

# 미세먼지의 발생 메커니즘 및 미세먼지 오염원의 추정 방법론

김 동 술 | 경희대학교 환경응용화학대학 및 환경연구센터  
교수 / 센터장

E-Mail : atmos@khu.ac.kr

황 인 조 | 경희대학교 환경응용화학대학 및 환경연구센터

E-Mail : ijhwang@cvs2.khu.ac.kr

## 1. 서론

최근 일부 대기환경 규제오염물질 (criteria air pollutants)의 농도는 하향 추세에 있다. 이는 저유황 사용 의무지역의 확대, 청정연료로의 전환, 오염원 배출허용기준의 설정, 연소효율 개선 등의 노력과 대기오염도 저감을 위하여 수차에 걸쳐 환경관련법규를 개정하고, 동시에 기술적, 경제적, 행정적 지원과 투자를 크게 확대시키는 등의 노력 덕분이다. 그러나 이와 같이 규제오염물질의 수치가 현상을 유지하거나, 꾸준한 감소추세에 있음에도 불구하고, 국민이 느끼는 체감오염도는 꾸준히 증가하고 있으며 이에 따라 국민들의 불만이 가중되고 있다. 또한, 대기오염 피해로 인한 건강 및 복지손실을 최소화하고 산업체의 경제적 손실을 최소화하기 위해, 합리적인 각종 대기환경 관리기술이 도입되고 개발될 필요가 있다.

대기환경에서 중요한 오염물질 중의 하나인 분진은 크게 인위적으로 방출되는 분진과 자연적으로 방출되는 분진으로 나눌 수 있다. 인위적 분진은 인간의 생산 및 산업활동의 결과로 방출되는 분진을 의미한다. 한편, 분진을 크기별로 분류하였을 때 미세먼 (fine particle)과 거대분진 (coarse particle)

으로 나눌 수 있는데, 미세먼진과 거대분진의 경계가 되는 크기가 2.5  $\mu\text{m}$ 이다. 공교롭게 인위적 분진의 대부분은 미세먼진이며, 자연적 분진의 대부분은 거대분진이다. 따라서 미국의 PM-2.5 기준의 설정은 기존 PM-10 기준보다 인위적 분진의 제어에 집중적인 관심을 보인다는 의미이며, PM-2.5 기준은 국민 특히, 노약자의 건강 및 시정 (visibility) 보호차원에서 PM-10 기준보다 합리적이며 규제력이 강한 기준이라 할 수 있다.

한편, 우리나라는 1995년 이후 PM-10과 TSP의 환경기준을 동시에 설정하고 운영하다가 2001년 이후에는 TSP 항목을 삭제하였다. 동일 분진에 대해 6년간 2개 기준을 설정하여 분진오염 규제에 커다란 혼선이 빚어지기도 하였다. 우리나라에서는 입자상 오염물질 (particulate matters) 또는 분진을 총칭하여 ‘먼지’라 부르고 있으며, 이를 법률적인 용어로서까지 확대 사용하고 있다. 이에 따라 PM-10을 ‘미세먼지’라 부르고 있는데, 이 용어는 대기환경학에서 사용하는 학술용어와 크게 달라 혼란을 가져오고 있다. 앞서 언급하였지만, 학술적으로 미세먼진은 공기역학직경으로 2.5  $\mu\text{m}$ 보다 작은 입자상 물질을 의미한다. 또한, 학술적으로 입자상 오염물질 또는 분진은 액체상 또는 고체상의 작은 입자를 총

칭하는 용어이며, 먼지 (dust)는 고체상의 작은 입자만을 일컫는 학술용어이다. 초기 법률행정적 용어를 선정할 때 환경과학적 고찰을 통한 신중한 용어 선택이 요구된다. 따라서 우리나라에서 미세분진은 PM-2.5를 의미하며, 본고 제목에도 포함된 미세먼지는 PM-10을 의미하므로 각별한 주의가 요망된다.

우리나라의 경우, 최근까지도 장기간에 걸쳐 측정된 오염물질의 방대한 자료를 활용하지 못하고 있으며, 단지, 오염물질의 농도를 기준으로 특정기간의 평균 및 편차를 단순 통계적으로 계산하고, 정성적인 상관성 비교에만 집착하고 있다. 이러한 결과만을 환경규제정책에 반영하였을 경우, 지역주민들을 비롯한 산업체까지도 비합리적인 제재를 받을 수 있다. 따라서 미세먼지에 대한 저감대책이 필요하며, 이를 위해서는 최우선적으로 주요 오염원에 대한 배출원 조사와 오염원의 정량적 기여도 산정이 조사되어야 한다. 오염도가 심각한 곳은 오염원을 파악한 후 이에 기초한 합리적 제어전략을 수립하여야 한다.

전술한 바와 같이 대기오염 관리기술을 개발하여 미세먼지에 의한 대기오염과 건강, 재산상의 피해 등을 최소화하기 위해서는 미세먼지의 발생 메커니즘을 규명하고 오염원을 파악하는 것이 선행되어야 할 것이다. 즉, 미세먼지 발생 메커니즘에 입각하여 오염배출원을 조사하고 정성·정량적 기여도 산정에 관한 연구가 수행되어야 한다. 본고에서는 먼저 일반적인 입자상 물질과 미세먼지 발생 메커니즘에 대하여 고찰을 하고 마지막으로 미세먼지 오염원의 추정 방법론에 대하여 고찰하고자 한다.

## 2. 분진의 물리적 특성

분진은 해염입자, 토양입자 등의 자연적 및 인위적 발생원에서 직접 대기로 방출되는 1차 분진(primary aerosol)과 연소, 소각 등에 의해 인위적으로 생성된 가스상 물질이 대기 중에서 물리적, 화학적 변환과정을 통해 입자화 된 2차 분진(secondary aerosol)으로 나눌 수 있다. 분진은 0.005 ~ 500  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가지고 있으며 오염생성원의 종류에 따라 독특한 크기 범위를 가지고 있다. 일반적으로

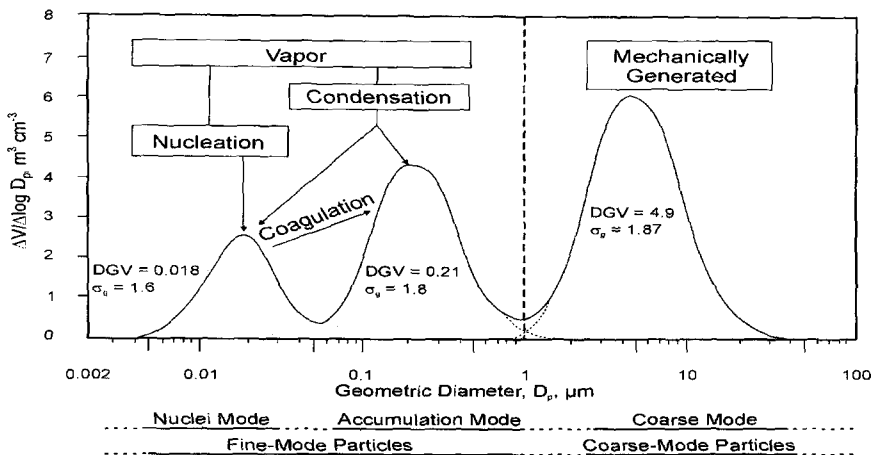


그림 1. 대기 중 입자상 물질의 입경 분포(DGV : geometric mean diameter,  $\sigma_g$  : geometric standard deviation).<sup>(3)</sup>

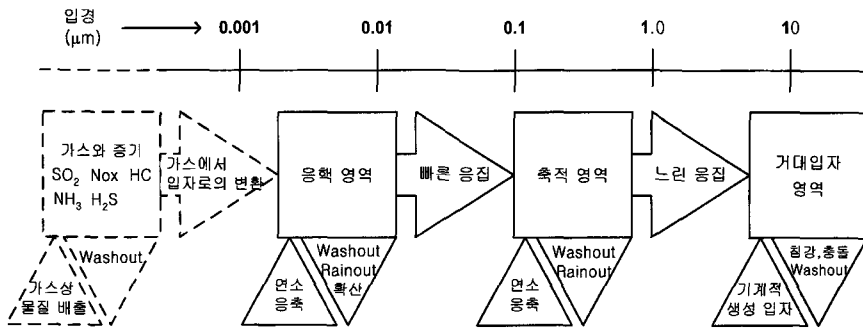


그림 2. 대기 중 입자상물질의 변환과정. (4)

로 분진의 입경별 농도분포는 대략 공기역학직경 2.5  $\mu\text{m}$ 를 중심으로 쌍극분포 (bimodal distribution)를 이루고 있다고 알고 있다.

실제로는 대기 중으로 배출되는 입자상 오염물질은 고온연소와 같은 작용으로 인해 3극분포 (tri-modal distribution)를 이루고 있으며 이를 그림 1에 나타내었다. (1) 3극 분포에는 3개의 mode가 있는데, 직경이 0.08  $\mu\text{m}$  이하의 응핵영역 (nucleation mode), 직경이 0.08 ~ 2  $\mu\text{m}$ 까지는 축적영역 (accumulation mode), 직경이 2 또는 3  $\mu\text{m}$ 이상은 거대분진 영역 (coarse mode)이라 한다. 응핵영역과 축적영역의 입자들을 포함하여 미세입자라 하고 거대분진 영역의 입자들은 거대입자라 한다. 미세입자와 거대입자의 전반적인 차이점을 표 1에 나타내었다.

응핵영역은 연소에 의해 직접 배출되는 입자와, 배출 후 바로 냉각되는 가스의 응축에 의해 생성된 입자로 구성된다. 응핵영역 범위의 입자들은 배출 후 더 큰 입자들과 빠르게 응집되고 구름이나 안개의 핵으로 제공되기 때문에 대기 중에서의 체류시간은 1시간 미만이다.

축적영역에는 2개의 소영역이 있는데, 0.2  $\mu\text{m}$ 에서 peak를 이루는 부분은 가스상 반응의 생성을 포함

한 응축영역 (condensation mode)이고 0.7  $\mu\text{m}$ 에서 peak를 이루는 부분은 응축영역의 입자들이 물이나 황산염의 첨가에 의해 생성되는 액적영역 (droplet mode)이다. 축적영역의 입자들은 연소시 배출되는 아주 작은 입자의 응집, 휘발성 물질의 응축, 가스상에서 입자상 물질로의 변환, 미세한 토양 입자 등에 의해 생성된다.  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 유기탄소 등이 이 범위 영역에서 주로 발견된다. 대기 중 황산염은 0.2 ~ 0.5  $\mu\text{m}$ 의 범위에 존재하는데,  $\text{SO}_2$ 의 가스상 산화에 의한 균일반응과  $\text{SO}_2$ 가 존재하고 있던 입자와 반응을 하여 생성된다고 보고된 바 있다. (2) 그림 2에는 입경에 따른 대기 중 입자상 물질의 생성 원인, 변환과정, 제거과정 등에 대하여 도식한 것이다.

응핵영역과 축적영역의 대부분의 입자들은 가스상 물질의 응축, 산화중화반응, 입자상 물질과의 불균일반응 (heterogeneous reaction) 등을 통하여 2차적으로 입자가 생성된다. 또한 가스상 물질이 상 (phase) 변화하여 액상, 고체상의 새로운 입자가 생성되는 균일반응 (homogeneous reaction)에 의해서도 2차 입자가 생성된다. 2차 생성입자는 화학반응이나 흡착, 흡수반응 등을 포함한 복잡한 반응과정을 통하여 생성되기 때문에 구성성분이 다양하고

변환되기 쉬우며, 주요 구성성분은 유기물질과 수 용성 성분으로 되어 있다. 2차 생성입자의 생성과정에 대해 간단히 정리를 하면 다음의 3가지 경우로 볼 수 있다.<sup>(6)</sup>

- 가스상물질의 응축현상
- 존재하고 있는 입자의 표면에서 가스상 물질과

표 1. 미세입자와 거대입자의 비교.<sup>(5)</sup>

	Fine		Coarse
	응핵영역	축적영역	
Formed from	- 연소, 고온 공정, 대기 중 반응		- 고체상 물질 또는 액적의 분해, 분쇄
Formed by	- 응핵 - 응축 - 응집	- 응축 - 응집 - 안개, 구름 액적의 증발	- 기계적 분쇄 - Spray의 증발 - 먼지의 부유 - 입자내의, 입자에 붙은 가스의 반응
구성성분	- 황산염 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) - 원소성 탄소 - 중금속 - 유기화합물	- 황산염 (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) - 질산염 (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) - 암모늄 이온 (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) - 수소이온 (H <sup>+</sup> ) - 원소성 탄소 - 다양한 유기화합물 - 중금속 (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn 등)	- 비산토양, 도로변 먼지 - 석탄, 기름, 목재의 연소 비산재 - HNO <sub>3</sub> /HCl로부터의 질산염/염화물 - 지각원소의 산화물(Si, Al, Ti, Fe) - CaCO <sub>3</sub> , NaCl, 해염 - 꽃가루, 곰팡이, - 타이어, 브레이크 패드의 파편
발생원	- 연소 - 유기화합물, SO <sub>2</sub> 의 대기 중 변환	- 석탄, 기름, 목재 등의 연소 - NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> 생성물, 터펜 등과 같은 biogenic 유기물질의 대기 중 변환 - 고온 연소과정, 제련, 제강공정	- 산업단지 먼지, 도로변 토양의 재비산 - 경작, 광산, 비포장 도로 토양의 부유 - 건설, 파괴 - control되지 않은 석탄, 기름의 연소
대기 중 체류시간	- 수 분에서 수 시간	- 몇 일내지 몇 주일	- 수 분에서 수 시간
제거과정	- 축적 영역으로의 성장	- 구름 액적 및 rains out 형성 - 건식 침착	- Fallout에 의한 건식 침착 - 강수에 의한 정화
이동거리	< 1~10s of km	100s to 1000s of km	< 1 to 10s of km

의 반응

- 입자 자체 내에서의 화학적 반응

### 3. 미세먼지의 발생

#### 3.1 응집 (Coagulation)

입자상 물질의 응집은 입자가 상대적인 운동에 의하여 서로 충돌하고 부착하여 더 큰 입자를 형성하는 과정이다. 응집의 결과, 개수농도는 감소하게 되고 입자의 크기는 증가하게 된다. 입자 사이의 상대적인 운동이 브라운 운동에 의하여 기안하는 경우를 열응집 (thermal coagulation)이라 한다. 중력이나 정전기력과 같은 외력 또는 공기역학적 효과에 의하여 상대적인 운동이 발생하는 과정을 운동응집 (kinetic coagulation)이라 한다. 응집이론은 입자 상호간의 현상으로, 원래는 액상을 대상으로 발전하였으며 입자상 물질에까지 확대되었다.

또한 응집은 단분산 (monodisperse) 응집과 다분산 (polydisperse) 응집으로 나눌 수 있다. 단분산 응집의 가장 단순한 형태는 단분산 구형입자의 열응집이다. 초기에 몇 개의 입자 충돌만을 고려하므로 응집된 입자들의 크기는 초기 입자들의 크기와 크게 다르지 않을 것이다. 응집된 입자의 크기는 생성되는 입자수의 세제곱근에 해당하는 만큼 증가하므로 액적의 응집에 이용할 수 있다. 이러한 형태의 응집이론을 처음으로 제안한 사람의 이름을 따서 Smoluchowski 응집이라고도 한다. 단분산 응집의 기본적인 접근 방식은 다른 입자들이 하나의 입자 표면에 어떻게 확산되는가를 고려하는 것이다. 응집되는 정도를 나타내는 응집율 (rate of coagulation)은 개수농도의 제곱, 응집상수에 비례한다. 즉, 응집에 의하여 입자의 크기가 두 배가 되려면 개수농도는 1/8로 줄어든다.<sup>(4)</sup> 단분산 응집에서, 비구형 입자의 응집은 구형 입자에 비해 빠르게 진행된다. 그 이유는 구형 입자와 비구형 입자가 동

일 체적이라면 구형입자보다는 비구형 입자가 표면적이 크며 브라운 운동에 의해 입자들 사이의 충돌 가능성이 더 크기 때문이다.

다분산 응집의 경우는 응집율이 입자의 입경범위에 좌우되므로 단분산 응집보다 복잡하다. 즉, 동일한 크기를 갖는 입자들보다는 크기가 서로 다른 입자들이 더 빠르게 응집이 진행된다. 큰 입자는 큰 흡수면을 가지고 있으며 그 표면에 작은 입자의 빠른 확산에 의해 다른 크기를 가진 입자끼리는 같은 크기의 입자들보다 빠르게 응집이 일어난다. 이러한 현상은 입자의 크기 차이가 클수록 잘 일어난다. 예를 들어 0.01  $\mu\text{m}$ 의 입자와 1.0  $\mu\text{m}$ 의 입자는 1.0  $\mu\text{m}$ 의 입자들에 비해 500배, 0.01  $\mu\text{m}$ 의 입자들에 비해 약 25배 빠르게 응집한다.<sup>(4)(8)</sup>

#### 3.2 응축 (Condensation)

고온증기의 냉각에 의한 연무 (mist)의 발생과 암모니아 가스와 염산가스의 혼합으로 생성된 염화암모늄 백색연기 등은 기체의 응축으로 입자가 생성되는 대표적인 예라고 할 수 있다. 이를 기체의 입자화 현상 (gas to particle conversion)이라 한다. 응축에 의한 입자의 생성은 크게 균일 핵생성 (homogeneous nucleation)과 불균일 핵생성 (heterogeneous nucleation)으로 나눌 수 있다.

응축에 의한 입자의 생성과 성장은 입자 생성의 주요한 원인이며 이 과정은 포화 수증기를 필요로 하여 입자생성에 관여하는 핵 (nuclei)의 존재하에서 발생한다. 그림 3에 응축에 의한 입자의 생성과정을 나타내었다. 가스의 화학반응 또는 증기의 물리적 냉각에 의해 응축성 물질이 과포화 상태가 되어 서로 충돌, 합체 및 증기분자의 증발과정을 반복하면서 분자의 집합체인 핵입자 (클러스터; cluster)가 형성된다. 이러한 클러스터들이 응집하거나 모노머 (monomer)가 클러스터에 응축하여

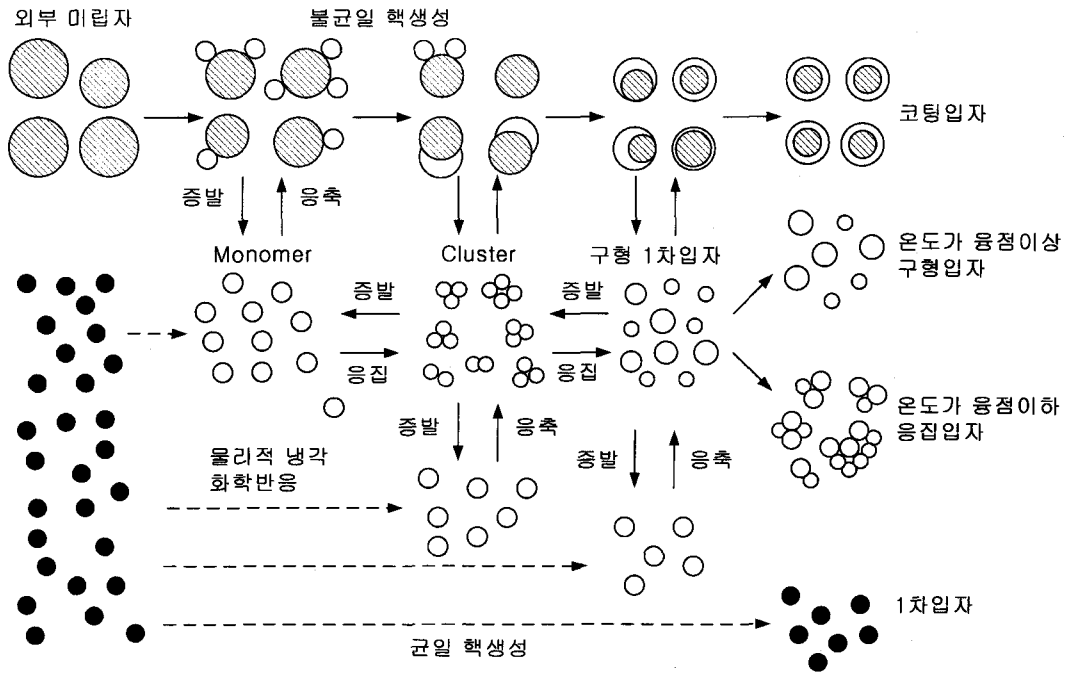


그림 3. 균일 및 불균일 핵생성에 의한 입자 발생과정.<sup>(7)</sup>

입자가 생성된다. 이러한 메커니즘에 의해 입자가 생성되는 것을 균일 핵생성이라 한다. 즉, 균일 핵생성은 여러 단계를 거치는데, 첫째로 증기가 일어날 수 있을 만큼 과포화되어야 하며, 둘째 작은 분자나 핵이 생성되어야 한다. 그리고 셋째는 증기가 핵을 이용하여 응축되어야 하며 이것은 액적이 된다. 불균일 핵생성은 첫 번째와 세 번째 단계만을 거치게 된다. 즉, 과포화도가 낮아도 이온이나 외부입자가 존재하면 이들이 응축핵이 되어 응축입자나 증기로 코팅된 입자가 발생하게 되는데 이러한 현상을 불균일 핵생성이라 한다.

그림 3에 나타낸 것과 같이 물리적 응축에 의한 입자의 생성과정은 두 개의 모델이 이용되고 있는데, 하나는 monomer의 증발 및 응축이 입자의 생성을 지배한다는 가정하고, 클러스터 사이의 응집

을 무시한 후 입자의 생성을 평가하는 모델이다. 이것을 고전적 핵생성 이론이라 한다. 다른 하나의 모델은 입자의 생성과정이 비가역적이라 가정하고 클러스터의 응집 및 monomer의 응축에 의해 입자의 생성을 평가하는 응집모델이다. 또한 기상화학반응에 의한 입자의 생성과정은 여러 반응이 복잡하게 관계되어 있어 명확치 않으나 가정된 화학반응의 진행을 열역학적으로 검토하여 입자가 어떻게 생성되는지를 밝힌 후 입자의 생성을 정량적으로 평가할 수는 있다. 그리고 응축법에 의한 담분산 입자의 생성에서, 입자로 만들려는 물질을 가열 증발시킨 후 고온증기를 저온공기와 혼합시키거나 관벽에서 냉각시키거나 단열팽창으로 냉각시키면 과포화상태가 되어 균일 또는 불균일 핵생성에 의해 입자가 생성되기도 한다.

### 3.3 증발 (Evaporation)

증발은 응축에 의해 입자들이 성장하는 것에 대한 반대 개념이며, 분자들이 입자 표면에 도달하는 것보다 떠나는 것이 더 많다. 증발에 있어서 응축과정에서 볼 수 있는 발생역치 (threshold of formation)와 같은 것은 존재하지 않는다. 따라서 불순물을 함유하지 않은 액적은 완전히 증발한다. 증발에 있어서 중요한 변수는 증발율 (시간에 따른 입자 크기 변화율)과 액적이 완전히 증발하는 시간 즉, 액적의 수명 또는 건조시간이라 할 수 있다.

대부분의 액적은 핵 응축에 의하여 생성되었기 때문에 증발이 일어나도 입경은 0이 되지 않고, 원래 핵의 크기로 된다. 수용성 핵의 경우에 건조율은 액적의 크기가 핵의 크기에 가까워짐에 따라 느려진다. 이것은 용액농도가 증가하여 액적표면 증기분압이 감소하기 때문이다. 대기 중의 액적은 오염물질을 흡착하여 표면에 막을 형성하여 증발을 크게 줄인다.

## 4. 미세먼지 오염원의 추정 방법론

### 4.1 대기관리모델

20세기 후반 우리나라를 비롯한 많은 국가들은 인구의 도시 집중화와 산업화 과정에서 야기된 환경오염을 사회의 중요한 문제로 인식하고 있다. 특히 도심지역은 한정된 공간에서 생활 및 산업활동이 급증하여 대기질이 악화되고 있다. 다양한 인위적 오염원에 의해 대기 중으로 배출된 오염물질은 인체에 심각한 영향을 미치며, 가시광선 산란에 의한 시정악화 및 산성침착 등 지역규모의 대기오염 문제를 야기시켰고, 더 나아가 오존층파괴와 온실효과 등 지구규모의 환경문제로 심화되고 있다. 이와 같은 총체적인 환경문제를 해결하기 위한 기술적, 경제적, 행정적 연구와 투자가 증대되고 있다. 또한, 많은 연구자들은 대기오염물질의 방지대책

및 환경기준 달성을 위해 오염물질의 물리적 이동현상 및 화학적조성 등의 제반 특성을 연구하고 있으며, 특히 오염원이 수용체 (receptor)에 미치는 영향을 밝히기 위하여 여러 가지 모델을 이용하고 있다. 대기오염물질의 효율적 제어를 위해서는 오염원에 대한 정성·정량분석이 선행되어야 하는데, 이는 오염원의 정성·정량분석이 일괄적인 오염원 규제가 아닌 개별 오염원 중심의 규제를 가능하게 하여 효율적이고 합리적인 환경정책 수립에 도움을 주기 때문이다.

각 오염원이 대기환경에 미치는 영향에 대한 연구는 오염원의 질량기여도 (mass contribution) 추정연구라고도 하는데, 크게 분산모델 (dispersion model)과 수용방법론 또는 수용모델 (receptor methods or receptor model) 연구로 구분할 수 있다. 두 방법 모두 질량보존의 법칙과 질량수지에 이론적 기초를 두고 있다. 초기 모델연구 단계에서는 오염원 배출자료와 기상변수들을 기초로 하는 오염원 중심의 분산모델이 활발하게 이용되었다. 이를 수행하기 위해서는 모델자체에 대한 연구뿐만 아니라 연구대상 지역의 배출원 조사, 기상자료의 확보, 분산변수의 결정을 위한 현장 실험, 오염물질간의 물리·화학적 반응에 대한 동력학적인 연구 등이 필수적이다. 그러나 이 과정에서 배출자료의 오차, 수직·수평적 분산변수의 불확실도, 복잡한 모델 개발에 따른 시간과 비용 등의 문제점이 야기되었다.

### 4.2 수용방법론의 분류

대기 중 입자상 오염물질의 제어를 위해 연구되기 시작한 수용방법론은 각종 응용통계학을 기반으로 한 일종의 계량화학적 분석기술이다. 이 용어는 오염물질의 배출원 확인을 위하여 풍하 (down-wind) 지역의 수용체 위치에서 측정된 오염물질의 이화학적 특성을 이용하기 때문에 명명되었다. 이

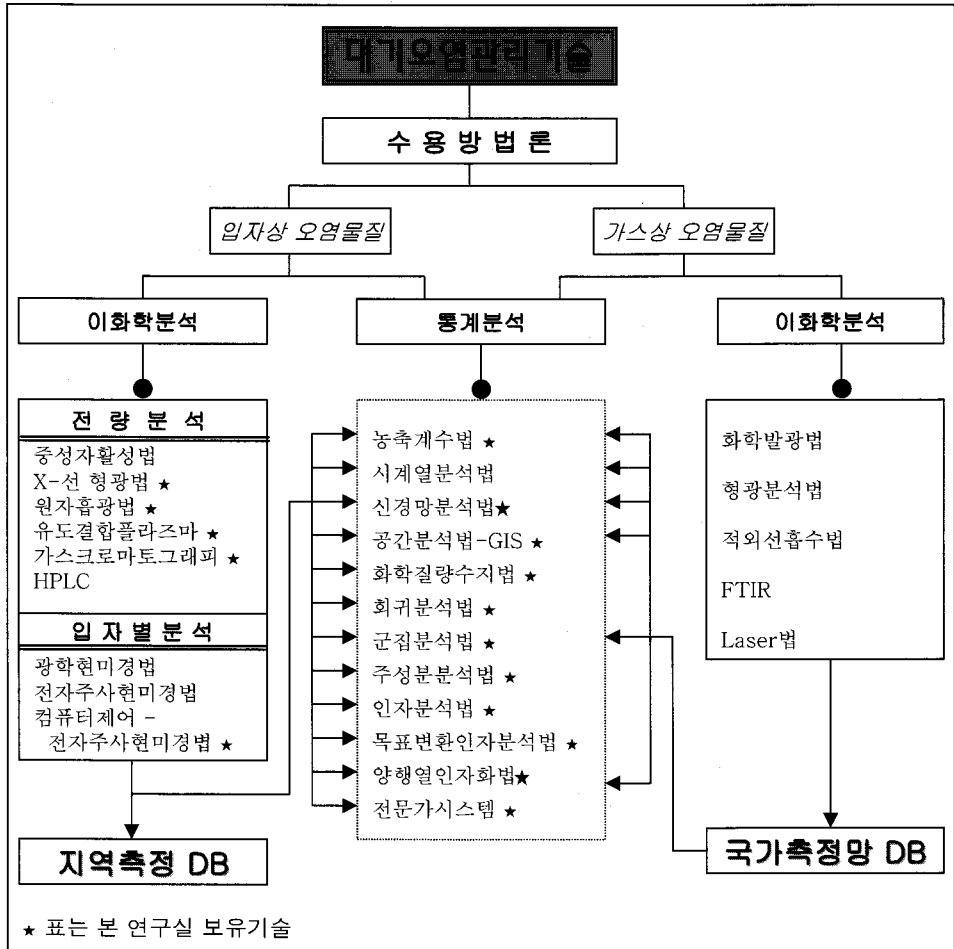


그림 4. 수용방법론의 분류

방법론은 입자상 및 가스상 오염물질의 분석에 다 각도로 응용할 수 있고, 이들 오염물질의 물리화학적 거동을 정량적으로 파악하여 합리적인 대기오염 관리를 유도하는 기초기술이라 할 수 있다.

대기환경학에서 수용방법론의 적용범위는 실내공기오염과 같은 미시규모, 대도시의 오염원 파악과 시정감소와 같은 지역규모, 동북아시아의 산성비와 황사현상과 같은 광역규모로 확대되고 있다. 그림

4는 최근 전세계적으로 수행되고 있는 수용방법론의 기술들을 나열하고 도식한 것이다. 그림과 같이, 수용방법론은 크게 이화학적 분석분야와 여기서 도출된 자료에 입각하여 결과를 해석하는 응용통계학적 분석분야로 나눌 수 있다. 한편, 입자상 오염물질의 이화학 분석은 진량분석과 입자별 분석으로 수행될 수 있는데, 국내의 대부분 대기환경 연구자들은 채취된 분진 전체를 하나의 시료로 간주하고



분석하는 전량분석에 치중하고 있다. 전량분석으로도 출된 분석자료 만으로는 현존하는 응용통계학적 기술을 모두 적용하더라도 유사오염원을 분리·확인할 수 없다. 예를 들어, 황사의 영향을 정량화하기 위해서는 지역토양과 통계적으로 분리되어야 하나, 전량화학분석으로는 이들을 분리시킬 수 없다. 반면, 분진의 입자별 연구는 유사오염원의 오염기여도를 정량적으로 파악할 수 있는 핵심기술이라 하겠다.

한편, 수용방법론 중 통계분석 분야는 모든 응용 가능한 통계학이 동원될 수 있다. 응용통계의 분석 과정은 이화학 분석과정과 마찬가지로 오염원의 확인·분리·정량화 과정으로 진행된다. 1998년도 말 현재 전국에는 147개의 국가측정망이 고비용으로 운영되고 있으며, 주요오염물질에 대한 방대한 자료가 매시간 양산되고 있다. 이러한 방대한 자료를 활용하기 위해서는 고도의 응용통계학을 적용하여야 한다. 대기오염에 응용통계학을 적용하기 위해서는 대기오염물질의 생성·소멸·영향 및 이화학 분석 등의 전과정을 이해하여야 하며, 특히 특정 오염물질의 거동을 진단하고 예보하는 기술은 대기환경학의 정점이 되는 분야로서 다양한 수용방법론을 적용할 때 비로소 소기의 목적을 달성할 수 있다.

이 기술은 가스상 오염물질의 오염도를 추정하고 공간분포를 파악하는 기술이지만, 국내 기술력은 매우 낮은 형편이다. 수용방법론에 입각한 대기오염관리기술은 국민건강과 재산 손실을 최소화시키는 공공복지적인 실용성, 산업체의 경영 손실을 최소화시키는 경제적인 실용성, 대기오염학의 기초연구를 활성화시키는 학문적인 실용성 등을 동시에 충족시키는 연구분야라 하겠다.

### 4.3 국내외 연구현황

수용방법론은 Blifford와 Meeker에 의해 대기오

염문제에 처음 적용되었으며, 1970년대 이후부터 대기환경학에 광범위하게 응용되어 최근까지 수백 편의 논문이 발표되고 있다.<sup>(9)~(11)</sup> 응용초기에는 오염원 확인을 위한 방법으로 농축계수법이나 시계열 분석법 등이 이용되었으나, 화학질량수지법과 인자 분석법과 같은 다변량 자료분석법이 최근 널리 사용되고 있다. Winchester(1971)는 오염원 배출자료를 기초로 시카고 지역의 오염원 추적에 응용하였으며, Hidy 등(1970)은 자동차 배출가스 및 토양 분진 등의 오염원 기여도를 산출하기 위해 화학질량수지법을 최초로 개발하였다.<sup>(12)~(13)</sup> 이후 Friedlander(1973)는 미국의 각 지역 대기오염 평가에 이를 응용하였다.<sup>(14)</sup> 당시에는 분진 중의 금속원소에 적용하였으나 최근에는 유기화합물 및 가스상 오염물질까지 적용 범위가 확산되고 있다. Lin 등(1994)은 휘발성 유기화합물의 오염원 추적을 위해 붕괴인자를 적용하였으며,<sup>(15)</sup> Scheff 등(1994)은 두개 상(phase)을 이용하여 시카고 지역의 대기 중 미세분진과 NMHC(non-methane hydrocarbon)의 오염원을 동시에 추정할 바 있다.<sup>(16)</sup>

한편, 인자분석을 이용한 수용방법론은 Prinz 등(1968)에 의해 대기오염 분야에 처음 응용되었으며, 개량된 방법론인 목표변환인자분석법이 그 후에 개발되었다.<sup>(17)~(18)</sup> 인자분석법은 도시 분진자료에 적용된 바 있으며, 실내공기 및 강수 중의 오염원 파악을 위해 적용된 바도 있다.<sup>(19)~(21)</sup> Zelenka 등(1993)은 화학질량수지법과 목표변환인자분석법을 결합하여 중국 베이징에서 오염원의 기여도를 추정하였다. 한편, Conner 등(1993)은 과거 독립적으로 발전되어 온 분산모델과 수용방법론을 결합하여 캐나다 온타리오에서 오염원의 기여도를 정량적으로 추정할 바 있으며, Song 등(1996)은 수용방법론과 인공지능이 결합된 기술을 개발하였다.<sup>(22)~(24)</sup> 최근 국외의 연구는 미세분진 및 유기화합물에 중

점을 두고 오염원을 정량적으로 평가하는 기술을 개발하는데 주력하고 있으며, 이들 결과를 가시적으로 표현하는 GIS 기술은 이미 보편화되었다.

그러나 상기 응용 및 개발기술들은 전적으로 전량분석에 입각한 방법론으로, 개별입자에 대한 현미경적 분석과 이를 위한 통계기술은 입자군수지법 (particle class balance) 개발을 계기로 활성화되기 시작하였다. 외국의 연구동향을 보면 SEM/EDX를 이용한 많은 자료가 이미 축적되어 있다. 미국 EPRI (Electric Power Research Institute)는 비산재의 생물학적 영향에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 미국 EPA에서도 전량분석과 병행하여 미세분진의 오염원 기여도를 파악한 바 있다.

한편, 수용방법론 중 국내에서 활발히 연구가 진행되었던 부분은 전량분석법으로 금속원소를 분석하는 부분이다. 유기화합물 및 특정유해가스의 측정기술은 미진하여 아직도 외국에 분석을 의뢰하는 경우가 적지 않다. 또한 이들 자료를 활용하는 통계 분석법의 응용도 극히 한정되어 고비용의 측정자료를 효율적으로 이용하지 못하고 있다. 이와 같은 연구침체의 주원인은 대기환경에 대한 기초연구 투자가 극히 작기 때문이며 환경기초기술의 개발이 경제성장의 걸림돌로 생각하는 정책적 분위기 탓도 있다. 이는 또한 이 분야의 연구가 실용화 또는 상용화 단계로 즉시 발전될 수 없는 공공복지기술이기 때문으로 사료된다. 최근 일부 민간기업 및 지방공사가 지역생활환경 및 사업장환경의 오염현황과 악 차원에서 수용방법론을 부분적으로 도입한 사례가 있다.

국내에서 수용방법론을 이용하여 대기질을 평가한 사례로는 부산시 분진오염원의 정량적 추정, 석탄화력발전소 주변에서의 강하분진의 정량적 평가, 서울시 지하상가에서의 오염패턴분석, 대도시 고농도 오존의 예측, 서울시 미세분진의 정량적 기여도

산출, 지하역사 공기오염의 정량적 평가, 분진의 크기별 오염원 분석, GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포분석, 다변량분석법을 이용한 초미세분진의 조성과 패턴연구, PM-2.5와 PM-10의 환경거동에 관한 연구, 수원지역 PM-10 오염원의 정량평가법 개발, PMF를 이용한 PM-10 오염원의 확인 등의 연구동향이 있다.(25)~(38) 한편, 입자별 분석 사례로는 황사입자와 일반 토양입자의 분리연구, 토양 및 소각로에서의 개별입자의 오염원 분류표 개발, 자동차 주행모드별 배출분진의 화학적 조성분석, 황사의 오염원 분류표 개발 등과 같은 연구가 수행된 바 있다.(39)~(41)

입자별 분석은 개별 분진입자에 대한 각종 물리 화학적 정보를 통해 오염원을 파악할 때 해상도를 크게 높일 수 있으나, 분석에 필요한 비용과 시간, 부정형의 유기물질에 대한 민감도의 부족, 입자의 밀도와 체적과 같은 양적인 분석에 불확실성을 내포하고 있다. 따라서 이 분석법이 오염원의 영향을 평가하는 유용한 방법이지만, 정량적인 평가를 위해 지속적인 기술개발이 요구되고 있다.

마지막으로, 여러 가지 수용방법론을 이용하여 미세먼지의 오염원별 정량적 기여도를 산정한 국내 및 국외의 연구결과를 표 2에 정리하여 제시하였다.

## 5. 결 언

쾌적한 환경을 추구하는 국민들은 경제가 발전할수록 상대적으로 더욱 심각한 체감오염을 실감할 것이며, 또한 국민들은 환경권 보호 및 알권리의 추구 차원에서 대기환경보전에 더욱 커다란 관심을 보일 것이다. 이에 따라 건강 및 복지손실을 최소화하며 또한 산업체의 경제적 손실을 최소화하는 합리적인 대기오염 관리기술의 개발이 절실히 요구되고 있다. 현재와 같은 종합적이고 일관적인 각종 규제는 설득력을 잃을 것이며, 과학적 분석기술에 입

표 2. 각 지역의 미세먼지 오염원 기여도 비교.

Sample	Location	Method- ology	Source Contribution (%)			Reference	
PM-2.5	Detroit, USA	Absolute PCA	Vehicles	5.1	Sulfate factor	55.0	Wolff and Korsog (42)
			Oil Burning	3.0	Incinerator	3.8	
			Unidentified	33.1			
PM-10- PM-2.5	Southeast Chicago	CMB	Urban&Steel Dust	45.0	Coal	34.0	Vermette <i>et al</i> (43)
			Steel Stack Emission	7.0	Soil	6.0	
			SO <sub>4</sub>	4.0	Incinerator	2.0	
			Oil Burning	1.0	Road Salt	1.0	
PM-2.5	Southeast Chicago	CMB	Region	76.0	Steel Stack Emission	19.0	Vermette <i>et al</i> (43)
			Urban&Steel Dust	3.0	Road Salt	2.0	
			Vehicles	1.0	Oil Burning	1.0	
PM-10	Rubidoux, CA, USA	CMB	Road Wind Dust	48.0	Ammonium Nitrate	21.7	Chow <i>et al</i> (44)
			Vehicles	10.2	Ammonium Sulfate	5.3	
			Lime or Gypsum	1.1	Marine	1.5	
			Residual oil Combust	0.3			
PM-10	Riverside- Magnolia	CMB	Road Wind Dust	31.7	Ammonium Nitrate	19.7	Chow <i>et al</i> (44)
			Vehicles	11.2	Ammonium Sulfate	4.9	
			Lime or Gypsum	1.2	Marine	1.2	
			Residual oil Combust	0.3			
PM-10	U.C. Riverside	CMB	Road Wind Dust	32.6	Ammonium Nitrate	21.4	Chow <i>et al</i> (44)
			Vehicles	7.2	Ammonium Sulfate	4.8	
			Lime or Gypsum	1.1	Marine	1.3	
			Residual oil Combust	0.3			
PM-10	Santa Barbara (Urban)	CMB	Road Wind Dust	9.5	Secondary Nitrate	1.0	Chow <i>et al</i> (45)
			Vehicles	14.7	Secondary Sulfate	3.2	
			Lime or Gypsum	0.7	Marine	6.4	
PM-10	Santa Maria (Urban)	CMB	Road Wind Dust	7.4	Secondary Nitrate	1.4	Chow <i>et al</i> (45)
			Vehicles	7.6	Secondary Sulfate	3.1	
			Marine	5.7			
PM-10	Santa Ynez (Near Airport)	CMB	Road Wind Dust	4.6	Secondary Nitrate	0.6	Chow <i>et al</i> (45)
			Vehicles	6.8	Secondary Sulfate	2.2	
			Lime or Gypsum	0.5	Marine	4.0	

Sample	Location	Methodology	Source Contribution (%)			Reference		
PM-10	Gaviota (Rural), CA	CMB	Road Wind Dust	3.2	Secondary Nitrate	0.5		
			Vehicles	5.1	Secondary Sulfate	2.6		
			Lime or Gypsum	0.3	Marine	6.3		
PM-10	Anacapa Island, CA	CMB	Road Wind Dust	2.2	Secondary Nitrate	1.0		
			Vehicles	4.9	Secondary Sulfate	3.4		
			Marine	9.6				
PM-10	Las Vegas (1) USA	CMB	Geological	93.3	Vehicles	2.7		
			Wood Combustion	0.2	Ammonium Sulfate	1.9		
			Ammonium Nitrate	1.9				
PM-10	Las Vegas (2) USA	CMB	Geological	84.4	Vehicles	9.0		
			Wood Combustion	2.1	Ammonium Sulfate	2.1		
			Ammonium Nitrate	2.3				
PM-10	PTEAM Study Riversid, CA	PMF	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			Yakovleva <i>et al</i> <sup>(41)</sup>		
			Soil	49.0	Seasalt		4.0	
			Nonferrous metal & Vehicle Exhaust		19.0			
			Secondary Sulfate	30.0				
			Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					
			Soil	33.0	Personal Activity		14.0	
			Nonferrous metal & Vehicle Exhaust		14.0			
PM-2.5	PTEAM Study Riversid, CA	PMF	Outdoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			Yakovleva <i>et al</i> <sup>(41)</sup>		
			Soil	7.0	Seasalt		4.0	
			Nonferrous metal & Vehicle Exhaust		14.0			
			Secondary Sulfate	20.0				
			Indoor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )					
			Soil	3.0	Personal Activity		19.0	
			Nonferrous metal & Vehicle Exhaust		7.0			
Secondary Sulfate		14.0						
PM-10	UK (Coastal, Rural, Urban)	Multi-linear Regres.	Secondary Source	28~35		Turnbull and Harrison <sup>(48)</sup>		
			Primary Combustion	20~57				
			Sodium Chloride	11~34				
			Others (include crustal)	3~21				

Sample	Location	Method-ology	Source Contribution (%)		Reference	
PM-2.5	Sihwa, Korea	CMB	Marine	1.1	Road Dust	6.4
			Vehicles	8.6	Incineration	4.9
			Metallurgy	0.8	Oil Combustion	0.3
			Agricultural Burning	11.3	(NH <sub>4</sub> )SO <sub>4</sub>	22.0
			NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	16.2	Nontraffic OC	20.6
			Cu Industry	0.5		
PM-10	Suwon, Korea	CMB	Combustion	5.5	Soil	2.2
			Incineration	4.6	Sulfate	11.8
			Vehicles	14.6	A-N-S	19.7
			Unknown	41.6		
PM-10	Suwon, Korea	TTFA	Combustion	2.1	Soil	3.8
			Incineration	4.4	Sulfate	12.4
			Vehicles	14.2	A-N-S*	14.4
			Unknown	48.6		

(\* : Ammonium-Nitrate-Sulfate related source)

각한 합리적 관리기술 만이 국민의 호응을 받을 수 있기 때문이다.

수용방법론에 입각한 대기오염관리기술은 국민 건강과 재산 손실을 최소화시키는 공공복지적인 실용성, 산업체의 경영 손실을 최소화시키는 경제적인 실용성, 대기오염학의 기초연구를 활성화시키는 학문적인 실용성 등을 동시에 충족시킬 수 있는 연구분야이다. 즉, 황사의 정량적 대기오염 기여도를 파악할 수 있으며, 대도시 가시도 오염의 오염원 파악, 강하분진의 강하 총량산출, 호소에서 대기오염에 의한 비점오염원 추정, 산성비의 오염기여도 파악, 대도시 주요 대기오염원의 원인 분석, 소각로를 비롯한 주요 오염원의 사후평가, 점·선·면 오염원의 정량적 기여율 추정, 환경영향평가의 핵심인 오염도 평가, 석면오염도의 진위파악, 오염물질의 장거리 운송량 추정, 고농도 오존의 예측 및 예

보, 배출계수의 추정, 대기오염 측정항목의 설정, 측정기술의 개발 등 대기환경 전반에 즉시 도입되고 응용될 수 있는 필수적 기술이다.

최근 휘발성유기화합물을 비롯한 극미량 유해대기오염물질의 측정항목이 매년 확대되고 있다. 이 결과 하드웨어적 측정기술은 투자지와의 비례하여 빠른 속도로 개선이 이루어질 것으로 사료되나, QA/QC를 비롯한 소프트웨어적 분석기술의 개발은 많은 어려움이 예상된다. 이들 분석기술과 더불어 수용방법론은 급속히 발전할 것이다. 즉, 수용방법론의 연구특성상 오염항목과 자료의 확보유무에 따라 다양한 연구성과가 창출될 것이다. 특히 입자별 분석기술과 응용통계기술이 상호보완적으로 발전한다면 대기오염을 효율적으로 관리할 수 있는 혁신적인 대기관리기술의 출현할 것이다.

- 참고문헌 -

1. Whitby, K.T., R.B. Husar, and B.Y.H. Liu (1972) The aerosol size distribution of Los Angeles smog, J. col. & intel. Sci., 39, p203.
2. Mueller, S.F. and R.E. Imhoff (1994) Estimates of particle formation and growth in coal-fired boiler exhaust-II. Theory and model simulations, Atmospheric Environment, 28, p603-610.
3. Wilson, W.E., H.H. Suh (1997) Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies. J. Air Waste Manage. Assoc., 47, 1238-1249.
4. Hinds, W.C. (1982) Aerosol Technology, John Wiley & Sons, New York.
5. U.S. EPA (1999) Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vol. 1, EPA600/P-99/002a.
6. Pitts, F.B.J. and J.N. Pitts (1986) Atmospheric Chemistry, John Wiley & Sons, New York.
7. 김동술, 김태오 (2001) 미립자 공학, 도서출판 대응.
8. 김신도, 김중호, 김태식 (1995) 에어로졸, 동화 기술.
9. Blifford, I.H. and G.O. Meeker (1967) A factor analysis model large scale pollution, Atmospheric Environment, 1, 147-157.
10. Hopke, P.K. (1985) Receptor Modeling in Environmental Chemistry, Wiley Interscience, New York.
11. Gordon, G.E. (1988) Receptor models, Environmental Science & Technology, 22(10), 1132-1142.
12. Winchester, J.W. and G.D. Nifong (1971) water pollution in lake Michigan by trace element from aerosol fallout, Water Air and Soil pollution, 1-50.
13. Hidy, G.M. and S.K. Friedlander (1970) The nature of the Los Angeles aerosol, Proceedings of the 2nd International Clean Air Congress, Academic Press, New York, 391-404.
14. Friedlander, S.K. (1973) Chemical element balances and identification of air pollution sources, Environ. Sci. Technol., 7, 235-240.
15. Lin, C. and J.B. Milford (1994) Decay adjusted chemical mass balance receptor modeling for volatile organic compounds, Atmospheric Environment, 28(20), 3261-276.
16. Scheff, P.A., R.A. Wadden, and J. Lin (1994) Source allocation of hazardous air pollution in Chicago, J. Air Waste Manage. Assoc., 94-TP26B.04.
17. Prinz, B. and H. Stratmann (1968) The possible use of factor analysis in investigating air quality, Staub-Reinhalt 23, p33.
18. Hopke, P.K., D.J. Alpert, and B.A. Roscore (1982) FANTASIA program for target transformation factor analysis to apportion source in environmental samples, Computer & Chemistry, 7(3), 149-155.
19. Severin, K.G., B.A. Roscore, and P.K. Hopke (1983) The use of factor analysis in

- source determination of particle emissions, Particulate Science and Technology, 1, 183-192.
20. Nitta, H., M. Ichkawa, M. Sato, S. Konish, and M. Ono (1993) A new approach based on covariance structure model to source apportionment of indoor fine particles in Tokyo, Atmospheric Environment, 28(4), 631-636.
  21. Bridgman, H.A. (1992) Evaluating rain-water contamination and sources in South-east Australia using factor analysis, Atmospheric Environment, 24A(13), 2401-412.
  22. Zelenka, M.P., P.J. Lioy, H. Qinc-ci, and W.E. Wilson (1992) Development of a new methodology for characterizing air pollution source in China, PM10 Standards, Edited by J.C. Chow and D.M. Ono, vol 1, A&WMA/EPA, 163-182.
  23. Conner, T.L., J.L. Miller, R.D. Willis, R.B. Kellogg, and T.F. Dann (1993) Source apportionment of fine and coarse particle in Southern Ontario, Canada, In proceeding of the 86th Annual Meeting of the Air Waste Manage. Assoc., paper 93-TP-58.05.
  24. Song, X.H. and P.K. Hopke (1996) Solving the chemical mass balance problem using an artificial neural network, Environ. Sci. Technol., 30, 531-535.
  25. 김태오, 김동술, 나진균 (1990) Target Transformation Factor Analysis 를 이용한 부산시 분진오염원의 양적 추정, 한국대기보전학회지, 6(2), 135-146.
  26. 김동술, 김희강, 김신도, 김태오 (1994) 수용 모델을 이용한 강하분진의 농도분포에 관한 연구, 대한환경공학회지, 12(1), 1-9.
  27. 김동술, 김형석 (1990) Pattern Recognition을 이용한 지하상가에서의 대 기오염물질의 농도 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 6(1), 1-10.
  28. 허정숙, 김동술 (1993) 다변량 통계분석을 이용한 서울시 고농도 오존의 예측에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(3), 207-215.
  29. 유정석, 김동술 (1995) 서울시 PM-10 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기보전학회지, 11(3), 279-290.
  30. 김동술, 김신도, 김윤신, 신용배, 이태정 (1994) 서울시 지하철역내 분진 오염원의 정량적 기여도의 결정, 대한환경공학회지, 16(3), 309-319.
  31. 이태정, 김동술 (1993) 입경 분류에 입각하여 목표변환 인자분석법을 이용한 수원지역 분진 오염원의 정량적 기여도 추정, 한국대기보전학회지, 9(1), 44-50.
  32. 이태정, 김동술 (1997) 수원지역 입자상 오염물질의 오염원 기여도의 추정, 한국대기보전학회지, 13(4), 285-296.
  33. 윤훈주, 김동술 (1997) GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포 분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.
  34. 김현섭, 이태정, 김동술 (1999) 수원지역 강하분진의 화학조성 및 공간분포 분석, 한국대기환경학회지, 15(1), 23-32.
  35. 황인조, 김동술 (1998) Submicron 부유분진의 화학적 조성 및 분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(1), 11-23.

36. 김병화, 김동술 (2000) 수원지역 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 와 PM<sub>10</sub>의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(2), 89-101.
37. 김관수, 황인조, 김동술 (2001) 수원지역 대기 중 PM-10 오염원의 정량 평가를 위한 수용방법론의 개발, 한국대기환경학회지, 17(2), 119-131.
38. 황인조, 김태오, 김동술 (2001) PMF 방법론을 이용한 수원지역 PM-10의 오염원 확인, 한국대기환경학회지, 17(2), 133-145.
39. 장여진, 김동술 (1997) CCSEM을 이용한 대기 중 개별분진의 분류에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 13(5), 345-353.
40. 김혜진, 이종대, 김동술 (1999) SEM/EDX를 이용한 디젤 분진의 입자별 분석, 한국대기환경학회지, 15(2), 175-182.
41. 강승우, 김동술 (2000) 황사의 오염원분류포 개발을 위한 개별입자분석, 한국대기환경학회지, 16(6), 565-572.
42. Wolff, G.T. and P.E. Korsog (1985) Estimates of the contributions of sources to inhalable particulate concentrations in Detroit, Atmospheric Environment, 19, 1399-1409.
43. Vermette, S., C. Sweet, D. Gatz, S. Landsberger, and P.K. Hopke (1989) Receptor modeling for source apportionment in Southeast Chicago, 82th AWMA Annual Meeting, 89-33.7.
44. Chow, J.C., C.S. Liu, J. Cassmassi, J.G. Watson, Z. Lu, and L.C. Pritchett (1992) A neighborhood-scale study of PM<sub>10</sub> source contributions in Rubidox, CA, Atmospheric Environment, 26(4), 693-706.
45. Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, and R.J. Countess (1996) Source and chemistry of PM<sub>10</sub> aerosol in Santa Barbara Country, CA, Atmospheric Environment, 30, 1489-1499.
46. Chow, J.C., J.G. Watson, M.C. Green, D.H. Lowenthal, D.W. Dubois, S.D. Kohl, R.T. Egami, J. Gillies, C.F. Rogers, and C.A. Frazier (1999) Middle- and neighborhood-scale variations of PM<sub>10</sub> source contributions in Las Vegas, Nevada, J. Air Waste Manage. Assoc., 49(6), 641-654.
47. Yakovleva, E., P.K. Hopke, and L. Wallace (1999) Receptor modeling assessment of particle total exposure assessment methodology data, Environ. Sci. Technol., 33, 3645-3652.
48. Turnbull, A.B. and R.M. Harrison (2000) Major component contributions to PM<sub>10</sub> composition in the UK atmosphere, Atmospheric Environment, 34, 3129-3137.
49. Park, S.S., M.S. Bae, and Y.J. Kim (2001) Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> particles in the Sihwa area Korea, J. Air Waste Manage. Assoc., 53, 393-405.