

# 차세대 전기집진기 국산화 개발

조창호	두산중공업 기술연구원	수석연구원
문상철		차장
최재승		선임연구원
이성진		선임연구원
김승민		선임연구원
김용진	한국기계연구원	책임연구원

## 1. 머리말

전기집진기(EP, Electrostatic Precipitator)는 초기 투자비는 다소 높지만 여러 유형의 집진장치보다 운전경비와 보수 유지면에 있어서 탁월한 경제적 우위에 있으며, 신뢰성 및 효율이 높기 때문에, 화력발전소와 같은 대형 연소 시스템에서 배출되는 입자상 분진을 포집하는데 가장 일반화된 집진 장치이다. 그런데, 최근의 대기오염 규제치의 강화에 따라 분진배출량이 엄격히 통제되고 있으며, 이에 따라 더욱더 고효율의 전기집진기를 개발해야만 하는 필요성이 제기되고 있다. 이러한 전기집진기의 기본적인 집진 원리는 간단하지만, 내부의 다중 인자들에 의한 복합적인 작용으로 전체 프로세스는 매우 복잡하다.

전기집진기에서 가장 중요한 것은 비용의 절감과 함께 고 집진효율을 가지는 것인데, 지난 20여년 동안의 연구에서 전기집진기의 판 간격 증가에 대하여 분진이동속도는 일정하지가 않고 오히려 증가된다는 광폭전기집진기(WPEP, Wide Pitch Electrostatic Precipitator) 개념을 발견하였다. 이러한 400mm 또는 그 이상의 판 간격을 가지는 광폭전기집진기는 실질적으로 다수 적용되

고 있다. WPEP는 전극의 개수를 작게 하지만 고전압이 인가되므로 전압공급장치의 용량을 크게 하는 면이 있으나, 특히 대용량의 전기집진기에서는 전반적인 비용의 절감을 가져올 뿐만 아니라, 유지가 간단하고 쉬우며 전극의 배치에서도 덜 민감하게 작용되는 여러 가지 장점을 가진다.

전기집진기에서 또 하나의 중요한 문제 가운데 하나는 고 전기저항 분진 문제인데, 고 전기저항 분진은 과도 스파크 또는 역전리(Back Corona)를 유발시켜 집진 효율을 심각하게 저하시키는데, 고 전기저항 분진의 이러한 문제를 해결하고 집진 효율을 향상시키기 위한 방안으로 마이크로 펄스 하전 방식(MPC TR, Micro-pulse Concept Transformer & Rectifier)과 집진판을 이동시켜 브러시에 의하여 분진을 탈진시키는 이동전극형 전기집진기(MEEP, Moving Electrode Electrostatic Precipitator) 방식 등이 있다.

국내의 전기집진기 적용에서 이상의 WPEP, MEEP 및 펄스하전 등의 기술들은 선진국으로부터 수입에 의존하고 있는 실정인데, 당사에서는 G7 프로젝트의 일환으로 대학 및 연구소와 더불어 전기집진기의 성능 향상을

위한 여러 가지 연구를 수행하고 있다. 현재 개발중인 연구들은 광폭전기집진기술, 새로운 방전극 개발, 이동전극형 전기집진기술, 간헐 및 펄스 하전 장치 개발, 최적 제어 및 조합형 전기집진기술 등으로, 이러한 연구들은 기존에 설치된 전기집진기의 고효율화 개조에도 응용될 수 있는 기술들이다. 광폭전기집진기와 새로운 형상의 방전극에 대하여는 삼천포 화력발전 4호기 보일러에서 실증 시험을 수행하였으며, 이동전극형 전기집진기의 핵심 설계 및 제어인자를 구하기 위한 파일럿 실험을 수행하였다. 아울러 선진국에서도 비교적 최근에 개발된 바 있는 500MW급 전기집진기용 고전압 마이크로펄스 하전 장치의 시제품을 설계, 제작하였으며, 이러한 기술들은 실증 시험에서 충분히 검증되었다. 끝으로, 본 연구에서는 전기집진기의 비용 절감과 고전기저항 분진의 집진 효율 향상을 위하여 광폭과 이동전극형 및 펄스하전의 기술들로 조합되는 조합형 전기집진 기술이 개발되었다.

## 2. 개발 동향

국내에 전기집진장치가 설치된 지 거의 20여년이 흘렀다. 그 동안 국내 환경법규도 날로 높아져 현재 적용 받고 있는 분진배출 규제보다 훨씬 낮은 수치를 요구하고 있으며 이미 기 설치된 설비 역시 수 차례에 걸쳐 성능개선이나 개 보수를 수행하였다. 또한 이제는 대기 입자상 물질뿐 아니라 가스상의 물질까지 심각한 규제를 받고 있으며 SOx, NOx, VOC 등 많은 가스상의 물질 또한 규제치가 강화되고 있는 실정으로 어느 한 분야에만 국한하여 주력할 수 없는 입장이 되었다. 국가 환경 보존 측면에서는 당연히 필요함에도 설비운전의 입장에서는 촉박하게 변경되는 환경 규제치에 무한정 따르는 것도 경제적 입장이나 국내 기술여건으로 보아 매우 어려움에 처해있는 것이 사실이다.

현재 전기집진장치에 대해서는 많은 실험적 시도가 행해지고 일부는 실제 플랜트에 적용하여 좀더 효율적인 전기집진장치에 수많은 연구인력이나 투자가 이루어지고 있지만 실제 적용상의 문제에서는 기술의 상품화, 시장 문제, 단기간의 실기로는 기존의 많은 선진업체들의 견제, 후발업체의 저가 전략으로 정성적인 노력 및 투자한 만큼의 우수한 전기집진 장치의 실현을 구현하기가 더욱 더 힘들게 되어 있다. 뿐만 아니라 전기 집진기의 경험적, 실험적 Know-how가 워낙 다양하기 때문에 고객 역시 선택하기가 쉽지 않고 시장 경쟁 원리로부터 구입 설치 운영되기 때문에 의도한 바대로 효과적인 설비를 구성하는데 많은 장애를 받는 경우도 있다. 또한 전기집진장치의 적용 또한 동일 Output을 내는 플랜트라도 전체 시스템의 구조에 따라 경제성이 크게 좌우되기 때문에 최초 플랜트 엔지니어링 단계에서 결정되어 경제성이 결핍되기 쉬운 특수성이 있어 최초부터 다양한 경험과 최근의 기술수준을 겸비해야 하는 어려움도 있다. 우리 나라의 경우에는 석탄화력의 경우 전세계석탄을 대상으로 운용해야 하는 특수성이 있어 설비의 적용뿐만 아니라 전기집진장치의 운전에도 있어서도 많은 경험과 노력이 필요하다. 따라서 단편적인 지식과 그릇된 판단으로 설비운전이 불가능한 상황까지 초래할 수도 있다.

최근 동향을 보면 전기집진장치에 있어서는 하전 장치의 개선과 Microprocess에 의한 모니터링과 제어, 미립자에 대한 집진 등 재래식 전기집진장치의 보강과 특수한 전극들을 사용한 실험적인 추구 단계에서부터 효율적인 유지보수 방식에 대한 제품 개발 경향을 띠고, 전원장치의 기술 진보로 플라즈마나 Electro-beam공법에 의한 DeSOx, DeNOx, VOC 등의 유해가스 처리와 입자상 물질을 동시 처리하는 다목적 Process로 급속히 진행되고 있는 상황이다. 또한 전기집진장치의 입자상 물질에 대한 연구, 개발은 그 복잡성과 다양한 성격 때문에 꾸준

히 학계에서나 업체에서의 연구는 계속 진행되고 있다.

### 3. 이동전극형 전기집진기(MEEP, Moving Electrode Electrostatic Precipitator)

#### 가. 역전리(Back Corona) 현상

배출가스를 전기적으로 처리한다는 원리에 따라 그 성능 특성은 포집하는 분진의 전기저항률에 크게 좌우된다. 특히 전기저항률이 높은 분진의 경우 “역전리 현상”이라고 하는 이상현상이 발생하고 집진 성능이 저하한다. 전기집진장치에 있어서 포집분진의 전기저항률( $\rho d$ )과 집진 성능 및 하전전압, 전류 특성에는 일반적으로 그림 1에 보이는 관계가 있다.  $10^{11} \Omega\text{cm} < \rho d < 10^{12} \Omega\text{cm}$ 의 영역에서는 불꽃이 빈번하게 발생하고 방전 전류의 감소에 따라 집진 성능이 저하한다. 이 영역은 집진극표면이 고저항분진으로 피복이 된 상태에서 발생한다. 또한  $\rho d \geq 10^{12} \Omega\text{cm}$ 의 영역에서는 역전리 현상이 발생하고 전류는 급격히 증가하는 동시에 전압이 저하하고 집진 성능이 대

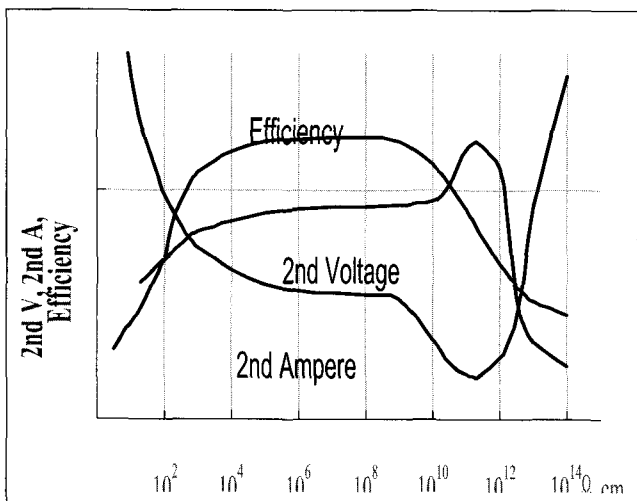
폭으로 저하한다. 역전리는 집진극 표면에 부착된 분진의 전기 저항이 극도로 높은 경우에 분진 층에 흐르는 전류에 의해 분진층내에 전위강하가 크게 발생하고 분진층 내에 절연과피를 일으키는 현상을 말한다.

전기집진장치에서 고저항 분진을 높은 효율로 포집하기 위해서는 역전리에 의한 장애를 방지할 필요가 있다. 석탄을 이용하는 보일러용 전기집진장치를 일례로 들면 그 분진의 전기저항률이 애쉬 성상 및 배출가스온도에 크게 좌우되고 특히 저온영역(가스온도  $130^{\circ}\text{C} \sim 160^{\circ}\text{C}$ )에 있어서는 포집분진의 전기저항률은 높아지게 된다. 석탄 연소 보일러용 전기집진장치에 있어서 최대의 과제는 역전리 현상의 극복, 다시 말하면 고저항분진에 대한 집진 성능의 유지, 향상에 있다고 말해도 좋다. 그러나, 더욱더 고저항 분진이 미세화하면 분진의 부착력은 급격히 증가하고 추타 등에 의한 기계적인 박리방법으로는 완전한 청정화는 불가능하다는 것이 경험적으로 확인되어 있다.

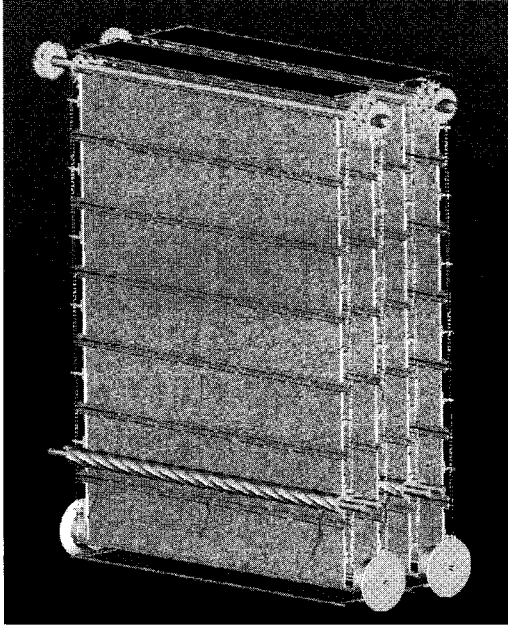
#### 나. MEEP의 구조와 특징

고저항 분진 포집용 전기집진장치에 있어서는, 종래의 고정 전극형 집진장치에서는 고저항장애 또는 역전리 현상이 생기고 안정된 집진이 곤란하게 되므로 집진극에 부착된 분진을 브러시에 의해 쓸어서 떨어뜨리고 항상 집진극 표면을 청정한 상태로 유지하는 것이 가능한 이동전극형 집진장치가 실용화되었다.

그림 2에 이동전극형 전기집진장치의 구조를 보인다. 집진극은 직사각형 형태의 요소로 분할되어 있고 플레이트와 보강재에 의해 구성되어 있다. 이 요소는 접속 기구에 의해 양단의 Link Chain에 연결되어 있고 Link Chain은 상부의 구동 Sprocket이 회전하는 것에 의해 집진극은 구동 Sprocket과 하단 로울러 간을 아주 천천히 ( $0.5\text{m}/\text{min}$  정도) 이동, 회전한다. 또한 하부 로울러는



〈그림 1〉 분진 전기저항률과 EP 집진효율



〈그림 2〉 이동전극형 전기집진장치

Link Chain에 장력을 주고 흔들리지 않고 안정되도록 작용을 한다. 분진포집은 종래의 고정 전극형 집진 장치와 같이 방전극이 있는 집진 영역에서 행해지지만 분진박리는 집진극 요소가 하부 로울러에서 반전해서 집진 영역으로 들어가기전(비집진 영역)에 회전 브러시에 의해 수행된다. 집진극을 양쪽에서 누르는 2쌍의 브러시는 집진극의 이동과 역방향으로 회전한다. 이 작용에 의해 분진 박리효과를 높게 하는 것과 함께 박리 분진이 비산하지 않도록 Hopper를 향해 분진을 쓸어 떨어뜨리도록 구성 되어 있다.

이동전극형 전기집진장치는 종래형 전기집진장치에 비해서 동일 집진성능을 발휘하는데 약 2/3~1/3의 설치 공간의 절감, 에너지 절감을 실현했다. 또한 펄스 하전 방식 전기집진장치에 대해서도 성능 면에서 우위에 있다. 또한, 개발 당초 염려되었던 각 부품의 내구성, 신뢰성에 대해서도 수년간에 걸친 기초실험, Field Test,

실기 운전 실적의 결과로부터 이상이 없는 것으로 확인되어 있다.

이동전극형 전기집진장치는 석탄전소 보일러용 이외에도 유리 용해로용, Sewage Sludge 소각로용, 시멘트로용, CO 보일러용 등 각종의 산업분야에의 적용 예가 있고 개발 이래 그 적용 확대를 꾀하기 위해 성능 향상, 신뢰성 향상, 대형화, 유지보수성 향상을 목적으로 아래에 서술하는 것과 같은 개선이 실시되어 왔다.

① 분진성상의 다양화에의 대응

집진극 및 회전 브러시의 이동 속도를 분진성상에 맞추어 쉽게 변경시킬 수 있는 Inverter 방식을 채용하고 상시 고효율 운전이 가능하다.

② 대형화에의 대응

석탄화력 발전소의 대형화에 맞추어 집진극의 폭과 높이의 면에서 대형화를 이루었다.

③ 열팽창의 영향이 없는 구동방식

집진극 및 회전 브러시의 구동은 개발 당초 베벨 기어를 채택하였으나, 열에 의해 늘어지는 영향이 작은 로울러 체인 방식을 채용했다.

더욱이 전기저항률이 높은 분진에의 대응, 고분진 농도역 또는 적용을 목적으로 한 집진극 및 회전 브러시의 고속화를 실현하기 위해 부품 레벨의 신뢰성, 내구성 개선이 꾀해지고 있다.

#### 4. 마이크로펄스하전 장치(Micro-Pulse Concept Transformer & Rectifier)

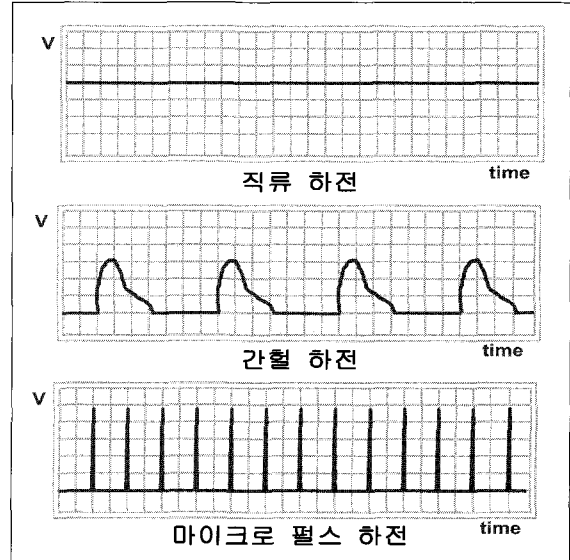
전기집진기용 전원장치는 전기집진기에 직류 전압을 공급하는 직류하전장치와 milli-second( $10^{-3}$ 초) 단위의 넓은 폭 펄스를 간헐적으로 공급하는 간헐하전(Intermittent Energization)장치, micro-second( $10^{-6}$ 초) 단위의 좁은 폭 펄스를 집진기에 공급하는 마이크로펄스

하전(Micro Pulse Energization)장치로 크게 나눌 수 있다.

직류 하전방식은 단상교류 전원으로부터 사이리스터(Thyristor), 고압 변압기, 고압 다이오드 정류기를 거쳐 직류 전압을 얻어 집진기에 공급하며, 공급되는 직류 전압의 크기는 사이리스터의 위상제어를 통하여 조절한다. 직류 하전방식은 전원공급장치의 구조가 간단하고, 가격이 저렴한 반면 포집하고자 하는 분진의 전기저항치가 큰 고저항 분진의 경우, 분진이 집진판에 두껍게 누적되면 역전리 현상이 발생하여 고전압 공급이 불가능하게 되고, 따라서 집진율이 급격히 감소하게 된다.

이러한 현상을 개선하기 위하여 보일러의 배기가스에 조절제(SO<sub>3</sub>, NH<sub>3</sub> 등)를 주입하여 분진의 비저항을 낮추어 집진효율을 증대시키는 방법도 있으나 이 방식은 집진판의 부식 증대 등 전기집진기의 유지·보수비용 증가 및 운전비용 증대를 초래하게 된다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 제안된 방식이 이동전극형 집진기와 펄스전원 장치이다. 이동전극형 집진기는 집진판을 이동시키며 집진판에 쌓인 분진을 브러시를 이용해 털어 내는 방식으로 효과면에서 탁월하나 전기집진기의 설치비가 상대적으로 고가이며, 기 설치된 전기집진기의 개조가 필요하다. 그러나 펄스 전원장치는 전원장치의 교체만으로 고저항 분진에 대해 집진 효율을 향상시킬 수 있는 방법으로 전기집진기의 신설이나 개 보수에 있어 유리한 위치를 점하고 있다. 특히 마이크로 펄스하전 장치는 순간적인 고전압 펄스를 집진기에 공급하여 분진을 쉽게 이온화시키고 역전리 현상을 억제하여 집진효율을 향상함과 동시에 집진된 분진의 이탈을 막기 위하여 최소한의 직류하전을 병행하여 직류전압 위에 펄스를 중첩하는 형태로 운용되므로 소비전력 절감 효과까지 얻을 수 있다. 하지만 마이크로 펄스하전이 석탄화력 발전소에서 우수한 성능을 발휘하는 것은 사실이나 석탄의 종류에



〈그림 3〉 하전 방식 비교

따라 기존하전 장치와 비교하여 개선효과가 미미한 경우도 있으므로 만능 해결책이라고 단언할 수는 없는 것 또한 사실이다(그림 3 참조).

일반적으로 마이크로 펄스 전원공급장치에는 전기집진기에 인가될 고전압의 마이크로 펄스를 생성하기 위하여 LC 공진과 고전압 스위칭기술이 사용된다. 전형적인 예로 수십kV의 전압으로 충전된 공진 커패시터와 공진 인덕터, 고전압 반도체 스위치 소자와 전기집진기가 직렬로 연결된 구조에서 스위치를 턴온하는 순간 공진 커패시터에 충전된 에너지가 집진기로 공급되며 집진기에서 소모되지 않은 에너지는 다시 공진 커패시터로 돌아오면서 한 사이클의 공진 펄스를 생성한다. 초기 공진 커패시터에는 높은 전압이 충전되어 있어야만 스위치를 턴온하여 한 사이클의 LC 공진을 일으켰을 때 원하는 고전압이 전기집진기에 인가될 수 있는데 초기에 공진 커패시터를 충전하는 방법은 고압 변압기와 정류기를 사용하여 직접 충전하는 방법과 당사에서 새로이 개발한 방법인 저전압 인버터로부터 고전압을 얻는 방법이 있다.

## 5. 광폭형 전기집진기(Wide Pitch Electrostatic Precipitator)

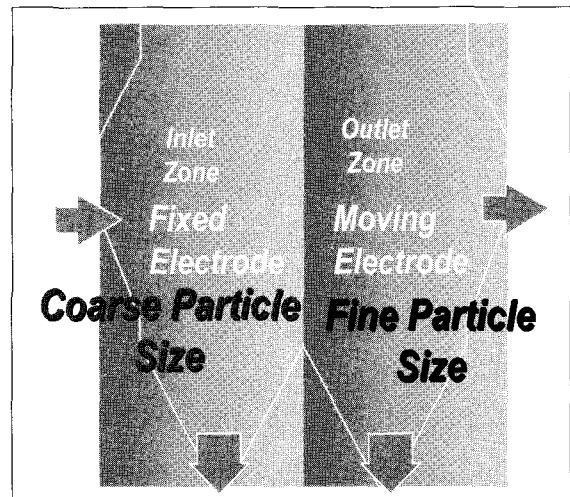
산업용 대형 전기집진기의 경우 당사는 이미 300mm 판 간격 전기집진기의 기본설계에 관한 기술을 개발하여 국내외의 대다수 플랜트에 적용시키고 있으며, 또한 국내 경쟁사 등에서도 선진 외국과의 기술 제휴를 통하여 적용시키고 있으나, 이들 대부분이 설계 능력에서 특정 프로세스에만 제한되어 있고, 프로젝트마다 외국의 제휴회사로부터 기술적 지원을 받아야 가능한 실정이다.

이에 당사는 확실한 기술 차별화를 위하여 전기집진기의 성능과 신뢰성 향상 및 시공과 유지비 절감의 측면에서, 집진/방전부에 대하여 집진판의 폭을 넓히는 광폭형 전기집진기에 관한 연구를 하여, 일반적인 석탄 플라이 애쉬 및 시멘트 플랜트의 분진에 대하여는 450mm급의 광폭형 전기집진기의 핵심 기술을 개발하였다. 실용화 모델에 대한 파일럿 플랜트에서의 종합적인 실험에서, 집진판의 형상은 고정시킨 상태에서 집진판 간의 간격과 방전극의 종류에 따른 효과를 집중적으로 실험하여 최적의 광폭 판 간격과 방전극의 형상을 도출하였다. 파일럿 실험에 사용되는 방전극 요소의 형상은 RT(Rectangular), ST(Saw Tooth) 그리고 TP(Twisted Pin and Pipe)형의 세 종류의 방전극 요소를 사용하였으며, 실용화 제작 및 설치와 연계하여 하나의 프레임에 여러 가지 배열로 조합하여 실험하였다. 개발된 광폭형 전기집진기를 실제의 발전소 배출가스에 연결한 실증 실험을 통하여 효과를 성공적으로 입증하였다. 실기 입증 실험에서는 기존의 300mm 판 간격에 비하여 400, 450, 500mm 집진판 간격의 실험으로 판 간격에 따른 전기집진기의 전기 및 집진 특성을 석탄화력발전소에서 직접 입증 실험하였으며, 이를 통하여 400~450mm의 최적 고효율 판 간격의 광폭형 전기집진기 성능을 입증하였다. 그리고 이때에 사용되

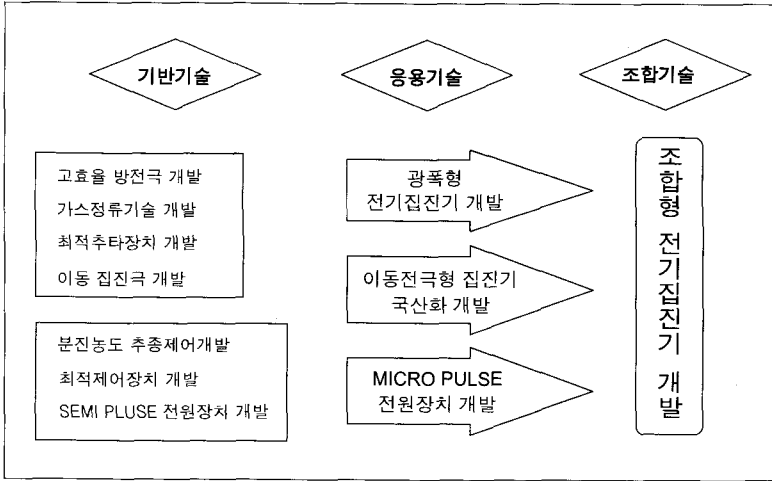
는 방전극에서도 기존의 사각 와이어보다, 고성능의 에지(Edge)형 및 강체 방전극의 우위를 입증하였다. 따라서, 이러한 광폭형 전기집진기와 방전극들은 현재 선진국에서도 개발, 부분적으로만 적용중인 첨단 기술이며, 본 연구를 통하여 이러한 기술을 국산화 확보함으로써 동남아 및 중국 등의 개발도상국들의 플랜트 수주에서 선진국의 유명 전기집진기 메이커들과 경쟁할 수 있는 기반을 확보하였다. 한편으로는 전기집진기의 유동, 추타 및 집진/방전의 핵심 부분에 대한 기초실험과 수치해석 연구를 통하여 기본 설계 기술을 국산화하였다.

## 6. 조합형 전기집진기

이동전극형 전기집진장치가 입자경이 미세한 분진에 대해 보다 유효하다는 것과 입자가 크고 고농도의 분진 분위기에서는 내구성이 저하하는 경향이 있는 것 뿐 아니라 경제성의 면에서 그림 4에 보이는 것과 같이 가스의 상류 측에 광폭 고정전극형(추타방식), 하류 측에 이동전극형(브러시 방식)을 조합하여 배치한 조합형 전기집진장



〈그림 4〉 조합형 EP



〈그림 5〉 차세대 전기집진기 개발

한 수단이라는 것이 판명되어 있고 세계적으로 보급이 되고 있는 신기술이다.

이상으로 가스상류측에 광폭고정전극형을 하류 측에 이동 전극형을 조합하고 MPC TR 방식을 채택한 전기집진장치는 역전리를 방지하고 고저항 분진의 집진 효율을 높이는 전기집진장치로서는 최고의 것이라고 말해도 과언이 아니다 (그림 5). 그러나, 전원장치의 가격이 꽤 높고, 고난이도의 설계기술을 요구하기 때문에 향후 연구에서는 이에 대한 보다 면밀한 검토가 필요하다.

치가 많이 사용되고 있다. 분진의 전기 저항률이 클 경우, 고정전극부는 성능이 대폭으로 저하하지만 이동 전극부의 성능은 거의 저하하지 않고 안정된 성능이 발휘되고 있다.

WPEP형과 MEEP형을 조합하여 배치한 조합형 전기 집진장치에  $10^{13} \Omega \text{cm}$  영역의 고저항 분진의 포집도 가능하지만 고정전극부의 경제성 및 여기에 고저항 분진영역에 안정된 집진 성능의 유지, 향상을 피하기 위해 고정 전극부에 펄스 하전 방식(MPC TR)을 채용하는 개발이 추진되고 있다. 펄스 하전방식은 역전리 대책상 유력

## 7. 맺음말

이상에서 개발된 WPEP 방식에 의한 고 집진 효율화와 설치 및 운전 원가의 대폭적인 절감을 기하고, MEEP 및 MPC TR에 의한 역전리 및 재비산을 원천적으로 차단시키는 국산기술의 차세대 전기집진기 개발을 통하여, 향후 점차 강화되는 대기오염 규제치에 원만하게 대처함과 아울러, 국내 전기집진기 산업의 국제 경쟁력 확보를 주도하고 있다. ■

## 참고 문헌

- (1) 大浦 忠, 三坂 竣明, "Back Corona 對策型 電氣集塵裝置", 日本 靜電氣學會誌, Vol. 14 No. 16, 1990.
- (2) 고효율 집진기술 개발, 환경부, 한국중공업, 1999.
- (3) 松井 義雄, Kjell Porle, "Improvement of ESP's Performance Achieved with Microsecond Pulsing Energization", 火力原子力發電, Vol. 41, No. 2, pp92~101, 1990.
- (4) 火力原子力發電技術協會, "火力發電所環境保全技術, 設備", Vol. 41, No. 6, pp779~794, 1990.
- (5) Oglesy, S. and Nichols, G. B., "Electrostatic Precipitation", Marcel, Dekker, New York, 1978.
- (6) Robinson, M., "Electrostatic Precipitation", Air Pollution Control, Part1, Wiley-Interscience, New York, 1971.