

입자와 액적간의 정전기적 응집을 통한 미세입자의 효율적인 제어

이명화* · 김상범* · 황유성** · 김종호** · 김경수†

Effective Control of Fine Particles Using an Electrostatic Coagulation Between Particle and Water Droplet

Myong-Hwa Lee, Sang Bum Kim, You Seong Hwang Jong-Ho Kim
and Gyung Soo Kim

Key Words: Electrostatic coagulation(정전기적 응집), Scrubber(스크러버), Fine particles(미세입자), Air pollution control(대기오염제어), Charged droplet(하전액적)

Abstract

A charged droplet scrubber was introduced to remove visible smokes generated in many industrial facilities. Lab-scale and field tests were conducted in this study. The system consists of a corona discharger to effectively charge the fine particles, followed by an electrostatic chamber to promote coagulation between charged fine particles and oppositely charged droplets and a demister to remove resultant particles. Overall collection efficiency, 98.4% was obtained from a lab-scale test, when a high voltage was applied to an ionizer and a charged droplet scrubber. Field tests also show the high collection efficiencies, 93.5% with one stage and 99.4% with two stage system. This system can be used to increase the collection efficiency of the conventional air pollution control devices to satisfy the national emission standard.

1. 서 론

최근 들어 환경보전에 대한 세계적인 관심사가 증가되면서, 환경파괴를 막고 환경의 질을 쾌적하게 유지하고자 하는 노력들이 범지구적으로 일어나고 있다.

특히 산업시설에서 배출되는 오염물질로 인하여 환경오염이 심화되면서 이들 오염물질의 양을 최소한으로 배출하기 위한 최적의 방법(BACT- Best Available Control Technology)들이 계속적으로 요구되고 있는 실정이다. 따라서 산업장의 배출시설에서는 각종 오염물질 처리장치들을 최대 효율로 운전하거나, 보다 높은 효율을 갖는 처

리장치들로 교체하여 오염물질 배출을 저감해야 하는 시점에 있다.

여러 가지 집진장치 중에서 위험하고 폭발성이 있는 먼지의 제거, 가스상 오염물질의 효과적인 제어 측면에서 비록 폐수처리의 문제점이 있기는 하지만 습식 스크러버가 주로 이용되고 있다. 그러나, 각종 산업시설에서 배출되는 대기오염물질 중 입경 1 μm 이하의 유해미세먼지는 기존 습식설비를 이용하여 제거하는 것이 어려우며, 인체에 미치는 악영향과 지구의 기상이변 현상과 시정을 감소(visibility impairment)하는 원인물질로 알려지면서 이에 대한 제어가 더욱 더 절실하게 요구되고 있다. 그 중에서도 입경 0.1~1 μm 범위의 입자들은 여러 가지 집진기작, 즉 확산, 직접차단, 관성력 및 정전기력을 고려할 때 가장 낮은 집진효율을 나타냄으로서 더욱이 문제가 되고 있다⁽¹⁻³⁾. 또한 많은 연구자들은 이 영역의 미세입자들이 인체에 위해하다는 것을 동물실험 및 세포실험을 통해서 증명하였다^(4,5). 그로 인하여 미국 EPA(환경보호청)에서는 1987년

(2006년 4월 6일 접수 ~ 2006년 5월 18일 심사완료)

*한국생산기술연구원 환경에너지본부

**한서대학교 환경공학과

†책임저자, 회원, 한국생산기술연구원 환경에너지본부

E-mail : gskim@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8531 FAX : (041)589-8580

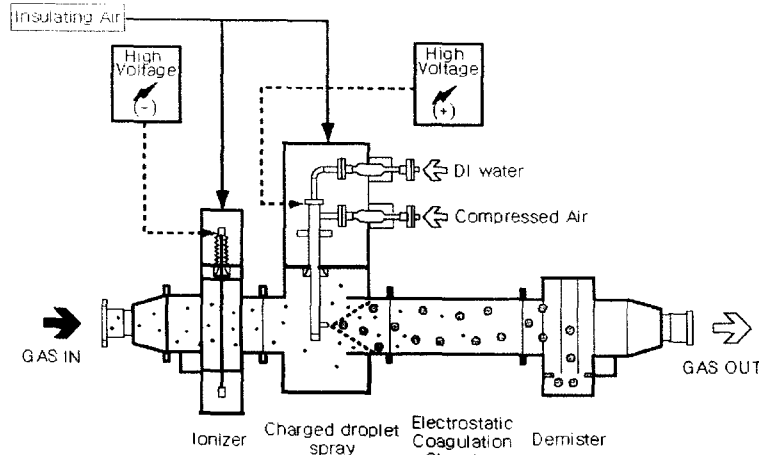


Fig. 1 Schematic diagram of a charged droplet scrubber

처음으로 PM10규제를 채택한 이래 1997년 PM2.5규제를 실시하는 등 점차 작은 입자크기로 기준을 강화하고 있다. 그러므로 미세입자의 제거효율을 높이기 위해서는 종래의 입자제어설비에 기능을 추가할 수 있는 부가적인 장비가 필요하게 된다.

그 일련의 방법으로서 전기집진기 및 스크러버에서 집진기의 전단에 하전장치를 추가함으로써 그 효율을 극대화시키고 있다⁽⁶⁻⁸⁾. 이는 미세먼지의 경우 확산하전(diffusion charging)이나 전계하전(field charging)에 의한 하전효율이 낮기 때문에, 부가적인 장치를 설치함으로써 하전효율을 높여 전기장에 의해 효율적으로 제거하고자 한 것이다. 또한 몇몇 연구자들은 하전된 입자들 간의 충돌을 촉진시킴으로써 응집체를 만들어 미세먼지를 효율적으로 제거하고자 하였다⁽⁹⁻¹¹⁾.

본 연구에서는 백연이 높은 농도로 발생하는 산업공정에서 상기에서 살펴본 미세입자의 효율적인 하전방법과 하전된 미세입자와 반대극성으로 하전한 액적을 공급하여 서로간의 정전기적 응집을 촉진시킴으로써, 백연제거용 하전액적 스크러버의 집진효율을 높이고자 하였다.

2. 실험방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 하전액적 스크러버(charged droplet scrubber)의 내부구조를 보여준다. 하전액적 스크러버장치는 배출되는 미세입자를 하전하는 부분(ionizer), 정전액적을 분무 및 정전기적으로 응집하는 부분과 응집된 입자를 집진하는 세 부분으로 구성되어 있다. 본 실험

을 위해 사용한 장치에서 ionizer부분의 단면적은 250 mm × 250 mm이며, ionizer에는 고전압발생장치(한국스위칭(주), KSH N40/5CN)를 이용하여 음(-)전기로 0~ -40 kV까지 인가하였다. 또한 챔버내부에는 습도가 높기 때문에, 고전압을 인가하는 부분에 절연을 위하여 뜨거운 공기를 공급하여 줌으로써 실험상의 안전을 도모하였다. 정전분무 노즐은 이류체 노즐로서 물을 약 5 l/min로 분사하며, 고전압발생장치(한국스위칭(주), KSH P40/5CN)로 양(+) 전기를 0~40 kV까지 인가시킬 수 있도록 제작하였다. 또한 정전기적 응집을 위한 챔버는 250 mm(H) × 250 mm(W) × 1000 mm(L)의 크기로 제작하였으며, 챔버의 후단에는 응집에 의하여 커진 입자들을 집진하기 위한 미스트 제거장치(demister)가 설치되었다.

Fig. 1에 보여준 실험장치의 내부에서 미세입자가 어떠한 집진기작에 의해 제거가 되는지를 보여주는 모형을 Fig. 2에 나타내었다. 배출되는 미세입자는 기본적으로 평형상태의 전하분포를 지니고 있다. 이러한 입자들은 ionizer부분을 통과하면서 음으로 하전(negative charging) 되고, 정전분무를 통하여 공급된 양으로 하전된(positive charging) 액적과 만나게 된다. 그리고 정전기적 응집챔버를 통과하는 동안 하전된 미세입자와 반대극성으로 하전된 액적들은 전기적인 집진기작(Coulombic force)에 의해 서로 응집하게 된다. 높은 하전량을 가진 한 개의 액적이 많은 미세입자들을 끌어들이어 응집하게 되므로, 커진 액적들은 미스트제거장치에서 관성력에 의해 쉽게 제거된다.

또한, Fig. 3에는 하전액적 스크러버를 이용하여 미세입자를 제거하기 위한 실험장치의 전체적인 개요도를 보여준다. 집진장치의 미세입자 제거효율을 측정할 때는 무엇

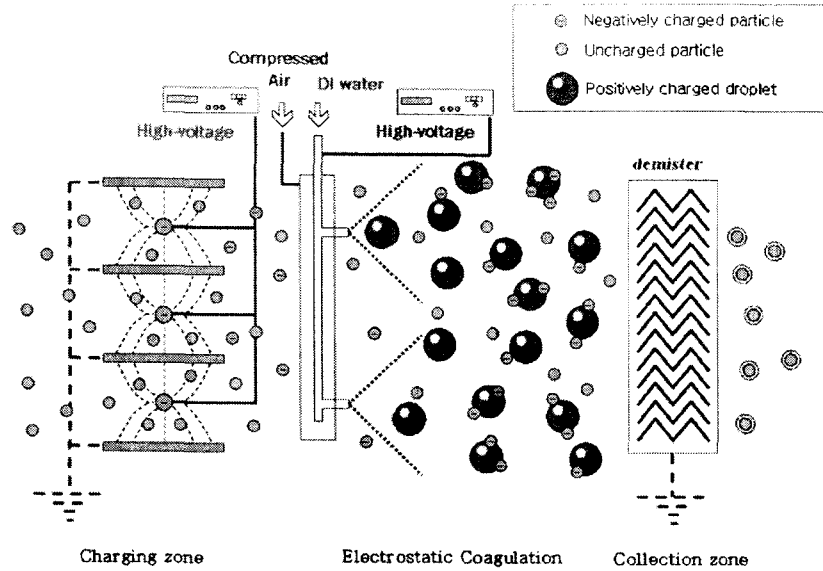


Fig. 2 Mechanistic description of the particle collection mechanism

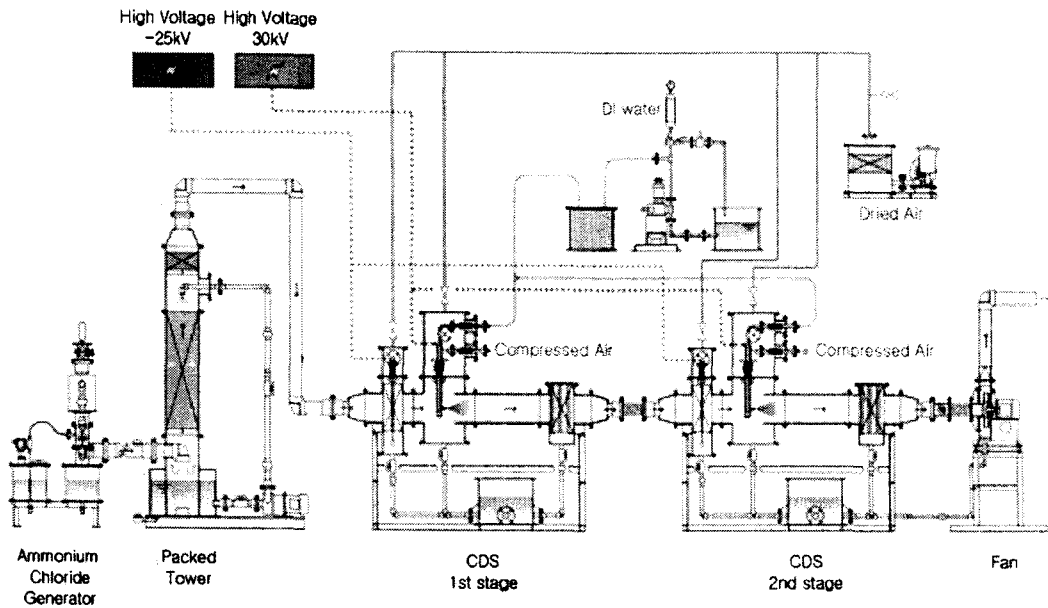


Fig. 3 Overall experimental setup to remove fine particles using a charged droplet scrubber

보다 입자들을 균일하게 발생시키는 것이 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 테스트용 입자로서 암모니아(NH_3)와 염화수소(HCl)를 충전탑 내에서 반응시켜 염화암모늄염을 생성시켰다. 충전탑 내에서 발생한 염화암모늄성분은 스크리버 후단에서 관찰하게 되면 백연으로 나타나게 된다. 본 연구가 실제 산업체에서 문제가 되고 있는 스크리

버 후단에서 발생하는 백연(visible smoke)을 제거하는데 초점을 맞추고 있기 때문에, 상기의 방법을 이용하였다. 실험에 사용한 입자발생장치는 충전탑(Packed tower)식 스크리버로서 노즐을 통하여 공급되는 물의 양이 40 // min 이며, 액기비는 약 8 // m^3 정도의 일반적인 규모로 제작하였다. 충전탑에 유입된 가스들은 충전탑을 통과하면

서 많은 양이 그 내부에서 제거되고, 비량의 가스들이 충전탑 내에서 반응하여 입자상물질로 전환된다. 이러한 반응으로 발생된 입자가 스크리버 후단에서 배출되어 백연으로 나타나게 된다.

입자측정장치로는 개수농도를 측정할 수 있는 Dust spectrometer(GRIMM AEROSOL TECHNIK GmbH & Co. KG, Germany)를 이용하여 입경분포와 농도를 측정하였다. Dust spectrometer의 측정 가능한 입자의 직경은 0.3~20 μm 이며, 실시간(real time)으로 분석이 가능하다.

본 연구에서는 산업체에서 발생하는 백연의 제거특성을 파악하기 위하여, 실험용 하전액적 스크리버를 제작하였으며, 먼저 실험실규모에서 상기에서 설명한 바와 같이 인위적으로 백연을 발생시켜 그 성능을 평가하였다. 또한 실제 산업체 A사에 본 시스템을 적용하여 그 효과를 평가하였다. Fig. 3에는 두개 단의 스크리버를 나타내었으나, 실험실 규모에서 실험을 수행할 때는 첫 번째 단만을 사용하였으며, 실제 산업체에서 실증시험을 할 경우에는 한 개단 혹은 두개 단 모두를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험실규모의 하전액적 스크리버 성능

Fig. 3에 나타낸 스크리버 후단의 샘플링 지점에서 ionizer와 정전분무 노즐을 작동시키지 않았을 때의 농도를 측정하여 스크리버의 입구농도로 하였다. 그 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. 입구에서의 총 먼지 농도는 $7.21 \times 10^9 \text{ \#}/\text{m}^3$ 이었으며, ionizer와 정전분무 노즐을 작동시켰을 때의 스크리버 후단에서의 농도는 $1.13 \times 10^8 \text{ \#}/\text{m}^3$ 으로 측정되었다. 이때, ionizer는 -25 kV, 정전분무 노즐은 30

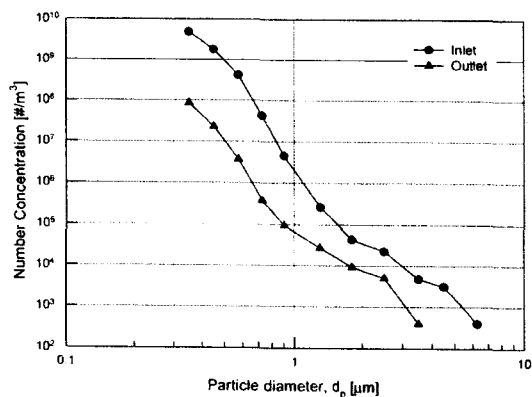


Fig. 4 Particle size distributions at the sampling point

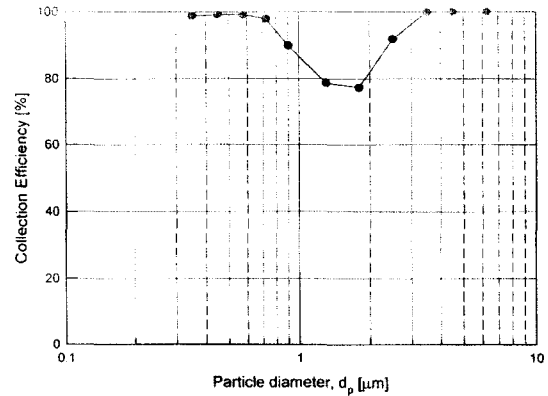


Fig. 5 Collection efficiency of a charged droplet scrubber as a function of particle diameter

kV를 인가하였고, 유속은 1 m/s로 운전하였으며, 그 때의 유량은 3.8 m^3/min 이었다. 본 실험에 사용한 입자측정장치의 측정범위가 0.3~20 μm 이기 때문에 0.3 μm 보다 작은 초미세입자의 분포를 알 수는 없었지만 입자가 커짐에 따라서 그 개수농도는 감소하는 경향을 보여준다. 또한 하전액적 스크리버 장치의 사용으로 배출되는 입자의 개수농도가 상당히 낮아졌다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에는 Fig. 4에 나타난 입경별 개수농도를 이용하여 계산한 효율곡선을 나타내었다. 각 입경별 집진효율은 하전액적 스크리버를 작동시키지 않았을 때의 유입농도와 하전액적 스크리버를 작동시켰을 때 각 입경별 출구농도와의 비를 이용하여 계산하게 된다. 각 입경별 집진효율을 살펴보면, 크기가 0.7 μm 이하인 입자와 3 μm 이상의 입자에 대해서는 거의 99%이상의 높은 집진효율을 나타내고 있다. 그러나 0.7~3 μm 의 입경범위에 대해서는 낮은 집진효율을 나타냈으며, 특히 입자의

크기가 약 1.8 μm 일 때는 약 77.3%로서 가장 낮은 집진효율을 나타냈다. 전 입경범위를 고려하여 계산된 총 집진효율은 98.4%로 나타났다. 일반적으로 전기집진기나 여과집진장치의 입경별 집진효율은 0.1~0.5 μm 영역에서 효율이 가장 낮게 나타나는데, 본 실험에서의 결과는 실험에 사용한 Dust spectrometer가 0.3 μm 이하의 먼지는 측정할 수 없어서 정확하게 비교할 수 없지만 다소 상이하게 나타난 것은 특이한 점이다. 그 원인으로 생각할 수 있는 것은 기본적으로 입자가 하전장치를 통과하게 되어, 일부의 입자들은 하전되지만 나머지 입자들은 하전되지 않은 상태로 집진장치를 통과하게 된다. 이 경우 정전기력이 작용하지 않아 하전된 액적과 응집될 가능성이 적으므로 그 상태로 미스트제거장치로 유입되게 된다. 그러나

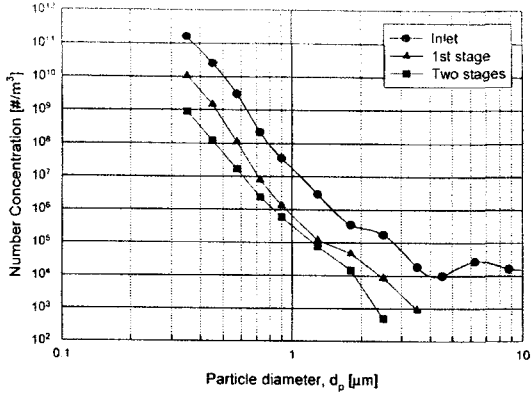


Fig. 6 Particle size distributions as a function of particle diameter in the field test

미스트제거장치 내부에는 습도가 높기 때문에 작은 입자들이 액적제거장치를 통과하면서 응축에 의해 큰 입자로 성장했을 것으로 생각된다.

3.2 현장 적용실험

산업시설의 굴뚝에서 백연이 심각하게 발생하는 A사업장에 대하여 본 하전액적 스크러버의 적용가능성을 파악하였다. A사업장에서 배출되는 먼지의 입경분포 측정결과를 Fig. 6에 나타내었다. 현장실증시험에서는 스크러버를 multi-stages로 설치하였을 경우의 효율성을 파악하기 위해 하전액적 스크러버를 한개 단과 두개 단으로 구분하여 측정하였다. 여기에서 ionizer와 정전분무 노즐에 인가된 전압은 실험실규모의 실험에서와 마찬가지로 각각 -25 kV, 30 kV이며, 고전압발생장치는 1개만을 사용하여 제 1단과 제 2단 모두 같은 전압을 인가하였으며, 유속은 1 m/s로 하였다. 측정결과 집진기 입구에서의 총 먼지 농도가 $1.87 \times 10^{11} \text{ #/m}^3$ 로 나타났다. 그러나 정전액적 스크러버를 사용하였을 때, 제 1단에만 전기를 인가하였을 경우에는 먼지의 개수농도가 $1.22 \times 10^{10} \text{ #/m}^3$ 로 입구농도의 약 1/10로 감소하였으며, 두개 단 모두에 전기를 인가하였을 때는 $1.05 \times 10^9 \text{ #/m}^3$ 로 거의 1/100로 감소하였다. Fig. 7에는 이때의 입경별 효율곡선을 나타내었다. 총 집진효율은 한개 단 혹은 두개 단에 전기를 인가했을 때 각각 93.5%, 99.4%로 나타났다. 입경별 집진효율을 살펴보면, 입자의 크기가 약 $1.8 \mu\text{m}$ 일 때 효율이 가장 낮아서 한개 단과 두개 단을 사용하였을 때 각각 86.7%, 95.8%를 나타내었다.

3.3 처리유량에 따른 집진효율의 변화

스크러버의 처리유량에 따라 집진효율이 다르기 때문

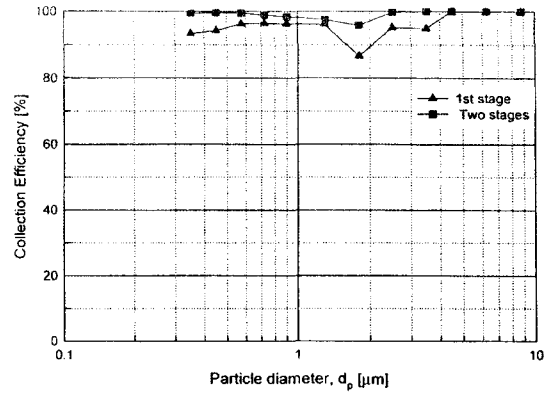


Fig. 7 Collection efficiency as a function of particle diameter in the field test

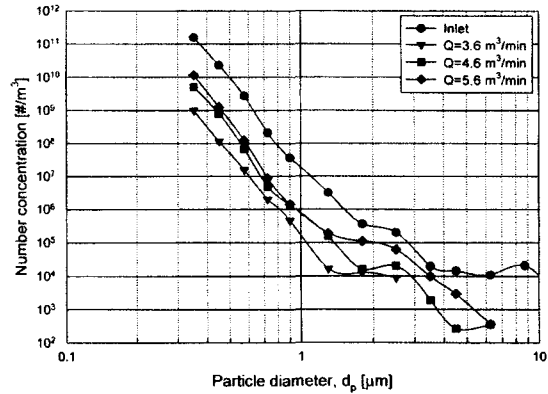


Fig. 8 Effect of flowrate on particle size distribution

에, 여기에서는 그 영향에 대해서 검토하였다. 산업체에서 배출되는 입자의 농도와 분포는 일정하지만, 본 시스템을 이용하여 이러한 미세입자들을 제거하고자 할 경우 그 처리유량에 따라 집진효율이 달라지게 된다. 즉, 처리유량에 따라 입자의 체류시간이 다르기 때문에, 하전부에서의 입자 하전효율이 달라지고, 이는 액적과의 충돌빈도에 영향을 미쳐 궁극적으로 집진효율에 영향을 미치게 된다. 정전액적 스크러버의 유량을 변화시켜가며 측정된 먼지의 농도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 전기적인 조건은 ionizer와 정전분무 노즐에는 상기의 실험과 동일하게 각각 -25 kV, 30 kV로 전기를 인가하였다. 실험은 3.6, 4.6, 5.6 m³/min(응집챔버에서의 유속 : 0.96, 1.23, 1.49 m/s)의 세 가지 조건에 대하여 이루어졌다. 또한, Fig. 9에는 유량 변화에 따른 입경별 집진효율을 나타내었다.

유량이 커짐에 따라서 총 집진효율이 감소하는 것을 볼 수 있는데, 유량이 3.6, 4.6, 5.6 m³/min일 때 각각 효율은 99.4%, 96.8%, 92.9%로 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 입

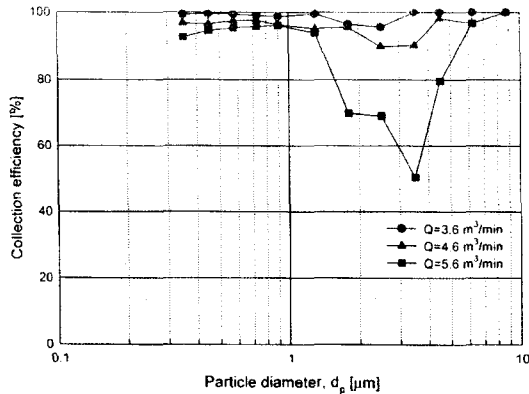


Fig. 9 Collection efficiency as a function of flowrate

자의 체류시간이 줄어들수록 입자의 집진효율이 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한 입경별 효율을 살펴보면 유량이 3.6 m³/min일 때 이것은 일반적인 집진기(전기집진기, 여과집진기, 스크러버 등)내에서 유속이 빨라지면 나타나는 일반적인 현상이지만, 유량이 높아질수록 최소효율을 갖는 입자의 크기가 1.6, 2.5, 3.5 μm로 커지고 있다. 만약 동일한 입자의 크기가 미스트제거장치 전반부에 존재한다고 가정하면, 유량이 커질수록 응축의 효과가 줄어들게 됨으로써 최종적으로 배출되는 입자는 작아져야 한다. 그러나 유량이 커질수록 최소효율을 갖는 입자의 크기가 커지고 있으므로, 이는 입경별로 체류시간에 따른 하전효율이 달라지므로 정전기적 응집을 거쳐서 나온 입자의 크기가 유량이 작을 때보다 클 때보다 컸을 것으로 판단된다. 약 1.6 μm에서 효율이 가장 낮은 것으로 나타나며, 4.6 m³/min일 때는 약 2.5 μm, 5.6 m³/min에서는 약 3.5 μm를 중심으로 효율이 낮다는 것을 볼 수 있다.

가까운 장래에 각 산업체에서 발생하는 미세입자에 대한 규제가 더욱 강화될 것으로 예상되며, 이러한 문제점을 해결할 수 있는 하나의 방법론으로서 하전액적 스크러버가 제안되었다. 대부분의 산업공정에 있어서 대기오염방지시설의 전단부에 이러한 장치를 설치하기는 공간상의 문제로 인하여 어려우므로, 기존의 설비로 일차적으로 미세먼지를 제거할 필요가 있다. 그러한 과정을 거친 후에도 배출허용기준을 만족시키지 못하는 부분에 대해서는 이러한 설비를 후단에 설치함으로써 목표달성이 가능할 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 하전액적 스크러버를 실험실 규모 및 현

장실증설비에 적용함으로써, 백연의 제거특성에 대한 검토가 이루어졌다. 스크러버 시스템 내에서 코로나하전을 이용하여 미세입자를 효율적으로 하전시키고, 그 반대극성으로 하전한 액적을 공급함으로써 서로간의 정전기적 응집을 촉진시켜 효율을 향상시키고자 하였다. 실험실 규모의 테스트에서는 ionizer(인가전압 : -25kV)와 하전액적 스크러버(인가전압 : 30kV)를 적용하였을 때, 98.4%의 총 집진효율을 나타냈으며, 1.8 μm의 입경에서 최소의 집진효율을 보였다. 현장테스트를 통한 결과 역시 1단 하전액적 스크러버를 설치했을 때는 93.5%의 집진효율을 나타냈으며, 2단을 설치했을 때는 99.4%까지 그 효율이 향상되었다. 본 시스템을 미세먼지의 배출허용기준을 만족시키지 못하는 산업설비에 적용함으로써, 대폭적인 설비의 확충없이 저렴한 비용의 투자로 그 기준의 만족시킬 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- (1) C. William, Hinds, "Aerosol Technology-Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles", 1999, 2nd Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- (2) W. P. Linak and J. O. L. Wendt, "Toxic Metal Emissions from Incineration-Mechanisms and Control", Prog. Energy Combust. Sci., 1993, Vol. 19, pp. 145~185.
- (3) Y. Zhuang, Y. J. Kim, T. G. Lee, P. Biswas, "Experimental and Theoretical Studies of Ultra-fine Particle Behavior in Electrostatic Precipitators", J. Electrostatics, 2000, Vol. 48, pp.245~260.
- (4) Norbert Englert, iFine Particles and Human Health - a Review of Epidemiological Studies, Toxicology letters, 2004, Vol. 149, pp. 235~242.
- (5) A. Samanta, K. A. Murphy, F. D. Berube, Pooley and R. J. Richards, "The Response of Lung Epithelium to Well Characterised Fine Particles", Life Sciences, 1998, Vol. 62, No. 19, pp.1789~1799.
- (6) 오명도, 유경훈, 이준식, "2단 평행판 정전식 집진기에서의 입자하전 및 포집", 대한기계학회논문집, 1994, Vol. 18, No.20, pp. 432~445.
- (7) 김중호, "전기하전식 세정집진장치 개발에 관한 기초 연구", 한국대기환경학회지, 1999, Vol. 15, No.1, pp. 33~39.
- (8) 檜山和成, "スクラバ式電氣集塵装置(イオンスクラバ)", 靜電氣學會誌, 1994, Vol. 18, No. 5, pp.424~428.
- (9) J. Michael, S. A. Pilat, Jaasund and L. E. Sparks, "Col-

lection of aerosol particles by electrostatic droplet spray scrubbers”, 1974, Environ. Sci. Technol., Vol. 8, pp. 360-362.

- (10) N. Sachchida, Tripathi and R. G. Harrison, “Enhancement of contact nucleation by scavenging of charged aerosol particles”, Atmospheric Research, 2002, Vol. 62, pp.

57-70.

- (11) Y. Koizumi, M. Kawamura, F. Tochibuko and T. Watanabe, “Estimation of the agglomeration coefficient of bipolar-charged aerosol particles”, J. Electrostatics, 2000, Vol.48, pp.93-101.