM) has played an important role in receptor modeling area because it is a powerful tool for characterizing individual particles. The purpose of the study was to classify individual diesel particles based on statistical analysis and image analysis by SEM/EDX (energy dispersive x-ray analyser). The diesel particles were sampled by both a modified CVS 75 mode and a high speed mode with a chassis dynamometer. The SEM/EDX system provides various physical parameters including particle's optical diameter and chemical information. Thus density and mass of the diesel particle were estimated based on its chemical composition and further fractal dimensions of the diesel particle were obtained by the Hurst exponent method. The fractal dimension in the sample of modified CVS 75 mode was higher than the high speed mode. Finally, mass fractions for a diesel vehicle as a source profile were estimated based on a particle class concept.

Key words : Image analysis, SEM/EDX, fractal analysis, diesel particle

1. 서 론

대기오염물질 중 입자상물질은 인간의 건강과 복지에 커다란 영향을 미친다. 이에 따라 입자상 오염물질을 효율적으로 저감하기 위한 관리방안의 하나로 최근 오염원의 기여도 추정에 관한 연구, 즉 수용모델링 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 분진의 물리화학적 구조 및 조성 파악에 관한 연구는 수용모델의 핵심이 되는 분야로 주로 개별입자별 분

석 (particle by particle analysis)과 전량분석 (bulk analysis) 과정을 거쳐 수행되고 있다. 만약 이 과정에서 오염배출원의 물리화학적 확인자 (marker)가 개발된다면 해당 오염원의 대기환경 중 배출량을 정량적으로 추정할 수 있다. 하지만 도시 및 지역규모의 대기오염 배출원의 종류는 매우 다양하며 유사오염원도 다수 존재하기 때문에, 오염원의 분리 및 확인과정이 매우 어려우며 특히, 특정 오염원에 대한 확인자 부재현상은 어려움을 가중시킨다. 예를 들어, 주요 오염원의 하나인 자동차 오염원은 과거

Pb 및 Br을 확인자로 사용하였으나 현재 유엔휘발유의 사용제한으로 확인자 부재라는 어려움을 겪고 있다. 또한 황사와 지역 토양분진은 화학조성이 유사하여 국내에 유입되는 황사의 총량 계산을 불가능하게 하고 있다.

특정오염원에서 방출된 분진의 조성을 화학적으로 분석할 때, 통계적으로는 화학종(chemical species)은 화학변수(chemical variable)에, 오염원은 화학변수로 구성된 벡터(vector)에 해당한다. 따라서 다양한 오염원 중 특정오염원을 분리 및 확인하기 위해서는 선형적으로 독립된 특정 벡터를 확보하여야 하며, 화학변수의 수는 벡터의 수보다 항상 커야 한다. 현재 전량분석과정에서 얻을 수 있는 화학변수의 수는 전적으로 첨단화되고 있는 기자체에 의존하나, 경제성 차원에서 화학변수를 무한히 확대할 수는 없다. 이와 같이 최근의 수용모델 분야는 확인자가 부재한 오염원의 점중, 유사 오염원의 분리불가 및 화학변수의 숫자적 한계로 어려움을 겪고 있다.

광학현미경을 이용한 입자별 분석은 분진오염원을 짧은 시간 내에 확인해 주는 경제성이 큰 정성적 분석법이며, EDX (energy dispersive x-ray analyzer)가 부착된 전자주사현미경(SEM)은 정량적 분석을 가능하게 한다. SEM/EDX는 입자의 크기, 모양 및 화학적 조성 등의 분석을 짧은 시간 내에 가능하게 한다. 최근 입자별 분석의 중요성은 기존 전량분석에 내재하고 있는 한정된 화학변수의 수를 무수히 증대시킬 수 있으며, 각 입자의 영상분석을 통하여 유사오염원을 분리시킬 수 있다. 한광인 등(1997)은 입자의 영상을 이용한 프렉탈 분석(fractal analysis)을 통하여 지역의 토양분진과 황사를 분리한 바 있다. 특히, 입자의 화학적 정보를 바탕으로, 인위적으로 창출된 입자군 변수(particle class variable) 역시 유사오염원의 collinearity의 문제를 해결할 수 있으며, 입자군 보존의 법칙(PCB; particle class balance)을 활용하여 오염배출원의 기여도를 정량적으로 추정할 수 있다(Kim and Hopke, 1988). 입자군을 이용하여 수용모델을 개발할 때 가장 중요한 첫 단계는 순수입자군(homogeneous particle class)을 창출하는 것이다(장여진, 1996; Noble and Prather, 1996; Xie and Hopke, 1994; 김동

술과 Hopke, 1990).

반면, 프렉탈 기하학은 일반 기하학 분야의 한 부류로서 에어로졸 관련 분야를 비롯하여 각 분야에서 응용되고 있다. 초기 많은 19세기 수학자들은 비정형 물질의 기하학적 중요성을 인식하지 못하였으나, 비정형 형상이 자연계에서 보편적이라는 사실을 밝혀내고, 무한 경계로 둘러쌓여 있지만, 유한 면적을 가지고 있는 비정형 형상에 관한 기하학을 프렉탈 기하학이라 명명하였다(Daves, 1993). 즉, 구름, 나무, 식물 뿌리, 인간의 폐 등은 매우 불규칙한 모양의 커다란 형상속에 작은 형상이 불규칙하게 결합되어 있으므로 비정형 형상의 예가 될 수 있다. 마찬가지로 금속 혼연(fume) 역시 불규칙한 형상의 입자들이 성장한 것으로 관찰되었고(Reist, 1989), 특별히 정의된 형상이 존재하지 않기 때문에 분진의 직경이나 면적을 정량적으로 얻기 어렵고, 공기역학 특성도 추정하는데 많은 어려움이 있었다. 하지만, 프렉탈 기하학을 응용하므로써, 이들 분진을 새로이 해석할 수 있으며 정량적인 연구도 가능하다(Katrinak et al., 1993; Savoji et al., 1983).

이동오염원 중 경유를 연료로 사용하는 디젤자동차는 고비점 연료사용과 저온 연소의 특성으로 입자상 물질의 방출이 휘발유 차량보다 상대적으로 많으며, 미연소 탄소에 각종 고비점 탄화수소가 흡착 또는 응축이 되고 또한, 각종 금속성분, 수분 및 황산염이 부착된다고 보고된 바 있다(엄명도 등, 1996; 임재영 등, 1996). 디젤자동차 배출가스 중 입자상 오염물질은 생성 시에는 미세입자이나 방출 후 응집되어 군집체를 이루며, 응축핵 주위의 다환 거대분자들은 조성과 관계없이 탄화수소로부터 생성된다(Amann 등, 1981). 이러한 탄소성 군집체에 대하여 Katrinak(1993) 등과 Nyeki(1995) 등은 프렉탈 분석을 시도한 바 있으며, Carpenter(1981) 등은 TEM을 이용하여 디젤분진의 물리적 특성을 연구한 바 있다.

본 연구에서는 디젤자동차 배출가스 중 입자상 물질을 SEM/EDX로 분석하고 여기서 얻은 화학적 정보를 이용하여 순수입자군을 창출한 후 오염원 분류표를 작성하고자 하였으며, 물리적 정보를 이용하여 배출된 탄소성 군집체의 표면특성을 프렉탈 분석을 통하여 규명하고자 하였다.

2. 실험방법 및 분석과정

2.1 시료의 채취

본 실험에서는 디젤트럭(적재량 1톤)을 야시동력계(DC-80, Clayton사) 상에서 저속모드 및 고속모드로 여지(teflon membrane filter: 직경 47 mm, pore size 0.2 μ m; Gelman Science Co.)가 10~40 ng/cm²의 질량부하를 갖도록 분진을 채취하였다. 본 실험에서 수행한 저속모드는 CVS 75모드(Constant Volume Sampler 75)를 수정한 것으로 CVS 75모드는 캘리포니아주의 자동차 배출가스 시험모드이다. 참고로, 이 모드는 1975년에 제정된 것으로서 정지가동(idling), 가속, 감속, 정속이 되풀이되는 과정을 대표화한 주행패턴이다. 또한 주행곡선은 과도기간(transient phase: 0~505초)과 안정기간(stabilized phase: 506~1,372초)으로 이루어지며, 10분간 엔진 시동을 끈 후 다시 과도기간동안 운전한다. 이 모드의 평균 차속은 34.1 km/h, 총 주행거리는 17.8 km이다.

본 연구에서는 우선 여지의 과도한 질량부하를 막기 위해 저속모드는 CVS 75 모드의 총 1,372초 중 200초만 주행하여 채취하였다. 따라서 본래 시험모드의 주행패턴과 차이가 있을 수 있다. 표 1은 CVS 75 모드의 주행패턴과 본 실험에서 수정용된 주행 패턴을 비교한 것이다. 따라서, 본 실험에서는 시료채취 모드의 평균 차속이 26.71 km/hr로 저속이므로 디젤자동차의 고속도로·제한속도인 80 km/hr의 정속으로 200초 동안 고속모드를 추가로 수행하여 시료를 채취하였다. 그러므로 본 실험에서는 저속모드로 2회(L-1, L-2), 고속모드로 2회씩

(H-1, H-2) 분진시료를 채취하였다. 채취된 시료의 양은 각각 L-1, 30.2 ng/cm²; L-2, 16.9 ng/cm²; H-1, 12.5 ng/cm²; H-2, 19.8 ng/cm²이었다.

2.2 시료의 전처리 및 분석과정

본 실험에서 사용한 여지는 teflon membrane filter (미국 Gelman Science)로 직경 47 mm, pore size 0.2 μ m이며 입자에 대한 부착력이 뛰어나며 입자가 균일하게 분포된다. SEM 분석시 절연체인 입자에 전하가 축적될 때 상이 찌그러지거나 입자가 전자빔에 의해 타버려 재비산되는 것을 방지하기 위해서 분진시료를 전도체인 물질로 코팅하였다. 본 실험에서는 Au 코팅 방법을 사용하였으며, 코팅 두께는 약 90 nm였다.

입자의 개별분석을 위하여 SEM/EDX를 이용하였다. 본 연구에서 이용된 SEM은 영국 Leica사의 Cambride Stereo Scan 440으로 작동조건은 가속전압 20 kV, working distance 25 mm이다. 영상분석시 한 화소가 차지하는 면적을 통일하기 위해서 전체 분석에서 배율을 9,000배로 고정시켰다. 이때, 분석

Table 1. Driving patterns for CVS 75 mode and sampling modes used in this study.

	Time Elapsed (sec)	Distance (km)	Average Speed (km/hr)	4 Mode Ratio (%)			
				ID*	AC*	DC*	CR*
CVS75 Mode	1372	17.85	34.10	19.2	20.1	42.6	18.1
Low Speed Mode	200	1.48	26.71	35.67	21.05	11.11	32.16
High Speed Mode	200	4.44	80.0			100	

*ID : Idling, AC : Acceleration, DC : Deceleration, CR : Cruise

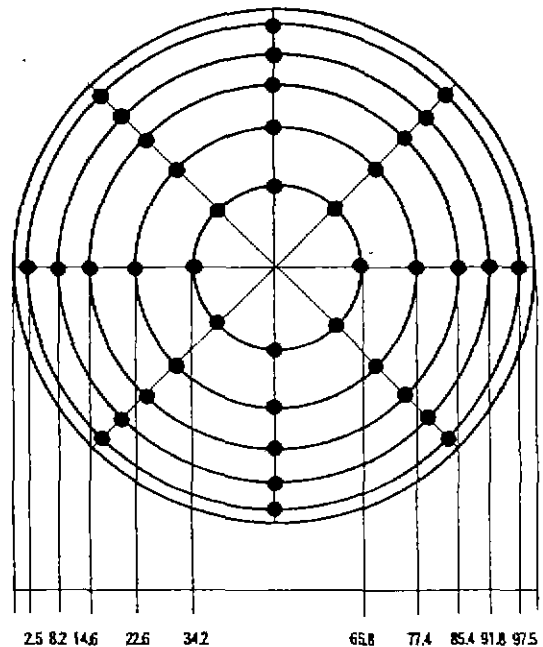


Fig. 1. A diagram of points analyzed on sampling filters.

입자의 대표성을 확보하기 위해서 공정시험법상의 원형골뚝에서의 측정점 선정법을 본 연구에 응용하였다. 따라서, 직경이 47 mm인 원형여지를 4등분하고 그림 1과 같은 배열비율에 따라 총 40개의 지점을 선정하였으며, 지점별로 약 3개의 분진입자에 대하여 SEM/EDX 분석을 수행하였다.

2.3 프렉탈 차원의 추정과정

2.3.1 프렉탈 기하학과 영상분석

SEM에서 얻은 영상자료를 분석할 때 입자의 형상과 크기 등 물리적 정보는 매우 중요한 의미를 갖는다. 최근 분진의 형상학에서 응용되고 있는 프렉탈 이론은 입자의 형상을 설명하는 체계적 이론으로 자리를 잡고 있다(Nyeki and Colbeck, 1995). 이차원적인 입자의 영상정보는 1차원적 크기보다 더욱 비중있는 정보를 제공하고 있다(Daves *et al.*, 1993). 프렉탈 기하학의 개념은 1977년 Mendelbrot에 의해 소개되었으며, 초기에는 경계선 분석정도에 적용되었으나, 비정형 형상도 입의 확대배율에서 선 또는 표면이 유사하다는 본체유사(self similarity)의 특성을 가질 수 있다(Russ, 1990; Reist, 1989 and 1984).

프렉탈 차원(dimension)분석의 주요 목적 중의 하나는 물질의 형상적 특징을 계수화할 수 있는 방법론을 개발하는 것이다. 차원분석에는 윤곽선의 복잡도를 계수화하는 외곽선 분석, 표면의 거칠도를 계수화하는 재질분석 및 밀도분석 등이 있다(Kindratenko *et al.*, 1994; Reist, 1989).

본 연구에서도 분진의 표면특성을 살펴보기 위해 프렉탈 차원을 사용하였다. 본 연구에서 응용한 프렉탈 차원은 Russ (1992) 및 Pentland (1984)가 제시한 것으로, 영상이 가시광선의 명암에 따라 달리 형성되는 것을 응용한 것이다. 본 연구에서는 이차전자 빔(secondary electron beam)을 가시광선과 마찬가지로 대응 해석하고 프렉탈 차원을 구하였다. 즉, 명암 차이에 의하여 입자의 영상을 분석하였고 화소 면적(pixel area) 대 표면적과의 관계를 해석하여 프렉탈 차원을 산출하였다. 실제 영상을 형성하는데 있어서는 역산란전자와 이차전자가 각각 그 특성별 장단점이 있지만, 여기서는 표면의 거칠도를 파악하기 위해 이차전자만을 이용한 영상을 활용하였다.

즉, 분진의 둘레를 이용해 프렉탈 차원을 구할 때에는 입자의 표면을 무시하기 때문에 역산란전자에 의한 영상자료를 사용해도 상관없이 없지만, 입자의 표면을 고려하기 위해서는 반드시 이차전자를 이용한 영상이 필요하다.

2.3.2 프렉탈 차원의 분석

표면의 거칠도에 입각한 프렉탈 차원은 실제 총 표면적과 투영면적을 log-log 축상에 도식하였을 때 직선의 기울기가 된다. 물질의 부식, 침식, 입자의 응집, 혹은 분쇄로 인해 변화된 표면적은 이러한 차원분석으로 계수화될 수 있다. 여러 가지 분석법 중 Hurst 지수법은 영상의 프렉탈 차원을 계산하는 효율적 방법이다(Russ, 1995, 1992, and 1990). 이 방법은 영상의 가로 또는 세로축상에 놓인 화소의 최대명암차이를 거리의 함수로 표시하는 방법으로 이들의 관계를 log-log 축에 도식하였을 때 직선 기울기를 프렉탈 차원으로 정의한다. 본 연구에서 사용한 Hurst 지수법의 수식은 다음과 같다. 즉, 프렉탈 한 화소의 차원 D는 아래와 같은 관계를 갖는다(Bunde and Havlin, 1994).

$$I = N r^D$$

여기서, 프렉탈 영상은 N개의 격자로 분해되며, r은 grey level을 의미한다. 상기 식은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\log N = -D \log r$$

여기서 N과 r사이에 log-log 관계가 있으며, 이때 해당 기울기가 D인 직선이 된다. 본 연구에서는 이때의 기울기 D를 프렉탈 차원으로 정의하였다. D의 값이 클수록, 즉 프렉탈 차원이 증가할수록 입자의 거칠도는 커지게 된다.

3. 디젤분진의 분석결과 및 고찰

본 연구에서는 EDX를 통해 제공된 화학변수로 Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Br, Pb 등 총 18개 항목을 선정하였다. 각종 EDX에서 얻은 x-선 count의 배경잡음을 제거하기 위해 한 원소에 대한 count가 총 count의 제공근의 두배 보다 작을 경우, 즉 95% 확률 속에 속하지 않

을 경우 해당원소의 x-선 count는 0으로 간주하였다.

한편, 분진의 물리적 변수는 영상분석을 통해 얻을 수 있었다. 영상분석은 TIFF 파일 형식으로 전체 영상을 저장하여 256 grey level을 bi-level로 파일 변환을 수행한 후, 분진입자의 면적이 차지하는 총 화소수에 한 화소당 면적을 곱하여 분진의 표면적을 산출하였다. 구체적인 영상분석과정은 문헌을 참고할 수 있다(장여진과 김동술, 1997). 입자의 광학직경(optical diameter)을 구하기 위하여 입자를 구형이라고 가정하였으며 위에서 산출된 표면적을 이용하였다.

3.1 디젤분진의 물리적 분석 결과

그림 2와 3은 저속모드로 채취한 디젤분진시료 L-1과 L-2, 그리고 고속모드로 채취한 시료 H-1과 H-2의 공기역학적직경의 분포를 보여주고 있다. 표 2에서 보면, L-1, L-2, H-1, H-2의 공기역학적 직경의 기하학적 평균은 각각 1.27, 1.25, 1.3, 1.41 μm 로 일반적인 디젤 자동차의 분진 크기 0.2~0.3 μm

보다 크게 조사되었다. 표 3은 L-1, L-2, H-1, H-2의 분진의 프렉탈 차원을 구한 후 기하학적 평균을 계산한 것이다. 이때 L-1, L-2, H-1, H-2의 프렉탈 차원은 각각 1.35, 1.14, 1.03, 0.90으로 저속모드일 때 고속모드일 때보다 프렉탈 차원이 큰 값으로 조사되었다. 즉, 저속모드일 때 고속모드보다 디젤분진의 거침도가 크게 나타났다. 저속모드에서의 시료는 200초 동안 정지가동 35.7%, 가속 21.1%, 감속 11.1%, 정속 32.2%로 4가지 주행모드가 되풀이되었으며, 고속모드는 200초 동안 80 km/hr로 정속모드가 지속되었기 때문에 저속에서 채취된 시료 입자

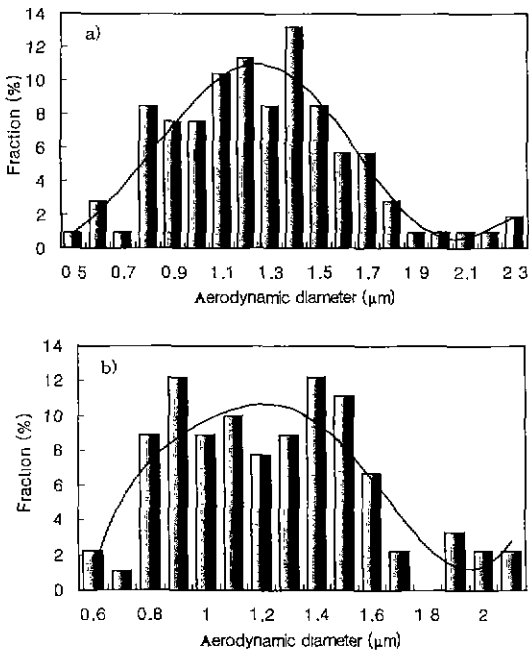


Fig. 2. Frequency distribution of aerodynamic diameter obtained from samples of a) L-1, and b) L-2.

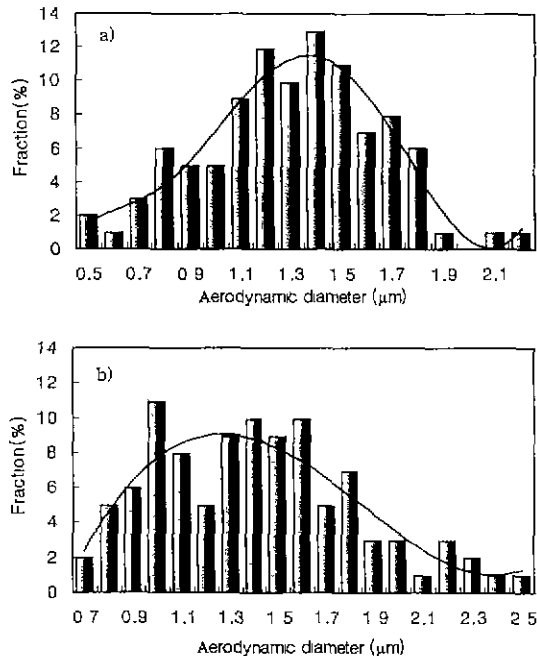


Fig. 3. Frequency distribution of aerodynamic diameter obtained from samples of a) H-1, and b) H-2.

Table 2. Statistics of aerodynamic diameter for each diesel particle sample.

	Min.	Max.	Standard Deviation	Geometric Mean
L-1	0.58	2.34	0.37	1.27
L-2	0.66	2.18	0.35	1.25
H-1	0.53	2.23	0.34	1.30
H-2	0.72	2.52	0.41	1.41

Table 3. Fractal dimensions for each diesel particle sample.

	Min.	Max.	Standard Deviation	Geometric Mean
L-1	0.69	2.05	0.29	1.35
L-2	0.74	1.19	0.22	1.14
H-1	0.62	1.59	0.19	1.03
H-2	0.47	1.46	0.21	0.90

들의 거침도에 영향을 준 것으로 사료된다.

3.2 입자군 분류의 결과

수용모델은 대기 중 시료의 전량분석에 기초한 다양한 통계적 방법의 일종으로 대기 중 입자상 오염물질의 오염원을 정량적으로 추정한다. 화학질량 수지법은 개념적으로 강력한 기술로 알려져 왔지만, 정확한 오염원 분류표가 존재하여야 하며, 또한 오염원이 유사한 조성을 가질 때 사용할 수 없다. 이러한 한계는 뚜렷한 차이를 가지는 변수를 창출함으로써 해결할 수 있다. SEM은 크기변수와 화학적 조성을 포함하는 수많은 개별입자의 정보를 제공한다. 이러한 정보를 이용하여 개별입자를 유사한 집단으로 묶어 새로운 입자군을 만들고 새로운 오염원 분류표를 개발할 수 있다.

본 연구에서 EDX로 분석된 18종의 화학적 변수를 이용하여 군집분석을 수행하였다. 이 결과 복잡한 개별입자의 자료에서 의미 있는 정보만을 추출할 수 있었다. 각각 시료의 군집분석에 이용된 입자의 수와 분류에 이용된 입자의 수는 표 4와 같다. 총 461개의 개별입자를 응집위계분석법을 이용하여 유사한 입자군으로 분류하였으며, 전체의 91.3%인 410개가 9개의 입자군으로 분류되었으며, 나머지 46개의 입자는 이상치(outlier)로 간주하여 입자군 분류시 제외시켰다.

개별입자를 응집위계분석법을 이용하여 입자군으로 분류한 후 분류된 입자군의 밀도를 산정하였다. 입자군의 밀도는 오염원 분류표 작성에 이용되는 질량분율을 계산할 때 이용된다. 순수입자군의 밀도를 산정하기 위해 개별입자의 원소분율에 각 원소의 고유밀도를 곱하여 개별입자의 밀도를 산출하였으며, 이들의 평균값을 순수입자군의 평균밀도로 정의하였다. 디젤자동차 분진은 대부분 탄소성분으로 구성되어 있기 때문에 밀도를 산정할 때 탄소 성분

Table 4. Number of particles and classified particles and classes for each sample in the classification study.

Sample	Particles	Classified Particles	Class
L-1	120	105	2
L-2	109	99	2
H-1	112	102	2
H-2	110	104	3
Total	461	410	9

Table 5. Densities and mass fractions of each homogeneous particle class in each diesel sample.

I.D.	Particle Class	Density	Mass Fraction	Bulk Density
L-1	Zn	2.80	10.29	2.74
	Br-Zn	2.72	32.76	
	Outlier	2.79	56.96	
L-2	Br	2.47	5.28	2.69
	Br-Zn	2.70	85.80	
	Outlier	2.80	8.87	
H-1	Br	2.35	5.14	2.64
	Br-Zn	2.69	83.10	
	Outlier	2.59	11.80	
H-2	Br	2.62	3.93	2.79
	Zn-Br-Si	2.73	5.71	
	Zn-Br	2.77	73.60	
	Outlier	3.07	16.80	

의 함량도 포함하여 계산하였다. 표 5는 순수입자군의 평균밀도와 디젤분진 시료의 종합밀도를 보여주고 있다. 저속모드와 고속모드의 운전과 관계없이 디젤분진의 종합밀도는 2.7 정도로 조사되었다.

한편, 표 5는 창출된 입자군을 변수로써 새로운 오염원 분류표를 제시한 것이다. 각 시료의 질량분율은 창출된 입자군에 기초하여 계산되었다. 이때 각 입자군 내의 개별입자에 대한 질량은 입자를 구형이라 가정된 상태에서 즉, 공기역학적직경(aerodynamic diameter)을 바탕으로 체적을 산출한 후, 여기에 순수입자군의 평균밀도를 곱하여 계산하였다. 표 5에는 저속모드와 고속모드시 분진의 입자군별 밀도와 질량분율을 표시하였다.

저속모드인 시료 L-1은 Zn 입자군이 10.3%, Br-Zn 입자군이 32.8%이었으며, 시료 L-2는 Br 입자군

이 5.3%, Br-Zn 입자군이 85.8%로 Br-Zn 입자군의 질량분율이 매우 높게 나타났다. 반면, 고속모드인 시료 H-1은 Br 입자군이 5.1%, Br-Zn 입자군이 83.1%이었으며, 시료 H-2는 Br 입자군이 3.9%, Zn-Br-Si 입자군이 5.7%, Zn-Br 입자군이 73.6%로 나타났다. 분류된 입자군의 질량분율값에 의하면, 전체 시료에서 Br-Zn 또는 Zn-Br 입자군의 질량분율이 월등히 높게 나타났다. Budavari (1989)에 의하면, bromobenzene (C_6H_5Br)은 엔진오일의 첨가제로 사용되며, zinc chloride ($ZnCl_2$)는 석유를 증류할 때 사용된다고 한다. 과거 Pb와 Br이 가솔린 차량 분진의 확인자로 사용되었듯이, Zn와 Br은 국내 디젤차량 분진의 확인자로 이용이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

디젤차량의 분진을 SEM/EDX를 이용하여 입자별 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 디젤차량을 저속 및 고속모드로 운행하여 분진을 포집하였고, 각 모드시의 분진특성을 규명하기 위해 프렉탈 차원분석, 분진의 밀도, 공기역학직경 및 질량분율 등을 분석하였다.

이를 위해 461개의 디젤차량 분진을 응집위계군 집분석법을 이용하여 순수입자군을 창출하였다. 즉, 전체의 91.2%인 421개가 창출된 입자군에 소속되었으며, 이를 통해 디젤차량에 대한 오염원 분류표를 작성할 수 있었다. 분류된 순수입자군의 질량분율에 의하면, 모든 시료에서 Br-Zn 입자군의 질량분율이 월등히 높아 디젤차량분진의 확인자로 이용이 가능할 것으로 사료되었다. 한편, 프렉탈 차원분석에 의하면, 저속모드일 때 고속모드일 때 보다 분진의 거침도가 크게 관측되었다.

참 고 문 헌

- 김동술, P.K. Hopke (1990) 분진의 크기별 분류에 의한 입자군 보존의 개발 법칙 개발. 대한환경공학회, 12(3), 9-19.
- 엄명도, 조강래, 오용석, 한영출 (1997) 매연 저감을 위한 천연가스 Dual-Fuel 엔진의 시내버스 적용 평가, 한국대기보전학회지, 13(3), 215-220.
- 임재영, 김태원, 정우식, 김경림 (1996) 디젤자동차 배출가스 저감을 위한 Pt, Pd 촉매의 특성 분석 및 W 첨가에 따른 CO, C_3H_6 , SO_2 산화 반응 활성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(2), 121-130.
- 장여진 (1996) SEM/EDX를 이용한 공기 중 개별분진의 분류, 경희대학교 대학원 환경학과 석사논문.
- 장여진, 김동술 (1997) CCSEM을 이용한 대기 중 개별분진의 분류에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 13(5), 345-353
- 한광인, 장여진, 김동술 (1997) CCSEM을 이용한 개별입자의 분류에 관한 연구-황사 및 지역토양분진의 분류, 경희대학교 환경연구소 논문집, 7, 37-45.
- Amann, C.A., D.L. Stivender, S.L. Plee, and J.S. MacDonald (1981) Some rudiments of diesel particulate emissions, in *The Measurement and Control of Diesel Particulate Emissions*, Part 2, Society of Automotive Engineers, Inc., U.S.A.
- Budavari, S., M.J. O'Neil, A. Smith, and P.E. Heckeltnan (1989) *The Merck Index 12th ed.*, Merck & Co., Inc. Rahway, N.J., U S A
- Bunde, A. and S. Havlin (1994) A brief introduction to fractal geometry, in *Fractals in Science*, Edited by A. Bunde and S. Havlin, Springer-Verlag, New York, 20pp.
- Carpenter, K. and J.H. Johnson (1981) Analysis of the physical characteristics of diesel particulate matter using transmission electron microscope techniques, in *The Measurement and Control of Diesel Particulate Emissions*. Part 2. Society of Automotive Engineers. Inc., U S A
- Daves, G.G., R.O. Buckus, J.E. Perters, and A.R. Schroeder (1993) Morphology descriptors of irregularly shaped particles from two-dimensional images, *Aerosol Science & Technology*, 19, 199-212.
- Katrlnak, K.A., P. Rez, and P.R. Buseck (1993) Fractal geometry of carbonaceous aggregates from an urban aerosol. *ES&T*, 27(3), 539-547.
- Kim, D.S. and P.K. Hopke (1988) Classification of individual particles based on computer-controlled electron microscopy data, *Aerosol Science and Technology*, 9, 133-151.
- Kindratenko, V.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, *ES & T*, 28, 2197-2202.
- Noble, C.A. and K.A. Prather (1996) Real-time measurement

- of correlated size and composition profiles of individual atmospheric aerosol particles, *ES & T*, 30(9), 2667-2680.
- Nyeki, S and I. Colbeck (1995) Fractal dimension analysis of single, in-situ, restructured carbonaceous aggregates, *Aerosol Science and Technology*, 23, 109-120.
- Parker, J.R. (1996) *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, Wiley Comp., New York.
- Pentland, A P (1984) Fractal-based description of natural scenes. *Proc. IEEE Comput. Soc. Conf. Comput Vision Pat. Recog.*, 4, 661.
- Reist, P.C. (1984) *Aerosol Science and Technology*, 2nd Edition. McGraw-Hill, New York.
- Reist, P.C., M.T Hsieh. and P A. Lawless (1989) Fractal characterization of the structure of aerosol aggregates grown at reduced pressure, *Acrosol Science and Technology*, 11, 91-99.
- Russ, J.C (1990) *Computer-Assisted Microscopy, The Measurement and Analysis of Images*, Plenum Press, New York
- Russ, J.C. (1992) *Computer-Assisted Microscopy*, Plenum Press, New York.
- Russ, J.C. (1995) *The Image Processing Handbook*, 2nd Ed., CRC Press.
- Savoji, M H and R.E. Burge (1983) Elemental classification in multi-detector STEM images using image analysis clustering techniques, *Ultramicroscopy*. North-Holland Publishing Company, 12, 1-8.
- Xie, Y. and P.K. Hopke (1994) Use of chain code histogram method to quantify airborne particle shapes. *Acrosol Science and Technology*, 21, 210-218.