

# 자석형 플라즈마 반응기의 자계 시뮬레이션과 질소산화물 제거 특성

이현수, 이동훈\*, 박재윤\*, 한병성\*\*  
마산대학, 경남대학교, 전북대학교\*\*

## The Magnetic Field Simulation & Removal Characteristic of Nitrogen Oxide for Magnet Type Plasma Reactor

Hyun-Soo Lee, Dong-Hoon Lee\*, Jae-Yoon Park\* and Byung-Sung Han\*\*  
MaSan Colle., KyungNam Uni., CheonBuk Uni.\*\*

### Abstract

산업의 고도화 및 도시의 집중화로 오염물질의 종류가 다양화 되었으며 여러 가지 오염물질 중에서도 비산 분진, 황산화물(SOx) 등은 연료 중의 특정성분을 제거하거나 연료를 대체하여 그 배출량을 줄일 수 있다. 그러나 질소산화물(NOx)의 경우에는 연료의 문제가 아니라 연소과정에서 반드시 발생되는 특징을 가진 오염물질이다.

이와 같이 환경오염물질의 제거기술에 있어 가장 중요하게 고려되어야 할 사항은 오염가스 제거의 효율성과 경제성이다. 따라서 본 연구에서는 사무실, 가정 등 주로 실내공기정화를 위하여 NOx 제거를 위한 선 대 평판형 플라즈마 반응기에 자석의 개수에 의한 자계세기 및 자속밀도 시뮬레이션과 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작된 반응기에 자석을 부가한 NOx 제거에 대한 실험을 하였다. 그 결과 자석을 부가한 경우가 NOx 제거효과에 있어 효율이 좋음을 알 수 있었다. 본문내용이 들어가는 부분입니다.

**Key Words** : 자석형 플라즈마, 자계 시뮬레이션, 질소산화물,

### 1. 서론

산업의 고도화 및 도시의 집중화로 오염물질의 종류가 다양화 되었으며 여러 가지 오염물질 중에서도 비산분진, 황산화물(SO<sub>x</sub> : sulfur oxide) 등은 연료 중의 특정 성분을 제거하거나 연료를 대체하여 그 배출량을 줄일 수 있다.

그러나 질소산화물(NO<sub>x</sub> : nitrogen oxide)의 경우에는 연료의 문제가 아니라 연소과정에서 반드시 발생되는 특징을 가진 오염 물질이다. 이와 같은 환경 오염물질을 제거하기 위한 청정화 기술이 필요하며 이 기술은 플라즈마 반응기에 자동차 배기가스에서 발생하는 NO<sub>x</sub>, 화력발전소에서 발생하는 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 등 여러 종류의 오염원을 제거하기 위하여 다양한 형태의 반응기가 개발되었거

나 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 NO<sub>x</sub>의 생성과 제거의 상관관계에 대한 실험을 하였다. 그 결과 선 대 평판형 플라즈마 반응기가 NO<sub>x</sub> 제거에 좋은 특성을 나타내었다.

따라서 NO<sub>x</sub> 제거를 위한 선 대 평판형 플라즈마

반응기에 자석수에 의한 자계세기 및 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 여기서 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 플라즈마 반응기를 제작하였고 제작된 반응기에 자석을 사용하여 NO<sub>x</sub> 제거에 대한 실험을 하였다.

## 2. 시뮬레이션 및 실험

### 2.1 자계 해석

#### 2.1.1 해석 기법

최적의 반응기 제작에 있어 반응기 내의 전자계 및 유체에 대한 시뮬레이션 형상 분할 기법을 그림 2.1 (a), (b)에 나타내었다. 형상의 설계는 보통 삼각형의 셀과 사각형의 셀로 나뉘며 각각의 형상조건에서 장단점은 모두 있다.

삼각셀의 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 잘못된 사각셀의 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 에러를 갖게 된다. 그러나 각각의 부분에서 셀의 크기가 균등한 크기가 아니므로 미세한 구간에서 극소 에러를 갖지만 무시할 수 있을 정도이다.

일반적으로 사각셀의 경우는 셀의 사각 모두가 90°에 근접할 경우 수렴의 정도가 우수하다. 이는 외부 사면에서 셀의 중심부로 유출입되는 에너지의 관계를 해석하기 때문이다.

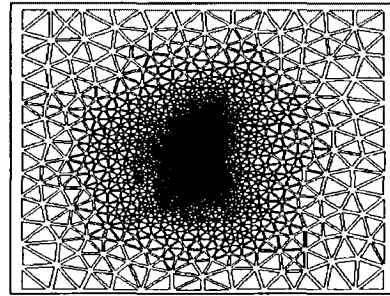
그러므로 직각 형태 구조물의 형상을 해석하는데 우수하지만 각각의 면과 면이 이루는 각도가 큰 둔각의 형태일 경우 에러의 가능성이 있어 해석상 수렴의 시간이 길어지는 단점이 있다.

그림 2.1 (b)의 사각셀 경우 각각의 미소 평면에서 보면 해석하고자 하는 한 점의 결과 값은 NEWS 방향에서 서로 마주보는 각 면의 중심과 에너지가 유

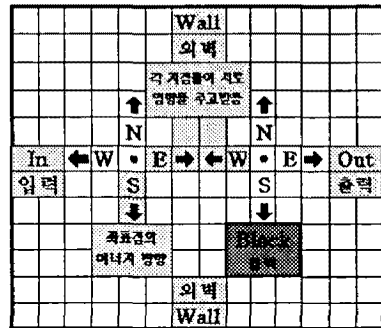
출입하는 관계에 의해 정의되기 때문에 이들의 상관관계에 관한 방정식이 해석하고자 하는 결과 값은 나타낸다.

그리고 입력과 출력의 에너지 차이가 반드시 있어야 유체의 흐름이 생겨 해석이 가능하며, 각각의 셀에서 들어오는 입력보다 큰 출력은 입력측으로 다시 피드백 시키게 되는 방정식은 발산하는 결과를 나타내어 해석이 불가능하게 된다. 또한 입력보다 적은 출력이 결과로 나타날 경우에도 수치해석상의 수렴이 불가능하게 되는 경우도 있다.

한편 외적으로는 무한 공간이 아닌 유한 공간에서 해석이 이루어져야 함으로 반드시 한계 지점에는 유한한 공간을 나타내는 외벽이 존재하여야 한다. 내부의 고체 및 닫힌 공간 등의 부분은 일반적으로 불력으로 지정된다. 이러한 영역에서 입력 값들의 변수 관계가 무난히 이루어질 때 전산 유체 해석은 올바르게 이루어질 수 있다.



(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 해석 순서

전산 해석 순서는 geomtry, physics, solv, earth, graphic, polt로써 전위, 전계, 자계는 flux-II D 프로그램을 이용하였으며 기본적으로 여섯 단계로 나누어져 있다.

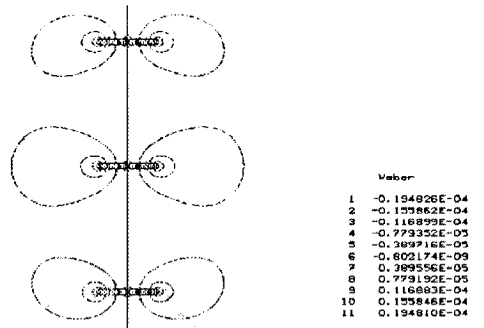
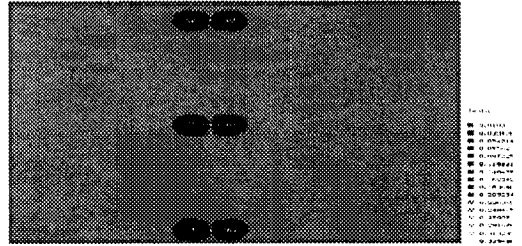
2.2 자계세기 및 자속밀도분포 시뮬레이션

플라즈마 반응기에 자석을 추가하였을 때 전자와 이온 등의 하전입자가 자력선을 중심으로 선회하면서 동시에 나선운동으로 진행하여 고에너지의 전자를 생성할 수 있다. 또한 전자와 NO<sub>x</sub>와의 충돌횟수를 증가시킬 수 있으므로 NO<sub>x</sub> 제거율이 향상 될 것으로 예상된다. 이 절에서는 반응기 내의 자석 갯수를 변화시켰을 경우 반응기 내의 자계세기 및 자속밀도분포를 알아보기 위하여 자계세기 및 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션을 하였다.

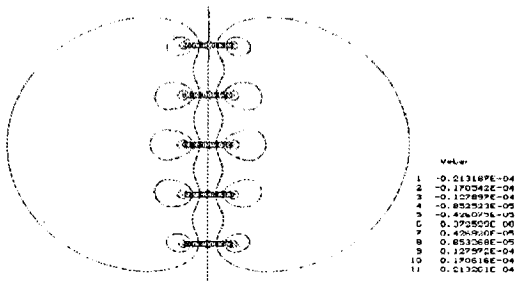
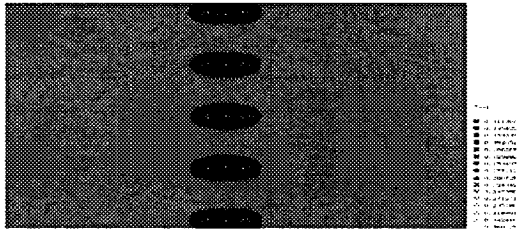
시뮬레이션 조건은 선전극과 평판전극사이 거리 12 mm, 선전극과 평판전극상단의 높이 차이 2 mm, 선전극의 직경은 0.5 mm로 하였다. 또한 그림 3.6의 자계분포 시뮬레이션에 사용된 자석은 두께 15 mm, 높이 30 mm, 폭 76 mm, Br 3900 Gauss인 페라이트 자석이다.

그림 2.2의 형상은 자석을 플라즈마 반응기 방전영역에 일정한 간격으로 3 개, 5 개, 7 개를 각각 부착한 경우로써 시뮬레이션 결과는 반응기의 공간에 분포하는 자력선의 세기를 나타낸 것이다.

그림 2.2 (a), (b), (c)의 최외각 자력선들은 각각 같은 크기의 자계세기를 의미한다. 그림 2.2 (c)는 자석이 7 개 부착된 경우로서 다른 경우 보다. 방전영역에서 강한 자계세기 분포를 나타내고 있다. 자석 3 개를 사용할 경우 자석사이 거리가 먼 관계로 자석 주변에서만 어느 정도의 자계분포를 갖지만 5 개와 7 개의 경우에는 방전 공간 전반에 걸쳐 자계가 분포함으로써 3 개보다는 5 개 또는 7 개의 경우가 NO<sub>x</sub> 제거에 있어서 효과적일 것으로 판단되었다.



(a)



(b)

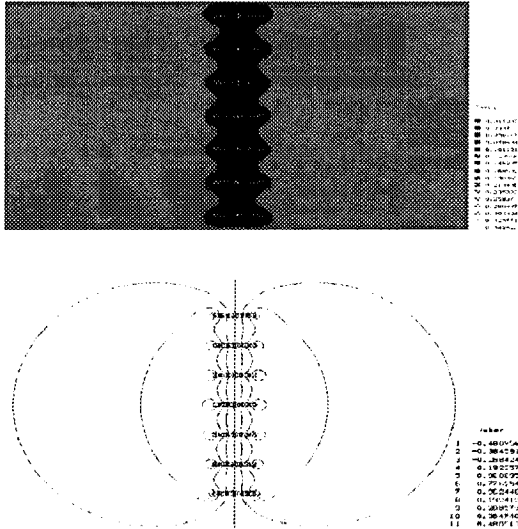


그림 2.2 페라이트 자석의 자계분포 (Br : 3900 Gauss)

(a) 자석 3 개 (b) 자석 5 개 (c) 자석 7 개

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 3.6 (a), (b), (c)에 나타난 자계분포를 자석의 수에 따른 자석 폭 방향의 자속밀도분포에 대한 시뮬레이션 결과이다.

그림 2.3에서 x축은 자석과 자석 사이의 수평 방향 위치이며 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 최소 43 ~ 최대 59 Gauss, 자석 5 개의 경우 최소 100 ~ 최대 140 Gauss, 자석 7 개 경우 최소 170 ~ 최대 340 Gauss인 것을 확인하였다.

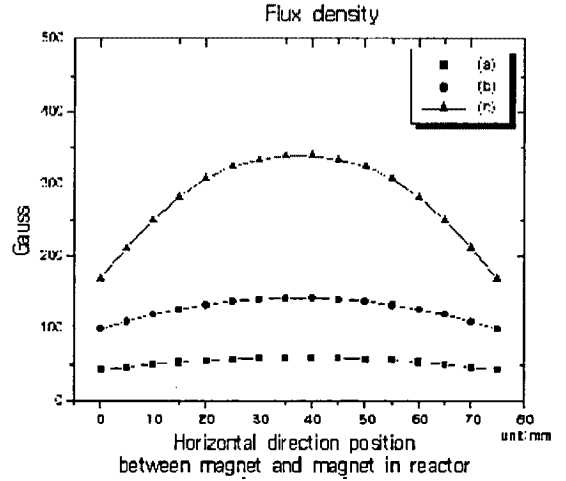


그림 2.3 자석 사이의 자속밀도분포

(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

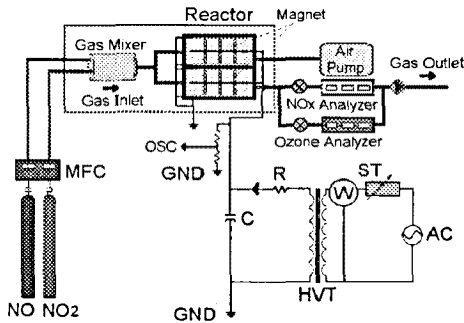
##### 3.1.1 실험장치의 구성

그림 3.1은 실험 장치의 개략도이다. 직류와 교류 전압을 반응기에 공급할 수 있는 고전압 발생 장치와 NO 및 NO<sub>2</sub>의 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 NO<sub>2</sub> 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 난

류의 발생이 최소화되도록 유입부로부터 1000 mm되는 지점에 다공성 난류 방지 장치를 설치하였다.



- 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

또한 유입부로부터 2000 mm되는 지점에 플라즈마 반응기가 삽입될 수 있도록 슬롯을 만들었다.

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.

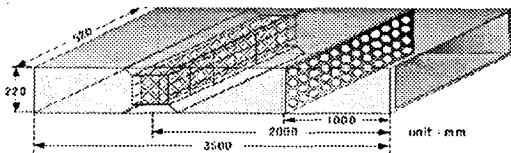


그림 3.2 가스 유출입 장치의 구조

Fig. 3.2 The structure of gas inlet and outlet

### 3.1.2 플라즈마 반응기

그림 3.3은 본 실험에서 사용된 플라즈마 반응기

에 자석이 결합되는 구조를 나타낸 것이다. 선전극과 평판전극의 길이는 각각 450 mm, 선전극과 평판전극사이는 12 mm, 평판전극 높이는 20 mm이다.

표 3.1 실험 조건

Table 3.1 Condition of experiment

매기매타	조 건	
유 량	150, 350, 700, 1500 [l/min]	
초기 NOx(HC)농도	10 [ppm]	
전 령	AC	5 ~ 9 [kV] (약 5 ~ 35 [W])
	DC	6 ~ 12 [kV] (약 5 ~ 40 [W])
선 전극	450 [mm] x 3개 (φ 0.5mm 텅스텐)	
평판 전극	450 [mm] x 18 [mm] x 4개	
선전극-평판 거리	12 [mm]	
선전극-축대 거리	18 [mm]	

또한 반응기 내에 설치된 전극의 칫수는 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 4.4 (a)와 같은 구조로서 자석에 만들어진 홈이 반응기에 설치된 선전극과 평판전극사이에 삽입될 수 있는 구조로 제작하였다.

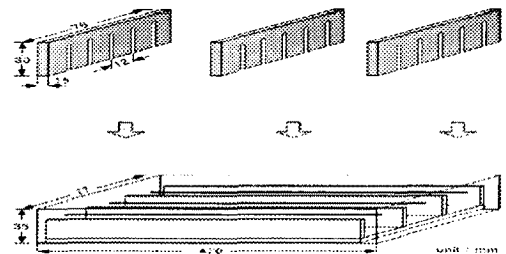


그림 3.3 자석과 전극의 결합

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, Br 3900 Gauss인 페라이트 자석으로서 선전극과 평판전극에 삽입될 수 있도록 홈이 형성되어 있다 그리고 시뮬레이션 결과로부터 선전극과 자석사이 홈, 평판전극과 자석사이 홈 및

자석표면을 물드형으로 절연하는 것이 안정된 방전이 유지될 것으로 판단되었기 때문에 자석은 에폭시 로써 도포하여 전극과 절연이 되도록 하였다.

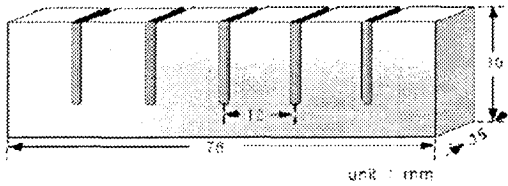


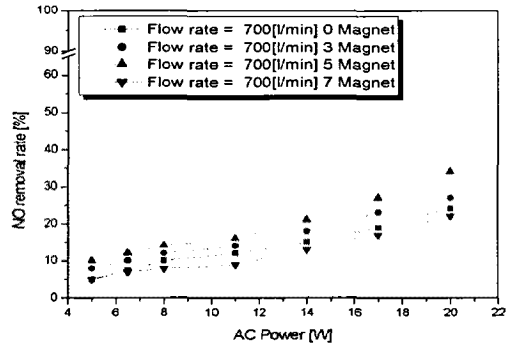
그림 3.4 플라즈마 반응기에 사용된 자석의 구조  
Fig. 3.4 The structure of magnet used plasma reactor

### 3.1.3 자석에 의한 NO 및 NO<sub>x</sub> 제거 특성

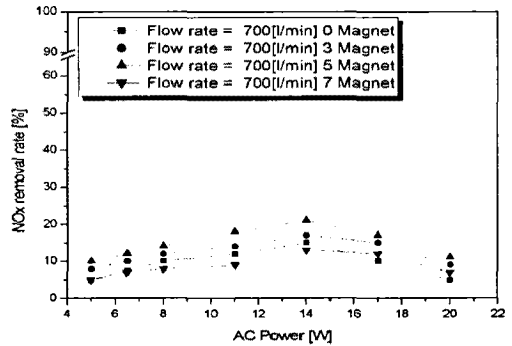
자계 세기 및 자속 밀도 시뮬레이션 결과 자석의 사용 갯수가 증가함에 따라 자계 세기 및 자속 밀도가 높아졌기 때문에 NO 및 NO<sub>x</sub> 제거 특성에 대한 실험을 하였다.

그림 3.5는 유량 700 l/min, 최대 잔류 자속 밀도 Br이 3900 Gauss인 페라이트 자석 0 개, 3 개, 5 개, 7 개를 그림 3.3과 같이 반응기에 부착하여 NO와 NO<sub>x</sub>의 제거율에 대한 자석의 관계를 나타낸 것이다. 그림 3.5 (a), (b)는 교류전력을 인가한 경우 NO와 NO<sub>x</sub>의 제거율을 나타낸 것이고, 그림 3.5 (c), (d)는 직류전력이 인가된 경우 NO와 NO<sub>x</sub>의 제거율을 나타낸 것이다. 교류전력의 경우 자석을 5개 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비하여 NO와 NO<sub>x</sub> 제거율이 7 ~ 10 % 증가하였고, 직류전력의 경우 자석을 5 개 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 NO와 NO<sub>x</sub> 제거율이 8 % 정도 증가되는 것으로 나타났으며, 교류와 직류전력 10 W 이하에서는 NO<sub>2</sub>가 거의 발생되지 않아 NO의 제거율과 NO<sub>x</sub>의 제거율은 같은 경향으로 나타났다. 시뮬레이션 결과 자석 7 개일 때 자속밀도가 가장 높았지만 실제 실험 결과에서는 자석을 5 개 사용한 경우가 NO와 NO<sub>x</sub>의 제거율이 가장 좋았다. 이는 자석 7 개를 사용하면 NO<sub>x</sub> 제거에 있어 부정적인 측면으로 첫째, 반응기 내의 방전 영역 감소 둘째, 가스 흐름의 난류 발생 등이 예상된다. 즉 반응기 내에서 자속밀도가 증가하면 할 수 록 하전입자 특히 전자가 자력선의 주

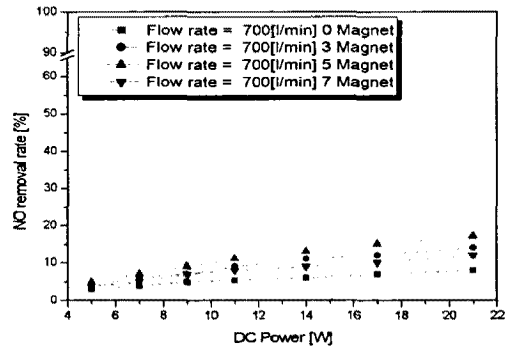
위로 집중하여 방전 영역이 감소한다. 이와 같이 NO<sub>x</sub> 제거 메커니즘에 있어 자석수의 증가는 긍정적인 점과 부정적인 점이 작용하기 때문에 NO<sub>x</sub> 제거율의 관점에서 5 개의 자석을 사용하는 것이 가장 높은 NO<sub>x</sub> 제거율을 얻을 수 있다는 결과를 얻었다. 자석을 5 개 사용한 경우 자석과 자석 사이의 방전 영역 자속 밀도는 자속 측정 장치에 의해 최대 140 Gauss로 측정되었으며 이는 시뮬레이션 결과값과 일치하였다.



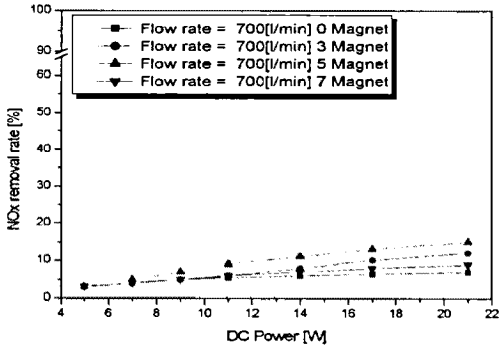
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.5 NO 및 NO<sub>x</sub> 제거에 대한 자석의 영향

Fig. 3.5 Influence of magnet on NO and NO<sub>x</sub> removal

#### 4. 결 론

본 논문은 실내의 NO<sub>x</sub> 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 NO<sub>x</sub>의 제거 특성을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

자계분포 시뮬레이션 결과 플라즈마 반응기의 NO<sub>x</sub> 제거율은 반응기에 자석을 부가하였을 때 전자와 이온 등의 하전입자가 자력선을 중심으로 회전하면서 나선운동으로 진행함으로써 고에너지의 전자를 생성할 수 있고 전자와 NO<sub>x</sub>와의 충돌횟수를 증가시킬 수 있으므로 NO<sub>x</sub> 제거율이 향상될 것으로 판단되었다.

동일 전력에서 자석을 부착하면 미부착시보다 NO<sub>x</sub> 제거율이 약 10 % 증가되었으며, 반응기에 자석을 5 개 부착하였을 때 가장 좋은 특성이 나타났다. 또한 자석과 촉매를 동시에 인가한 경우는 자석만 인가한 경우보다 교류전력에서는 5 ~ 10 %, 직류전력에서는 3 ~ 5 % 정도 증가하는 결과를 얻었다.

자속밀도분포 시뮬레이션 결과 자석 7 개일 때 자속밀도가 가장 높았으나 실제 실험결과 자석을 5 개 사용한 경우의 NO와 NO<sub>x</sub> 제거율이 가장 좋았다. 이는 반응기 내에서 자속밀도가 증가하면 할 수 록 하

전입자가 자력선의 주위로 집중되어 방전 영역이 감소되기 때문에 NO<sub>x</sub> 제거율의 관점에서 자석의 사용 갯수를 고려하여야 함을 알 수 있었다.

NO<sub>x</sub> 최대 제거율은 교류전력 14 W, 자석 5 개를 사용한 경우였으며, 이 때의 NO<sub>x</sub> 제거율은 다른 실험조건의 결과와 비교하면 약 2 배 정도 향상되는 결과를 얻었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Masuda and H. Nakao, "Control of NO<sub>x</sub> 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, T. Matsuoka, and S. Furuta, "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 NO<sub>x</sub> removal by pulsed streamers", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 29, No. 1, pp. 29~36, 2001.