

## 다단 임팩터 (MOUDI)의 조대 입자 채취 특성

### Collection Characteristics of a MOUDI Cascade Impactor for Coarse Particles

배 귀 남 · 지 준 호 · 문 길 주

한국과학기술연구원 지구환경연구센터

(1999년 3월 23일 접수, 1999년 12월 8일 채택)

Gwi-Nam Bae, Jun-Ho Ji and Kil-Choo Moon

Global Environmental Research Center, Korea Institute of Science and Technology

(Received 23 March 1999; accepted 8 December 1999)

#### Abstract

Particle collection characteristics of the MOUDI cascade impactor has been studied for coarse particles in the range of 2 to 20  $\mu\text{m}$  in aerodynamic diameter. A vibrating orifice aerosol generator was employed to generate monodisperse test aerosols. The oleic acid and sodium chloride ( $\text{NaCl}$ ) particles were used as test aerosols. Aluminum foil and Teflon filter were selected as impaction media. The sampling flow rate was changed from 25 to 35 L/min. Particle collection efficiency for single stage was examined for liquid particles. The stage response was obtained experimentally for the cascade impactor composed of three stages and a backup filter. The results showed that most of particle collection efficiencies measured in this work are similar to the efficiency curves obtained by Marple *et al.* (1991). For particles less than cut-off size of the stage, the collection efficiencies of solid particles are similar to those of liquid particles. However, the collection efficiency of solid particles decreases with increasing particle diameter for the particles greater than the actual cut-off size of the impactor. The particle collection efficiency increases with increasing sampling flow rate at the same particle size. However, the collection efficiency curves seem not to be greatly shifted with the flow rate. The stage responses obtained by direct measurements in this work are in good agreement with those derived from the collection efficiency curves for single stage.

**Key words :** cascade impactor, coarse particles, collection efficiency, stage response

#### 1. 서 론

산업화, 도시화 등으로 인해 대기오염 뿐만 아니라 실내 공기오염도 중요한 문제로 다루어지고 있다. 공기 중에는 에어로졸, 유해가스, 미생물, 라돈

등 다양한 오염물질이 존재하므로, 이러한 오염물질의 오염도 수준을 파악하기 위한 연구가 국내외적으로 많이 수행되고 있다. 에어로졸의 경우 지금까지는 주로 총부유입자(total suspended particulates, TSP)와 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)이 10  $\mu\text{m}$  또는 2.5  $\mu\text{m}$  이하인 부유입자(particulate mat-

ter, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)를 측정하여 대기오염도를 평가하여 왔다. 대도시 스모그 현상, 대기 에어로졸의 장거리 이동, 에어로졸이 인체에 미치는 영향 등을 규명하기 위해서는 입경분포와 같은 에어로졸에 대한 보다 상세한 정보가 필요하다.

최근 대기 에어로졸의 입경별 질량농도분포 측정에 다단 임팩터(cascade impactor)가 많이 사용되고 있으므로 (Howell *et al.*, 1998; 박정호와 최금찬, 1997), 신뢰할 수 있는 에어로졸 테이터를 얻기 위해서는 임팩터의 입자채취(particle collection) 특성을 정확히 파악하여야 한다. 임팩터는 입자의 관성을 이용하여 기류로부터 입자를 분리하며, 입자 충돌 기판의 재질 및 표면상태, 입자재질, 그리고 흡인 유량 등에 따라 입자채취 특성이 달라질 수 있다. 임팩터의 이론, 설계방법, 사용법, 테이터 처리 등에 대해서는 잘 알려져 있으며 (Lodge, Jr. and Chan, 1986), 널리 사용되는 임팩터의 성능 특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었다 (Howell *et al.*, 1998; Marple *et al.*, 1991; Rader *et al.*, 1991; Knuth, 1984). 임팩터는 입자의 관성을 이용하여 입자크기를 분류하므로 주로 크기가 1 μm 이상인 조데 입자(coarse particles)의 분류에 사용되었으나, 최근 미세 입자(fine particles)에 대한 관심이 높아짐에 따라 저압(low-pressure)이나 미세 오리피스(micro-orifice)를 사용하여 미세 입자를 분류할 수 있는 임팩터가 개발되어 널리 사용되고 있다.

미세 오리피스를 사용한 임팩터는 1980년대 초에 개발되어 현재 시판되고 있으며, 기본적인 성능 특성도 알려져 있다 (Marple *et al.*, 1991; Lodge, Jr. and Chan, 1986). 최근 들어 국내에서도 미세 오리피스를 사용한 다단 임팩터(microorifice uniform deposit impactor, MOUDI, MSP Corp., USA)가 대기 에어로졸의 입경분포 측정에 사용되고 있다 (김용표 등, 1999; 배귀남 등, 1998; 배민석과 김영준, 1998). 따라서, 본 연구에서는 다단 임팩터인 MOUDI(model 100)를 대상으로 실험실에서 시험용 단분산 입자를 발생시켜 입자 및 기판의 재질, 흡인유량에 따른 조대 입자의 채취 특성을 살펴보았다.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 MOUDI는 8단으로 구성되어

있는데, 각 단의 분리입경(cut size, aerodynamic diameter)은 0.185, 0.33, 0.54, 1, 1.8, 3.2, 5.6, 10 μm이고 입구(inlet)의 분리입경은 18 μm이며, 흡인유량은 30 L/min이다. 일반적으로 입자크기에 따라 입자발생 및 측정방법이 달라지는데, 실험대상인 MOUDI의 분리입경 범위가 넓으므로 한가지 방법만으로 모든 단의 입자채취 특성을 규명하기가 곤란하다. 보통 분리입경이 큰 단의 경우 형광법(fluorometric 방법) 또는 중량법을 사용하고, 분리입경이 작은 단의 경우 입자계수법을 사용하여 임팩터의 입자채취 특성을 규명하고 있다 (Marple *et al.*, 1991). 형광법은 추적자(tracer) 역할을 하는 형광물질이 일부 섞인 입자를 시험 입자로 사용하여 임팩터의 기판과 최종 필터(backup filter, after filter)에 채취된 입자에 포함되어 있는 형광물질의 양을 측정하여 입자채취효율을 평가하는 방법이다. 중량법은 임팩터의 기판과 최종 필터에 채취된 입자의 무게를 측정하여 입자채취효율을 평가하는 방법이고, 입자계수법은 임팩터 각 단의 상류와 하류에서 입자의 수 농도를 측정하여 입자채취효율을 평가하는 방법이다.

본 연구에서는 분리입경이 큰 단의 입자채취 특성을 살펴보기 위하여 중량법을 사용하였는데, 그림 1에 나타낸 바와 같이 입자발생장치(vibrating orifice aerosol generator, VOAG, model 3450, TSI Inc., USA)를 사용하여 단분산 입자를 발생시키고, 임팩터의 각 단을 고정시키고 흡인유량을 조절할 수 있는 성능평가장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 습식 가스미터(wet gas meter, model W-NK-10A, Sinagawa Corp., Japan)로 압력(진공도)에 따라 교정된 유량계(rotameter)를 사용하여 임팩터로 흡인되는 유량을 설정 값으로 일정하게 유지하였다. 시험 입자로는 올레인산(oleic acid, 밀도 = 0.895 g/cm<sup>3</sup>)으로 만든 액체 입자와 소금(NaCl, 밀도 = 2.2 g/cm<sup>3</sup>)으로 만든 고체 입자를 사용하였다. 임팩터의 기판으로는 직경이 47 mm인 텐플론 필터(Teflon filter, F2996-25, zefluor, pore size 2 μm, Gelman Scientific)와 알루미늄 호일(Al foil)을 사용하였고, 최종 필터로는 직경이 47 mm인 텐플론 필터를 사용하였다. 기판의 표면은 코팅 등의 표면처리를 하지 않고 원래 상태에서 사용하였다. 임팩터의 기판과 최종 필터는 측정 전과 측정 후 24시간 동안 데시케이터에 보관하여 항습시킨 후 분해능이 0.01 mg인 전자저

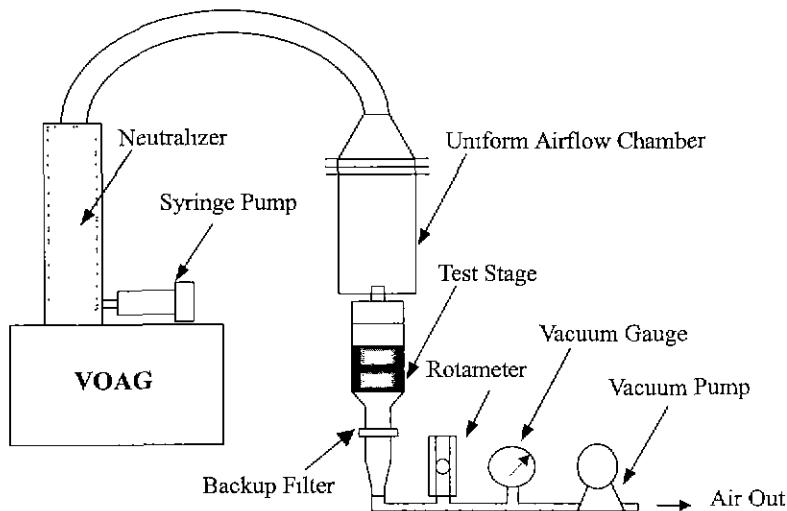


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

을 (model M-AP250D, Ohaus)로 무게를 측정하였다. 각 단의 입자채취효율은 임팩터의 기판과 최종 필터에 채취된 입자의 무게로부터 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 개별 단의 입자채취효율

Marple *et al.*(1991)은 형광법을 사용하여 MOUDI의 각 단별 입자채취효율 곡선을 구하였는데, 본 연구에서는 중량법을 사용하여 MOUDI의 4개 단(입구, 1~3단)에 대해 입자채취효율을 구하였다. 입자 채취효율은 충돌 기판의 종류에 따라 달라질 수 있으므로(Knuth, 1984), 임팩터의 기판에서 입자가 충돌 후 다시 튀어나오지 않으리라고 생각되는 올메인산으로 만든 액체 입자를 사용하여 테플론 필터와 알루미늄 호일 기판에 대한 입자채취효율을 구하여 그림 2에 나타냈다. 그림에서 실선은 Marple *et al.*(1991)의 실험결과를 곡선으로 연결하여 나타낸 것이다.

그림 2에서 각 단의 입경에 따른 채취효율을 측정데이터로부터 50% 채취효율을 나타내는 입경(분리 입경)을 추정해 보면, 이것은 제작회사에서 제시하는 값(입구: 18  $\mu\text{m}$ , 1단: 10  $\mu\text{m}$ , 2단: 5.6  $\mu\text{m}$ , 3단: 3.2  $\mu\text{m}$ )과 거의 비슷하다(MSP Corporation, 1992). 또한, 임팩터의 기판이 알루미늄 호일인 경우 각 단에

서 4가지 입경에 대해 측정된 채취효율도 Marple *et al.*(1991)의 실험결과와 매우 유사하다.

그림 2에서 1~3단의 입자채취효율을 보면, 각 단의 동일한 입경에서 기판이 테플론 필터인 경우 ( $\circ$ ,  $\bullet$ )의 채취효율이 알루미늄 호일인 경우( $\triangle$ ,  $\blacktriangle$ )보다 대체로 약간 높다. 각 단에서 채취효율이 50% 이하인 입경의 경우 테플론 필터일 때의 채취효율이 알루미늄 호일인 경우보다 상당히 높으며, 이러한 채취효율의 차이는 미세 입자를 채취하는 단으로 갈수록 커진다. 즉, 1~3단에서 입경이 가장 작은 경우 알루미늄 호일에 대한 입자채취효율은 0~8%로 낮지만, 테플론 필터에 대한 채취효율은 14~32%로 높다. 이론적으로 입자채취효율이 거의 영(zero)에 근접하여야 할 입경에서 채취효율이 높게 되면, 임팩터의 입자분리 성능이 나빠지게 된다.

MOUDI의 경우 노즐과 입자 충돌 기판 사이의 간격이 매우 좁으며, 이러한 간격은 미세 입자를 채취하는 단으로 갈수록 줄어든다(Marple *et al.*, 1991). 테플론 필터가 알루미늄 호일에 비해 두꺼우므로, 노즐과 기판 사이의 간격이 상대적으로 더 좁아져 채취효율이 증가한 것으로 여겨진다. MOUDI는 기판으로 알루미늄 호일을 사용한 경우에 대한 입자분리 성능만 알려져 있는데(Marple *et al.*, 1991), 본 연구결과는 알루미늄 호일과 특성이 다른 테플론 필터 등의 기판을 사용할 경우 MOUDI의 입자분리

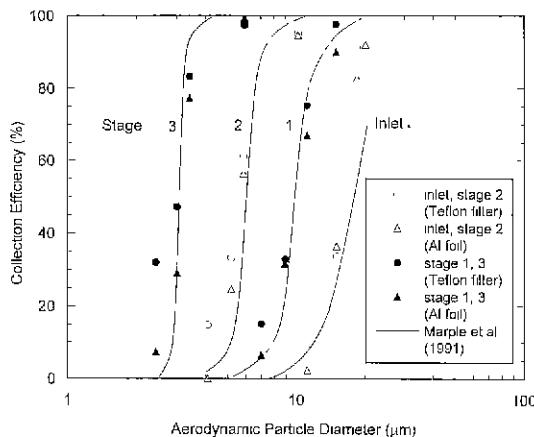


Fig. 2. Particle collection efficiency curves of the MOUDI.

특성이 약간 달라질 수 있음을 의미한다.

### 3.2 입자재질 및 흡인유량의 영향

에어로졸은 공기 중에 부유하는 고체 또는 액체 입자를 말하며, 대기 에어로졸은 주로 고체 입자로 존재한다. 액체 입자의 경우 기관에 충돌할 때 부착력이 강하여 다시 튀어나오는 경우가 거의 없지만, 고체 입자의 경우 기관의 표면상태, 충돌속도 등에 따라 상당량의 입자가 표면에 부착하지 않고 튀어나온다고 알려져 있다(Lodge, Jr. and Chan, 1986).

본 연구에서는 고체 입자로 소금 입자를 선택하여 입자재질이 임팩터의 채취효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 그림 3은 MOUDI의 1단과 3단에서 고체 입자와 액체 입자의 채취효율을 비교하여 나타낸 것이다. 그림을 보면, 입경이 단의 분리입경보다 커지면 액체 입자의 채취효율은 급격히 증가하지만, 고체 입자의 경우 채취효율이 증가하지 않고 오히려 입경이 증가함에 따라 감소한다. 이러한 경향은 다만 임팩터에 대한 기존 실험결과와 유사하다(Rao and Whitby, 1977). 또한, 고체 입자의 경우 1단에서 테플론 필터일 때의 채취효율이 알루미늄 호일에 비해 약간 낮음을 알 수 있다.

일반적으로 알려진 다만 임팩터의 입자채취효율 곡선은 액체 입자에 대한 것인데, 그림 3에서 보는 바와 같이 고체 입자의 경우 기관에서 튀어나오는 현상으로 인해 분리입경보다 큰 입자의 채취효율이 크게 달라짐을 알 수 있다. 대기 에어로졸은 대부분

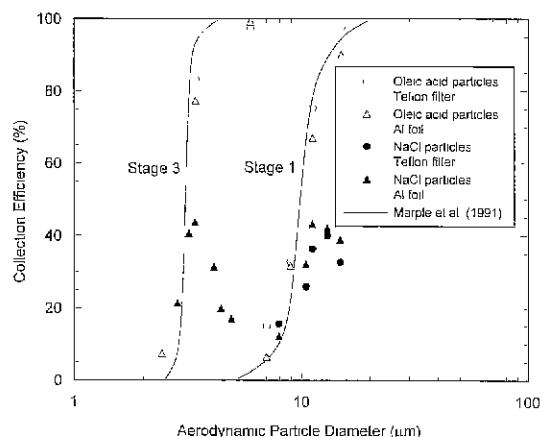


Fig. 3. Effect of particle material on the particle collection efficiency.

고체 입자로 존재하므로, 다만 임팩터를 사용하여 에어로졸을 채취할 경우 원래의 입경분포와 다른 측정결과를 얻게 된다. 즉, 에어로졸의 질량중앙입경 (mass median diameter)이 실제보다 작게 측정된다(Lodge, Jr. and Chan, 1986; Knuth, 1984). 입자의 튜 나오는 현상을 방지하기 위하여 기관의 표면을 그리스로 코팅하는 방법이 사용되고 있는데, 에어로졸의 화학적 조성을 분석하고자 할 경우 오염원으로 작용하는 문제가 있다(Rao and Whitby, 1977). 따라서, 대기 에어로졸의 입경분포 측정 및 해석 시 이 점이 고려되어야 하며, 이런 문제를 보정할 수 있는 데이터 해석방법이 개발되어야 한다.

대기 에어로졸의 농도는 낮으므로 다만 임팩터를 사용하여 그 특성을 분석하기 위하여 보통 24시간 이상 대기 시료를 채취하게 된다. 이 경우 최종 필터의 압력손실 증가, 기온의 변화 등에 의해 흡인유량이 달라질 수 있다. 임팩터의 입자채취효율은 스톡스 수(Stokes number)에 따라 달라지는데 스톡스 수는 흡인유량과 관계되므로, 흡인유량이 변하면 임팩터의 분리입경이 달라져 입경분포를 왜곡시킬 수도 있다(Rader et al., 1991). 본 연구에서는 흡인유량이 입자채취에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 MOUDI의 정격 흡인유량(30 L/min)을 기준으로 흡인유량이 25, 30, 35 L/min일 때 울레인산으로 만든 액체 입자의 채취효율을 구하였다. 그림 4는 MOUDI의 1단과 3단에서 흡인유량에 따른 입자채

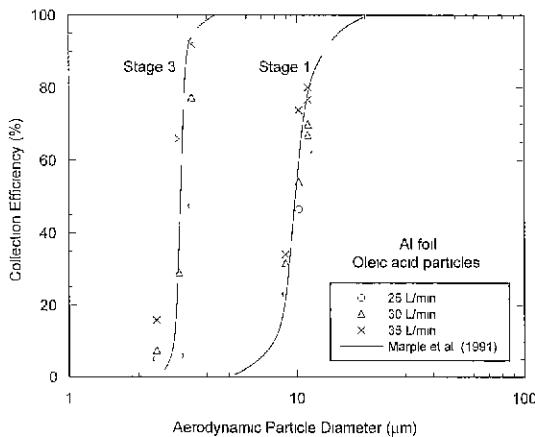


Fig. 4. Effect of sampling flow rate on the particle collection efficiency.

취효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림을 보면, 동일 입경에서 유량이 증가함에 따라 스톡스 수가 커져 입자체취효율이 증가하고, 1단에 비해 3단에서 유량에 따른 입자체취효율의 차이가 큼을 알 수 있다. 그러나, 유량변화에 따른 측정값은 대체로 각 단의 입자체취효율 곡선 상에 위치하므로, 유량변화는 다단 임팩터의 입자체취 특성에 거의 영향을 미치지 않는다고 여겨진다.

### 3. 3 단별 입자체취 반응(stage response)

일반적으로 알려진 임팩터의 입자체취 특성은 액체 입자에 대한 개별 단의 특성을 나타낸 것으로 이론적 예측과 실험적 결과가 매우 잘 일치하는 것으로 알려져 있다. 다단 임팩터를 사용하여 대기에 에어로졸의 입경분포를 측정할 경우 개별 단을 하나씩 사용하지 않고 여러 단을 동시에 연결하여 사용하므로, 각 단의 입자체취 특성은 상류 측에 위치한 단의 영향을 받게 된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 임팩터의 입자체취효율 곡선이 계단(step) 형태가 아니라 S 형태이므로, 각 단에서 분리입경보다 큰 입자의 일부는 체취되지 않으며, 분리입경보다 작은 입자도 일부 체취된다. 즉, 동일 크기의 입자라도 한 단에서만 체취되지 않고 인접한 몇 단에 걸쳐 체취될 수 있으며, 각 단에서 입자가 체취될 수 있는 확률은 입경에 따라 달라진다. 임팩터로 흡인된 입자가 각 단에서 체취될 분율(fraction)을 단별 입자체

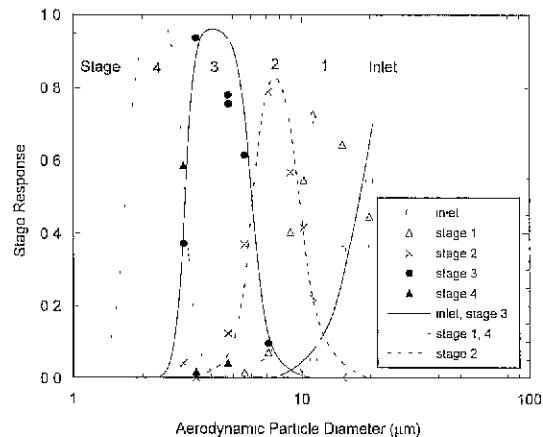


Fig. 5. Stage responses of the MOUDI cascade impactor.

취 반응(stage response, kernel function)이라고 부른다(Rader et al., 1991). 따라서, 다단 임팩터를 사용한 대기 에어로졸의 입경분포를 해석할 때에는 단별 입자체취 반응이 매우 중요하다.

본 연구에서는 MOUDI의 단별 입자체취 반응을 실험적으로 구하기 위하여 입경에 따라 인접한 3개 단과 최종 필터를 설치한 후 알루미늄 호일 기판에 액체 입자를 충돌시켜 각 단에서 체취되는 입자의 무게를 측정하였다. 이것으로부터 입경별로 각 단에서 입자가 체취될 수 있는 분율을 구하였다. 이 때 특정 입경에서 각 단의 입자체취 분율을 합하면 1이 된다.

단별 입자체취 반응은 개별 단의 입자체취효율 곡선으로부터 이론적으로 구할 수 있으므로, Marple et al.(1991)의 실험 곡선을 이용하여 구한 단별 입자체취 반응(실선 또는 점선)과 실험적으로 구한 측정값을 그림 5에 나타냈다. 그림을 보면, 동일 크기의 입자는 임팩터의 특성에 따라 여러 단에 걸쳐 체취될 수 있음을 알 수 있다. 예를 들면, 입경이  $7.13\text{ }\mu\text{m}$ 인 입자가 1단에 체취될 분율은 0.070이고, 2단과 3단에 체취될 분율은 각각 0.789, 0.096이다. 단별 입자체취 반응의 측정값은 Marple et al.(1991)의 입자체취효율 곡선으로부터 구한 이론적 곡선과 잘 일치하고, 단별 입자체취 반응 곡선의 최대값은 아래 단으로 내려갈수록 증가하며, 4단에서는 거의 1에 가깝다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 최근 대기 에어로졸 입경분포 측정에 많이 사용되고 있는 다단 임팩터(MOUDI)의 조대 입자 채취 특성을 실험적으로 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 중량법으로 측정한 50% 채취효율을 나타내는 임팩터의 분리입경은 제작회사에서 제시하는 값과 거의 비슷하고, 각 단별 입경에 따른 채취효율도 Marple *et al.*(1991)의 실험결과와 매우 유사하다. 또한, 동일 입경에서 기관이 테플론 필터인 경우의 입자채취효율이 알루미늄 호일인 경우보다 대체로 약간 높다.

둘째, 입경이 임팩터 단의 분리입경보다 커지면 액체 입자의 채취효율은 급격히 증가하지만, 고체 입자의 경우 채취효율이 증가하지 않고 오히려 입경이 증가함에 따라 감소한다.

셋째, 동일 입경에서 홀인유량이 증가함에 따라 스톡스 수가 커져 입자채취효율이 증가하지만, 유량 변화에 따른 측정값은 대체로 각 단의 입자채취효율 곡선 상에 위치하므로, 유량변화는 다단 임팩터의 입자채취 특성에 거의 영향을 미치지 않는다고 여겨진다.

넷째, 동일 크기의 입자는 임팩터의 특성에 따라 여러 단에 걸쳐 채취될 수 있으며, 단별 입자채취 반응의 측정값은 입자채취효율 곡선으로부터 구한 이론적 곡선과 잘 일치한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 1998년도 기관고유사업(과제번호: 2E1553)의 일부로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- 김용표, 배귀남, 지준호, 진현철, 문길주(1999) 제주도 고산에서의 에어로솔 입경분포별 조성: 1998년 4월 측정 연구, *한국대기환경학회지*, 15(5), 677-685.
- 박정호, 최금찬(1997) 저압 임팩터를 이용한 대기 에어로졸 입자의 입경분포 측정과 화학조성 자료의 해석, *한국대기보전학회지*, 13(6), 475-486.
- 배귀남, 지준호, 문길주(1998) 다단 임팩터를 이용한 실내 부유입자의 크기분포 측정, *한국대기보전학회 춘계학술대회요지집*, 255-257.
- 배민석, 김영준(1998) 시화지구 대기분진 중 중금속 및 이온성분의 물리화학적 특성에 관한 연구, *한국대기보전학회 춘계학술대회요지집*, 35-37.
- Howell, S., A.A.P Pszenny, P Quinn, and B. Huebert(1998) A field intercomparison of three cascade impactors, *Aerosol Sci Technol*, 29, 475-492.
- Knuth, R.H. (1984) Calibration and field application of a Sierra model 235 cascade impactor, *Am. Ind. Hyg Assoc. J* 45(6), 393-398.
- Lodge, Jr., J.P. and T.L. Chan (1986) *Cascade Impactor. Sampling & Data Analysis*, Am. Ind. Hyg. Assoc.
- Marple, V.A., K.L. Rubow, and S.M. Behm (1991) A micro-orifice uniform deposit impactor (MOUDI): description calibration, and use, *Aerosol Sci. Technol*, 14, 434-446.
- MSP Corporation (1992) *Model 100/Model 110 Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor Instruction Manual (MOUDI)*
- Rader, D.J., L.A. Mondy, J.E. Brockmann, D.A. Lucero, and K.L. Rubow (1991) Stage response calibration of the Mark III and Marple personal cascade impactors, *Aerosol Sci. Technol*, 14, 365-379.
- Rao, A.K. and K.T. Whitby (1977) Nonideal collection characteristics of single stage and cascade impactors, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J*, 38, 174-179.