

정전분무 이용 나노먼지 대전 및 집진 기술

안 강 호 | 한양대학교 기계공학과 부교수

E-Mail : khahn@hanyang.ac.kr

안 진 흥 | 한양대학교 대학원

E-Mail : jhahn02@ihanyang.ac.kr

김 광 영 | (주)에이스랩 대표이사

E-Mail : kykim@acelab.co.kr

1. 머리말

최근 초미세 입자는 대기 환경 오염뿐만 아니라 신소재 개발 및 제조 연구에 있어서 그 특성의 이해는 매우 중요한 문제로 대두되었다. 이에 따라 초미세 입자에 대한 관심이 집중되고 있으며, 입자 발생에 대한 연구 또한 선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

현재까지 초미세 입자의 제거를 위해 사용되고 있는 방법은 크게 2가지로 분류할 수 있다. 첫째로 부직포 섬유 필터를 사용하는 방법이 있다. 이러한 섬유 필터의 종류로는 중간 필터(Medium filter), 헤파 필터(HEPA, High Efficiency Particulate Air filter), 울파 필터(ULPA, Ultra Low Penetration Air filter) 등이 있다. 중간 필터는 보통 비색법에 의한 집진 효율이 60~90%의 범위를 차지하며, 이 때의 압력 강하는 15~30mmAq 정도이다. 헤파 필터는 0.3 μ m 입경의 입자를 99.97% 이상을 처리하는 것으로 압력 강하는 25~50mmAq 정도이며, 울파 필터는 0.12~0.17 μ m 입경 범위의 입자를 99.9999% 이상을 처리하며 압력 강하는 헤파 필터와 유사한 범위를 가진다. 그러나 이러한 필터의 단점은 많은 용량을 처리하는 것이 불가능하며, 또한 압력 손실이 상당히 커서 소비 동력의 막대한 손실을 가져다 준다. 둘째로 정전기력을 이용한 입자상 물질을 제거하는 방법이 있다. 정전기력을 이용한

는 필터의 종류로는 코로나 방전을 이용한 전기 집진 방식과 정전 필터로 나눌 수 있다. 정전 필터는 기존 섬유 필터의 단점인 압력 강하의 증가에 따른 운전비용의 증가를 보완하기 위해 이용되기 시작하였다. 정전 필터는 그 제조 방법에 따라 필터 자체가 정전기를 갖게 되는 대전 필터와 외부에서의 강한 전기장에 의한 필터 섬유에 극성을 띄게 하는 유전 필터가 있다. 이러한 정전 필터들은 일반 섬유 필터에 비해 압력 강하가 낮으면서 집진 효율이 매우 좋아 진공 청소기, 방진 마스크, 공기 청정기 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 필터의 경우 사용조건에 따라 필터 섬유의 전기가 중화되어 집진 효율이 급격히 나빠지는 단점이 있다. 코로나 방전을 이용한 전기 집진 방식은 일반적으로 면풍속이 2.0m³/s에서 0.3 μ m 입경의 입자를 약 40~60%를 처리한다. 이러한 방식은 낮은 압력 손실에서 초미세 입자를 효율적으로 처리하지만 그 집진 효율은 헤파 필터나 울파 필터에 크게 미치지 못하여 고청정을 유지하는데 적절한 필터는 아니다.

또 다른 집진 방식으로는 정전분무(Electrospraying)에 의한 전기 집진 방식이 있다. 이는 정전기력을 이용하여 물방울을 미세한 하전된 액적으로 분해시키는 과정을 말한다. 정전분무에 의한 하전된 초미세 입자 발생의 가장 단순한 방법 중의 하나는 그림 1과 같이 물이 공급되는 노즐의 끝과 집진 사이에 수천 볼트의 전기적 포텐셜을 인가함으

로써 쉽게 얻어질 수 있다. 이러한 분무 기술에 의해 발생된 액적은 몇가지 특이한 특징을 가지고 있다. 정전분무에 의해 발생된 미세한 액적은 매우 높게 하전되어 있으며, 쿨롱 반발력에 의해 자기 스스로 분해되며, 따라서 액적간에 응집현상이 나타나지 않는 특성을 가지고 있어 수 많은 이온의 발생량도 유지할 수 있다. 이렇게 발생된 초미세 크기를 가진 액적은 먼지와 충돌하게 되고, 궁극적으로 먼지는 높게 하전되게 된다. 또한 0.1 μ m 입경 이하의 먼지도 더 작은 크기의 액적의 브라운 운동에 의해 하전을 띄게 된다. 이렇게 하전된 먼지는 전기 집진기로 유입되어 포집되게 된다.

본고에서는 정전분무의 원리 및 나노 먼지 대전 효과에 대해 살펴보고, 이러한 방식을 이용한 집진 기술 및 성능에 대해 알아보려고 하였다.

2. 정전분무(Electrospraying)의 원리

바닷물의 스프레이, 폭포수등의 자연적으로 발생된 액체의 스프레이는 전기적으로 하전된 액적(droplet) 또는 이온을 포함하고 있다. 이처럼 자연적으로 발생된 스프레이의 대전 현상은 1890년에 Elster와 Geitel에 의해 관측 되었다. 그 이후 30년 동안 Lenard(1892)등에 의해 스프레이의 대전 현

상에 대한 상세한 연구가 계속 진행되었다. 그들은 다양한 방식에 의해 수용성 액체를 분사시켰을 때, 하전된 물방울을 발생시킬뿐만 아니라 상당한 양의 양이온 및 음이온이 동시에 형성됨을 보았다. 이때 음이온은 스프레이의 방식에 따라 일반적으로 양이온의 10%이상이 발생되었으며, 폭포수의 경우, 미세한 액적들은 뚜렷하게 음이온을 형성하였고 반면에 다소 큰 액적들은 양이온을 형성하였다. 이러한 자연적인 하전의 특별한 이유는 액체속에 자유하전매체나 이온이 존재하기 때문이다.

스프레이의 자연적인 하전은 액체의 분쇄과정에서 액체 표면에 전기장이 존재하면 절대적으로 증가할 수 있다. 따라서 자연적 하전현상(nature charging)이라는 학술 용어는 액체의 붕괴(Liquid breakup)라는 방식에 의해 자체적으로 하전됨을 의미하며, 인위적인 전기장의 효과를 의미하지 않는다. 스프레이가 폭포수나 바닷물의 경우에서처럼 자연에서 발생된 경우, 이 스프레이의 과정은 지구에 존재하는 전기장에 의해 일어난다고 볼 수 있다. 지구상에 자연적으로 존재하는 전기장의 세기는 일반적으로 맑은 날씨인 경우 약 130V/m이며, 대기에 대해 음으로 하전되어 있다. 바닷물의 스프레이 액적에 대한 유도 하전(induction charge)의 효과는 상당히 높으며, 이는 Blanchard(1963)에 의해 관측되었다.

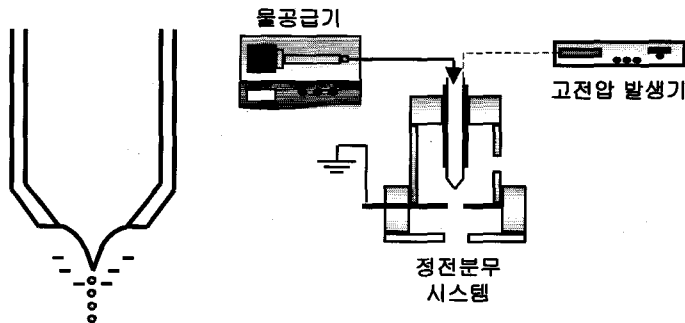


그림 1. 정전분무의 발생 원리(정수압력과 표면장력의 붕괴)

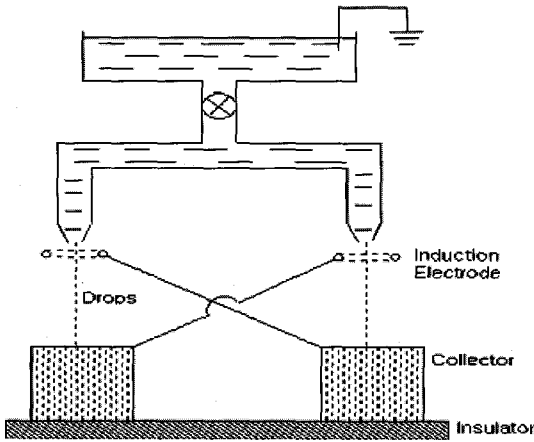


그림 2. 켈빈의 유도 액적 발생기

유도 하전의 효과는 그림 2에서 보여준 유도액적(Water-dropper)라는 장치를 이용하여 Lord Kelvin(1867)에 의해 증명되었다.

그림 2에서 보여준 것처럼 접지된 상위체(reservoir)로부터 물은 2개의 유리나 금속 노즐로부터 떨어지게 된다. 2개의 금속 재질의 포집기(collector)는 2개의 링 전극에 전기적으로 연결되어 있다. 이 시스템이 작동되어졌을 때 다양한 물리적 및 전기-화학적 효과에 의해 액적은 미소한 하전을 띄게 된다. 노즐, 드리핑 비율(dripping rate), 액적의 크기 등에 미소한 불평형은 2개의 포집기에서 형성된 하전에서 미소한 하전의 차이를 발생시키며 따라서 2개의 링형식의 전극에 형성된 포텐셜도 미소한 차이가 나타난다. 노즐의 주변에 대한 양의 포텐셜의 전극 구성은 액적이 유도에 의해 음으로 하전되는 원인이 된다.

2.1 정전분무에 대한 연구 내용

2.1.1 1950년 이전의 연구

Rayleigh(1882)이후에 가장 중요한 연구가

Zeleny(1915)에 의해서 수행되었다. 그는 유리로 만든 모세관을 사용하여 모세관 끝에 매달린 물방울의 분해 현상(break-up)을 연구하였다. 그는 콘젯(Cone-jet) 모드뿐만 아니라 작동조건에 따라 여러 가지 모드가 존재하는 것을 관찰하였으며, 전압이 입구 전압보다 작을 경우 물방울이 안정한 상태를 유지한다는 것을 알았다. 또한 전압을 처음 가할 때 액체 내에 진동(Oscillation)이 있음을 관찰하였다. 그는 대략 발생하는 입자의 크기를 측정하였는데 약 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 였다. 그는 미세한 물방울의 분사과정은 모세관 끝에서 비교적 큰 물방울로 분해되는 과정과는 다른 과정을 거치게 되는 것을 발견하고 이것은 물방울 표면에서 불안정한 결과로부터 일어난다고 결론지었다.

2.1.2 1950년대~1980년까지의 연구

1950년까지는 1935년 Zeleny의 연구 이후에 별다른 연구가 진행되지 못했다. Vonnegut와 Neubauer(1952)는 Zeleny의 실험장치와 비슷한 실험 장치를 사용하고 전극에 가해주는 전압을 $5 \sim 10\text{kV}$ 로 하여 입자의 지름이 $1.0 \mu\text{m}$ 정도의 단분산 입자를 만들 수 있었다. 그들은 실험결과와 이론을 일치시키려고 노력했지만 정확성을 주장할 수는 없었다. 그 이후에 Drozin(1955)의 연구는 Vonnegut와 Neubauer의 연구와 밀접한 관련을 갖는다. Drozin은 액체가 가해지는 전압을 증가시키면서 일어나는 여러 가지 단계를 관찰하였다. 그가 관찰한 것 중에서 가장 중요한 것은 절연 상수(Dielectric Constant)가 작은 액체는 분사될 수 없다는 것이다. 그리고 액체의 물리적인 성질과 방전(discharge)과의 관계를 관찰하려는 시도가 있었다. Deshon과 Carson(1968)은 가해지는 전압으로부터 발생하는 물방울 끝에서의 전기장의 세기를 측정하려고 노력하였다. 직관적으로 예상할 수 있듯이 물방울이 분해되는 조건을 결정하는 것

은 가해주는 전압이 아니라 물방울 표면에서의 전기장의 세기라는 점에서 중요한 관찰이었다.

2.2 정전분무

물방울이나 jet에 존재하는 전하에 의해서 액체에 발생하는 불안정성을 처음으로 발견한 사람은 Rayleigh(1882)이다. 그는 액적이나 제트의 안정성은 외부의 전기적 응력과 표면장력과의 관계에 의해 결정된다고 생각했다. 그 이후에 많은 과학자들에 의해 이에 대한 연구가 계속 되고 있지만 Rayleigh의 실험 결과와 분석 자료를 증명하려는데 그치고 있다. 따라서 최근까지도 여러 장치에 정전분무 기술을 적용하려는 관심은 크지만 여전히 입자 발생 과정을 지배하는 미립화 과정(atomization process)이 완전히 이해되고 있지 않다.

2.2.1 기본 원리

평형상태에서 표면 장력과 액주의 높이와의 관계는 다음과 같다.(Smith,1960)

$$2\gamma\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r}\right) = \rho gh \quad (1)$$

여기서, γ 는 액체의 표면 장력을 나타내며, ρ 는

액체의 밀도, h 는 액체 칼럼의 높이를 나타낸다.

액체에 잠겨져 있는 첫 번째 전극에는 고전압이 가해지고 모세관(capillary tube)끝에서 약 1~2cm 정도 밑에 접지로 처리된 두 번째 전극(plate 형상)이 놓이게 된다. 전극에 고전압을 가해주기 전에는 정수 압력과 표면장력이 평형을 이루다가(그림 3(a)) 전극에 약간의 전압을 가해주자마자 모세관 끝에 반구형의 물방울이 형성된다.(그림 3(b)) 적당한 압력과 전압(threshold voltage)에서 물방울의 모양은 콘젯 모드를 형성하며(그림 3(c)), 콘의 정점에서 제트가 분사된다. 분사되는 제트는 눈으로 식별할 수 없다. 콘젯 모드를 형성하며 분무(spray)를 하기 위한 전압의 크기는 두 번째 전극(ground plate)과 액체 콘의 정점사이의 간격에 의존한다. 전극에 가해주는 전압이 커질수록 발생하는 입자의 양도 많아진다. 그러나 이것은 어떤 제한된 전압 아래에서만 가능하며, 콘젯 모드에 의해서 미세입자가 발생되는 전압은 대략 3~5kV근방이며 콘의 정점과 접지판과의 간격에 따라 그 이상에서도 가능하다. 입구 전압(threshold voltage)이하에서는 어떠한 미립화도 발생되지 않는다. 전압을 더욱 증가시키면 노즐의 끝에서의 액적의 모양이 두 곳 이상

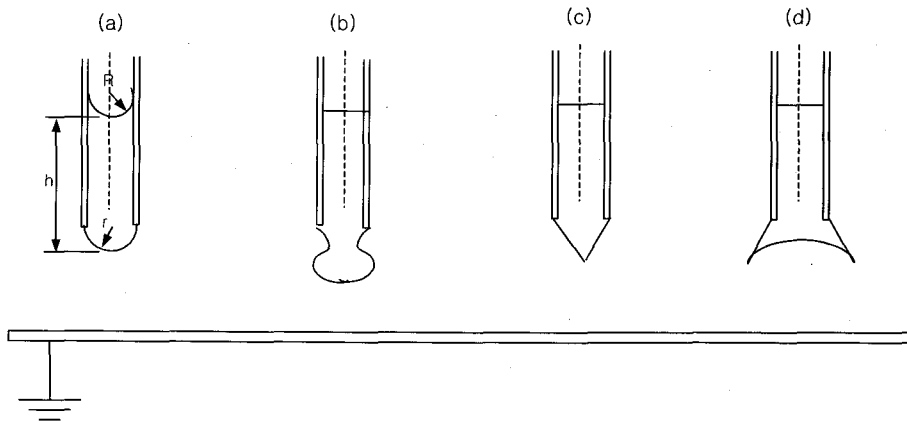


그림 3. 전압의 변화에 따른 액적의 모양

에서 분사가 일어나는 멀티 젯(그림 3(d))이 나타난다. 액체의 안정한 방전이 일어나는 최적의 분사조건하에서 액체 콘의 반각은 45°이다.

3. 정전분무에 의한 집진 원리

본 연구에서 사용된 정전분무 시스템에 대해서 간단하게 설명하겠다. 본 정전분무 시스템의 구성은 크게 정압 유지 장치부, 분사부, 제어부의 4개의 구성으로 나누어진다. 분사부는 파이프와 노즐로 구성되며 제어부는 고 전압 발생기와 전압 콘트롤러 그리고 솔레노이드 밸브로 구성된다. 이를 그림 4에 나타내었다.

3.1 정수압 유지 장치

정전분무 장치를 이용하여 많은 양의 분진을 효율적으로 포집하기 위하여는 초미세입자들이 다량으로 발생하여야 하며, 또한 초미세입자들이 균일하게 발생되어야 한다. 본 장치는 다량의 초미세입자들을 균일하게 분사시킬 수 있는 정압 유지장치이다.

3.2 분사부

분사부는 크게 파이프와 노즐로 구성된다. 분사부



그림 4. 정전분무 시스템

의 구성은 한열에 8개의 파이프가 서로 연결되는 구조이며, 이러한 파이프들이 10개의 열로 이루어진다. 따라서 시스템의 노즐의 수량은 총 80개를 필요로 한다.

3.3 제어부

제어부는 크게 고전압 발생부와 전압 콘트롤러, 솔레노이드 밸브로 구성된다. 고전압 발생부는 크게 2개의 부분으로 나누어진다. 하나는 정전분무 시스템에 연결되고, 다른 하나는 컬렉터에 연결된다.

3.4 컬렉터 원리 및 개념

기존의 2단 평행판 정전식 집진기의 집진부는 알루미늄 박판 형태를 가지는 타입이 주로 사용되고 있다. 알루미늄 박판 타입의 집진부를 가지는 정전식 집진기는 금속 재질을 사용하기 때문에 소형 경량화하기 어려우며 금속판의 방전에 의한 방전 소음이 발생할 가능성이 높으며 효율이 저하하는 경향이 있다. 본 연구에 사용된 집진부는 폴리프로필렌(PP) 필름의 한쪽면에 특수 도전성 잉크(Carbon particle)가 코팅되어져 있고 다른 면에는 코팅되어 있지 않다. 이러한 필름은 코팅되어진 면과 코팅되지 않은 면 이 다량으로 적층되어져 있으며, 도전층 사이의 이웃하고 있는 필름사이에 고전압을 인가하는 형태이다. 이러한 전극의 구성은 전기적 안정성이 매우 높고 전기적 스파크가 없으며, 전극사이의 간격을 최소화할 수 있어 매우 높은 전기장(electrical potential)을 형성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 이러한 방식의 전기 집진기는 매우 높은 집진 성능을 확보할 수 있다. 본 연구에서 사용된 정전식 집진기의 집진부는 위에서 언급한 수지 필름 방식을 채택하였으며 집진부의 형태는 그림 5와 같다.

집진판 간극에서 전기장의 형성에 대해 자세히

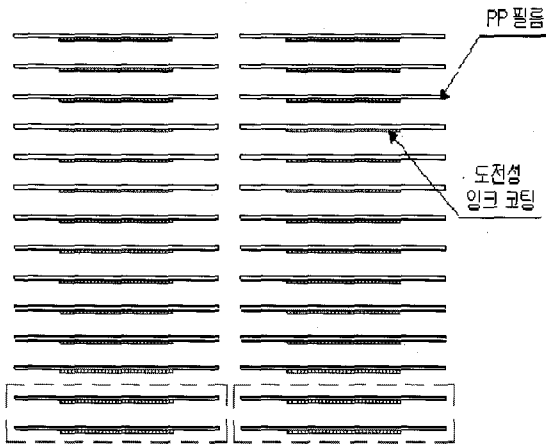


그림 5. 컬렉터의 구조

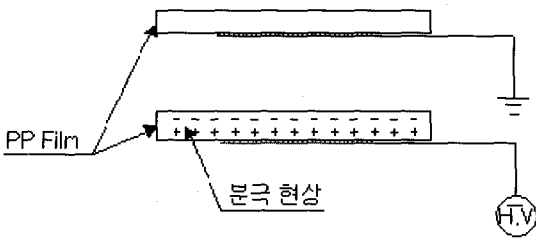


그림 6. 집진부의 원리

설명하면 다음과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 PP필름의 한쪽면에 음극의 고전압을 인가하고 다른 한쪽면에 접지를 하면 음극의 고전압을 가한 쪽의 PP필름에는 분극 현상이 일어난다. 따라서 이러한 분극현상에 의하여 각각의 필름에는 전위차가 형성되어 하전된 입자를 쿨롱력에 의해 포집할 수 있게 된다.

3.5 집진 원리

그림 7은 정전분무된 액적 또는 이온에 의해 먼지가 하전되어 컬렉터에 포집되는 개략도를 나타낸 것이다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 정전분무 시스템에 일정 전압을 인가하게 되면 분무가 시작되고,

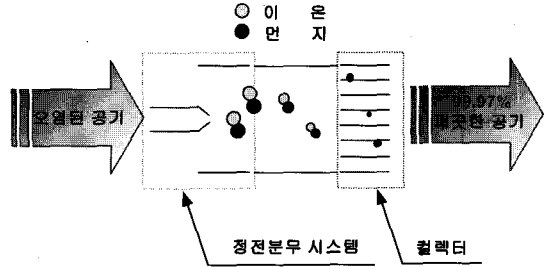


그림 7. 정전분무에 의한 집진 메커니즘

수~수십 나노미터로 분무된 액적은 매우 높게 하전되어 외부의 먼지와 충돌하게 되고, 충돌된 먼지는 액적과 같은 하전량으로 대전되어 일정 전압이 걸린 컬렉터에 포집되게 된다. 컬렉터에서의 집진 메커니즘은 3.4절에서 설명하였다.

4. 실험적 고찰

4.1 정전분무 시스템의 압력 손실 측정

그림 8은 정전분무 시스템의 압력 손실을 측정한 값이다. 정전분무 시스템만 설치한 경우와, 컬렉터를 동시에 설치한 경우에 먼풍속에 따른 압력 손실을 측정하였다. 그림 8로부터 정전분무 시스템 자체만의 압력 손실은 먼풍속 3.0m/s에서도 0.25mmH₂O의 매우 낮은 압력 손실을 보이고 있다. 그러나 컬

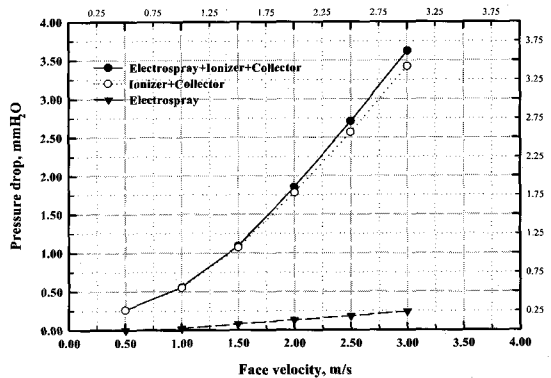


그림 8. 정전분무시스템의 압력 강하

렉터를 연결시킨 시스템에서는 먼풍속 2.0m/s에서 약 1.8mmH₂O로 나타났다. 이는 일반적인 정전식 집진기의 압력 손실과 유사한 특성을 보인다. 그러나 정전분무 시스템의 압력 손실은 동일한 성능의 헤파필터에 비해 약 10배 정도 낮은 압력 손실을 보인다.

4.2 집진 효율 분석

본 실험은 정전분무 시스템의 집진 효율 성능을 평가하기 위한 것이다. 본 연구의 목적은 서브 마이크론 입자에 대해 집진율을 99%이상 달성하는 것이 목적이다. 이러한 실험을 수행하기 위해 그림 9와 같은 장치를 구성 하였다. 그림 9에서 보여 주듯이, 청정 풍동내에 정전분무 시스템과 컬렉터를 설치한다. 풍동의 전 후단에서 입자를 샘플링하여 DMA 및 응축 핵 계수기로 그 농도를 측정하여 집진 효율을 구한다. 먼저 실험 장치에 대한 간단한 소개를 하고자 한다. 입자를 발생시켜주는 분무기

(atomizer), 분무된 입자의 수분을 제거하기 위한 확산 건조기(diffusion dryer), 확산 건조기를 통한 입자를 Po210으로 전기적으로 중화시켜 불츠만 평형 상태를 이르게 하는 중화기(neutralizer), 발생된 입자 중에서 일정한 크기의 입자만을 선택적으로 선별하기 위한 DMA(differentail mobility analyzer)와 하전된 미세한 액적(droplet)을 발생시키는 정전분무 시스템, 기체 중의 입자를 포집하는 전기 집진기(electrostatic precipitator, ESP), 전기 집진기 및 정전분무 시스템의 전극에 전압을 걸어 주기 위한 직류 고전압 발생 장치, 입자의 개수 농도를 측정하기 위한 응축 핵 계수기(condensation nuclei counter, CNC), 그리고 시험 풍동으로 구성하였다. 먼저 압축기에 의해 발생된 2.5 kg/cm²의 고압 공기는 청정 공기 공급기를 통과하여 분무기와 DMA로 유입된다. 분무기에 의해 발생된 다분산 입자는 확산 건조기와 중화기를 통과하여

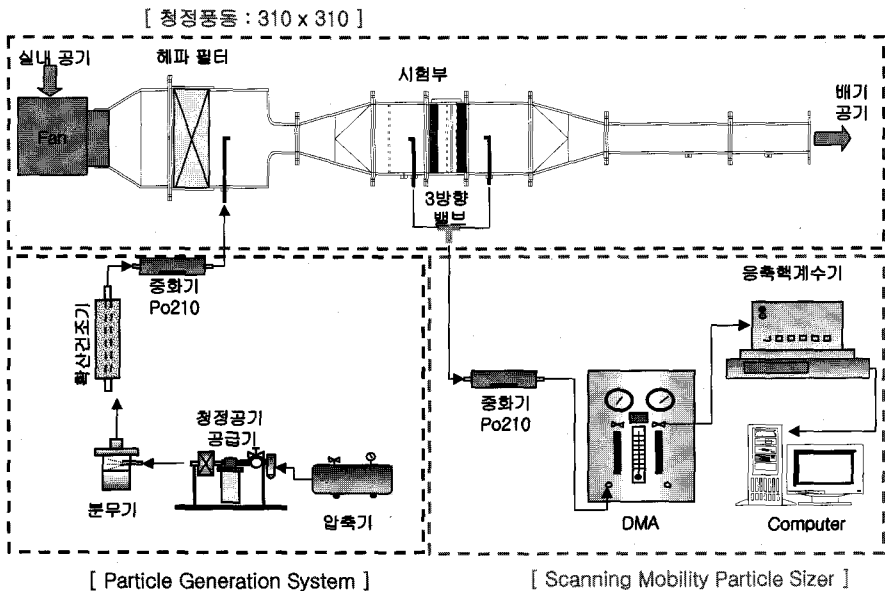
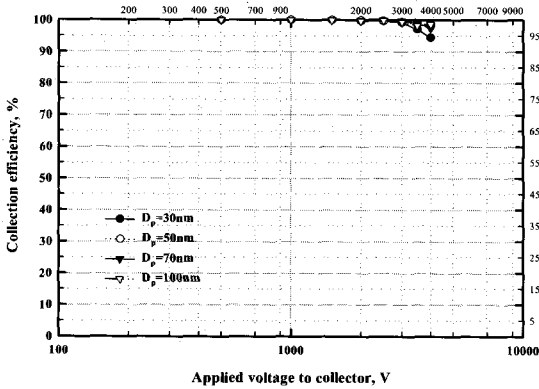
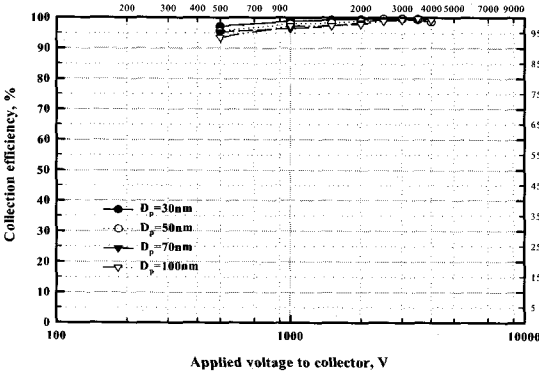


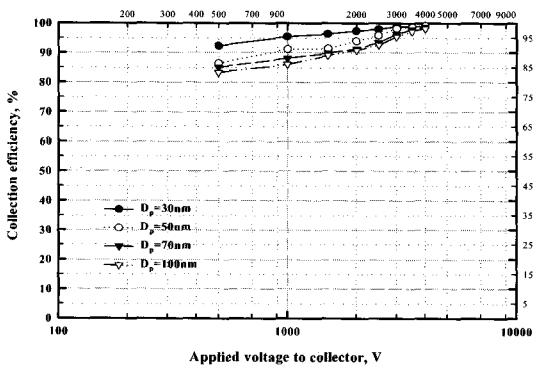
그림 9. 집진 성능 평가를 위한 실험 장치도



(a) 면풍속 : 0.5m/s



(b) 면풍속 : 1.0m/s



(c) 면풍속 : 1.5m/s

그림 10. 면풍속에 따른 집진 성능

청정 풍동으로 유입된다. 청정 풍동으로 유입된 다분산 입자는 청정공기와 혼합되어지고 시험부로 유입된다. 시험부로 유입된 입자는 DMA로 샘플링되며, DMA에 의해 일정한 크기의 입자가 분류되어 응축핵 계수기로 유입된다. 여기서 시험부를 지나 는 평균 공기의 속도가 0~3%사이에서 가변될 수 있도록 원심 송풍기의 회전 속도를 0에서 60Hz사 이에서 조절할 수 있도록 인버터를 장착하였다. 시 스템의 외형 크기는 305x305(mm)이다.

그림 10은 소금(NaCl)입자를 분무기에 의해 발 생시켜 청정 풍동내로 주입 한 후, 정전분무 시스템 -컬렉터의 효율을 평가한 것이다. 시험 입자의 크 기는 30nm, 50, 70, 100으로 하였다. 정전분무 시스 템에 인가된 전압은 10kV이다. 그림 10(a)는 면풍 속이 0.5m/s 인 경우이며, 그림에서 볼 수 있듯이 컬렉터의 전압이 낮은 경우에도 거의 100%의 집진 효율을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 10(b)는 면 풍속이 1.0m/s인 경우로, 컬렉터의 전압이 낮은 경 우 효율이 그림 10(a)의 경우보다 다소 감소하였지 만 고전압의 조건에서는 그 효율은 99.9%이상을 보여 주었다. 그림 10(c)의 경우도 유사한 경향을 보였다.

4.3 헤파 필터와의 성능 비교

그림 11은 정전분무 시스템과 헤파 필터, 울파 필 터의 성능을 비교한 그래프이다. 본 실험에서는 100nm이하의 입자에 대해서는 SMPS를 적용하 였으며 그 이상에서는 OPC를 사용하였다.

그림에서 알 수 있듯이 정전분무 시스템은 헤파 필터보다 우수한 성능을 보이고 있다. 집진 효율뿐 만 아니라 압력 손실에서도 1/10배이상 우수하기 때문에 헤파필터로의 대체가 가능할 것으로 보인 다. 그러나 울파 필터보다는 집진 효율이 다소 떨 어지는 경향이 나타났다.

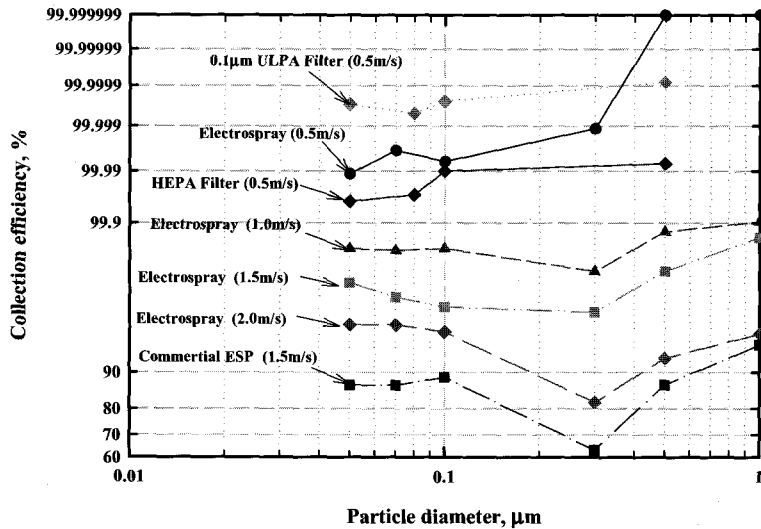


그림 11. 입자 포집 방식에 따른 집진 성능 비교

5. 맺음말

이상에서 설명한 정전분무 시스템은 기존의 정전 집진 방식에 비해 고효율을 보일 수 있음을 알았다. 정전분무 시스템의 최적 분사 조건에서 수행된 외부 입자의 대전 효과는 거의 100%에 도달됨을 보였으며, 따라서 정전분무 시스템을 집진 시스템에 적용하면 초미세 입자의 포집에 매우 효율적이라는 것을 알았다. 즉, 면풍속이 0.5m/s인 경우, 100nm이하의 입자에 대해 99.99%이상의 집진율을 보였으며, 2.0m/s의 속도에 대해, 100nm이하의 입자의 경우 96%이상의 고효율을 보였다. 이는 기존의 해파 필터나 정전 필터의 경우보다 높은 효율을 보이며 저 압력 강하를 나타내는 장점을 보였다.

- 참고문헌 -

1. Michelson, 1990.1., "Electrostatic Atomization", Adam Hilger, Bristol and New York,
2. Michel Cloupeau and Bernard Prunet-Foch, 1994, "Electrohydraulic Spraying Functioning Modes : A Critical Review", J. of Aerosol Sci., Vol. 25, No. 6, pp.1021-1036
3. M. Grace and J.C.M. Marijnissen, 1994, "A review of Liquid Atomization by Electrical Means", J. of Aerosol Sci., Vol. 25, No. 6, pp.1005-1019
4. Chen, D., Pui, D.Y.H., and Kaufman, S.L., 1995, "Electrospraying of Conducting Liquids for Monodisperse Aerosol Generation in the 4nm to 1.8um Diameter Range", J. of Aerosol Sci., Vol. 26, No. 6, pp.963-977
5. L. De Juan and J. Fernandez De Ra Mora, 1997, "Charge and Size Distributions of Electro spray Drops", J. of Colloid & Interface Science, 186, pp.280-293
6. Keqi Tang and Alessandro Gomez, 1996, "Monodisperse Electro sprays of Low Electric

- Conductivity Liquids in the Cone-Jet Mode”, J. of Colloid & Interface Science, 184, pp.500-511
7. R.P.A. Hartman, D.J. Brunner, D.M.A. Camelot, J.C.M. Marijnissen and B. Scalett, 2000, “Jet Break-Up in Electrohydrodynamic Atomization in the Cone-Jet Mode”, J. of Aerosol Sci., Vol. 31, No. 1, pp.65-95
8. Leonid T. Cherney, 1999, “Electrohydrodynamics of Electrified Liquid Menisci and Emitted Jets”, J. of Aerosol Sci., Vol. 30, No. 7, pp.851-862
9. 한국공기청정연구조합, 2002, “공기청정편람 제 2권 기구편”