

Simulation of Electric Potential and Electric Field for Wire-Plate Type Plasma Reactor Manufacture

李 東 勳*
(Dong-Hoon Lee*)

Abstract - Due to advancement of industrialization, the flue gas from the combustion of industrial factories and various means of transportation have polluted air. Therefore, it is necessary to develop new techniques of air purification. In order to produce a more effective reactor, simulation were conducted using the Flux-II D program. The condition of the simulation were as follows: The height of the plate electrode was 0 mm or 2 mm higher than that of the wire electrode. The distance between the electrodes was 12 mm, and the diameter of the wire electrode was 0.5 mm or 1.0 mm. The results of the electric potential and electric field simulations show that pollutants will be more effectively removed due to the dielectric strength between wire electrode and plate electrode which was strong, and wire electrodes which were concentrated in a high electric field.

Key Words : flue gas, purification, electric potential, electric field

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 산업시설 및 수송수단에서 발생되는 연소배기 가스는 대기를 오염시키고 이러한 오염된 공기는 공단 지역과 도로 주변의 빌딩, 아파트 등에서 생활하는 사람들의 건강을 위협하고 있다. 그러므로 이러한 오염된 공기를 제거할 수 있는 장치의 개발이 절실히 요구되어지고 있다[1-4].

환경오염 물질(질소산화물 : NOx, 황산화물 : SOx)의 제거기술 개발에 있어 가장 중요하게 고려해야 할 사항은 오염가스 제거의 효율성과 경제성 문제이나 이러한 기본적인 문제점의 해결방안 제시를 위한 청정화 기술은 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 사무실, 가정 등 주로 실내공기정화를 위한 여러 가지 형태의 플라즈마 반응기를 제작하여 연소과정에서 반드시 발생하는 NOx 생성과 제거의 상관관계에 대한 실험을 하고자 NOx 제거를 위한 선 대 평판형 플라즈마 반응기 제작에 필요한 최적 조건을 도출하기 위하여 선전극과 평판전극의 높이 차이, 선전극 굵기에 의한 반응기 내부의 전위분포, 전계분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 여기서 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 플라즈마 반응기를 제작하고 제작된 플라즈마 반응기를 이용하여 NOx 제거에 대한 실험을 하고자 한다.

2. 해 석

2.1 해석 방법

최적의 반응기 제작에 있어 반응기 내의 전위 및 전계에 대한 시뮬레이션 형상 분할 기법을 그림 1에 나타내었다. 형상의 설계는 보통 삼각형의 셀로 나뉘며 형상 조건에서 장·단점은 있다.

삼각셀의 경우는 기본적으로 사각형 셀의 둔각 부분 해석에 유리한 조건을 갖고 있다. 왜냐 하면 그림 1 삼각형 셀의 경우는 3면으로 구성되어 미소 구간까지 삼각형의 형태로 자를 수 있기 때문이다. 그러나, 구조가 복잡하고 삼각형 셀의 한 내각이 둔각일 경우 각 꼭지점에서 같은 거리에 있는 해석하고자 하는 지점이 삼각형의 외부면에 위치하게 되므로 이러한 경우 전산 해석이 불가능한 경우가 된다.

이는 잘못된 사각셀의 형상 설계 경우와 같이 외부면에서 셀의 중심부로 에너지가 유·출입되는 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 극소한 에러를 갖지만 무시할 수 있을 정도이다.

2.2 해석 순서

표 1은 전산 해석 순서를 나타낸 것이다. 전위, 전계시뮬레이션은 flux-II D 상용프로그램을 이용하였으며, 기본적으로 여섯 단계의 해석 과정으로 나누어져 있다.

* 正 會 員 : 慶南大學校 大學院 電氣工學科 博士課程
接受日字 : 2003年 5月 14日
最終完了 : 2003年 11月 19日

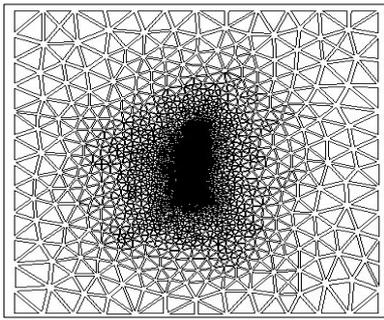


그림 1 시뮬레이션에 대한 삼각셀의 분할 기법
Fig. 1 The division method of triangle cell to simulation

표 1 해석 순서

Table 1 Flow chart of simulation

명령어	실행내용
geometry	형상 설계의 과정으로 좌표, 선, 면, 공간적 외형 설계 및 초기 데이터 파일 작성
physics	설계상에서 형상 영역에 해당되는 물질의 전체 물성값 입력
solve	해석 영역, 해석 방법, 해석 부분의 경계 조건, 해석 시간 및 반복 횟수의 자료 입력
earth	전산 수치 해석 과정, 각각의 좌표별 시간별 과도 현상 및 수렴 데이터 생성
graphic	전산 해석의 결과를 그래픽 혹은 계산상의 수치적 결과로 볼 수 있음
plot	출력부로서 결과 파일을 그래픽 (벡터, 채색 형태) 혹은 데이터 파일로 제공

3. 전위 및 전계분포 해석

3.1 전위 및 전계분포 해석

3.1.1 전위분포 해석

최적의 플라즈마 반응기를 제작하기 위하여 반응기에 전압이 인가되었을 때 반응기 내부의 전위분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 그림 2은 시뮬레이션에 이용한 모델 반응기를 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 하기 위한 조건은 선전극과 평판전극사이를 12 mm, 선전극과 평판전극 상단의 높이는 0 mm, 2 mm, 선전극의 직경을 0.5 mm, 1.0 mm로 하여 각각 시뮬레이션을 하였다.

그림 3는 반응기 내부 전극사이의 전위분포 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 플라즈마 반응기의 유속 방향을 기준으로 반응기를 수직방향으로 자른 단면의 전위 시뮬레이션 결과로서 그림 3 (a), (b), (c)의 우측면 중간의 노란색으로 둘러싸인 흰색이 선전극의 단면이고 좌측면 중간의 곡률부 하단 흰색은 평판 전극의 단면이다.

그림 3 (a)는 평판전극 상단과 선전극 사이의 높이차가 0 mm, 선전극 직경 \varnothing 가 0.5 mm의 경우이고, 그림 3 (b)는 평판전극 상단과 선전극 사이의 높이 차이가 2 mm, 선전극 직

경 \varnothing 가 0.5 mm의 경우이며, 그림 3 (c)는 평판전극 상단과 선전극 사이의 높이차가 2 mm, 선전극의 직경 \varnothing 가 1 mm의 경우이다. 그림 3 (a), (b), (c)의 전극과 전극 사이 거리는 12 mm이다.

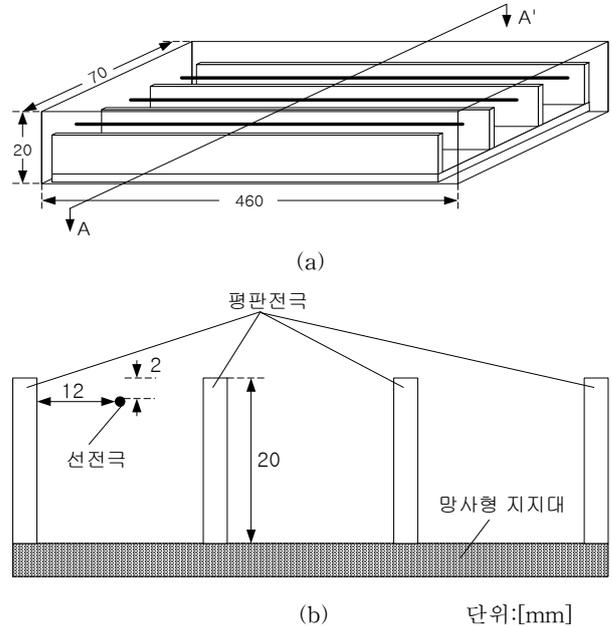


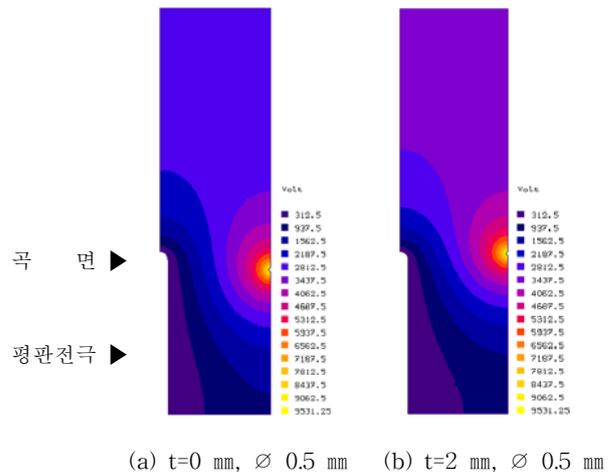
그림 2 시뮬레이션에 이용한 모델 반응기

(a) 모델 반응기 (b) A-A' 단면

Fig. 2 The model reactor for simulation

(a) model reactor (b) cross section of A-A'

그림 3 (a)에서 선전극 주위 전위분포를 나타내는 색은 집중적으로 노란색(7.1~9.5 kV)을 띠고 있으며, 선전극과 평판전극 사이에 약 1~5 kV를 나타내는 전위분포 색이 형성되어 있다. 그림 3 (c)는 선전극 주위 전위분포를 나타내는 노란색이 그림 3 (a)보다 넓게 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한, 선전극과 평판전극 사이에 약 1~5 kV를 나타내는 전위분포 색이 형성되어 있다.



(a) t=0 mm, \varnothing 0.5 mm (b) t=2 mm, \varnothing 0.5 mm

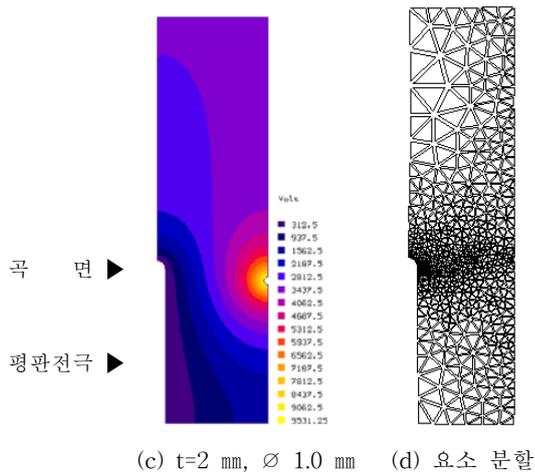


그림 3 전위분포

t : 선전극과 평판전극 높이 차이 Ø: 선전극 직경

Fig. 3 Electric potential distribution

t : height difference of wire & plate electrode

Ø : diameter of wire electrode

그러나, 그림 3 (b)는 그림 3 (a), (c)보다 노란색이 선전극 주위에 반경이 작은 범위로 분포되어 있으며, 선전극과 평판전극 사이는 약 1~3 kV를 나타내는 전위색이 분포되어 있다. 따라서 그림 3 (b)와 같이 선전극과 평판전극 상단의 높이 차이를 2 mm, 선전극의 직경이 0.5 mm인 경우가 전극사이의 낮은 전위분포로 인한 높은 절연내력과 고전위의 선전극 집중으로 인하여 전자가 쉽게 방출되어 NOx 제거 측면에서 좋을 것으로 판단되었다.

3.1.2 전계분포 해석

전압이 반응기에 인가되었을 때 반응기 내부의 전계분포를 알아보기 위하여 전계분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 전계분포에 대한 시뮬레이션은 방전이 발생되기 위한 전자방출 조건, 전극과 전극사이의 절연내력이 안정된 방전상태 유지에 밀접한 관계가 있기 때문에 실시하였다. 전계 시뮬레이션 조건은 전위 시뮬레이션 조건과 동일한 선전극과 평판전극사이 거리는 12 mm, 선전극과 평판전극의 높이 차이는 0 mm, 2 mm, 선전극의 직경은 0.5 mm, 1.0 mm로 하여 각각 시뮬레이션을 하였다. 그림 4은 전계 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 선전극에 전압을 10 kV 인가하였을 때 전극사이의 전계 분포이다. 이 결과를 보면 그림 4 (a)의 경우 최대 전계는 152 kV/cm, 그림 4 (b)의 경우 최대 전계가 90 kV/cm, 그림 4 (c)의 경우 최대 전계가 55.6 kV/cm이다.

일반적으로 공기에 대한 직류 전압 최대 절연 내력은 23 kV/cm이고, 교류 전압의 경우는 30 kV/cm로 알려져 있다. 그러므로 그림 4에서 나타난 각각의 최대 전계는 공기의 방전 개시 전계보다 매우 높아 방전 발생의 기본 조건은 충분히 만족하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 전극사이 임의의 공간에서 측정된 최저 전계는 공간의 절연 파괴 전계보다 반드시 낮아야 안정된 방전을 유지할 수 있게 된다. 만약 최저 전계가 공간의 절연 내력보다 높게 되면 방전이 불안정해 지거나, 바로 전로 파괴로 이어지게 된다.

그림 4 (a)의 경우 최저 전계는 4.9764 kV/cm, 그림 4 (b)의 경우 최저 전계는 2.9518 kV/cm, 그림 4 (c)의 경우 최저 전계는 1.8235 kV/cm로 공기의 전계에 의한 절연 파괴 한계 전계보다 매우 낮으므로 인가전압 10 kV에서는 방전이 안정적이면서 지속적으로 유지될 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 유속이나 불평등 전극면 등으로 인하여 전극사이 방전영역 공간에서 전계 분포가 불평등 전계를 형성할 경우 파괴 전압은 더 낮아질 수도 있다. 그러므로 공간상의 유체의 흐름이나 온도 분포, 전극의 가공 상태는 매우 중요한 변수가 될 수 있다. 만약 선전극 직경 Ø가 2 mm를 넘고 전극사이의 간격이 12 mm인 경우 최대 전계는 30 kV/cm 정도로 낮아져 선전극 부분에서 방전발생은 어려워지나 선전극의 직경 Ø가 2 mm 이하인 경우는 방전 발생이 쉬워져 유해 가스 제거에 유리하다고 판단된다. 따라서 선전극의 직경 Ø가 0.5 mm 이하인 경우 최대 100 kV/cm 내외로 방전 개시에 충분한 전계가 발생함으로써 선전극 직경은 0.5 mm 전·후가 적당하다고 판단되었다.

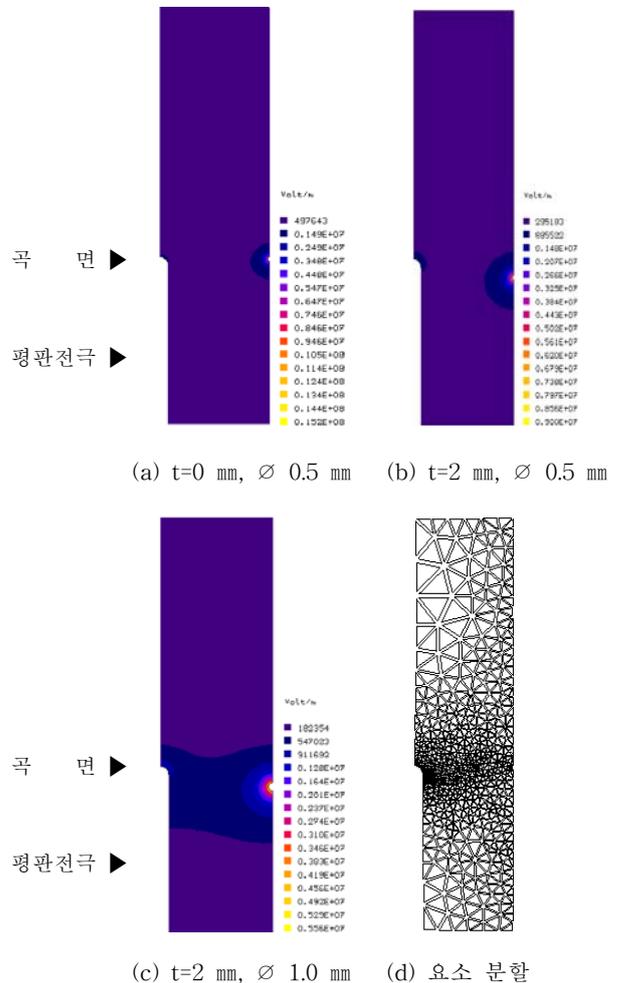


그림 4 전계분포

t : 선전극과 평판전극 높이 차이, Ø: 선전극 직경

Fig. 4 Electric field distribution

t : height difference of wire & plate electrode

Ø : diameter of wire electrode

그러므로 선전극 직경이 너무 작으면 전계에 의한 파괴보다 전류에 의해 선전극의 열적 파괴나 재질의 물리적 파괴가 있을 수 있으므로 실용화할 경우 선전극의 직경은 0.5 mm 정도가 적절하다고 판단되었다. 따라서 전극사이 절연내력을 25 kV/cm로 할 때 그림 4 (a)는 2 단계, 그림 4 (b)는 4 단계, 그림 4 (c)는 7 단계까지 전극사이 절연이 유지되고 선전극의 전계가 높아 전계에 의한 방전 발생 조건은 그림 4 (a), (b)가 좋고, 전극사이 안정적인 방전 유지를 위해서는 그림 4 (b), (c)가 좋을 것으로 판단되었다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 반응기 제작에는 그림 4 (b)와 같이 선전극과 평판전극의 높이 차이가 2 mm, 선전극 직경이 0.5 mm인 조건을 선택하였다.

3.2 부분 절연물에 의한 전위 및 전계분포 해석

반응기에 잔류자속밀도(Br) 3900 Gauss인 자석을 부착할 경우 자석과 선전극 사이는 홈이 구성되는데 이 홈에 의하여 방전이 발생하는 동안 전위 및 전계분포가 어떻게 영향을 받는지 알아보기 위하여 홈이 부분 절연되었을 경우에 대한 전위 및 전계 분포 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 조건은 선전극과 평판전극사이 거리는 12 mm, 선전극과 평판전극상단의 높이 차이는 2 mm, 선전극의 직경은 0.5 mm, 시뮬레이션에 사용된 자석은 두께 15 mm, 높이 30 mm, 폭 76 mm로 하였다.

그림 5는 부분 절연물에 의한 전위 및 전계 시뮬레이션 결과이다. 자석이 부착된 반응기를 위에서 내려다 본 것으로 좌측 곡면 상부의 흰색은 평판 전극이고, 우측은 선전극이다. 우측 상부의 홈 부분은 자석을 사용하였을 때, 연면 혹은 자석 내부로 인가 고전압에 의한 전극사이 방전 전류의 흐름을 막기 위하여 선전극과 자석 사이에 절연체가 삽입된 부분이다. 이 결과는 방전 영역에서 삽입물 또는 다른 유전율을 갖는 물질이 전극사이의 전계 분포에 어떠한 영향을 미치는지 나타내고 있다.

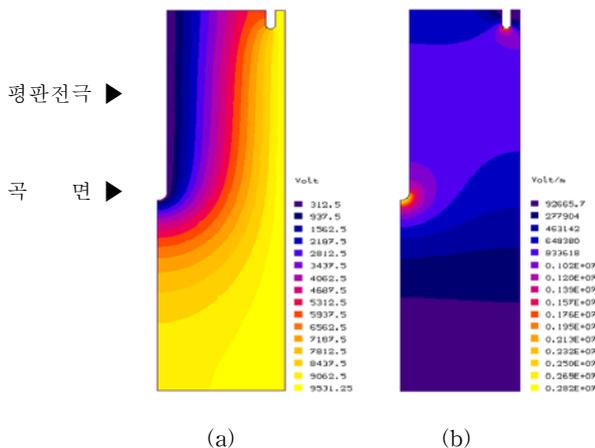


그림 5 부분 절연물에 대한 전위 및 전계분포
(a) 전위 (b) 전계
Fig. 5 Electric potential and electric field distribution to partial insulator
(a) electric potential (b) electric field

그림 5 (a)의 시뮬레이션 결과를 보면 공간의 홈으로 인하여 등전위선이 왜곡되어 있음을 보여주고 있다. 그림 5 (b)의 경우 최대 전계가 좌측 평판 전극의 곡면($r = 0.5$)에서 전계는 28.2 kV/cm이고, 홈에서의 전계는 25.0 kV/cm로 높은 전계가 형성되었음을 나타내고 있다. 이 때 전극사이 거리는 12 mm이고 전계 해석을 위하여 인가한 전압은 10 kV이다. 기본적으로 평판 전극의 곡면 부근에 강한 전계 집중 현상이 나타났고, 상부 홈에서도 전계가 상당히 증가함을 나타내고 있다. 따라서 이 홈과 평판 전극 곡면 사이에서 절연 파괴가 일어날 가능성이 높음을 알 수 있었다

3.3 몰드형 절연물에 의한 전위 및 전계 해석

반응기에 자석을 부착하였을 때 선전극과 자석사이 및 자석 표면을 통한 연면방전을 방지하기 위하여 홈 부분과 자석 표면을 절연하였을 경우 전위 및 전계분포에 대한 시뮬레이션을 하였다.

그림 6은 홈 부분과 자석 표면을 절연시킨 경우 전위 및 전계분포 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 조건으로서 선전극과 평판전극사이 거리는 12 mm, 선전극과 평판전극상단의 높이 차이는 2 mm, 선전극의 직경은 0.5 mm 시뮬레이션에 사용된 자석은 두께 15 mm, 높이 300 mm, 폭 76 mm, Br 3900 Gauss로 하였다. 자석과 전극사이의 절연을 위하여 에폭시로 자석표면 전체를 절연시킨 경우로서 이 몰딩된 에폭시가 방전 영역의 전계 분포에 어떤 영향을 주는지 나타낸 것이다. 상단 돌출된 사각형상은 실제 실험에서 고전압인자로 인한 자석 표면으로의 연면 방전에 의한 절연 파괴를 막기 위하여 사용된 절연물이다.

그림 6 (a)의 시뮬레이션 결과 자석 표면 전체를 절연하면 등전위선이 왜곡되어지는 현상이 거의 나타나지 않았고, 그림 6 (b)는 최대 전계가 좌측 곡면 즉, 평판 전극의 곡면(반경 $r=0.5$) 부근에서 전계가 집중되어 있음을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있었다.

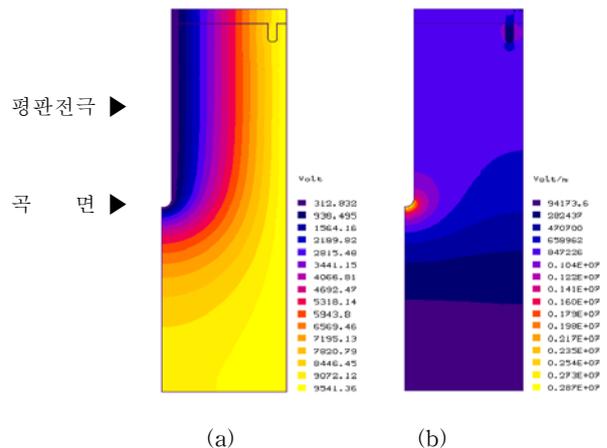


그림 6 몰딩형 절연물에 대한 전위 및 전계분포
(a) 전위 (b) 전계
Fig. 6 Electric potential and electric field distribution to molding insulator
(a) electric potential (b) electric field

그림 5의 결과와 비교하면 절연물의 형태와 방식에 의해서 전계 분포에 큰 차이점이 나타남을 알 수 있다. 그림 5 (b)의 경우 홈(부분 절연물)에서 최대 전계가 25.0 kV/cm로 아주 큰 전계가 형성되었지만 자석표면 전체를 절연한 그림 6 (b)는 전계가 6.589 kV/cm로 전계 값이 약 1/4로 감소한 결과를 나타내었다. 이상과 같은 결과로부터 전극사이의 연면 방전을 방지하기 위하여 자석표면 전체를 절연하는 것이 좋을 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 실내의 NOx 제거를 위하여 선 대 평판형 플라즈마 반응기 제작에 필요한 최적 조건 도출을 위한 반응기 내부의 전위분포, 전계분포에 대한 시뮬레이션을 하였다. 여기서 도출된 시뮬레이션 결과를 바탕으로 선 대 평판형 플라즈마 반응기를 제작하고자 한다. 여러 가지 조건으로 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

전위분포, 전계분포 시뮬레이션 결과 선전극과 평판전극 상단의 높이 차이를 2 mm, 선전극의 직경이 0.5 mm인 경우 전극사이의 낮은 전계분포로 인한 높은 절연내력과 고전계의 선전극 집중으로 인하여 전자가 쉽게 방출되어 NOx 제거 측면에서 좋을 것으로 판단되었다.

부분절연에 의한 전위, 전계분포는 평판 전극의 곡면 부근에 강한 전계 집중 현상이 나타났고, 상부 홈에서도 전계가 상당히 증가함을 나타내었다. 따라서 이 홈과 평판 전극 곡면 부분사이에서 절연 파괴가 일어날 가능성이 높음을 알 수 있었다.

자석 표면 전체를 절연하면 등전위선의 왜곡현상이 거의 나타나지 않았고 최대 전계 세기는 평판전극의 곡면에 집중되어 있음을 알 수 있었다.

전극사이 연면방전 방지를 위하여 자석의 절연 방법은 자석 표면 전체가 절연 형태로 되어야 좋을 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kohno, A. A. Berezin, J. S. Chang, and M. Tamura, "Destruction of volatile organic compounds used in semiconductor industry by a capillary tube discharge reactor", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 34, No. 5, pp. 953~966, 1998.
- [2] Kanazawa, T. Ohkubo, Y. Nomoto, T. Adachi, and J. S. Chang, "Simultaneous measurements of wire electrode surface contamination and corona discharge characteristics in air-cleaning electrostatic precipitator", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 1, pp. 279~284, 1997.
- [3] K. Tsunoda, K. Shimizu, T. Yamamoto, and A. Mizuno, "Experimental approach to enhance efficiency of non-thermal plasma process in flue gas cleaning", J. Adv. Oxid. Technol., Vol. 4, No. 3, pp. 347~351, 1999.
- [4] Kazuo Shimizu, Hiroyuki Sone, and Akira Mizuno, "Effect of water on NOx removal using pulsed discharge plasma", 靜電氣學會講演論文集, pp. 355~358, 1993.

저 자 소 개



이 동 훈 (李 東 勳)

1972년 2월 24일생. 1996년 경남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사졸업. 2001년 동 대학원 박사과정 수료. 현재 (주)미래 워터에어텍 대표.

Tel : 055) 241-3440, Fax : 055) 249-2839

E-mail : 2323444@hanmail.net