

# 집진장치 및 기술개발 동향

Particulate Control Equipments and Technology Direction

김 용 진

한국기계연구원 열유체시스템연구부

## I. 서론

최근, 전세계적으로 첨예화된 환경오염 문제 가운데에서 대기오염 문제는 지구전체 인류의 생존에 직결되는 매우 긴박한 문제이므로 대기오염제어기술에 대한 연구개발 및 투자가 전세계적으로 가속화되고 있다. 따라서 대기오염 문제가 국가적인 사회문제로 대두되면서 대기오염방지장치의 수요가 급증하고, 점차 강화되는 환경오염 규제치로 인하여 고효율의 오염방지장치의 설치가 요구되어진다. 대기오염방지장치에서 대표적인 집진장치 기술은 대기 및 실내오염제어 뿐만 아니라, 고정도의 첨단 클린룸 수요의 증가등으로 인하여 산업체의 각 분야에서 필수적이면서도 기본적인 기술이다.

대기중의 분진(dust)은 분자의 응축(condensation) 및 핵생성(nucleation) 등에 의하여 발생하는 매우 미소입자( $0.05 \mu\text{m}$  단위)와 일반공장 및 작업장 등에서 발생하는 분진( $0.1 - 10 \mu\text{m}$ ) 과 그리고 바람에 의한 지표면의 흙, 모래 등에 의한 비교적 큰 분진 등의 광범위한 조성과 입경분포를 가진다. 이 가운데, 특히 산업발달에 따라 불가피하게 생성되며, 대기오염의 주종을 이루면서 인체에 가장 유해한 분진입자는 산업체의 오일(oil) 및 석탄연소 보일러, 자동차, 제철/제강 및 시멘트 플랜트 등으로 부터 배출되는 미세입자(fine particle)들이며, 앞으로 이들의 제어에 관한 연구가 지속적인 관심의 대상이 될 것이다. 한예로, 석탄연소 화력발전소로부터  $1 \mu\text{m}$  이하의 입자들의 배출량은 무게비로는 1% 이하이지만 입자수의 비율에서는 99%를 차지하고 있다. 이들은 매우 높은 중금속 함유량을 지니고 있기 때문에 인체의 호흡시 심각한 문제를 유발시킬 뿐만 아니라, 이러한 미세입자들은 대기중에 부유하고 있다가 비(rain)에 의하여 세정되어 수질오염을 유발시킨다.

따라서, 이들의 미세 배출분진의 농도 및 입자의 크기에 따라 각각 최적의 집진장치의 선정을 달리하게 되며, 따라서 적용분야에 따라 배출 초기에 효율적인 제거가 가능한 집진장치의 설치가 매우 중요하다. 여기서는 이러한 집진장치 및 기술들에 관하여 기본기술 및 개발현황 등에 관하여 소개하고자 한다.

## II. 싸이클론(Cyclone) 집진장치

싸이클론 집진기는 구조가 간단하고 설치비가 및 운전비가 저렴하기 때문에 관성력을 이용하여 분진을 처리하는 가장 대표적인 장치이다. 현재 싸이클론은 보건위생분야에서 호흡에 의해 인체에 흡입이 가능한 서브미크론 크기의 입자를 집진하는 본체직경 10mm이하 에서부터, 각종 산업공정에서 배출되는 오염가스로부터 입자상 물질을 집진하는 7~8 m의 크기로 다양하게 적용되고 있다. 그런데, 대부분의 관성력 이용 집진장치와 마찬가지로 이러한 싸이클론 집진장치는 미세입자의 집진에는 효과적이지 못하며, 중간입자 또는 큰 입자의 경우에 효과적인 집진이 가능하므로 전기집진기 또는 여과포 집진장치의 수명향상을 위한 전처리용으로 사용되고 있다.

그러나, 최근에는 싸이클론 내부의 유동 구조변경 및 전기효과등을 통하여 미세입자의 집진에서도 고효율화에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있는데, 싸이클론에 정전기력을 첨가하여 미세입자의 집진을 효과적으로 보완하는 전기싸이클론(electrocyclone)이 최근 미국을 비롯한 선진국에서 개발되어 여러 현장에서 실용화되고 있으며, 최소 30% 이상의 집진효율 향상을 가져오고 있다. 이는 코로나 유동 및 입자 이온화에 의하여 전기유동 및 쿨롱력이 원심력에 첨가되어 작용함으로써 미소분진의 경우에도 벽면으로의 전달을 용이하게 하여 결국 집진효율의 향상의 결과를 가져오기 때문이다.

## III. 전기집진장치 (Electrostatic Precipitator)

전기집진장치는 코로나 방전을 이용하여 분진에 전하를 부여시키고 극성을 가진 분진을 전기장속으로 이동시켜 분진을 부착, 수거하는 장치이다. 따라서 이 장치는 초기 시설비가 고가이나, 광범위한 입경분포의 분진입자에 대하여 매우 효과적이며 고온유동에서도 적합할 뿐만 아니라, 작동시 압력손실이 매우 낮은 많은 장점을 가지고 있기 때문에, 현재 가장 많이 사용되어지고 있는 집진장치이다.

최근의 여러가지 분진에 대하여 집진효율의 예측기술과 고전기저항의 분진문제 등에 관하여 집중적인 연구가 수행되고 있으며, 전기집진기에서 방전부와 집진부는 집진기 전체 체적의 90% 이상을 차지하기 때문에

이에 대한 최적설계는 궁극적으로 소요동력의 최소화, 집진기 전체 크기의 최소화에 의한 시공비가 절감을 가져오기 때문에 전기집진기 연구에서 가장 중요하다고 할 수 있다. 전기집진기 집진/방전부의 유체 및 입자운동은 코로나(corona)전기장파 복잡하게 조합되어 있으며, 전기집진장치의 집진효율을 수치적으로 정확히 예측하기 위하여는 이러한 시스템을 해석하지 않으면 안된다. 일반적으로 도이취(Deutsch) 방정식에 의하여 전기집진기의 성능을 예측하고 있는데, 이것은 균일 입자농도 분포와 모든 집진기 내부 위치에서의 균일 혼합(mixing) 등의 무리한 가정을 가지고 있기 때문에 정밀하고 정확한 예측이 불가능하다. 최근에는 전기유체역학(EHD: electrohydrodynamics)과 조합하여 전기집진기 내부 유동을 정확히 예측하고 입자운동 및 농도 분포에 의한 전기집진기 성능 예측이 시도되고 있다. 결국, 운전 에너지 절감 및 집진효율 증대의 측면에서 전기집진기 개발의 추세는 일본과 유럽을 중심으로 하는 펄스하전공급방식, 광폭전극공간(wide plate spacing)방식, 이동집진전극방식에 관한 연구와 미국을 중심으로 하는 유입황 제어 기술, 전처리 하전 및 2 단하전 방식 등에 관한 연구가 매우 활발히 진행중이다.

여기서 먼저, 펄스하전방식은 원형 와이어의 코로나 전극에서 더욱더 균일한 코로나를 형성시키고 이는 결국 분진층을 통하여 균일한 전류분포를 가져온다고 알려져 있다. 그리고 더욱 짧은 펄스 간격이 효율적이라고 알려져 있는데, 이는 이온 구름(cloud)이 분진층에 도달하기전에 고전압이 소멸될 수 있게하여 스파크 발생을 억제시킬수 있기 때문이다. 그리고 광폭전극공간 방식은 많은 집진기 메이커들에서 채택되고 있는 첨단 기술로서, 이는 판간격의 확대에 따라 공간전하를 증가시키고 결국 높은 집진 전기장을 형성시키면서, 더욱더 균일한 전류밀도와 공기역학적 요소들을 증가시키는 방식으로 알려져 있는데, 이러한 효과들은 이러한 기술의 더욱더 정확한 적용을 위하여 지속적으로 시험되어지고 정량화 되어져야 할 것이다.

#### IV. 여과포(Fabric Filter) 집진장치

여과포 집진장치는 유리 또는 세라믹 섬유상의 여과포에 분진유동을 통과시켜 분진을 부착, 수거하는 장치이다. 따라서 이 장치는 광범위한 입경분포의 여러종류의 분진입자에 대하여 매우 효과적이거나, 여과포의 재질 문제 등으로 보일러 등에서 배출되는 고온유동에서는 부적합하고, 작동시 압력손실이 매우 높은 결점을 가지고 있다. 최근에는 저유황 석탄의 연소시 생성되는 고전기저항의 분진의 경우 그 적용범위가 미국의 서부 지역을 중심으로 확대되어지고 있다. 전기집진기인 경우, 분진의 물리적 전기적 특성에 따라 집진효율이 민감한 반면 여과포 집진의 경우에는 분진의 종류 및 특성에 관계 없이 집진효율이 매우 높다. 단지, 에너지 소모와 압력손실 및 수명 등의 문제에서 많은 연구가 병행되어져야 할 것으로 사료된다.

이를 위하여, 여과포 집진장치에서 음과의 사용 및 정전기를 이용한 압력손실의 감소 및 집진효율의 증대에 관한 연구가 첨단적으로 진행되고 있다. 먼지가 부착된 기체가 단일 섬유를 통과하여 입자가 포집되는데, 먼저 섬유에 포집되다가 점차적으로 먼지 자체에 부착되어 덴드라이트(dendrites)를 형성한다. 전기장이 존재하는 경우 입자들의 포집율은 급격히 증가하며 덴드라이트들은 전기장이 없을 경우의 불규칙적인 형상에 비하여 직선적인 형상을 형성한다. 전기장이 존재할 때 단일 섬유에 대한 포집율은 20배 정도까지 증가될 수 있다. 또한 여과포 집진에서 정전기력은 미세입자의 집진효율과 먼지층의 성장 형상 및 압력손실에서 상당한 감소를 가져온다고 알려져 있다. 요구되는 집진효율에 대하여 향상되는 집진효율은 덜 조밀한 필터 여재의 사용을 가능하게 하고 따라서 이것은 압력손실을 감소시킬 수 있다.

다음의 3가지의 기술들이 주로 전기여과포 집진에 사용되어 진다.

(1) 정전여과포 여재; 여재의 재료가 전기력을 향상시킬수 있도록 제조공법 및 화학처리 한다.

(2) 백(bag) 전극 삽입; 필터 백에 방전극을 삽입하여 전기력을 부여한다.

이 방법의 목적은 가스 유동에 수직되는 충분한 힘을 부여하여 입자들을 먼저 기체유동에서 제거하고 여재의 상류측에서 부착시키게 하는 것이다. 이것은 여재내로 미소입자의 침투에 기인되는 눈막힘(blinding)을 감소시키고 동시에 집진효율을 향상시킨다. 실험적으로 pilot 테스트 결과 플라이 애쉬를 집진하는 Teflon 백을 통한 압력손실은 전기를 가했을때 약 1/4로 감소되고 있다. 유리섬유 여재를 사용하는 경우 이러한 효과는 다소 감소하게 되는게 이는 여재의 표면구조에 기인된다. 일반적으로 정전기 효과는 필터 여재의 표면층이 성길(loose)때 크게 작용한다.

(3) 입자의 예비하전; 필터로 유입되는 분진에 하전을 가하는 방법

입자가 필터에 도달되기전 정전기적인 하전이 주어질때 필터에서의 압력손실은 또한 감소되어진다. 여기에는 많은 과정에 의하여 기인되는데, 한예로 하전입자는 하전 케이크(cake)에 접근함에 따라 감속되어지며 따라서 보다 성길(loose) 먼지층이 형성되어진다. 예비하전된 먼지는 보다 다공성(porous)의 먼지층을 형성하며

표면이 훨씬 거칠다. 그러나 필터의 유속이 증가될 때 이러한 거칠기는 나타나지 않는다. 그리고 예비하전은 케이크에서 입자들의 뭉침 현상을 감소시키서 탈진시 더욱 많은 분진을 제거시킬수 있게 한다.

그리고 최근에는 암모니아와 SO<sub>2</sub> 등을 첨가 주입하여 입자들간의 응집력을 증가시켜 분진층의 공극율 (porosity)를 증가시켜 압력손실을 저감하고 탈진시 분진의 재비산을 감소시키는 연구가 적용되어지고 있다. 또한 PFBC(pressurized fluid bed combustors) 시스템등의 고온고압에서의 집진에서는 여러가지 형태의 세라믹 필터의 적용이 이루어지고 있는데, 이때는 역기류 탈진시스템에 관한 연구와 세라믹 필터 여재의 기계적인, 열적인 손상(수명)이 문제가 되고 있는데, 이에관한 연구가 국내외에서 수행되어지고 있다.

## V. 복합형 시스템

이상에서 언급한 집진기술에 첨가하여 최근에는 가스상의 오염물과 같이 동시에 처리할 수 있는 복합시스템에 관한 연구가 집중되어 지고 있다. 그 가운데 하나가 전기스크루버 세정시스템이다. 슬러리의 스프레이 방울들이 먼저 코로나 방전에 의하여 유도(induction) 또는 이온에 의하여 대전되고 오염입자 및 유해가스들은 코로나 방전에 의하여 반대극성으로 대전된다. 기체 1000ft<sup>3</sup>당 5 gallons의 물의 수밀도 비중일 때, 정전기력의 첨가에 의하여 효율의 증가는 13.8%에서 44.8%로 된다고 보고되고 있다. 효율증가에 대한 실증실험이 계속적으로 보고되고 있으며 여러가지 방법에 의하여 지속적으로 진척되고 있다. 집진효율 향상에 대한 한가지 예로, 1974년 Pilat등은 140ft<sup>3</sup>/h에 대하여 2개의 챔버 스크루버에서 약 7초동안 잔류시킨 결과 효율향상의 결과, 입자를 하전시켰을때 1.05 μm DOP 입자에 대하여 전반적인 입자포집 효율은 68.8%에서 93.6%로 증가되었다. 전기스크루버 관련 최근 이와 유사한 설계에 의한 고효율 상품이 개발되어 시판되고 있다. 이런 유사한 디자인으로, 고전압전극을 벤츄리의 목(throat)부분에 설치한 스크루버가 있는데, 이는 목 부분에서의 빠른 기체속도는 강한 전기장을 형성하여 보통의 값에 비하여 3배이상으로 상승시킨다. 이때 오염입자에 대하여 반대극성을 가진 물방울이 방전극과 접지된 케이스간의 전기장에서 미립화에 의하여 하류부분으로 (downstream) 형성된다. 0.5 μm T<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 입자에 대하여 집진효율은 하전이 없을 때의 80%에서 95%정도까지 형성된다. 이 방법 이외에도 다른 여러가지 상용화된 디자인이 시판되어지고 있다. 전기스크루버 디자인의 경우, 개개 입자들의 포집효율 문제에 의해서 뿐만아니라 입자들의 군(cloud)에 의해서 전달될 수 있는 최대 하전량에 관한 장치의 두가지의 주요한 이론적한계, 즉 자체포집과 가우스 한계들에 의해서 고려되어야 한다. 자체포집이란 물방울을 자체들의 공간 전하량에 의한 힘에 기인되는 스크루버 벽면에 물방울 미립자의 부착이다. 이러한 자체포집은 물방울에 오염입자의 포집되는 특성시간에 대한 물방울의 포집되는 특성시간을 고려함에 의하여 평가되어진다.

그리고 코로나 방전시 생성되는 코로나 플라즈마 프로세스에 의하여 입자상 및 가스상 오염물의 제거기술에 관한 개발 및 실용화 연구가 최근의 미국, 유럽 및 일본 등지에서 첨단적으로 진행중에 있다. 이때의 플라즈마는 크게 두가지 방법에 의하여 개발되고 있는 PCP(Pulse Corona Plasma) 공정과 SP(Surface Plasma) 공정은 상온상압의 기체에서 플라즈마를 생성시키고 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, Hg 증기, 프레온, 다이옥신, 염화탄 및 다른 염화 HC와 불루엔, 벤젠 등을 포함하는 여러가지 휘발성 유기물(VOC) 등의 가스상 오염물 및 유해물질을 제어할 수 있는 활성 래디칼(radical)을 효율적으로 발생시킨다.

먼저, PCP법은 플라즈마 반응기(reactor)내에 코로나 방전극과 반대 전극으로 구성되는 코로나 전극계를 설치하고 양전극간에 처리대상 가스를 흐르게 하고, 급속도의 증가시간(약 20~100ns 정도)을 가지며, 폭이 매우 좁은 (폭반경 100~500ns 정도) 나노세컨드(nanosecond) 펄스 고전압을 수십에서 수백 Hz정도의 비교적 낮은 주파수로 인가하여 강력한 스트리머(streamer)를 생성하는 상압저온 플라즈마 화학처리 공정이다. 이 경우 펄스폭이 지극히 짧기때문에 질량이 가벼운 전자가 가속되어 비평형(nonequilibrium) 플라즈마를 형성하고, 매우 짧은 시간내에 래디칼(radical)생성이 완료된다. 여기에 이온 펄스 정지 기간중에 냉각이 이루어지고 다음의 펄스인가시에 다시 초기상태로 복귀하여 가스온도 상승을 억제할 수 있다. 이 경우 펄스 인가 기간이 매우 짧고, 그 기간 동안 분자온도의 상승이 미세하기 때문에 스트리머 로부터 발달, 다시말해 불꽃방전을 대폭 억제시키면서 펄스전압의 상승치를 매우 높일 수 있다(예를 들면 50KV/cm 이상). 이 결과 전자의 가속에너지를 함께 높여서 활성의 래디칼을 풍부하게 만들 수 있다. PCP는 보일러, 쓰레기 소각로, 엔진 등의 연소 배출가스의 정화(탈황, 탈진, 수증기 등의 각종 유해가스 제거)등의 대형 스케일에 적용하기가 매우 유리한 것이 실증되고 있다.

SP법은 고순도 알루미늄(92%)의 절연층을 매우 얇게 설치한 텅스텐의 선(wire) 형태의 방전극과 평면 형태의 유도 전극사이에 주파수 5~30Hz 정도의 교류전압을 인가하여 선상 방전극에서부터 절연층의 표면에

이르는 다수의 스트리머상의 교류방전을 발생시켜 불평형 플라즈마를 생성시켜 PCP와 같은 래디칼을 만들어 저온 플라즈마 반응을 일으키는 방식이다. 이 방전은 진진속도가 매우 빠른 스트리머상 나노세컨드 펄스방전으로 교류전압의 1/2 사이클만으로 어떤기간 펄스방전군이 발생, 그 이외의 기간은 방전이 일어나지 않고 유지기간으로 되어 소위 간헐적 나노세컨드(nanosecond) 펄스 방전으로 되어서 가스가 냉각하여 가스온도 상승의 억제가 달성된다. 역시 이것은 무성방전에 있어서도 완전히 동일하다. 단 무성방전은 공조방전을 이용하여 가스 냉각이 가스의 분자 전열에 의존하기 때문에 가스온도 상승의 억제효과가 나빠지고 500~1,000Hz이상의 주파수를 올리는 것은 곤란하다. SP에서는 반응영역의 기하학적 제약이 없어질 뿐만아니라 열전도가 좋은 알루미늄세라믹의 매우 가까운 근방에서 방전 플라즈마가 발생하기 때문에 냉각효과가 매우 좋다. 주파수를 용이하게 5~30Hz까지 올릴수 있다. 더구나 래디칼의 시간적 생성률(온도가 일정하게 되면 주파수에 비례)이 향상되고, 반응용기와 전원, 양쪽 모두가 대폭 소형화 된다. 이러한 SP형은 VOC, 냄새 및 일반 공기정화용, 반도체 프로세스에서의 유해가스 제어에 많이 응용되고 있다.

## VI. 결론

이상에서 언급된 바와 같이, 집진장치는 환경 규제치의 강화에 따라 그 수요가 지속적으로 증가하면서 고집진 효율화가 요구되어지는데, 아직도 각각의 적용 경우에 따라 실험 데이터에 의존하여 설계, 설치되어지고 있다. 그리고 미세한 입자의 집진과 가스상 오염물의 동시제어 기능에 의한 원가 및 운전/유지비 절감 시스템에 관한 개발 연구가 향후 중요한 과제로 될 것이다. 이에따라 특히 최근에 전기를 이용하는 집진장치들은 높은 집진효율과 운전 및 보수비의 절감 측면에서 유리하기 때문에 그 수요가 비약적인 성장을 보이고 있다. 그런데, 우리나라에서는 이러한 전기용용 집진 및 유해가스 제어기기들의 설계, 제작과 관련된 기술의 거의 전량을 외국에 의존하고 있는 실정이다. 특히, 장치 내부의 전기유체유동(EHD) 해석 및 제거효율 예측 관련 기술, 그리고 포집분진의 재비산방지와 집진효율 증대 및 장치의 수명증대 등의 문제는 고효율 오염제어 장치의 설계에서 매우 중요하며 시급하게 해결되어져야 할 과제들이다.

미국, 일본 등을 비롯한 선진국들에서는 대기오염 제어기술 분야에 투자가 이미 오래전부터 시작, 개발되어 개발도상국에 수출하여 막대한 외화를 획득하고 있으며, 새로운 형상 및 방식의 고효율 집진/탈유해가스 제어기기의 각 적용별 응용기술 및 모델변경 등에 대한 연구가 계속적으로 진행중에 있다. 앞으로의 집진장치는 전기집진장치와 여과포 집진장치에 대한 연구 개발이 주종을 이룰 것으로 전망되는데, 전기집진장치인 경우, 일본과 유럽을 중심으로 간헐전류 공급방식과 팽폭판공간에 관한 연구가 집진효율의 증대와 동시에 설치비 및 운전비의 절감면에서 연구/개발되고 있으며, 미국을 중심으로 산화황의 제어기술에 의한 고전기저항 분진의 집진효율 증대에 관한 연구가 진행되고 있다. 백하우스 집진장치는 저유황 부산물의 집진에 매우 효과적이기 때문에 미국의 서부를 중심으로 그 수요가 점차 증가되고 있으며, 가장 큰 문제점인 여과필터의 압력손실, 수명 및 효율예측 능력에 관한 연구가 계속적으로 추진되고 있다.

현재 국내의 환경제어기기 설계 및 제작은 선진국의 기술에 대부분 의존하고 있으며 국내 기술개발에 대한 노력 및 투자가 없이는 해외기술에 종속될 추세에 있다. 따라서, 장기적으로 자체기술의 개발노력에 의한 기술자립과 환경제어장치 관련 시장증대에 대비한 제품 기술의 확립이 매우 절실한데, 앞으로 한국기계연구원을 비롯한 출연연구소, 학계 및 기업연구소에서 G7 등의 프로젝트를 통하여 대기오염제어장치의 설계 및 제작 기술 등이 향후 지속적으로 개발될 것이다.

## 참고문헌

Wang, L.K. and Pereira, N.C. eds., (1979) *Handbook of Environmental Engineering*, Vol.1, Humana Press, Clifton, NJ.

Licht, W., (1988) *Air Pollution Control Engineering*, 2nd ed., Marcel Dekker.

Oglesby, S., Jr., (1990) "Future Directions of Particulate Control Technology: A Perspective", J. Air Waste Manage. Assoc., Vol. 40, No. 8, 1183-1185.