

저온 플라즈마 탈황탈질 공정의 운전전력 절감을 위한 실험연구

An Experimental Study of Power Saving Technique in Non-thermal Plasma DeSO_x/DeNO_x Process

송영훈 · 최연석 · 김한석 · 신완호 · 길상인
정상현 · 최갑석 · 최현구 · 김석준 · 장길홍¹⁾

한국기계연구원 연소환경그룹

¹⁾한국중공업 기술연구원

(1996년 5월 17일 접수, 1996년 8월 6일 채택)

Young-Hoon Song, Yeon-Seok Choi, Han-Seok Kim
Wan-Ho Shin, Sang-In Keel, Sang-Hyun Chung, Kab-Seok Choi
Hyun-Ku Choi, Seock-Joon Kim, Gil-Hong Chang¹⁾

Combustion and Environment Research Group, Korea Institute of Machinery and Metals

¹⁾ *Research and Development Center, Korea Heavy Industries & Construction Co., Ltd.*

(Received 17 May 1996; accepted 6 August 1996)

Abstract

Simultaneous effects of C₂H₂ injection and heterogeneous chemical reactions on non-thermal plasma process to remove SO₂ and NO_x from flue gas were investigated in the present experimental study. The present results showed that 40% of the electrical power can be reduced if C₂H₂ injection and heterogeneous chemical reaction are simultaneously included in the non-thermal plasma process. As an effort to apply the non-thermal plasma technique to practical flue gas treatment system, a wire-plate type reactor which has technically similar geometry of industrial electrostatic precipitators is used instead of other types of reactors, such as wire-cylinder, packed-bed and surface discharge which are inappropriate to industrial application. In the present study, the photo pictures of positive streamer corona taken by ICCD camera, voltage and current oscillograms, and design criteria of a wire-plate type reactor are also shown, which are needed for industrial application of the non-thermal plasma process.

key words : SO₂, NO_x, C₂H₂, non-thermal plasma, heterogeneous chemical reaction

1. 서 론

저온 플라즈마 탈황탈질 공법은 대기압 조건에서 플라즈마 방전화학반응을 일으켜 배연가스에 포함된 아황산

가스(SO₂) 및 질산화물(NO_x)을 제거하는 기술이며, 최근들어 세계 각국에서 규제하는 가스의 종류가 SO₂를 비롯하여 NO_x, VOC(휘발성 유기물, volatile organic compounds), CO₂ 등으로 확대됨에 따라 하나의 시스템에서 이들 유해가스를 동시에 처리할 수 있

는 본 기술의 중요성이 높아지고 있다(Jogan *et al.*, 1993; Chang, 1992; Chang *et al.*, 1991; Dinelli *et al.*, 1990; Masuda, 1988). 저온 플라즈마 탈황탈질 공정을 본격적으로 산업에 응용하기 시작한 연구로는 80 년 중반 이태리의 마게라 화력발전소에서 수행하였던 1,000 Nm³/hr의 배연가스 처리공정을 예로 들 수 있으며, 그 연구결과 플라즈마 탈황탈질 공정의 장점으로 1) 초기 투자비용이 기존공정 대비 약 40%에 불과한 건식공정이고(Masuda, 1992), 2) 부산물로는 농업에 사용될 수 있는 유안/초안 비료가 생성되며, 3) 본 공정은 탈황탈질 이외에도 휘발성 유기물(VOC), 악취, 암모니아, 다이옥신 등의 여타 유해가스처리에도 효과적이어서 본 기술의 응용범위가 다양하다는 점을 들 수 있다. 이상과 같은 플라즈마 공법이 갖는 기술의 장점 및 경제성에도 불구하고 본 공법이 갖는 단점은 운전시 전력소모량이 많아 기존의 습식탈황법에 비하여 운전비용이 높다는 것을 들 수 있다. 예를 들어, 현재까지 각종 연구결과에 나타난 바로, 플라즈마 공법에 소요되는 운전전력 소모량은 화력발전소 발전량의 약 5%로 나타나 있어 플라즈마 공법과 유사한 전자빔공법보다 1.6배 가량 높다고 알려져 있다(Vogtlin *et al.*, 1992). 이에 따라 현재 플라즈마공법의 운전전력을 절감하려는 기술 개발은 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며, 이들 운전전력 절감기술의 본격적인 적용은 플라즈마 공법을 대형사업장에의 실적용을 앞당길 것으로 보고 있다.

저온 플라즈마 공법의 실용화를 보다 가속화하기 위해 전력소모량을 절감하려는 기술로서 지금까지 소규모 실험 및 이론연구를 통해 알려진 것으로는 1) 암모니아 혹은 알카리 화합물로 중화반응을 일으키는 전력감소 기술(Dinelli *et al.*, 1990), 2) 탄화수소(CH₄, C₂H₄, n-Octane 등) 혹은 수분을 공정에 첨가하여 아황산가스 및 질산화물을 산화시키는 OH 래디칼을 다량으로 발생시키는 화학물 첨가기술(Vogtlin *et al.*, 1992), 3) 공정에 플라즈마 반응 뿐만 아니라 기체-고체/기체-액체 화학반응(heterogeneous chemical reaction, 비균질 화학반응)을 야기함으로써 전력소모량을 감소시키는 기술(Civitano, 1992), 3) 전력변환효율 향상기술(Rea *et al.*, 1992) 등이 제시되어 있다. 한편, 앞서 언급된 마게라 발전소의 실험에서는 이들 전력소모율 절감기술중 일부만을 적용했기 때문에 현재 발전소 발전량의 약 5%로 추정되고 있는 플라즈마 탈황탈질공법의 운전비용은 이들 기술들이 적용됨에 따라 상당히 감소될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

본 연구는 지금까지 이론적으로 제시된 플라즈마 공정

의 운전전력 절감기술을 실용화하는데 목적을 두고 수행되었으며, 이를 위해 과거 개별적인 실험을 통해 각 각 제시된 운전전력절감 기술들을 복합적으로 적용하여 본 공정에 소요되는 운전전력 소모율을 새로이 평가하였다. 한편, 종래 다른 연구에서 대부분 사용되어 온 wire-cylinder, packed-bed, silent discharge형 반응기를 대형사업장에 실적용시킬 경우 압력손실 및 유지보수 등의 기술적 문제가 있어(Chang, 1992) 플라즈마 공정의 실용화를 위해 수행된 본 실험에서는 산업용 플라즈마 반응기와 동일한 wire-plate형 플라즈마 반응기를 사용하여 산업용 플라즈마 반응기의 설계시 필요한 기초 자료인 처리가스유량, 방전극 형상 등을 얻을 수 있도록 하였다. 본 연구는 현재 한국기계연구원에서 개발 중인 배가스 처리량 1,500 Nm³/hr의 파일럿 플랜트를 개발하기 위한 사전연구로 시작되었으며, 이에 따라 본 연구에서는 파일럿 플랜트보다는 규모가 작은 가스량(최대 15 Nm³/hr)을 처리하는 소형 반응기에서 수행된 연구에 한하여 언급하였다.

2. 실험방법

그림 1은 가스처리 유량이 최대 15 Nm³/hr인 저온 플라즈마 탈황탈질 실험장치의 개략도이다.

본 실험에서는 실제 배가스대신 압축공기 및 실린더 가스를 사용한 모사가스(simulated flue gas)를 만들어 반응기에 공급했으며, 가스온도는 전기히터를 사용하여 조절하였다(최대가스온도: 100°C). 실험가스의 습도를 조절하기 위해서 공기가열기 전단에 물을 정량적으로 공급해주는 수분공급장치가 설치되어 있다. 본 실험에서는 wire-plate형식의 반응기 후단에 흡입팬을 설치하여 운전시 반응기의 압력이 10~50 mmAq.의 부압이 걸리도록하여 유독가스인 NO, CO, 오존 등의 누출을 방지하였다.

2.1 펄스전원공급장치

본 실험에서 사용된 펄스전원공급장치는 로타리 스파크

Table 1. Specification of the pulse generator.

Type of Pulse Switch	Rotating Spark-gap
Peak Voltage	50 kV
Average Power	200 W
Pulse Rise Time	50 nano sec
Repetition Rate	Max, 200 Hz
Duration of Pulse(FWHM)	300 nano sec

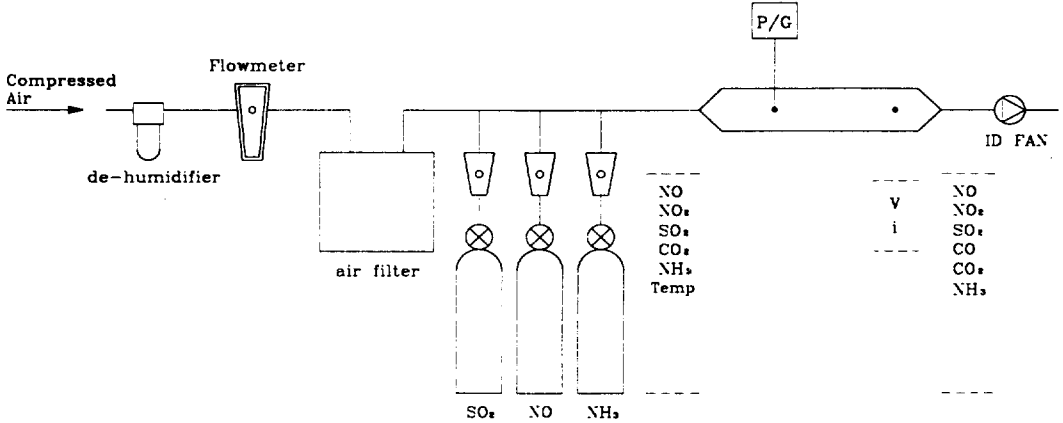


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

크랩 스위치를 이용하였고, 펄스전원공급장치의 사양은 표 1과 같다.

전압 및 전류의 파형은 350 MHz의 Lecroy사 제품과 250 MHz의 Tecktronix사 제품을 병행하여 측정하였다. 그림 2는 양극 스트리머 코로나를 발생시킬 때 인가된 전압-전류 곡선으로 전압의 상승시간은 50 나노초 그리고 펄스의 FWHM은 300 나노초 이내이다.

여기서, 전압의 상승시간이 길어질 수록, 공급된 전기 에너지는 산화력이 강한 OH, O 라디칼 등을 발생시키는데 필요한 전자들에게만 공급되는 것이 아니라, 이온에게도 동시에 전기에너지가 공급되는 것으로 알려져 있다 (Chang *et al.*, 1991). 이에 따라 필요 이상의 긴 시간동안 전원을 공급하게 되면 단순히 기체의 온도만을 상승시키는데 전기에너지가 소모된다. 따라서 저온 플라

즈마 공법에서는 상승시간이 매우 짧은 펄스전력의 공급이 운전 전력소모율을 줄이는데 중요하다.

2.2 wire-plate형 반응기

본 실험에서 사용한 반응기는 향후 대형 플라즈마 반응기 형식으로 채택될 가능성이 가장 높은 wire-plate형으로 사양은 표 2에 제시된 바와 같다. wire-plate형 반응기를 설계시 고려되어야 할 사항으로는 1) 처리 가스의 유속, 2) 펄스전원공급당 wire의 총 길이, 3) 방전봉간의 거리, 4) 방전봉의 직경 및 형상 5) 펄스전원공급 특성에 따른 방전판간의 폭 등이다. 지금까지 플라즈마 공정을 위한 wire-plate형 반응기의 최적설계연구가 거의 없었기 때문에 본 실험에서 제작된 반응기의 제반 사양은 현재 산업용으로 사용되고 있는 전기집진기의 일반적인 설계기준을 기초로 한 것으로, 표 2에서 제시된 사양은 저온 플라즈마 탈황탈질 반응기에 적합한 최적설계는 아니다. 따라서 저온 플라즈마 탈황탈질 반응기를 위한 최적의 설계기준은 향후 본 연구가 계속됨에 따라 보다 구체적으로 결정될 것으로 보여진다.

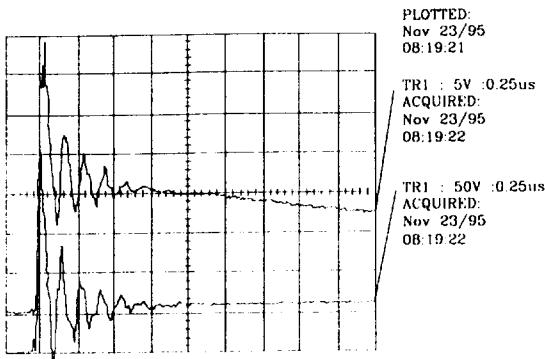


Fig. 2. Voltage and current oscillograms of the pulse generator.

Table 2. Specification of the wire-plate reactor.

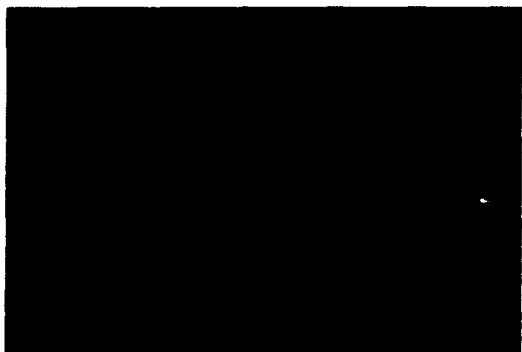
방전판간 폭	20 cm
Channel 수	1개
반응기 길이	2 m
방전봉의 직경	1.2 m
방전봉의 길이	20 cm
방전봉 수	19개
방전봉과의 거리	10 cm

2.3 스트리머 코로나

그림 3은 본 실험에서 ICCD (intensified CCD camera, 미국 Princeton사 제품) 카메라를 이용하여 wire-plate 반응기 (방전판의 간격: 6 cm, 방전봉: 1.2 mm sus wire) 내부에 양극 스트리머 코로나 및 양극 글로우 코로나를 발생시켜 이를 촬영한 것으로, 양극 스트리머 코로나는 펄스폭이 500 나노초 이내인 양극 펄스전원을 25 kV까지 인가하였으며, 양극 글로우코로나는 일반적인 전기집진기의 경우와 마찬가지로 DC 전원을 24 kV까지 인가하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 양극 스트리머 코로나는 방전 wire에서 발생되기 시작하여 방전판까지 공간적으로 분포된 반면에 양극 글로우 코로나는 방전 wire 부근에만 플라즈마가 존재하고 있다. 본 그림에서 명백히 볼 수 있듯이, 양극 스트리머



(a)



(b)

Fig. 3. Images of corona taken by intensified CCD camera, (a) streamer corona (applied voltage: positive pulsed voltage at 22 kV) and (b) glow corona (applied voltage: DC positive voltage at 24 kV).

코로나를 이용할 경우 그렇지 않은 경우보다 플라즈마의 공간적인 분포가 확장되어 탈황탈질 의 화학반응 영역이 상대적으로 광범위 함을 알 수 있다.

2.4 계측시스템

배가스내에 포함된 유해가스를 ppm 단위로 계측하는 데에는 많은 어려움이 따르며, 본 실험에서 계측시 특히 주의한 사항은 1) 반응기에서 계측기까지 연결된 샘플링 라인에서도 아황산가스가 수분과 암모니아에 흡수가 되는 것을 방지하였다는 점, 2) NOx 계측시 NO와 NO2를 구분하여 계측했다는 점, 그리고 3) NH3, NO, SO2 등을 동시에 계측할 경우 발생하는 간섭작용을 고려했다는 점을 들 수 있다. 본 실험에서는 아황산가스가 샘플링 라인에서 제거되는 반응을 방지하기 위해 샘플링 라인의 가열 (130°C 이상) 및 수분제거를 하였으며, 아황산가스의 연속계측 (NDIR법, 정 엔지니어링 제품)과 병행하여 가스 샘플링을 통한 화학분석법을 수행하였다. 본 실험에서 NO 및 NO2의 계측은 화학발광법 (Chemiluminescence법 영국 ROTOK사 제품)과 NDIR법 (정 엔지니어링사 제품)을 병행하여 계측하였는데, 화학발광법은 NO와 NO2를 구분하여 계측할 수 있는 장점이 있는 반면에, NH3가 존재할 경우 계측이 불가능한 단점이 있었다. 한편, 최근에는 NH3의 영향을 적게 받으면서도 NO 및 NO2의 계측이 가능한 NDIR법이 상용화되었기 때문에 본 실험에서는 이를 활용하였다. 본 실험에서는 계측에 앞서 일일 점검사항으로 표준가스 (한국 표준연구원제조)를 이용하여 영점교정과 스패ن교정 (span calibration)을 하였는데, 영점교정만이 가능한 포터블 계측기는 (portable analyzer) 상대적으로 신뢰도가 떨어짐을 확인할 수 있었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 탈황탈질 동시처리공정

본 실험에서는 1) C2H4의 주입과 2) 비균질 화학반응을 복합적으로 공정에 적용했을 경우에 탈황 및 탈질율을 살펴보았다. 이에 따라 비균질 화학반응을 일으키기 위해 아황산가스와 암모니아를 주입하고 (초기농도 [SO2]: 483, [NH3]: 1,200 ppm) 처리가스온도를 상온 15°C로 하였다. 실험 중 반응기내의 활발한 비균질 화학반응의 결과로 무수히 많은 작은 입자상의 암모늄염이 쉽게 관찰되었으며, 이 때 C2H4 농도를 300 ppm으로 맞추어 주입하였다. 그림 4는 이상과 같은 실험조건 하에서 펄스 피크전압에 따른 탈황 및 탈질율을 제시한

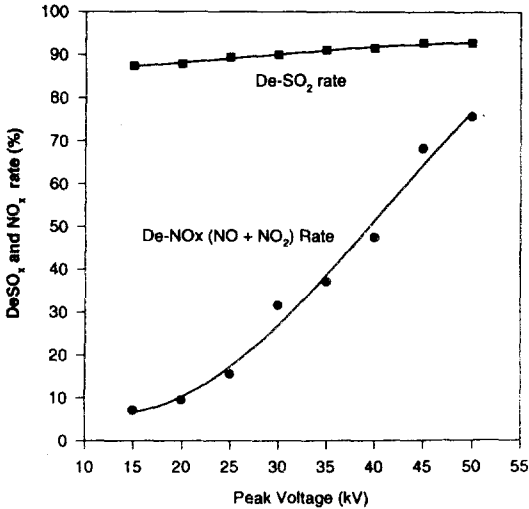


Fig. 4. Removal rate of SO₂ and NOx vs. peak voltage.

것으로, 전력공급을 최대로 증가시켰을 때 탈황율 90% 이상, 탈질율 75%까지 얻을 수 있었다. 여기서 NO 및 NO₂의 초기 농도는 각각 [NO]: 178, [NO₂]: 34 ppm이었고, 처리가스유량은 6 Nm³/hr였다. 본 실험에서 투입된 전력량은 15 Wh/Nm³로, 본 실험과 비슷한 전력량을 반응에 투입했으나 C₂H₄를 주입하지 않았던 Dinelli *et al.*, (1990)이 수행한 실험에서 얻은 탈황 및 탈질율 (각각 80%, 55%)과 비교해 보면, 본 실험에서 첨가된 C₂H₄의 플라즈마 공정에서의 긍정적인 효과를 알 수 있었다. 한편, 90년도에 보고된 일본의 소규모 실험에서는 플라즈마 방전화학만으로 탈질처리할 경우에 소요되는 전력소모량이 약 90 Wh/Nm³에 이르고 있어 (Masuda *et al.*, 1990), C₂H₄의 주입과 비균질 화학 반응을 복합적으로 플라즈마 공정에 적용했을 경우에 얻어지는 매우 큰 소요전력의 절감효과를 알 수 있다.

그림 5는 비균질 화학반응이 탈질율에 미치는 영향을 살펴본 것으로, 탈황탈질이 동시에 처리될 경우와 탈질만이 처리될 경우의 탈질율을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 탈황과 탈질이 동시에 처리되어 비균질 화학 반응이 존재할 경우, 생성된 황산이어서 조금에 NO₂가 흡수되어, 탈질만을 처리한 경우에 비해 결과적으로 높은 탈질율을 보이고 있음을 보이고 있다. 탈질만을 처리한 경우 계측된 NOx의 구성은 거의가 NO₂로 (약 88%), 이는 본 실험에서 방전화학반응의 주된 역할은 NO를 NO₂로 산화시키는 데 있는 반면에, 대부분의 NO₂는 비

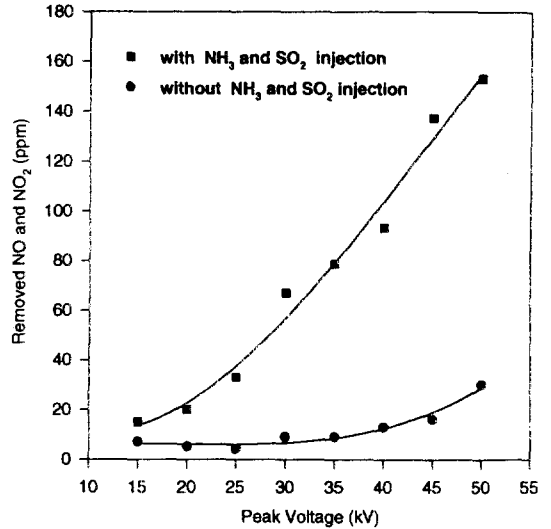


Fig. 5. Removal rate of NOx (NO and NO₂) vs. peak voltage; ■: with NH₃ and SO₂, ●: without NH₃ and SO₂

균질 화학반응을 통해 제거되었음을 보여준다. 한편, NO가 NO₂로 산화되는 과정은 비균질 화학반응에는 커다란 영향을 받지 않으며, 탈황을 동시에 처리하지 않을 경우에도 90% 이상의 NO가 NO₂로 변환되고 있음을 실험을 통해 알 수 있었다.

3.2 초기 NO 농도 및 C₂H₄ 주입량에 따른 NO 제거율

앞절의 실험조건과는 달리 SO₂와 NH₃를 공급하지 않고, 즉, 비균질 화학반응을 상대적으로 저감시킨 조건에서 NO의 초기농도 및 C₂H₄ 주입량을 변화시켜주면서 실험을 수행하였으며, 그 결과는 그림 6에 제시되었다.

본 실험의 처리가스온도는 상온 (15°C)이고, 가스처리량은 6 Nm³/hr로 유지하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이, 1) C₂H₄의 주입량이 증가할 경우 추가적인 전력량의 투입이 없이도 산화되는 NO량이 꾸준히 증가되며, 2) NO의 초기농도가 증가하면, NO의 제거율이 저감됨을 볼 수 있었다. 이와 같이 저온 플라즈마 분위기내에 주입된 C₂H₄가 NO의 산화를 증가시키는 이유는 탄화수소가 NO의 산화에 필요한 OH 라디칼을 발생시키기 때문으로 알려져 있으나 (Mizuno *et al.*, 1995; Vogtlin *et al.*, 1992), 구체적인 화학반응과정은 아직 명확히 알려져 있지 않고 있다. 한편, 초기 NO의 농도가 증가하면 NO의 제거율이 감소됨을 그림 6을 통해 알 수 있

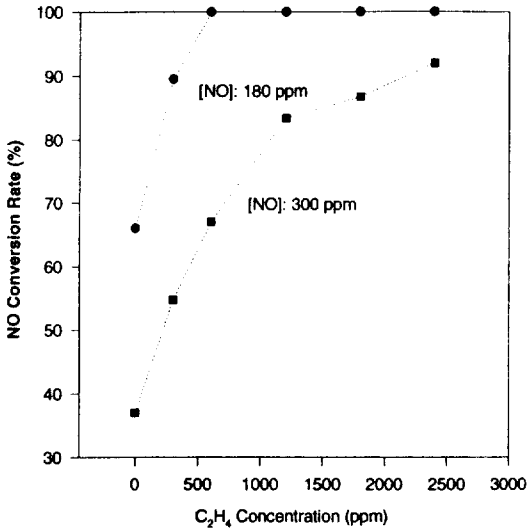


Fig. 6. Removal rate of NO vs. initial concentration of C₂H₄, and NO (applied peak voltage: 50 kV)

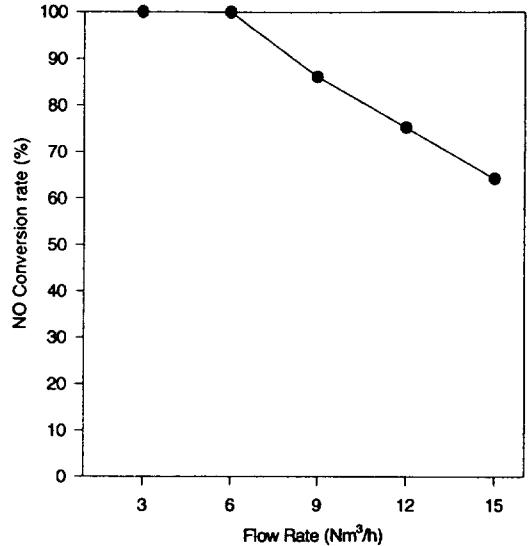


Fig. 7. Removal rate of NO vs. flow rate of treated gas.

는 데, Masuda *et al.* (1990)은 투입된 전력량에 따라 제거되는 NO의 절대적인 양이 정해져 있음을 밝히고, 이에 대한 실험적인 상관관계식 (empirical correlation)을 제시하였다.

본 실험에서는 C₂H₄의 첨가로 인해 NO 산화에 소요되는 전력량이 절감될 수 있는 기술적 장점을 제시하였으나, 1) C₂H₄의 주입에 따른 운전비용의 상승, 2) 첨가된 C₂H₄이 미처 반응되지 못할 경우 본 공정에서 다른 형태의 유해물질(VOC)이 배출될 가능성에 대한 검증은 수행되지 못하였다. 이에 따라 향후의 연구과제로서 1) 보다 저렴한 탄화수소의 첨가 및 2) 미반응 C₂H₄ 대책 (투입량 조절, 투입방식의 개발 등) 등이 수행되어야 할 것을 알 수 있다.

3.3 가스처리량에 따른 NO 제거율

지금까지 기술한 실험 결과는 NO의 제거량을 증가시키기 위해서는 이에 따른 전력공급량 혹은 C₂H₄ 주입량의 증가 등 반드시 운전비용의 상승을 초래하였다. 본 실험에서는 동일한 전력공급 조건에서 단순히 처리가스량을 증가시켜 보았는데, 이 경우 NO 제거량이 유량에 비례하여 감소하는 것이 아니라, 완만한 감소를 보임을 알 수 있었다. 그림 7 및 그림 8은 배가스내 NO 농도가 185 ppm, 투입전기에너지가 135 W, C₂H₄ 투입량이 300 ppm일 때, 처리가스 유량증가에 따른 NO 산화율 및 단위 전기 에너지 투입량당 제거된 NO의 질량을

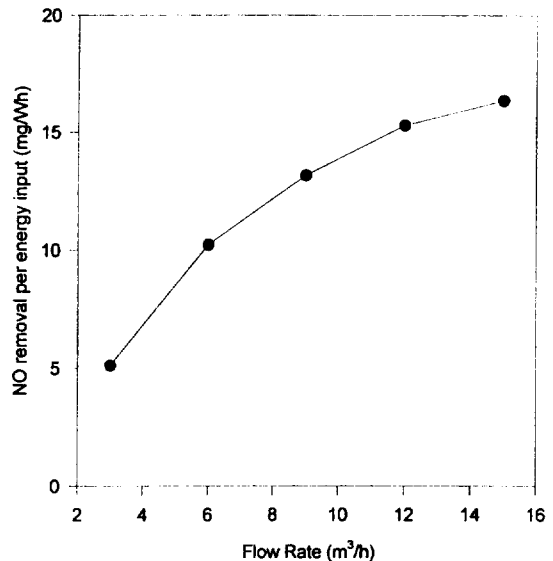


Fig. 8. Removal NO per energy input (mg/Wh) vs. flow rate of treated gas.

제시한 것으로, 처리 가스량을 증가시켰을 때 제거 효율은 다소 떨어지더라도 투입된 전기에너지당 NO의 절대적인 제거량은 오히려 증가함을 보이고 있다. 따라서 실용화된 플라즈마 탈황탈질 공정을 운전할 경우, 탈황율은 90% 이상으로 높게 하는 반면에 탈질율은 60% 정도

로 낮게 운전하는 것이 경제성 측면에서는 유리함을 알 수 있었다.

한편, 현재 NOx의 규제가 전세계에서 가장 엄격한 유럽국가의 배출허용치가 100 ppm이므로 배가스내의 NOx 농도가 200 ppm 전후인 경우, 50%의 탈질율로 플라즈마 공정을 운전하는 것이 유럽국가에서는 가능하기 때문에 실제로 이태리의 ENEL의 실험에서도 탈질율 55~60%로 운전하였다 (Dinelli, 1990). 이 경우 ENEL에서 소모한 전력에너지는 발전소발전량의 약 5%에 해당하는 12~15 Wh/Nm³였는데, 본 실험에서는 그림 7에 제시된 바와 같이, 탈질율 65%일 경우 소모된 전력 에너지가 발전소 발전량의 3%에 해당하는 9 Wh/Nm³이였기 때문에, 본 실험에서 사용된 CH 계열 가스의 주입 및 비균질 화학반응과 같은 전력절감기술을 실용화할 경우 플라즈마 공정의 경제성은 더욱 높아질 수 있을 것으로 보여진다.

4. 결 론

가스처리량 15 Nm³/h의 wire-plate형 반응기에서 수행한 본 연구결과는 다음과 같이 요약될 수 있었다.

- 1) 플라즈마 탈황탈질의 운전소모전력은 지금까지 화력발전소 발전량의 5% 정도로 알려져 왔으나, 비균질 화학반응 및 C₂H₄의 첨가로 인해 운전전력 소모량이 3% 이내로 감소될 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 본 실험연구에서는 과거 대부분의 소규모 실험연구에서 사용되어 온 wire-cylinder 반응기 형식을 사용하지 않고, 실용화된 플라즈마 공정에서 사용하게 될 wire-plate형 반응기를 현재 산업용 전기집진기의 설계기준을 근거로 제작하여 wire-plate형 반응기를 사용하였는데, 이 경우 wire-cylinder 반응기 못지 않은 성능을 얻을 수 있었다.
- 3) 탈황탈질을 동시에 수행한 본 실험에서는 기존에 실용화된 탈황 및 탈질의 각 공정(습식 탈황공정 및 SCR 공정)에서 얻을 수 있는 탈황 및 탈질율과 비슷한 수준인 90%, 80%의 탈황탈질율을 각각 얻을 수 있음을 알 수 있었다.
- 4) 탈황 및 탈질을 동시에 수행할 경우, NOx의 제거율은 급격히 증가하였다. 이는 탈황과정을 거치면서 발생된 작은 입자상의 황산암모늄염의 표면에 NO₂가 NH₃와 함께 흡착반응을 일으키는 비균질 화학반응의 결과로, 저온 플라즈마 공정의 전력소

모량을 감소시킬 수 있는 핵심기술임을 알 수 있었다.

- 5) 에틸렌 (C₂H₄)의 주입은 추가적인 코로나 에너지의 투입이 없이도 NOx 제거율을 증가시키고 있었다.
- 6) 초기 NOx의 농도가 증가하면 이에 비례하여 탈질율은 감소하지만, 처리가스량의 증가에 따라서는 탈질율이 매우 완만하게 감소되었다. 이에 따라 실용화된 플라즈마 탈황탈질 공정에서는 탈질율과 전력소모율간의 최적운전조건이 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 과제의 수행을 위한 한국중공업(주) 기술연구소의 연구비지원에 대하여 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Chang, J-S., P. Lawless, and T. Yamamoto, (1991) Corona discharge process, IEEE Transaction on Industry Applications, 19(6), December, 1152-1166.
- Chang, J-S. (1992) Energetic electron induced plasma processes for reduction of acid and greenhouse gases in combustion flue gas, NATO ASI Series, G 34, Part A, 1-32.
- Civitano, L. (1992) Industrial application of pulsed corona processing to flue gas, NATO ASI Series, G 34, Part B, 103-130.
- Dinelli, G., L. Civitano, and M. Rea (1990) Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NOx and SO₂ from flue gas, IEEE Transactions on Industry Applications, 26(3), May/June, 535-541.
- Jogan, K., A. Mizuno, T. Yamamoto, and J-S. Chang (1993) The effect of residence time on the CO₂ reduction from combustion flue gases by an AC ferroelectric packed bed reactor, IEEE Transactions on Industry Applications, 29(5), 876-881.
- Masuda, S. (1992) Report on novel dry DeNOx/DeSOx technology for cleaning combustion gases from utility thermal power plant boilers, NATO ASI Series, G 34,

- Part A, 131-137.
- Masuda, S. and H. Nakao (1990) Control of NO_x by positive and negative pulsed corona discharges, IEEE Transactions on Industry Applications, 26(2), March/April, 374-383.
- Masuda, S. (1988) A ceramic-based ozonizer using high-frequency discharge, IEEE Transactions on Industry Applications, 24(2), 223-231.
- Mizuno, A., K., Shimizu, A. Chakrabarti, L. Dascalescu, and S. Furuta (1995) NO_x removal process using pulsed discharge plasma, IEEE Transactions on Industry Applications, 31, 957-963.
- Rea, M. and K. Yan (1992) Energization of pulsed corona induced chemical processes NATO ASI Series, G 34, Part A, 191-204.
- Vogtlin, G.E. and B.M. Penetrante (1992) Pulsed corona discharge for removal of NO_x from flue gas, NATO ASI Series, G 34, Part B, 187-1198.