

RF Ar 플라즈마에서의 레이저 어블레이션 모델링

소순열*, 임장섭**, 이 진*, 정해덕*, 박계춘*, 문재주*

* : 목포대학교 전기제어신소재공학과

** : 목포해양대학교 해양전자통신공학부

Modeling of the Laser Ablation under the RF Ar Plasmas

Soon-Youl So*, Jang-Seob Lim**, Jin Lee*, Hae-Deok Jung*, Gye-Choon Park*, Chae-Joo Moon*

* : Division of Advanced Materials and Electrical Engineering, Mokpo National University

** : Division of Marine Electronic and Communication Engineering, Mokpo National Maritime University

Abstract - In this paper, we developed a hybrid simulation model of carbon laser ablation under the Ar plasmas consisted of fluid and particle methods. Three kinds of carbon particles, which are carbon atom, ion and electron emitted by laser ablation, are considered in the computation. In the present modeling, we adopt capacitively coupled plasma with ring electrode inserted in the space between the substrate and the target, graphite. This system may take an advantage of μm -sized droplets from the sheath electric field near the substrate. As a result, in Ar plasmas, carbon ion motions were suppressed by a strong electric field and were captured in Ar plasmas. Therefore, a low number density of carbon ions were deposited upon substrate. In addition, the plume motions in Ar gas atmosphere was also discussed.

1. 서 론

아몰피스 탄소 (a-C) 필름은 기계적 강도가 우수하며, 적외선 영역에서의 높은 광학적 투명성과 높은 전기저항이 요구되는 재료에 널리 이용되고 있다. 현재, 이러한 필름 제조에는 레이저 어블레이션 기법이 폭 넓게 이용되고 있다[1]. 이 기법은 증착 기판에 높은 에너지를 갖는 탄소 입자들을 생성시킬 수 있기 때문에 a-C 필름을 제작하는데 있어 아주 우수한 방법이라고 할 수 있겠다. 그러나 보다 세밀하고 신뢰성 높은 필름을 제작하기 위해서는, 레이저에 의해 방출된 탄소 입자들의 운동을 정확하게 분석하여 탄소 입자들의 운동 에너지 및 분포를 제어하는 것이 매우 중요할 것으로 고려된다. 특히, 재료 표면에서 방출된 이온의 에너지에 의해서 기판에 증착된 박막은 정질 및 비정질 등의 다양한 결합 구조로 이루어지는 것을 볼 수가 있다. 따라서 적절한 이온의 운동 에너지 제어 및 버퍼 가스와의 상호 충돌 반응의 선택성 등이 주요한 연구 과제로 부각되고 있다[2].

본 논문에서는 레이저 입사에 의해 방출된 탄소 입자들의 운동을 분석하기 위하여 수치해석 기법을 이용하였으며, 레이저 어블레이션 모델링을 구현하고자 하였다. Ar 플라즈마의 방전 공간내에서 레이저에 의해 방출된 전자, 탄소 이온 (C⁺) 및 탄소 원자 (C)의 운동 과정을 보다 정확히 계산하기 위해서 입자 및 유체 모델을 융합한 2차원 하이브리드 모델을 개발하였다. 유체 모델을 이용하여 Ar 플라즈마의 시·공간적 특성을 분석하였으며, Ar 플라즈마가 주기적 정상상태에 도달한 후, 입자 모델을 이용하여 탄소 입자들의 운동을 시뮬레이션하였다.

또한, 구현된 모델링을 통하여 방출된 탄소 입자들과 Ar 플라즈마의 상호관계를 확인하고자 하였으며, 탄소 입자들의 운동을 분석하고 이온의 운동을 제어하는 하나의 파라미터를 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 모델링

본 시뮬레이션에서는 유체 모델과 입자 모델을 융합한 2차원 하이브리드 모델을 새롭게 개발하여 Ar 플라즈마의 방전 공간내에서 레이저 어블레이션 기법에 의한 전자, 탄소 이온 (C⁺) 및 탄소 원자 (C)의 운동 과정을 계산하였다. 유체 모델은 각 하전 입자의 연속방정식, 전자 에너지 보존 방정식 및 포아송 방정식으로 구성되어 있다. 대전입자의 전송의 식을 아래에 표시하였다.

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = -\frac{\partial \Gamma_j}{\partial x} + S_j \quad (1)$$

$$\Gamma_j = s n_j N_j E_j - D_j \frac{\partial N_j}{\partial x} \quad (2)$$

여기서 j는 전자 및 양이온을 나타낸다. N_j 는 각 하전입자의 밀도, S_j 는 전자 충돌 및 화학 반응에 의한 각 입자의 발생 및 소멸 항을 나타낸다. 또한 I_j 는 입자속(flux), D_j 는 확산 계수, s 는 이동도, E 는 전계를 나타낸다. s는 전자의 경우 -1, 이온의 경우 +1을 나타낸다.

Ar 플라즈마가 주기적인 정상상태에 도달하게 되면, 레이저 입사에 의해서 증발된 입자의 운동을 입자 모델을 통하여 계산한다. 입자 모델은 (i) 입자의 비행 시간 결정 ($\tau = -\frac{1}{C} \ln(1-\xi)$,

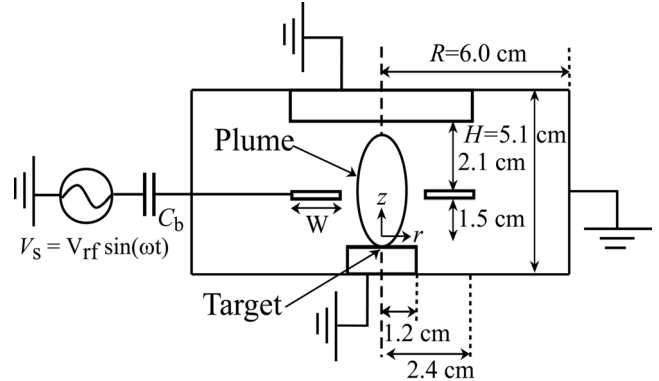
(ii) 입자 운동의 추적 ($v = v_0 + \frac{eE}{m} \tau$), (iii) 충돌의 판단 (ξ),

(iv) 충돌 후의 운동 방향 결정 ($\cos \theta = 1 - 2\xi_0$, $\xi_\phi = \frac{1}{2\pi} \phi$) 과

(v) 충돌 후의 속도 및 에너지 결정 ($\epsilon' = \epsilon - \delta\epsilon$)에 의한 과정으로 수행되어 진다. 여기서, ξ 는 랜덤 상수이며, θ 및 ϕ 는 산란 각 및 방위각을 나타내며, ϵ 및 $\delta\epsilon$ 는 운동 에너지 및 충돌 후의 에너지 손실을 나타낸다.

2.2 챔버 및 외부회로

평행 평판 전극에 콘덴서를 직렬 연결한 용량결합형 플라즈마의 모델을 그림 1에 나타내었다. 방전 챔버의 높이는 $H=5.1[\text{cm}]$, 방전 여기 RF 전원 주파수는 13.56 [MHz], 전원 전압은 $V_{rf}=300[\text{V}]$, 가스온도는 $T=300[\text{K}]$ 로 설정하였다. 또한 블로킹 콘덴서 용량은 $C_b=40[\text{pF}]$, Ar 가스압력은 $P=50[\text{mTorr}]$ 로 설정하였다.



<그림 1> 용량결합형 플라즈마의 모델과 외부 회로: 40.0 [pF] 커패시터, 기압 50[mTorr], 링 전극의 폭 18[mm].

본 연구에서는 ArF 레이저 ($\lambda=193[\text{nm}]$, $\tau=20[\text{ns}]$ 및 레이저 선량 $=3.0[\text{J}/\text{cm}^2]$)가 Graphite 타겟에 입사하는 것으로 고려하였으며, 이러한 ArF 레이저 범위에서는 C_n ($n=1\sim 3$)의 분자가 주류를 이루어 방출되는 것으로 보고되고 있다[3]. 각 입자들의 초기 에너지는 실험 결과를 통하여 얻어진 값으로 전자는 10 [eV], C 및 C⁺은 각각 100 [eV]로 설정하였다[4]. Ar 원자와 탄소 이온 및 원자와의 충돌 단면적은 각각의 원자 반경으로부터 계산하였고 ($\pi(r_1+r_2)^2$; r_1 은 Ar 원자의 반경 $1.91 \times 10^{-8}[\text{cm}]$, r_2 는 C 원

자의 반경 0.77×10^{-8} [cm]), 충돌후의 산란각은 $\cos\theta$ 로 설정하였다. 탄소 입자들의 움직임은 입자 모델로부터 3차원 좌표계를 이용하여 계산하였으며, 이 입자들의 초기 운동 방향은 z축으로 한정하였다 (0, 0, z). 전극 간에 인가되는 방전 전압(V_g) 및 전류(I_g)는 다음과 같이 계산되어 진다.

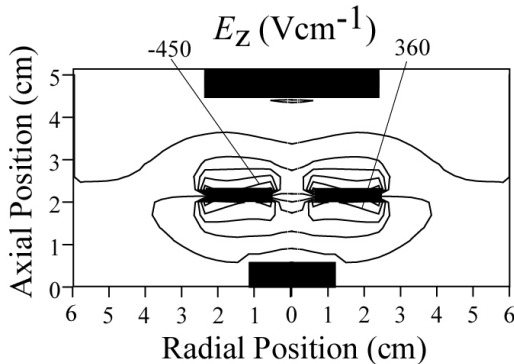
$$V_g = \frac{C_b}{C_b + C_g} V_{rf} - \frac{1}{C_b + C_g} \cdot \int_0^t I_g dt \quad (3)$$

$$I_g = \frac{e}{V_g} \int_v (\Gamma_p - \Gamma_e) \cdot E_s dv \quad (4)$$

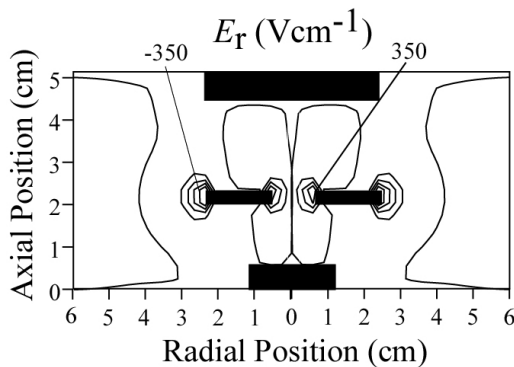
3. 결과 및 고찰

그림 2는 Ar 플라즈마의 정상상태에서의 z방향(수직방향)의 공간전계와 r방향(반경방향)의 공간전계를 나타내고 있다. 각 등고선의 증가분은 각각 80, 70[V/cm]를 보여주고 있다. 중앙부분에 형성되어 있는 링 전극의 주변에 강한 공간전계가 형성되고 있음을 확인할 수 있다. 공간전계는 플라즈마를 구성하는 입자들의 운동으로부터 형성되며, 이 분포도는 탄소 입자의 에너지, 운동방향, 충돌 프로세스에 지대한 영향을 끼칠 것으로 사료된다.

그림 3에 레이저 주입 후 $100\mu s$ 경과하였을 때의 탄소입자 운동 시뮬레이션을 보여주고 있다. 그림 4는 기관에 도달하는 C 및 C^+ 의 에너지를 나타내고 있다. C 원자는 충돌 과정을 거치지 않는 입자들이 상부 전극면을 향하여 전진하게 됨으로, 에너지가 높은 입자들이 기관 중앙 ($r=0.0$ [cm])에 위치하게 되며, 중앙에서 멀어질수록 에너지도 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 C^+ 은 상부 전극면 ($z=4.5$ [cm])에 가까울수록 기관 주위에 형성된 쉬스의 영향으로 기관을 향하여 가속되어, C 원자들이 가지는 에너지보다 매우 높은 에너지가 분포하는 것을 알 수 있다. 또한, 이 결과는 탄소원자보다 탄소이온이 더 높은 에너지 폭을 보여주고 있으며, 기관 주변에 형성되어 있는 공간전계에 의해서 탄소이온이 가속을 받게 되고 이로부터 기관에 충돌하는 이온의 에너지가 높아지는 것으로 고찰된다. 그러나, 전반적으로 기관에 도달하는 이온의 수밀도는 탄소원자에 비해 매우 낮으며, 이것은 타겟 주변에 형성되어 있는 공간전계가 반대로 탄소이온이 기관을 향하여 운동하지 못하도록 장벽의 역할을 하기 때문으로 고찰된다.

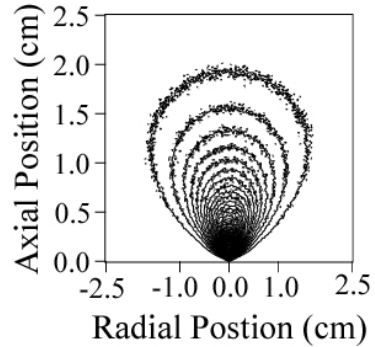


(a)

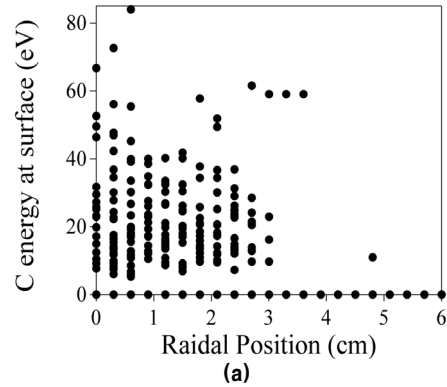


(b)

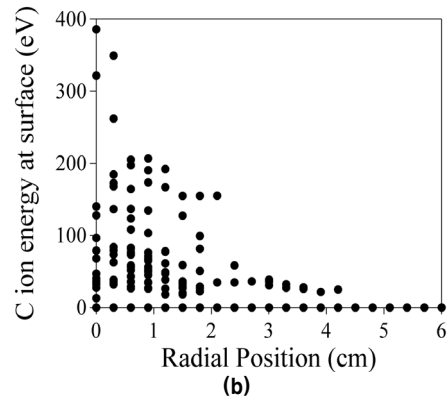
<그림 2> Ar 플라즈마의 정상상태에서의 (a) z방향의 전계 E_z 와 (b) r방향의 전계 E_r .



<그림 3> 레이저 주입 후 $100\mu s$ 경과하였을 때의 탄소입자의 방출 분포도 (각 등고선은 최대치를 50등분).



(a)



(b)

<그림 4> 기관에 증착되는 (a) 탄소 원자와 (b) 탄소 이온의 에너지

[참 고 문 헌]

- [1] B-Y Lee, K-D Song, J-K Chong and K-Y Park, "Steady State Analysis of Nozzle Ablation Under High Temperature and High Pressure Arc Plasma", Trans. KIEE, Vol. 52C, No. 9, pp. 395-399 (2003)
- [2] Dong-Hee Rhie, "Effects of Two-Step Annealing Process on the Pulsed Laser Ablated Lead Zirconate Titanate Thin Films", KIEE International Trans. on EA, Vol. 3-C, No. 2, pp. 43-47 (2003)
- [3] Seung Min Park, Heebyoung Chae, Sangwook Wee and Inhyung Lee, "Anomalous enrichment of C_2^+ ions by laser ablation of graphite in Ar jet", J. Chem. Phys., Vol. 109, No. 3, pp. 928-931 (1998)
- [4] D. H. Lowndes, V. I. Merkulov, A. A. Puretzky, D. B. Goehagan, G. E. Jellison, Jr., C. M. Rouleau and T. Thundat, "Amorphous Diamond Films Deposited by Pulsed-Laser Ablation: The Optimum Carbon-Ion Kinetic Energy and Effects of Laser Wavelength", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 526, pp. 325-330 (1998)