

전기집진 기술 현황

습식 전기집진기를 중심으로

기존의 건식전기집진기에서 제거가 효과적이지 못한 미스트(mist), 유해가스 등의 새로운 대기오염물질의 제거를 위하여 최근의 수요가 증가되는 습식 전기집진기를 중심으로 기술의 현황과 전망에 대해 소개하고자 한다.

송 동 근

한국기계연구원 (dksong@kimm.re.kr)

정 상 현

한국기계연구원 (shjeong@kimm.re.kr)

김 용 진

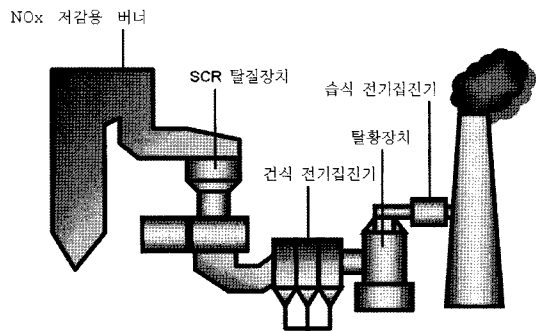
한국기계연구원 (yjkim@kimm.re.kr)

서론

대기중으로 배출되는 입자상 오염 물질을 저감하는 대기오염방지설비 기술로 전기집진기(electrostatic precipitator, EP), 세정기(scrubber), 백 필터(bag filter) 및 회전 관성 분리기(cyclone) 등의 대기오염 방지장치가 개발되어 사용되고 있다. 그런데, 석탄 또는 오일 연소 화력발전소에서 배출되는 다량(시간 당 30만 내지 200만 입방미터 규모)의 배출가스로부터 입자상의 분진 오염물질을 처리하는 집진장치에서는 설치의 용이함, 저렴한 운영비 및 유지비, 높은 제거 효율 등의 장점을 가지는 전기집진기의 적용이 필수적이다. 전기집진기는 집진판의 세정 방식 및 운용 조건에 따라 건식(dry EP)과 습식(wet EP)으로 구분된다. 국내 발전소에 설치, 운전중인 집진기는 거의 건식 전기집진기이며, 최근의 환경규제의 강화에 따른 지속적인 기술개발로, 국내 화력발전소에 설치된 전기집진기의 집진효율은 특정 프로세스를 제외 하고는 대부분이 99%를 상회할 정도의 매우 높은 집진효율을 유지하고 있다.

그런데, 최근의 환경규제 강화가 예상되는 서브마이크론(submicron) 크기의 초 미세먼지와 탈황 및

탈질 장치의 설치와 수입되는 석탄의 저급화에 따라 미스트(mist)를 포함하는 먼지 배출량이 증가하며, 이러한 새로운 오염 물질에 대해서는 건식전기집진기 만으로는 규제 요구를 충족시키지 못하고 있다. 이에 따라 건식 전기집진기의 보완 및 다른 오염방지 설비와의 병행을 통해 제거가 쉽지 않은 오염물질을 제거하려는 노력들이 이루어지고 있다. 그림 1은 최근의 미국에서 설치되는 발전소의 대기오염 방지설비의 개략도인데, 그림에서와 같이 환경오염



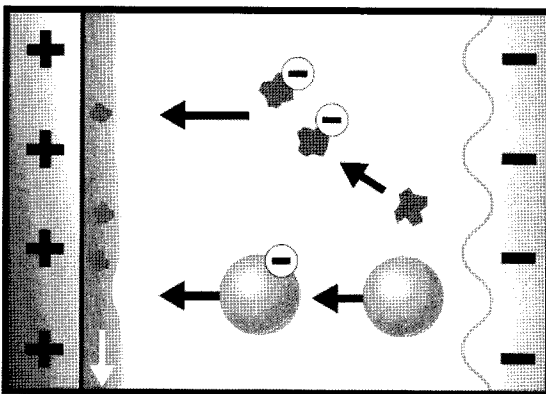
[그림 1] 차세대 발전소 대기오염방지설비 구성도

방지 설비의 구성은 기존에 초기 집진 설비로 사용되던 건식 전기집진기와 탈황 세정기(scrubber) 후단인 마지막 오염 제어 설비로 습식 전기집진기를 사용하는 점이 특징적이다. 이와 같이, 보다 높은 규제를 만족하기 위해 습식 전기집진기의 사용은 더욱 증가할 것으로 보이며, 국내에서는 올해부터 한국코트렐과 한국기계연구원이 공동으로 습식 전기집진기 개발을 본격화 진행 중에 있다. 여기서는 본 습식 전기집진 기술의 현황과 전망에 대하여 기술하고자 한다.

습식 전기집진기의 구성 및 원리

습식 전기집진기는 건식 전기집진기를 구성하는 방전극, 집진판, 고전압 인가 장치에 세정수 공급장치 및 순환장치가 추가되어 구성된다. 습식 전기집진기 내의 오염 물질의 제거 과정은 입자상 오염 물질의 대전, 집진, 제거로 이루어지며, 세정수에 의한 제거를 제외한 대전 및 집진 과정은 건식 전기집진기와 동일하다. 건식 전기집진기에서의 집진판에 부착된 오염물질의 제거를 위해 추타(rapping) 과정 대신, 습식 전기집진기에서는 세정수를 집진판에 공급하여 부착된 오염 물질을 제거한다(그림 2).

- 대전 - 습식 전기집진기로 유입되는 가스에 포함된 입자상 오염 물질은 집진부에 형성된 강력한 코로나에 의해 전기적으로 대전되어 전하를 갖게 된다.



[그림 2] 습식 전기집진기 내의 오염 입자 제거 과정

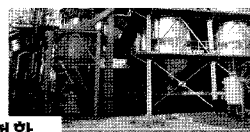
- 집진 - 대전된 입자상 오염 물질이 집진부를 통과하면서, 방전극과 집진판 사이에 형성된 전기장에 의해 집진판으로 이동하여 포집된다.
- 제거 - 집진판에 세정수를 공급하여, 포집된 분진을 제거한다. 세정수는 습식 전기집진기 운전 중 연속적으로 공급되기도 하며, 세정수 분사에 의해 발생하는 미스트에 의한 효율 저감을 고려하여 주기적으로 집진기 운전을 중지하고 공급하기도 한다.

집진판에 연속적으로 공급되는 세정수 자체가 집진극 역할을 할 수 있어, 비전도성이며 내부식성이 좋은 재료로 집진판을 구성할 수 있는 장점이 있다. 이 때, 집진판으로 공급되는 세정수의 전기 전도도(electric conductivity)는 습식 전기 집진기의 성능에 큰 영향을 줄 수 있다. 전기 전도도가 낮은 경우, 세정수 표면과 집진판 사이에도 전위차가 생겨 습식 전기집진기의 방전 및 집진 성능 저감 요인이 된다. 다양한 전기 전도도를 갖는 액체를 세정수로 사용한 실험 결과, 세정수의 전기 전도도가 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하인 경우, 집진 효율의 저감이 나타났다(Wadenphol and Peukert, 1997; 일반적인 먹는 물의 전기 전도도는 약 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이다).

세정수의 공급에 따른 집진부의 습도 증가로 인해 증가된 수분이 입자상 오염 물질의 표면에 응축하여 분진의 성장을 초래하고, 입자상 오염 물질의 크기 증가로 인해 입자 하전율의 증가와 그에 따른 집진 효율의 증가가 이루어진다. 아울러 습도 증가에 의한 가스 온도의 강하는 전기집진기의 안정적인 운전을 가능하게 해 준다.

습식 전기집진기의 장·단점

습식 전기집진기는 서브마이크론(sub-micron) 미세 입자, 중금속 입자, 안개(mist), 연기(fume), 다이옥신(dioxin), 푸란(furan) 등의 배출 제어에 뛰어난 성능을 보인다. 특히 운용 비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 세정기, 섬유 필터 (fabric filter), 건식 전기집진기(dry electrostatic precipitator) 등의 오염방지 설비 등의 집진 효율은 청정화 대상 입자의 물리, 화학적 물성에 따라 민감한 반면, 습식 전



기집진기는 다양한 영역의 오염방지 설비에 적용이 가능하며, 청정화 대상 입자의 물리, 화학적 물성에 관계없이 서브 마이크론 입자의 제거에 효과적이다.

습식 전기집진기는 제거 대상 분진의 농도가 높은 경우에는 제거 효율이 높지 않아, 독립적인 오염방지 설비로 사용하기에는 처리 용량에 제약이 따른다. 습식 전기집진기 이외의 대기오염방지 설비로 처리가 용이하지 않은 오염 물질을 처리를 위해서, 습식 전기집진기를 다른 설비의 후단에 설치하여 오염 물질의 농도를 저감시킨 후 처리하는 방식의 하이브리드(hybrid) 구성이 널리 적용되고 있다. 특히 세정기 후단에 습식 전기집진기를 설치하여 운용하는 구성이 대표적이라 할 수 있다.

습식 전기집진기 집진판의 세정수 필름은 자체적으로 접지극 역할을 하여 분진을 포집하며, 포집된 입자와 물 사이의 높은 결합력으로 인하여 미세입자에 대하여 매우 우수한 포집 특성을 보인다. 습식 전기집진기는 고 전기저항 분진이 포집되더라도 물에 의하여 집진판이 재생되기 때문에 재비산이 발생하지 않고, 건식 전기집진기에 비하여 매우 높은 코로나 전력을 인가할 수 있어 입자의 하전을 매우 크게 증가시키고 서브미크론 크기의 미세 입자들의 포집 효과를 극대화 할 수 있다. 습식 전기집진기는 가스의 온도를 감소시켜 가스상의 유해성분을 입자상으로 응축 변환시키기 때문에 점착성(sticky) 입자,

soluble acid 입자 등의 포집에 적합하며, 집진극의 재질을 PVC, PP, Plastic 등의 비전도성 내 부식 재질로도 제작이 가능하며, 열악한 화학적인 공정에서 부식 등에 대한 저항성이 높은 장점이 있다.

하지만, 처리 가스의 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. 일반적인 금속 관형의 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 주 원인이 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"의 원인이 된다. 습식 전기집진기 운전 시, "spark-over" 현상은 집진 효율 감소의 원인이 되어 오염방지 설비에서 "blue haze"가 발생하는 문제를 야기한다. 이러한 "spark-over" 현상을 막기 위하여 세정수 분사 시, 인가 전압을 감소시키거나

<표 1> 세정기, 백 필터, 건식 전기집진기와 습식 전기집진기의 비교

	세정기	백 필터	건식 전기집진기	습식 전기집진기
초미세 입자		○	○	○
액체상 입자	○			○
중금속 입자				○
다이옥신과 furan			○	○
청정 가시도				○
낮은 가스 온도/높은 이슬점	○			○
점착성 입자	○			○
높은 효율	○	○	○	○
가스 흡착 필요	○			○
고 비저항 입자	○			○
낮은 에너지 소비			○	○
낮은 유지 비용			○	○

고전압 인가를 정지하는 운전 조건으로 인해 습식 전기집진기의 효율을 떨어뜨리고 연속적인 운전을 보장할 수 없게 된다. 산성 입자의 부착에 따른 집진판의 부식 문제는 비 연속 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.

습식 전기집진기와 다른 오염방지 설비와의 비교를 표 1에 나타내었다.

습식 전기집진기를 이용한 오염 물질의 제거

• 질소 산화물 (NOx)

코로나 방전을 통해 생성된 OH, HO₂, O 등의 산화 라디칼은 NOx를 질산(HNO₂, HNO₃)으로 변화시키며, 질산은 암모니아(NH₃)에 의해 중화된다. 이 과정을 통해 생성되는 질산암모늄(NH₄NO₃, NH₄NO₂)는 일반적인 전기집진기에 의해 쉽게 제거할 수 있다(Civitano et al., 1992; Maezawa & Izutsu, 1993). 습식 전기집진기에 공급되는 수분으로 인해 생성되는 OH 및 HO₂ 라디칼을 증가시킬 수 있어, NOx 제거에 습식 전기집진기가 이용되고 있다. 세정수 필름이 형성된 전기집진기를 이용하는 경우, NOx 제거 효율이 크게 향상되었으며(NO₂ by 62% and NOx by 42% with positive corona), NOx 제거에는 음극 방전보다는 양극 방전이 더 효과적인 것으로 나타났다(Mizuno et al., 1995; Dors et al., 1998; Yang, 1999).

• 다이옥신 (Dioxin)

소각을 이용한 폐기물 처리에서 발생하는 다이옥신 제거를 위해 일반적으로 후처리 연소기(after burner)가 사용되며, 800℃ 이상에서 수초간의 연소 과정을 거치는 것이 매우 효율적인 다이옥신 제거 방법으로 알려져 있으나, 연소기 후단에서 가스 냉각에 의해 생성되는 다이옥신은 대기 중으로 배출된다. 가스 온도가 낮아지면 다이옥신은 입자상 물질에 흡착된 상태로 배출되어 전기집진기를 이용한 제거를 통해 대부분의 제거가 가능하나, 일부 다이옥

신 성분은 200 ~ 300℃의 작동 온도를 갖는 전기집진기 후단에서 새로이 생성되는 것으로 알려져 있다(Kasai et al., 1997). 세정기와 습식 전기집진기를 이용한 다이옥신 제거 효율이(다이옥신 농도를 포함한) 매우 광범위한 작동 조건에서 90% 이상으로 나타났다(후처리 연소기 이용 시 99.7%), 다이옥신 생성의 주 원인인 HCl의 제거 효율이 98.2 ~ 99.8%에 이르는 것으로 보고되었다(Kim et al., 2000).

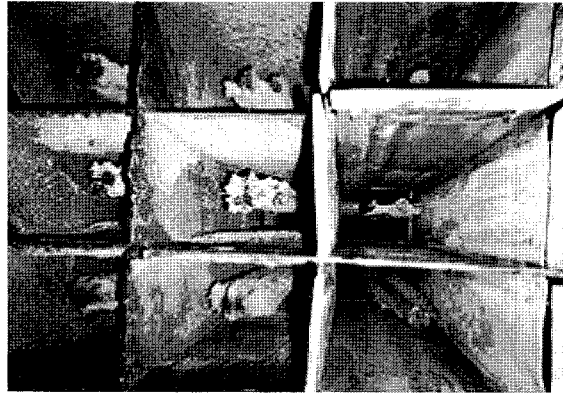
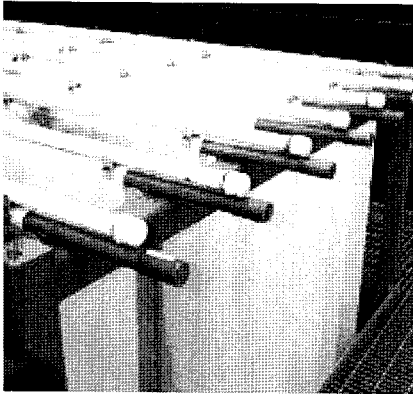
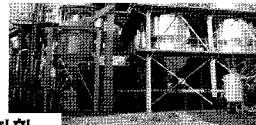
• 황산 미스트(Sulfuric Acid Mist Plume)

처리 가스에 포함된 SO₂는 세정기를 이용해 효과적으로 제거가 가능하며, 산화된 SO₃는 바나듐(vanadium) 촉매를 이용하여 산화시킬 수 있다. 세정기 세정수와와의 접촉에 의해 생성된 황산(H₂SO₄) 미스트 제거를 위하여 습식 전기집진기가 이용된다. 황산 미스트는 직경 1 마이크로미터 이하의 droplet 형태로 존재하며, 금속에 대한 강한 부식 작용을 일으켜 건식 전기집진기를 이용한 제거가 용이하지 않아 습식 전기집진기를 이용한다.

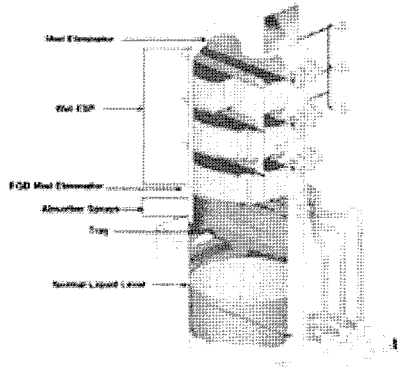
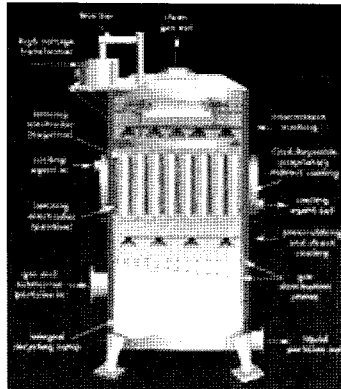
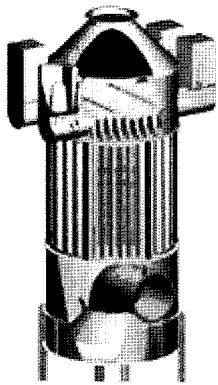
습식 전기집진기 기술의 국내외 현황

국외에서는 저급의 석탄을 사용하는 발전소의 증가로 인해 2000년 초반부터 세계 각국에서 습식 전기집진기 관련 기술의 선점을 위한 개발 경쟁이 치열하게 전개되었다. 습식 전기집진기 운영을 통해 파악된 세정수의 bead화 현상, 집진판에 dry spot의 생성, 세정수의 폐수처리 등의 문제점들이 있으나, 발전소 FGD 후단의 SO₃ 미스트의 대량 배출 방지를 위한 가장 매력적인 방법으로 인식되어 지속적인 개발이 이루어지고 있는 실정이다. 최근에는 세정수 연속 공급 운전을 위해 집진판으로 멤브레인을 사용하여, 멤브레인 표면에서의 모세관 현상을 통해 세정수의 안정적인 공급을 구현하여 pilot 운전 단계에 있다(Bayless et al., 2004; 그림 3). 이 밖에도 많은 회사에서 높은 효율의 모듈화된 습식 전기집진기를 생산 판매하고 있는 실정이다(그림 4).

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 대



[그림 3] 멤브레인을 집진판으로 이용한 습식 전기집진기



a) SonicKleen WESP (Turbo Sonic Co.) b) Condensing WESP (Croll-reynolds Co.) c) Integrated FGD/WESP (B&W Co)

[그림 4] 해외 생산, 판매되는 습식 전기집진기

<표 2> 국내 · 외 습식 전기집진기 연구 개발 동향

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
한국코트렐	수평형 습식 전기집진기 개발	제진 전용으로 국내설치
서울사프	수직형 습식 전기집진기 개발	제진 전용으로 국내설치
한국 EP	수직형 습식 전기집진기 개발	제진 전용으로 국내설치
Ohio Univ.(2004)	Membrane 집진판 습식 전기집진기 개발	Pilot 실험 단계
Southern Env. Co.	MWESP 실제 적용 가능성 연구	실적용 실험 후 가능성 확인

한 설계 개념의 개발이 주로 수행되었으며, 가장 핵심기술인 세정수 유동 균일화 기술에 대한 부분의 연구는 미미한 실정이다. 전세계적으로 습식 전기집진기의 적용이 증가하는 추세이나, 현재 국내 업체

들의 기술 부족으로 인해 세계 시장에서의 경쟁력은 취약한 상황이다.

국내 · 외 습식 전기집진기에 대한 연구 개발 동향을 표 2에 정리하였다.

향후전망 및 결론

전기집진기는 집진 설비 시장의 성장과 더불어 지속적인 증가세에 있다. 2005년에 33억 달러이던 전세계 전기집진기 시장은 2006년 32억 달러로 줄어들었으나, 2007년에는 39억 달러로 다시 증가하였다. 이러한 시장 규모의 변동은 일부 거대 프로젝트의 영향에 의한 것이다. 또한 집진기를 원격으로 모니터링하고 관리, 운영하는 능력은, 추후 공급 산업계의 팔목할만한 시장 점유를 가능하게 할 것이다. 최근의 미국에서 보고된 2010년의 시장 규모를 표 1에 나타내었다. 중국의 전기집진기 시장 규모가 그 뒤를 잇는 네 나라의 규모를 합한 것보다 많을 것으로 예상하고 있다. 중국이 신규 집진기 시장의 30% 이상을 점유할 것으로 예상되지만, 기존 집진 설비에 대한 부품 및 서비스 영역에서는 단지 5%에 불과한 것으로, 개보수 및 서비스 관리 기술의 중요성이 증가할 것이다.

또한 최근의 가장 큰 다국적 회사들 중 일부가 시장에 진입하고 있다. GE와 Siemens는, 기존 집진기의 수리와 업그레이드 분야의 선두 주자인 BHA와 집진기 완제품 시스템의 주된 공급자인 Wheelabrator를 각각 매입했다. 중국 공급자들의 출현과 거대한 국제적 회사의 시장 진입이라는 두 요인은 시장을 변화시켜 나가고 있다. 당분간은 새로운 집진기 시장은 완

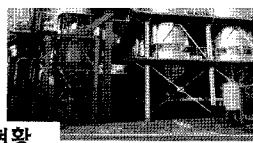
만한 성장세를 보이겠지만, 수리 및 서비스 시장은 팔목할만한 성장을 이룰 것으로 예상된다.

그리고 국내의 배출분진 농도의 규제치가 50 mg/Nm³인데 반하여 WTO의 기준치 30 mg/Nm³ 이하로 강화될 추세이며, PM10 및 PM2.5 등으로 제어 대상 분진도 인체에 유해한 미세분진으로 규제가 강화되고 있다. 특히 황함유 배가스 배출에 따른 SO₃ 미스트 및 미세 입자화 변환 등에 따른 전기집진기에서의 집진효율의 저하를 유발시키는 원인이 될 수 있으므로, 이에 대한 습식전기집진 등의 대응기술의 개발이 시급하다.

현재 국내 전기집진기의 핵심 구성품인 고압 펄스 및 고주파 전원공급장치, 방전전극 및 절연애자 등의 경우 대부분이 수입에 의존하고 있으며, 기존의 기술적 우위에 있는 전기집진기 기술의 지속적인 경쟁력 우위를 압박하고 있는 실정이다. 따라서, 미래 첨단 기술에 대응하고 기존 발전소의 고효율 및 공정개선에 적용할 수 있는 장치에 대한 구성품, 부품 및 소재 기술의 개발로, 지속적인 비교우위 유지와 함께, 수입대체는 물론 중국, 인도 및 개발도상국의 수출을 통한 국부창출 및 기업육성이 시급한 분야이다. 또한 기존의 단순한 건식전기집진 보다는 초고효율의 집진효율과 동시에 가스상 물질을 동시에 저감시킬 수 있는 습식 전기집진기의 복합 집진기술 등에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

<표 3> 2010년 세계 집진기 시장 예상 규모

건식 시스템 (백만 달러)		습식 시스템 (백만 달러)	
국가	2010	국가	2010
중국	1,129.50	미국	340.93
미국	513.26	중국	101.26
인도	278.72	일본	42.90
독일	117.30	브라질	26.79
일본	115.57	인도	21.98
대한민국	82.38	대한민국	20.34
러시아	79.69	독일	18.07
폴란드	78.73	캐나다	14.52
호주	68.73	이탈리아	13.53
브라질	59.92	러시아	11.21



참고문헌

1. Robert Mcllvane(2006) The future of electrostatic precipitators, Pollution Engineering, November, 18.
2. Wadenphol, C. & Peukert, W. (1997) Untersuchungen zum Betriebsverhalten eines gespulten Rohrelektrofilters. Chem-Ing-Tech 69, 345-349.
3. Mirosław Dors, Jerzy Mizeraczyk, Tadeusz Czech & Massimo Rea (1998) Removal of NO_x by DC and pulsed corona discharges in a wet electrostatic precipitator model. Journal of Electrostatics, 45, 25-36.
4. L. Civitano, E. Sani, in: M. Capitelli, C. Gorse (Eds.) (1992) Plasma Technology. Fundamentals and Application, Plenum Press, New York.
5. A. Maezawa, M. Izutsu (1993) NATO ASI Series, vol. G 34, Part B 47.
6. Mizuno, A., K. Shimizu, T. Matsuoka, S. Furuta (1995) Reactive Absorption of NO_x Using Wet Discharge Plasma Reactor. IEEE Trans. Ind. Appl., 31(6), 1463-1467.
7. Chen-Lu Yang (1999) Pulse-Energized Wet Tubular Electrostatic Precipitator for NO_x 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. Kasai, E., K. Shibata and Y. Waseda (1997) A Behavior of Dioxin in the Combustion Process, Kinzoku, 67, 763-774 (in Japanese)
10. 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.
11. J. Bayless, M. Khairul Alam, Roger Radcliff, and John Caine (2004) Membrane-based wet electrostatic precipitation. Fuel Processing Technology, 85, 781-798. 