

# 대기환경용 습식전기 집진기술 동향

김용진, 정상현, 송동근, 한방우 | 한국기계연구원

## 1. 서 론

전기집진 장치는 산업현장에서 발생하는 입자상 오염물질을 제거하는 장치로 널리 사용되어 왔고, 일반적인 입자상의 단일 오염물질에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔다. 그러나 최근의 미국을 중심으로 초미세 먼지 입자와 중금속, 백연 등의 새로운 미량 유해성 공기오염의 입자상 물질에 대한 배출 허용농도가 더욱 강화될 추이에 따라, 초미세먼지와 가스상 및 액체 미스트(mist)상의 복합적인 오염물질에 대한 새로운 집진 및 유해가스 제거 기술이 요구되어 진다.

2006년 2월 국립환경과학원의 “대기환경기준 조사연구” 보고서에 의하면, 현재 국내 미세먼지 연간기준이  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 강화예정에 있으나, 이는 여전히 미국 캘리포니아 기준  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 높은 값으로, 향후 더욱더 강화될 추세이다. 한편, 미국에서는 1997년부터 PM(Particulate Matter) 2.5의 미세입자에 대한 규제를 시작으로 2005년 12월부터 기준을 더욱 강화시키기로 발표하였으며, 2006년도에 발표된 미세먼지 저감대책은 미국 대기환경정책의 가장 중요한 이슈로 Bush 정부는 Clean Air Interstate Rule(미 동부지역 화력발전소 배출량 감소) 및 Clean Diesel Program(고속도로 배출량 감소) 등을 중점 추진하고 있다. 국내에서도 표 1에서와 같이, 2010년부터 발전소, 소각로 등의 사업장 배출허용기준의 대폭적인 강화 및 배출부과금 개편과 반도체제조시설, 액정표시장치(LCD) 등 신규 첨단산업시설에 대한 배출허용기준의 강화가 입법 예고됨에 따라 고기능의 대기오염방지시설의 추가적인 설치가 예상된다.

최근의 선진국들의 화력발전소에서는 그림 1에서와 같이, SCR(Selective Catalytic Reduction) 탈질장치 및 FGD(Flue Gas Desulfurization) 탈황장치의 설치로 후단에 새로운 반응물질인 황산암모늄 입자 또는 삼산화황( $\text{SO}_3$ ) 미스트(mist) 등이 발생하여 배출되는 문제점으로 탈황장치 후단에 습식전기집진기가 추가적으로 설치되고 있는 추세이다. 또한, 반도체 공정과 같은 다양한 유해성 화학물질을 사용하는 공정에서도 기존의 집진장치에서는 제거가 어려운 미세먼지, 미스트와 각종 인체유해 화학물질들이 배기가스로 배출되고 있다. 이러한 유해 배출가스의 정화를 위하여 습식세정장치(wet scrubber) 등이 사용되고 있으나, 이들의 처리효율상의 한계와 구조적인 문제로 효과적인 습식 전기를 이용한 저감기술이 개발, 적용되고 있다.

여기서는 전기집진기술에서 최근의 한국기계연구원을 중심으로 연구가 활발하게 진행되고 있는 습식 전기집진 기술에 대하여 현황을 분석하고 고찰하고자 한다.

표 1. 2010년 사업장 배출허용기준 주요항목 강화 내용(안)

항 목	배출시설	현행기준	개정(안)	비 고
질소산화물	보일러(40톤이상)	250(4)ppm이하	150(4)ppm이하	액체연료 기준
	발전시설(액체연료)	250(4)ppm이하	100(4)ppm이하	기타발전
황산화물	발전시설(액체연료)	150(4)ppm이하	100(4)ppm이하	400MW 이상
먼지	연마, 저장, 혼합, 탈사 및 탈청시설	100mg/Sm <sup>3</sup> 이하	20mg/Sm <sup>3</sup> 이하	
일산화탄소	석유정제·석유화학 제품, 코크스 제조시설의 일산화탄소 소각보일러	500(12)ppm 이하	200(12)ppm 이하	
염화수소	반도체 및 기타전자부품 제조시설의 표면처리시설	-	2ppm이하	신설
수은화합물	발전시설(고체연료)	-	0.1(6)mg/Sm <sup>3</sup>	신설

자료: 환경부「대기환경개선 10개년 종합계획(안)」

주 : ( )는 표준산소농도

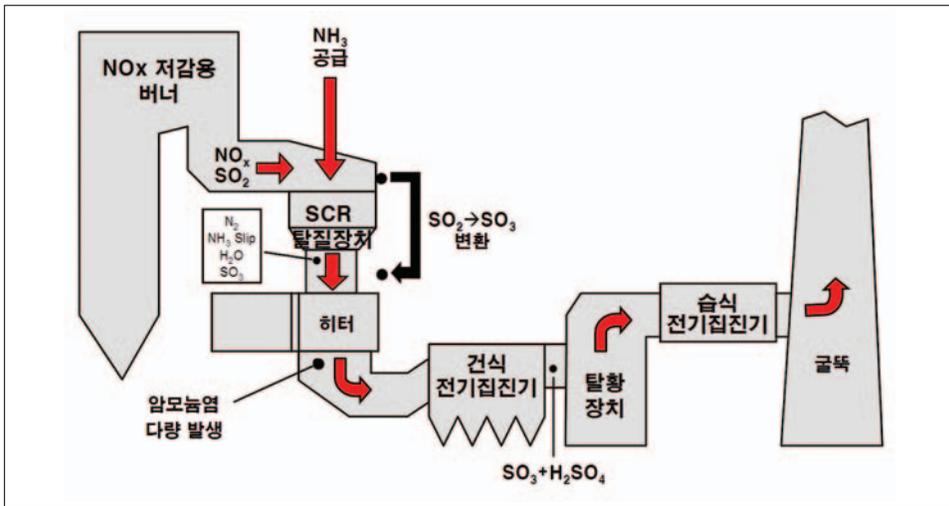


그림 1. 석탄화력발전소 최신 환경설비 구성도

## 2. 습식 전기집진 기술 현황

습식전기집진기(WESP: wet electrostatic precipitator)는 건식 전기집진기를 구성하는 방전극, 집진판 및 고전압 인가 장치에 세정수 공급장치와 순환장치가 추가되어 구성된다. 건식 전기집진기에서의 집진판에 부착된 오염물질의 제거를 위해 추타(rapping) 과정 대신, 습식 전기집진기에서는 세정수를 집진판에 공급하여 부착된 오염물질을 제거한다(그림 2).

습식 전기집진기는 서브마이크론(sub-micron) 미세 입자, 중금속 입자, 미스트(mist), 흠(fume), 다이옥신(dioxin), 푸란(furan) 등의 입자와 가스상 오염물질의 배출 제어에 뛰어난 성능을 보인다. 섬유상의 필터(fabric filter)나 건식 전기집진기 등의 오염방지 설비 등의 집진 효율은 제거 대상 입자의 물리, 화학적 물성에 따라 민감

한 반면, 습식 전기집진기는 다양한 영역의 오염방지 설비에 적용이 가능하며, 대상 입자의 물리, 화학적 물성에 관계없이 서브 마이크론 입자의 제거에 효과적이다.

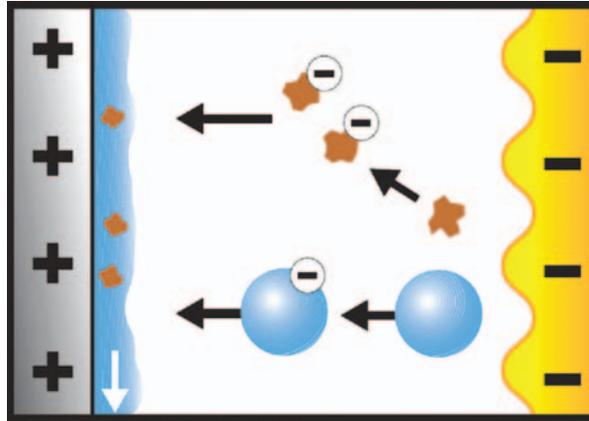


그림 2. 습식 전기집진기의 입자 집진 및 세정 과정

그러나, 대상 분진의 농도가 높은 경우에는 제거 효율이 높지 않아, 독립적인 오염방지 설비로 사용하기에는 처리 용량에 제약이 따른다. 습식 전기집진기 이외의 오염방지 설비로 처리가 용이하지 않은 오염 물질의 처리를 위해서, 습식 전기집진기를 다른 방지 설비의 후단에 설치하여 오염 물질의 농도를 저감시킨 후 처리하는 방식의 하이브리드(hybrid) 시스템에 대한 개발도 활발하게 진행되고 있다. 즉, 대용량 처리 가스중의 높은 분진 부하로 인하여, 현 시점에서 석탄 화력발전소에 단독 처리 설비로 적용할 수 있는 대용량의 습식 전기집진기를 설치하는 것은 어려운 일이며, 일반적으로 건식 전기집진기 등의 다른 분진 포집 장치의 하류에 설치하여 분진 부하가 감소된 이후에 적용하는 방안이 필요하다.

그리고 일반적인 금속 판형의 습식 전기집진기는 집진판 설치의 초기 불완전성과 세정수와 집진판의 표면 장력으로 인해 세정수가 bead 형태가 되는 경향이 있고, 이로 인하여 집진판에 세정수가 존재하지 않는 dry spot이 존재하여 입자들의 build up을 초래하며 전류를 감소시켜 결과적인 전체 효율을 저하시키는 주원인이 된다.

이와 같은 dry spot을 제거하기 위하여 집진판에 세정수를 분사하는 방법을 사용하는 경우, 세정수 분사에 의한 미스트가 발생하여 방전극과 집진극 사이의 전도체 역할을 하여 전기장을 파괴시키는 “spark-over” 현상이 발생한다. 습식 전기집진기 운전시, “spark-over” 현상은 집진 효율 감소의 원인이 되어 오염방지 설비 후단 배출시에 “blue haze”가 발생하는 문제를 야기한다. 이러한 “spark-over” 현상을 막기 위하여 세정수 분사시 인가 전압을 감소시키거나 고전압 인가를 정지하는 운전이 불가피하여, 이로 인해 습식 전기집진기의 효율을 떨어뜨리고 연속적인 운전을 보장할 수 없게 된다. 그리고 습식 전기집진기에서 산성 입자의 부착에 따른 집진판의 부식 문제는 비연속 운전을 하는 일반적인 습식 전기 집진기에서의 또 다른 중요한 단점이다. 이 때문에 집진기 내부에 고 비용의 내부식성 재질이 사용되어 원가 상승의 원인이 되며, 최근 이러한 문제의 해결을 위하여 습식 전기집진기의 집진극에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

그리고 dry spot 현상을 방지하기 위하여 최근 미국에서는 그림 3에서와 같이, 세정수 연속 공급 운전을 위해 집진판을 멤브레인(membrane) 막을 사용하여, 멤브레인 표면에서의 모세관 현상을 통해 세정수의 안정적인 공급

을 구현하는 시스템이 개발되어 pilot 운전 단계에 있다. 그림 4는 전세계적으로 개발, 적용되고 있는 WESP 들의 구조를 보여주는 것으로, 수직형과, 수평형, 그리고 발전소의 FGD와 조합한 모듈화 시스템 들이다.



그림 3. 멤브레인을 집진판으로 이용한 습식 전기집진기

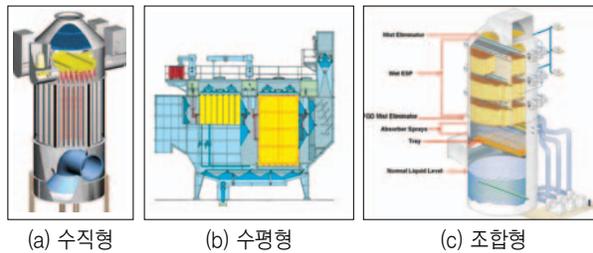


그림 4. 여러 가지 모듈형의 습식 전기집진기 구조

국내에서 설치되어 운영되는 습식 전기집진기는 대형은 전혀 없으며, 기존의 중형 습식 전기집진 설비도 제거 대상 오염 물질이 분진으로 국한되어 있다. 국내의 연구 개발은 대부분 시스템의 구성에 대한 설계 개념의 개발이 주로 수행되었으며, 가장 핵심기술인 세정수 유동 균일화 기술에 대한 부분의 연구는 초기단계의 실정이다. 전세계적으로 습식 전기집진기의 적용이 증가하는 추세이나, 현재 국내 업체들의 기술 부족으로 인해 세계 시장에서의 경쟁력은 취약한 상황이다.

### 3. 응집 복합형 습식 전기집진 기술 개발

일반적으로 오염입자의 크기가 작아질수록 이온과의 충돌 확률이 적어지므로 하전될 가능성이 낮아져 건습식 모두 전기집진기에서의 집진효율은 감소한다. 특히, 반도체 및 디스플레이 제조 공정 등에서 배출되는 미립자는 스크러버 (scrubber)에서 포집되지 않고 출구에서 대량 방출되며, HF, HCl 등의 유해 가스상 물질들도 응축되어 배출된다.

이러한 초미세입자의 효율저하 문제를 해결하기 위하여, 미세입자들의 전기적 특성에 의한 응집 (coagulation) 을 유도하여 최종 배출되는 유해물질을 포함하는 미세입자를 효과적으로 포집, 처리하는 시스템을 개발, 적용하고 있다.

그림 5는 최근에 한국기계연구원에서 개발되어 반도체 공정 배출가스 처리에 실용화 적용중인 유전체 응집형 습식전기집진 장치의 원리를 보여주는 것으로, 입자를 포함한 공기가 방전부를 통과하여 미립화기 (atomizer)에서

발생하는 물 액적들과 함께 응집부로 유입되게 된다. 응집부의 전극에 의해 발생하는 전기장에 의해 유전체인 물 액적은 쌍극성을 띄게 되고, 물액적들 간의 극성에 의해 주위에 부유하는 입자들은 미세한 인력을 받아 액적들에 흡착, 응집하게 된다. 이렇게 미세 입자들과 응집된 물 액적들은 집진부에서 포집되어, 기존의 집진 방식으로는 한계가 있었던 미세 입자들까지도 효율적으로 제거할 수 있게 하는 것이다.

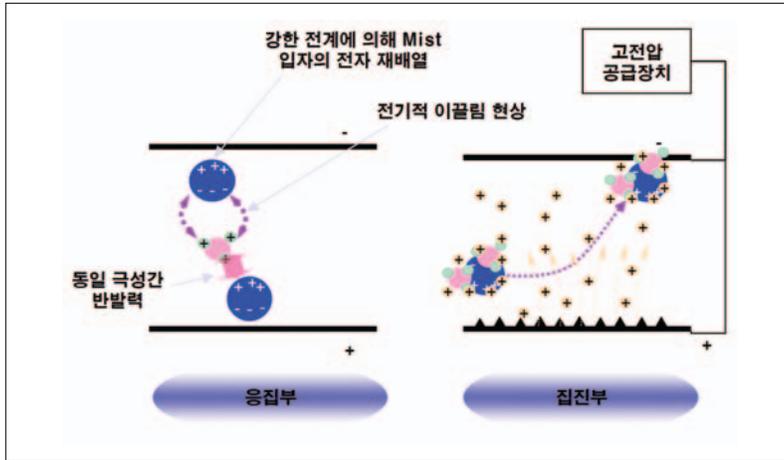


그림 5. 전기 응집형 습식전기집진 장치의 원리도

그림 6은 참여기업에서 반도체 공장에 적용, 설치한 배기가스 유해백연 제거 시스템의 200,000CMH 급의 대용량 실증장치의 사진을 보여주는 것이며, 그림 7과 8은 각각 단위모듈에 대하여 입자 크기에 따른 집진 성능과 풍량에 따른 집진 및 가스 제거 성능 결과를 보여주는 것이다.

그림 7에서 보는바와 같이, 응집부에 전압을 인가함에 따라 단순 습식전기집진기에 비하여 입자크기 전체에 걸쳐 포집효율의 향상을 보였으며, 특히, 입경 1 $\mu$ m 이하의 초미세 입자들에서의 효율 향상이 뚜렷하게 일어나는 것



그림 6. 200,000CMH 배기가스 유해백연 제거 실증 시스템 사진

을 확인할 수 있었다. 이는 기존의 습식 전기집진 시스템으로는 제거하기 어려운 미세입자를 상대적으로 제거가 용이한 마이크론급 입자 크기로 성장시킨 뒤 포집함으로써 기존 장치와 비교했을 때 미세입자 영역에서 집진효율 향상의 결과로 기인되는 것을 보여준다. 한편, 그림 8에서 보는바와 같이 유량이 증가하여도 응집부의 인가전압이 충분히 높을 경우 입자의 포집효율의 저하가 거의 나타나지 않는 것으로 나타났다. 즉, 본 시스템은 대풍량의 집진 설비로의 적용이 기존 설비에 비해 매우 용이함을 보여주고 있다. 또한 본 응집 복합형 유해백연 제거 기술은 입자 상 물질 뿐만 아니라 암모니아나 불산과 같은 수용성 가스 성분의 제거하는 기능까지 보유하고 있어 향후 반도체 제조 공정뿐만 아니라, 각종 공해 방지 설비에 적용이 가능하다. 따라서 이는 국내 환경설비 시장을 활성화시키고 환경산업의 국제적인 경쟁력 확보함과 동시에 국외로의 수출 효과도 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

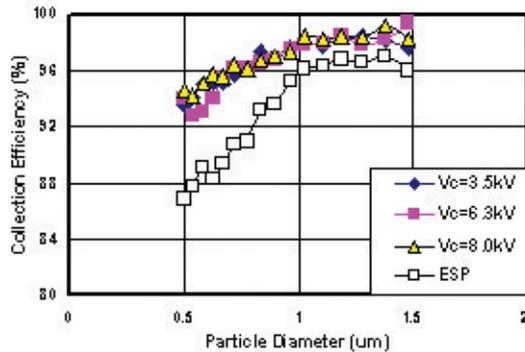


그림 7. 입자 크기에 따른 집진효율 비교

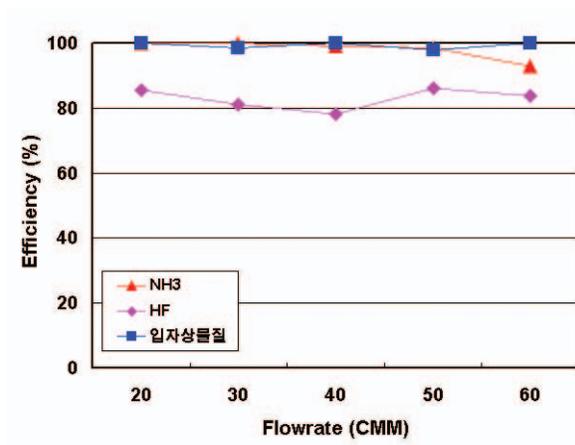


그림 8. 단위모듈 유량별 집진 및 가스 제거효율 특성

## 4. 결 론

첨단 산업의 발전과 더불어 환경오염 문제가 심각하게 대두되면서 산업 발전설비 및 공장 등에서 발생하는 각종 새로운 유해 오염물질을 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히, 미래의 발전소나 첨단 반도체 디스플레이 및 나노 공정 등에서 다양한 신기술이 적용되고 유해성 화학물질을 사용됨에 따라 인체에 유해한 극미세 입자를 포함하여 각종 유해 화학물질들이 배기가스로 배출될 것이다. 이러한 미세 입자상 및 가스상의 복합 오염 물질들은 기존의 건식전기집진 단독의 공정만으로는 한계가 있을 것이며, 이를 위하여 습식 전기를 이용하는 새로운 공정기술의 적용이 늘어날 것으로 예상된다.

여기서도 습식전기집진기술에서 문제점인 균일세정, 하전방식 및 부식문제를 포함하여 극미세입자, 미스트의 응집화 집진 등의 다양한 기술 개발이 이루어지고 적용되고 있으며, 이에대한 경제성 있는 기술 개발이 지속적으로 요구될 것이다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] Robert McIlvane (2006) The future of electrostatic precipitators, Pollution Engineering, November, 18.
- [2] Wadenphol, C. & Peukert, W. (1997) Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines gespulten Rohrelektrogilters. Chem-Ing-Tech 69, 345-349.
- [3] Y. Zhuang, Y. J. Kim, T. G. Lee, P. Biswas (2000) Experimental and theoretical studies of ultra-fine particles behavior in electrostatic precipitators, Journal of Electrostatics, 48, 245-260
- [4] Y. J. Kim, B. Han, S. C. Hwang (2004) Removal of Aerosol Pollutants via an Electrostatic Coagulation Technique, AAAR Conference, Oct. 4-8, Atlanta, Georgia
- [5] 김용진, 정상현, 홍원석, 한방우, 황순철, 윤성한, 최찬규, 윤종필 (2005) 정전 응집체 미세입자 제거 스크리버 특성 연구, 2005년도 한국입자제어로졸학회 학술대회, 295-296
- [6] Mirosław Dors, Jerzy Mizeraczyk, Tadeusz Czech & Massimo Rea (1998) Removal of NO<sub>x</sub> by DC and pulsed corona discharges in a wet electrostatic precipitator model. Journal of Electrostatics, 45, 25-36.
- [7] Chen-Lu Yang (1999) Pulse-Energized Wet Tubular Electrostatic Precipitator for NO<sub>x</sub> Emission Control, Environmental Progress, 18(2), 80-86.
- [8] Hyun Ha Kim, Isao Yamamoto, Kazunori Takashima, Shinji Katsura and Akira Mizuno (2000) Incinerator Flue Gas Cleaning Using Wet-Type Electrostatic Precipitator. Journal of Chemical Engineering of Japan, 33(4), 669-674.
- [9] Charles A. Brown and Paul A. Hohne (2001) Eliminating a Sulfuric Acid Mist Plume from a Wet Caustic Scrubber on a Petroleum Coke Calciner. Environmental Progress, 20(3), 182-186.
- [10] David J. Bayless, M. Khairul Alam, Roger Radcliff, and John Caine (2004) Membrane-based wet electrostatic precipitation. Fuel Processing Technology, 85, 781-798.



김 용 진

- 한국기계연구원 환경기계연구본부  
나노청정연구팀 책임연구원
- 관심분야 : 입자제어, 대기오염방지기술
- E-mail : yjkim@kimm.re.kr



정 상 현

- 한국기계연구원 환경기계연구본부  
나노청정연구팀 책임연구원
- 관심분야 : 대기오염방지기술, DPF재생기술
- E-mail : shjeong@kimm.re.kr



송 동 근

- 한국기계연구원 환경기계연구본부  
나노청정연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 나노입자계측, 대기오염방지기술
- E-mail : dksong@kimm.re.kr



한 방 우

- 한국기계연구원 환경기계연구본부  
나노청정연구팀 선임연구원
- 관심분야 : 실내공기질, 나노입자
- E-mail : bhan@kimm.re.kr