

## 전기력을 이용한 배가스처리의 기술동향

최 금 찬 · 김 신 도\*

동아대학교, \*서울시립대학교

### 1. 서 론

에어러졸입자에 대한 전기적현상의 연구는 그 역사가 깊으며 대기정전기학, 구름물리학, 대기오염등의 분야에서 많은 연구들이 진행되어 왔다. 산업분야에서 오염된 배가스를 정화하기 위한 시도는 1900년대에 이루어졌으며, 전기집진방식(Electrostatic Precipitation)은 전계영역내에서 에어러졸입자를 하전시켜 높은 이동도를 갖게 하여 포집하였다. 전기집진방식은 1910년 코트렐에 의해 개발된 방식으로 미세한 입자의 포집에 유효한 것으로 알려져 있다. 그러나, 실제 운전면에서는 많은 어려움이 뒤따르며 고전기저항분진이나 소각공정 등에 다이옥신문제 등 해결되어 할 과제들이 남아있는 실정이다. 최근에는 전기력을 이용한 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 배가스처리에 전자빔처리기술과 전기집진에서 화학첨가제의 투입, 예바하전, 광하전, 방전플라즈마기술 등의 신기술들이 등장하여 배가스처리효율의 향상을 목표로 하고 있으며 가스 및 입자를 동시처리하는 연구들도 몇몇 보고되고 있다. 국내의 배출기준이 더욱 강화됨에 따라 각종 배가스 정화장치의 처리효율향상은 필연적이나, 국외의 기술이전 기피현상 등이 겹쳐 자체기술개발에 많은 어려움을 가지고 있다. 전기력을 이용한 집진 및 가스처리방식은 실플랜트의 적용에서 각 시설의 배출변동과 배출원의 다양성 등으로 현장적용의 문제점이 있으나, 에너지절감의 효과와 건식의 적용으로 2차오염물질의 감소 등 많은 장점을 가지고 있다. 현재 국내에서도 전기력을 이용한 배가스처리기술이 기업, 대학, 연구소 등에서 활발히 연구중에 있으며 그 성과가 기대된다. 본 기고에서는 전기력을 이용한 배가스처리에 대한 국내외의 연구 및 기술 동향사례를 요약하고 서술하고자 한다.

### 2. 전기집진에서 처리효율향상의 방안들

#### 2. 1 첨가제에 의한 효율향상

배가스조절(flue gas conditioning)은 전기집진기(Electrostatic Precipitators)에서 전기적 상태 또는 fly ash 특성을 변화시키기 위해서 석탄연소화력발전에서 화학물질을 첨가하여 fly ash의 전기저항을 감소시킴과 동시에 전기집진기의 효율을 향상시키는 방법이다. 이 방법은 전기집진의 성능이 저하될 때 또는 작동이 설계효율보다 낮을 때 이용하며, 기존 설치된 시설에서 고전기저항 fly ash가 발생할 경우에 전기집진의 성능을 개선시키는데 효과적이며 적은 비용으로 이를 달성할 수 있다. SO<sub>2</sub>규제강화와 저유황연료로의 전환 등 몇 가지 문제로 인하여 발생하는 고저항의 fly ash때문에 간혹 역코로나(back corona)라고 하는 성능저하의 문제가 기존의 전기집진시설에서 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위한 대표적인 방법이 펄스하전방식과 배가스조절방법이며, 펄스하전방식은 평균전류밀도가 일정하여 어느 정도 역전리현상을 방지할 수는 있으나 전계가 약해서 하전이 약해지는 단점을 가지고 있다(Altman, et al., 1982).

따라서, 배가스조절방법은 손쉽고 경제적으로 전기집진의 성능저하를 막을 수 있으며, 배연탈황시설과 비교할 때 저유황석탄의 사용과 배가스조절방법의 조합을 통해 더욱 경제적으로 운용될 수 있음을 보고하고 있다(Arnott and Kocac, 1992).

화학적 첨가제는 다음의 메카니즘에 의해서 전기집진의 입자포집효율에 영향을 미친다.

1. fly ash 표면에 흡착해서 표면전기저항을 감소시킨다.
2. fly ash에 흡착해서 fly ash의 응집, 부착 특성을 변화시킨다.
3. 미세입자의 농도를 증가시켜 공간전하(space charge)를 증가시킨다.
4. 배가스의 breakdown strength를 증가시킨다.
5. 에어러졸입자의 평균입경을 증가시킨다.

6. 배가스내에서 산로짐을 변화시킨다.

이들 화학적 첨가제의 종류와 각각의 메카니즘을 아래의 표 1에 나타내었다(Ronald G. Patterson, et al., 1985).

표 1. 첨가제의 종류와 각각의 메카니즘

Conditioning Agent	Conditioning Mechanisms
SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	저항수정
NH <sub>3</sub>	응집, 부착성 개선 Space charge 증가
Ammonium compound (SO <sub>2</sub> OH)NH <sub>3</sub> , (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , NH <sub>4</sub> HSO <sub>4</sub> , (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> CO (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	Space charge 증가 저항수정
Organic Amines (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> N-Triethylamine (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N-Trimethylamine (C <sub>6</sub> H <sub>11</sub> )NH <sub>2</sub> -Cyclohexylamine	저항수정
Alkali compounds Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	저항수정

이들 첨가제중 대표적인 것들의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

① SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

미국 등에서 가장 많이 사용된 첨가제이며 fly ash 표면에 흡착하거나 응축하면 전도층을 형성해서 fly ash의 전기저항을 감소시킨다. 그러나 SO<sub>3</sub>첨가는 cold-side ESPs에 한정되어 있으며 정상적인 SO<sub>3</sub>주입량은 5~30ppmv이나, 만약 많은 양의 알칼리화합물이 fly ash내에 함유되어 있으면 더 많은 양의 SO<sub>3</sub>의 첨가가 요구된다고 보고하고 있다(Dismukes, 1975). 일반적으로 20ppmv의 첨가로서 전기저항을 약 10<sup>2</sup> Ω·cm 정도를 감소시킨다.

② 암모니아(NH<sub>3</sub>)

호주 등에서 많이 사용된 첨가제이며, 일반적으로 암모니아의 주입량은 약 15~20ppmv이다. 주입된 암모니아 증기는 배가스내의 황산증기와 반응해서 ammonium sulfate-(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ammonium bisulfate-NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> fume의 미세입자를 형성시킨다. 이렇게 형성된 fume은 전자에 더 큰 표면적을 제공해주며, 전자보다 적은 이동성을 가지고 있기 때문에 더 안전한 코로나를 발생시킬 수 있게 하고, breakdown 없이 더 높은 전계강도를 적용할 수 있다. Baxter(1968), Mclean(1976), Bickelhaupt et al.(1978), Brown et al.(1978) 등은 암모니아의 첨가 실험에서 입자의 전기저

항이 감소됨을 보고하였다.

③ 암모늄화합물(Ammonium Compounds)

암모늄화합물은 주입되면 SO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>로 분해되어서 SO<sub>3</sub>의 영향과 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>영향의 조합적인 영향을 나타내지만 fly ash의 전기저항을 낮추는 면에서는 SO<sub>3</sub>만큼 효과적이진 못하다. ammonium sulfate는 고온에서 NH<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O로 분해되며, 160°C로 온도가 내려가면 암모니아와 마찬가지로 ammonium sulfate(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, ammonium bisulfate-NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> fume의 미세입자를 형성시켜, 이온 이동도를 감소시키고 전기집진 상태를 개선시킨다. 또, 포집된 fly ash표면에 전도층을 형성해서 fly ash의 전기전도성을 낮추고, 입자들 사이에 증가된 응집성은 탈진할 때 재비산되는 양을 줄인다(Dismukes, 1975). Dalmon and Tidy(1972), Brown et al.(1978)와 미국의 SRI(Southern Research Institute)의 많은 연구자들도 이들 화합물이 전기저항을 낮추고 동시에 입자들간의 응집성을 증가시킨다고 보고하였다(Dismukes, 1975).

④ 유기아민류(Organic Amines)

모든 amine중에서 Triethylamine을 20~140ppmv 정도 주입했을 때 전기저항을 가장 많이 감소시킨 것으로 각광을 받아 왔으나(Brown et al., 1978, Bickelhaupt, 1978) 열분해에 의해서 Nitrosoamine(발암물질)을 발생시키며, 경제성도 없기 때문에 이 첨가제는 pilot-plant ESPs에 많이 사용되어 왔으나 산업체의 적용은 없었다. 저온 ESPs의 상세한 테스트가 필요하다(Dismukes, 1975). Potter and Paulson(1974), Collin(1978), Bickelhaupt(1978) 등이 이들 화합물에 대해 많은 연구들을 진행하여 왔다. EPRI(Electric Power Research Institute)는 이들 화합물의 위험성을 지적하고 있다.

⑤ 알칼리화합물(Alkali Compounds)

SO<sub>3</sub>농도가 낮거나 온도가 200°C보다 높을 때 fly ash전기저항은 fly ash내의 Alkali metal 함량과 관련되어 있다. 가장 큰 영향인자는 fly ash와 sodium salts의 혼합문제이며, 주입량은 Na<sub>2</sub>O로서 2~5%범위이다. fly ash내에 sodium, lithium, potassium 등이 있으면 체적전도를 증가시킨다(Bickelhaupt, 1974). 주로 분진입자의 전체체적을 통하여 sodium ion의 이동에 의해서 전도한다(Electric Power Research Institute, The manual of Flue gas conditioning, 1985). 만약 sodium화합물이 석탄과 같이 보일러에 주입되면 sodium은 fly ash에 붙어서 조절제의 휘산과 완전한 분해를 일으키며 결과적으로 fly ash의 표면에

균일하게 도포되어 전기저항에 영향을 준다(Gooch et al., 1982). sodium 함량이 fly ash중에 0.2%에서 2%로 증가될 때  $10^2$  정도로 전기저항의 감소가 나타나며, Alkali metal salts중에서 sodium salts이 조작하기가 쉽고 비교적 적은 비용 때문에 가장 흔히 사용되는 첨가제이다. 염화나트륨도 실험실규모로 사용하여 효과적인 결과를 얻었으나, 금속부식 등으로 사용되지 못하고 있다.

#### ⑥ 기타화합물(Miscellaneous Compounds)

철 화합물과 바나듐 화합물 같은 몇몇 금속화합물은 배가스 내에서  $SO_2$ 를  $SO_3$ 로 산화시켜 배가스 내의  $SO_3$  농도를 증가시키며 조질제로서 가능성이 있는 것으로 조사되었다(Kanowski and Coughlin, 1977). 첨가제의 사용은 전기집진기의 선구자였던 F.G.Cottrell이 1918년에 집진기의 성능에  $SO_3$ 의 영향을 인정한 후로 1925년에 Rathbun은 copper smelter에서 집진기로 유입되는 배가스에 sulfuric acid를 첨가제로 사용하였으며, 그 후 특허를 얻은 이후로 계속 50년 동안 사용되어 왔다(Rathbun, R.B. 1922). 1937~1950년에 White는 fly ash를 함유하는 배가스에  $SO_3$ 의 영향을 나타내었고(White, 1963), 1963년에 Darby and Busby가 이 첨가제의 영향을 석탄연소발전소에 성공적으로 적용시켰다. 1975년에는 처음으로 배가스조질방법이 저유황석탄에서 발생하는 고전기저항 fly ash의 문제에 대처하는 유일한 방법으로 선택되기 시작하였다(Sparks, 1976). 그 이후로 영국 등에서 ammonium sulfate- $(NH_4)_2SO_4$ 를 사용하였고, ammonia화합물도 역시 fly ash집진기를 위한 미량 첨가제로서 사용되었다.

Fly ash의 전기저항으로 인한 전기집진성능저하의 원인이 sodium의 결핍이라는 사실이 밝혀진 후, 80년대에 접어들면서 hot-side ESP에서 sodium conditioning이 연구되었다(Bickelhaupt, 1984). Flue gas conditioning기술을 더욱 발전시키기 위해서 미국의 EPRI는 온도제어예비하전방식(TCP: Temperature Controlled Precharging)과 새로운 passive conditioning system-reagentless flue gas conditioner를 개발중에 있다. 이 시스템은 flue gas의 1~3%는 보일러 뒤로 뽑아내어(이때의 온도는  $400 \sim 500^\circ C$ ) 이 가스를 촉매변환기로 통과시키면  $SO_2$ 의 80% 이상이  $SO_3$ 로 되며 이것을 전기집진기의 입구에 주입하여 전기저항을 낮추고 효율을 향상시키는 방법이다(Altman, 1991). EPRI는 1990년대에 입자상물질의 처리에 혁신적인 방법에 대한 수요가 확대될 것으로 예측하고 있으

며 ESP의 디지털전압제어, 배가스조질방법(flue gas conditioning), 간헐하전, TCP(온도제어예비하전), 광폭집진극(wide plate spacing) 등의 항목이 이에 속한다.

## 2. 2 펄스하전기술(Pulse Energization)

아황산가스에 의한 대기오염을 줄이기 위한 대책으로 저유황연료가 확대보급되고 있으며, 저유황미분탄을 사용하는 발전소에서 발생하는 고전기저항 입자( $10^{10} \sim 10^{13} \Omega \cdot cm$ )는 전기집진에서 역코로나(back corona) 또는 역전리(back discharge)라 불리는 현상을 초래하여 집진효율의 저하를 가져왔다. 따라서 전기집진의 운용에 있어서 역전리 현상의 극복을 위한 방법으로서 여러 가지 방안이 시도되어 왔다. 그 중 대표적인 방법으로 펄스하전(Pulse energization)과 배가스조질(flue gas conditioning) 등의 방법이 있다.

전기집진에서 펄스하전의 적용은 1947~1952년에 Research Laboratory of the Research Corporation Precipitator Division(Research-Cottrell, Inc.)에서 White와 Hall(1952)에 의해 연구개발되기 시작하였다. 그 이후 미국, 유럽, 일본 등에서 고전기저항 fly ash입자를 처리하는 전기집진에서 펄스하전을 적용한 결과, 뚜렷한 장점을 인식한 많은 연구자들에 의해 더욱 효과적으로 발전되어 왔다.

최근에는 펄스하전의 방법이 고전기저항 입자의 처리뿐만 아니라 산업장에서 배출되는  $SO_x$ ,  $NO_x$ , 그 외의 가스상 물질의 처리에 있어서도 그 범위가 확대되고 있으며, 가스를 입자화하여 전기집진으로 입자/가스를 동시처리하는 기술 또한 실용화에 이르고 있다(Mizuno, 1986; Masuda, 1990; Helfritsch, 1993).

역코로나 또는 역전리 현상은 많은 연구자에 의해 보고되어 왔으나 가장 신뢰성 있는 연구는 White(1963)에 의한 연구의 결과에서 나타난다. 역전리 현상이란  $2 \times 10^{10} \Omega \cdot cm$  이상의 고전기저항 dust에 의하여 집진극의 dust층 공간에서 일어나는 비정상적인 방전으로서 dust의 고전기저항 때문에 코로나 전류가 dust층과 dust층 표면과 집진극사이의 높은 전계강도 영역을 통과하지 못함으로서 일어난다. 역전리의 개시조건은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$i_d \times \rho_d \geq E$$

$i_d$ : dust층내의 전류밀도

$\rho_d$ : dust층의 전기저항성

### E: dust층의 절연과괴 강도

포집된 dust층에서 이러한 조건이 만족되는 점에서 역전리가 발생하면, 생성된 (+)이온이 방전극 쪽으로 이동하면서 (-)이온과 하전된 입자를 중화시키게 되며 집진효율이 저하되는 것이다. D.C. 전압의 운전에서는 이러한 역전리현상을 피하는 수단으로 이온전류를 억제하기 위해 인가전압을 낮추게 되는데, 이로 인하여 하전 성능이 크게 감소하게 되는 문제점이 있다. 이를 위한 해결점으로 펄스전압이 이용될 수 있으며, 직류전압에 비해 훨씬 더 높은 피크전압을 인가할 수 있으므로 이온의 분포가 균일해진다는 장점이 있다. 또한 특징적으로 D.C. 전압에서와 같이 하전시 이온의 구동에 에너지를 소모하지 않고 전자에만 전달하기 때문에 에너지를 절약할 수 있다. 이러한 펄스는 dc-bias에 중첩시키거나 또는 펄스만을 전기집진기에 인가하는 방식으로 사용된다. 전기집진에서 펄스하전이 적용되어 온 역사는 다음의 주요 세 단계로 나눌 수가 있다. ①초기 연구/개발의 시작(1947~1970) ②중간 개발과 실 플랜트에의 적용(1970~1980) ③상업적 단계(1980~현재)(Hall, 1990)

펄스하전기술의 초기 연구는 White와 Hall에 의해 기온 22~25°C, 대기압 조건하에서 wire-cylinder형, parallel-plate형 전극에 대하여 각각 연구되었다(1947). 그 이후 1967년 Hall은 고전기저항 입자에 있어서의 펄스하전의 영향에 대하여 pulse widths: 100~400 $\mu$ s, repetition rates: 37~400 per second의 조건하에서 실험하여 입자 전기저항이  $10^{12} \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 일 때 집진효율이 향상됨을 발표하였다(Hall, 1990). 그 이후 1970~80년대에는 일본의 Masuda(1976), Mizuno(1981) 등에 의해 Box-Charger 등이 개발되면서 더욱 더 발전을 보여 왔다. Dinelli(1991) 등의 연구자들이 실제 발전소의 배가스에 종래의 D.C. 하전 방식과 펄스하전 방식을 적용하여 비교실험을 한 결과, 에너지 소모는 0.5Wh/Nm<sup>3</sup>에서 0.1Wh/Nm<sup>3</sup>으로 약 80% 정도 절감할 수 있었으며, 5 $\mu$ m이하의 미세입자에 대한 통과율을 D.C. 하전에 비해 40% 이하로 제어할 수 있었다. 또한 140,000m<sup>3</sup>/h규모의 제강공장 sinter공정에서 배출되는 dust를 제거하는데 D.C. 전압을 인가하였을 때와 비교하여 더스트의 평균배출농도가 400mg/Nm<sup>3</sup>정도일 때 펄스하전으로 대체하여 90mg/Nm<sup>3</sup>로 성공적으로 배출농도를 감소시켰다(Lausen, 1990).

이상의 연구실험 보고들에서 나타난 펄스하전의 장점을 요약하면 아래와 같다. 즉,

- ① 펄스하전은 규칙적이며 강한 확산방전이다.
- ② 펄스하전은 집진면적 전체를 이용할 수 있는 보다 규칙적인 코로나 전류분포를 나타낸다.
- ③ 펄스하전은 짧은 시간에 빠르게 상승하는 전압펄스와 함께, 코로나 전류는 일반적인 D.C. 하전에 비해 스파크에 의해 제한되지 않으며, 상당히 높은 최고값으로 유지될 수 있다. 또, 입자하전의 제어도 피크전압의 펄스폭과 반복주파수에 의해 조정될 수 있다. 따라서 역코로나발생을 억제할 수 있다.
- ④ 입자의 하전과 집진을 향상시킨다.
- ⑤ 펄스로 상당한 양의 전력소비를 줄일 수 있다(예, 50% 또는 그 이상).

펄스하전과 첨가제의 성능을 비교한 연구보고에 의하면  $6 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 고전기저항 dust에 있어 펄스하전의 효과는 D.C. 하전에 비해 1.6배 상승하였으며, SO<sub>2</sub> 첨가에 의한 상승효과는 3배 정도로 flue gas conditioning이 보다 효율적임이 나타났다. 그러나, 이와 같은 결과에도 불구하고 펄스하전의 장점을 강조한다면 펄스하전은 화학적인 공정의 부가없이 단지 전기적인 요소만으로도 효율의 향상을 얻을 수 있다는 점이며, 화학적 첨가제로 인한 다른 2차적인 오염을 줄일 수 있는 것이다. 그리고, 운전비와 유지비가 낮아 펄스하전은 장래에 유용한 집진기술로 발전할 것이 분명하다.

### 3. 정전형여과집진(ESFF; Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration)

여과에 있어서 중력에서 확산, 확산에서 중력, 관성에서 중력으로 이동하는 과도영역에 있어서 에어러졸입자의 포집효율은 최소가 된다. 따라서, 높은 포집효율을 얻기 위해서는 상기 세가지중 어느 하나의 메카니즘이 지배적으로 작용하는 조건하에서 집진장치를 운전할 필요가 있다. 그러나 관성영역에서는 여과속도가 크고 압력손실이 증대하며, 확산 또는 중력 지배 영역에서는 여과속도가 작게 되므로 처리가스량이 작아지는 문제점이 있다. 정전기력은 이와 같은 기계적인 여과의 결점을 극복하기 위해 이용되며 입자나 섬유간에 작용하는 정전기력을 적극적으로 이용하여 여과에서 달성하기 어려운 낮은 압력손실과 높은 포집효율을 목적으로 한다(高橋, 1984).

에어러졸입자에 대한 정전기력 하전은 두 가지의 사실에 근거하며, 그 중 첫째가 모든 에어러졸입자는 자연적이든 인공적이든 하전될 수 있으며, 둘째는 전계영역내에서 약하게 하전된 입자라 할지라도 그 입자에 작용하

는 힘은 중력의 수배에 달한다는 것이다. 따라서 많은 연구자들이 정전기력을 여과집진에 응용하여 효율향상을 위한 연구들을 수행하였으며, Iinoya(1980) 등은 입자를 예비하전을 함으로써 포집효율의 증가를 확인하였으며, 여재상 분진층의 표면구조가 변하지 않는 한 압력손실이 항상 감소하는 것이 아님을 보고하였다. 한편 Frederick(1980) 등은 입자를 하전시키거나 여포주변에 전계를 인가함으로써 여재표면에 덴드라이트 구조(dendrite structure)로 인한 압력손실의 감소와 여재의 가교형성을 촉진시켜 입자의 통과량을 감소시킨다고 보고하였다. 그림 1은 단일 섬유상에 입자가 포집되는 형태를 나타낸 것으로 직접차단에 의한 입자의 포집과 정전기력이 부가되었을 때 입자의 포집형태를 비교한 것이다.

Felt여포를 사용한 여과집진에서의 문제점은 입자가 여재의 공극을 통과하거나 여재의 틈에 붙어 탈진시 여재가 cage쪽으로 수축할 때 깨끗한 반대방향으로 빠져나오거나 미세입자는 scrim지역을 통과해 여포에 영구히 머물면서 탈진되지도 않고 여재의 눈막힘현상을 초래하여 높은 압력손실을 일으킨다. 따라서 고전압을 이용하여 방전선과 여포 사이에 강한 전계를 형성시키면 이는 하부로부터 들어오는 배가스중에서 여재의 선단에서 입자만을 선택 포집하게 되고 이는 여재선단 먼지층 표면에 바늘상의 형태로 인해 여재내로 미세입자의 침투에 기인하는 눈막힘을 감소시키고 동시에 집진효율을 향상시킨다. 또한 여재의 상단에는 분진이 거의 쌓이지 않아 그 결과 하부로부터 들어오는 가스는 상부로 빠져나가게 되는 형태가 되기 때문에 압력손실은 훨씬 줄어들게 된다. 그림 2에서와 같이 입자를 예비하전 했을 때 깨끗한

여포는 하전된 입자의 정전기력에 의해 분극화되고 하전된 입자와 분극화된 여재 사이에 작용하는 쿨롱력에 의해 유도되어 필터표면에 포집된다. 집진된 입자는 같은 극성의 전하에 의한 쿨롱력으로 서로 반발하지만 입자에 적절한 질량과 기류의 관성력에 비해 쿨롱력이 훨씬 작으므로 입자는 여재상에 바늘상의 형태로 표면에 부착된다. 따라서, 필터의 표면은 불규칙하고 느슨하며 여과표면적이 상대적으로 커지게 되어 압력손실이 줄어들게 된다.

그리고 VanOsdell(1981) 등은 정전기가 부가된 여과집진장치(ESFF: Electrically Stimulated Fabric Filter)와 종래의 여과집진장치를 직접 비교하여 정전형 여과집진의 장점으로 여과 주기동안에 있어 압력손실 증가율의 감소와 낮은 잔류 압력손실, 높은 여과속도에서의 지속적인 운전이 가능하고 포집효율의 향상이 있음을 확인하였다. 그리고 종래의 pulse-jet 하드웨어를 약간만 개조하면 적은 전력의 소비로도 여과속도를 크게 할 수 있어 연간 30% 정도의 운전비용의 절감을 가져왔음을 보고하고 있다. 그러나, 이들 장치는 탈진 성능의 저하, 설치의 어려움, 고온 배가스 환경하에서의 재료의 문제점, 절연 cage가 필요하다는 문제점과 고전압의 전기사용으로 인한 위험성을 포함한 기술적인 문제점 등이 아직 완전히 해결되지 않고 있어 소용량 집진장치에는 실용화되어 있으나 대용량 집진장치에는 아직 실험 단계에 있다.

이와 같은 문제점에도 불구하고 압력손실의 감소로 인한 여과속도의 증가는 대용량의 배가스의 처리가 가능하여 경제적으로 유리하게 작용할 수 있을 것으로 보인다. 정전형여과형태의 종류는 입자와 섬유사이에 작용하는

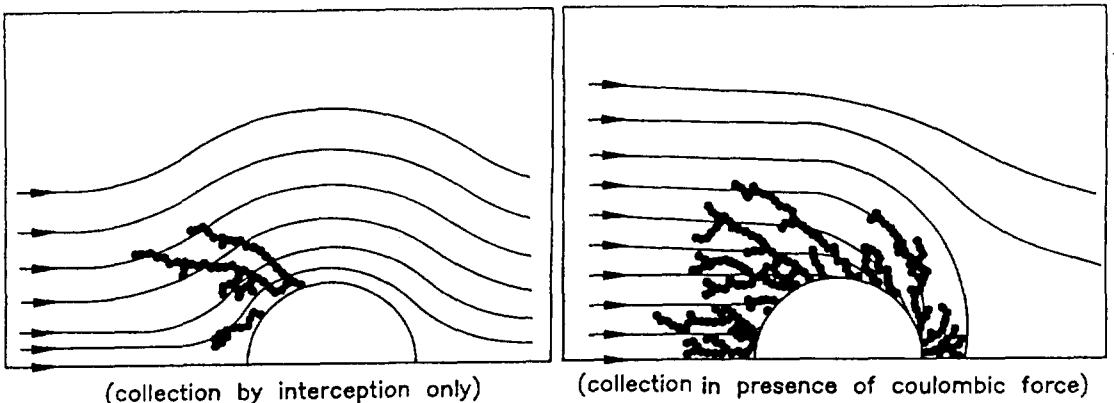


그림 1. 단일 여재상 입자의 포집형태

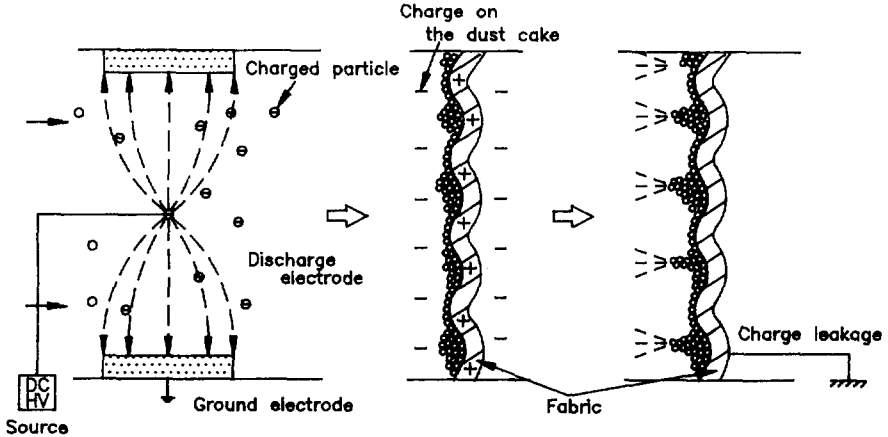


그림 2. 정전여과집진방식의 집진메카니즘

표 2. 입자와 필터섬유사이에 작용하는 정전기력

荷電條件		靜電氣力의 名稱	靜電氣力의 式	無次元 파라메타
外部電界 不在時	粒子, 纖維 荷電	쿨롱力 Coulomb force	$F_r = \frac{-qQ}{\pi\epsilon_0 d_f r}$ $F_\theta = 0$	$K_C = \frac{C_c q Q}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f u_0}$
	粒子 荷電	影像力 image force	$F_r = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 d_f^2 r (r-1)^2}$ $F_\theta = 0$	$K_M = \left(\frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1}\right) \frac{C_c q^2}{12\pi^2 \epsilon_0 \mu d_p d_f^2 u_0}$
外部電界 存在時	纖維 荷電	誘起力 induced force	$F_r = \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \frac{Q^2 d_p^3}{\pi\epsilon_0 d_f^3 r^2}$ $F_\theta = 0$	$K_I = \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \frac{C_c Q^2 d_p^2}{3\pi^2 \epsilon_0 \mu d_f^3 u_0}$
	粒子無 荷電	誘電分極力 gradient force	$F_x = \frac{\pi\epsilon_0 d_p^3}{4} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \nabla  E ^2$	$K_G = \frac{2}{3} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 2}\right) \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p + 1}\right) \frac{C_c \epsilon_0 d_p^2 \bar{E}^2}{\mu d_f u_0}$
	粒子 荷電	쿨롱力 Coulomb force	$F = qE$	$K_{EC} = \frac{C_c q \bar{E}}{3\mu d_f u_0}$

힘에 의해 분류되며, 필터에 인가된 외부전계의 유무에 의해 또는 입자 및 섬유사의 대전 유무에 의해 표 2에서와 같이 5종류의 정전기력으로 분류된다.

이 도표에서의  $\bar{E}$ 는 섬유층내의 평균전계강도이며, 섬유가 존재하지 않을 경우의 전장  $E_0$  사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\bar{E} = E_0 - \left(1 - \frac{\epsilon_f - 1}{\epsilon_f + 1} a\right)^{-1}$$

$\epsilon_0$ : 진공유전율( $8.85419 \times 10^{-12}$  F/m)

$\epsilon_p, \epsilon_f$ : 입자, 섬유 비유전율

$q$ : 입자가 가진 전하(C)

$Q$ : 섬유가 가진 전하(C/m)

그리고 정전기력에 의해 입자의 포집효율을 높이는 것 이상으로 압력손실을 감소시키는 목표를 가지고 정전형 백필터가 연구 개발되고 있으며, 정전형백필터의 종류로서는 크게 예비하전식, 유전식, 일만식으로 나눌 수 있다.

예비하전식은 필터의 전단에서 입자에 고전압을 가함으로써 입자를 하전시키는 방식으로 Ohtsuka(1986) 등은 동심 원통형 전극에 의한 예비하전을 통해 압력손실을 1/2~1/3 이하로 낮추었고, 예비하전장치 내에서

도 집진이 일어났음을 보고하였다. 또한 입자의 평균입경이  $8\mu\text{m}$ 인 입자가 예비하전장치를 통과하면서  $7\mu\text{m}$  이하로 감소하였으며 예비하전장치내에서의 집진효율은 전체의 10% 정도로 보고하고 있다.

유전식은 지지체에 고전압에 가함으로써 필터의 표면에 전계를 형성시키는 방식으로 이는 reverse air, pulse-jet의 탈진방식이 모두 가능하며, 전기력선은 여포면에 평행으로 형성되고, VanOsdell(1981) 등에 의하면 이 방식은 종래의 방식보다 여과속도를 1.5배로 상승하여 운전이 가능하며 연간 운전비용도 30%를 절감할 수 있음을 보고하고 있다.

Mosley(1985) 등은 원통상 여포 중심에 방전선을 설치하고 여과포로는 스테인레스섬유를 혼합한 glass백을 사용한 일반식을 개발하였으며, 석탄보일러의 배가스에 대해서 실험한 결과 압력손실이 개선되는 양호한 결과를 얻었다. 일반식은 고성능 정전집진장치(AESFF: Advanced Electrically Stimulated Fabric Filter)라고도 하는데 Viner(1988) 등에 의하면 여재의 표면과 방전극 사이에 형성된 전계는 더스트의 포집형태(dust deposition pattern)를 변화시켜 기존 여과집진방식에 비해 70%정도의 낮은 압력손실에서 운전할 수 있으며, 여포의 수명에 대한 경제성 평가에 있어서도 기존 장치에 비해 10~30%의 비용을 절감할 수 있다고 보고하고 있다. 이 경우, 전계강도의 범위는 1.8~3.5 KV/cm이었으며, 평균 전계강도는 약 2.7KV/cm로 보고하고 있다. 한편, 박영옥에 의하면 백 원·통의 외부에 방전선을 설치한 조금 다른 형태의 AESFF를 보고하고 있으며, 이 결과에서도 30%전후의 압력손실의 감소를 나타내었으며, 기존장치에 비해 필터백의 수를 줄일 수 있는 이점이 있다.

## 4. 방전플라즈마처리기술

### 4.1 플라즈마 공정

플라즈마란 기체가 이온화되어 양이온과 전자 또는 음이온이 거의 같은 수로 존재해 전체적으로 전기적 중성을 나타내는 상태를 지칭한다. 1879년에 W. Crookes에 의해 물질의 제4상태(A World where matter may exist in a 4th state)라는 표현이 사용되었는데, 그 후 1929년에 I. Langmuir에 의해 처음으로 학술용어로서 도입된 후 응용과학 등 많은 분야에서 "Plasma"라는 용어가 사용되어 왔다. 플라즈마가 환경분야에서 적용된 것은 주로 입자상 물질의 처리에 널리 이용되는 전기집진기와 정수장에서 살균용 오존생성을 위한

오존노이즈가 주된 것이었다. 1980년대 중반이후 플라즈마를 이용한 가스상 오염물질의 처리에 관한 연구가 세계각국에서 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 최근 몇 년 사이에 이들 분야에 대한 연구가 대학들과 연구소를 중심으로 활발히 진행되고 있는 실정이다.

플라즈마를 이용한 유해가스 처리공정은 크게 다음의 두 가지 면으로 나누어 접근할 수 있다. 첫째는 플라즈마를 발생시키기 위한 물리적 요인으로서, 여기에는 Unit of Dimension, 인가전압, 극성, 주파수, 세라믹의 유전상수, 반응기의 전압-전류 특성 등의 여러 인자가 있다. 둘째로 생성된 플라즈마에 의한 화학적 반응이다. 여기에는 가스조성과 처리대상 가스의 종류에 따라 나타나는 수많은 화학반응이 포함된다. 실제의 산업분야에서 적용을 고려할 때 이들 반응기의 최적화설계를 위해 물리적 인자들에 대한 값들이 결정되어야 하며, 이를 뒷받침하기 위한 이론적 기초를 제공하기 위한 화학적 반응메카니즘에 대한 깊은 연구도 필요한 실정이다.

### 4.2 환경분야에 사용되는 플라즈마 프로세스

가스처리에 사용되는 플라즈마 공정은 모두 내용적으로 강력한 전자를 생성시키고, 이들 전자들이 기체 분자종을 해리, 여기, 이온화시켜 반응성이 큰 활성 자유라디칼을 생성시키고, 이들 라디칼과의 반응에 의해 가스상 오염물질을 제거하는 동일한 메카니즘을 가진다. 플라즈마 공정에서 생성되는 주된 라디칼에는 N, O, OH, O<sup>•</sup> 등이 있으며, 이들 라디칼중 OH, O 등의 산화성 라디칼들이 플라즈마방전에 중요한 역할을 한다. 이들 라디칼은 가스 중에 존재하는 O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O가 근원이 되기 때문에 이들 기체는 배가스 조성중 중요한 위치를 차지한다.

아래에 기술하는 각 공정들은 단지 이들 강력한 전자들을 생성시키는 방법상에 약간의 차이가 있을 뿐 나머지 공정은 거의 유사하다. 플라즈마를 이용한 가스처리는 건식공정이기 때문에 2차 오염물의 발생이 없고, 처리대상 가스를 무해한 산물로 전환시키는 등의 장점을 가지고 있다.

플라즈마 공정에 의한 대표적인 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> 제거 메카니즘은 다음의 표 3에서 나타낸 것과 같이 크게 4단계로 구분할 수 있다.

VOCs 등의 유기성가스는 소각에서 열에너지로 사용되는 대신에 전기적 에너지를 이용하는 플라즈마 공정에 의해 탄소성분은 CO<sub>2</sub>로, 수소성분은 H<sub>2</sub>O 등으로 분해되어 제거된다.

표 3. 방전 플라즈마에 의한 SOx, NOx 처리메카니즘

1 단계	강력한 전자들에 의한 라디칼 생성단계 $O_2 + e \rightarrow O + O + e, H_2O + e \rightarrow OH + O + e$
2 단계	산생성 단계 $SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4, HSO_3 + OH \rightarrow H_2SO_4$ $NO_2 + OH \rightarrow HNO_3$
3 단계	입자로의 전환단계(NH <sub>3</sub> 등을 첨가) $H_2SO_4 + 2NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$ $HNO_3 + NH_3 \rightarrow NH_4NO_3$
4 단계	백필터나 EP에 의한 입자상물질의 제거단계

이들 환경분야에서 플라즈마를 이용하는 기술은 주로 가스상 오염물질의 처리에 이용되고 있으며, 몇 가지 공정별로 구분하면 다음과 같다.

1) 펄스코로나 플라즈마 공정(Pulse-corona induced Plasma Chemical Process, 이하 PPCP), PPCP는 이미 전기집진기를 통하여 친숙해진 기술로서 입상시간과(5~250ns 정도) 펄스폭이 좁은(300ns)펄스전압을 사용하여, 종래의 D.C. 코로나에서 이온의 이동에 많은 에너지가 소비되는 것을 피하고, 전자에만 에너지를 전달함으로써 에너지소모를 줄일 수 있다. PPCP는 대상가스로 SOx와 NOx의 처리에 주로 사용되는데, 그 처리산물은 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 등의 입자상물질로 전환되어 토지개량제로 이용할 수 있다. (+), (-)의 극성에 따른 영향과, O, OH 등의 유용한 라디칼의 근원이 되는 O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O 등의 기체농도가 플라즈마형성에 중요한 영향을 미치는 변수가 된다.

PPCP에 대한 연구는 일본과 이탈리아 미국을 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 이탈리아에서 Dinelli(1990)

등에 의해 석탄연소 화력발전소에서 1000Nm<sup>3</sup>/h규모의 Pilot 장치로 초기농도 400~500ppm에서 NOx 50~60%, SO<sub>2</sub> 80%의 제거효율이 나타났음을 보고하고 있으며, Masuda 등(1990)은 실험실 규모의 장치로 NOx(NO 300ppm) 80%의 제거효율을 보고하고 있다. PPCP의 적용에 있어 (+)극성은 스트리머의 진전성이 뛰어나기 때문에 공간전하의 영향을 받는(-)극성에 비해 반응공간에서 반응성이 아주 높다. Mizuno(1986) 등은 dc-bias 전압을 펄스전압과 같이 인가하여 가스 및 입자상물질의 동시처리의 가능성을 보여주었고, SO<sub>2</sub>의 제거에 있어서 (-)에 비해 (+)극성이 20% 정도 처리효율이 높다는 것을 보여주고 있다.

대상가스의 처리온도는 일반적으로 100°C 이하일 때가 최대 효율을 얻을 수 있다고 보고되고 있다. 이 이상의 온도에서는 역반응이 증가하여 효율은 감소하며, 가스에서 생성된 전환산물이 다시 분해되기 때문이다.

2) 연면방전 플라즈마 공정(Surface-discharge induced Plasma Chemical Process, SPCP)

SPCP는 처음에 Masuda 등에 의해 입자상물질의 처리 향상을 위한 예비하전 장치로서 개발된 Box Charger에서 출발한 것이다. 그 후 오존나이지와 유해가스의 처리에 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있다. 본 장치는 전기적, 기계적, 열적, 그리고 화학적 내구성이 뛰어난 고순도의(92% 이상) 알루미늄 세라믹층을 절연체로 사용하기 때문에 냉각효과가 뛰어나고, 이로 인해 과도한 온도상승을 피할 수 있기 때문에 아주 높은 주파수(10KHz)의 A.C. 전압을 가할 수 있다. SPCP는 두께 0.5mm의 얇은 알루미늄 세라믹층에 많은 방전

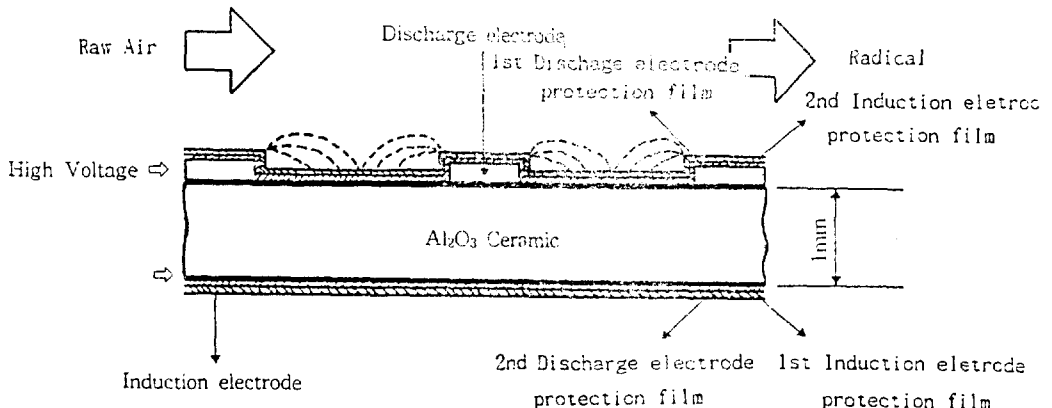


그림 3. 연면방전플라즈마 공정



극을 병렬로 두고, 반대쪽에 필름과 같은 유도전극이 위치한다. 여기에 외부 세라믹층을 두고 압축하여 원통형 또는 평판형으로 성형, 소결한 후 제조한다. 방전극은 일반적으로 텅스텐을 많이 사용하는데 텅스텐은 알루미늄과 열팽창 계수가 거의 같아서 열적경사에 의한 분리가 생기지 않는다(그림 3).

오존나이저로서 종래의 무성방전을 이용한 공정에서는 주파수의 상승에 따른 과도한 온도상승 때문에 주파수가 600Hz 이상이 되면 오존의 생성량보다 열적분해가 지배적이 되는 어려움이 있었지만, SPCP에서는 열전도성이 뛰어나고, 0.5mm의 얇은 세라믹층을 절연재로 사용하기 때문에 10KHz 이상의 주파수와 5-10KV의 낮은 인가전압으로 오존 생성율을 현격하게 향상시킬 수 있게 되었다. Masuda 등(1993)의 연구에 따르면 산소를 원료로 했을 때 60,000ppm까지 오존의 생성이 가능하며, NOx의 처리에 있어서도 850ppm 정도를 99% 이상 제거가능하다고 보고되고 있다.

### 3) 무성방전 플라즈마 공정(Dielectric Barrier Discharge, DBD)

DBD공정은 원래 정수장에서 살균용 오존을 생성하는 장치로서 1857년에 Siemens에 의해 개발된 이래, 플라즈마공정의 대표적인 것으로서 널리 이용되어온 기술이다. 이 장치에는 장벽(Barrier)으로서 유리와 같은 절연체가 전극사이에 사용되어 과도한 전류의 증가를 막게 된다. DBD공정의 가장 큰 장애요인인 온도상승을 막기 위해 물과 기름이 냉각제로 사용된다.

최근에는 DBD공정을 다른 유해가스의 처리에 응용하려는 연구가 진행되고 있는데 Chang 등(1995)에 의해 SOx, NOx, 포름알데히드 등의 처리에 관한 연구가 보고되고 있다.

이들에 따르면 실험실규모의 장치 SOx(1000ppm) 80%, NOx(NO 250ppm) 90%, HCHO 97%의 제거효율을 얻을 수 있었다.

### 4) 강유전체 세라믹 충전층 반응기(Ferroelectric Pellet Bed Reactor, FPBR)

본 반응기는 처음에 입자상물질의 제거를 위해 A. Mizuno 등(1986)에 의해 개발된 것으로서, 현재는 악취물질을 비롯한 VOCs 등의 유해가스 처리를 위한 공정으로 연구가 진행되고 있다. 강유전체 세라믹이 Pellet형태로 충전된 반응기에 A.C. 고전압을 가하면 이들 세라믹의 고유한 성질에 의해 각 Pellet의 접촉공간에 세부플라즈마가 생성된다. 세라믹의 유전상수(Die-

lectric Constant), Pellet의 크기, 인가전압 등이 플라즈마의 생성을 위한 중요한 물리적인 변수가 된다.

미국 EPA의 주도로 RTI에서 Ramsey 등의 여러 연구자들에 의해 여러 가지의 VOCs의 파괴에 관한 연구가 보고되고 있으며, 저농도의 VOCs에 대해서 거의 완벽한 처리가 가능한 것으로 나타났고, Yamamoto 등(1992)에 따르면 약 250ppm 정도의 Toluene을 99% 이상 파괴할 수 있다. 암모니아, 황화수소, 메르캅탄 등의 악취물질에 대해서도 아주 우수한 제어성능을 나타내는 것으로서 알려져 있다.

### 4. 3 국내동향 및 앞으로의 연구과제

국내에서도 이들 플라즈마 공정을 이용한 가스상 오염물질의 처리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 임계규 등(1993)은 DBD를 이용해 지하수에서 탈기시킨 TCE의 처리에 관한 연구를 보고하였다. 문재덕(1994) 등과 채재우(1993) 등은 PPCP를 사용하여 200ppm 정도의 NO에 대한 실험결과를 보고하고 있고, 한국 기계연구원 등에서는 실 플랜트 규모의 개발을 위한 연구중에 있다. 김신도, 김광영 등(1995)은 연면방전플라즈마(SPCP)를 이용한 NOx, SOx, 암모니아 등의 처리에 관한 연구보고가 있었고, 최금찬 등(1995)은 강유전성 Pellet충진(FPBR)을 이용한 toluene의 처리에 관한 연구발표가 있었다.

우리 나라를 비롯한 선진각국에서 플라즈마를 이용한 유해가스 처리분야에 대해 많은 연구가 진행중이나, 실 플랜트로의 적용을 위해서는 아직 해결해야 할 문제가 상당히 남아있는 실정이다. 실 플랜트에 접근을 위한 반응기의 최적 Dimension, 가스조성에 대한 영향 그리고 여러 가지 물리적인 인자와 특히 각종 대상가스에 대한 처리메카니즘의 해명 등에 관하여 더욱 깊은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

- 과학기술처(1989) Pulse-jet식 여과포 집진장치의 여과포 성능시험 연구(I), 한국동력자원연구소.
- 이주삼, 김신도, 김광영, 김종호(1995) 연면방전의 플라즈마 화학처리에 의한 유해가스 제어 성능에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11, 2, 185-190.
- 김용진, 홍원석, 최현오, 함병훈, 민춘식, 유기선(1994) 전기집진기 집진특성 및 유한차분해석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 10, 1, 49-56.
- 문재덕, 이근택(1994) 펄스 코로나 방전 플라즈마와

- 수막에 의한 NO저감, 대한환경공학회지, 16(2), 149-156.
- 문재덕(1985) 디-젤 배진용 하이브리드형 전기집진장치  
의 개발(I), 전기학회논문집, 34, 4, 164-169.
- 박영욱(1991) 산업공정에서 여과포 집진기술의 적용과  
운전동향 및 기술적 과제, 한국산업기술연구  
원, 집진장치 환경오염방지 대책실무, 11-12.
- 박 용(1994) 진보된 오염물질 처리 신기술, 환경보전,  
9, 57-61.
- 송영훈, 김석준(1995) 코로나 방전을 이용한 플라즈마  
탈황/탈질 시스템의 국내의 기술 동향, 기계  
와 재료, 7, 1, 59-69.
- 임계규, 유호식(1993) A Study of Off-Gas Treat-  
ment of an Air Stripping Tower Using a  
Plasma Reactor, 한국대기보전학회지, 9,  
E, 382-389.
- 정진도, 최주홍(1995) 석탄가스화 및 연소가스의 집진  
을 위한 세라믹필터 집진기술 평가 대한환경  
공학회지, 17, 8, 811-822.
- 채재우, G. Vasiliev 등(1993) Pulse Streamer Cor-  
ona 방전을 이용한 NOx저감 효과에 관한  
연구, 대한환경공학회 춘계학술 발표회집,  
173-177.
- 김현하, 최금찬, 주용관, 사공건(1995) 강유전성 Pe-  
llet 충전층 플라즈마 반응기를 이용한 VO-  
Cs 제어에 관한 연구, 한국대기보전학회 춘계  
학술대회 강연요지집, 36-37.
- 한재균, 최금찬(1993) 연소장치를 이용한 소형 전기집  
진장치의 집진효율에 관한 연구 연구, 한국대  
기보전학회지, 9, 2, 125-131.
- 高橋幹二(1984) 應用エアロゾル學, 養賢堂.
- 富澤成元(1988) 都市ごみ燃焼排ガス集じんシステムと  
濾過式集じん機の適用性, 公害と対策, 24, 2,  
23-28.
- 田森行男(1988) 濾過集じん技術の最近の動向, 公害と  
対策, 24, 2, 3-10.
- 井伊谷鋼一(1986) 集塵装置の性能, 日刊工業新聞社.
- 花田剛, 野口嘉一(1988) 石炭燃焼ボイラーにおけるば  
いじんの特性と濾過式集じん技術の進歩, 公  
害と対策, 24, 2, 11-16.
- Altman R.F. et al(1982) Field Evaluations of  
Ammonium Sulfate Conditioning for Imp-  
rovement of Cold Side ESP Performa-  
nce, EPA Report No. EPA 600/9-82-  
005a.
- Altman R.F.(1991) Issues and Trend in ESP  
Technology for U.S. Utilities, JAPCA,  
222-227.
- Arnott J.A. and Kovac V.(1992) Ontario Hydros  
Evaluation of Flue Gas Conditioning for  
ESP Performance Enhancement, EPRI  
Report.
- Baxter, W.A.(1968) Recent Electrostatic Precipi-  
tator Experience with Ammonia Condi-  
tioning of Power Boiler Flue Gases, JAP-  
CA, 18, 817-820.
- Bickelhaupt.(1974) Electrical Volume Conduction  
in Fly Ash, JAPCA, 25, 251-255.
- Bickelhaupt et al.(1978) Flue Gas Conditioning  
for Enhanced Precipitation of Difficult  
Ashes, EPRI EP-910, RP724-1.
- Bickelhaupt, R.E.(1984) A Method for Predicting  
the Effective Volume Resistivity of Sod-  
ium Depleted Fly Ash Layer, JAPCA,  
832-838.
- Brown et al.(1978) Modification of Electrostatic  
Precipitator Performance by Use of Fly  
Ash Conditioning Agents, American Soci-  
ety of Mechanical Engineers Paper 78-  
vvh/apc-3
- Busby and Darby.K.(1963) Efficiency of Electro-  
static Precipitator as Affected by the  
Property and Combustion of Coal., J.  
Inst. Fuel, 36, 184-197.
- Chang M.B., et al.(1995) Destruction of Formal-  
dehyde with Dielectric Barrier Discharge  
Plasmas, Environ. Sci & Tech., 29, 1,  
181-186.
- Clements J.S., Mizuno A., et al.(1989) Combined  
Removal of SO<sub>2</sub>, NOx and Fly Ash from  
Simulated Flue Gas Using Pulsed Stream-  
er Corona, IEEE, Ind. App., 25(1) 62-  
69.
- Collin P.J.(1978) Surface Reactions between  
Triethylamine and Fly Ashes in Electro-  
static Precipitator, Proc. of Int. Clean  
Air Con.,
- Dalmon, Tidy.(1972) A comparison of Chemical  
Additives as Aida to the Electrostatic  
Precipitation of Fly Ash, Atmos. Env.,  
6, 721-734.
- Dinelli G., et al.(1990) Industrial Experiments on

- Pulse Corona Simultaneous Removal of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> from Flue Gas, IEEE. Ind. App., 26(3)535-541.
- Dinelli G, et al.(1991) Enhanced Precipitation Efficiency of ESP by means of Impulse Energization, IEEE. Ind. App., 27(2), 323-330.
- Dismukes E.B.(1974) EPA Report NO. EPA-600/2-75-015.
- Dismukes E.B.(1975) Conditioning of Fly Ash with Ammonia, JAPCA, 152-156.
- Dismukes E.B.(1975) Conditioning of Fly Ash with Sulfur Trioxide and Ammonia, EPA Report No. EPA-600/2-75-015.
- Donovan R.P., Hovis L.S., Ramsey G.H., Ensor D.S.(1982) Electric-Field-Enhanced Fabric Filtration of Electrically Charged Fly ash, Aerosol Science and Technology, 1, 385-399.
- Frederick, E.R.(1980) Fibers, Electrostatics and Filtration: A Review of the New Technology, JAPCA, 30, 4, 426-433.
- Gooch et al.(1982) A Field Demonstration Study to evaluate Sodium Carbonate Injection for Reducing Fly Ash Resistivity, EPA Report, Contact No. 68-02-2656.
- Greiner G.P., Furlong D.A., VanOsdell D.W., Hovis L.S.(1981) Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration, JAPCA, 31, 10, 1125-1131.
- Hall H.J.(1947) Notes on Impulse Corona Studies in Air, Abstract, Phys. Rev. 72, 2, 185
- Hall H.J.(1990) History of Pulse Energization in Electrostatic Precipitation, J. of Electrostatics, 25, 1-22.
- Helfritsch D.J.(1993) Pulsed Corona Discharge for HC Decomposition, IEEE. Ind. App., 29(5), 882-886
- Hovis, L.S, Abbott, R.P, Donovan, C.A, Paraja, Electrically Charged Fly Ash in a Laboratory Shaker Baghouse.
- Humphries W., Madden J.J., Miceli M.(1984) The Effect of Particle Precharging on the Performance of a Fabric Filter Collecting Lead Smelter dust, Aerosol Science and Technology, 381-395.
- Iinoya K, Mori Y.(1980) Effects of Corona Precharger and Relative Humidity on Fabric Filter Performance Study, 2nd Sympo. on the Transfer and Utilization of Particulate Control Technology, Vol.1 EPA-600/9-80-039a.
- Kanowski S. and Coughlin R.W.(1977) Catalytic Conditioning of Fly Ash without Addition of SO<sub>2</sub> from External Sources, Env. Sci. & Tech., 11, 67-70.
- Katz J.(1980) Electrostatic Precipitator Performance from the Point View of Gas Treatment Time, JAPCA, 30, 8, 882-887.
- Ohtsuka.K(1986) Mechanism of Fabric Filtration by Electrostatic Argumentation, J. of Electrostatics, 18, 93-102
- Lausen Preben(1990) Application of Pulse Energization on ESP for Various Processes, J. of Electrostatics, 25, 41-53.
- Masuda S.(1976) Bias-Controlled Pulse Charging System for Electrostatic Precipitators, Staub-Reinhalt Luft, 36(1), 19-26
- Masuda S.(1990) Control of NO<sub>x</sub> by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges, IEEE. Ind. App., 26(2), 374-383.
- Masuda S., et al.(1993) Destruction of Gaseous Pollutants by Surface-Induced Plasma Chemical Process, IEEE. Ind. App., 29(4) 781-786
- McDonald J.R., Mosley R.B.(1980) An Approach for Describing Electrical Characteristic of Precipitated Dust Layers, JAPCA, 30, 4, 372-376.
- Mclean K.J.(1976) Factors Affecting the Resistivity of a Particulate layer in Electrostatic Precipitator, JAPCA, 26, 866-870.
- Mizuno A. and Clements S.(1986) A Method for the Removal of SO<sub>2</sub> from Exhaust gas Utilizing Pulsed Streamer Corona Electron Energization, IEEE. Ind. App., 22, 3, 516-530.
- Mizuno A.(1981) Review of Particle Charging Research, Proc. 1st Int. Conf. on Electrostatic Precipitation, 304
- Mizuno A., et al.(1986) An Electrostatic Precipitation using a Ferroelectric Pellet Layer for Particle Collection, IEEE. Ind. App., 1106-1112.

- Mosley R.B.(1985) Proc. 3rd conf. on Fabric filter Tech. for coal-fired power plants.
- Nunez M.Carlos et al.(1993) Corona Destruction :An Innovative Control Technology for VOCs and Air Toxics, J. of Air & Waste Ass. 43, 242-247.
- Ohtsuka K., Shimoda M.(1986) Mechanism of Fabric Filtration by Electrostatic Argumentation, Journal of Electrostatics, 18, 93-102.
- Patterson R.G., et al.(1985) Flue Gas Conditioning, EPA Report/600/7-85/005.
- Potter E.C, Paulson C.A.(1974) Improvement of Electrostatic Precipitator Performance by Carrier-gas Additives and Its Graphical Assessment Using an Extended Deutsch Equation, Chem. Ind., 532-533.
- Rathbun R.B.(1922) Electrical Precipitation of Solids from Smelter Gases, J. Am. Inst. Electr. Eng., 41, 243-279.
- Sparks L.E.(1976) ESP Options for Collection of High Resistivity Fly Ash, EPA-600/7-76-010.
- VanOsdell D.W.(1981) Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration, JAPCA, 31(10), 1125-1131
- Viner A.S., Greiner G.P., Hovis L.S.(1988) Advanced Electrostatic Stimulation of Fabric Filtration: Performance and Economics, JAPCA, 38, 12, 1573-1582.
- White H.J.(1963) Industrial Electrostatic Precipitation, Reading, Mass: AddisonWesley.
- White H.J.(1952) A Pulse Method for Supplying High Voltage Power for Electrostatic Precipitation, Trans. AIEE, 71(Part 1), 326-330.
- White H.J.(1974) Resistivity Problems in Electrostatic Precipitation, JAPCA, 24, 4 314-338.
- Yamamoto T., et al.(1992) Control of Volatile Organic Compounds by an ac Energized Ferroelectric Pellet Reactor and a Pulsed Corona Reactor, IEEE Ind. App., 28, 3, 528-534.