

화력발전소의 전기집진기 적용 실례

Experiences of Electrostatic Precipitator Application at Fossil Power Plant

박 해 조
H. J. Park

한국전력(주) 수화력사업단 기계기술부



- 1953년생
- 울산대학교 공과대 졸업
- 보일러 계통설계 및 Dynamic Behavior Analysis에 관심이 있음

1. 머릿말

산업구조의 개편으로 공업화가 지속되면서 각종 플랜트가 급격히 증가함에 따라 이들로 부터 배출되는 폐가스는 대기오염의 주요원인이 되고 있으며, 그 처리기술이 국민적 관심의 대상이 되고 있다.

폐가스는 분진과 기타 유해성분으로 나눌 수 있으나 거의 대부분이 복합적으로 발생하고 있다. 분진은 집진기를 이용하여 거의 완벽하게 제거할 수 있고 기타 유해가스는 재연소, 중화 또는 흡수 등의 방법으로 처리할 수 있다.

본 논문에서는 각종 플랜트중 화력발전소 보일러에서 배출되는 연소가스중 분진 및 매연의 처리기술과 실제 적용되고 있는 전기집진기 선정에 대하여 소개하고자 한다.

발전소는 사용연료 및 연소방법에 따라 재래식 화력(유·무연탄 및 중유) 발전소, 복합(가스, 경유)발전소, 원자력 발전소로 분류하며, 분진에 의한 대기오염 문제는 재래식 화력발전소에서 대두되고 있다.

발전소에서 채택하고 있는 집진기는 전기집진기, 여과집진기, 기계집진기 등이 있으나, 발전소단위기 용량의 증대, 부지확보, 운전 및 유지의

용이성, 집진효율 및 경제성 등의 제반여건을 고려하여 전기집진기를 주로 채택하고 있다.

현재 환경법규상 분진 배출허용기준은 유류발전소는 $100\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하, 유연탄 발전소는 $250\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하이다. 2000년대에는 유류발전소가 $40\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하, 유연탄 발전소가 $50\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하로 강화될 전망이므로 고효율의 운전신뢰가 높은 집진기가 요구되고 있다.

2. 집진기의 종류

2.1 종류

집진기는 마립자로 배출되는 가스속의 분진을 포집, 처리하는 장치로서 다음과 같이 분류된다.

- 전기집진기(Electrostatic Precipitator)
- 여과집진기(Fabric Filter)
- 기계집진기(Cyclone Collector)
- 세정집진기(Wet Scrubber)

(1) 전기집진기

전기집진기는 대부분의 발전소에서 채택되어 운전되고 있으며, 건식과 습식, 고온과 저온 집진기 등으로 분류된다.

집진원리는 분진입자에 가해지는 정전력에 기인하며, 상세사항은 제 4 항에서 언급한다.

(2) 여과집진기

가스가 백 필터(bag filter)를 통과하도록 하여 분진을 제거하는 기술로서 필터 표면에 포집된 분진을 제거하는 방식에 따라 공기분사식(pulse jet type), 역세식(reverse flow type), 기계진동식(mechanical shaker type), 역세기계 진동식(reverse air mechanical shaker type) 등으로 분류되며 역세식과 공기분사식이 널리 사용된다.

여과집진기는 전기집진기보다 압력강하가 크고 여과기의 청결 상태에 따라 집진성능이 변화하나 입구분진농도에 관계없이 일정한 출구분진농도를 유지할 수 있다. 여과집진기는 분진의 성분에 영향을 받지 않을 뿐만 아니라 집진효율이 높고 미립자의 포집도 가능한 반면 정기적인 여과포의 교체, 공기예열기 고장 등에 의한 배기가스 온도상승시 운전이 불가능한 점등이 문제점이 있다.

특히 석탄중 유황분이 아주 적을 경우 전기집진기로서는 효과적인 집진이 어려우나, 여과집진기는 효과적으로 처리할 수 있다.

(3) 기계집진장치

기계식 집진장치는 사이클론의 배열에 따라 싱글사이클론(single-cyclone)과 멀티사이클론(multi-cyclone)으로 분류되며, 구조가 비교적 간단할 뿐만 아니라 견고하다. 집진원리는 사이클론 내부에서 가스의 회전운동으로 인한 원심분리력에 의해 집진이 이루어진다. 집진효율이 낮기 때문에 주로 주집진기의 전단에 설치하는 예비집진기기로 이용된다.

(4) 세척집진기

스크러버(scrubber)와 분무탑(packed tower)으로 분류된다. 집진원리는 유동층의 가스속에 미세한 물방울을 분무하여 분진입자와 충돌케 하여 분진을 제거하는 기술로서 이 과정에서 유해가스의 일부도 흡수하게 한다.

앞에서 간단하게 언급한 바와 같이 각 종류별 집진기의 집진원리에 의하여 전기집진기를 제외하고는 집진을 위해 에너지가 직접 분진을 함유하고 있는 유동가스 속에 가해지기 때문에 많은 유동저항이 발생하게 되어 소요동력이 많다. 그러나 전기집진기의 경우 분진의 분리는 정전력에만 의존하기 때문에 기체의 유동에는

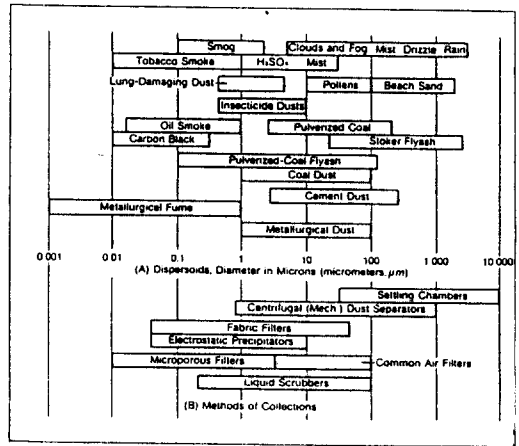


그림 1 분진 입자 크기에 따른 집진 방법

무관하게 되어 유동저항에 의한 동력손실은 거의 없다.

2.2 종류별 집진 범위

각종 분진 및 매연의 입자 크기 및 이들의 제거를 위한 적절한 집진방법은 그림 1과 같다.

3. 전기집진기

3.1 집진원리

작은 도체인 방전극의 표면에 전계강도를 높일 때 방전극 근방에 국부적인 절연과 파괴가 일어나며, 이것에 의해 발생된 코로나(corona) 전류가 집진극판을 향해 이동한다.(그림 2)

이때 집진기 내부는 공간전하(space charge)를 이루고 이 공간내부를 흐르는 가스중의 분진에 전하를 주어 대전시키고 양극간에 형성된 전장에 의한 쿨롱힘이 대전된 분진에 작용하여 분진은 집진극으로 이동 부착된다.

집진극에 부착된 분진은 방전과 동시 가전력을 상실하고 집진극에 가해지는 추타력에 의해 떨어져 호퍼에서 저장 처리된다.

3.2 전기집진기 성능 및 설계요소

(1) 분진의 이동속도

분진의 이동속도는 전기집진기 크기를 결정

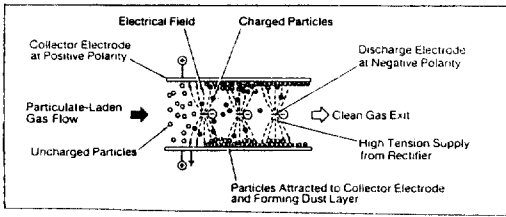


그림 2 집진원리

하는 중요한 요소로서 대전된 분진의 이동속도는 다음식과 같다.

$$W = K \cdot \frac{\alpha \cdot E_0 E_p}{6\pi\mu}$$

여기서

W : 분진입자의 이동속도 [m/s]

K : 상수

E_0 : 방전 전계강도 [kV/m]

E_p : 집진 전계강도 [kV/m]

α : 비회 입자경 [μ]

μ : 기체의 점성계수 [kg · s/m²]

(2) 집진효율

집진기 효율계산은 DEUTSCH 이론(식)이 일반적으로 적용되고 있다. DEUTSCH식은 단일입경에 대한 이론식으로 SCA(Specific Collecting Area) 증가에 따라 집진율이 직선적으로 증가한다는 것을 기본 전제로 하고 있다.

$$\eta = 1 - \exp\left\{-\frac{A}{Q} \cdot W\right\}$$

여기서

η : 집진기 효율

A : 집진면적 [m²]

Q : 처리가스량 [m³/s]

W : 분진입자의 이동속도 [m/s]

그러나 고집진 효율 영역이나 집진기 출구 분진농도가 극히 낮은 경우에는 SCA가 증가하여도 집진효율은 직선적으로 증가하지 않고 지수곡선에 근접하는 것을 경험적으로 입증되고 있기 때문에 DEUTSCH식을 수정한 한 MATTS식을 전기집진기 효율 계산에 적용하고 있다.

$$\eta = 1 - \exp\left\{-\frac{A}{Q} \cdot Wk\right\}^k$$

여기서

Wk : MATTS식에서 분진입자 이동속도 [m/s]

k : 상수(0.5~0.75)

비집진면적(SCA)은 단위유량을 처리하는데 필요한 집진면적을 나타내며 집진기 크기를 결정하는 중요한 수치이다.

이 식에서 보는 바와 같이 집진기 효율에 영향을 미치는 요소는 SCA와 비회 이동 속도임을 알 수 있다.

(3) 분진의 고유전기저항치(Resistivity)

분진의 전기저항치는 전기집진기 설계에 고려되어야 하는 가장 중요한 요소중의 하나로서 사용 탄종에 따라 각기 다르므로 집진기형식 선정의 요소가 된다.

그림 3은 분진의 전기저항치와 집진성능과의 관계를 나타내는 것으로 대체로 전기 저항치가 10¹² Ω-cm 이상에서는 집진이 용이하지 않으며, 10¹¹ Ω-cm 이하의 영역에서 집진이 용이하다.

전기저항치가 10⁹ Ω-cm 이하에서는 집진관에 부착된 분진이 재비산하고, 10¹² Ω-cm 이상에서는 역진류(back corona)가 발생하여 집진이 어렵다.

분진의 전기저항치는 회분의 화학조정, 가스 조건 특히 온도, 수분함량 및 SO₃ 등에 의해 결정되며, 전기저항 계수(factor)는 다음과 같다.

$$\text{Resistivity Factor} = \frac{1}{\text{Conductivity Factor}}$$

$$\text{Conductivity Factor} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO}}$$

위 식에서 보는 바와 같이 분진중 알칼리성 및 Na₂O와 Fe₂O₃, K₂O가 많을수록 전기저항치가 낮아지고, 또한 유황분, 수분 및 미연분이 많을수록 전기저항치가 낮아진다.

(4) 가스온도

분진의 전기저항치는

○ 분진입자 표면에 전류가 흐르는 표면전도도

○ 분진내부에 전류가 흐르는 용적전도도에 의해 결정된다.

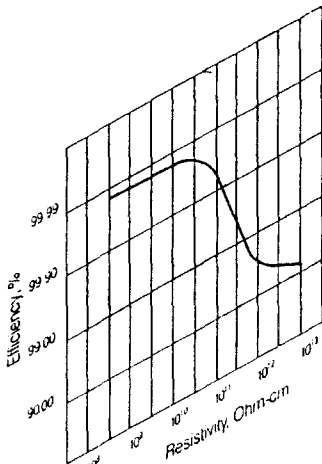
가스온도가 약 150°C이하의 영역에서는 분진입자 표면에 수분이나 황산의 응축 등으로 인하여 표면전도도가 발생한다.

따라서 표면전도도가 지배적인 저온영역에서는 회분과 가스의 화학조성에 크게 좌우되며, 온도가 낮을수록 응축 등의 원인으로 표면전도도가 커져서 전기저항치가 감소하나 어느 한계까지 온

도가 높아질수록 표면전도도가 낮아지고 전기저항치가 증대하여 집진이 어렵게 된다.

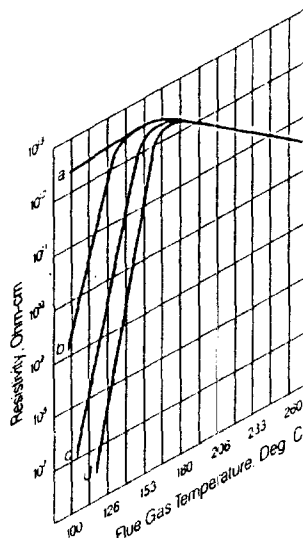
용적전도도는 약 300°C이상의 고온영역에서는 일어나며 분진의 전기전도도 입자표면 전도의 영향은 업게 된다.

용적전도도는 분진의 특성(화학조정)에만 영향을 받게 되며, 가스 온도가 높아질수록 전기저항치가 낮아질 뿐만 아니라 안정된 값을 유지하여 집진이 용이하게 된다. 다음 그림 3, 4, 5는 효율과 전기저항치, 전기저항치와 가스온도 및 효율과 SCA의 관계를 나타낸다.



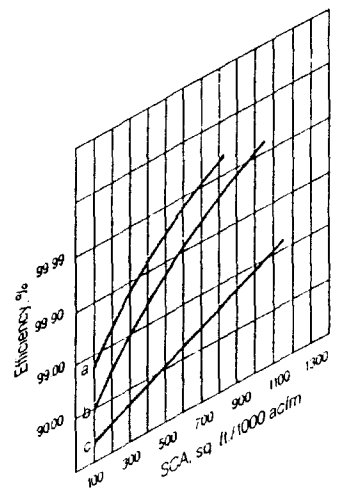
Des SCA = 250 sq ft/1000 acfm

그림 3 효율과 저항



a - Unconditioned
b - 10 PPM SO₃
c - 4.0 PPM SO₃
d - 10.0 PPM SO₃

그림 4 분진저항과 온도



a - Conditioned (5 x 10¹⁰ Ω-cm)
b - Unconditioned (1 x 10¹¹ Ω-cm)
c - Unconditioned (1 x 10¹² Ω-cm)

그림 5 효율과 SCA

3.3 집진기의 형식별 특징 및 선정시 고려 사항

발전소에서 실제 적용되고 있는 집진기는 저온집진기, 고온집진기, 조절장치를 갖춘 저온집진기가 있다(표 1, 그림 6).

(1) 형식별 특징

(가) 저온 전기집진기(Cold Electrostatic Precipitator)

저온 전기집진기는 공기예열기 후단에 설치되

기적 힘으로 압착되어 이를 제거하기에는 충분한 추타력(rapping power)이 필요하다.

(나) 고온 전기집진기(Hot Electrostatic Precipitator)

고온 전기집진기는 저온 전기집진기의 운전 온도 영역(120~200°C)보다 높은 영역(300~400°C)에서 운전되기 때문에 동일 종류의 분진이라든 전기저항치가 상당히 낮아지게 되어 저유황 석탄, 즉 고저항 분진의 집진에 효과적이다.

고온 전기집진기는 공기예열기 전단에 설치되

며 배기가스온도가 120~200°C 사이에서 운전된다.

저온가스 영역에서는 대체로 분진의 전기저항치가 높고 불균일하게 나타나게 되므로 저온집진기는 사용탄의 종류 및 분진특성이 일정한 규격으로 제한되고, 전기저항치가 낮은 고유황분탄을 사용할 때 채택된다.

저온집진기에서는 가스온도가 높을수록 전기저항치가 높아지기 때문에 분진이 집진구에 전이 고온의 배기가스를 집진하므로 저온 전기집진기보다 처리가스 체적이 약 60% 증가한다.

보일러와 공기예열기 사이에 설치되므로 배기가스의 온도가 약 8°C 저하하여 보일러 열효율에 영향을 미친다.

고온 전기집진기는 닥트작업이 복잡할 뿐 아니라 열손실을 적게 하기 위한 보온재의 강화, 열팽창에 견딜 수 있는 구조 등에 경비상승의 요인이 있다. 또한 고온 전기집진기는 운전시간이 경과함에 따라 집진 성능이 저하하는 경향이 있어 최근에는 고온 전기집진 장치를 기피하는 추세이며, 배기가스중 함유된 비휘발 $Na_2O < 0.75\%$, $CaO > 10\%$, $CaO/Na_2O < 7\%$ 의 모든 사항을 만족시 성능이 양호할 것이라는 점을 고온 전기집진기 선정시 고려하여야 한다.

(다) 배기가스 조절장치를 설치한 저온전기집진(Cold Electrostatic Precipitator with Flue Gas Conditioning System)

화학첨가제를 가스에 주입하여 분진의 저항을 조절함으로써 집진이 용이하게 하는 방식이다.

전기집진기 종류별 특징 비교

성능	종류	고온 E.P	저온 E.P	조절 장치 + 저온 EP
처리가스온도(°C)		300~400	120~200	120~200
실처리가스량(% Vol)		160	100	100
고유황분탄 사용시 집진 성능		양 호	양 호	양 호
저유황분탄 사용시 집진 성능		양 호	불 량	조절장치사용
탄종 변동에 대한 적응성		양 호	불 량	조절장치사용
고유황분탄 장기사용시 집진 면적		대	소	소
저유황분탄 장기사용시 또는 탄종 변동시의 집진 면적		소	대	중
열손실		있 음	없 음	없 음

1) 수분에 의한 방법

배기가스중에 수분을 분부하면 고저항 분진에 수분의 부착이나 증발에 의한 온도저하로 집진에 적합한 전기 저항치까지 저하시킬 수 있다.

2) 화학물질에 의한 방법

배기가스 중에 함유된 고저항분진에 의한 역전리현상 방지법으로 가스에 SO_3 를 주입하여 전기 저항치를 저하시킨다. 조절장치를 저유황분 석탄연소용 집진기에 적용하는 방법은 집진기의 크기를 감소시킬 수 있으나 조절장치가 고장이 나면 분진배출 기준치에 맞추어 보일러를 저부하로 운전해야 하는 문제가 있다.

조절장치는 기존 집진기의 성능을 개조하는 방법의 일환으로 강화된 분진배출기준치에 적합하도록 성능향상을 시켜주는 경제적인 방법이다. 그러나 신설되는 집진기에 조절장치를 처음부터 설치하는 방안은 석탄의 사양변경 및 배출기준치 강화에 대처하기 위한 불가피한 방안으로 적용되고 있다.

(2) 집진기 선정시 고려사항

전기집진기 선정시 반드시 고려하여야 할 사항으로는

- 발전소의 운전형태
- 사용연료의 종류 및 범위
- 분진의 전기저항치 범위
- 집진기 출구 분진농도
- 처리가스량

등을 들 수 있으며 이러한 제반사항들이 집진기 형식선정에 미치는 영향을 종합적으로 분석하여야 한다.

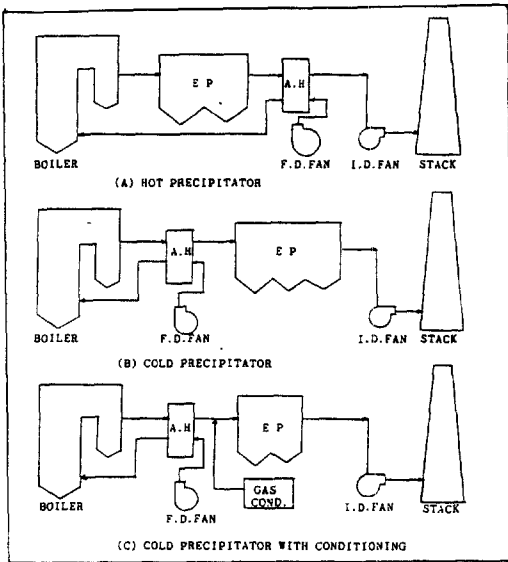


그림 6 전기집진기 배치도

(가) 고온집진기

- 1) 중간부하용 보일러에는 채택이 곤란하며, 기저부하용으로 적합하다.
- 2) 전기저항치가 높은 저유황분탄 및 다종다양탄 연소보일러에 적합한다.
- 3) 처리가스량은 저온집진기보다 50~60% 정도 많다. 즉, 집진기의 체적이 커진다.
- 4) 가스의 밀도가 낮으므로 집진기의 전압은 저하되고 전류는 높게 된다.
- 5) 집진기의 케이싱, 집진극, 방전판 등 설비의 열피로를 고려하여야 한다.
- 6) 집진기 내의 가스온도 분포를 균일하게 하여 분진의 전기저항치를 균일하게 하여야 한다.
- 7) 집진기에서의 열손실은 보일러 열효율에 직접 영향을 미치므로 보온에 유의하여야 한다.

(나) 저온집진기

- 1) 중간부하 발전소에 적합하다.
- 2) 분진의 성상에 따라 집진성이 크게 변하므로 고유황분탄과 일정한 규격탄을 연소하는 보일러에 적합하다.

- 3) 분진의 전기저항치가 $10^{12} \Omega - \text{cm}$ 이상영역에서는 사용이 곤란하다.
- 4) 집진기에서의 열손실이 보일러 열효율에 영향을 미치지 않는다.

4. 발전소 적용사례

국민생활 수준의 향상과 산업구조의 선진화에 따라 전력수요가 주·야간과 계절간에 큰 차이가 있기 때문에 최근의 석탄(주로 유연탄) 화력발전소는 일일기동정지(DSS) 및 주기운전(cyclic operation) 방식을 채택, 설계 건설하고 있으므로 전기집진기 역시 이러한 운전형태에 적합한 형식이어야 한다.

다종 다양탄을 발전용 연료로 수입 사용하는 우리나라의 경우 수입탄의 상당수가 회분의 성분중 Na, SO₃가 비교적 적고 SiO₂, H₂O₃등의 산성분이 주류를 이루고 있기 때문에 아주 높은 전기저항치를 갖고 있다. 따라서 고온집진기를 채택하여 다양한 특성을 가진 분진 처리에 대응하는 방안이 고려될 수 있다.

그러나, 고온 전기집진기의 경우 빈번한 기동, 정지로 인한 케이싱, 방전극, 집진판 등 기타 설비의 열피로(thermal fatigue) 현상에 대응키 어렵기 때문에 중간부하용 발전소에서는 저온 집진기가 채택되고 있다. 중간부하 발전소용 전기 집진기는 빈번한 부하변화에 적절히 대응할 수 있도록 자동전압제어시스템(automatic voltage control system)과 투과성메타(opacity meter)를 설치하여 저부하시 또는 집진효율에 따라 집진기 전압이 자동 조절되도록 하므로써 전력손실 방지와 일정한 배출분진치로 인한 집진 효율저하 대책으로 조절가스설비를 도입하므로써 기능을 보완하고 있다.

한편, 기저부하로 운전되는 발전소에서는 고온집진기 또는 중간부하발전소와 동일한 조절설비를 갖춘 저온집진기를 채택하고 있다.

국내 대용량 유연탄 발전소에 채택된 전기집진기의 주요 설계기준 및 제원은 표 2에 나타난 바와 같다.

표 2 전기집진기의 설계기준 및 제원

발전소운전형태	발 전 소 명				
	보령 1,2호기	보령 3~6호기	삼천포 1,2호기	삼천포 3,4호기	
발전소운전형태	기저부하	중간부하	기저부하	중간부하	
집진기형식	고온집진기	저온집진기	저온집진기	저온집진기	
가스조질설비	Na ₂ SO ₃ 를 COAL에 혼합	SO ₃ 가스주입식	-	SO ₃ 가스주입식	
사용탄종	25종	28종	1종(성능탄)	28종	
전기저항치(최대)	6×10 ¹³ Ω - cm	6×10 ¹³ Ω - cm	6×10 ¹³ Ω - cm	6×10 ¹³ Ω - cm	
설 계 기 준	연소가스량	2,436,236 kg/hr	44,317 Am ³ /min.	48,128 Am ³ /min.	49,491 Am ³ /min.
	설계온도	343.3 °C	90~135 °C	124.4 °C	95~138 °C
	입구분진농도	22 g/m ³ (@762mmHg, 15.6°C)	17.4 g/Sm ³ (@O ₂ 6% DRY)	13.5 g/Sm ³ (@O ₂ 6% DRY)	17.4 g/Sm ³ (@O ₂ 6% DRY)
	출구분진농도	92 mg/m ³ (@762mmHg, 15.6°C)	100 g/Sm ³ (O ₂ 6% DRY, W/O FGC) 50 g/Sm ³ (O ₂ 6% DRY ; WITH FGC)	200 g/Sm ³ (O ₂ 6% DRY)	100 g/Sm ³ (O ₂ 6% DRY, W/O FGC) 50 g/Sm ³ (O ₂ 6% DRY ; WITH FGC)
기 타 주 요 제 원	집진효율	99.58%	99.4/99.7%	98.5%	99.4/99.7%
	필드수	5	5	3	4
	집진극중횡비	2.04	1.587	1.19	1.17
	집진판면적	95,694 m ² /BOILER	77,362 m ² /BOILER	58,150 m ² /BOILER	80,524 m ² /BOILER

5. 맺음말

인류의 현재와 미래를 생각할 때 자연환경 보전을 위한 노력과 투자는 아무리 강조해도 지나침이 없을 것이다.

그중 분진처리와 관련하여 국내에 운전중인 수심기의 화력발전소, 현재 건설중인 화력발전소와 향후 계획중에 있는 화력발전소가 모두 연소가스에 포함된 분진과 매연을 제거하기 위하여 전기집진기를 설치 운용하고 있고, 설치중 또는 설치를 계획하고 있다.

기 운용중인 발전소는 항시 집진기의 운전상태를 점검하고 적절한 보수를 통하여 최적의 성능을 유지할 수 있도록 하며, 건설 또는 설치계획중인 발전소는 집진기 선택, 설계, 구매, 시공 및 시운전에 최고의 기술과 자본과 노력을 투자

하여 하나뿐인 지구의 자연환경을 보전하여야 할 것이다.

특히, 설계 및 구매시에 사용탄의 분진이 가진 특성과 사용탄의 범위, 분진의 전기저항치 변화 범위, 처리가스량 및 온도 등의 조건을 완벽히 검토하여 집진기 설계시 고려하여야 하는 SCA, 필드수 및 처리시간등이 여유있는 설계가 되어야 하며, 가능한 한 전기저항치를 낮추는 방안이 강구되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- R.F Altman, 1985 "Electrostatic Precipitator Guidelines", Proceedings of the American Power Conference, Vol. 47, pp. 184~189.
- W. Morgan, 1986, "Update ESP Control with Feed-

- forward Concepts”, Power, pp.79~81.
- J. H Tumer, 1988, “Sizing and Costing of Electrostatic Precipitators”, APCA.
- V. H Belba, 1983, “Effects of Cycling Operation Air Quality Control Systems”, Proceedings of American Power Conference, Vol. 45, pp.359~363.
- Joint/Technical Committee of ABMA & IGC1, 1980, “Design and Operation of Reliable Central Station Fly Ash Hopper Evacuation Systems”, Proceedings of the American Power Conference, Vol. 42, pp.74~85.
- F. A Wybenga & R. J. Gray, 1979, “Electrostatic Precipitator Design and Operational Consideration for Start-up and Low Load Operation”, PGTP 79-38, pp.1~8.
- Sumitomo Heavy Industries, 1978, “Electrostatic Precipitation of Fly Ash”, pp.1~36.
- ABB-CE, 1991, “Control of Power Plant Stack Emissions”, Combustion pp.15-4~15-26.
- Sargent & Lundy Co, 1986, “Standard Specification for Electrostatic Dust Precipitator”, pp.1~20.
- Sargent & Lundy Co, 1988, “Particulate Removal”, Technology Transfer Course No ; CL-ENV-4, pp.3-1~3-22.
- Takeshi Nakayama, 1985, “Application of Moving-Electrode Type Electrostatic Precipitator to Coal Fired Utility-Use Boiler”, Hitachi Review Vol. 34, No. 5, pp.225~228.
- 박길웅, 1988, “유연탄 연소 화력발전소의 집진 성능 향상대책”, 발전용탄 이용기술, pp.334~348.