

무수은 무전극 유도-용량형 직관형 램프 방전에 관한 연구

(Investigation of Hg free Electrodeless inductively capacitive tubular discharge)

이태일* · 박해일 · 백홍구
(Tae Il Lee* · Hae Il Park · Hong Koo Baik)
연세대학교 금속 시스템공학과

Abstract

In this paper we introduce novel electrode structure for high efficiency discharge. We operate discharge tube under the 0.16 torr pure Xe and apply the sinusoidal wave power to the lamp with 60kHz. We measure the electric power dissipation, plasma parameters, and 828 nm IR intensity. From these data we determine the discharge efficiency, IR intensity/watt, EEDF(Electron energy distribution function). As a result we obtain that the novel electrode structure has better performance in efficiency than that of conventional external electrode system. Also we determine the EEDF for each type of electrode structure by Boltzmann slover, EELNDIF code. The result of Boltzmann equation solving show that the noble electrode system has many high energy electrons compared with the conventional system.

1. 서론

최근 LCD 기술 발달로 인하여 LCD에 사용되는 백라이트(Back Light)의 성능 향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초기에 사용했던 백라이트는 CCFL(cold cathode fluorescent lamp)이라 불리는데 이 램프는 세관 내부에 할로우(hollow) 형상이나 플레이트(plate) 형상의 전이 금속 전극을 설치하고 미량의 수은 과 5~10 torr의 아르곤 또는 네온을 넣은 후에 수십 KHZ 고압 전원으로 구동된다. 그러나 램프의 전극이 플라즈마에 노출되어 있어 전극 스퍼터(sputter)로 인한 램프의 수명 감소 문제를 가지고 있다. 또한 고휘도의 백라이트를 위해서 다수의 램프를 사용하려 할 경우 CCFL은 부저항의 특성을 가지고 있어 사용하려는 램프의 수만큼 인버터의 수가 요구되는 단점을 가지고 있다. 이러한 CCFL의 문제를 해결하기 위하여 EEFL(External electrode fluorescent lamp)라 불리는 외부 전극 구조가 제안되었다. 외부 전극 구조 램프는 세관 밖에 금속 포일(foil)을 밀착시켜 관벽을 캐패시터로 하여 가스에 에너지를 전달하는 용량형 방전이다. 이 방전은 전극이 플라즈마와 격리되어 있어 전극의 소모가 없기 때문에 전극 소모로 인한 수명의 감소 문제가 없다. 또한 유리관 자체가 램프 전체의 임피던스(Impedance)를 양의 값이 되게하여 하나의 인버터로도 다수의 램프를 병렬 구동할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 EEFL이 용량형 방전이기 때문에 가지고 있

는 단점이 있다. 용량형 방전에서는 Sheath라고 하는 부분에서 유리관벽의 영향으로 큰 전위값을 가지게 되어 상당량의 전력을 소모한다. 용량형 방전에서 Sheath는 플라즈마를 유지하기 위하여 필연적으로 형성되는 부분이다. 이 부분에서는 주로 이온의 가속이 이루어지는데 플라즈마를 유지하기 위한 이온의 흐름을 만들어 주는 전위가 요구된다. 그러나 Sheath에서의 이온가속은 가스를 여기시키는데 에너지가 소모되는 것이 아니라 단순히 시스템의 전류 연속성을 위하여 이온을 가속시키는데 소모된다. 그러므로 램프 전체의 효율면에서 볼 때 Sheath의 전력 소모는 최소화하는 것이 바람직하다.[1]

본 논문에서는 EEFL에서 Sheath에서의 전력 소모를 최소화 하기 위한 방법으로 유도 코일을 외부 전극 선단에 장착하는 전극 구조를 제안한다.

또한 본 논문에서는 앞으로 환경 규제 강화에 대비하여 환경 친화적 기술로 수은을 사용하지 않고 Xe을 사용한 방전에 관하여 실험을 하였다.

2. 본론

2.1. 실험 구성 및 측정 방법

방전관은 지름이 10 mm이고 길이가 34 cm인 석영관을 사용하였다. 발광 부분을 30 cm로 설정하고 나머지 부분은 외부 전극을 설치하였다. 기존의 전극 구조를 CCP(capacitively coupled plasma)라하고 새로 제안

하는 전극 구조를 ICCP(inductively and capacitively coupled plasma)라 명명하기로 한다. 위의 세관 램프를 각각 전극 구조에 따라 제작했다. 각각의 전극 구조는 그림 1에 나타났다. ICCP의 전극 구조는 외부 전극의 역할을 하는 금속 포일(foil) 선단에 유도 코일을 설치한 형태이다. 코일의 지름은 0.5 mm이고 코일의 감은 길이는 1.5 cm이다. 외부 전극으로는 구리 포일을 사용했으며 그 폭은 50 mm인 것을 사용했다. ICCP 구조에서 코일과 세관 사이에 아세탈로 된 스페이서를 설치했는데 이는 방전 전에 코일에 모인 전자로 인해 발생되는 전기장을 차단 하기위해 유전률이 작은 공기의 간격을 두었다.

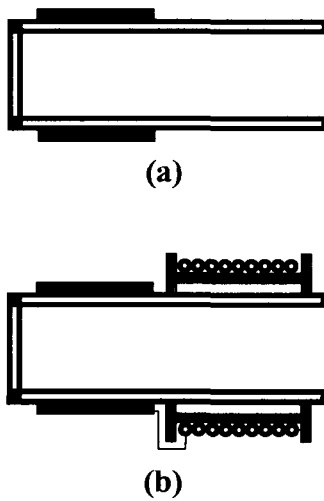


그림1. (a) CCP의 전극 구조 (b)ICCP의 전극 구조
Fig. 1 (a) CCP electrode structure
(b) ICCP electrode structure

램프 방전을 위하여 초기 진공을 10^{-3} mtorr 까지 하고 순수 Xe 가스를 0.16 torr 채웠다. 전원은 60kHz의 사인 파위를 공급했고 방전의 전기적인 특성을 측정하기 위하여 램프 양단에 전류 프루브와 전압프루브를 설치하였다. 각각의 프루브는 오실로스코프(HP)에 연결하여 값을 표시하였다. 광학적 측면에서 828 nm 전자기파의 강도를 측정하기 위해 ACTON spectra pro. 300i를 사용하였다. 전기적 특성과 광학적 특성을 측정하기 위한 실험 구조도는 그림 2에 나타내었다.

방전 램프 안의 형성된 플라즈마의 진단을 위하여 Double Langmuir probe (DLP2000)를 사용하였다. Langmuir probe를 이용하여 플라즈마 내의 전자 온도와 전자 밀도 그리고 플라즈마의 전위를 측정하였다. Probe의 구조와 세관에 설치 위치를 그림 3에 나타내었다. 탐침(probe)의 총 길이는 5 mm 이고 그 중 2 mm

는 절연 피막을 입혔고 플라즈마와 접촉하는 부분은 3 mm가되게 하였다. 그리고 양 탐침사이의 거리는 4 mm를 유지하였다. 탐침의 지름은 0.25 mm 인 텅스텐을 사용하였다.

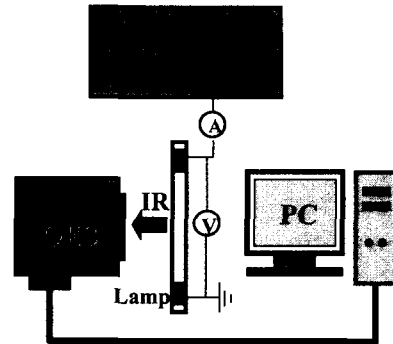


그림 2 . 전기적, 광학적 특성 측정 실험 개략도
Fig. 2 The schematic diagram of experiment for electrical and optical property of lamps

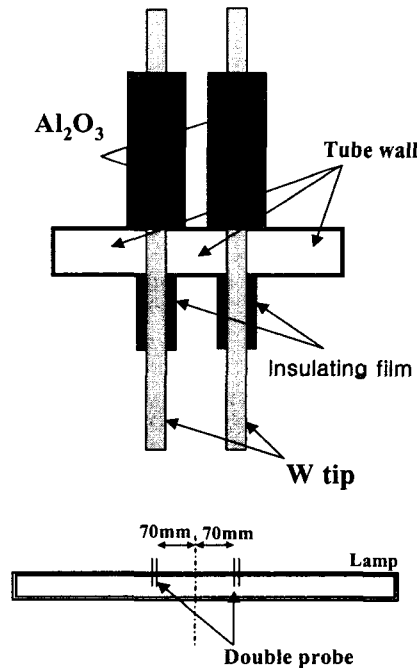


그림 3 . Double probe의 구조와 probe 설치도
Fig. 3 The structure of double probe and setting configuration

2.2. 실험 결과 및 논의

2.2.1 전기적 특성

그림 4는 CCP와 ICCP 각각의 전류와 전압의 상관 관계를 보여 주고 있다. ICCP는 전극 구조상 코일 인덕터의 영향으로 램프 전체의 임피던스는 감소하게 된다.

$$V_s / I_s = |Z| = R + \sqrt{(wL - 1/wC)^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 ICCP의 경우 L성분이 추가 되므로 전체 Z 값이 작아 지게된다. 그러므로 그림 4에서 보는 것처럼 ICCP의 경우 그래프의 기울기가 CCP의 경우보다 작은 것을 알 수 있다.

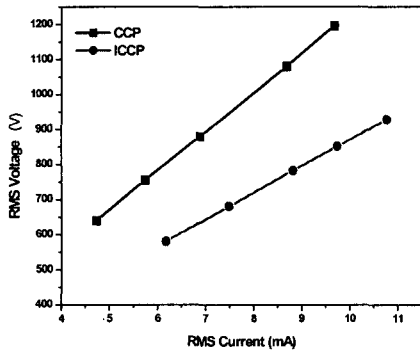


그림 4 . CCP와 ICCP에대한 I-V 곡선
Fig.3 The I-V curves for ICCP and CCP

또한 그림 4에서 알 수 있는 것은 더 큰 전력이 인가 되어도 전체 시스템의 임피던스는 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다.

방전의 효율을 알기 위하여 흐르는 전류에 대한 전력 소모 곡선은 그림 5에 나타내었다.

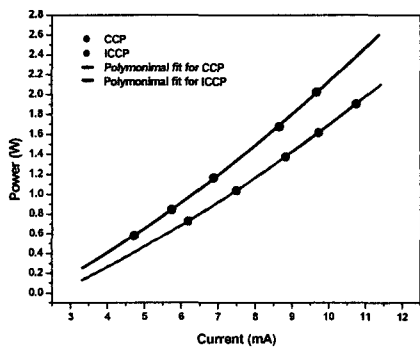


그림 5 . CCP와 ICCP에대한 I-P 곡선
Fig.5 The I-Pcurves for ICCP and CCP

주어진 시스템에서 전력의 소모는 임피던스의 저항 성분에 의해서만 나타나기 때문에 전류와 전력은 다음과 같은 관계를 가진다.

$$P = R I_{rms}^2 \quad (2)$$

그러므로 동일한 전력을 인가하여 높은 전류 값을 얻을 수 있는 ICCP의 경우가 전기적으로 CCP보다 광원으로로서의 전기적 효율이 좋음을 알 수 있다.

2.2.2 광학적 특성

Xe 방전에서 광원으로 사용하는 여기 종은 $[Xe]^3P_1$ 에서 $[Xe]^1S_0$ 로 천이 될 때 나오는 147nm의 진공 자외선이다. 일반적으로 높은 에너지를 가진 전자에 의하여 중성 Xe 가스 분자는 Xe continuum level 까지 높게 여기된 뒤 3P_1 상태로 천이될 때 828nm의 전자기파를 방출한다. 그 후 곧 바로 기저 상태인 1S_0 로 천이 하면서 147nm의 전자기파를 방출한다. 그러므로 828nm의 강도는 147nm의 강도와 비례 관계에 있다.[2] 그림 6은 828nm의 강도와 전력에 대한 그래프를 보여준다. ICCP의 경우 CCP 보다 동일한 전력에 더 큰 IR의 강도를 가짐을 볼 수 있다. 이는 그림 5의 결과와 같은 경향을 나타내는 것이다. 플라즈마의 전류가 클수록 IR의 강도가 크게 나옴을 알 수 있다.

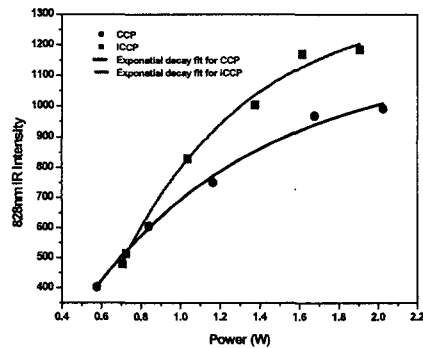


그림 6 . CCP와 ICCP에대한 power에대한 IR 강도
Fig.6 P-IR curves for ICCP and CCP

그림 6에서 전력이 많이 공급되면 될수록 ICCP와 CCP사이의 IR 강도의 차이가 크게 나는 것을 알 수 있는데 이는 전류의 흐름이 클수록 코일의 효과가 크게 나타나기 때문이다. 코일 내부에 형성되는 자기장의 세기는 코일을 통하여 흐르는 전류의 양에 비례하고 형성된 자기장의 세기는 접선 방향의 기전력의 크기에 비례

한다. 그러므로 전류가 많이 흐르게 되면 ICCP의 인덕션 효과가 증가하여 전극 부근에 이온화를 향상시키고 Sheath 전위를 감소시키게 되어 전체적인 전력 분배가 램프의 양광주에 집중되므로 IR의 강도가 크게 되는 것이다.

그림 7은 전력 증가에 대한 IR의 강도 변화를 나타낸다. 일반적인 경우와 같이 전력이 증가할수록 IR의 강도는 포화되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 인가해 준 전력에 대해 발생하는 IR의 비율과 전력과의 관계를 보여준다. 각각의 경우 방전 효율이 극대가 되는 전력 지점이 존재함을 알 수 있다. ICCP의 경우 1.037 W, CCP는 0.85W를 인가한 경우가 효율의 극대점이 된다.

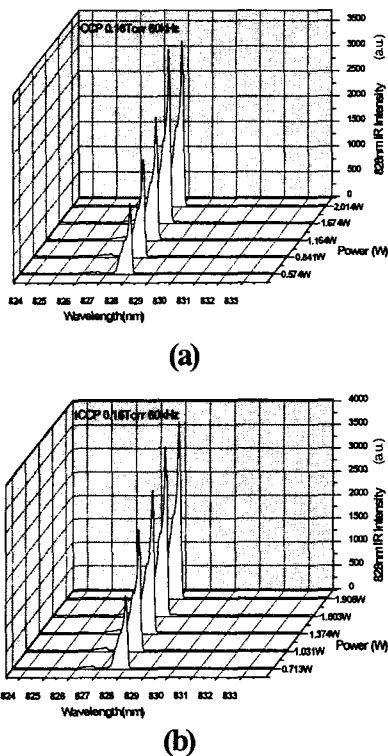


그림 7. (a) CCP의 전력에 대한 IR 강도 변화
(b) ICCP의 전력에 대한 IR 강도 변화
Fig. 7 (a) The change of IR intensity as power increase for CCP
(b) The change of IR intensity as power increase for ICCP

2.2.3 플라즈마 진단

전력을 증가하면서 각각의 구조에 대한 플라즈마의 전자 온도, 전자밀도, 플라즈마 전위의 변화를 측정하였

다. 그림 9는 전형적인 I-V 곡선을 나타낸다.

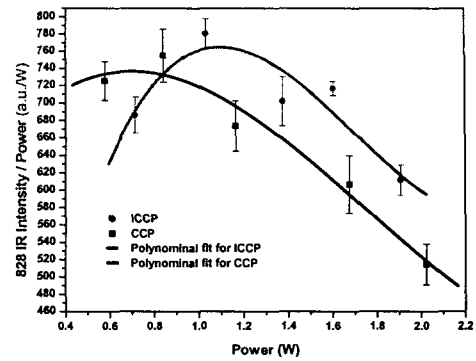


그림 8. ICCP 와 CCP에 대한 전력에 따른 광학적 효율
Fig.8 The optical efficiency of ICCP and CCP as power increase

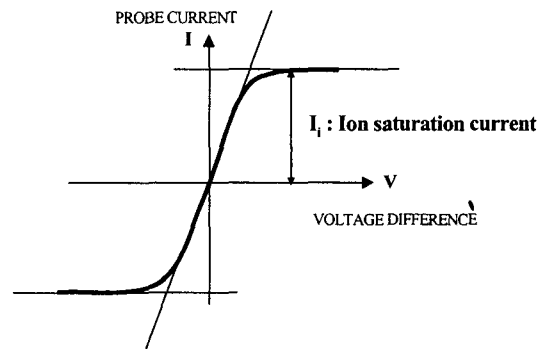


그림 9. Double probe 에서의 일반적인 I-V 곡선
Fig.9 The typical I-V curve in double probe method

$$T_e = \frac{I_i}{(-\frac{dI}{dV})(V=0)} \quad (3)$$

플라즈마의 전자 온도는 식 (3)에 의하여 그림 9의 그래프의 원점에서의 기울기와 이온 포화 전류로부터 얻어진다.[3] 또한 일반적으로 전자의 온도는 플라즈마 전위와 floating 전위와 함수 관계에 있는 것으로 알려져 있다. [4]

그림 10은 CCP 와 ICCP의 전자 온도와 플라즈마 전위를 음극 부근에서의 전력에 대한 변화를 보여주고 있다. 전자 온도와 플라즈마 전위는 비례하는 것을 알 수 있고 ICCP의 경우 플라즈마 전위가 CCP 보다 작은 것으로 나타나는 것은 음극의 Sheath 전위가 낮음을 의미한다. 그리고 ICCP의 경우 플라즈마 전위가 거의 변화하

지 않는 것은 코일의 효과가 전력에 비례하여 증가하기 때문에 플라즈마 밀도의 증가에도 불구하고 전자의 온도가 감소하지 않고 자기장에 의한 전자기적 유도 기전력의 추가적인 가속을 받기 때문이다.

시킴으로 Sheath에서의 전위를 감소시키고 양극주에서의 전위를 증가시킨다. 이러한 점은 ICCP가 방전 효율과 발광 효율이 CCP 보다 우수함을 시사해 준다.

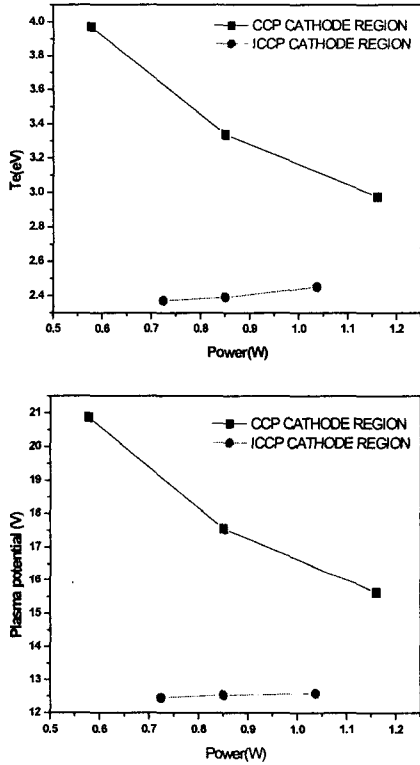


그림 10. 음극 부근에서 CCP와 ICCP의 전력에 대한 전자 온도와 플라즈마 전위 변화

Fig.10 The changes of Te and Vp of CCP and ICCP as power increase in the cathode region

그림 11은 CCP 와 ICCP의 전자 온도와 플라즈마 전위의 양극 부근에서 전력 대 한 변화를 보여주고 있다. 음극에서와 마찬가지로 전자 온도와 플라즈마 전위는 비례하는 것을 알 수 있고 ICCP의 경우 플라즈마 전위가 CCP 보다 높은 것으로 나타나는 것은 양극의 Sheath 전위가 낮음을 의미한다.

그림 12 과 13은 전력에 대하여 각각의 구조에서의 전자 밀도의 변화를 나타내고 있다. 전자 밀도는 ICCP가 CCP보다 전반적으로 큰 것을 알 수 있다. 이러한 양상은 그림 6의 양상과 일치한다. 플라즈마의 밀도도 또한 전력이 증가할수록 포화되는 것을 알 수가 있다.

앞에서 언급한 것처럼 ICCP의 코일에 의한 효과는 음극에서의 전위를 감소시키고 양극에서의 전위를 증가

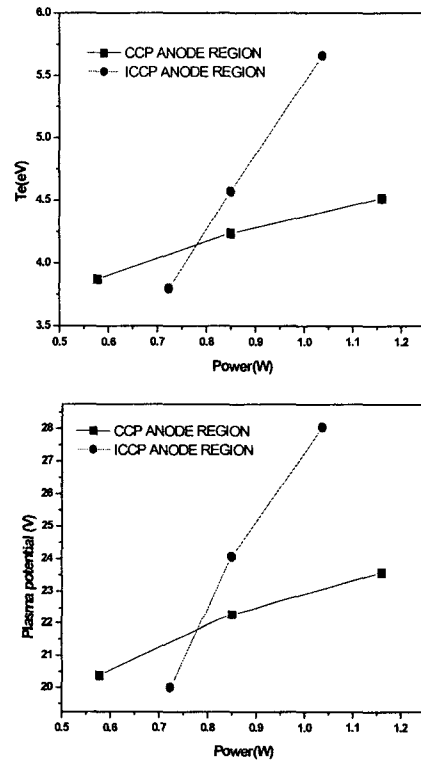


그림 11. 양극 부근에서 CCP와 ICCP의 전력에 대한 전자 온도와 플라즈마 전위 변화

Fig.11 The changes of Te and Vp of CCP and ICCP as power increase in the anode region

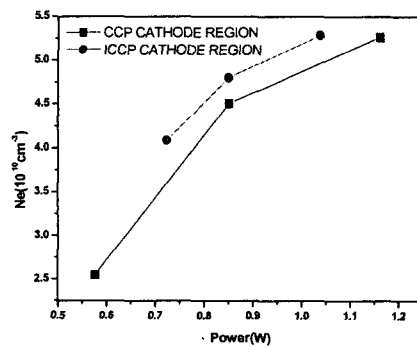


그림 12. 음극 부근에서 CCP와 ICCP의 전력에 대한 플라즈마 밀도 변화

Fig. 12 The changes of Ne of CCP and ICCP as power increase in the cathode region

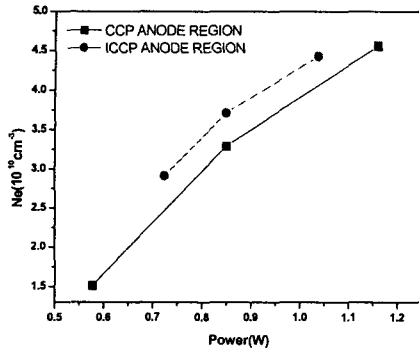


그림 13. 양극 부근에서 CCP와 ICCP의 전력에 대한 플라즈마 밀도 변화

Fig. 13 The changes of Ne of CCP and ICCP as power increase in the anode region

2.2.4 ELENDIF 시뮬레이션

그림 8로 부터 각각의 전극 구조에 대하여 극대점에서 플라즈마를 Double Langmuir probe로 진단을 하였고 진단 결과를 통하여 양광주에서의 전자에너지 분포를 ELENDIF[5]를 사용하여 시뮬레이션을 하였다.

ELENDIF를 위하여 각각의 최대 효율 전력 지점에서 그림 3의 탐침을 설치하여 전자의 온도와 전자의 밀도 그리고 플라즈마의 전위를 측정된 결과는 표1에 정리하였다.

	Power	Te	Ne	E/N
CCP	0.85W	5.89eV	3.90E(10)cm ⁻³	13.18Td
ICCP	1.037W	6.08eV	4.86E(10)cm ⁻³	143.56Td

*1 Td=10⁻¹⁷ Vcm²

표 1. Langmuir probe 진단 결과

Table. 1 The results of Langmuir probe diagnostics

표 1의 양광주의 E/N은 두지점의 플라즈마 전위의 차이를 통하여 구하였다. 전자와 중성 분자 사이의 충돌 반응 시간을 9 ns로 설정하였을 경우 ELENDIF 코드로 전자의 에너지 분포를 구하였다. 그림 14는 시뮬레이션의 결과를 나타낸다.

그림 14에서 ICCP의 경우 10 eV이상의 빠른 전자의 수가 CCP보다 많은 분포를 나타낸다. 이 결과는 양광주에서 Xe의 여기 중 형성은 ICCP 방전이 CCP보다 유리함을 보여 주고 있다.

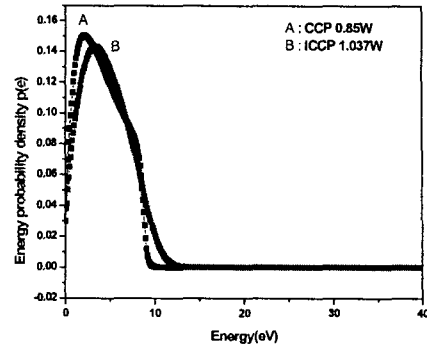


그림 14. ICCP 와 CCP의 전자 에너지 분포
Fig. 14 EEDF for ICCP and CCP

3. 결론

ICCP 와 CCP 전극 구조에 대하여 전기적, 광학적 특성을 측정하였다. 그 결과 ICCP 구조의 경우 방전 효율 적인 면이나 광효율 적인 면에서 CCP에 비하여 우수한 것으로 나타났다. 본 논문에서는 이 결과에 대한 기구 규명을 위하여 Double Langmuir probe를 통한 플라즈마 진단과 ELENDIF를 통한 시뮬레이션을 수행하였다.

플라즈마 진단을 통해 ICCP의 경우 Sheath 전위가 CCP에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 이는 ICCP가 CCP에 비해 방전 전압과 유지 전압 낮음을 의미하므로 ICCP의 우수한 전기적 특성을 설명해 준다. 또한 ICCP의 경우 CCP에 비해 발광 영역인 양광주의 E/N이 큰 것은 ICCP가 우수한 광효율을 나타내는 증거이다. ICCP의 발광 효율과 E/N이 크기와의 관계는 ELENDIF 시뮬레이션을 통해 구한 EEDF로 설명을 할 수 있다. 빠른 전자가 많을수록 Xe의 여기에 소모되는 전력이 증가하므로 그림 14에서 보는 바와 같이 ICCP가 CCP 보다 빠른 전자의 수가 많은 것은 광효율이 좋은 원인이 된다.

참고 문헌

- [1] V. A. Godyak OSRAM fellow IEEE 2000 p3281
- [2] R. Wendt and H. Lange, J. Phys. D: Appl. Phys. 31(1998) p3368-3372
- [3] M. A. Liberman, A. J. Lichtenberg Principles of Plasma discharges and material processing 1994 Jhon Wiley & Sons, Inc.
- [4] E. O. Jhonson and L. Malter, Physical Review vol 80 no 1 1950 p58-70
- [5] Morgan W. L., and B. M. Penstrate, ELENDIF: A time-dependent Boltzmann solver for partially ionized plasmas, Comput. Phys. Commun., 58, 127, 1990.