

RF 유도형 플라즈마 프로세스에 대한 분광학적 연구

(A Study on the Optical Emission Spectroscopy of the RF Inductive Plasma Process)

장문국* · 한상보** · 박상현

(Mun-Gug Jang · Sang-Bo Han · Sang-Hyun Park)

Abstract

This paper is tried to analysis the optical emission spectroscopy related to the position of inductive load coil and flow rates of methane and oxygen in the RF inductive plasma process. According to the position of load coil, peak of H_{α} , H_{β} , and CH were appeared strongly at the middle position of the coil and it decreased both direction. The electron temperature was approximately 0.9[eV] at that position. Emission intensities of H_{α} , H_{β} , and CH increased linearly by increasing input power. In addition, intensities of H_{α} and H_{β} increased by increasing the flow rate of oxygen. It might be ascribed that the oxygen species were bonded with C_nH_m by suppressing the combination with hydrogen atoms. Consequently, the optimal position of the inductive coil is decided to the intermediate position between 4th and 5th turns, the wanted carbon thin-film is possible to deposit by controlling flow rates of methane and oxygen.

Key Words : Hydrogen, Methane, Optical Emission Spectroscopy, RF Inductive Plasma Process

1. 서 론

1.1 연구의 배경

플라즈마 프로세스는 전원의 종류, 리액터 구조, 가스 구성, 압력, 전극 배치 등 여러 가지 파라메타에 직접적으로 영향을 받으며, 이들을 적절히 선정하여 다양한 반도체 공정에 효율적으로 적용되고 있다. 주요

한 전원의 종류로는 직류, 고주파(13.56[MHz]), 마이크로파(2.45[GHz])를 들 수 있으며, 직류인 경우는 플라즈마 리액터 구조가 주로 정전형이며, 고주파 전원은 정전형 및 유도형, 마이크로파는 도파관과의 조합 방식에 따라서 여러 가지 구조로 이루어져 있다. 특히 전원 주파수(ω)는 플라즈마 내부의 전자와 입자의 충돌과 관련된 매우 중요한 파라메타로서, 전원주파수보다 이온의 각주파수(ω_i)가 높은 경우에는 외부 전극과의 γ 작용에 의하여 2차 전자방출이 주로 이루어지며, 플라즈마를 유지하기 위해 높은 전압이 필요하다. 그리고, 전원주파수(ω)보다 전자의 각주파수(ω_e)는 높고 이온의 각주파수(ω_i)가 낮은 경우에는 이온은 플라즈마 공간상에 트랩(trap)되고, 전계에 의해 가속된 전자

* 주저자 : 경남대학교 전기공학과 박사과정
** 교신저자 : 경남대학교 전기공학과 교수
Tel : 055-249-2635, Fax : 0505-999-2161
E-mail : hansangbo@kyungnam.ac.kr
접수일자 : 2011년 10월 18일
1차심사 : 2011년 10월 22일
심사완료 : 2011년 11월 4일

가 공간 내 체적전리에 의해 플라즈마가 유지된다. 이 영역이 고주파 전원주파수의 영역이라고 볼 수 있다. 또한 전자와 이온의 각주파수 모두가 전원주파수보다 낮은 경우($\omega_i, \omega_e \ll \omega$)에는 전자와 이온이 공간상에 트랩되어 플라즈마가 유지되며, 이때의 전원 주파수는 마이크로파 영역으로서 하전입자들은 주로 확산에 의해 운송된다[1].

본 연구에서 논한 고주파 플라즈마 장비인 경우는 전극이 도체 및 유전체에 관계없이 플라즈마를 발생시킬 수 있으며, 일반적으로 전극 구조에 따라서 유도형 및 정전형 구조가 많이 사용되고 있다. 특히 유도형은 석영관 외부에 코일을 감고, 코일에 흐르는 고주파 전류에 의한 자속의 시간변화에 의해 발생하는 유도 전계에 의해 플라즈마를 유지시키는 방식이다. 플라즈마 진단기술에는 일반적으로 분광분석법, 탐침법, 질량분석법 등이 있으며[2-7], 분광분석법은 비교적 간단한 측정법으로서 플라즈마 내부의 발광을 관측하는 것에 의해 플라즈마의 특징을 파악하거나 그 변화를 모니터링하는데 자주 이용되고 있다. 하지만 플라즈마 내부에 존재하는 비발광 화학종이나 준안정 분자를 계측할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 최근 중요시되고 있는 그래핀, DLC(Diamond-Like Carbon), 다이아몬드[8-12]와 같은 탄소계 박막을 합성하기 위하여 수소, 메탄, 산소를 주요한 조성 가스로서 공급하였을 때, 고주파 유도형 플라즈마 공간 내에 존재하는 발광 화학종의 분포를 측정하기 위하여 분광분석법을 실시하였다. 특히 흑연, 그래핀, 카본나노튜브, DLC, 다이아몬드, 풀러렌 등은 탄소계 동소체이며, 플라즈마 공간내의 가스 구성, 압력, 기판 소재의 종류, 축매의 종류 등과 관련되어 매우 비슷한 프로세스 조건임에도 서로 다른 성장 특성을 보인다.

따라서 본 연구에서는 분광분석법을 이용하여 자체 개발한 고주파 유도형 플라즈마 장비의 각 코일 턴과 턴 사이의 2[mm] 공간 측면에서의 발광화학종의 분포 및 전자온도 변화를 조사하고, 주요한 파라메타인 입력 전력, 산소의 유량 및 메탄의 유량에 대한 영향을 조사하였다. 주요한 결과로서 박막 성장을 위한 최적의 위치는 코일 위쪽으로부터 4번째와 5번째 코일 사

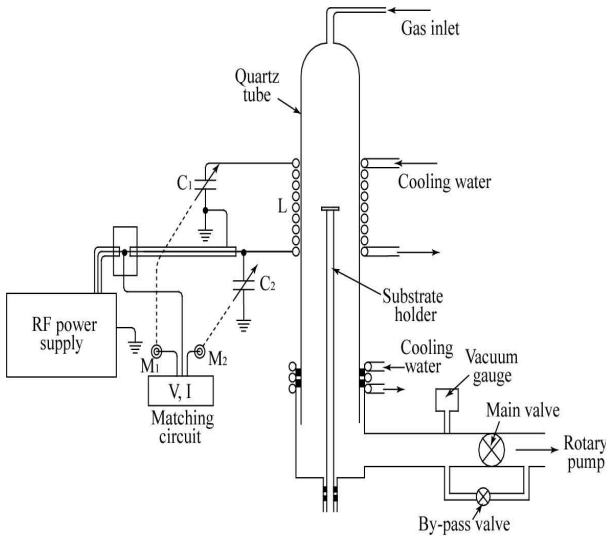
이로 판단되었으며, 메탄 및 산소 유량을 적절히 제어함으로써 원하는 탄소계 박막을 성장시킬 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험방법

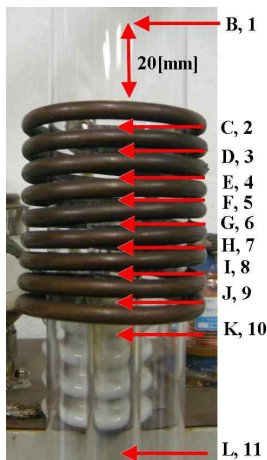
본 연구에서는 주파수 13.56[MHz]인 RF 전원을 이용하여 L과 C의 병렬공진 조건에서 코일과 콘덴서에 흐르는 탱크전류에 의하여 석영관(외경 : 50[mm]) 내부에 플라즈마를 발생시켰다.

그림 1은 실험장치도 및 분광측정위치를 보인 것으로서, 그림 1 (a)에서와 같이 부하코일은 외경 6[mm]의 구리관을 9회 감고 내부에는 냉각수를 흘려 고온에 의해 손상되지 않도록 하였으며, 부하조건에 따라서 임피던스를 매칭 시키기 위하여 가변용 진공콘덴서를 직렬 및 병렬로 연결하였으며, 석영관 내에 박막증착용 기판을 놓기 위해 상하 이동이 가능한 기판 지지대를 설치하였다. 이때 석영관 외부와 코일 내부와의 간격은 2.5[mm]이며, 분광분석을 위하여 RF 부하 코일 측면 10[mm] 떨어진 지점에 직경 1[mm]의 핀홀을 두고, 이 핀홀을 통과한 빛만이 콜리메이터를 통해 광파이버(19 bundles)에 집속되고, 분광기(Monochromater, Spectrapro 2300i, 300[g/mm] gratings, 500[nm] blaze)의 인입구 슬릿(20[μ m])을 통과하여 분광기 내부의 그레이팅(Grating)에서 반사되어 CCD 카메라(detector temp. : -40[$^{\circ}$ C], 1~5 pixels)에 의하여 측정되도록 구성하였다.

그리고, 석영관 내부는 로타리 펌프에 의하여 일정한 압력 1×10^{-2} [torr]으로 배기시킨 후, 소정의 가스를 주입시켜 주 밸브를 잠근 후 니들밸브(by-pass valve)를 이용하여 항상 4×10^{-1} [torr]가 유지되도록 조절하였다. 실험에 사용된 수소가스의 유량은 항상 60[sccm]으로 고정하였고, 산소는 0~3.5[sccm], 메탄은 0~4[sccm]까지 조절하면서 분광분석을 실시하였다. 석영관 내의 압력은 Pirani-gauge를 사용하여 측정하였으며, 온도는 광고온계를 이용하였으며, 박막의 물성을 분석하기 위하여 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy, CX-100SM)으로 입자들의 표면형상을 관찰하였다.



(a) RF 플라즈마 장치 구성도



(b) 부하 코일 확대 사진(측정 위치)

그림 1. RF 플라즈마 프로세스 장치도 및 분광 측정 위치
Fig. 1. Schematics of RF plasma process and the position of the optical measurement

그림 1 (b) 분광 측정위치를 나타낸 것으로서, 위치 B는 위쪽 코일에서 상부측으로 20[mm] 떨어진 지점이며, 위치 C는 최상부 코일과 그 다음 코일 사이의 위치, 위치 D~J까지는 코일과 코일 사이의 위치를 순서적으로 나타낸 것이며, 위치 K는 마지막 아래 코일에서 5[mm] 떨어진 지점, 위치 L은 마지막 코일에서 아래측으로 40[mm] 떨어진 지점을 의미한다.

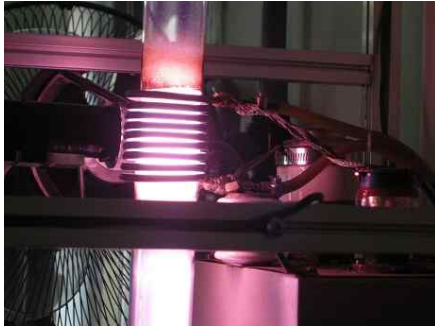
3. 이론적 고찰

사진 1은 입력전력 1[kw], 수소 유량 60[sccm]으로 고정하고, 반응기 내부의 가스조성이 수소만으로 형성되어 있는 경우에 메탄 또는 산소가스를 첨가 시 발생된 플라즈마를 일반 카메라로 촬영한 사진이다. 사진 1 (a) 및 (b)는 큰 차이를 느낄 수 없지만, 분광분석 결과로부터 수소 원자에 의한 발광이 메탄을 추가함에 의하여 상당히 감소되는 특징을 보였다. 그리고 사진 1 (c)는 산소가 첨가된 경우로서, 수소만으로 조성된 경우에 비하여 다소 붉은 색으로 변화됨을 알 수 있다. 이것은 산소와 메탄으로부터 생성된 C_nH_m 화합종과 산소와의 결합에 기인되는 것으로 판단된다. 각 조건에 대한 분광분석 결과를 4절에서 논하였다.

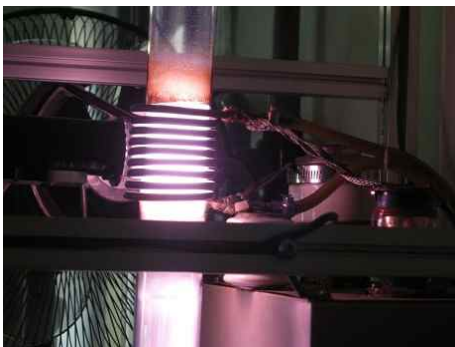
3.1 RF 플라즈마 발생 이론

그림 1 (a)의 전원회로는 부하 코일(L)과 진공 콘덴서(C_1)가 직렬로 연결되어 있으며, 진공 콘덴서(C_2)는 $L-C_1$ 직렬회로에 병렬로 연결되어 있다. 공진주파수는 직렬회로의 공진주파수(ω_1)과 회로전체의 병렬 공진주파수(ω_2)로서 2개가 존재한다. 전원 주파수 13.56[MHz]를 회로 자체의 고유주파수(ω_2)와 일치시키면, 회로전체는 병렬 공진상태가 되면서 전원으로부터 공급되는 전압과 전류는 동상이 되고, C_2 양단과 $L-C_1$ 직렬회로 양단에 전압과 동일한 크기의 전압이 걸리게 된다. 또한 ω_2 에서의 회로전체 병렬공진 임피던스의 크기를 동축케이블 50[Ω]과 일치시킴에 의하여 전원으로부터 병렬회로로 최대전력이 전달되면서 발전하게 된다. 이때 석영관 내부의 가스조성 및 압력에 따라서 코일 자체의 L값이 변화되므로, 이에 대하여 진공콘덴서 C_1 및 C_2 를 서보 모터인 M_1 과 M_2 를 동작시켜 50[Ω]을 자동으로 맞추도록 구성하였다. 실제로는 코일 및 권선 자체의 저항, 코일의 표피 효과에 의한 저항성분(R)이 $L-C_1$ 직렬회로에 존재하게 된다.

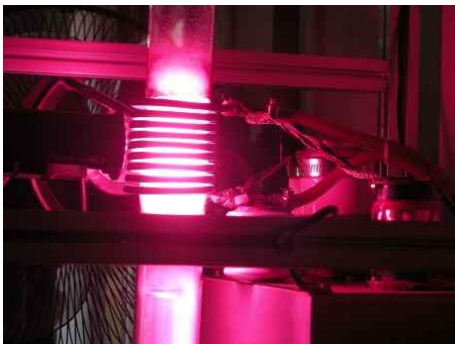
직렬회로만을 고려하면, 직렬 공진주파수 $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1C_1}$ 에서 코일(L) 양단의 전압은 입력전압



(a) $H_2 : CH_4 : O_2 = 60 : 0 : 0 [sccm]$



(b) $H_2 : CH_4 : O_2 = 60 : 4 : 0 [sccm]$



(c) $H_2 : CH_4 : O_2 = 60 : 0 : 3.5 [sccm]$

사진 1. 주요 조건별 실험 사진

Pic. 1. Experimental pictures on some experimental conditions

의 Q배로 되며, 위상은 입력전압보다 90° 앞서게 되고, C_1 양단의 전압도 입력전압의 Q배로 되지만 위상은 90° 느리게 되어 L과 C_1 양단 전압의 벡터합은 0이 된다. 여기서 Q는 직렬회로의 선택도로서 $Q = j\omega L/R = 1/j\omega C_1 R$ 에 해당된다.

직렬회로의 공진주파수, 회로전체의 공진주파수, 병렬공진주파수(ω_2)에서 임피던스는 아래의 식 (1)~(3)과 같다.

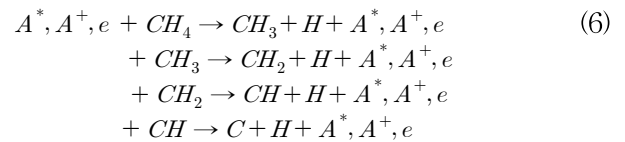
$$\omega_1 = 1/\sqrt{LC_1} \quad (1)$$

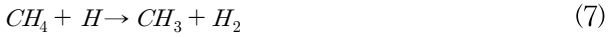
$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{C_1 L} + \frac{1}{C_2 L}} \quad (2)$$

$$\dot{Z}_{\max} = \frac{\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C_1}}{\omega_2 C_2 R} = \frac{L}{C_2 R} - \frac{1}{\omega_2^2 C_1 C_2 R} \quad (3)$$

3.2 RF 주요한 화학반응

본 연구에서와 같이 플라즈마 내부의 가스 조성이 메탄과 수소로 이루어진 경우에는 메탄 분자 및 수소 분자가 전자와의 충돌에 의하여 반응식 (4), (5)와 같이 수소원자 및 메틸 라디칼이 생성되고, 반응식 (6)에서와 같이 전자, 이온 또는 여기화학종과의 연쇄적인 충돌에 의하여 CH_3 , CH_2 , CH , C 화학종이 생성될 수 있다. 또한 충돌하는 전자에너지가 높은 경우에는 공간내의 여러 화학종들을 이온화시킬 수 있다. 플라즈마 중의 이온으로서는 CH_4^+ , CH_3^+ , CH_2^+ , CH^+ , C^+ , H_2^+ , H^+ 등이 고려되며, 라디칼은 CH_3 , CH_2 , CH , C , H 가 존재할 것으로 판단된다[12]. 또한 반응식 (9)에서 전자의 스핀이 반평형인 경우에는 메탄 분자로 전환되며, 스핀이 평형인 경우에는 CH_3 와 H 가 생성될 수 있다. 그리고 반응식 (10)에서와 같이 화학종들 사이에 서로 반응하여 새로운 화합물인 C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 등의 안정된 분자가 생성될 수 있다.





(n, m =1, 2, 3,..., x, y = 2, 3, 4, ...)

플라즈마 공간 내부에 존재하는 다양한 화학종 중에서 수소원자는 전자와의 충돌에 의하여 전자 여기되었다가 Balmer 계열의 H_α , H_β , H_γ , H_δ 의 빛들이 방출되며, 주로 H_α , H_β 의 발광이 강하게 나타나며, $C_n H_m$ 화학종에 있어서도 CH 발광이 주로 나타난다.

3.3 전자온도 측정 이론

수소와 산소는 2.2절에서 논한 바와 같이 탄소계 박막을 제작함에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 또한 공정조건의 변화에 따라서 플라즈마 내부의 발광화학종의 분포 및 전자온도 등도 매우 중요한 파라메타이다. 따라서 플라즈마 프로세스에 있어서 매우 중요한 파라메타인 입력전력, RF 유도코일의 위치, 메탄 및 산소 유량을 변화시키기에 따른 수소 원자로부터의 H_α (656.4[nm]), H_β (486.3[nm]) 및 CH(B-X, 388.9[nm]) 발광을 중점적으로 비교·분석하였다.

플라즈마 내부의 전자온도는 H_α 와 H_β 의 상대적인 발광 강도비를 아래의 식 (11)을 이용하여 산출하였다.

$$T_e [K] = \frac{hc}{k} \times (E_\alpha - E_\beta) \times \left[\ln \left(\frac{I_\beta}{I_\alpha} \times \frac{\nu_\alpha \times A_\alpha \times g_\alpha}{\nu_\beta \times A_\beta \times g_\beta} \right) \right]^{-1} \quad (11)$$

여기서 α, β 는 H_α, H_β 를 의미하는 아래첨자이며, 그 외의 상수는 다음과 같다.

h= 플랑크 상수 (4.135×10¹⁵[eV.s])

c= 광속 (3×10¹⁰[cm/s])

k= 볼츠만 상수 (8.617×10⁻⁵[eV/K])

I= 발광강도[Arbitrary units]

A= 천이확률, E = 여기준위의 수소원자 에너지 [cm⁻¹]

ν = 천이 주파수[cm⁻¹]

g= 여기준위의 주양자수(J)에 의존하는 중합도 (g=2J+1)

표 1. 전자온도 계산을 위한 상수값

Table 1. Constant for calculating the electron temperature

| | λ [nm] | ν [cm ⁻¹] | E [cm ⁻¹] | g | $A(\times 10^7)$ [1/s] |
|------------|----------------|---------------------------|-------------------------|---|------------------------|
| H_α | 656.285 | 15237.3 | 97492.36 | 6 | 6.465 |
| H_β | 486.136 | 20570.4 | 102823.89 | 6 | 2.062 |

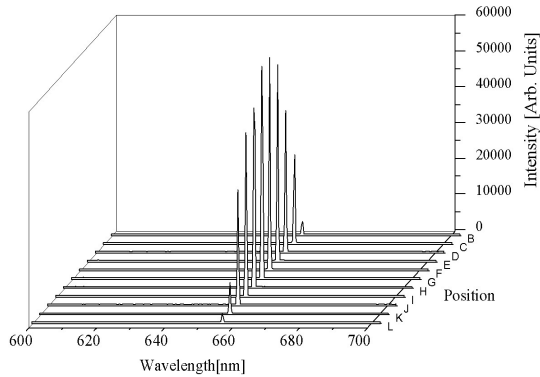
4. 실험결과 및 고찰

4.1 부하 코일 위치에 따른 특징

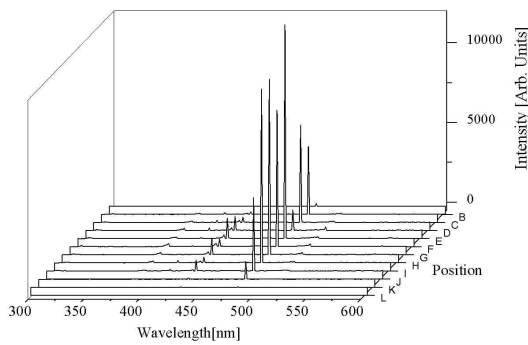
그림 2는 인가전력 1[kw], 가스 조성 H₂:CH₄:O₂ = 60:4:3.5[sccm], 압력 4×10⁻¹[torr]인 상태에서 측정 위치를 변경시키기에 따른 분광분석 결과를 보인 것이다. 측정 위치는 높이를 미세 조정시킴에 따라서 H_α 의 발광강도가 가장 강한 지점을 파악하여 측정하였다.

각 위치별 3회 측정된 결과들을 이용하여 각 화학종의 발광강도 및 전자온도 변화를 조사하였다. 세로축에 해당되는 알파벳은 그림 1 (b)에 표기된 바와 같이 측정위치를 의미한다.

그림 2 (a)는 측정위치에 따른 656.2[nm]의 H_α 피크 변화를 보인 것으로서, 발광 강도는 위쪽 4번째 코일과 5번째 코일 사이의 공간인 위치 F에서 가장 강하며, 그 아래쪽 위치부터는 서서히 감소되고 있음을 알 수 있다. 그림 2 (b)에서는 H_β , H_γ , CH 영역의 피크 변화를 보인 것으로서, H_β 는 H_α 와 비슷한 경향을 보이지만 3번째 코일과 4번째 코일 사이의 강도가 약함을 알 수 있다. 이것은 플라즈마 상태가 글로우로서 안정되어 있음에도 내부공간의 화학종들은 측정 시간에 따라서 발광강도가 다소 차이가 발생할 수 있음을 의미한다. 또한 H_γ 피크는 매우 약하며, CH 피크도 위치에 따라 강도에 있어서 차이가 있음을 알 수 있다.



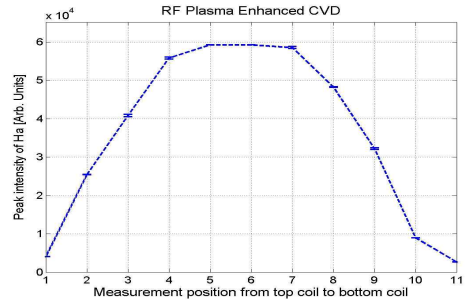
(a) 측정위치에 따른 600~700(nm) 영역의 발광



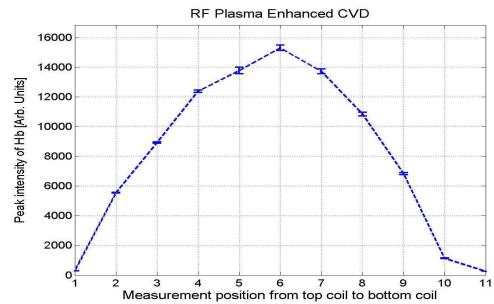
(b) 측정위치에 따른 300~600(nm) 영역의 발광

그림 2. 측정위치에 따른 각 영역별 발광피크의 변화
Fig. 2. The change of optical emission peaks according to the measurement position

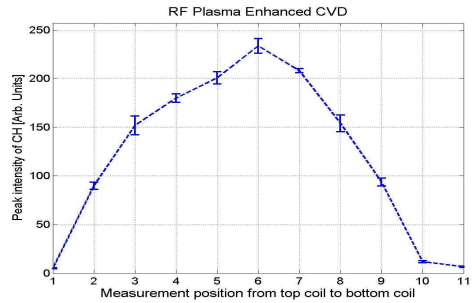
그림 3 (a)~(c)에서와 같이 H_{α} , H_{β} , CH 피크 모두가 코일의 중간부에서 가장 강하고, 상측 및 하측으로 이동함에 따라 감소됨을 알 수 있다. 하지만 각 피크 별 크기는 H_{α} 가 매우 강하고, CH 피크는 강도가 매우 낮음을 알 수 있다. 그림 3 (d)는 위치별 전자온도의 변화를 보인 것으로서, 코일 중간부에서 약 0.9[eV]이며, 상측 및 하측으로 이동함에 따라 대칭적으로 감소되는 특징을 보이며, 코일이 존재하는 공간에서는 최소 0.65[eV]이며 코일 이외의 위치에는 0.3[eV]로서 최고치의 약 1/3로 감소됨을 알 수 있다. 전자온도가 높다는 것은 플라즈마 내에서 가속되는 전자의 운동 에너지가 높은 것으로서 공간 내부의 여러 화학종들을 여기 및 전리작용이 활발해짐을 의미한다. 이처럼 분해된 화학종들이 플라즈마 공간내에서 박막을 형성시키게 된다.



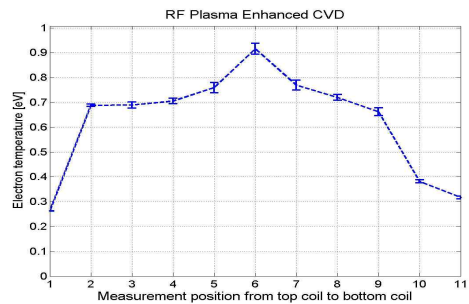
(a) H_{α} 피크



(b) H_{β} 피크



(c) CH 피크



(d) 전자온도

그림 3. 위치에 따른 화학종들의 피크 및 전자온도의 변화
Fig. 3. The change of several chemical species and electron temperature peaks according to the measurement position

4.2 입력 전력의 영향

그림 4는 코일 위쪽에서 4번째와 5번째 코일 사이에 측정 위치를 고정하고, 가스 유량을 $H_2 : CH_4 : O_2 = 60 : 4 : 3.5[sccm]$ 으로 일정하게 하여 입력전력을 변화시키기에 따른 여러 화학종의 피크 및 전자온도 변화를 보인 것이다. 입력 전력이 상승할수록 플라즈마 내부의 전하 밀도가 증가될 것이며, 여기분자의 밀도 및 전자와 분자 사이의 충돌도 증가될 것으로 판단된다.

그림 4 (a)~(c)에서와 같이 H_α , H_β , CH 의 발광피크가 입력전력에 대하여 선형적으로 증가되는 경향을 보였다. 이것은 입력 전력을 증가시키기에 따라 플라즈마 공간 내부의 전자밀도가 증가되어 수소 분자, 메탄, 메탄 분해에 따른 중간 화학종들과의 충돌확률이 증가되기 때문으로 판단된다. 또한 입력 전력의 변화에 대하여 각 피크 증가량(ΔI)의 차이가 발생됨에 의하여 전자온도에 있어서 다소 차이가 있음을 식(1)로부터 예측할 수 있다.

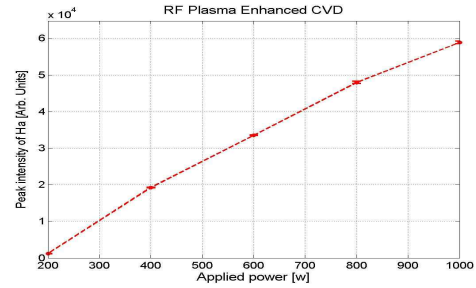
입력 전력이 증가됨에 따라서 각 피크는 증가됨에도 불구하고 그림 4 (d)에서와 같이 전자온도가 약 0.9[eV]에서 0.7[eV]로 감소되는 경향을 보였다. 이것은 분해된 수소원자들이 전자충돌에 의하여 여기되어 원래의 준위로 복귀함에 따라서 방출되는 H_α 및 H_β 에 대하여 각 발광피크의 여기준위로의 천이확률 차이가 존재하기 때문에 감소되는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

아울러, 그림 3과 비교하여 1000[w]에서 각 피크의 크기 차이가 발생하는 것은 반복측정에 따른 측정위치가 정확히 일치되지 않기 때문이다.

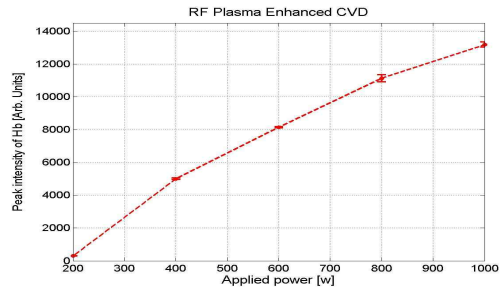
4.3 메탄 유량의 영향

그림 5는 그림 4와 동일한 조건하에서 산소를 공급하지 않고 메탄 유량을 0에서 4[sccm]까지 증가시키기에 따른 변화를 보인 것이다.

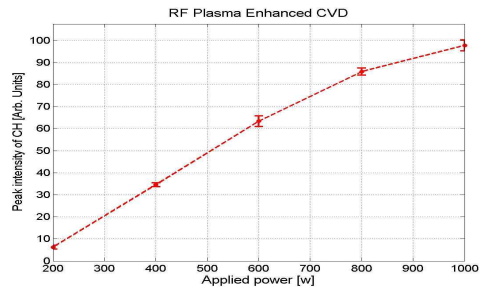
그림 5 (a), (b)에서 메탄이 공급되지 않는 경우에는 H_α 와 H_β 의 발광강도가 강하지만, 메탄이 조금만 공급되어도 피크가 매우 감소되고, 메탄 유량을 증가시켜



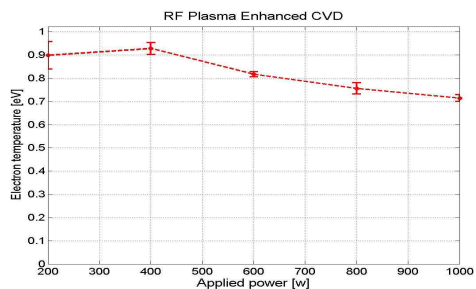
(a) H_α 피크



(b) H_β 피크



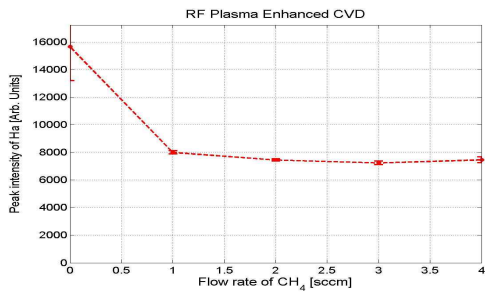
(c) CH 피크



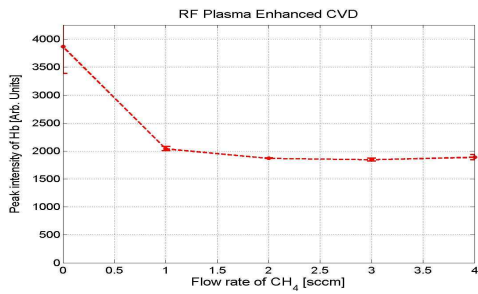
(d) 전자온도

그림 4. 인가전력에 따른 화학종들의 피크 및 전자온도의 변화

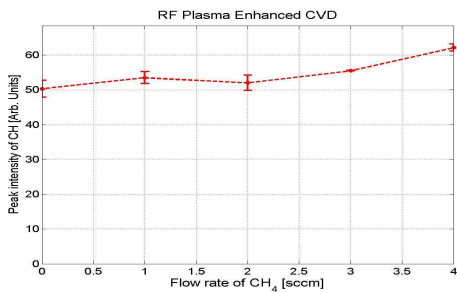
Fig. 4. The change of emission peaks on chemical species and the electron temperature according to the measurement position



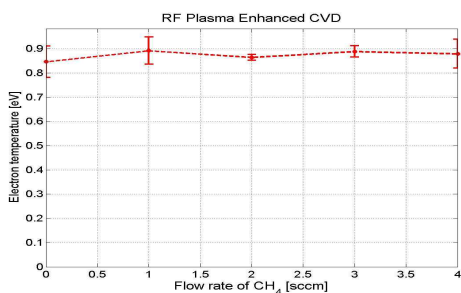
(a) H_α 피크



(b) H_β 피크



(c) CH 피크



(d) 전자온도

그림 5. 메탄 유량에 따른 화학종들의 피크 및 전자온도의 변화

Fig. 5. The change of emission peaks on chemical species and the electron temperature according to the flow rate of methane

도 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 일정한 전자 밀도로 유지되고 있는 안정된 글로우 상태의 플라즈마 공간에 메탄을 공급함에 의하여 전자와 메탄과의 충돌확률이 증가됨에 의하여 수소 분자와의 전자충돌 확률이 감소되고, 수소원자들이 메탄으로부터 생성된 C_nH_m 화학종과의 재결합에 의한 것으로 판단된다.

아울러, 그림 5 (c)에서와 같이 CH 화학종의 발광강도가 메탄 유량을 증가시키에 따라 증가되는 것은 전자와 메탄과의 충돌이 증가되어 CH 화학종 생성이 활발히 이루어지고 있음을 의미한다.

따라서 메탄 유량이 1[sccm] 이상으로 증가됨에 따라 H_α와 H_β의 발광강도는 일정하지만, CH 화학종의 발광강도가 약간 증가되는 것은 전자와 메탄과의 충돌확률은 유량이 증가됨에 따라서 CH 화학종 및 수소원자가 증가되지만, 발생된 수소원자들이 다른 화학종과 재결합됨에 의하여 H_α와 H_β의 발광강도가 포화되는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그림 5 (d)의 전자온도는 약 0.9[eV]로서 메탄 유량 변화에 따라서 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

4.4 산소 유량의 영향

그림 6은 그림 4 및 그림 5와 동일한 조건하에서 메탄 유량을 4[sccm]으로 고정하고 산소 유량을 0[sccm]에서 3.5[sccm]까지 증가시키에 따른 여러 화학종의 피크 및 전자온도 변화를 보인 것이다.

그림 6 (a), (b)는 H_α, H_β 발광피크의 변화를 보인 것으로서 산소가 공급되지 않은 경우에는 발광강도가 낮고, 산소 유량을 증가시키에 따라서 서서히 증가되는 경향을 보이고 있다. 산소가 공급되지 않는 경우에는 수소와 메탄만으로 구성되어 있으므로 수소 분자 및 메탄의 분해로부터 생성된 수소 원자의 발광을 의미한다. 이처럼 수소 원자의 발광강도가 산소 유량을 증가시키에 따라 증가되는 것은 산소 분자가 전자 부착에 의하여 부이온으로 되기보다는 전자충돌에 의하여 여기 또는 해리되어 메탄으로부터 생성된 C_nH_m 화학종과 결합됨으로서 수소원자와의 결합을 억제함으로써 공간상 수소원자의 비율을 증가시키기 때문으로

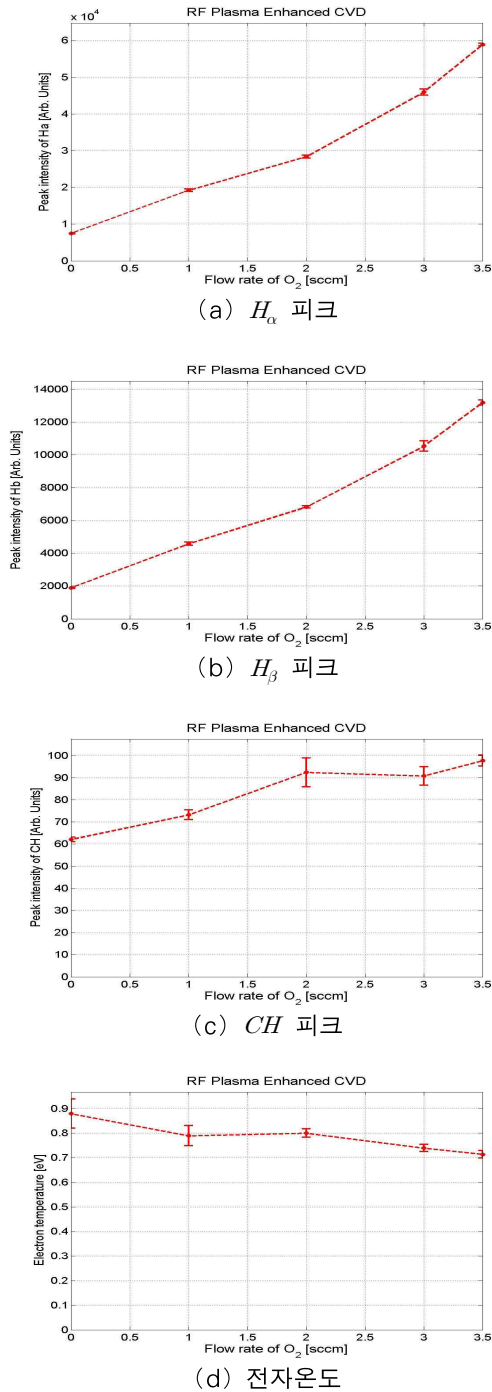


그림 6. 산소유량에 따른 화학종들의 피크 및 전자온도의 변화
 Fig. 6. The change of emission peaks on chemical species and the electron temperature according to the flow rate of oxygen

사료된다.

또한 그림 6 (c)에서와 같이 CH 피크는 2[sccm]까지 증가되다가 포화되는 경향을 보였다. CH 피크가 증가되는 것은 산소 여기분자 또는 산소원자들이 공간상의 C_nH_m 화학종과 결합되면서 CH 화학종을 생성시키는 것으로 판단되며, C_nH_m 과의 충돌확률이 포화됨에 의하여 일정 유량 이상에서 큰 변화가 없는 것으로 판단된다. 그림 6 (d)로부터 산소 유량이 증가됨에 따라 전자온도가 0.7[eV]까지 감소됨을 알 수 있다. 이것은 H_α와 H_β의 발광강도 변화에 있어서 H_β의 변화량이 H_α의 변화량에 비해서 작기 때문에 기인되는 것으로서, 산소공급 유무가 수소 원자의 각 전자준위로의 여기확률에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 RF 플라즈마 프로세스에 있어서 부하 코일의 위치, 입력 전력, 메탄 및 산소유량 변화에 따른 분광분석을 실시하였으며, 주요한 결과는 다음과 같다.

부하코일의 위치에 따라서 H_α, H_β, CH 피크 모두가 코일의 중간부에서 가장 강하고, 상측 및 하측으로 이동함에 따라 감소되었으며, 코일 중간부에서의 전자온도는 약 0.9[eV]임을 보였다.

입력전력이 증가됨에 따라서 H_α, H_β, CH의 발광피크가 선형적으로 증가되는 경향을 보였다. 하지만 각 피크가 증가됨에도 불구하고 전자온도가 약 0.9[eV]에서 0.7[eV]로 감소되는 경향을 보였다.

메탄을 공급하지 않은 경우에는 H_α와 H_β의 발광강도가 강하지만, 메탄이 조금만 공급되어도 피크가 매우 감소되고, 유량을 증가시켜도 큰 변화가 보이지 않으며, CH 화학종인 경우는 유량 증가에 따라서 증가됨을 보였다. 이것은 전자와 메탄과의 충돌확률이 증가됨에 의하여 수소 분자의 전자충돌 확률이 감소되고, 생성된 수소원자들이 메탄으로부터 생성된 C_nH_m 화학종과의 재결합에 기인된 것으로 판단된다.

산소 유량을 증가시키기에 따라서 H_α, H_β 피크가 서서히 증가되는 것은 산소 분자가 전자충돌에 의하여

여기 또는 해리되어 메탄으로부터 생성된 C_nH_m 화학종과 결합됨으로서 수소원자와의 결합을 억제시킴으로서 공간상 수소원자의 비율이 증가되기 때문으로 판단된다. 따라서 RF 유도형 플라즈마 장비에 있어서 박막 성장을 위한 최적의 위치로는 코일 위쪽에서 4번째와 5번째 코일 사이로 판단된다.

향후에는 본 연구결과를 중심으로 성장된 박막과의 상관관계를 정립하여, 효율적인 프로세스를 위한 최적 조건을 확립할 계획이며, 메탄 및 산소 유량을 적절히 제어함으로써 다이아몬드 및 그래핀과 같은 탄소계 박막을 효율적으로 합성하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2011-0005750)

References

- [1] 일본 학술진흥회 플라즈마 재료과학 제153위원회 편, "플라즈마 재료과학 핸드북", 오음사, 1992.
- [2] Francis F. Chen, Jane P. Chang, "Principles of Plasma Processing", Univ. of California, book.
- [3] I Gallimberti, J K Hepworth and R C Klewe, "Spectroscopic investigation of impulse corona discharges", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 7, pp. 880-889, 1974.
- [4] N K Bibinov, A A Fateev and K Wiesemann, "On the influence of metastable reactions on rotational temperatures in dielectric barrier discharges in He-N₂ mixtures", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 34, pp. 1819-1826, 2001.
- [5] Jialiang Zhang, Liying Liu, Tengcai Ma, Xinlu Deng, "Rotational temperature of nitrogen glow discharge obtained by optical emission spectroscopy", Spectrochimica Acta part A, Vol. 58, pp. 1915-1922, 2002.
- [6] F Bourg, S Pellerin, D Morvan, J Amouroux and J Chapelle. "Spectroscopic diagnostic of an argon-hydrogen RF inductive thermal plasma torch at atmospheric pressure used for silicon hydrogenation", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol. 35, pp. 2281-2290, 2002.
- [7] E. Tatarova, F.M Dias, H. van Kuijk, C.M Ferreira. "Emission spectroscopy of a surface wave sustained N₂ +H₂ discharge", Vaccum, Vol. 69, pp. 189-193, 2003.
- [8] H Nassar, S Pellerin, K Musiol, O Martinie, N Pellerin, and J-M Cormier, "N₂⁺/N₂ ratio and temperature measurements based on the first negative N₂⁺ and second positive N₂ overlapped molecular emission

spectra", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 37, pp. 1904-1916, 2004.

- [9] J.L. Qi, W.T. Zheng, X.H. Zheng, X. Wang, H.W. Tian, "Relatively low temperature synthesis of graphene by radio frequency plasma enhanced chemical vapor deposition", App. Surf. Sci., Vol. 257, No. 15, pp. 6531-6534, 2011.
- [10] Lei Liao, Xiangfeng Duan, "Graphene - dielectric integration for graphene transistors", Materials Sci. and Eng., R: Reports, Vol. 70, No. 3-6, pp. 354-370, 2010.
- [11] Noriaki Ikenaga, Kaoru Awazu, Noriyuki Sakudo, Haruyuki Yasui, Takeshi Kawabata, "Effect of electron temperature on the DLC film properties", Surface and Coatings Tech., No. 196, No. 1-3, pp. 226-230, 2005.
- [12] Qingwen Li, Hao Yan, Jin Zhang, Zhongfan Liu, "Effect of hydrocarbons precursors on the formation of carbon nanotubes in chemical vapor deposition", Carbon, Vol. 42, pp. 829-835, 2004.

◆ 저자소개 ◆



장문국 (張文國)

1959년 10월 1일생. 1997년 진주산업대학교 기계공학 졸업. 1999년 동의대학교 전기전자공학 졸업(석사). 현재 경남대학교 대학원 첨단공학과 박사과정.

E-mail : mungug@hanmail.net



한상보 (韓尙甫)

1972년 9월 22일생. 1998년 경남대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동경대학교 전자공학과 졸업(박사). 2005~2008년 한국전기연구원 선임연구원. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.



박상현 (朴相鉉)

1950년 1월 27일생. 1973년 경북대 물리학과 졸업. 1984년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2004년 미국 휴스틴 대학 방문교수. 현재 경남대학교 전기공학과 교수.