

# 코로나 방전을 이용한 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 국내외 기술동향



송 영 훈

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '78-'83 한양대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '84-'86 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '89-'94 미국 Pennsylvania State Univ. 기계공학과(박사)
- '86-'89 한국기계연구소 연구원
- '94-현재 한국기계연구원 선임연구원



김 석 준

(KIMM 열유체시스템연구부)

- '72-'76 서울대학교 공과대학 기계공학과(학사)
- '82-'85 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '88-'93 한국과학기술원 기계공학과(박사)
- '80-현재 한국기계연구원 책임연구원

## 1. 서 론

세계 각국의 환경규제는 날로 강화되고 있어, 이에 대응하는 기술수요 즉, 환경관련기계의 수요가 전 세계적으로 늘고 있다. 이러한 가운데, 아황산가스, NOx, 악취, 이산화탄소 등을 한 시스템에서 동시에 처리하는 방전을 이용하는 저온 플라즈마 공법은 최근 많은 관심을 국내외에서 모으고 있다. 이 중에서도 플라즈마 탈황/탈질 공법은 80년대 초부터 미국, 일본, 이태리, 러시아 등지에서 본격적으로 개발되기 시작한 새로운 기술로, 이태리에서는 대규모의 파이롯트 플랜트가 현재 운전중에 있어 실용화를 눈 앞에 두고 있다. '91년도에 일본의 기계공업연합회 및 에너지종합공학 연구소에서는 기술평가사업을 통해 플라즈마 탈황/탈질 공법의 기술 및 경제성을 평가하였는데,<sup>(1)</sup> 본 공법은 설치비용 및 공간이 기존의 공법에 비해 절반 이하이고, 기설치된 오염배출원 규모에 상관없이 적용하기가 용이해 향후 기존의 탈황 및 탈질 공법에 대체할 유망한 기술로 평가되었다.

본 공법의 기초기술은 코로나 방전화학, 전자기 유동, 고전압 펄스발생기술 등으로 국내에 널리 보급된 기술은 아니나, 일부 기초기술을 선진 기술국으로부터 도입하여 실용화를 위한 연구가 국내에서도 활발히 수행되고 있다. 현재 국내에서는 한국기계연구원, 한국중공업, 한국코트렐(주), 인하대, 신성(주) 등이 본 공법을 개발하고 있으며, 본 기술과 원리가 유사한 전자빔 공법을 삼성

중공업이 개발하고 있다. 본 고에서는 이와 같이 최근 많은 국내 연구기관에서 개발하고 있는 탈황/탈질 공정에 대하여 경제성 및 기술적 과제 등을 소개하고자 한다.

## 2. 탈황/탈질 시스템 개발의 배경

### 2.1. 국내외 오염물질 규제정책

우리나라 대기환경기준에 의해 규제를 받는 7 가지 오염물질 (아황산가스, 먼지, NOx, 오존, 일산화탄소, HC, 및 Pb) 가운데, 아황산가스는 산성비, 호흡기질환의 요인으로, NOx는 스모그 (Smog) 를 야기시키는 것으로 알려져있다. 우리나라는 이들 오염물질에 대한 저감시책의 하나로 '99 년도 까지 3단계에 걸쳐 배출허용기준을 강화시키고 있어 배연탈황/탈질설비에 대한 수요가 급증하고 있다. 예를 들면 향후의 석탄화력발전소에는 배연탈황시설의 의무화가 예정되어 있어, 2001 년까지 화력발전소에 설치될 배연탈황시설에 2조 5천억 원 (총 32기, 15,160 MW)이 투입될 것으로 예상되고 있다. 한편, 세계 각 국은 아황산가스 및 NOx에 대한 규제기준이 날로 엄격해지는 추세에 있고, 이에 따른 배연탈황, 탈질설비의 설치규모도 증가하고 있다. 일례로, 1990년도까지 전세계 화력발전소에는 배연탈황설비가 총 147 GW 규모가 설치되어 있는 데, 향후 10년 동안에만 설치될 배연탈황설비는 지금까지의 설치규모와 비슷한 129.1 GW가 예상되고 있다.

표1은 대규모 석탄화력발전소 (110 MW 이상) 에 적용되는 아황산가스 및 NOx에 대한 국내외 오염배출기준을 제시한 것으로, 한국의 배출허용 기준치('95, '99 년도기준)가 선진제국의 기준치 ('90년도기준)에 비해 상당히 높은 것을 나타내고 있다. 우리나라와 같이 인구밀도가 높은 유럽제국 들은 각 국의 규제치를 공동 협의체를 통해 정하고 있는 데, 표 1에서 제시된 바와 같이 매우 엄격한 규제치를 두고 있다. 일본은 60년대 부터 강

력한 규제치를 정하고, 지난 30여년 간 몇 단계를 거쳐 이를 지속적으로 강화해오고 있다. 일본의 경우 규제치는 전국적으로 통일된 규제치가 적용 되는 것이 아니라 지역 또는 사업장마다 각 기 다른 규제방식과 규제치를 정하고 있다.

표 1. 국내의 규제기준치 (산소량 6% 기준)

|           | SO <sub>2</sub> ppm | NOx ppm |
|-----------|---------------------|---------|
| 한국('95년도) | 500                 | 350     |
| 한국('99년도) | 270                 | 350     |
| EC 국가     | 150                 | 100     |
| 일본        | -                   | 210-320 |
| 미국        | 280-565             | 305-380 |

지금까지 비교적 대기오염 규제치가 엄격하지 않았던 미국의 경우 부시 전 미국대통령이 1990 년도에 공기청정법안 (Clean Air Act)을 발효시켰 는 데, 이 법안은 2000년도까지 두 단계에 걸쳐 약 50%의 아황산가스 및 NOx 배출량의 감소를 규정하고 있다. 본 법안의 핵심은 배출규제방식이 종래의 배출농도중심에서 국가 총량규제로 규제 방식이 변경되었다는 점이다. 그림 2는 이 법안의 개념을 아황산가스의 배출의 경우를 예를 들어 나타낸 것으로, 1995년도, 2000년도에 각 각 국가의 총체적인 배출량을 단계적으로 줄이고, 2000 년도에는 신규배출원으로 인한 배출의 증가를 일체 허용하지 않고 있음을 보여주고 있다. 따라서 향후 각 사업장의 탈황시설은 아황산가스가 거의 배출되지 않는 고효율의 성능이어야함을 이 법안 은 요구하고 있는 것이다.

이상에서 살펴본 바와 같이 세계 각 국의 법적 인 아황산가스 및 NOx의 규제치는 향후 강화되는 추세가 명백하며, 우리나라에서도 미국의 경우 와 같은 총량규제가 논의되고 있는 상황이므로 대표적인 대기오염물질인 아황산가스와 NOx를 동시에 한 시스템에서 제거하는 기술인 플라즈마 탈황/탈질 기술의 확보가 시급한 실정이라고 할 수 있다.

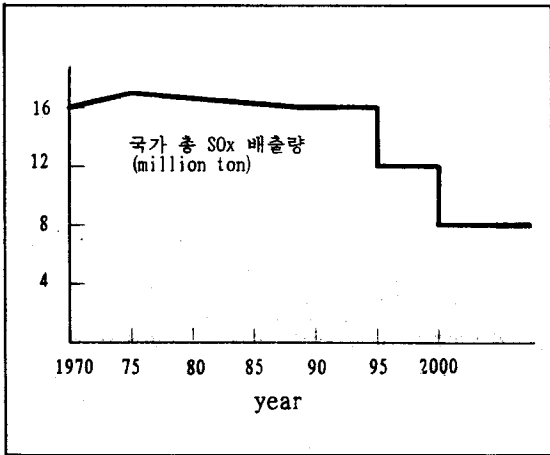


그림 2. 미국 공기청정법안에 따른 아황산가스 국가 총배출량 년도별 추이

## 2.2. 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 기술 및 경제성 평가

기존의 배연탈황 및 탈질공정은 각 각 습식법 (Wet-scrubber)과 촉매를 이용한 선택적 환원법 (SCR)이 대표적이며, 오염배출원의 특성에 따라 이들 두 공정이 동시에 설치되거나 한가지 공정만 선택적으로 설치되고 있다. 이들 기존기술은 기술선진국에서는 안정화된 기술로, 대표적인 습식공정의 제작사는 GE, Mitsubishi, Babcock-Hitachi, Chiyoda 등이 있으며, 국내의 여러 중공업회사가 이들과 기술제휴를 하고 있다. 이들 기존기술의 단점으로는 1) 습식 탈황시설의 경우 폐수배출로 인한 2차 오염 문제 2) 각 기 별개인 탈황 및 탈질 공정의 동시 설치시 많은 초기 투자가 필요 3) 중소규모 사업장에 적용이 어려움 등이 제기되어 있다.<sup>(1)</sup>

한편, 플라즈마 탈황/탈질 동시공정 시스템의 장점은 1) 설치비가 기존의 탈황/탈질공정에 비해 절반이하 2) 건식공정이므로 2차 폐수의 문제가 없으며, 처리후 배출물은 비료로 활용 3) 사업장 규모에 상관없이 설치가 용이 4) 탈황/탈질 이외에도 악취 및 유해유기물의 제거가 가능하다 등을 들 수 있다. 현재 본 기술의 최대 단점은 플라

즈마 발생에 필요한 전력소모로 인한 운전비가 높다는 것을 들 수 있는 데, 80년도 후반 이태리에서 보고된 자료에 따르면,<sup>(2),(3)</sup> 화력발전소에 본 공정을 적용할 경우 전력소모는 총 발전량의 약 5% 정도로 평가되어 있다. 그러나 최근의 일본기계공업연합회 자료에 의하면,<sup>(1)</sup> 향후 전력소모는 이태리의 결과보다 1/2 내지 1/3 수준으로 감소될 것으로 예상되어 있어, 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 운전비용은 매우 빠르게 저감될 것으로 예측되고 있다. 그림 1은 250 MW급 발전소의 탈황/탈질에 소요되는 초기연도 연간경비를 기존의 공법, 전자빔 공법 그리고 플라즈마 탈황/탈질 공법의 경우에 따라서 예측한 일본의 자료를 나타낸 것으로, 연간경비에는 운전비용 (전기, 촉매, 암모니아 사용료)과 설비투자에 대한 감가상각비를 고려하였다.

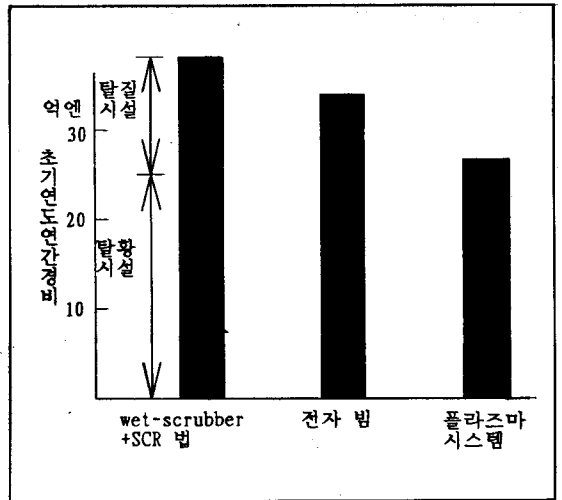


그림1. 공정별 초기연도 연간경비 비교표

그림1에서 볼 수 있듯이 플라즈마 탈황/탈질 시스템을 운영하는 데 필요한 연간경비는 현재의 높은 운전비용을 고려하더라도 여타의 공법에 비하여 상대적으로 적은 설치비용 때문에 상당히 저렴함을 알 수 있다. 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 연간경비의 구성은 감가상각비가 40%, 암모니아 및 전력사용료가 60% 가량으로 되어 있어 운

전정비의 절감이 향후 최대의 기술개발과제로 대두되어 있다.

한편, 위에서 제시된 반응과정과 유사한 과정을 거치는 탈황/탈질공정으로 전자빔공법이 1970년도부터 일본, 미국, 독일, 러시아 등지에서 개발되어 왔다. 플라즈마 이용기술과 전자빔 공법의 근본적인 차이점은 반응에 참여하는 전자에너지의 크기인 데, 플라즈마 반응로에서는 1에서 20 eV 정도 그리고 전자빔에서는 약 1 MeV의 에너지를 갖는 전자들이 방출된다. 한편, 탈황/탈질의 래디칼생성에 필요한 전자에너지는 약 5에서 20 eV 정도로 밝혀져 있어, 전자빔공법은 반응에 필요한 전자의 에너지에 비해 지나치게 큰 전자에너지를 방출하고 있음을 알 수 있다. 전자빔 공법은 고출력 전자빔 발생기에 대한 안전설비 (shielding)의 추가로 인한 설치비의 증가가 단점으로, 플라즈마 이용기술은 이 같은 단점을 피하기 위해 개발된 기술로 알려져 있다.<sup>(4)</sup>

### 3. 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 원리 및 구성

#### 3.1. 시스템의 원리

플라즈마 탈황/탈질 기술은 코로나 방전을 이용하는 기술로, 우리 주위에서 흔히 볼 수 있는 코로나 방전현상의 한 예로 번개를 들 수 있다. 코로나 방전현상을 이용한 기술로는 전기집진기, 오존발생기, 전자복사기 및 플라즈마 탈황/탈질 기술 등이 있는데, 이중 앞서의 세가지 기술은 코로나 방전시 발생하는 이온을 이용하는 기술로, 그리고 플라즈마 탈황/탈질은 전자를 이용하는 기술로 분류된다.<sup>(5)</sup> 본 절에서는 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 원리인 코로나 방전과 탈황/탈질을 수반하는 방전화학과정을 간단히 소개하기로 한다.

그림 3은 여러종류의 코로나 방전 가운데 플라즈마 탈황/탈질 시스템에서 주로 이용되는 양극 (positive) 코로나의 종류를 나타낸 것으로, 양극

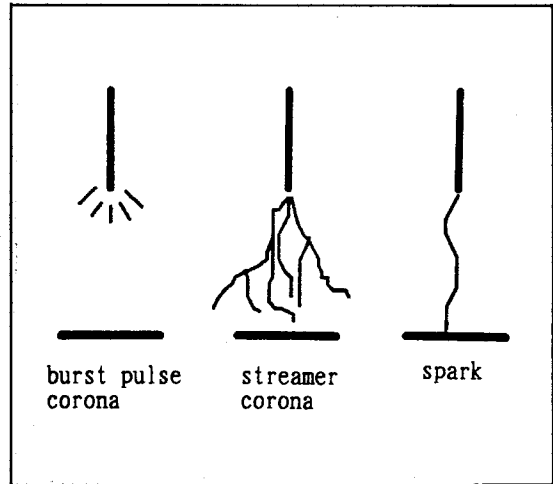


그림 3. 양극 코로나의 종류

코로나란 발광현상이 양극에서 시작되어 음극 (negative) 방향으로 진행되는 경우를 말하며 이의 반대 경우가 음극 코로나이다. 코로나라는 말은 라틴어로 왕관이라는 뜻으로 발광형태가 왕관과 같다고 하여 그 이름이 붙여졌다. 코로나 방전시 방전된 전기에너지는 기체분자를 전자와 이온으로 분리시키는 데, 분리된 전자와 이온은 재결합을 하게되고 이때 높은 에너지준위로부터 낮은 에너지준위로 전자에너지가 이동하면서 푸른 빛을 (실제로는 자외선을 포함) 방출한다. 기체분자가 전자와 이온으로 분리되어 국부적으로는 극성을 갖으나 전체적으로는 중성인 상태를 가리켜 물리학에서는 플라즈마 분위기라고 부르고 있다. 기체가 국부적으로 극성을 갖기 위해서는 전기에너지뿐만 아니라 고온에 의해서도 가능한 데, 대표적인 예로 태양을 들 수가 있다. 플라즈마 탈황/탈질 반응기내의 플라즈마는 고온에서 비롯된 것이 아니기 때문에 고온 플라즈마와 차별을 두기 위해 저온 플라즈마로 분류한다. 그림 4는 저온 플라즈마 반응로의 한 예로, 한국기계연구원에서 제작된 소형 플라즈마 반응로의 단면을 찍은 사진이다. 반응로는 원통형이고 중심에 전극선 (wire)이 있는데, 코로나 방전으로 인해 전극선에서 방출된 보라색의 빛을 보여주고 있다.

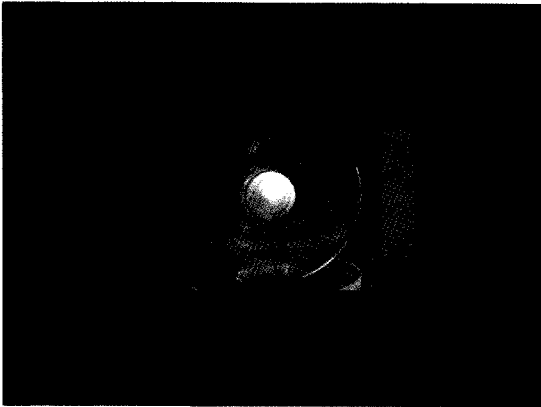


그림 4. 플라즈마 반응로에서의 코로나 방전

양극 코로나는 전극간의 전장강도 (Electrical Field Intensity: V/cm)가 강해짐에 따라 즉, 같은 전극간의 거리가 유지될 때 전압차이가 커질 수록 버스트 펄스 (Burst pulse), 스트리머 (streamer), 그리고 스파크로 이행된다. 이 가운데, 플라즈마 탈황/탈질 시스템은 스트리머 코로나만을 사용하는 데, 이유는 그림 3에서 볼 수 있듯이 양극과 음극의 전극공간에 발광하고 있는 구역이, 즉 화학반응에 필요한 에너지를 갖는 전자의 존재 구역이 다른 종류의 코로나보다 광범위하여 탈황/탈질을 위한 화학반응 공간이 상대적으로 넓기 때문이다. 일반적으로 양극 코로나는 음극 코로나에 비하여 안정적 (stable)이므로 스파크로 이행될 가능성이 적어 플라즈마 탈황/탈질 시스템에 사용되는데, 이와는 반대로 전기집진기에서는 입자의 하전에 상대적으로 유리한 음극코로나를 일반적으로 사용하고 있다.

코로나 방전시 방출된 전자들은 산화력이 강한 OH, O 등의 래디칼을 만들어 공해물질인 아황산가스, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, VOC (Volatile Organic Compound)등을 산화시켜 다른 중간물질로 변환시키는데, 이러한 래디칼을 통한 산화반응속도는 안정된 화합물간의 반응에 비해 수 천, 수 만 배 이상 빠르다고 알려져 있다. 래디칼에 의해 생성된 중간물질은 산성이 강한 황산, 질산 등인데, 이 같은 강산성의 중간물질의 처리를 위해 암모니아와 같

은 알칼리성 중화제를 이용하여 최종적으로는 중성을 갖는 비료입자가 플라즈마 탈황/탈질 시스템에서 배출되도록 한다. 이상의 탈황/탈질과정을 요약하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

1.  $O_2, H_2O + e \rightleftharpoons OH, O, HO_2$   
: 래디칼 생성
2.  $SO_x + OH, O, HO_2 \rightleftharpoons H_2SO_4$  (aerosol)  
: 산화반응  
 $NO_x + O_2, O \rightleftharpoons NO_2, N_nO_m$   
: 산화반응  
 $NO_2 + OH \rightleftharpoons HNO_3$  (aerosol)
3.  $H_2SO_4, HNO_3 + NH_3 \rightleftharpoons (NH_4)_2SO_4$   
 $NH_4NO_3$   
: 중화반응
4.  $(NH_4)_2SO_4 + NH_4NO_3 \rightleftharpoons (NH_4)_2SO_4 \cdot 2NH_4NO_3$   
(fine particle)  
: 최종산물

이상의 반응은 플라즈마 반응기에서 일어나는 반응중 실험을 통해 잘 알려진 것만을 제시한 것으로, 실제로 가능한 반응은 이외에도 수 없이 많을 뿐만 아니라 그러한 반응이 밝혀져야 반응기의 보다 정확한 성능예측이 가능하다고 한다.

### 3.2. 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 구성

그림 5는 기계연구원에 건설 예정인 실험용 플라즈마 반응기의 개략도를 (시간당 가스처리량: 1500 Nm<sup>3</sup>) 나타낸 것으로 1) 배연가스를 얻기 위한 연소로, 2) 배연가스 온도를 조절하기 위한 열교환기, 3) 플라즈마 반응기, 4) 전기집진기 등으로 구성되어 있다. 이 밖에 그림에 나타나지 않은 주요 구성요소로는 나노초컨드 펄스발생기, 암모니아 혼합기 및 각종 계측기 등을 들 수 있다. 본 시스템의 규모는 약 0.5 MW급 발전소에서 배출되는 배연가스를 처리할 수 있는 크기로, 본격적인 파이롯트 플랜트를 (10 MW급 이상) 실제 배출사업장에 건설하기 이전에 각종 엔지니어링

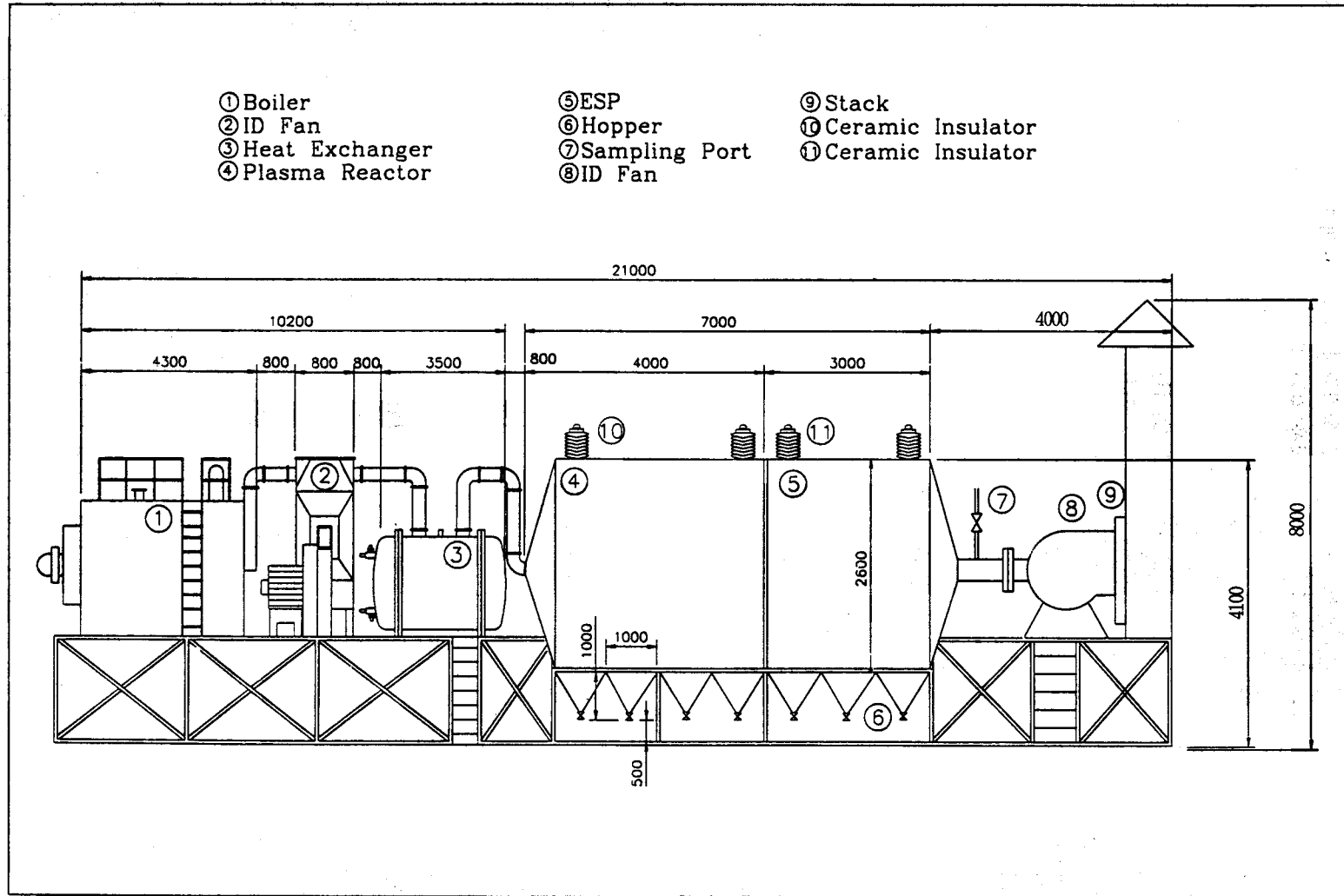


그림 5. 0.5 MW DeSOx/DeNOx SYSTEM With Plasma Reactor

기술을 확보하기 위한 목적으로 설계되었다. 본 절에서는 앞에서 언급한 방전화학반응을 실제로 수행하는 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 주요 구성 부품인 반응기와 펄스발생기에 관하여 기술적인 특성을 소개하기로 한다.

a) 플라즈마 반응로

플라즈마 반응기의 형상은 그림 6 및 7에서 제시된 바와 같이 wire-cylinder 혹은 wire-plate 형식으로 구분된다. 그림 6의 wire-cylinder 형식의 플라즈마 반응기는 원통관 중심에 가는 전선이 가로지르고 원통은 접지되어 있다. 코로나 방전은 전선에서 발생하는 데, 이 때 전선에 양극(positive)을 걸어주고 관은 접지를 시켜 positive pulsed streamer corona를 발생시키도록 한다. 한편, 그림 7과 같이 여러 가닥의 전선 및 접지평판으로 구성된 wire-plate 형식의 플라즈마 반응기를 이태리에서는 사용하였는데, 이 같은 형식은 상용화

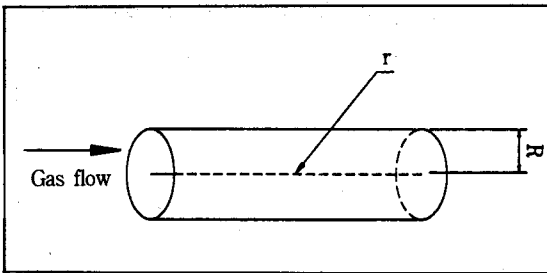


그림 6. Wire-Cylinder형 반응기

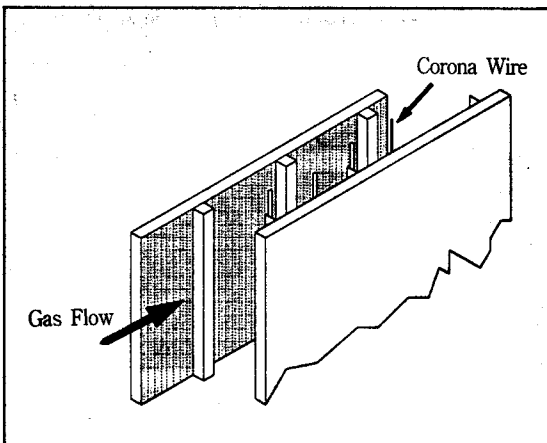


그림 7. Wire-Plate형 반응기

된 전기집진기와 형태가 매우 유사하다. 전기집진기의 경우 소형에서는 wire-cylinder 형식이, 그리고 상용화된 대형 집진기에서는 wire-plate 형식이 주로 사용되는데, wire-plate 형식은 집진된 입자들을 래핑(추타)하고 청소하는 데 상대적으로 장점이 있다. 이태리에서 플라즈마 반응기를 wire-plate 형식으로 채택한 이유는 wire-plate 형식의 상용화된 전기 집진기와의 연계가 편하기 때문이었다. 그러나 이와는 반대로 wire-cylinder 형식의 반응기는 단위 부피당 코로나 방전으로 발생된 전자의 밀도가 wire-plate형식보다 높아 일본의 Masuda 연구소에서는 wire-cylinder 형식의 반응기를 채택하고 있다. 따라서 최적의 반응기 형식은 현재 그 결론이 나지 않은 채 향후의 연구과제로 남아 있다.

반응로의 형상을 결정하는 또 다른 요소는 코로나 개시 전압인 데, 반응로의 크기는 안정된 코로나 방전이 지속되도록 설계되어야 한다. wire-cylinder형 플라즈마 반응로의 경우 코로나 방전이 시작되는 전압과 전기장의 강도는 다음과 같은 실험식으로 표현된다.

$$V_c = E_c \cdot r \cdot \ln(R/r)$$

$$E_c = 31.3 \cdot \delta \cdot \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\frac{\delta}{r}}}\right)$$

여기서,

$V_c$  = 코로나 발생이 시작되는 전압 (kV)

$E_c$  = 코로나 발생이 시작되는 전기장 강도 (kV/cm)

$\delta$  :  $(T_0/T)(P/P_0)$ , 상대공기밀도

P: 압력,  $P_0 = 1 \text{ atm}$

T: 온도,  $T_0 = 298 \text{ K}$

R: cylinder 반경, r: wire 반경

위의 식은 실험을 통해 얻어진 경험식으로<sup>(6)</sup> 식에서 사용된 실험식 상수(constant)는 wire의 형상, 가스조성 등에 의해 변경될 수 있다. 위의 식을 이용하면 반응기 및 wire의 직경이 결정된다.

b) 나노 세컨드 (nano-second) 펄스 발생기

플라즈마 탈황/탈질 시스템에서 사용하는 나노 세컨드 펄스발생기는 1에서 1000 나노 세컨드의 펄스폭을 갖는 고전압 발생장치로, 과거 본 장치는 주로 고출력 레이저 발생장치에서 사용되었다. 그러나 최근에는 나노 세컨드 펄스발생기의 기술이 환경 및 식품공학 등의 분야에도 적용되는 것이 알려져 본 기술의 빠른 보급화가 이루어지고 있다.<sup>(4)</sup>

플라즈마 탈황/탈질 시스템에서 매우 짧은 폭의 펄스전압이 필요한 이유는 방전된 전기에너지를 가능한 많이 탈황/탈질 반응에 사용하기 위해서이다. 코로나 방전시 전자와 이온이 동시에 발생되는 데, 앞서 살펴 본바와 같이 탈황/탈질 반응에 필요한 래디칼은 전자에 의해서만 생성된다. 따라서 펄스발생기에서 발생된 전기 에너지가 이온의 운동 에너지보다는 전자의 운동에너지로 변환되도록 펄스발생기가 설계되어야 펄스발생기의 이용효율을 높일 수가 있다. 펄스발생기에서 발생된 전기에너지가 극히 짧은 순간에 가해지면 이온의 무게는 전자에 비해 수천배가 무겁기 때문에 관성이 상대적으로 작은 전자에 대부분의 전기에너지가 전달된다. 반면에 전기에너지가 비교적 긴 시간에 걸쳐 공급이 되면, 이온에 전기에너지가 공급될 가능성이 높아지고, 이는 온도상승 및 스트리머 방전에서 스파크방전으로 이행등의 결과를 가져와 탈황/탈질 시스템은 매우 비효율적으로 전기에너지를 소모하게 된다. 과거에 수행된 실험에서는 일반적으로 펄스가 최고점에 도달하는 시간 (rise time)이 100에서 200 나노 세컨드 정도였고, 펄스의 FWHM (Full width half maximum)은 약 300 에서 500 나노 세컨드였다.

c) 기타 시스템 구성요소

그림 5에서 나타난 열교환기는 플라즈마 반응기에 들어가는 배기가스의 온도를 조절하기 위해 설치된 것으로 기존의 발전설비에 열교환기가 이미 설치되어 있다면 이를 활용할 수도 있다. 과거 수행된 소규모의 탈황/탈질 실험에서는 배기가스

의 온도가 낮을 수록 즉, 상온에서 가장 높은 탈황/탈질율을 얻을 수 있었는데, 이태리의 파이롯트 플랜트에서는 저온부식을 피하면서도 반응기의 성능향상을 위해 열교환기를 이용하여 배기가스의 입구온도를 약 100°C로 조절하고 있다. 한편, 그림에서 나타난 전기집진기는 탈황/탈질 과정중의 최종산물인 비료입자를 채집하기 위해 설치된 것으로, 실제 발전소에 설치될 경우에는 반응기 입구에 또 하나의 집진기가 설치되어 재 (Fly-Ash)를 제거하게 된다.

4. 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 개발 동향

4.1. 국내외 기술개발 동향

플라즈마 탈황/탈질에 관한 기초이론은 1) 코로나 방전에 의해 아황산가스와 NOx가 산화되는 방전화학, 2) 코로나 방전의 발생 및 거동을 결정하는 방전 및 전자기학, 3) 코로나방전과 유동의 상호간섭 (interaction)을 이해하기 위한 정전유체역학 (Electro-Hydro Dynamics), 4) 중간 및 최종산물로 작은 액적 (aerosol)과 입자 (particle) 상태로 상변화가 일어나는 과정인 비평형 열역학 등으로 구분된다. 이들 기초이론을 종합하여 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 성능을 예측할 수 있는 이론은 아직 완성되지 않았다. 그러나 일본, 미국 등에서는 소규모 실험을 통하여 1) 최적성능을 위한 온도조건 2) 방전극 형상 및 극성 3) 초기 SO<sub>2</sub> 및 NOx에 따른 성능변화 4) 첨가제인 NH<sub>3</sub>의 영향 5) 재 (Fly Ash)의 영향 6) 펄스형상에 따른 성능향상 등이 연구되어왔기 때문에, 이론적인 모델링의 부족에도 불구하고 시스템의 실제 설계시 필요한 실험적인 경험식 (empirical correlation)은 상당히 축적되어 있는 상태에 있다.<sup>(6),(7),(8)</sup>

현재 각 국에서 수행하는 실용화를 위한 플라즈마 탈황/탈질 시스템개발의 최우선 과제는 1) 시스템의 운전경비를 절감하고, 2) 대형 사업장에



적용하는 대형화 (Scale-up) 기술을 확보하는 데 있다. 이를 이루기 위한 구체적인 기술로는 1) 플라즈마 반응로의 취적설계기술, 2) 대형 시스템 운전기술, 3) 전원공급장치의 효율적인 운영기술 등을 들 수 있다. 이들 기술들은 앞에서 언급한 기초기술을 종합한 엔지니어링 기술들이며, 이태리, 일본, 미국, 호주 등지에서 파이롯트 플랜트급 혹은 이보다 작은 규모로 엔지니어링기술의 개발을 수행하고 있다. 현재까지 본 기술에 가장 큰 규모의 투자를 한 나라는 이태리로, 이태리의 국립전력회사인 ENEL에서는 80년대 후반에 약 1,000 Nm<sup>3</sup>/hr의 배연가스를 처리하는 실험을 하였고, 현재는 석탄화력 발전소로부터 배출되는 10,000 Nm<sup>3</sup>/hr의 배연가스를 처리하기 위한 파이롯트 플랜트를 운전하고 있다.

국내의 플라즈마 탈황/탈질 기술수준은 기초기술의 취약점에도 불구하고 실용화를 위한 연구는 상당한 수준에 있다. 예를 들면, 한국기계연구원은 '92년도에 자체 기술로 소규모 플라즈마 탈황/탈질실험을 수행하였고, 현재는 석탄화력발전소에 설치할 대형 파이롯트 플랜트건설을 한국중공업과 공동으로 추진중에 있다. 인하대 및 한국코트렐(주)에서는 각각 러시아 및 일본에서 제작된 소규모 시제품을 도입하여 성능실험 중에 있고, 본 기술과 원리가 유사한 전자 빔을 이용한 탈황/탈질 시스템은 삼성중공업이 러시아로부터 기술을 도입하여 개발중에 있다. 따라서 국내에서도 각 기관의 사업목적에 따라 형태와 규모가 다른 플라즈마 탈황/탈질 시스템들이 향후 몇 년 후에는 각 사업장에 설치될 것으로 기대되고 있다.

한편, 플라즈마 탈황/탈질 시스템을 국내에서 실용화하기 위해서는 고효율의 시스템을 자체적으로 개발하는 것이 시급하다. 앞서 살펴 본 바와 같이 플라즈마 탈황/탈질 시스템은 기술선진국에서도 개발과정 중에 있는 기술이므로, 현재 국내에 도입된 시제품들은 기존의 습식탈황기술이나 선택적환원법보다 경제성 및 안전성에서 확고한 우위가 입증된 상태가 아니다. 따라서 본 시스템

의 실용화를 위한 엔지니어링기술을 국내 각 연구기관이 자체적으로 향상시켜 나가야만 기존의 공정을 대체할 수 있다고 보여진다.

## 4.2. 향후의 기술개발과제

파이롯트 플랜트를 운전한 이태리의 Civitano는 실제 운전경험을 토대로 1) 상당량의 암모니아가 미반응인 채 반응기 출구에서 배출되는 문제와 2) 펄스발생기의 안정적인 운전을 향후의 기술개선과제로 제시하였다. Civitano의 실험에서는 상당량의 암모니아가 반응기의 출구로 나올 때까지 미처 반응물과 혼합되지 못해 중화반응에 참여하지 못하였다고 한다. 이의 영향으로 Civitano의 실험에서는 탈황/탈질율이 각각 80%, 60% 였는데, 혼합도가 충분히 높은 소규모 실험의 경우 탈황/탈질율은 99% 이상이 보고되어 있다.<sup>(7)</sup> 화학반응기 (chemical reactor)에서 화학 반응시간을 결정하는 인자는 (factor) 일반적으로 화학반응속도와 각 종 반응물질이 서로 섞이는 혼합도에 (mixing rate) 좌우된다. 화학반응속도가 혼합속도에 비해 매우 빠를 경우 반응기의 성능은 혼합도에 크게 관련이 없으나, 이와 반대의 경우 혼합도는 반응기의 성능에 매우 중요하게 된다. 혼합도는 일반적으로 유동특성에 지배되는 데, 플라즈마 반응기와 구조 및 특성이 유사한 전기 집진기의 내부유동은 난류 (turbulence), 전자기유동 (MEHD) 및 다상유동 (multi-phase flow)이 공존하고 있다. 따라서 이와 같은 플라즈마 반응기내의 유동특성을 고려한 설계가 고성능의 플라즈마 탈황/탈질시스템 개발에 요구되고 있다.

펄스발생기의 안정적인 운전을 위해서는 펄스발생기의 핵심 부품중의 하나인 펄스 스위치를 개선시켜야 한다고 알려져 있다. 펄스 스위치는 on-off를 전자적으로 제어하는 thyatron 방식과 기계적으로 제어하는 rotary spark-gap 방식이 있는데, thyatron 방식은 수명이 긴 반면 (10<sup>9</sup>

shot) 가격이 비싸고 반대로 rotary spark-gap 방식은 수명이 짧으나 ( $10^6$  shot) 가격이 저렴하다. 펄스 스위치를 어느 방식으로 하건 간에 폭이 짧은 고전압 펄스를 발생하는 것은 펄스 스위치에 부담을 주므로, 최근의 펄스 스위치에서는 비교적 긴 펄스를 발생시키고 이를 다시 전자기력으로 펄스폭을 줄이는 magnetic pulse compressors 기술이 도입되어 있다. 따라서 향후 펄스발생기는 thyatron 방식과 magnetic pulse compressors 기술이 합쳐진 방식으로 개발되어 플라즈마 탈황/탈질 시스템의 성능을 향상 시켜줄 것으로 예상된다.

## 5. 결 언

본 고에서는 이상과 같이 플라즈마 탈황/탈질 시스템 개발의 필요성을 기술수요 및 경제성을 통하여 소개하였고, 본 기술의 국내외 개발동향 및 기술적인 과제를 등을 살펴보았다.

전 세계적으로 강화되고 있는 대기오염규제는 필연적으로 대기오염관련기술 수요를 유발하며, 특히 한 시스템에서 여러 오염물질을 (아황산가스, NOx, VOC, CO<sub>2</sub> 등) 저렴한 가격으로 처리할 수 있는 플라즈마 배연가스 처리 기술개발은 향후의 환경관련 설비수요에 대응하여 매우 필요한 기술이다. 본 기술은 여러 종류의 기술이 복합된 시스템기술로 엔지니어링 설계시 필요한 기초기술이 수 십년 전부터 구미 각 국에서 연구되어 왔고, 대부분의 연구결과가 공개되어 있다. 따라서 본 기술과 관련된 기초기술이 취약한 국내에서도 본 기술의 실용화를 위한 연구가 현재 가능하다. 이를 뒷 받침하는 사실로는 이태리 및 호주 등이 기존의 전기집진기와 펄스발생기 기술을 바탕으로 실용화를 앞둔 플라즈마 탈황/탈질 시스템을 개발할 수 있었다는 사례를 들 수 있다. 현재 본 시스템의 실용화를 더욱 앞당기기 위해 필요한 기술과제는 운전비용의 절감과 대형화 (scale-up)

기술이다. 이를 이루기 위한 구체적 기술로는 1) 반응로의 최적 설계기술, 2) 대형 시스템 운전기술 그리고 3) 펄스발생기의 성능향상 등을 들 수 있다. 한국기계연구원에서는 한국중공업과 공동으로 향후 5 년간에 걸쳐 10 MW급 파이롯트 플랜트를 건설할 예정에 있어 본 시스템의 조속한 실용화를 기대해 본다.

## 참 고 문 헌

- 1) S. Masuda, et. al., "펄스코로나·플라즈마 화학방식 (PPCP)에 의한 화력발전용 보일러 배가스의 새로운 건식 탈황·탈질 기술조사보고서", 사단법인 일본기계공업연합회 및 재단법인 에너지종합공학 연구소, 1991
- 2) G. Dinelli and M. Rea, "Pulse Power Electrostatic Technologies for the Control of Flue Gas Emissions", J. Electrostatics, Vol. 25, P. 23-40, 1990
- 3) G. Dinelli, L. Civitano, and M. Rea, "Industrial Experiments on Pulsed Corona Simultaneous Removal of NOx, and SO<sub>2</sub> from Flue Gas", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No.3, P. 535-541, 1990
- 4) E.L. Neau, "Environmental and Industrial Applications of Pulsed Power Systems", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 22, No. 1, P. 2-10, 1994
- 5) J.S. Chang, P.A. Lawless, and T. Yamamoto, "Corona Discharge Process", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 19, No. 6, P. 1152-1166, 1991
- 6) K. Tamaki, K. Kawamura, H. Yoshida, T. Katayama, and C. Kaido, "Effects of Temperature, Water Vapour, Sulfer Dioxide and Ammonia on the Discharge Oxidation of Nitrogen Monoxide", J. Chemical Society of Japan, No. 11, p. 1597-1603, 1979

- 7) J. S. Clements, A. Mizuno, W.C. Finney, and R.H. Davis, "Combined Removal of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and Fly Ash from Simulated Flue Gas Using Pulsed streamer Corona", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 25, No.1, P. 62-69, 1989
- 8) S. Masuda, H. Nakao, "Control of NO<sub>x</sub> by Positive and Negative Pulsed Corona Discharges", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No.2, P. 374-383, 1990