Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 12, No. 2, pp. 188-192, 1999.

# 자계가 인가된 원통형 플라즈마 반응기에서 질소산화물(NOx)의 제거특성

논 문
12-2-14

## A removal characteristics of NOx at the cylinderical plasma reactor with magnetic field

박재윤*, 이재동*, 고용술*, 한상보*, 박상현*, 이덕출**

(Jae-yoon Park*, Yong-sul Koh*, Jae-Dong Lee*, Sang-Bo Han*, Sang-Hyun Park*, Duck-Chool Lee**)

**Abstract**

The effect of magnetic field was measured on NOx removal for cylinder-wire plasma reactor with magnetic field applied to electric field vertically. Electric power was supplied to plasma reactor using rotating spark gap switch. Consumption power increased with increasing discharge voltage. When magnetic field was applied to electric field vertically, consumption power was less than that without magnetic field because of lorenz's force. NOx removal rate of plasma reactor with magnetic field were higher, 10-15%, than that of plsama reactor without magnetic field. And NOx removal rate decreased with increasing gas flow rate.

**Key Words(중요용어)** : NOx removal(NOx 제거율), Pulsed corona discharge(펄스 코로나 방전) Magnetic field(자계), Consumption power(소비전력)

## 1. 서 론

오늘날 화력발전소, 자동차 및 산업체 등에서 배출되는 탄소산화물($CO_2$), 황산화물(SOx) 및 질소산화물 (NOx)은 주요 대기오염 가스이다. 이들 중 질소산화물(NOx)은 화력발전소와 같은 고정 발생원과 자동차와 같은 이동 발생원에 의해서 대부분 발생된다. 질소산화물은 연소과정의 고온에 의해 공기중의 질소($N_2$)와 산소($O_2$)가 반응하여 생성되고, 배기가스의 약 95[%] 정도가 NOx이며 반응성이 낮기 때문에 제거가 상당히 어렵다[1-3]. NOx는 대기로 배출되어 대기중의 $O_3$, $O_2$, 수분 등에 의하여 $NO_2$, $NO_3$, $N_2O_4$, $N_2O_5$ 등으로 산화되고 대부분은 $NO_2$이다. 이들은 공기중에서 에어로졸 상태가 되어 산성비가 된다. 또한 미연소 탄화수소(HC)가 존재할 경우, 태양광선의 자외선에 의해 광화학 반응이 일어나 2차 오염물질인 $O_3$, Formaldyde, Acrolein, PAN 등을 생성시킨다. 이들로 인한 피해는 매우 광범위하며 단시간에 인체에 미치는 영향은 주로 호흡기의 질환 및 시각 장애를 유발한다. 장기간 오염원에 노출되면 호흡기 질환이 만성화되고 심폐기능이 회복 불가능한 상태가 될 수 있다. 이러한 오염원에 금속이 노출되면 부식이 되고 정밀기계인 경우 그 피해는 심각하다[4].

최근에는 30~40년간 NOx 저감 연구가 지속되고 있으며 저감방법으로는 공기와 연료의 최적 혼합비를 이용하는 방법과 습식공정인 수세법, 알카리흡수법, 액상환원법, 건식공정인 접촉환원법과 무촉매환원법을 이용한 방법이 있다. 이러한 방법들은 화력발전소와 같은 대형 고정원의 배기가스 정화처리에 우수한 특성을 보인다. 그러나 최근에는 전기방전을 이용하는 방법과 전자빔을 이용하는 방법 등이 활발히 연구되고 있다. 이들은 광범위하고 다양한 종류의 복합 유해 가스의 처리에 이용될 수 있다[5]. 특히, 에너지의 효율이 좋은 펄스 코로나를 이용한 전기적인 방법이 아주 관심을 모으고 있다. 수십[㎸]의 고전압 펄스를 플라즈마 반응기 전극간에 인가하고, 반응기 내부를 플라즈마화하여 오염가스를 제거하는 방법으로 2차 오염가스가 발생하지 않기 때문에 첨단 유해가스처리법으로 인식되고 있다[6].

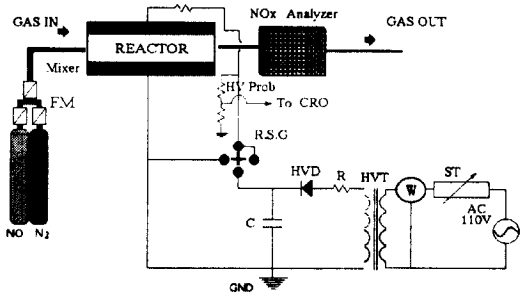
본 연구에서는 일반적으로 저온플라즈마를 이용한 경우 NOx제거를 위해 많은 전력이 필요하므로 이러한 소비전력을 감소시키기 위해 전극간에 인가된 전계방향과 직각방향으로 자계를 형성시킨 전자계응용

* : 경남대학교 전기공학과
(경남 마산시 월영동 449번지, Fax : 0551-249-2839 E-mail : jypark@hanma.kyungnam.ac.kr)
** : 인하대학교 전기공학과
1998년 8월 18일 접수, 1999년 1월 25일 심사완료

실린더-선형 반응기에서 NOx제거에 미치는 자계의 영향을 측정하고 분석하였다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험 장치




FM : flow meter, HVD : high voltage diode
ST : slide transformer, C : capacitor [33.6μF]
CRO : oscilloscope (powerpro 610), W : powermeter
R.S.G : rotating spark gap switch,
HVT : high voltage transformer
R : stability resistance [50kΩ]

그림 1. 실험장치 개략도
Fig. 1. Experimental Setup

본 논문에서는 R.S.G(Rotating Spark Gap)스위치를 사용하여, 구형파 펄스 전압을 발생시켜 전원으로 사용하였다. 또한 NOx의 가스농도를 측정하기위하여 미국 G.C社의 GC-952와 GC-901 가스센서를 사용하였고 전압 및 방전전류의 파형은 Pluse Electronic社에서 제작된 High Voltage Probe(내압50[kV] 1900:1)를 이용하여 미국의 Tetronix社의 Tek2440 오실로스코우프로 측정하였다. 방전소비전력은 아날로그형 전력계를 사용하여 측정하였다. 또한, 실험에 사용된 자석은 Mn-Zn 페라이트 자석이고, 자석의 자속밀도는 4000[Gauss]이다. 모의 샘플가스는 한국표준과학연구소에 의뢰하여 제작된 NO의 가스농도가 1918[ppm]인 NO-$N_2$ 혼합가스이며 $N_2$를 첨가하여 실험목적에 따라 NOx의 초기농도를 조절하여 사용하였다. 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 그림1에 도시한다.

그림 2는 본 논문에 사용된 각종 반응기의 형태를 도시한 것이다. 그림에서 (a)와 (b)형 반응기는 입구와 출구부분에 가스의 흐름이 안정화 되도록 테프론 버퍼를 플라즈마 반응기 단말부에 연결하였다. (b)형 반응기는 원통형 반응기 주위에 환형영구자석을 삽입하여 반응기 내부에 전자계영역을 형성하

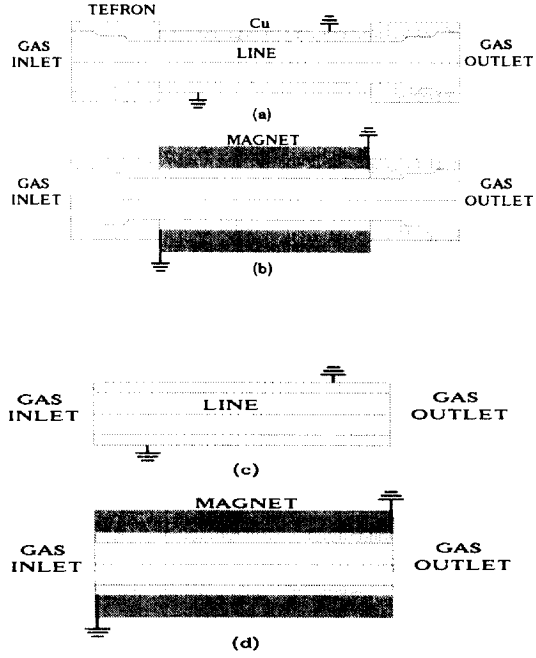



그림 2. 실험에 사용한 반응기 형태
Fig. 2. Schematic diagrams of reactor

여 방전시 발생하는 전자에 작용하는 로렌쯔힘에 의한 NOx제거의 영향을 분석하였다. 또한 (c)와 (d)형의 플라즈마 반응기는 모의가스의 유동형태의 영향을 보기 위해 반응기 단말부의 버퍼를 제거한 반응기 형태를 나타내고 있다. 실린더의 재질은 구리, 선전극은 텅스텐을 사용하였다. 플라즈마 반응기의 길이는 300[mm]이다.

### 2.2 실험 방법

실험은 선전극에 펄스 그 전압을 인가하고 실린더형 전극은 접지 시켰으며 기온이 20℃ 내외인 대기압 상태에서 하였고 반응기 외부에 자석부착의 유무에 따라 질소산화물(NOx)의 제거율과 소비전력을 측정하고 상호 비교하였다. 모의가스의 유량오차를 줄이기 위해 NOx, $N_2$ 등의 특정가스에 대해 보증값이 실증된 유량계를 사용하여 반응기에 유입되는 가스유량을 조절하였다. 가스유량은 1[1/min], 3[1/min] 및 5[1/min]로 변화하였다. 초기농도가 1918[ppm]인 NOx에 $N_2$가스를 첨가하여 실험을 위한 혼합가스의 농도를 200[ppm], 400[ppm], 600[ppm]그리고 800[ppm]으로 변화시켰다. 이들 혼합가스 농도중에서 디젤 자동차의 배기가스중의 NOx농도와 비슷한 800[ppm]을 기본 측정농도로 하였다. 각 조건에서 측정값이 5분 이상 연속적으로 유지되고 3회 연속 측정한 값의 평균값들을 취하였

다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3. 1 자속밀도분포 및 방전특성

그림 3은 실험에 사용한 반응기 내의 자속밀도를 가우스 미터를 이용하여 측정한 결과이다. 자속밀도는 자석의 단말부에서 최대값 880[Gauss]가 측정되었고, 중심부에서는 최소값 340[Gauss]가 측정되었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 전계가 집중될 가능성이 높은 반응기의 단말부에 자속 밀도도 높음을 알 수 있다.

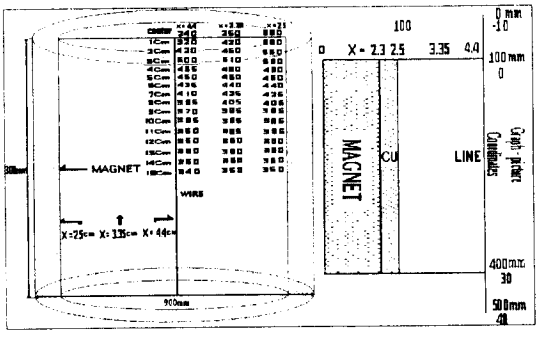


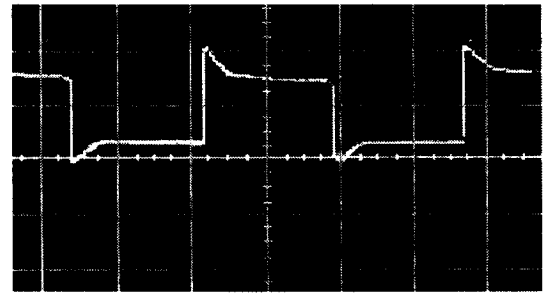

그림 3. 방전관의 단면구조와 자속밀도분포

Fig. 3. Magnetic flux density at cylinderical reactor

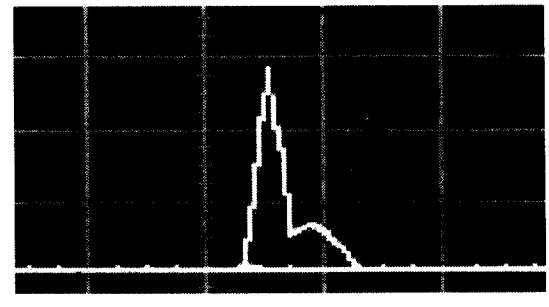
그림 4는 전압 11[kV], 반복율이 400[Hz]인 구형파 펄스 전압과 그 방전전류파형을 나타낸 것이다. 구형과 펄스전압의 상승시간은 50[ns]이었고, 파두에 큰 오버슈터가 나타났으며, 이때 큰 전류가 흐른다.

그림 5는 그림 2에 도시한 반응기들의 인가 전압에 대한 반응기와 R.S.G(Rotating Spark Gap)에서의 소비전력을 나타내고 있다. 인가전압이 증가함에 따라 소비전력이 증가되었고, 자계가 인가된 경우의 소비전력이 자계가 인가되지 않은 경우의 소비전력보다 감소되었다. 또한 반응기의 입구 및 출구부분에 버퍼가 있는 반응기의 소비전력이 작은 것으로 나타났다. 그림 5에서(d-1)은 그림 2의 (d)형 반응기의 출구단면적을 50[㎟]에서 25[㎟]로 축소시킨 것으로 소비전력이 크게 증가하였다. 이는 출구의 면적이 감소되면 반응기 내부 플라즈마 밀도가 상승하고 따라서 임피던스가 감소되어 방전전류가 증가되기 때문인 것으로 생각된다.

그림 6은 그림 2의 (a)와 자계가 부착된 (b)형 플라즈마 반응기에서 펄스의 반복율을 300[Hz]로 유지시키고 유량증가에 따른 전극간의 아크로의 전이전압



(a)



(b)

그림 4. 인가전압 및 전류파형

Fig. 4. Voltage (a) and current (b) wave forms

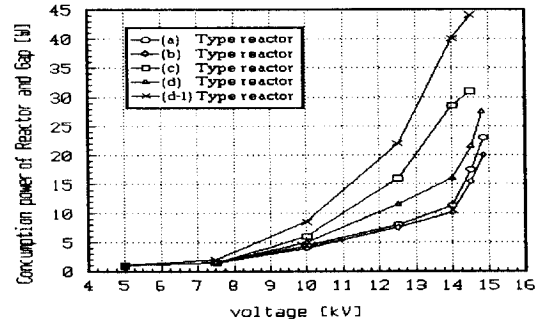



그림 5. 반응기와 R.S.G의 소비전력

Fig. 5. Consumption power by reactor and R.S.G

을 나타낸 것이다. 혼합가스의 유량을 증가함에 따라 전이전압이 낮아졌다. 이는 유량이 증가함에 따라 반응기 내부의 플라즈마 밀도가 상승되고, 동시에 플라즈마 반응기 내부 가스의 임피던스가 감소하여 아크로의 전이전압이 낮아지는 것으로 생각된다. 또한 그림에서 자계가 인가된 그림(b)형 반응기의 경우

가 자계가 인가되지 않은 그림(a)형 반응기보다 아크 전이전압이 높게 나타났다. 이는 그림3에서 보는바와 같이 전계가 집중되는 반응기의 입출구 단말부의 가장자리에 자계도 집중되므로 자계가 방전의 진행을 억제하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 자계를 인가하면 동일조건에서 더욱 높은 전압을 전극에 인가할 수 있고 전자의 에너지를 상승시켜 NOx의 분해효율도 향상될 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.2 NOx 제거 특성

그림 7은 그림 2의 플라즈마 반응기 형태에 따른 NOx 제거율을 나타낸 것이다. 전압이 상승함에 따라 제거율도 선형적으로 증가되었다. 그림 2의 자석이 부착된 (b)형 반응기는 자석이 부착되지 않은 (a)형 반응기보다 NOx의 분해율이 높게 나타났다. 이것은 자계가 인가되면 3.1항에서 설명한 것과 같이 자계를 인가하지 않은 경우보다 전극간에 더욱 높은 전압을 인가할 수 있으므로 반응기내의 전자 에너지를 증가시켜 NOx의 제거율을 증가시킬 수 있으며, 또한 전자계영역에서 발생되는 로렌쯔힘에 의한 전자의 사이크로트론 운동에 의해 가스분자와의 충돌횟수가 증가되고 전자의 전극간 이동시간 즉 잔류시간이 길게 되어 NOx 분해효율이 향상되는 것으로 사료된다[7),8),9)]. 그림 2의 (c), (d)형 플라즈마 반응기는 가스의 흐름이 입출구부분에서 급준하게 변화하므로 안정된 가스흐름을 나타내는 (a), (b)반응기보다 상대적으로 유량이 크기 때문에 저전압영역에서 NOx 제거율이 (a), (b)반응기보다 낮으나 높은 전압영역에서는 입출구의 가장자리부분의 가스흐름이 정체된 영역에서 방전이 쉽게 발생되어 전체 반응기로 확산되어 분해율이 (a), (b)형 반응기보다 NOx의 제거율이 향상되나 방전전류가 크게 증가된다. 그러므로

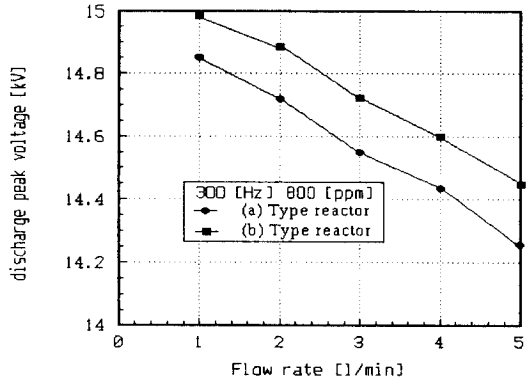



그림 6. 아크전이전압에 대한 유량의 영향

Fig. 6. Effect of gas flow rate on arc transition voltage

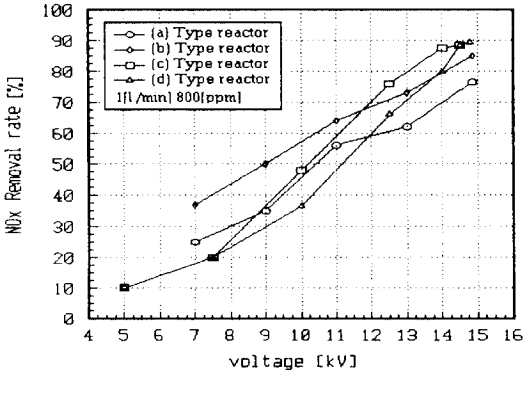



그림 7. 반응기 형태에 따른 NOx 제거율

Fig. 7. NOx removal rate as reactor types

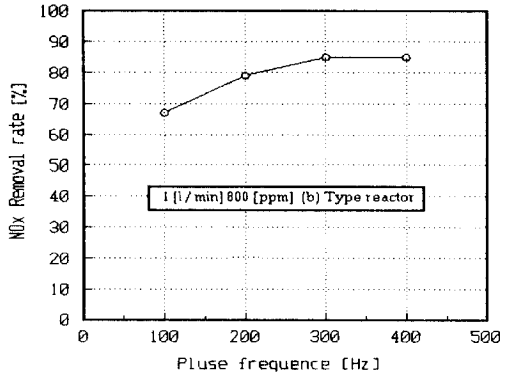



그림 8. NOx 제거율에 대한 주파수의 영향

Fig. 8. Effect of frequence NOx removal rate

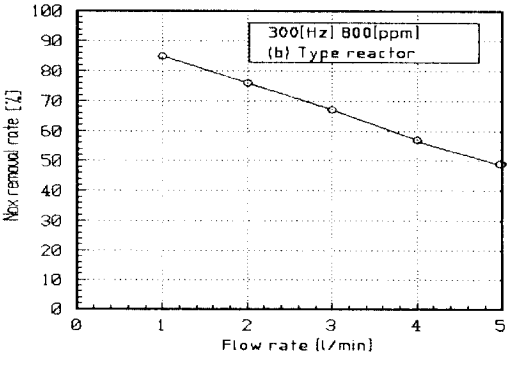



그림 9. NOx 제거율에 대한 유량의 영향

Fig. 9. Effect flow rate NOx removal

NOx제거를 위한 에너지 효율은 감소될 것으로 사료된다.

그림 8은 그림 2의 (b)형 플라즈마 반응기에서 구형과 펄스 전압이 14.8[㎸]일 때 펄스 반복율 변화에 따른 NOx제거율을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 구형과 펄스전압의 반복율이 증가함에 따라 질소산화물(NOx)의 제거율이 증가하고 있다. 이는 반복율의 증가에 따라 단위 시간당 반응기 내부에 전달되는 에너지의 증가 때문인 것으로 사료된다. 또한 300[㎐]이상의 주파수에서는 NOx제거율이 거의 포화되는 현상이 나타났다.

그림 9은 그림 2의 (b)형 플라즈마 반응기에서 펄스 반복율을 300[㎐]로 일정하게 하고 가스유량의 증가에 따른 질소산화물 (NOx)의 최대 분해율을 나타내고 있다. 가스 유량이 선형적으로 증가함에 따라 NOx가스의 플라즈마 반응기에서의 잔류시간이 감소하여 NOx 분자가 충분한 에너지를 받지 못하여 미분해된 상태로 배출됨을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 대기오염가스의 처리를 위해 제작된 자계가 인가된 실린더-선형 플라즈마 반응기에서 NOx제거 특성에 미치는 자계의 영향을 측정하고 분석하였다. 자계는 반응기의 입출구 단말부의 전계가 집중되는 부분에 집중되며 방전이 아크로 진행하는 것을 저지하는 것으로 사료된다. 반응기 입출구부분에 가스의 흐름을 균일하게 하는 버퍼가 있는 경우 NOx제거율은 약간 감소하지만 소비전력이 크게 감소하였다. 자계가 인가된 경우의 소비전력이 자계가 인가되지 않은 경우보다 작게 나타났으며, NOx제거율은 자계인가의 경우가 자계를 인가하지 않은 경우보다 10~15[%]증가하였다. 이는 자계에 의해 로렌쯔힘이 발생되고 전자의 사이크로트론 운동에 의해 전자의 전계방향의 실질 이동거리를 감소시킴으로서 전류가 감소되고 소비전력이 감소되는 것으로 사료되며, 전자의 전극간 이동거리가 증가하여 NOx와 충돌횟수가 증가하기 때문에 NOx제거율이 증가되는 것으로 생각된다. 또한 NOx제거율이 증가되었으나 300㎜]이상에서는 포함되는 현상이 나타났다.

## 참 고 문 헌


1. 박재윤 "침대평판전극에서의 NOx 제거특성", '95 대한전기학회 하계 학술대회논문집, pp. 1317-1319(1995).
2. 김종달, 박재윤, 고희석 "코로나 방전을 이용한 배기가스중의 NOx 제거", 한국전기전자재료학지, Vol. 8, No. 6, pp. 721-726(1995).
3. 장철현, 신남철, 유해가스 처리공학, 동화기술(1995).
4. 김종달, 코로나 방전플라즈마에 의한 NOx의 제거, 박사학위 논문(1996).
5. Akira Mizuno, Kazuo Shimizu, Alok Chakrabarti, Lucian Dascalescu, Satoshi Furuta, "NOx removal process using pulsed discharge plasma", Conf. Rec. of IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 1977-1982(1993).
6. S. Masuda, "Destruction of gaseous pollutants and air toxics by surface discharge induced plasma chemical process (SPCP) and pulse corona induced plasma chemical process(PPCP)", Non-Thermal Plasma Tecniques for pollution Control Part B, Sringer-Verlag Pub. Co, pp. 179-201(1993).
7. Jae-Yoon Park, Geon-Ho Kim, Jong-Dal Kim, Hee-Seog Koh, "Removal of NOx from Dry Air by a Pulsed Corona Discharge with Magnetic Field", J. Adv. Oxid. Technol., Vol. 2, NO. 2(1997).
8. 秋山秀典 외1인, "고전압 Pluse Power 공학" 森北出版社(1991).
9. Jae-Yoon Park etal, "NOx Removal Using DC Corona Discharge with Magnetic Field" Combust. Sci. and Tech., Vol. 333, pp. 65-77(1998).