

Wire-Cylinder형 반응로에서의 코로나 방전 플라즈마의 특성 연구

박승자 · 박인호 · 고옥희*

인천대학교 물리학과, *한서대학교 컴퓨터응용물리학과
(2003년 10월 24일 접수)

Study of Characteristics of Corona Discharge Plasma in a Wire-Cylinder Type Reactor

Seung-Ja Park, In-Ho Park, and Wook-Hee Koh*

University of Incheon, *Hanseong University

(Received October 24, 2003)

요 약

대기압의 공기 중에서 코로나 방전 플라즈마에 대한 특성을 연구하기 위해 wire-cylinder 형태의 반응로에서 FCT(flux-corrected transport) 알고리즘과 FEM(finite element method) 방법을 적용한 자체 모순이 없는 1차원 수치적 모델을 사용하였다. 코로나 방전 반응로에 펄스 전압과 직류 전압을 인가하였을 때, 플라즈마 밀도의 분포를 계산하여 전압의 변화에 따른 플라즈마 특성의 변화를 연구하였으며, 또한 반응로의 크기 변화에 따른 플라즈마의 특성 변화를 연구하였다. 이 결과로 얻어지는 활동 반경(active radius)의 변화를 Peek의 실험값과 비교해 보았다. 이와 같은 코로나 방전 플라즈마에 대한 수치적 계산 결과는 방전 과정에서 일어나는 물리적 특성을 잘 설명하여 환경오염 물질 제거를 위한 반응로의 최적 설계를 위해 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

주제어 : 대기압 공기, wire-cylinder 반응로, FCT-FEM, 펄스 코로나 방전

Abstract

We used the self-consistent one-dimensional model applied to FCT algorithm and FEM method in a wire-cylinder type reactor to study the characteristics of corona discharge plasma in air at the atmospheric pressure. At the pulsed dc voltage and dc voltage, we studied the changes of the characteristic of plasma by computing electron density profile according to the changes of voltage and the size of reactor. The changes of active radius from this result are compared with the data of Peek's. The numerical simulation results for a corona discharge plasma explain the physical mechanism of the discharge process and could be used to obtain the optimized parameters for designing the plasma reactor for pollution abatement.

Key Words : atmosphere pressure air, wire-cylinder reactor, FCT-FEM, pulsed corona discharge

1. 서 론

오늘날 세계가 직면하고 있는 환경 문제가 심각해짐에 따라 오염 물질을 저감시킬 수 있는 플라즈마 반응로에 대한 관심이 점점 증가하고 있고 이런 추세에 맞추어 1992년 캠브리지 대학에서는 “non-thermal plasma techniques for pollution control”이라는 주제의 워크샵이 개최되어 환경오염 문제 해결을 위한 플라즈마의 실용화에 대한 기틀을 마련하기도 하였다 [1]. 산업적 이용을 위한 방전 플라즈마에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 오고 있으며, 최근에는 대기압, 공기 중에서 일어나는 코로나 방전에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [2,5,6,7,8,9,10].

코로나 방전 플라즈마는 건설 현장이나 실내 환경 통풍 시스템에 쓰이는 정전 집진기, 복사기나 프린터, 오존 발생기 등에 널리 이용되고 있으며, 특히 전자의 온도가 기체나 이온의 온도에 비해 매우 높은 비평형 플라즈마(non-thermal plasma)에 대한 연구는 공장 배기가스에서 배출되는 유해 물질을 제거하기 위한 반응로와 같은 장치에도 응용되고 있다 [3,4].

코로나 방전을 일으키기 위한 반응로에 사용되는 전극의 형태는 매우 다양하여 point-plane 형태, point-point 형태, wire-plane 형태, wire-cylinder 형태 등이 있으며 사용되는 전압도 직류 전압, 교류 전압, 펄스 전압 등이 있다.

여러 형태의 코로나 방전 반응로에 대한 수치적 방법을 통한 연구는 실제 장치를 제작하기에 앞서 최적 설계를 위한 도구로 사용되고 있으며, 나아가 실제 현상을 분석하고 예측하기 위한 수단으로 활용되고 있다.

여러 연구자들에 의해 wire-cylinder 형의 반응로에서의 펄스 코로나 방전 플라즈마에 대한 연구 [5,6], point-plane 형의 전극사이에서의 플라즈마 발생에 대한 연구 [2], 그리고 평행극판 사이의 스트리머에 대한 연구 [9]등 코로나 방전 플라즈마에 대한 수치적 연구가 진행되어 왔다.

그러나 보다 경제적이고 실용화된 반응로를 제작하기 위해서는 크고 안정된 형태의 플라즈마를 발생시키기 위한 연구가 이루어져야 한다. wire-cylinder 형 코로나 방전로는 모듈화하기 편하여 이

동성 및 공간활용성이 높아 흐름이 빠른 배기가스를 배출하는 소각로나 자동차 배연 저감에 매우 유용하게 적용할 수 있다는 장점이 있다 [4]. 이와 같은 반응로에서 전압 형태의 변화 및 전극 간격의 변화 등의 여러 조건의 변화에 따른 플라즈마 특성의 변화에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 wire-cylinder 형태의 코로나 방전 반응로 내의 대기압 공기에 대하여 인가 전압의 형태 및 반응로의 크기를 변화시키면서 플라즈마의 특성 변화에 대한 연구를 수치적으로 수행하였다.

방전 플라즈마의 거동을 분석하기 위하여 이미 개발된 자체모순이 없는 1차원적 유체 모델을 사용하였다. 이 모델은 전하 밀도가 급속히 변화하는 영역에서의 정확한 해를 얻기 위해 FCT 알고리즘 및 FEM 방법을 이용하였다. 전자 및 양이온과 음이온의 밀도에 대한 시간적, 공간적 변화의 계산을 위해 이온화(ionization), 흡착(attachment), 재결합(recombination), 전자 확산 현상(electron diffusion) 등이 고려된 연속 방정식과 Poisson 방정식을 사용하였다.

본 논문의 제 2절에서는 코로나 방전 플라즈마의 수치적 계산 방법에 대하여 설명하며, 제 3절에서는 여러 조건의 변화에 따른 플라즈마 특성에 대한 계산 결과 및 토의를 하였으며, 제 4절에는 결론이 주어진다.

2. 코로나 플라즈마의 수치 해석

대기압 상태의 공기로 가득 차 있는 wire-cylinder 형태의 반응로에 고전압을 걸어주면 이온화로 인해 플라즈마가 발생한다. wire 주위에서 방전이 시작되면 이온과 전자는 정전기력에 의해 반대 방향으로 움직이면서 중성기체와의 충돌에 의해 2차 전자를 발생하게 된다. 이러한 전자와 이온들은 흡착과정, 재결합과정, 전자 확산 현상 등에 의해 플라즈마는 비 중성(non-neutral) 상태가 되어 전기 퍼텐셜도 계속 변하게 된다. 따라서 반응로에서의 시공간적으로 변하는 플라즈마 밀도와 전기장의 분포를 결정하기 위해서는 플라즈마의 운동을 수치적으로 해석해야 한다.

wire-cylinder형 구조의 반응로에서 축방향의 길이는 반경 반향의 길이보다 훨씬 길므로 무한 원통으

로 근사하여 반경 방향의 변화만 살펴본다. 전자 및 양이온과 음이온 밀도의 시공간적 변화를 원통 좌표계에서 연속방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_e v_e) - D_e \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial n_e}{\partial r} \right) = (\alpha - \eta) n_e v_e - \beta n_e n_p \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_p v_p) = \alpha n_e v_e - \beta n_e n_p - \beta n_n n_p \quad (2)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r n_n v_n) = \eta n_e v_e - \beta n_n n_p \quad (3)$$

여기서 n_e , n_p , n_n 은 각각 전자, 양이온, 음이온의 밀도이고 v_e , v_p , v_n 은 전자, 양이온, 음이온의 표류속도(drift velocity)이다. 또 α , η , β , D_e 는 각각 이온화, 흡착, 재결합, 전자 확산계수를 나타내는 기호이다. 또한 Poisson 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) = -\frac{e}{\epsilon} (n_p - n_e - n_n) \quad (4)$$

이 때 전기장 E는 아래와 같이 표시된다.

$$E = -\nabla \phi \quad (5)$$

진공 중에서는 전하가 존재하지 않으므로 식 (4)의 우변은 0이 되며, 그 때의 퍼텐셜을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\phi(r) = V_0 \frac{\ln(r/r_b)}{\ln(r_a/r_b)} \quad (6)$$

$$E(r) = -\frac{d\phi}{dr} = \frac{V_0}{r \ln(r_b/r_a)} \quad (7)$$

여기서 r_a , r_b 는 각각 wire 반경과 cylinder 반경을 나타낸다.

플라스마를 산업적으로 적용할 때 코로나가 발생되어지는 활동 부피(active volume)를 크게 하는 것은 꼭 필요하다. 활동 부피(active volume)는 wire 반경에서부터 전기장이 절연과피 전기장의 값으로

떨어질 때인 활동 반경(active radius) 까지의 공간을 말한다.

wire-cylinder 반응로에서 전기장 E(r)은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(r) = \frac{\phi_0}{r \ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \quad (8)$$

여기서 r , ϕ_0 은 활동 반경, 인가 전압을 나타내며 wire에서는 활동 부피의 전기장 E(r)이 절연과피 전기장 E_B 와 같으므로 활동 반경 r은

$$r = \frac{\phi_0}{E_B \ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)} \quad (9)$$

로 표현된다.[11]

이러한 활동 반경을 조사해 봄으로써 반응로의 특성을 확인할 수 있고 반응로의 제작시 크기를 결정하는데 활용할 수 있게 된다.

3. 결과 및 토의

3.1 펄스 전압에 의한 코로나 방전

코로나 방전 플라스마의 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 내부 반경이 r_a 이고, 외부 반경이 r_b 인 wire-cylinder 형태의 반응로를 사용한다.

대기압(760Torr)의 공기 중에서 펄스 전압 ϕ_0 을 인가하면 펄스 코로나 방전 플라스마가 발생된다.

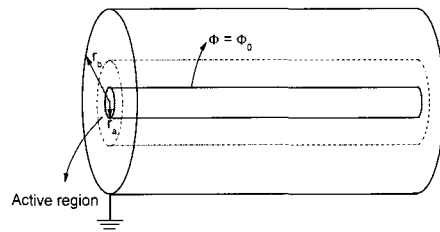


Fig. 1 Wire-cylinder 반응로의 구조

이 반응로의 크기는 wire 내부 반경이 0.1cm이고 cylinder의 외부 반경이 2.0cm이며 wire와 cylinder 사이에는 밀도가 $2.45 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 이고 온도가 300K인 중성기체가 들어 있다. 이 반응로에서 wire에 펄스 주기가 $1 \mu\text{s}$, 상승 주기가 50ns인 50kV의 펄스 전압 ϕ_0 를 인가한 후 플라즈마의 특성을 알아보았다.

$t=0$ 에서 방전에 의해 anode 근처에서 발생되기 시작한 전자는 중앙 전극 근처의 높은 전기장 쪽으로 급속히 이동하며 주변의 중성 기체를 이온화하여 더 많은 2차 전자를 발생시켜 이온화 전면 (ionization front)을 형성한다. 이렇게 형성된 이온화 전면은 anode 쪽에서 cathode 쪽인 바깥 전극 쪽으로 계속 이동해 가게 되는데 시간에 따라 변하는 전자 밀도의 분포를 나타낸 것이 Fig. 2이다.

처음에 anode쪽에 많은 전자는 시간이 지남에 따라 점차 cathode 쪽으로 이동해 가게 되며 전자 밀도의 최대치는 전자가 이동해 갈수록 점점 줄어들어 110ns에서는 50ns의 1/5정도로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

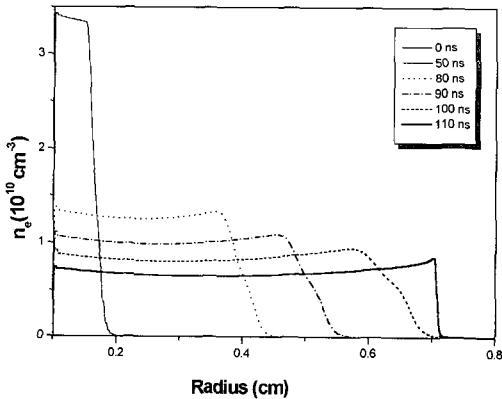


Fig. 2 Electron density profile at various times

이유는 반응로 내에서 음이온은 양이온과 흡착, 재결합하고 전자는 anode 쪽으로 계속 이동해가기 때문이다. 양이온과 음이온 밀도 분포를 분석해 보면 전자 밀도 분포와 비슷하지만 양이온 밀도가 음이온 밀도보다 좀 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있는데 이것은 W. H. Kho의 결과에서도 확인할 수 있다 [6].

Fig. 3은 시간에 따른 전기장의 분포로써 내부 전

극 근처에서의 전기장은 매우 낮게 나타난다. 그리고 이온화 전면에서의 전기장의 기울기가 급하고 그 외의 영역에서는 전기장의 변화가 매우 완만하게 나타나는데 이것은 양전하와 음전하가 균형을 이루었기 때문이다. 110ns 이후부터 전기장은 감소하여 처음의 전기장과 같아져서 순전하 밀도가 거의 0이 됨을 알 수 있다.

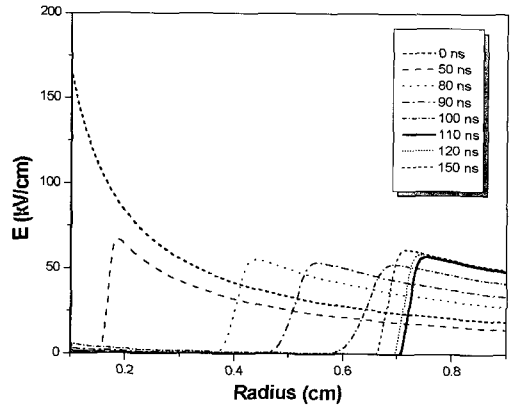


Fig. 3 Electric field profile at various times

Fig. 4는 $t=110\text{ns}$ 에서의 이온화 전면에서의 전자, 양이온, 음이온, 순전하 밀도와 전기장을 나타내고 있다. 이런 전체적인 구조는 점차 바깥쪽 전극으로 이동해 가게 된다.

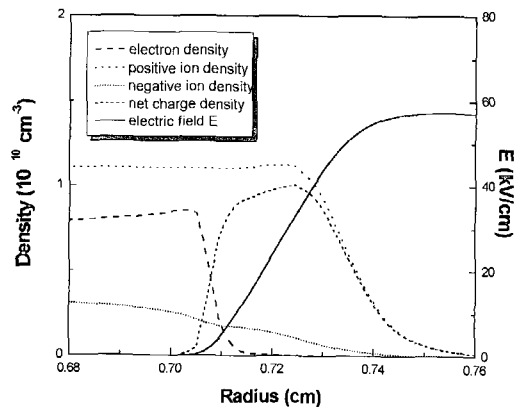


Fig. 4 Structure of ionization front at $t=110\text{ns}$

3.2 직류 전압에 의한 코로나 방전

반응로에 펄스 전압 대신 같은 크기인 50kV 직

류 전압을 인가한 후 플라즈마의 특성을 조사하여 전자 밀도 분포를 나타낸 것이 Fig. 5이다.

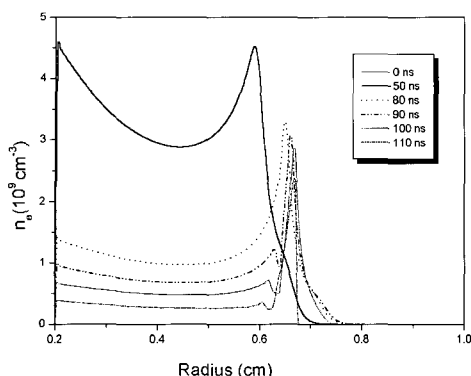


Fig. 5 Electron density profile at DC voltage

같은 50kV의 펄스 전압의 경우인 Fig. 2와 비교하면 전체적인 모양은 비슷하게 나타나지만 이온화 전면에서 전자 밀도가 갑자기 증가하는 것을 알 수 있으며 전자 밀도는 약 10배 정도의 차이가 남을 확인할 수 있다. 이것은 반응로에 직류전압보다 펄스 전압을 인가할 때 전자를 더 많이 발생시키고 안정적으로 전파되어진다는 사실을 알려준다.

Fig. 6은 50ns에서 직류 전압을 40kV에서 60kV로 변화시키면서 측정된 전자 밀도 분포를 비교한 것이다. 인가 전압이 높을수록 이온화가 많이 일어나 전자의 밀도가 높게 나타나고, 충분한 에너지를 얻은 전자들이 중성 기체와의 충돌에 의해 2차 전자 방출을 유도하여 전자 밀도가 점점 증가하게 된다는 것을 알 수 있다.

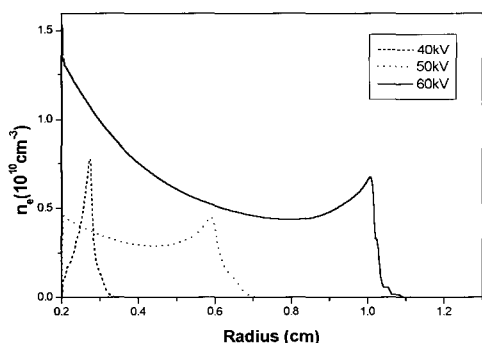


Fig. 6 Electron density to change of DC voltages (50ns)

반응로에 인가하는 직류 전압에 따라 활동 반경 (active radius)이 변하게 된다는 것은 1929년 Peek의 실험에 의해 확인되었다. Peek는 wire 직경이 0.2333 cm, cylinder 반경이 9.3cm인 wire-cylinder 반응로에서 활동 반경을 측정된 실험값과 절연파괴 전기장을 30kV/cm로 하여 (9)식을 계산하여 얻어진 값을 비교하였다 [11].

본 연구에서는 wire 직경을 0.2cm, cylinder 반경을 2cm, 절연파괴 전기장을 30kV/cm로 하여 활동 반경을 조사하여 Peek의 실험값과 비교해 보았더니 Fig. 7과 같이 나타났다. 따라서 인가되는 직류 전압의 증가에 따라 플라즈마의 활동 반경이 증가함을 알 수 있으며 이는 (9)식에 의한 이론값과 비슷한 형태를 나타내지만 플라즈마가 없는 진공상태에서의 Peek 실험값과 대기압 공기 중에서의 결과인 본 연구 사이에는 차이가 있음을 확인할 수 있다.

3.3 반응로 크기 변화에 따른 활동 반경의 변화

반응로의 크기에 따른 플라즈마의 특성을 알아보기 위해 wire-cylinder 반응로의 내부 반경과 외부 반경을 변화해 가면서 활동 반경(active radius)을 측정해 보았다.

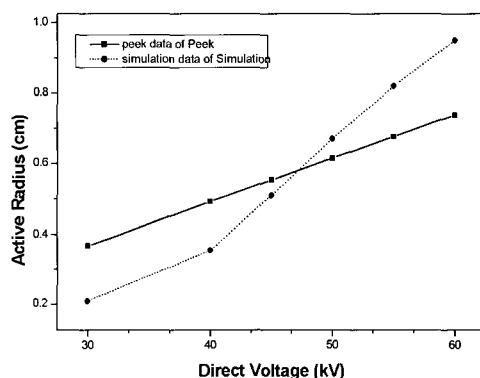


Fig. 7 Active radius to DC voltages

먼저 주기가 1μs인 펄스 전압을 50kV, cylinder 외부 반경을 3cm로 고정하고 wire 내부 반경을 0.1cm에서 0.5cm까지 변화시키면서 활동 반경을 알아본 결과가 Fig. 8이다.

내부 반경이 커질수록 방전에 의해 발생하는 전

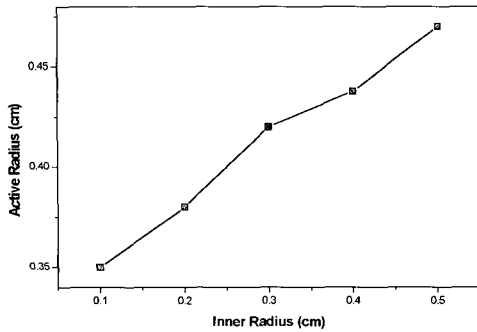


Fig. 8 Active radius to change of inner radius

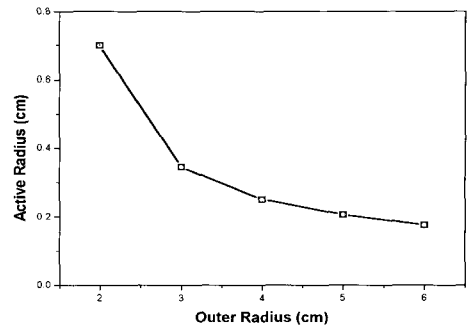


Fig. 9 Active radius to change of outer radius

자와 이온의 밀도가 커져 플라즈마의 활동 반경이 시뮬레이션한 범위 내에서 비례하여 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 wire의 내부 반경이 플라즈마의 특성에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

다음으로 반응로의 외부 반경을 변화시키면서 플라즈마의 활동 반경의 특성을 조사하여 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다. 반응로의 내부 반경을 0.1cm로 고정시키고 외부 반경을 2cm에서 6cm까지 변화시키면서 활동 반경을 알아본 결과, 외부 반경이 클수록 방전에 의해 발생하는 플라즈마의 활동 반경이 줄어든다는 것을 알 수 있다.

이러한 반응로의 크기 변화에 따른 결과는 실제 반응로를 제작할 때 반응로의 내부 반경 r_a , 외부 반경 r_b 의 크기를 결정하는 중요한 자료가 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

대기압, 공기중 wire-cylinder 반응로에서 인가 전압을 펄스 전압과 직류 전압으로 변화시키면서 코로나 방전 플라즈마의 역학적 운동을 수치적으로 해석해 보았다.

자체 모순이 없는 1차원적 유체 모델을 사용하여 FCT-FEM 수치 해석법으로 전자, 이온 밀도 및 전기장 등을 조사해 보았고, 이온화 전면에서의 밀도 분포도 알아보았다.

전압 형태의 변화에 따른 플라즈마의 특성을 비교해 보고 반응로의 전극 간격의 변화에 따른 플라즈마의 활동 반경을 조사해 보았다.

그 결과 첫째, wire-cylinder 형태의 반응로에서

펄스 코로나 방전 플라즈마의 특성을 알 수 있었고 둘째, 직류 전압에서보다 펄스 전압을 인가할 때 더 많은 전자가 발생함을 알 수 있었으며 직류 전압의 증가에 따라 활동 반경이 증가함을 알 수 있었다. 셋째, wire의 내부 반경이 클수록 활동 반경이 커지고 cylinder의 외부 반경이 클수록 활동 반경이 줄어든다는 것을 알 수 있었다.

이러한 코로나 방전 반응로에 대한 수치적 연구는 실제 환경오염 물질을 제거하기 위한 장치를 제작하기에 앞서 최적의 설계를 위한 도구로 사용되어질 것이며 실제 장치에서 일어나는 현상을 분석하고 예측하는데 유용한 수단으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 2003년도 인천대학교 자체연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

This work is partly supported by the research fund of the University of Incheon

참고 문헌

- [1] The NATO Advanced Research Workshop, *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*, Part A, (Cambridge, England, 1992), 1.
- [2] R. Morrow and J. J. Lowke, *Appl. phys.* **30**, 614 (1997).
- [3] J.-S. Chang, P. A. Lawless, and T. Yamamoto, *IEEE Trans. Plasma Science.* **19**, 1152 (1991).

- [4] R. McAdams, J. phys. D. **34**, 2810 (2001).
- [5] S. T. CHUN, J. Kor. Phys. Soc. **33**, 428 (1998).
- [6] W. H. Koh, I. H. Park, J. Kor. Phys. Soc, **41**, 920 (2002).
- [7] J. M. Park, Y. H. Kim, and S. H. Hong, Proc. 8th Int. Sym. High Pressure Low Temperature Plasma Chemistry, Pühajärve, Estonia, July 21~25 (2002).
- [8] J. Batina, F. Noel, S. Lachaud, R. Peyrous, and J. F. Loiseau, Appl. Phys. **34**, 1510 (2001).
- [9] A. A. Kulikovskiy, Appl. phys. **30**, 441 (1997).
- [10] 민웅기, *비정렬격자망과 FEM-FCT법을 이용한 플라스마의 과도상태 수치해석* 2, (2002).
- [11] J. Reece. *Roth, Industrial Plasma Engineering* (Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 1995), Vol. 1. 265-269.