

선 대 평판형 플라즈마 반응기를 이용한 자계 시물레이션과 질소산화물제거 특성

論 文

52C-9-7

Simulation of Magnetic Field and Removal Characteristic of Nitrogen Oxide Using Wire-Plate Type Plasma Reactor

李賢洙* · 朴在潤**
(Hyun-Soo Lee · Jae-Yoon Park)

Abstract - The purpose of this paper is to study the removal of nitrogen oxide(NOx) using a wire-plate type plasma reactor with magnet attached for indoor air purification. In order to produce a more effective reactor, we conducted magnetic field simulations. The results of the magnetic field simulations show that NOx can be removed more effectively. The results from the magnetic field simulation show that when 7 magnets were applied to the reactor, the magnetic flux density was at its highest amount than when using 0, 3, or 5 magnets. From the data obtained by the simulation results a plasma reactor was made and thus, several experiments were conducted. The best removal efficiency was obtained with 14 W AC power to the reactor with 5 magnets.

Key Words : nitrogen oxide (NOx), wire-plate, plasma reactor, magnetic field

1. 서 론

산업의 고도화 및 도시의 집중화로 오염물질의 종류가 다양화 되었으며 여러 가지 오염물질 중에서도 비산분진, 황산화물(SOx : sulfur oxide) 등은 연료 중의 특정 성분을 제거하거나 연료를 대체하여 그 배출량을 줄일 수 있다. 그러나 질소산화물(NOx : nitrogen oxide)의 경우에는 연료의 문제가 아니라 고온연소과정에서 반드시 발생하는 특징을 가진 오염 물질이다. 이와 같은 환경 오염물질을 제거하기 위한 청정화 기술이 필요하며 이 기술은 플라즈마 반응기로써 자동차 배기가스에서 발생하는 NOx, 화력발전소에서 발생하는 NOx, SOx 등 여러 종류의 오염원을 제거하기 위하여 다양한 형태의 반응기가 개발되었거나 개발 중에 있다[1-7]. 환경오염 가스의 제거기술 개발에 있어 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 오염가스 제거의 효율성과 경제성 문제이나 이러한 기본적인 문제점의 해결방안 제시를 위한 청정화 기술은 아직 미흡한 실정이며 현재 국내외의 실내 유해가스 처리 반응기로는 선 대 선형, 선 대 실린더형, 평판 대 평판형 플라즈마 반응기가 이용되고 있다.

본 연구에서는 사무실, 가정 등 주로 실내공기 정화를 위한 여러 가지 형태의 플라즈마 반응기를 제작하여 NOx 제거에 대한 실험을 하였다. 그 결과 선 대 평판형 플라즈마 반응기가 NOx 제거에 좋은 특성을 나타내었다. 따라서 보다 효율적인 NOx 제거를 위하여 선 대 평판형 플라즈마 반응기의 자석수에 의한 자계세기 및 자속밀도분포에 대한 시물레

이션을 하였다. 여기서 도출된 시물레이션 결과를 바탕으로 자석이 부가된 플라즈마 반응기를 제작하였고 제작된 반응기를 이용하여 NOx 제거에 대한 실험을 하였다.

2. 시물레이션

2.1 자계 시물레이션

2.1.1 자계 시물레이션 기법

최적의 반응기 제작에 있어 반응기 내의 자계에 대한 시물레이션 형상 분할 기법을 그림 2.1 (a), (b)에 나타내었다. 형상의 설계는 보통 삼각형의 셀과 사각형의 셀로 나뉘며 각각의 형상조건에서 장단점은 모두 있다. 삼각형의 경우는 기본적으로 사각형 셀의 둔각 부분 해석에 유리한 조건을 갖고 있다. 왜냐 하면 그림 2.1 (a)와 같이 삼각형 셀의 경우는 3면으로 구성되어 미소 구간까지 삼각형의 형태로 자를 수 있기 때문이다. 하지만 구조가 복잡하고 삼각형 셀의 한 내각이 둔각일 경우 각 꼭지점에서 같은 거리에 있는 해석하고자 하는 지점이 삼각형의 외부면에 있게 되는데 이러한 경우 전산 해석이 불가능한 경우가 된다. 이는 사각형의 형상 설계 경우와 같이 외부면에서 셀의 중심부로 에너지가 유출입되는 것을 해석하는 것이 아니라 내부에서 에너지가 이유 없이 생겨 밖으로 배출되는 현상으로 해석되기 때문에 발산 알고리즘이 된다. 그러므로 자연계에서는 있을 수 없고 수식 또한 큰 어려움을 갖게 된다. 그러나 각각의 부분에서 셀의 크기가 균등한 크기가 아니므로 미세한 구간에서 극소 어려움을 갖지만 무시할 수 있을 정도이다. 일반적으로 사각형의 경우는 셀의 사각 모두가 90°에 근접할 경우 수렴의 정도가 우수하다. 이는 외부 사면에서 셀의 중심부로 유출입되는 에너지의 관계를 해석하기 때문이다. 그러므로 직각 형태 구조물의 형상을 해석하는데 우수하지만 각각의 면과 면이 이루는 각

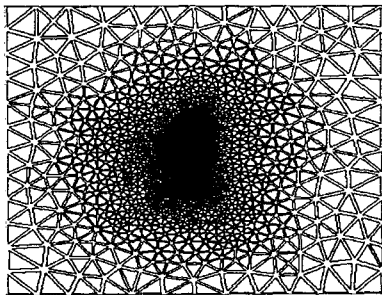
* 正 會 員 : 馬山大學 컴퓨터電氣工學部 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 慶南大學校 電氣電子工學部 教授 · 工博

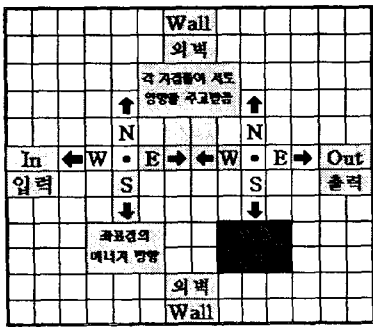
接受日字 : 2003年 6月 11日

最終完了 : 2003年 7月 28日

도가 큰 둔각의 형태일 경우 에러의 가능성이 있어 해석상 수렴의 시간이 길어지는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 삼각셀 기법을 이용하였다.



(a)



(b)

그림 2.1 시뮬레이션에 대한 셀의 분할 기법

(a) 삼각셀 (b) 사각셀

Fig. 2.1 The division method of cell to simulation

(a) triangle cell (b) square cell

2.1.2 시뮬레이션의 해석 순서

시뮬레이션의 해석 순서는 geometry, physics, solve, earth, graphic, plot로 나뉘어져 있으며, flux-II D 프로그램을 사용하였다.

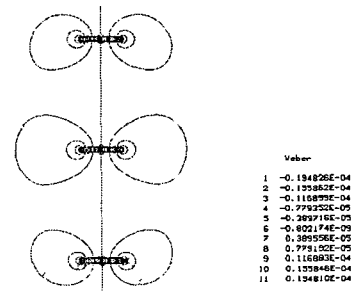
2.1.3 자계분포 및 자속밀도분포 시뮬레이션

플라즈마 반응기에 자석을 추가하였을 때 전자와 이온 등의 하전입자가 자력선을 중심으로 선회하면서 동시에 나선운동으로 진행하여 고에너지의 전자를 생성할 수 있다. 또한 전자와 NOx와의 충돌횟수를 증가시킬 수 있으므로 NOx 제거율이 향상 될 것으로 예상된다. 이 절에서는 반응기 내의 자석 개수를 변화시켰을 경우, 반응기 내의 자계세기 및 자속 밀도분포를 알아보기 위하여 자계세기 및 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션을 하였다.

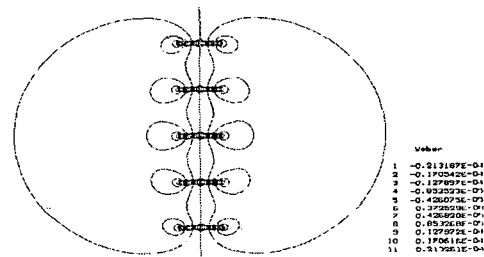
시뮬레이션 조건은 선전극과 평판전극사이 거리 12 mm, 선전극과 평판전극상단의 높이 차이 2 mm, 선전극의 직경은 0.5 mm로 하였다. 또한 그림 2.2의 자계분포 시뮬레이션에 사용된 자석은 두께 15 mm, 높이 30 mm, 폭 76 mm, 잔류 자속밀도 3900 Gauss인 페라이트 자석이다.

그림 2.2는 자석을 플라즈마 반응기 방전영역에 일정한 간격으로 3개, 5개, 7개를 각각 부착한 경우의 시뮬레이션 결과로서 반응기의 공간에 분포하는 자력선의 세기를 나타낸 것이다. 자력선의 방향은 아래에서 위쪽으로 향한다.

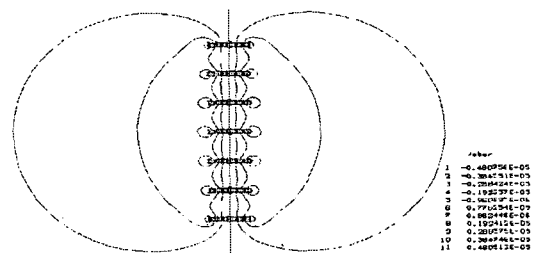
그림 2.2 (a), (b), (c)의 최외각 자력선들은 각각 같은 크기의 자계세기를 의미한다. 그림 2.2 (c)는 자석이 7개 부착된 경우로서 다른 경우 보다 방전영역에서 강한 자계세기 분포를 나타내고 있다. 자석 3개를 사용한 경우 자석사이 거리가 먼 관계로 자석 주변에서만 어느 정도의 자계분포를 갖지만 5개와 7개의 경우에는 방전 공간 전반에 걸쳐 자계가 분포함으로써 3개 보다는 5개 또는 7개의 경우가 NOx 제거에 있어서 효과적인 것으로 판단되었다.



(a)



(b)



(c)

그림 2.2 페라이트자석의 자계분포 (Br : 3900Gauss)

(a) 자석 3개 (b) 자석 5개 (c) 자석 7개

Fig. 2.2 Magnetic field distribution to ferrite magnet

(a) magnet 3 ea (b) magnet 5 ea (c) magnet 7 ea

그림 2.3은 그림 2.2 (a), (b), (c)에 나타난 자계분포를 자석 개수에 따른 자석 폭 방향의 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션 결과이다.

그림 2.3에서 x축은 자석의 폭이며 y축은 자속밀도를 나타내고 있다. 자속밀도는 반응기 끝단으로부터 그림 2.3 (a) 337 mm, (b) 60 mm, (c) 118 mm에서 측정하였다. 자속밀도 측정 위치는 설치된 자석수가 3, 5, 7 개인 경우 각각 자석과 자석사이의 중간지점에 해당된다. 시뮬레이션 결과로부터 플라즈마 반응기의 방전영역인 자석 사이의 중심부에서 자속밀도는 자석 3 개의 경우 43~59 Gauss, 자석 5 개의 경우 100~140 Gauss, 자석 7 개 경우 170~340 Gauss정도가 분포하고 있음을 알 수 있다.

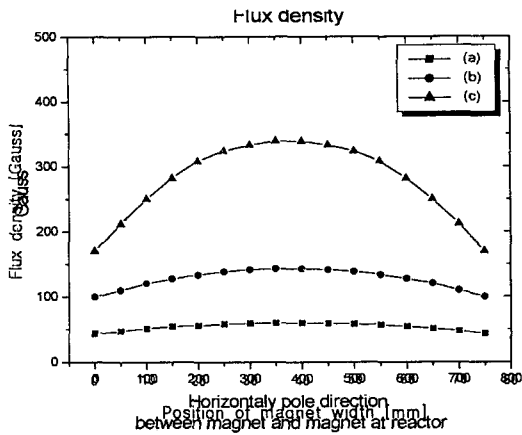


그림 2.3 자석 사이의 자속밀도분포
 (a) 자석 3 개 (b) 자석 5 개 (c) 자석 7 개
 Fig. 2.3 Magnetic flux density distribution between magnet and magnet
 (a) magnet 3 ea (b) magnet 5 ea (c) magnet 7 ea

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험

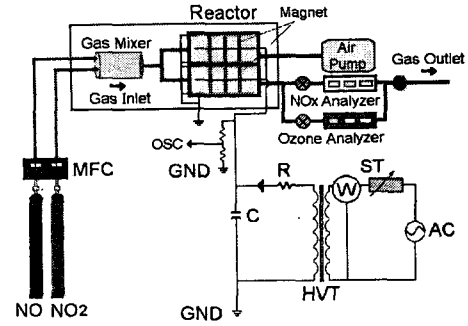
3.1.1 실험장치의 구성

그림 3.1은 실험 장치의 개략도이다. 직류와 교류 전압을 반응기에 공급할 수 있는 고전압 발생 장치와 NO 및 NO₂의 유량을 조절하기 위하여 유량 조절기를 사용하였다.

또한 오염 가스 처리를 위한 코로나 방전 플라즈마 반응기, 반응기 내부 유속 측정을 위한 유속계(Kanomax model 6511), 소비 전력을 측정하기 위한 전력계와 오실로스코프, 혼합 가스 중의 NO와 NO₂ 농도를 측정하는 가스 측정 장치(Green Line MK2, Italy), 오존 농도를 측정하기 위한 오존 측정기(Monitor Labs Inc. model 8810)를 사용하였다. 그리고 가스 유량을 조절하기 위한 공기펌프로 구성되어 있다.

그림 3.2는 가스 유출입장치의 구조로서 장치 내에 시뮬레이션 결과로부터 얻어진 데이터를 바탕으로 제작한 선 대 평판형 플라즈마 반응기가 삽입된 모습이다.

장치의 크기는 3500×520×220 mm로서 가스 유출입장치 내부의 균일한 압력 분포와 부분적인 난류의 발생이 최소화되도록 유입부로부터 1000 mm되는 지점에 다공성 난류 방지 장치를 설치하였다. 또한 유입부로부터 2000 mm되는 지점에 플라즈마 반응기가 삽입될 수 있도록 슬롯을 만들었다.



- ST : Slide type transformer
- HVT : High voltage transformer
- OSC : Oscilloscope
- MFC : Mass flow controller

그림 3.1 실험 장치의 개략도
 Fig. 3.1 The schematic diagram of experimental apparatus

가스 유량은 실험 장치에 부착된 공기펌프를 이용하여 가스 유량을 조절하였으며 최대 유량은 1500 l/min이다. 표 3.1은 시뮬레이션 결과로부터 도출된 데이터를 기본으로 하여 본 실험에 적용된 파라메타와 조건을 나타낸 것이다.

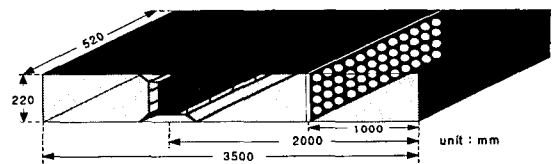


그림 3.2 가스 유출입 장치의 구조
 Fig. 3.2 The structure of gas inlet and outlet

표 3.1 파라메타와 실험 조건

Table 3.1 Condition of parameter and experiment

파라메타	조건	
유량	700[l/min]	
초기 NO _x (NO)농도	10[ppm]	
전원	AC	5~9[kV] (약 5~35[W])
	DC	6~12[kV] (약 5~40[W])
선 전극	450[mm]×3개 (Φ0.5mm 텅스텐)	
평판 전극	450[mm]×18[mm]×4개	
선-평판 전극 거리	12[mm]	

3.1.2 플라즈마 반응기

그림 3.3은 본 실험에서 사용된 플라즈마 반응기에 자석이 결합되는 구조를 나타낸 것이다. 선전극과 평판전극의 길이는 각각 450 mm, 선전극과 평판전극사이는 12 mm, 평판전극 높이는 20 mm이다. 또한 반응기 내에 설치된 전극의 치수는 시뮬레이션 결과에 의해 선전극과 평판전극 상단의 높이 차이를 2 mm, 선 전극의 직경을 0.5 mm로 하였다. 반응기 외관의 크기는 길이 470 mm, 폭 77 mm, 높이 35 mm로

하였고 자석은 그림 3.4와 같은 구조로서 자석에 만들어진 홈이 반응기에 설치된 선전극과 평판전극사이에 삽입될 수 있는 구조로 제작하였다.

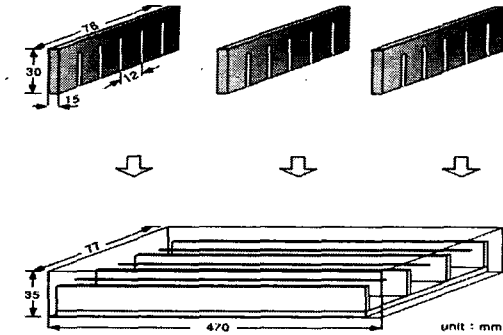


그림 3.3 자석과 전극의 결합
Fig. 3.3 The combination of magnet and electrode

그림 3.4는 플라즈마 반응기에 사용된 자석의 구조를 나타낸 것이다. 자석의 크기는 두께 15 mm, 높이 30 mm, 폭 76 mm, 잔류자속밀도 3900 Gauss인 페라이트 자석으로서 선전극과 평판전극에 삽입될 수 있도록 홈이 형성되어 있다. 그리고 시뮬레이션 결과로부터 선전극과 자석사이 홈, 평판전극과 자석사이 홈 및 자석 표면을 몰드형으로 절연하는 것이 안정된 방전이 유지될 것으로 판단되었기 때문에 자석은 에폭시로써 도포하여 전극과 절연이 되도록 하였다.

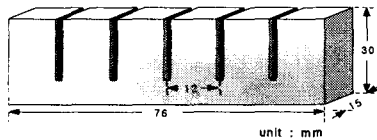
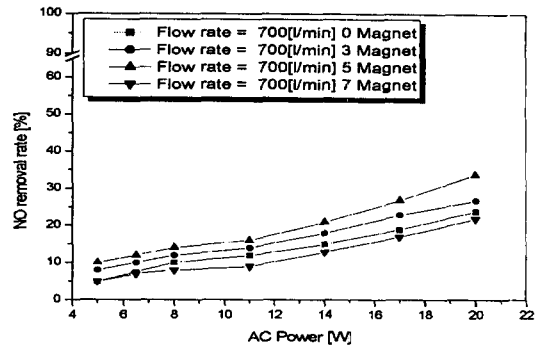


그림 3.4 플라즈마 반응기에 사용된 자석의 구조
Fig. 3.4 The structure of magnet used plasma reactor

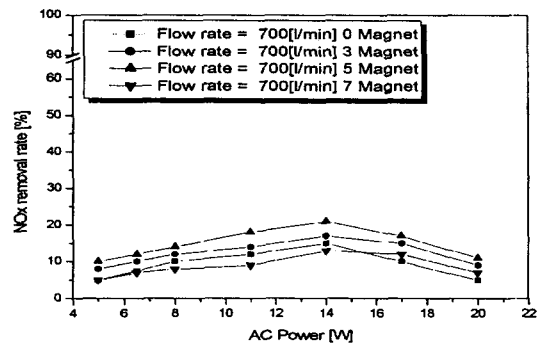
3.1.3 자석에 의한 NO 및 NO_x 제거 특성

자계 세기 및 자속 밀도 시뮬레이션 결과 자석의 사용 개수가 증가함에 따라 자계 세기 및 자속 밀도가 높아졌기 때문에 NO 및 NO_x 제거 특성에 대한 실험을 하였다.

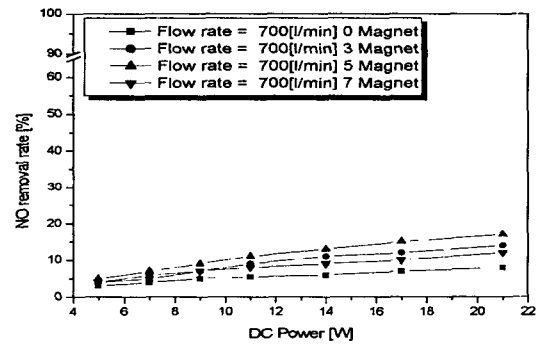
그림 3.5는 유량 700 l/min, 최대 잔류자속밀도가 3900 Gauss인 페라이트 자석 0개, 3개, 5개, 7개를 그림 3.3과 같이 반응기에 부착하여 NO와 NO_x의 제거율에 대한 자석의 관계를 나타낸 것이다. 그림 3.5 (a), (b)는 교류전력을 인가한 경우 NO와 NO_x의 제거율을 나타낸 것이고, 그림 3.5 (c), (d)는 직류전력이 인가된 경우 NO와 NO_x의 제거율을 나타낸 것이다. 교류전력의 경우 자석을 5개 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비하여 NO와 NO_x 제거율이 7~10 % 증가하였고, 직류전력의 경우 자석을 5 개 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 NO와 NO_x 제거율이 8 % 정도 증가되는 것으로 나타났으며, 교류와 직류전력 10 W 이하에서는 NO₂ 가 거의 발생되지 않아 NO의 제거율과 NO_x의 제거율은 같은 경향으로 나타났다. 시뮬레이션 결과 자석 7개일 때 자속 밀도가 가장 높았지만 실제 실험결과에서는 자석을 5개 사용한 경우가 NO와 NO_x의 제거율이 가장 좋았다.



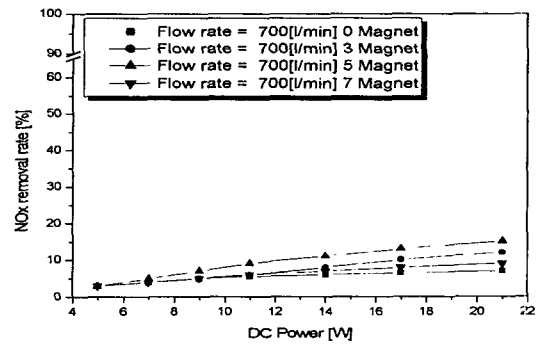
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.5 NO 및 NO_x 제거에 대한 자석의 영향
Fig. 3.5 Influence of magnet on NO and NO_x removal

이는 자석 7개를 사용하면 NOx 제거에 있어 부정적인 측면으로 첫째, 반응기 내의 방전 영역 감소 둘째, 가스 흐름의 난류 발생 등이 예상된다. 즉 반응기 내에서 자속밀도가 증가하면 할수록 하전입자 특히 전자가 자력선의 주위로 집중하여 방전 영역이 감소한다. 이와 같이 NOx 제거 메커니즘에 있어 자석수의 증가는 긍정적인 점과 부정적인 점이 작용하기 때문에 NOx 제거율의 관점에서 5개의 자석을 사용하는 것이 가장 높은 NOx 제거율을 얻을 수 있다는 결과를 얻었다. 자석을 5개 사용한 경우 자석과 자석 사이의 방전 영역 자속 밀도는 자속 측정 장치에 의해 최대 140 Gauss로 측정되었으며, 이는 시뮬레이션 결과와 일치하였다.

4. 결 론

본 논문은 실내의 NOx 제거를 위하여 선 대 평판형 플라즈마 반응기 제작에 필요한 최적 조건 도출을 위한 반응기 내부의 자계분포 및 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 여기서 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 자석이 결합된 선 대 평판형 플라즈마 반응기를 제작하였고, 여러 가지 실험 조건에서 NOx의 제거 특성을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

자계분포 시뮬레이션 결과 플라즈마 반응기의 NOx 제거율은 반응기에 자석을 부가하였을 때 전자와 이온 등의 하전입자가 자력선을 중심으로 회전하면서 나선운동으로 진행함으로써 고에너지의 전자를 생성할 수 있고 전자와 NOx와의 충돌횟수를 증가시킬 수 있으므로 NOx 제거율이 향상될 것으로 판단되었다.

동일 전력에서 자석을 부착하면 미부착시보다 NOx 제거율이 약 10 % 증가되었으며, 반응기에 자석을 5개 부착하였을 때 가장 좋은 특성이 나타났다. 또한 자석과 촉매를 동시에 인가한 경우는 자석만을 인가한 경우보다 교류전력에서는 5~10 %, 직류전력에서는 3~5 % 정도 증가하는 결과를 얻었다.

자속밀도분포 시뮬레이션 결과 자석 7개일 때 자속밀도가 가장 높았으나 실제 실험결과 자석을 5개 사용한 경우의 NO와 NOx 제거율이 가장 좋았다. 이는 반응기 내에서 자속밀도가 증가하면 할수록 하전입자가 자력선의 주위로 집중되어 방전 영역이 감소되기 때문에 NOx 제거율의 관점에서 자석의 사용 갯수를 고려하여야 함을 알 수 있었다.

NOx 최대 제거율은 교류전력 14W, 자석 5개를 사용한 경우였으며, 이 때의 NOx 제거율은 다른 실험조건의 결과와 비교하면 약 2배 정도 향상되는 결과를 얻었다.

감사의 글

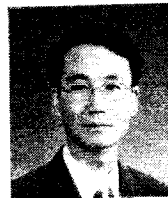
본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문 게재연구비 지원으로 이루어졌음

참 고 문 헌

[1] S. Masuda and H. Nakao, "Control of NOx by positive and negative pulsed corona discharges", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No. 2, pp. 374~383, 1990.

[2] J. H. Seinfeld, "Atmospheric chemistry and physics of air pollution", John Wiley & Sons, 1986.
 [3] K. Takaki, M. A. Jani, and T. Fujiwara, "Removal of nitric oxide in flue gas by multipoint to plane dielectric barrier discharge", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 27, No. 4, pp. 1137~1145, 1999.
 [4] A. Chakrabarti, A. Mizuno, K. Shimizu, S. Furuta, and T. Matsuoka, "Gas cleaning with semi-wet type plasma reactor", IEEE transactions on industry application, Vol. 30, No. 3, pp. 500~505, 1994.
 [5] L. Bromberg, D. B. Cohn, M. Koch, and B. M. Patrick, "Decomposition of dilute concentrations of carbon tetrachloride in air by an electron-beam generated plasma", Phys. Lett. A, Vol. 173, No. 3, pp. 293~299, 1995.
 [6] T. Oda, T. Takahashi, and K. Shimizu, "Nitric oxide decomposition in air by using nonthermal plasma processing with additives and catalyst", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 34, No. 2, pp. 268~272, 1998.
 [7] S. Tsukamoto, T. Namihira, D. Wang, and R. Hackam, "Effect of fly ash on NOx removal by pulsed streamers", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 29, No. 1, pp. 29~36, 2001.

저 자 소 개



이 현 수(李賢洙)

1959년 12월 5일생. 1984년 명지대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 인하대학교 대학원 졸업(석사). 1998년 전북대학교 대학원 수료(박사). 1993년~현재 마산대학교 컴퓨터전기공학부 부교수.

Tel : 055-230-1327, Fax : 055-230-1325
 E-mail : hslee@masan.ac.kr



박 재 운(朴在潤)

1960년 4월 15일생. 1986년 경남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1988년 인하대학교 대학원 졸업(석사). 1991년 인하대학교 대학원 졸업(박사). 1992년~현재 경남대학교 전기전자공학부 교수.

Tel : 055-249-2636, Fax : 055-249-2839
 E-mail : jypark@kyungnam.ac.kr