

전자계-촉매형 플라즈마 반응기의 질소 산화물 제거 특성

Removal Characteristics of Nitrogen Oxide in Electromagnetic-Catalytic Plasma Reactor

이현수*, 박재윤**, 이동훈**, 한병성***

(Hyun-Soo Lee*, Jae-Youn Park**, Dong-Hoon Lee**, and Byung-Sung Han***)

Abstract

This study is to develop electromagnetic-catalyst application plasma reactors for indoor air purification. Nitrogen Oxide(NOx) removal characteristics are measured in the electromagnetic catalyst application plasma reactors with various parameters and the effect of catalyst or/and magnetic field are investigated on the NOx removal. And AC or DC high voltage is applied for corona discharge, flow rates are 150~1500 l/min and NO initial concentration is about 10 ppm. MnO₂ and TiO₂ catalysts to increase NOx removal rate are used. In the results, NOx removal rate by AC power is about 10 % higher than that by DC power under the experimental condition of 700 l/min, 5 magnets, MnO₂ and TiO₂ catalysts. When magnet is applied to the reactor, NOx removal rate increased. Also, the reactor with MnO₂ and TiO₂ catalyst and magnet have the best removal rate.

Key Words : Electromagnetic, Plasma, Catalyst, NOx, NO, NO₂

1. 서 론

산업화에 의해 사람은 장시간 다양한 형태의 환경오염원들이 있는 가정, 사무실, 공장, 지하 시설물 등과 같은 밀폐된 실내공간에서 생활하고 있다. 이러한 실내공간의 오염된 공기는 사람의 건강과 밀접한 관계가 있으므로 이의 정화는 우선적으로 고려해야 할 필요가 있다. 특히, 공장과 자동차의 증가로 인하여 배출되는 NOx, VOCs(Volatile Organic Compounds) 등은 대기를 오염시켜 공단

과 도로주변의 빌딩이나 아파트의 실내에서 생활하는 사람들의 건강을 위협하고 있다. 그러므로 유해가스를 제거할 수 있는 장치의 개발이 요구되어지고 있다. 환경오염가스의 청정화 기술은 이미 여러 종류의 오염원을 대상으로 다양한 형태의 반응기가 개발되었거나 개발 중에 있다. 유해가스 제거에 있어 중요하게 고려하여야 할 사항은 유해가스의 제거효율과 경제성 문제이나, 이러한 문제점의 해결 방안 제시를 위한 기술은 아직 미흡한 실정이다[1,2]. 본 연구는 사무실, 가정 등의 실내공기 정화를 위한 전자계-촉매 응용 플라즈마 반응기를 개발하기 위한 것이다. 따라서 다양한 파라미터에 따른 플라즈마 반응기를 제작하여 플라즈마 반응기에서 발생하는 NO, NO₂, O₃에 대한 전원, 자계 그리고 촉매의 특성을 측정하여 실내 유해가스 제거에 관한 최적조건을 도출하였다.

* : 마산대학 컴퓨터응용전기계열
(마산시 내서읍 용담리 100번지,
Fax: 055-230-1325
E-mail : hslee@masan-c.ac.kr)

** : 경남대학교 전기공학과

*** : 전북대학교 전기공학과

2002년 5월 2일 접수, 2002년 5월 21일 1차 심사 완료,
2002년 6월 3일 최종 심사 완료

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치의 개략도를 그림 1에 나타냈었고, 그림 1과 같이 실험장치는 직류와 교류 전압을 반응기에 공급할 수 있는 고전압 발생장치와 NO 가스유량을 조절하기 위하여 MFC(Mass Flow Controller)를 사용하였으며, 오염가스처리를 위한 코로나 방전플라즈마 반응기와 반응기내부 유속측정을 위한 유속계(Kanomax Model 6511), 소비전력을 측정하기 위한 전력계, 혼합가스 중의 NO와 NO₂ 농도를 측정하는 가스분석장치(Green MK2, Italy) 그리고 오존측정기(Monitor Labs Inc. Model 8810)로 구성되어 있다.

2.2 실험방법

표 1은 플라즈마 실험장치 내의 초기 NO_x(NO) 농도, 유량, 전원 및 전극에 대한 실험조건을 나타낸 것이다.

그림 2는 실험장치로서 장치 내에 플라즈마 반응기가 삽입된 모습이다. 장치 크기는 3500×520×220 mm로서 실험장치 내부의 균일한 압력분포를 위하여 난류 발생이 최소화되도록 다공성 난류방지장치를 설치하였고, 유입부에서 1500 mm되는 곳에 플라즈마 반응기를 삽입할 수 있도록 슬롯을 만들어 놓았다. 가스유량은 장치 출구에 부착된 송풍장치의 흡입속도로 조절하였고, 최대 흡입유량은 1500 ℓ/min이다.

표 1. 실험조건.

Table 1. Condition of experiment.

그림 2. 실험장치의 사진.

Fig. 2. The photograph of experimental apparatus.

그림 1. 실험장치의 개략도.

Fig. 1. The schematic diagram of experimental apparatus.

S.T : Slide type Transformer
 HVT : High Voltage Transformer
 O.S.C : Oscilloscope

(b)

그림 3. 플라즈마 반응기의 사진.

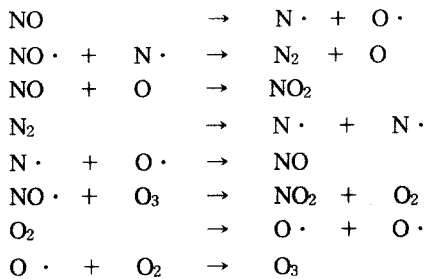
Fig. 3. The Photograph of plasma reactor.

(a) magnet detached to plasma reactor.
 (b) magnet attached to plasma reactor.

그림 3(a)는 자석이 탈착된 선대 평판형 플라즈마 반응기의 사진이고, (b)는 자석이 부착된 선대 평판형 플라즈마 반응기의 사진이다. 그림 3(b)와 같이 플라즈마 반응기의 형태에 맞추어 페라이트 자석(두께:25 mm, 최대 잔류자속 Br:3900 Gauss)을 설치하였으며, 자석은 예폭시로 도포하여 전극과 절연하였다.

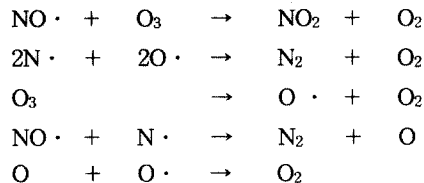
그림 4(a)는 광촉매 특성이 있는 산화티타늄(TiO₂) 촉매로서 주석도금 아연 망사형 지지대에 약 200 μm의 두께로 도포하였고, 그림 4(b)는 산소(O₂)흡착 특성이 있는 다공성 형태의 MnO₂ 촉매이다. 인가가스가 플라즈마 반응기 내의 방전에너지를 받아 촉매와 반응하도록 전극 후단에 설치하여 실험하였다.

NO_x 제거는 플라즈마 방전에너지에 의해 촉매의 유무에 따라 다음과 같은 화학적 반응 메커니즘을 갖는다. 플라즈마 반응기 후단에 촉매를 사용하지 않은 경우 플라즈마 반응기 내부 또는 후단에서 생성·소멸되는 NO_x의 반응 메커니즘이다.



다음은 플라즈마 반응기 후단에 촉매를 사용한 경우 전리 또는 이온화된 NO_x가 촉매 표면에서 생성·

소멸되는 반응 메커니즘이다.



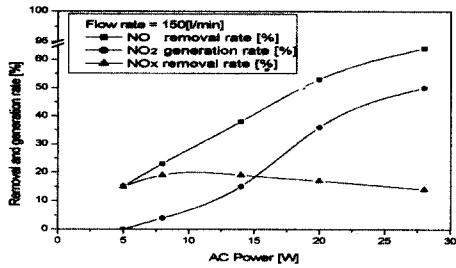
3. 결과 및 고찰

그림 5는 플라즈마 반응기에 자계를 인가하지 않고, 교류전력을 인가했을 때 유량에 따른 NO 및 NO_x 제거율과 NO₂ 생성률을 나타낸 것이다. NO_x 농도는 NO 농도와 NO₂ 농도를 합한 것으로서, 본문에서 NO_x의 제거율은 NO의 제거율에 NO₂의 생성률을 뺀 값을 의미하며, NO₂의 생성률은 NO의 농도에 대한 NO₂ 생성량을 비율로 나타낸 것을 의미한다. 그리고 유량은 실험장치에서 반응기와 난류방지장치 사이의 총류 형태의 유속을 환산한 수치이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 전력이 증가하면 NO 제거율도 증가하고, 동시에 NO₂ 생성률도 높아지기 때문에 전체적인 NO_x 제거율은 어느 전력까지 증가하다가 다시 감소하는 특성을 나타내었다. 그리고 유량이 증가하면 NO_x 제거율은 감소하는 특성을 나타내었다. 이는 NO 분자가 코로나방전으로부터 받는 단위에너지가 유량 증가와 더불어 감소하기 때문인 것으로 판단된다[3-5].

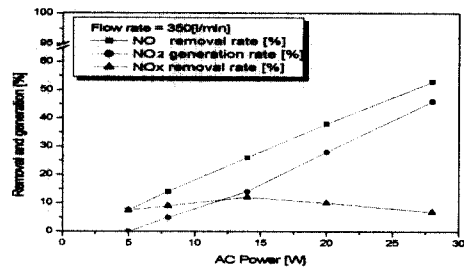
그림 6은 직류전력을 인가했을 때의 유량변화에 따른 NO 및 NO_x 제거율과 NO₂ 생성률을 나타낸 것이다. 교류의 경우와 같이 직류를 반응기에 인가했을 경우에도 NO_x 제거율은 증가하다 다시 감소하는 특성을 나타내었다. 그림 5와 그림 6에서 NO 제거율은 전력이 높을수록 증가하였다. 그러나 상대적으로 전력이 증가할수록 NO₂의 발생이 많아지기 때문에 전반적인 NO_x 제거율은 전력에 비례하지는 않는다는 것을 알 수 있었다.

이와 같은 결과에 의해 교류 혹은 직류전력이 인가되었을 때 유량 150, 350, 700 l/min의 단위 에너지당 NO_x 최대 제거효율을 비교하면, 700 l/min의 경우가 가장 좋은 결과가 나타났고, 700 l/min과 1500 l/min의 단위에너지당 NO_x의 제거효율은 서로 비슷하지만 실 시스템 운영상 발생되는 다양한 문제점 즉, 가능한 저전압의 사용, 운전상의 안정도와 신뢰도 확보 그리고 시스템의 유지

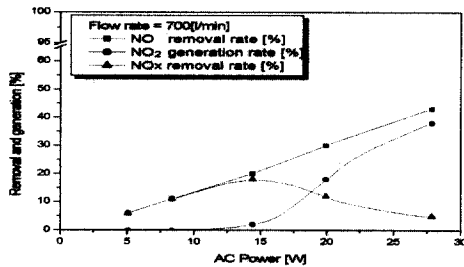
그림 4. 반응기 후단에 부착된 TiO₂와 MnO₂ 촉매.
Fig. 4. TiO₂ and MnO₂ catalysts spread on the rear face of reactor.



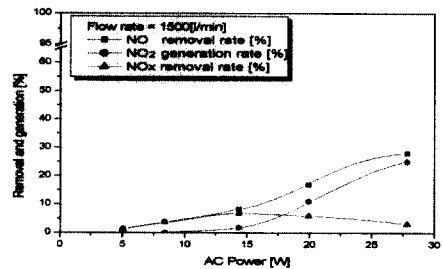
(a)



(b)



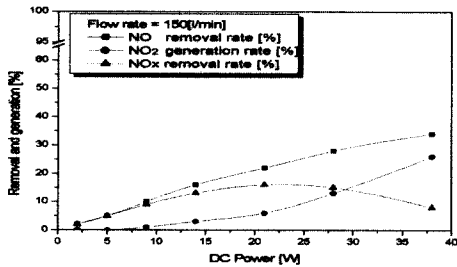
(c)



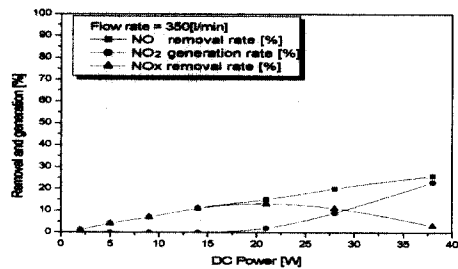
(d)

그림 5. 교류전력 인가시 NO_x 제거율에 미치는 유량의 영향.

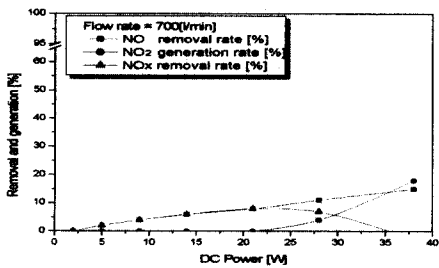
Fig. 5. Influence of flow rate on NO_x removal rate under ac power.



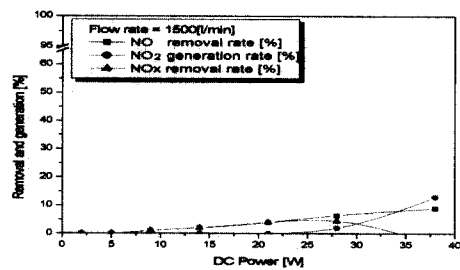
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 6. 직류전력 인가시 NO_x 제거율에 미치는 유량의 영향.

Fig. 6. Influence of flow rate on NO_x removal rate under dc power.

및 보수차원에서 700 ℓ/min이 더욱 효율적이라고 판단되어 이후 실험은 700 ℓ/min에서 행하였다.

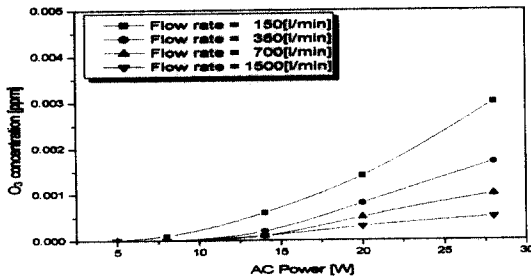
그림 7(a), (b)는 교류와 직류전력인가시 O₃ 발생량을 나타낸 것이다. 전반적으로 직류전력에서는 교류전력보다 O₃의 발생량이 적었고, 실험장치 내의 유량이 감소할수록 O₃의 발생량은 증가하였다. O₃의 발생량은 교류 및 직류전력 모두 환경부의 환경기준치(0.12 ppm/hr)보다 1/40 이하로 매우 적게 발생되기 때문에 실 시스템용으로서 문제가 되지 않는 것으로 확인되었다.

NO₂ 발생은 NO의 제거 메커니즘과 같이 방전에너지가 높아질수록 그 발생량이 증가하였다. 이는 공기중의 산소(O₂)와 질소(N₂)가 방전에너지에 의해 전리후 재결합 과정에서 발생되기 때문이다[6,7].

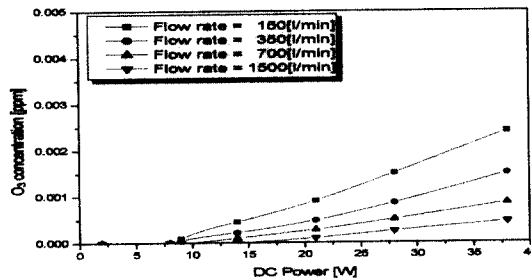
그림 8은 자계가 인가되지 않은 플라즈마 반응기에 광촉매 특성을 가지는 산화티타늄(TiO₂) 또는 다공성 MnO₂ 촉매를 반응기 후단에 설치한 경우의 NO 제거율을 나타낸 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 17 W 이하의 전력에서는 MnO₂ 특성이

우수하였고, 그 이상의 전력에서는 TiO₂ 광촉매 특성으로 인하여 NO의 제거특성이 우수하였다. NO의 제거율은 대체로 전력이 비례적인 경향을 보였고, 직류전력보다 교류전력을 인가한 경우가 제거율이 더욱 커짐을 확인할 수 있었다.

그림 9는 촉매 사용에 따른 플라즈마 반응기에 대한 NO₂의 생성률을 나타낸 것이다. 그림 9와 같이 NO₂ 생성률은 촉매에 크게 영향을 받지 않았고, 직류전력보다 교류전력에서 생성률이 높았다. 한편 교류 및 직류전력 약 15 W 이하에서 NO₂가 거의 발생하지 않는 특성을 보였는데 이는 교류와 직류전력의 최대 전계치가 공기(N₂, O₂)나 NO 분자를 충분히 전리시키지 못하기 때문으로 판단되고, 그림 9의 15 W 보다 큰 영역에서 NO₂가 발생되는 이유는 플라즈마 반응기로 유입되는 일산화질소(NO)가 9.25 eV, 산소(O₂)가 12.2 eV 그리고 질소(N₂)가 15.58 eV의 전리에너지를 가지므로 그림 7의 700 ℓ/min에서 나타내는 바와 같이 오존이 교류 및 직류전력 모두 약 14 W 이후에서 생성되고 있으



(a)



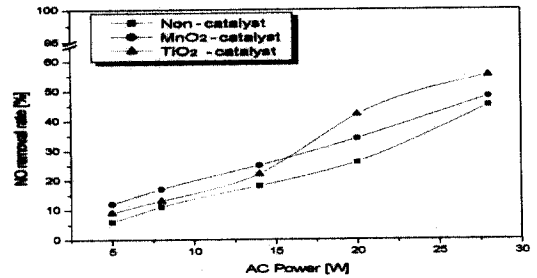
(b)

그림 7. 소비 전력 증가에 따른 오존의 농도.

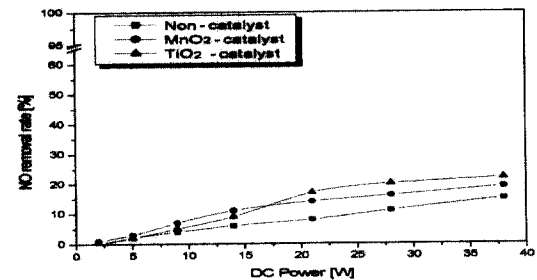
(a) 교류전력, (b) 직류전력.

Fig. 7. O₃ concentration under.

(a) ac power, (b) dc power.



(a)



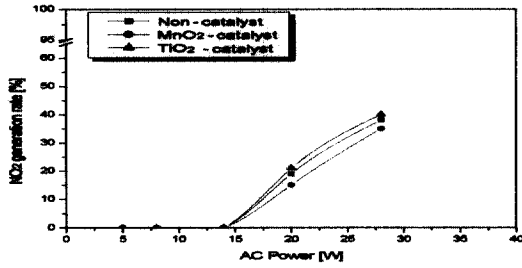
(b)

그림 8. NO 제거에 미치는 촉매의 영향 700 ℓ/min

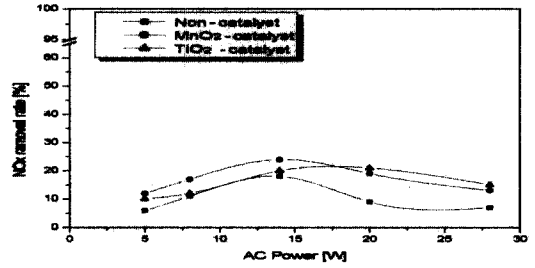
(a) 교류전력, (b) 직류전력.

Fig. 8. Influence of catalyst on NO removal

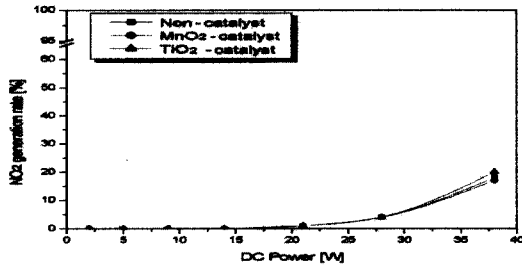
under (a) ac power, (b) dc power.



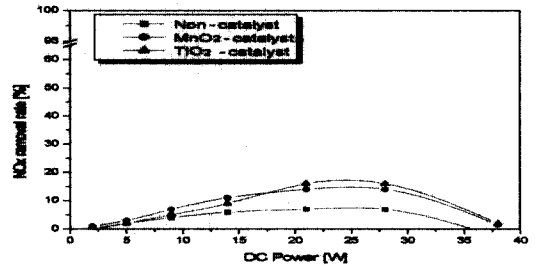
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 9. 촉매의 NO₂ 생성 영향 700 l/min.

(a) 교류전력, (b) 직류전력.

Fig. 9. Influence of NO₂ generation by catalyst under (a) ac power, (b) dc power.

므로 이는 일산화질소와 산소분자가 이 시점에서 전리되고 있음을 의미한다. 따라서 그림 9는 교류 및 직류전력 15 W 이상에서 전리 혹은 여기된 일산화질소와 산소에 의해 NO₂가 발생됨을 나타낸다.

그림 10은 촉매 사용에 따른 플라즈마 반응기의 NO_x 제거율을 나타낸 것이다. 그림 8과 그림 10에서 NO와 NO_x 제거율을 살펴보면, 17 W 이하의 교류 및 직류전력에서는 TiO₂의 광촉매 영향보다 다공성 MnO₂ 촉매의 영향으로 NO 및 NO_x 제거율이 증가하였지만, 20 W 이상의 교류전력에서는 MnO₂ 촉매보다 TiO₂ 광촉매의 영향으로 NO 및 NO_x의 제거율이 높게 나타났다. 그러나 20 W 이상의 교류 또는 직류전력에서 보면 NO₂의 생성물이 NO의 제거율을 앞서기 때문에 전반적인 NO_x의 제거율은 감소하는 특성을 나타내었다. 또한 직류전력 30 W 이상에서는 NO₂의 생성물이 NO의 제거율보다 급격히 증가하여 NO_x 제거율이 급감하는 특성을 보였다. 이는 표 1의 초기농도 10 ppm의 NO 저농도 처리를 위해 과다한 방전에너지

그림 10. NO_x 제거에 미치는 촉매의 영향 700 l/min.

(a) 교류전력, (b) 직류전력.

Fig. 10. Influence of catalyst on NO_x removal under (a) ac power, (b) dc power.

지가 공기(O, N)에 인가되기 때문에 NO_x의 제거율이 나빠지는 경향이 나타났다. 즉, NO 농도에 대해 적절한 에너지가 인가되어야만 NO_x 제거에 있어 효율적이라 사료된다. 이러한 현상들을 촉매 측면에서 살펴보면, 산소 흡인특성을 갖는 MnO₂가 반응기에서 방출되는 플라즈마 에너지를 갖는 가스에 의해 광화학적 반응 또는 전기화학적 반응을 일으키기 때문에 NO_x 제거에 좋은 특성을 나타내고, N₂는 인가 가스 내에 존재하는 N₂, NO, O₂의 분자중 N₂가 전리되지 않는 에너지 준위에서 NO와 O₂만 여기 혹은 전리되어 광화학적 반응과 전기화학적 반응을 일으킬 수 있다. 그러므로 NO는 여기 혹은 전리에너지에 의해 N₂와 O₂로 환원될 수 있으며, O₂는 여기와 전리에너지에 의해 오존(O₃)을 생성할 수도 있다. 또한 NO는 여기산소 혹은 오존과의 반응에 의해 NO₂로 변환될 수 있다. 이와 같은 다양한 메커니즘에 의해 NO_x가 제거 또는 생성되는 경향을 가진다. 즉 NO가 N₂와 O₂로의 환원되려는 경향이 NO₂로 산화되려는 경향보

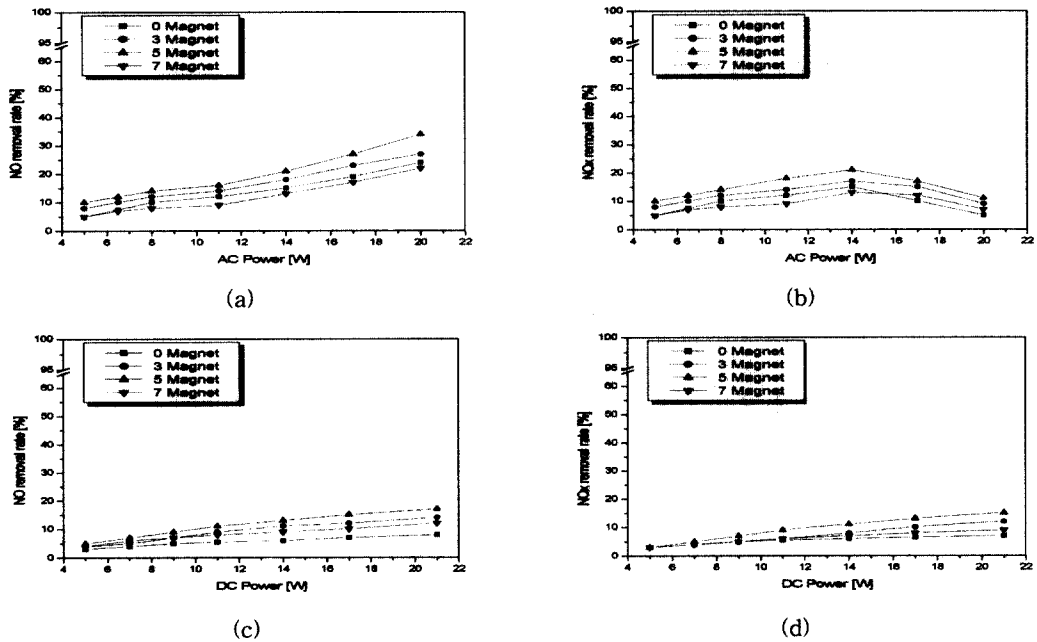


그림 11. NO 및 NOx의 제거율에 미치는 자계의 영향 700 ℓ/min. (a), (b) 교류전력, (c), (d) 직류전력.
 Fig. 11. Influence of magnetic field on NO and NOx removal rate. (a), (b) under ac power, (c), (d) under dc power.

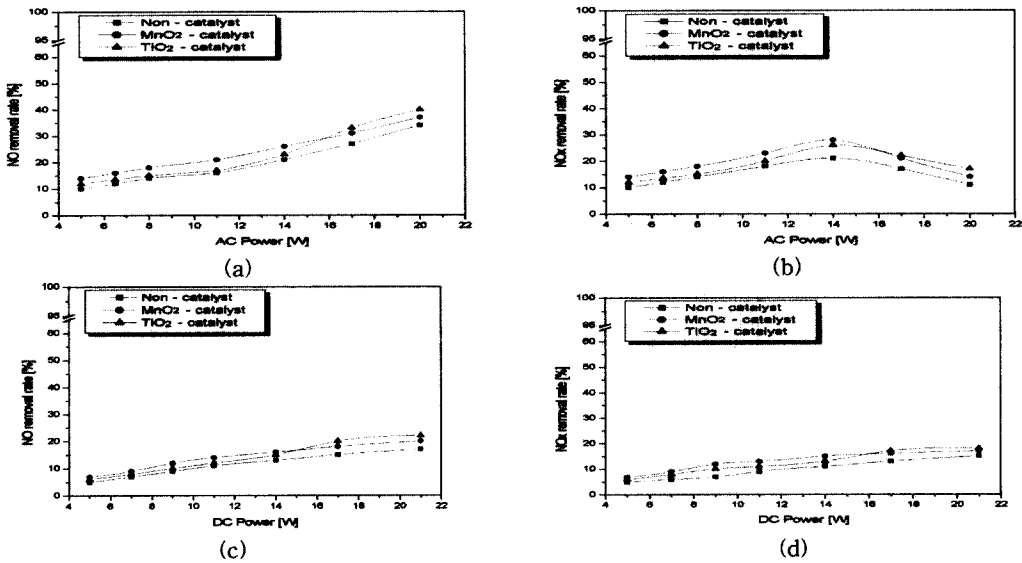


그림 12. 자계와 촉매가 동시에 부착된 경우 NO 및 NOx의 제거율 변화 700 ℓ/min. (a), (b) 교류전력, (c), (d) 직류전력.
 Fig. 12. The changes of NO and NOx removal rate due to the arrangement of magnet together with catalyst. (a), (b) under ac power, (c), (d) under dc power.

다 강하게 되면 전반적으로 NOx 제거특성이 나타나게 된다[8]. 이와 같은 경향은 TiO₂의 NOx 제거 메커니즘에도 적용된다. 그리고 광촉매 특성을 갖는 TiO₂는 결합에너지가 3.2 eV, 파장대가 380 nm를 갖는데 TiO₂ 표면에 이 파장보다 짧은 큰 에너지를 인가하면, 가스분자의 전자, 정공이 이 에너지에 의해 여기 혹은 전리되어 NOx 제거 메커니즘에 영향을 미친다[9].

그림 11은 유량 700 ℓ/min, 최대 자속밀도가 Br:3900 Gauss인 페라이트 자석을 그림 3과 같이 부착하여 NO와 NOx의 제거율과 자계와의 관계를 나타낸 것이다. 그림 11(a), (b)는 자석을 3개, 5개, 7개를 사용하여 교류전력을 인가한 경우 NO와 NOx의 제거율을 나타낸 것이고, 그림 11(c), (d)는 직류전력이 인가된 경우 NO와 NOx의 제거율을 나타낸 것이다. 교류전력의 경우에는 자석을 5개 사용한 경우가 NO와 NOx 제거율이 사용하지 않은 경우에 비하여 7~10 % 증가하였고, 직류전력의 경우에서도 NO와 NOx 제거율이 자석을 5개를 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 8 % 정도 증가되는 것으로 나타났고, 직류전력 10 W 이하의 전압에서는 NO₂가 발생되지 않아 NO의 제거율과 NOx의 제거율은 같은 경향으로 나타났다. 자석을 5개 사용한 경우가 NO와 NOx의 제거율이 가장 좋았고, 7개를 사용한 경우는 오히려 감소하였다. 이는 자석 7개를 사용하면 NOx 제거에 있어 부정적인 측면 즉, 반응기 내의 방전영역이 자석으로 인하여 줄어든다는 점과 반응기를 통과하는 가스의 난류지점이

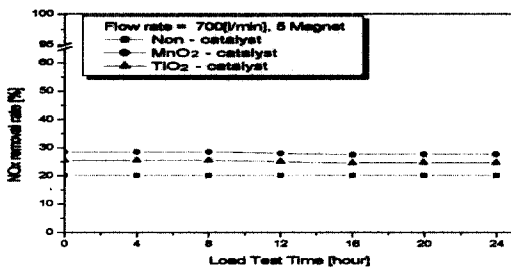


그림 13. NOx 최대 제거율을 나타내는 14 W 교류전력 인가시 시간에 대한 NOx의 제거율 변화 특성.

Fig. 13. The change of NOx removal rate as a function of time under the condition of maximum efficiency for NOx removal, 14 W ac power.

자석의 수가 적은 경우보다 다소 늘었기 때문이다. 또한 자석을 사용할 경우, 자석의 자계방향을 전계방향에 직각이 되도록 설치하면 전계만 있는 경우 크기를 갖는 전계와 자보다 초기 전계방향의 힘과 전계와 자계의 외적의계에 수직하는 힘의 합성 방향으로 진행하게 된다. 즉, 로렌츠의 법칙에 의해 하전 입자가 진행하면서 회전반경이 커지게 되고 방전영역이 확대되어 가스분자와 접촉되는 확률을 높이기 때문에 그림 11에 나타난 바와 같이 NO와 NOx 제거율이 향상되는 것으로 판단된다.

자석을 5개 사용할 경우, 자석과 자석사이의 거리는 80 mm이고, 전체 방전영역은 320 mm이다. 자석과 자석 사이의 방전영역에서 자속밀도는 자속측정장치에 의해 140 Gauss로 측정되었다.

그림 12는 자석과 촉매가 동시에 부착된 경우로서 그림 12(a), (b)는 교류전력을 (c), (d)는 직류전력을 사용했을 때 NO와 NOx 제거율을 나타낸 것이다. 교류전력에서는 자석과 촉매를 동시에 부착한 경우가 자석만 부착한 경우보다 NOx 제거율이 전반적으로 5~10 % 상승하는 경향을 보였고, 직류전력에서는 자석과 촉매를 동시에 부착한 경우가 자석만 부착한 경우보다 NOx 제거율이 약 3~5 % 정도 증가하는 경향을 보였다. 또한 교류와 직류전력에서 단위 에너지당 최대 NOx 제거효율을 비교하면 교류전력의 경우가 직류전력의 경우보다 2배정도 증가됨을 확인하였다. 이는 가스분자가 상승시간이 짧고, 파두치가 큰 교류 또는 펄스형태의 전압에 의해 발생하는 전계치에 의해 여기 혹은 전리되는데, 적은 소비전력으로 많은 가스분자를 활성화시키기 위하여 동일한 교류 및 직류전력인 경우 직류보다 교류가 최대 인가전압이 약 $\sqrt{2}$ 배정도 높기 때문에 동일한 교류전력의 경우가 직류전력을 인가한 경우보다 단위에너지당 NOx 제거효율이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 가스의 흐름, 방전영역, 유량과 자석수를 함께 고려해야 할 것이다.

그림 13은 그림 12 (b)의 NOx 최대 제거효율을 나타내는 14 W 교류전력에 대한 24시간 실시간 실험결과로서 촉매 사용 유무에 관계없이 시간에 대해 거의 일정한 NOx 제거효율 특성이 나타났다.

4. 결론

본 NOx 제거특성 연구는 코로나 방전 플라즈마 반응기를 제작하여 여러 가지 조건에서 NOx의 제

거특성을 측정하였고, 그 결과는 다음과 같았다.

교류전력을 인가한 경우가 직류전력을 인가한 경우보다 NOx의 제거율이 10 % 정도 높게 나타났고, 유량이 증가할수록 NOx 제거율은 선형적으로 감소하였다. 그러나 유량을 감소시키면 NO₂, O₃의 발생률이 증가하는 경향을 나타내었다. 동일 전력에서 자계를 인가하면 비인가시보다 NOx 제거율이 약 10 % 증가되었으며, 자석을 5개 배치하였을 때 가장 좋은 특성이 나타났다. 또한 자계와 촉매를 동시에 인가한 경우는 자계만 인가한 경우보다 교류전력에서는 5~10 %, 직류전력에서는 3~5 % 정도 증가하는 결과를 얻었다. NOx 최대 제거율은 교류전력 14 W와 직류전력 17 W에 자계와 촉매를 동시에 인가한 경우이고, 비인가시보다는 NOx 제거율이 10 % 정도 증가하는 경향을 나타내었으며, 교류전력은 직류전력보다 약 10 % 정도 증가하였다. 교류전력에 자계와 촉매를 동시에 인가한 플라즈마 반응기와 이 이외의 플라즈마 반응기들과 단위 에너지당 NOx의 제거효율을 상호 비교하면 교류전력에 자계와 촉매를 동시에 인가한 플라즈마 반응기의 NOx 제거효율이 약 2~6 배정도 향상되는 결과를 얻었다. 이러한 결과에 의해 NOx 제거에 있어 단순히 교류 또는 직류전력만을 인가하는 것보다는 교류전력에 자계와 촉매를 동시에 인가한 플라즈마 반응기의 형태가 바람직한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문연구 기제비 지원으로 이루어졌습.

참고 문헌

- [1] 박재윤, 송원섭, 고희석, 박상현, "BaTiO₃-슬러지 Packed-bed형 반응기에서 NOx 제거에 미치는 슬러지의 영향", 전기전자재료학회논문지, 14권, 10호, p. 861, 2001.
- [2] 박재윤, "코로나 방전에 의한 NOx, SOx 동시제거에서 첨가제의 영향", 전기전자재료학회논문지, 5권, 13호, p. 451, 2000.
- [3] H. S. Koh, J. Y. Park, and G. H. Kim, "Removal of NOx by Pulsed streamer discharge", J. of KIEEME(in Korean). Vol. 10, No. 8, p. 807, 1997.
- [4] H. H. Kim and A. Mizuno, "Plasma-driven ca-

talyst process for NOx removal", Sym. on Plasma Sci. for Materials, p. 87, 1999.

- [5] K. Kimoshita, Y. Fujiyama, and A. Mizuno, "Control of tabaco smoke and odors using discharge plasma reactor", J. of Electrostatics, Vol. 42, No. 1, p. 83, 1997.
- [6] P. A. Vitello and J. N. Bardsley, "Multi-dimensional modeling of the dynamic morphology of streamer coronas", Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control Part A, Springer-Verlag Pub. Co., p. 249, 1993.
- [7] Y. Kamase and A. Mizuno, "Erosion of spark gap of square wave high voltage source for ozone generation", IEEE Trans. on IAS, Vol. 29, No. 4, p. 262, 1993.
- [8] K. Y. Choo and B. H. Boo, "Oxidation Reactions of Carbon Monoxide on NiO and MnO₂ Catalysts", J. of the Korean Che. Soc., Vol. 22, No. 6, p. 370, 1978.
- [9] H. K. Joo, M. S. Jeon, and T. K. Lee, "Photocatalysts : Theory and Its Application", J. of Korean Soc. of Environmental. Eng., Vol. 21, No. 6, p. 1231, 1999.