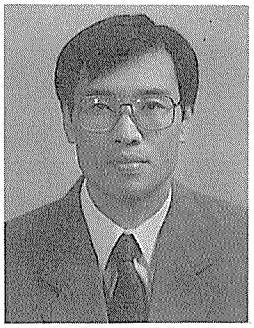
전기집진기의 집진현상과 전원장치



한국전기연구소
전력전자연구부
전력변환 연구팀장 임 근 희

1. 서 론

대형 플랜트에 채용되고 있는 전기집진장치(이하, EP,(Electrostatic Precipitator)는 일반적으로 매우 높은 집진성능을 발휘함과 동시에, 운전비(동력비, 보수비 등)가 다른 형태의 집진장치와 비교해 매우 우수한 특징을 가지고 있다. 그러나 함진가스를 전기적으로 처리하는 것이기 때문에 처리 가스 및 분진의 물질적·화학적 성상의 영향을 받기 쉬운 면도 있으므로 경험 공학적인 요소를 다분히 포함하고 있다.

EP는 20세기 초부터의 공정상의 많은 기초와 실용적인 진보에도 불구하고 여러 부분에서 문제점이 남아 있는데 예를 들면, 고저항 입자 처리방법, 집진기 설치비용, 에너지절약 등의 문제를 들 수 있다. 집진에 대한 세계 각국의 관심 또한 새로운 분야의 연구개발 및 집진의 총체적인 공학적 측면에서의 접근과 효율향상 등을 통하여 날로 강화되고 있는 환경적 제약조건을 충족하는데 집중되고 있는 상황이다.

EP의 동작에서 중요한 점은 코로나 전류밀도, 전압의 크기 및 집진기의 유용한 코로나 전력이다. 코로나 전류밀도는 다음과 같은 요소에 의해 제한된다.

- 가스 구성성분, 온도, 압력
- 부유분진의 전기량 충전효과
- 집진된 입자층의 저항
- 전극배열과 균일성

- 집진부분의 에너지량
- 고전압 발생장치의 설계와 제어

입자 이동속도는 전기장에서 증가하게 되는데 이는 코로나 전압과 전류에 좌우되어 코로나 전력과 밀접한 관계를 가진다. 따라서, 전기 집진기의 집진효율과 효과적인 집진은 핵심요소인 전원 장치의 설계 및 제작기술에 크게 좌우된다. 따라서, 현재까지 연속하전방식인 DC하전, 간헐하전방식인 Semipulse 하전과 Microsecond Pulse 개념을 도입한 MPC방식등의 여러 하전방식들이 개발되었다. 이들 각각의 방식들은 기술적인 측면뿐만 아니라 전기절약, 신뢰성, 설치비용 등의 면에서 각기 다양한 특성을 지닌다.

본 고에서는 최근 집진기의 집진효율 향상을 위한 핵심기술로 평가받고 있는 전원장치를 위주로 한 집진현상, 전원장치 기술개발 및 그 특징에 대하여 설명한다.

2. 규제치 강화와 고효율화

선진 OECD 국가를 중심으로 전 세계적으로 첨예화된 환경문제는 그 규제치 강화는 물론 이와 관련된 기술개발과 설비투자에 큰 원동력이 되고 있다.

우리나라의 경우, 급진적인 산업화를 이루어 국민보건위생 문제 뿐만 아니라 선진국의 환경보호 정책을 내세운 무역장벽과 자국산업보호를 위한 기술장벽으로 인한 복합적인 어려움에 처하게 되었다. 특히, 환경산업은 산업화에서 파생되는 자체문제와 향후 선도적으로 국제 경제를 주도하게 될 핵심 산업으로 인식되어야 하며, 이에 대한 적절한 투자와 기술개발이 요구되어 진다.

국내의 경우 대기오염문제는 지금까지의 꾸준한 전기에너지 사용증가와 향후의 수요예측〈표－1〉에서도 유추할 수 있듯이 각종 산업활동 증가에 따른 오염도 매우 심각하게 예상되어 이에 대처하기 위한 분진배출 허용기준을 〈표－2〉와 같이 강화하는 추세에 있다.

〈표－1〉 최대 전력수요

년 도	최대수요전력
1994년	26,690MW
2006년	45,553MW(예상)

〈표－2〉 국내 대기환경보전법 분진배출 허용기준 강화내역

년 도 / 배출시설구분	'83~'87.7	'87.8~'91.1	'91.2~'94.12	'95.1~'98.12 (시행규칙 장기 입법예고)	'99.1 이후 (좌동)
1. Oil Boiler	**				
1) 20만m^2/hr이상	200mg/Sm^3	150(4)mg/Sm^3	100(4)mg/Sm^3	60(4)mg/Sm^3	40(4)mg/Sm^3
2) 3~20만m^2/hr	300mg/Sm^3	200(4)mg/Sm^3	150(4)mg/Sm^3	100(4)mg/Sm^3	50(4)mg/Sm^3
2. Coal Boiler	**	***			
－ 3만m^2/hr 이상	400mg/Sm^3	250(6)mg/Sm^3	250(6)mg/Sm^3	100(6)mg/Sm^3	50(6)mg/Sm^3
3. 금속제조설비	300mg/Sm^3	200mg/Sm^3	전기아크로 30mg/Sm^3 용광,용선,배소로 70mg/Sm^3 소결로 200mg/Sm^3	20mg/Sm^3 50mg/Sm^3 70mg/Sm^3	10mg/Sm^3 50mg/Sm^3 50mg/Sm^3
4. 소각설비	300mg/Sm^3	150(12)mg/Sm^3	100(12)mg/Sm^3	80(12)mg/Sm^3	80(12)mg/Sm^3
5. 시멘트, 요업	400mg/Sm^3	용융로 500(10)mg/Sm^3 소성로 300(12)mg/Sm^3 기타설비 300mg/Sm^3	유리용융로 100(13)mg/Sm^3 소성, 건조시설 200(10)mg/Sm^3 냉각시설 100mg/Sm^3	70(13)mg/Sm^3 100(10)mg/Sm^3 50mg/Sm^3	50(13)mg/Sm^3 50(10)mg/Sm^3 50mg/Sm^3

** mg/Sm^3 : 0℃, 1기압, Dry gas, Excess air "0"로 보정

*** (6)mg/Sm^3 : 0℃, 1기압, Dry gas, O_2 6%(Excess air 약 40%)로 보정

이에 대한 배출 분진저감 대책으로서는

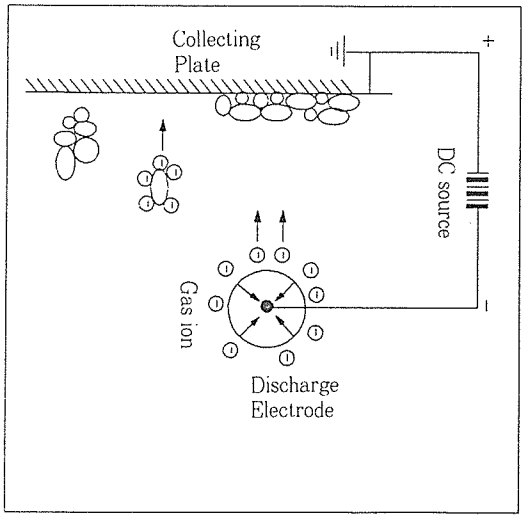
- 연료변경 또는 화학처리
- 집진기 필드(Field) 또는, 채널(Channel)수를 증가시키는 용량적 강화
- 집진판 간격을 넓혀 분진 함유 가스의 유동흐름을 증가시킴
- 이동전극 EP 사용으로 재비산 분진 저감
- 고저항 분진 포집에 성능이 뛰어난 Micro-Pulse형 전원사용
- 이 중 몇 개를 선택혼합 적용하는 조합형 등을 들 수 있는데,

이 중 전원장치의 성능과 특성개선을 통해서 목적을 달성할 수 있는 Micro-Pulse 개념은 기존설비의 큰 기계적 보수가 수반되지 않는 간편한 방법으로 국내의 시멘트·제철소 등에서 이미 도입되어 만족스러운 효과가 있는 것으로 보고되고 있다.

3. EP의 원리 및 구조

EP는 〈그림－1〉에 나타낸 것처럼 코로나방전을 이용하여 가스 안의 분진에 전하를 주어 이것을 전계의 작용에 의하여 가스 안에서 전기적으로 분리, 포집하는 것으로서 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 정전적인 응집작용에 의하여 미립자의 포집이 가능해지며 고효율이 얻어진다.



〈그림－1〉 집진원리도

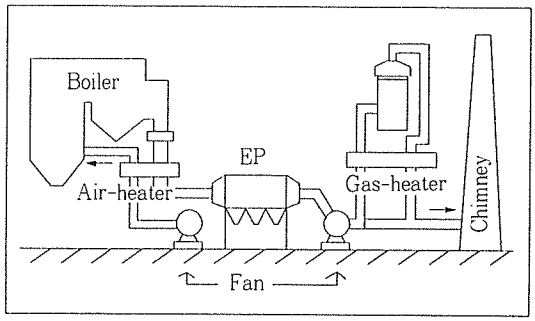
- 가스속도는 0.5~1.5m/s이며 압력손실이 10~20mmHg로 적고, 운전경비가 절약된다.
- 분진의 입자경, 가스의 온도·습도 등의 가스·분진성상이 광범위하게 사용되어진다.

EP는 크게 기계적 부분과 전기적 부분으로 나눌 수 있으며, 전기적 부분은 특성상 하전장치, 절연부, 방전극, 집진극, 제어장치 등으로 세분화 되어지며, EP의 성능을 좌우하는 핵심부분이라 할 수 있다.

화력 발전용으로 사용되는 EP는 거의가 건식으로 집진극으로는 평행평판형이 사용되어지고 있으며 기본 구조는

- 코로나 방전을 하는 방전극
- 이 코로나 방전에 의해 대전한 분진을 포집하는 집진극
- 전극표면에 포집, 부착된 분진을 박리시키기 위해 진동을 주는 추타 장치
- 집진실내의 가스 유속을 균일하게 분포시키기 위한 분포판
- 방전극을 접지극에서 전기적으로 절연하기 위한 애자
- 내장품을 수납하는 집진실 및 포집 분진을 재처리하기 위한 호퍼(hopper)
- 방전극과 집진극 간에 고전압을 인가하기 위한 하전장치
- 효과적인 전기집진이 되도록 코로나 전류를 저장하는, 자동제어장치를 내장한 제어반 등으로 구성되어 있다.

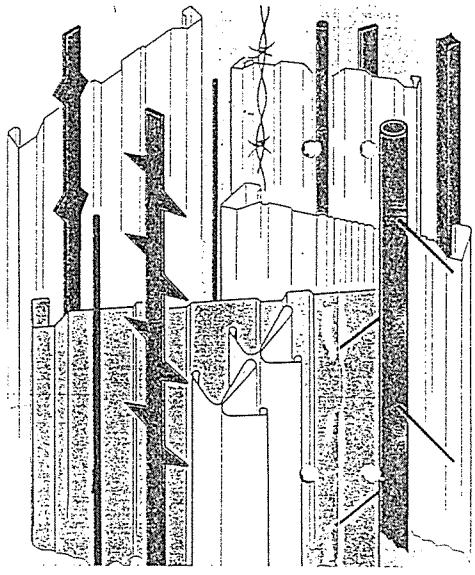
화력발전소용으로 사용되는 EP의 위치와 그 외 시스템은 〈그림－2〉와 같다.



〈그림－2〉 화력발전소의 시스템도와 EP

전기집진기에서 전기적으로 마지막 성능을 좌우하는 중요부품인 방전극과 집진판의 형상은 〈그림-3〉과 같이 아주 다양하다. 방전극의 형상은 양 전극에 고전압을 인가시 알맞는 전계분포를 이루며 코로나가 균일하게 발생되도록 설계 되어져야 하며, 코로나 방전시 또는 분진 가스의 화학적 반응에 부식 또는 마모되지 않는 재질이어야 한다.

한편 집진판은 화학적 부식(조질제 등에 의한)과 기계적 충격 및 고온에 의한 변형이 적도록 재질 특성이 고려되어져야 하며, 추타(Hammering)에 의한 진동전달이 잘 되어야 한다.



〈그림-3〉 방전극 및 집진판의 다양한 형상

4. 하전방식

현재 국내의 여러 화력발전소에 설치된 EP의 집진방식은 DC 하전방식을 취하고 있다. DC 하전방식은 단상 교류의 전원으로부터 스위칭 소자를 사용하여 위상제어 방식을 통해 전압을 트랜스포머의 2차측으로 전달한 후, 고압 다이오드를 이용하여 DC 가변전압을 얻어서 EP에 하전하는 방식을 취하고 있다. 그러나, 이 DC 하전방식은 EP에 부의 직류 고전압을 연속적으로 공급하는 방식으로 고저항탄의 경우에는 분진이 집진판에 두껍게 누적되면 역전리 및 분진의 재배산 현상이 발생되므로 고전압 공급이 불가능하게 되어 집진율이 급격히 감소하게 된다. 그러나, 펄스 하전방식은 펄스 전압을 이용하여 순간적인 고전압을 공급하여 분진을 쉽게 이온화 시키고 추타시에는 전원공급을 중단하여 집진판에 부착된 분진을 쉽게 탈리시킴으로써 집진효율이 향상된다.

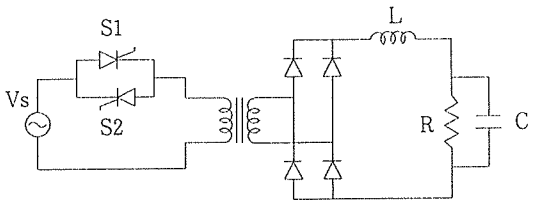
즉, 기존의 DC 하전방식 EP의 전원장치는 연속적으로 35~45kV 정도의 DC 전압을 인가하지만 펄스 하전방식의 전기집진기는 6~30회/초로 50~60kV 정도의 전압을 펄스 형태로 공급하고 나머지 기간은 집진판에 부착된 분진이 자체중량에 의한 이탈이 일어나지 않도록 30kV 정도의 DC전압을 공급한다. Micro-Pulse 하전방식은 DC전압이 낮으므로 추타가 상대적으로 용이하다.

역전리 발생을 방지하기 위해 전류를 너무 줄이면 종래형 EP에서는 방전극에서의 코로나 전류에 현저한 불균일 분포가 생겨 EP의 성능이 저하된다. 이에 대해 방전극에 짧은 시간동안 펄스 상태의 고전압을 인가하면 방전극에서 발생하는 코로나 전류는 방전극 전체에 걸쳐 동일한 분포가 되며 더우기, 인가한 전압 펄스의 파고치, 폭, 주기 등을 적당히 바꾸는 것에 의해 직류하전시보다도 현저히 높은 피크전압이 얻어지는 등 하전개선이 가능하게 되며 집진성능이 향상된다. 이 펄스 하전방식은 최근 특히 관심이 높아져 세계적으로 그 실용화 연구가 행해지고 있다. 펄스 하전은 EP에 인가하는 펄스전압의 폭에 의해 Millisecond펄스, Microsecond 펄스로 크게 구별된다. Millisecond 펄스하전으로서는 간헐하전방식이 있고 상당한 에너지 절약과 동시에 고저항 분진에서는 약 1.2배에 이르는 분진 이동속도의 향상이 얻어지고 있는 한편, Microsecond 펄스에 대해서는 구미 메이커를 중심으로 석탄 보일러, 시멘트 공장용의 기설 EP에서의 성능 개선효과가 보고되고 있다.

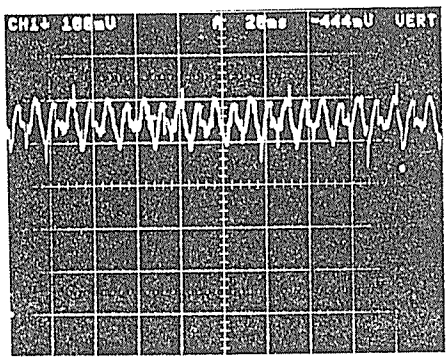
펄스하전은 종래의 직류하전과 비교해 몇가지 점에서 우위성을 가지지만 현시점에서 넓게 실용화되고 있지 않은 요인으로써는, 전원설비 가격이 높은 것과 펄스전원의 신뢰성이 불충분한 것을 들 수 있다. 전원설비는 통상 고압전류에 덧붙여 고속 스위칭 소자, 충전 및 결합 커패시터 및 펄스 발생용 전원등이 필요하고 종래 하전 방식의 약 4배 정도로 비싸다고 알려져 있다. 따라서 앞으로의 과제로서는 펄스하전의 장래를 좌우하는 전원설비 가격 저감, 신뢰성 확립 등을 들 수 있다.

가. DC 하전방식

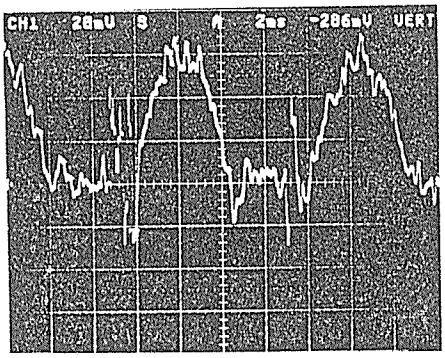
〈그림－4〉는 DC 하전 및 Semipulse 하전시에 사용되는 주회로도의 구성을 나타낸 그림이며 국내 화력발전소에서 현재 기동중인 DC 하전방식 집진기의 출력 전압 및 전류를 〈그림－5〉에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 집진판에 가해지는 전압이 전 구간을 통하여 일정하게 인가되므로 역전리의 제어가 불가능하며 초기 집진율의 측면에서는 유리하지만 점차적으로 증가되는 집진층의 탈리에 있어 나쁜 효율을 가진다. 결국, 여타 집진 방식과 비교할 때, 계속적인 DC전압을 인가함으로써 소비전력이 증가하는 결과를 가져오게 된다.



〈그림－4〉 DC 하전 및 Semipulse 하전 주회로도



(a) 전압파형



(b) 전류파형

〈그림－5〉 DC 하전시의 집진기 전압 및 전류파형

나. Semipulse 하전방식

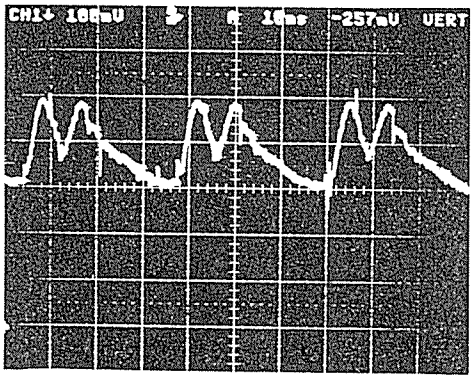
연속적인 방식에 의한 집진 방식은 집진 초기의 분진은 쉽게 집진이 되지만 분진층과 집진판 사이의 전계강도로 인해 추타효율이 저하되며 집진판에 분진이 두껍게 부착되는 문제점이 있다. 이 경우에 인가전압을 상승시켜 이온화 강도를 높이면 역전리 또는 분진 재비산 현상이 발생하여 집진율이 저하된다. 이에 반해 펄스 하전방식에 의한 집진 방식은 순간적인 고전압을 공급하여 분진을 쉽게 이온화시키고 추타시에는 전압 공급을 줄여 집진판에 부착된 분진을 쉽게 탈리시킴으로서 집진율을 향상 시킬 수 있다. 연속 하전방식과 비교할 때 이 방식은 펄스에 의하여 하전시키며, 인가전압이 낮은 상태에서 추타되므로 효율도 높다.

국내 일부 화력발전소에도 이 펄스 하전방식에 의한 집진 방식이 부분적으로 채용되고 있는데 이 방식은 어떤 기간을 주기로 하여 고전압 펄스가 인가되는 부분과 전압이 인가되지 않는 부분으로 구분되어 제어하는 방식으로서 탄종이나 여타의 조건에 따라서 전압이 인가되지 않는 부분의 주기를 가변적으로 조절할 수 있도록 되어 있다.

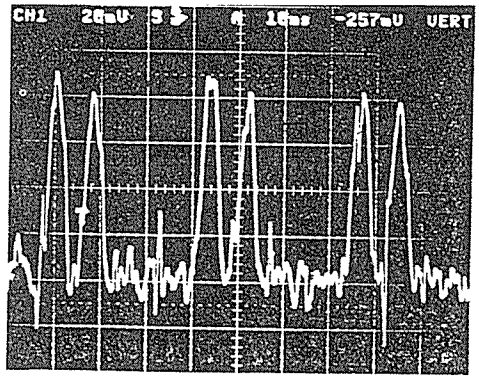
〈그림－6〉은 현재 화력발전소에 실가동중인 Semi-pulse 하전방식으로 운전되는 집진기 전원의 동작을 나타내 주는 파형이다. 그림에서 보는 바와 같이 고전압 펄스열을 인가한 이후에 영 전압 구간을 두어 DC 하전방식과 같이 전 구간에 걸쳐 인가전압을 일정하게 유지함으로 인한 에너지 소비를 줄일 수 있으며 집진 효율의 향상도 꾀한 방식이다.

다. Micro-pulse 하전방식

기존에 설치한 EP의 성능개선 대책이 여러 용도의 EP에 채용되었으나, 모든 방법들이 연료의 제약, 운전 가동비의 증대, 운전 관리의 복잡화, 설치면적 증



(a) 전압파형



(b) 전류하형

〈그림－6〉 Semipulse 하전시의 집진기 전압, 전류파형

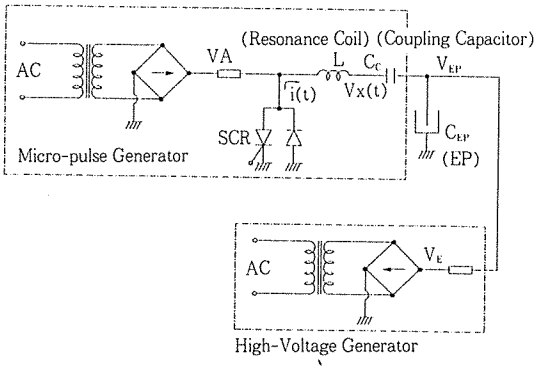
대, 보수의 복잡화, 성능 개선율의 부족, 공사로 인한 장기간 플랜트 휴지 등의 결점이 있었다. 마이크로 펄스하전(Micro-pulse Concept)에 의한 기존설치 EP의 성능개선은 종래의 결점을 해소한 새로운 방법이다. 여기서는 마이크로 펄스하전의 원리, 특징 등에 대해 서술한다.

a. 마이크로 펄스하전의 회로 원리

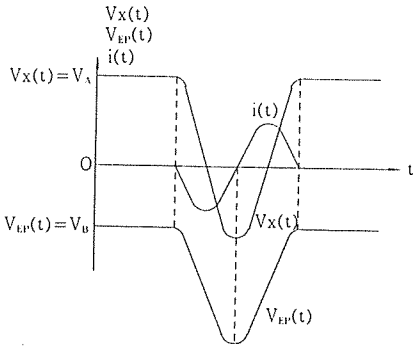
마이크로 펄스하전 회로는 이미 유럽 등지에서 몇 가지 방법이 실용화 되었으나 일반적으로 펄스전원과 기본전원이 별개인 2전원 방식과 펄스전원에서 기본전원을 겸용하는 1전원방식이 있다.

부의 직류전압을 기본 DC 전압으로 집진기에 인가하기 위한 전원장치와 LC 공진회로로부터 Micro-pulse가 발생하도록 하는 또다른 전원장치로 구성되는 2전원방식의 특징을 가지는 MPC 전원장치의 기본회로를 〈그림－7〉에 나타내었으며 회로의 전압, 전류파형을 〈그림－8〉에 나타내었다. 펄스폭은 $2\pi\sqrt{LC}$에 의해 결정되며, 여기서 L은 공진코일의 인덕턴스이고, C는 EP의 정전용량과 결합콘덴서의 직렬합성용량이다.

〈그림－7〉에 나타난 MPC 기본회로의 특징은 다른 마이크로 펄스하전 방식에서 쓰이고 있는 펄스 트랜스포머, 에너지 저장용 콘덴서, 펄스발생을 위한 스파크 갭이 없으며 SCR을 사용한 무접점방식으로 고압 공진 루프를 구성하여 펄스를 발생하는 것이다. 또한 이 회로는 펄스 인가시에 EP 충전에 사용한 에너지가 펄스 인가 후 회수되며 결합콘덴서에 축적에너지로 보존되기 때문에 소비전력이 적어 에너지 절약 효과도 뛰어나다.



〈그림－7〉 마이크로 펄스하전의 기본회로



〈그림－8〉 마이크로 펄스전원의 전압, 전류파형

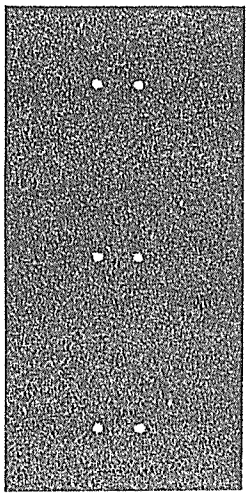
b. 마이크로 펄스하전의 특징

○ 균일한 코로나 방전

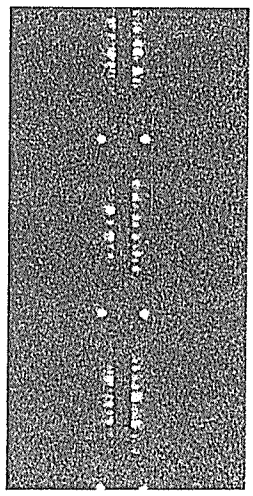
Pilot-scale의 EP에서 사진 촬영한 코로나 방전상태를 〈그림－9〉에 나타내었다. 〈그림－9〉의 (a)는 피크전압 800kV의 간헐하전의 코로나 방전에 의한 상태를 나타내는데 직류하전, 간헐하전에서는 톱니상 전극의 톱니 선단부만 코로나 방전이 발생한다. 〈그림－9〉의 (b)에서는 피크전압 65kV의 마이크로 펄스하전의 코로나 방전에 의한 발광상태를 나타내는데 마이크로 펄스하전에서는 톱니 선단부 이외에서도 코로나 방전이 발생하며 대단히 균일한 분포임을 알 수 있다. 마이크로 펄스하전에서 이와 같이 균일한 코로나 분포를 얻을 수 있는 이유는 펄스 폭이 수십 μs～수백 μs와 짧은 시간이기 때문에, 코로나 방전에 의한 부의 이온이 집진공간에 증가됨에도 불구하고 부이온의 공간전하에 의한 코로나 억제작용이 작아져 펄스 인가 중에 전극 전체에서 균일한 코로나 방전이 발생한다.

○ 분진의 대전율 증가

공간전하에 의한 코로나 억제 작용이 작아져 전극전체에서 균일한 코로나 방전이 발생해 〈그림－10〉에

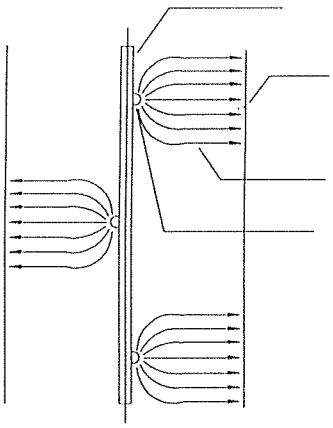


(a) 간헐하전 코로나(피크 80kV)

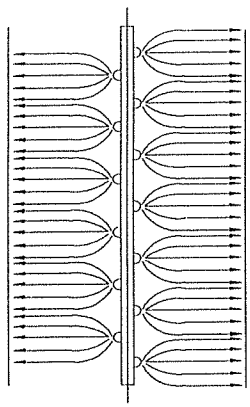


(b) 마이크로 펄스하전 코로나(피크 65kV)

〈그림－9〉 코로나 발생현상



(a) 종래의 하전



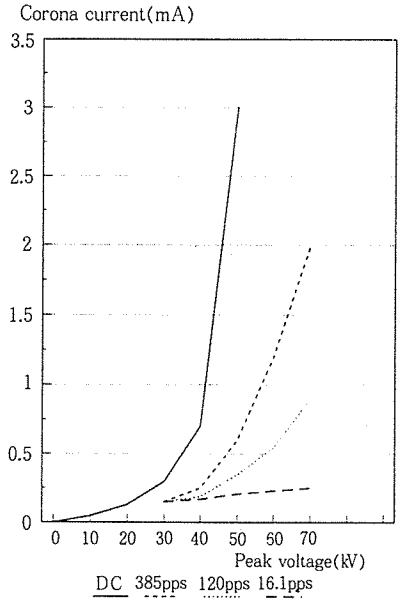
(b) 마이크로 펄스하전

〈그림－10〉 코로나와 이온류 분포

나타내듯이 이온류는 집진공간 내에 균일한 분포를 가져 분진의 대전율이 종래의 EP와 비교해 증가한다.

○ 코로나 전류의 광범위한 설정

〈그림－11〉은 MPC 하전에 의한 코로나 전류특성을 조합한 결과이다. 세로측은 코로나 전류이고, 가로측은 펄스의 피크전압(DC 전압과 펄스성분의 합계)이며 펄스폭은 100㎲로 펄스빈도를 매개변수로 한 피크전압과 코로나 전류의 특성을 나타낸 그림이다. DC 전압은 20kV이며 이 시점이 코로나 개시전압 근방이다.



〈그림－11〉 MPC 하전에 의한 코로나 전류특성

○ 역전리의 억제

방전극의 코로나 방전에 의해 부이온은 집진공간 중의 분진에 대전함으로써 집진극으로 이끌려가 집진작용이 되는 경우가 있으며 높은 전기저항을 분진의 경우는 집진극 분진측의 표면 전위를 상승시켜 집진극판과 분진층 표면에서 절연파괴를 일으킨다. 이 때, 절연파괴된 부분은 가스가 전리되어 정의 이온이 집진공간에 방출되어 방전극의 코로나 방전에 의해 발생한 부이온과 중화되기 때문에 EP성능이 저하되어 집진작용을 현저히 떨어뜨리게 되는데 이것을 역전리라 부르고 있다. 마이크로 펄스하전에 의한 역전리의 억제는 다음과 같다.

- 종래의 하전방식에서는 코로나 전류를 적게하기 위해 인가전압을 낮추어야만 하였으나 마이크로 펄스하전방식에서는 펄스빈도의 조정으로 인가전압이 떨어지지 않게 코로나 전류를 광범위하게 조정 가능하고 분진의 전기저항율에 따른 역전리가 일어나지 않는 최고의 코로나 전류값으로 운전가능하다.
- 코로나 분포가 균일함으로 인해 코로나 전류의 국소적인 집중이 발생되지 않으며 종래의 하전방식보다 높은 전류에서도 역전리가 일어나지 않는다.

5. 끝 맺 음

본고에서는 집진기의 집진 효율과 여러가지 운전특성면에 있어 가장 큰 영향을 미치는 전원장치의 특성과 경향에 대해 설명 하였다. 집진기의 전원장치는 이미 언급한 바와 같이 DC 하전, Semipulse 하전, Micro-pulse 하전의 3가지로 나눌 수 있는데 그 중에서도 현재의 연구된 결과를 토대로 볼 때에는 Micro-pulse 하전방식(MPC)이 가장 우수한 효과를 나타냄을 알 수 있었다. MPC 방식의 가장 큰 특징에 대해서 정리해 보면

- 펄스폭이 좁고 높은 펄스 피크전압까지 스파크가 발생하지 않으므로 집진기의 운전 상태가 다른 전원 방식보다 안정하다.
- 펄스 피크전압이 높고 폭이 좁기 때문에 대단히 균일한 코로나 분포로 된다. 이 결과 코로나 전류가 흐르지 않는 전류 공백 구역이 EP 내에서 생기지 않아 EP전체가 유효한 집진 공간으로 활용되어 보다 낮은 피크 전압에서 더욱 높은 집진 성능과 효율을 얻을 수 있다.
- 역전리를 억제시킬 수 있다.

이렇게 우수한 특징에도 불구하고 마아크로 펄스하전은 종래의 직류하전과 비교해 전원설비 가격이 높은 것을 들 수 있다. 전원설비는 고압 스위칭 및 고속 스위칭 소자, 충전 및 결합 커패시터 및 펄스 발생용 전원등이 필요하므로 선결되어야 할 과제로서는 전원설비 가격 저감, 신뢰성 확립 등을 들 수 있다.

한편, 현재로서 날로 강화되는 배출 분진 규제치에 대해 단기간에 최소의 투자로 해결할 수 있는 방법은 전원장치 부분에 대한 개선이 최선책 중의 하나가 될 수 있으며, 국내의 시멘트 및 제철설비에서 그 성능이 입증되고 있어 이에 대한 기술개발 및 설비개선은 시간문제라 할 수 있다.