

# 플라즈마 배연탈황 탈질동시처리 장치 개발

(Development of Plasma Facility for Simultaneous Removal of SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub>)

연구기관 : 한국전력공사 전력연구원, 참여기업: 한국전력공사

위탁연구기관: 이우테크(주) 환경과학기술연구소\*

엄희문, 장경룡, 박태성, 심재구, 한영욱\*

## 기술개발요약

본 연구는 배가스 중에 함유된 황산화물과 질소산화물을 동시에 고효율로 처리할 수 있는 플라즈마 배연 동시 처리장치 개발을 목표로 설정하고 2단계 2차년도부터 G-7과제로 수행하고 있다. 그 동안 수행된 내용을 살펴 보면 우선, 플라즈마 배연처리 특성조사를 위해 러시아 기술을 토대로 1997년 9월 보령화력본부에 pilot plant(P/P)를 설치하고 펄스 발생기의 최적화 작업과 플라즈마 배연처리 특성에 영향을 주는 여러 운전인자에 대해 시험을 수행하였다. 그 결과 적정조건에서 고효율의 탈황·탈질이 가능하다는 것을 확인하였다. 또한 그동안 문제점으로 제기되었던 전력 사용량이 크다는 문제점 또한 첨가제 활용으로 기존기술 대비 경쟁이 가능한 수준으로 낮출 수 있었으며, 또한 부산물 수집을 위한 기본 데이터를 확보 하였다. 이에 따라 금년도에는 당초 계획 대로 본 기술의 대형 플랜트 실용화 설계(개념 및 기본)와 기술성/경제성 평가 및 부산물 활용 방안에 대한 연구수행중에 있다.

NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, Plasma, Pulse Generator, Reactor, 첨가제, 동시처리, 부산물

## 1. 서론

현재 사용되고 있는 대표적인 배가스 정화기술은 탈황공정으로는 FGD(Flue Gas Desulfurization), 탈질공정으로는 SCR(Selective Catalytic Reduction) 등이 있으나, 이러한 기술들은 탈황과 탈질이 각각 개별적인 제거 공정으로 이루어지고 있어 비효율적이다. 더욱이 FGD 공정은 설치비용이 비싸고, 넓은 설치공간을 필요로 하며, 폐수가 발생할 뿐만 아니라, 운전 및 보수가 어렵다는 단점이 있다. 또한 SCR 공정은 반응기 내부의 온도를 촉매 반응이 일어나는 일정온도로 유지해야 하며, 고가의 촉매

를 주기적으로 교체하여야 한다. 따라서 본 연구는 플라즈마 동시처리기술을 통하여 기존의 방지시설이 갖고 있는 기술적·경제적인 문제점을 해결하면서 고율의 탈황·탈질이 가능하고 폐수 등의 2차 오염물질을 배출하지 않는 신기술 개발에 그 목표를 두고 있다. 또한 플라즈마 동시처리설비는 전력공급장치 및 펄스 발생기 등의 전기설비와 핵심장치인 반응기외에 특별한 구조를 갖지 않으므로 규격화 및 모듈화가 용이하여 개발 여건에 따라 적은 용량은 물론 대용량의 처리로의 격상이 용이하다. 특히, 본 연구에서 개발하고 있는 플라즈마 공정은 그 동안 많이 알려진 고온상태에서 발생하는 플라즈마가 아닌 비열방전

(non-thermal plasma)에 의한 것으로서 이를 위해 전기적 펄스를 인가하므로 고전압과 관련된 기술 발전을 동시에 피할 수 있어 환경기술은 물론 전력기술 발전의 파급 효과가 크다 하겠다.

## 2. 연구방법

G-7 사업 2단계 2차년도에 한전 보령화력 제 3호기에 부지를 선정하고, 러시아 Gintsvetmet 연구소에서 도입한 펄스 발생기와 반응기 등 핵심 설비와 냉각장치 등 부대설비 일부를 국산화한 3,000 Nm<sup>3</sup>/h의 P/P를 1997년 9월에 신설하였다. 이후 P/P의 시운전 및 공정개발에 필요한 단위기 특성실험 및 플라즈마의 발생 특성조사를 위한 실험이 수행되었으며, 실 배가스 적용시 탈황·탈질율 변화 측정을 위한 기초실험을 수행하였다.

2단계 3차년도에는 펄스 발생기의 여러 조건을 변화시켜 주파수 변화 등 다양한 조건에서의 탈황·탈질율을 확인하였다. 또한, 방전극의 거리 및 형상을 변화시키고 반응기에 최소의 에너지를 인가하면서 최대의 제거효율을 지니는 반응기의 설계조건을 도출하였다.

3단계 1차년도에는 저전력 플라즈마 동시처리를 위한 공정을 개발하기 위하여 첨가제에 의한 특성 실험을 P/P 일부를 개조하여 수행하였고, 전년도에 제작된 플라즈마 반응특성 실험설비를 이용하여 플라즈마의 안정적 생성 조건 규명을 도출하였다. 또한, 본 연구에서의 플라즈마 동시처리설비는 전력소모량이 설비의 경제성을 가늠하는 최우선의 조건이 되므로, 주설비인 전력 공급장치와 펄스발생기 등 전반적인 전력 계통도를 검토하여 회로구성을 최적화 하였다. 다음 표 1에 G-7 계획서상의 3단계 연구개발 목표와 내용을 요약하여 나타내었다.

표 1. G-7 계획서상의 3단계 요약

구분	연구개발 목표	연구개발 내용
1차년도 (1998~1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 플라즈마 동시처리 공정 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 플라즈마 동시처리 공정 연구</li> <li>첨가제 주입 시험</li> <li>impulse generator 격상 방안</li> </ul>
2차년도 (1999~2000)	<ul style="list-style-type: none"> <li>고효율 반응장치연구</li> <li>대형플랜트 설계운전 인자 도출</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>공정별 에너지 저감 기술</li> <li>고효율 전극/반응기 최적화 연구</li> <li>대형플랜트 설계를 위한 운전인자 설정</li> <li>최적 부산물 수집 기술 선정</li> </ul>
3차년도 (2000~2001)	<ul style="list-style-type: none"> <li>실용화설계(100 MW급)</li> <li>플라즈마 동시처리 공정 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>100 MW급 실용화 기초설계</li> <li>기술성/경제성 평가</li> <li>부산물 수집/활용</li> </ul>

## 3. 연구개발결과

### 3.1. 시험설비

본 연구에서 활용된 시험설비는 용량이 3,000 Nm<sup>3</sup>/h로서, 보령 3호기의 발전소 실 배가스를 연돌 입구에서 일부분기시켜 전기 집진기에 다시 순환시키도록 하여 차압에 의해 순환이 되도록 하였다. 또한 각종 플라즈마 배연처리 특성에 영향을 미치는 배가스 온도, 압력 및 유량과 공급

전기의 펄스 파형 및 전압, 전류를 측정에 미치는 영향을 용이하게 분석 가능토록 시험장치를 설치하였다. 이 장치는 전원공급설비, 펄스 발생기 및 반응기를 포함하는 반응기 부분과 냉각기, 열교환기, 공기 압축기 등의 부속설비 및 오실로스코프, 전압계, 전류계, NOX/SO<sub>2</sub> 계측기, 온도, 압력 및 유량 측정기 등의 계측설비로 구성되어 있다. 또한, 첨가제의 반응특성 규명을 위해 반응기 전단에 주입장치를 신설하였으며 상세한 도면을 그림 1에 나타내었다.

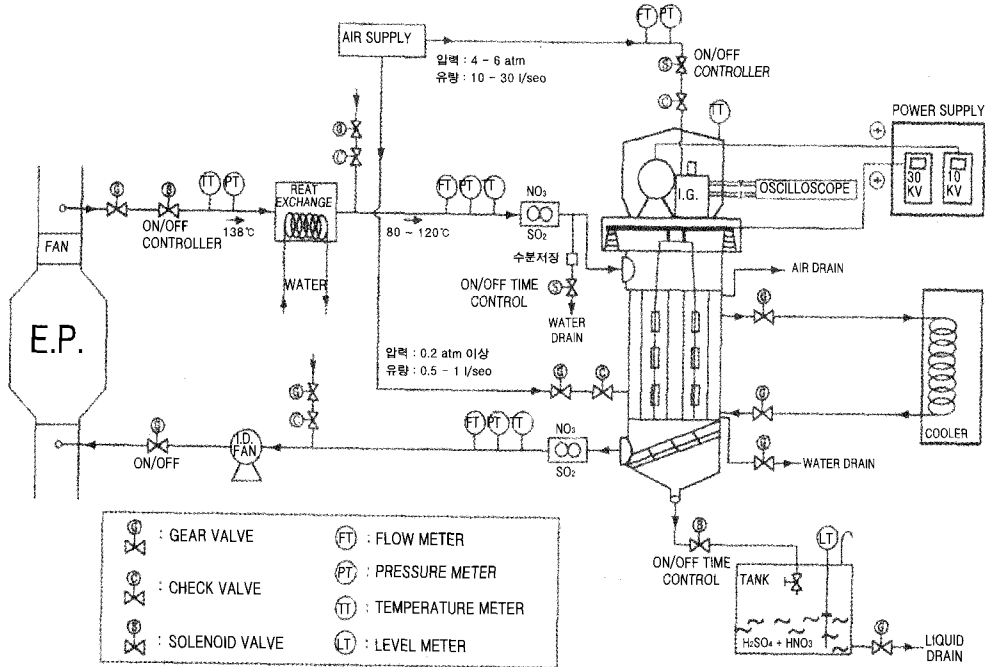


그림 1. 플라즈마 배연 탈황·탈질 동시처리장치

### 3.2 첨가제에 의한 반응특성실험

그동안 실험을 통하여 암모니아(NH<sub>3</sub>)를 주입하면 SO<sub>2</sub>는 90%이상 제거되고, 에탄올을 주입하면 NOx가 75% 정도 제거되지만, 반응기에서 방전 이상현상(break-down)이 자주 발생하는 문제점과 NO에 대하여 일정한 비율로 주입하는 방법상의 어려운 문제가 발생하였다. 따라서, 금년도에서는 알코올과 같은 액상 첨가제보다 에틸렌(ethylene, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)과 프로필렌(propylene, C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>) 등 몇 가지의 기상 첨가제를 이용한 실험을 수행하였다. 그 결과 예상대로 가스상 첨가제가 주입이 용이하고, 동일조건에서 안정적으로 NOx가 제거되는 것을 확인하였다. 또한 각 펄스 전력 등 여러 조건에서의 반응특성 시험결과 주파수 0.68kHz에서 펄스 전압 10kV, 항전압 28kV로

유지되고, 배가스 유량을 1,500Nm<sup>3</sup>/h에서 일정량의 탄화수소가 주입될 경우 고효율의 탈황·탈질과 비전력량이 3~4 Wh/Nm<sup>3</sup>로 낮아지는 것을 확인하였다.

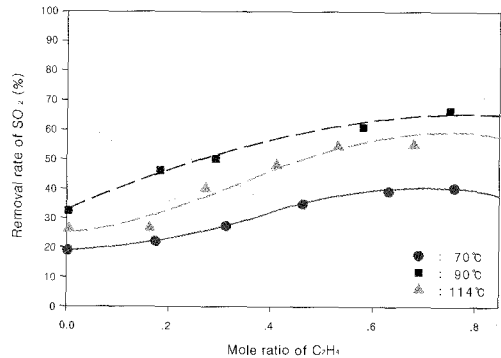


그림 2. 플라즈마 배연 탈황·탈질 동시처리장치

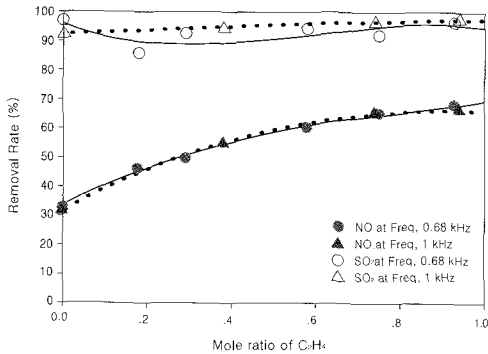


그림 3. 에틸렌의 주입량에 대한 탈질율

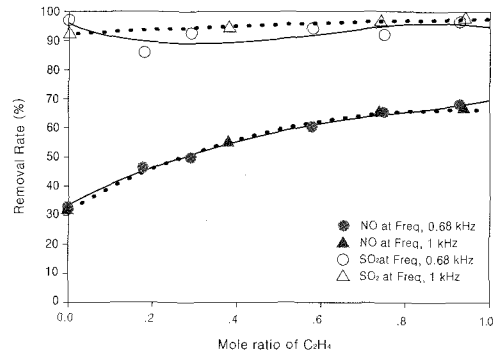


그림 4. 주파수 변화에 따른 탈황·탈질율의 변화

그러나 표 2에서 볼 수 있듯이 최근 다른 연구기관의 실험결과에서는 프로필렌이 에틸렌보다 탈질특성에 더 좋은 효과를 나타내고 있는 것으로 보고된 반면에 본 시험에서는 그 반대로 나타나 이를 규명하기 위한 연구를 수행할 필요가 있어 계획에 이를 반영하고 시험중에 있다.

표 2. 에틸렌 및 플로필렌 주입시 탈질 특성 비교

첨가제	P/P		반응특성 실험설비		P대학교		E연구소	
	몰비	제거율(%)	몰비	제거율(%)	몰비	제거율(%)	몰비	제거율(%)
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.6	70	1	57	-	50	0.3	82
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1	70	1	87	-	90	1.45	83

### 3.3 주파수 변화

첨가제를 주입하지 않는 실험에서 주파수는 SO<sub>2</sub> 및 NOX 제거에 아무런 영향을 주지 않지만, 첨가제가 주입될 때, 주파수에 의한 변화를 확인하기 위하여 유량 1,500 Nm<sup>3</sup>/h, 인입 온도 90°C에서 펄스 전압을 10kV, 항전압을 30kV로 고정하고, 주파수를 1 kHz와 0.68 kHz로 실험을 진행하여 그림 4에서와 같이 주파수에 관계없이 탈황·탈질율은 일정하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 주파수는 첨가제를 주입하지 않으면서 플라즈마를 이용한 탈황·탈질 실험에서와 같이 탈황·탈질에 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

### 3.4 비전력량에 따른 탈질율의 변화

P/P와 플라즈마 반응특성 실험설비는 전압을 조정하여 배가스에 인가되는 에너지를 조절할 수 있지만, 전류는 배가스의 성상에 따라 결정되어 임의로 조절할 수 없다. 따라서 비전력량 실험에서는 유량 885 Nm<sup>3</sup>/h와 1,533 Nm<sup>3</sup>/h 범위에서 항전압과 펄스 전압을 표 3과 같이 변화시켜 실험을 진행하였다. 이때 전력 사용량의 변화는 전압의 변화에 의존한 것이며, 전류의 변화는 높은 전압이 배가스에 인가되면서 가스의 성상이 변화하였거나, 탈질이나 발진조건의 변화에 의하여 가스의 조성의 변화에 의한 것으로 추정된다.

실험 결과 그림 5에서와 같이 유량 1,533Nm<sup>3</sup>/h에서 비전력량을 3.7Wh/Nm<sup>3</sup>로 인가하면 에틸렌 주입몰비 0.7에서 NOX가 60% 제거되고, 비전력량을 5Wh/Nm<sup>3</sup>로 인가하면 에틸렌 주입몰비 0.6에서 NOX가 70% 이상 제거되어 그림 6의 유량 885Nm<sup>3</sup>/h의 실험에서와 같이 비전력량을 증가시키면 탈질율도 증가하였다.

표 3. 인가전력 변화시험시 적용한 전력량

번호	유량 (Nm <sup>3</sup> /h)	Pulse Power		Base Power		사용전력량 (W·h)	비에너지 (W·h/Nm <sup>3</sup> )
		전압	전류(mA)	전압	전류(mA)		
1	885	9	250	26	75	4,200	4.7
2	885	10	250	28	100	5,300	6.0
3	885	11	275	31	140	7,365	8.3
4	1,533	10	275	29	100	5,650	3.7
5	1,533	11	280	33	140	7,700	5.0

설계를 대비하고자 1999년 11월 10일 16시 30분부터 11월 14일 16시 30분까지 120분간 연속 운전 상태에서의 파일럿 플랜트의 건전성을 확인하고자 하였다. 그 결과 전력공급장치, 펄스 발생기 등 구성설비의 일부 문제점이 확인하였다. 실험 시작후 30시간 동안은 탈황율 90%, 탈질율 70%를 나타내었고 안정된 설비 운전상태가 지속

되었으나 그 후 여러 차례에 걸쳐 전력공급이 이상적으로 변화하는 break-down현상이 발생하였다. 이때 NO<sub>2</sub> 전환율은 70%로 탈질율도 60%로 감소하였으며, 탈황율도 90%에서 80%로 감소하였다. 이러한 현상은 펄스 전력을 공급하는 장치의 문제이거나 배가스의 변동에 의한 것으로 추정하고 있으며 이를 보완하여 금년도에 다시 확인하고자 한다.

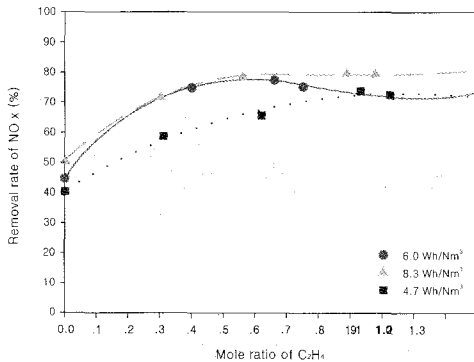


그림 5. 비전력량에 따른 탈황·탈질율 (유량 885 Nm<sup>3</sup>/h)

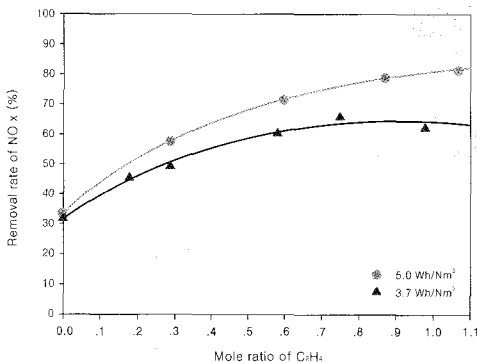


그림 6. 비전력량에 따른 탈황·탈질율 (유량 1,533 Nm<sup>3</sup>/h)

### 3.6 플라즈마 배연처리 부산물 집진 실험

플라즈마 배연처리 공정에서 배출되는 입자상 분진에 대하여 집진에서 중요한 물리적, 화학적 및 전기적 특성인자를 분석하고, 전기집진 및 여과집진에 대한 기본연구에 의한 타당성을 검증하여 적절한 집진방안을 찾고자 하였다.

플라즈마 파일럿플랜트에서 생성입자의 샘플링 및 특성분석중, 배가스 온습도 측정 및 분석, 부산물 입경분포, 농도, 화학적 조성 및 형상분석, 반응 시간을 고려한 샘플링 위치별, 특성분석과 여과집진 및 전기집진 기초실험 및 비교 그리고 적용 타당성 분석을 통한 결과 부산물의 집진 시스템은 내부에서도 부분적인 가스 화학반응과 에어로졸 입자화 반응을 수반하는 플라즈마 배연처리 공정에서 전반적인 성능을 지배하는 중요한 시스템이라는 것을 알 수 있었으며, 대부분의 부산물 입경은 1미크론 이하로 미세하며 여과집진의 경우, 집진기를 통과할 때 입자생성이 발생되며 높은 집진효율을 얻을 수 없었고, 플라즈마 부산물 집

### 3.5 연속운전실험

그동안 실험을 통하여 확인된 플라즈마 동시처리기술의 공정과 장치에 대한 신뢰성을 확인하고, 향후 설비의 격상

진은 전기집진이 매우 효과적이나, 집진판에 부착, 용해성이 있으며, 이에 따른 코로나 전류의 감소 및 집진효율의 저하가 발생되어, 전기집진장치의 플라즈마 배연처리 부산물 집진장치 실용화 적용을 위해서는, 배출가스 조건, 플라즈마 반응로 운전조건 및 암모니아 주입 조건, 온도, 습도 등에 따라 생성부산물의 특성이 다르다. 따라서 금년에는 이에 대한 정량적인 연구와 병행한 부산물 전기집진에 대한 Pilot 실험과 부산물 집진설비의 플라즈마 파일럿플랜트 배가스 전량처리 규모를 설치하여 실험하고자 한다.

## 4. 기술개발 효과 및 적용분야

### 4.1 기술개발 효과

현재까지 수행된 결과로서 플라즈마 배연 탈황·탈질 동시처리기술은 100 MW급의 실용화 연구를 위한 기반 연구가 수행되었으며, 그 결과 플라즈마 배연처리시 여러 변수가 가지고 있는 특성에 대해 파악할 수 있었다. 따라서 향후의 연구는 경제성 확보 연구에 치중될 것이며, 이미 확인된 공정의 단순성과 전식기술이라는 장점과 더불어 경제성을 확보할 경우 기술의 우수성이 크게 증대될 것이다. 이 경우 기존 배연 탈황·탈질의 상용화기술에서 문제시되었던 과대한 설치비 및 설치면적 등을 획기적으로 개선할 수 있을 것이다. 이에 따라 전세계적으로 매장량이 가장 값싸고 풍부한 에너지원인 석탄의 활용 제한요소를 극복할 수 있으므로 적게는 전력회사의 전력생산 단가를 낮추고, 국가적으로는 수출 경쟁력을 높이게 될 것이다.

### 4.2 적용분야

#### 4.2.1 국내 화력발전소의 배연 탈황·탈질

이미 강화된 SO<sub>2</sub> 배출 규제치는 물론, 탈질규제 강화시 기술성과 경제성을 겸비한 본 기술이 크게 이바지할 수 있

는 바, 화석연료 활용의 제한을 극복할 수 있는 대안임

#### 4.2.2 중·소형 보일러의 배연 탈황·탈질

병커 C 오일을 연료로 사용하는 중·소형 보일러에 대해 고유황 연료를 사용하는 경우에도 배연가스중 SO<sub>2</sub> 배출량을 규제치 이하로 감소시킬 수 있는 공정으로 활용

#### 4.2.3 도시 쓰레기 소각로의 후처리 시스템

현재 개발되고 있는 도시 쓰레기 소각로에서 발생하는 다량의 폐기가스를 처리하기 위한 후처리 설비로 활용

## 5. 결론 및 향후 전망

### 5.1. 결론

고효율 플라즈마 동시처리공정을 위한 첨가제 시험 등 금년도에 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 첨가제를 이용한 최적공정실험에서 에칠렌이 전년도의 에탄올 보다 우수한 결과를 나타내었으나 다른 기관에서 제시한 프로펠렌 시험에서의 우수한 점은 발견하지 못하였다. 이때 도출된 비전력량은 3~4Wh/Nm<sup>3</sup>이었으며, 이를 보령화력 3호기를 기준으로 전력소모율을 환산시 소내 소비율은 1.5% 이내가 된다. 이로서 당초 계획한 소내 소비율 2%이하의 목표를 달성하였다.

둘째, 주파수의 변화 시험결과 1.33~0.68kHz의 범위에서는 탈황·탈질율에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타나 가장 에너지 주입량이 적은 0.68kHz에서 시험을 수행하였다.

셋째, 비전력량에 따른 탈질율 변화의 시험결과 비전력량을 3.7Wh/Nm<sup>3</sup>로 인가하면 에칠렌 주입몰비 0.7에서 NOx가 60% 제거되고, 비전력량을 5Wh/Nm<sup>3</sup>로 인가하면 에칠렌 주입몰비 0.6에서 NOx가 70%이상 제거되었

다. 넷째, P/P의 전전성을 확인하고자 120분간 연속으로 운전시험결과 전력공급장치, 펄스 발생기 등 구성설비가 여러 차례에 걸쳐 공급전력이 이상적으로 변화하는 breakdown 현상이 나타났으며 이는 펄스 전력을 공급하는 장치의 문제이거나 배가스의 변동에 의한 것으로 추정되어 앞으로 이를 보완하여 재시험을 수행하고자 한다.

### 5.2 향후 전망

금년도에 가장 큰 연구 결과는 그동안 전력사용량의 과다로 문제가 되었던 것을 첨가제를 활용하여 크게 낮추게 되

었다는 것이다. 이는 플라즈마 공정의 실용화를 그만큼 앞당길 수 있다는 것을 의미한다. 금년도에는 이를 바탕으로 실용화 설계를 위한 반응기 최적화에 역점을 둘 것이다. 따라서 본 연구는 당초 계획대로 순조롭게 수행되고 있으며 이를 토대로 실용화를 위한 연구를 착실히 추진할 경우 임박한 탈질규제 강화에 맞춰 중소형 보일러, 화력발전소 등에서 배출되는 황 및 질소 산화물의 효과적인 처리장치에 활용될 수 있을 것이다. 본 개발기술의 상업화는 기술개발이 상대적으로 늦고 농업국가로서 상당량의 화학비료가 필요한 중국을 포함한 동남아시아 및 북한에 이르기까지 기술수출과 외화획득의 길을 열고 더 나아가 열악한 환경기술의 발전에 크게 기여할 것이다.



## 회 고

### '전국환경관리인연합회' 명칭 공모

본 연합회는 그동안 16년 동안 사용해온 '전국환경관리인연합회'라는 명칭을 이미지 제고와 시대적 흐름에 부응하기 위해 새롭게 변경하고자 합니다.

환경보전의 다양화로 무엇보다 환경관리 전문인이 필요한 시기인 만큼 보다 차별화되고 기술적인 명칭으로 개칭하고자 하오니 많은 관심 부탁드립니다.

환경관리 전문인을 가장 잘 대변하는 명칭으로 회원여러분들의 좋은 아이디어를 기다립니다.

응모한 명칭은 회원들의 설문조사에 의해 연합회정식명칭으로 사용될 것 입니다.

**\*\*응모자 중 추첨을 통해 소정의 상품을 드립니다.**

(연합회 발간도서-환경정보총람, 환경평가사 수험서, 문화상품권 등)

문의 : 이메일 kemf@kemf.or.kr 또는 전화 (02)852-2291 FAX (02)852-2294