

원통형 Inductively Coupled Plasma (ICP) 광원 모드변환의 안테나 의존성

최 용성¹, 조 수영², 김 영근³, 김 창복³, 이 경섭¹
 동신대학교¹, 성화대학², 광주보건대학³

Antenna Dependency of Mode Transition in Cylindrical Inductively Coupled Plasma (ICP)

Yong-Sung Choi¹, Soo-Young Cho², Young-Keun Kim³, Chang-Bok Kim³, Kyung-Sup Lee¹
 Dongshin University¹, Sunghwa College², Kwangju Health College³

Abstract : In this paper, we designed the cylindrical type light source that had a electromagnetic principle of inductively coupled plasma, and measured its electrical-optical properties. Using the principle of transformer, electrically equivalent circuit of cylindrical type light source was analyzed. According to the parameters of electromagnetic induction which were diameter of coil with 0.3~1.2 mm, number of turns with 4~12 turns, distance with 40~120 mm and RF power with 10~150 W, the electrical and optical properties were measured. When diameter of coil was 0.3 mm, number of turns was 8 turns and distance was 40 mm, the highest brightness of 29,730 cd/m² was shown with RF power 150 W. The relationship between electromagnetic induction and plasma discharges was shown by mode transition from E-mode to H-mode.

Key Words : Inductively coupled plasma(ICP), E-mode, H-mode, Mode transition

1. 서 론

광원은 발광원리에 따라 물체를 가열할 때 같은 온도의 흑체 보다 더 강한 방사를 하는 열발광형 광원과 음극선이 물체를 충격할 때 생기는 음극선 발광형 광원, 기체/금속 증기내의 대전 입자간 또는 원·분자의 충돌로 형성된 방전에 기인한 방사 발광형 광원 등이 있다. 이 가운데 플라즈마 상태를 이용한 방전은 형광등, 저압 나트륨등과 같은 저압 방전과 수은등, 고압 나트륨등, 제논 램프, 메탈 할라이드 램프 등과 같은 고압 방전으로 구분된다[1].

플라즈마 방전 광원은 불활성 기체, 금속 증기 또는 이들 혼합체를 봉입한 영역의 양끝에 전극을 삽입하고 이들 전극 간에 전압을 인가하여 방전을 형성한다. 인가하는 전압과 전류에 따라 글로우 방전 발광과 아크 방전 발광으로 나누어진다. 이러한 방전광원은 장시간 사용 시 전극의 산화로 인한 부식 및 가스 순도의 저하로 광속 유지율과 출력을 저하시켜 수명을 단축시키는 단점이 있다. 따라서 무전극 광원과 같이 방전관 내부에 전극을 사용하지 않는 광원은 이를 보완할 수 있다.

무전극 광원은 방전원리에 따라 용량성 결합 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma: CCP)와 유도성 결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma: ICP) 광원으로 나뉘어진다. 용량성 결합 플라즈마 방전은 고주파 전원을 평행판 전극 사이에 인가할 때 형성되는 전기장에 의해 기체가 이온화되어 방전이 이루어진다. 반면 유도성 결합 플라즈마 방전은 방전관 주위에 감겨진 코일에 고주파 전원을 가하면, 코일에 흐르는 전류에 의한 축 방향 교번

자기에 의해 자기장이 형성되고 시변 자기장이 전기장을 생성하여 플라즈마를 생성·유지하게 한다[2]. 유도성 결합 플라즈마 방전의 장점은 1) 저압 방전에서 비교적 높은 플라즈마 밀도를 소유, 2) 플라즈마를 생성하는 방전관내부에 전극을 갖지 않으므로 전극의 스피터링(sputtering) 현상 등에 의한 불순물의 혼입 축소, 3) 균일한 플라즈마 소유, 4) 구조적 장치의 용이성 등이다.

따라서 본 논문에서는 전자기 유도 결합형 플라즈마의 발광원리를 소유한 원통형 광원을 설계 및 제작하였고, 전기적 및 광학적 특성을 실험하였다. 또한 변압기 원리를 이용하여 원통형 광원을 전기적으로 등가회로 해석하여 수식화 하였다. 코일의 직경(0.3~1.2 mmφ), 권선수(4~12회), 간격(40~120 mm) 등의 전자기 유도의 파라메타 변화와 10~150 W의 RF 전력 변화에 따른 전자기적·광학적 특성을 이해함으로써 물리적인 메카니즘적 관계를 확인하였다. 전기적 모드에서 자기적 모드로 변환되는 특성을 통해 전자기 유도도와 플라즈마 방전 사이의 관계를 확인하였다.

2. 실험 방법

유도결합형 플라즈마에서 사용되는 전자기 유도 코일의 인덕턴스는 패러데이 법칙에 의해 모양에 따라 흐르는 전류의 형태가 바뀌게 되고, 따라서 그 전류에 의해 유도되는 전자기장의 공간적인 분포와 플라즈마에 큰 영향을 주게 된다. RF 전력에 의해 방전이 전기적 모드에서 자기적 모드로 전환될 때 휘도는 급격히 증가한다. 전기적 모

드는 낮은 RF 전력에서 넓은 면적의 약한 발광과 함께 낮은 플라즈마 밀도가 관측된다. 이러한 전기적 모드의 발생원인은 각각의 유도코일 루프의 전위차로 기인한 전계에 의한 것이다. 자기적 모드는 RF 전력의 증가에 따라 급격히 전자밀도와 발광이 증가되며 이것은 자계의 공진에 의해서 형성되는 수직 축의 RF 전계에 기인한 것이다. 이와 같이 고밀도의 플라즈마를 발생시키는 자기적 모드는 인덕턴스의 모양에 따라 매우 다른 전기적·광학적 특성을 발생시킬 수 있다[3, 4].

그림 1과 같이 직경 52.5 mmφ, 길이 250 mm인 원통형 파이렉스 방전관 외부에 유도 코일의 직경(d)을 0.3~1.2 mmφ, 간격(l)을 40~120 mm, 권선수(N)를 4~12회로 변화하면서 식 (1)을 이용하여 인덕턴스를 계산하였고, 임피던스 분석기(HP- 4194A)를 이용하여 인덕턴스를 측정하였다.

인덕턴스는 전류 변화에 대한 전자기 유도에 의해 생기는 자속의 변화량을 나타내는 상수로 유도계수라고도 한다. 인덕턴스는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 본 실험에서 공심코일을 사용한 원통형 파이렉스 방전관의 인덕턴스는 진공의 상대 투자율(μ_r) 1과 자유공간의 투자율(μ_0) $4\pi \times 10^{-7}$ H/m를 식 (1)에 대입하여 계산하였다. 이때 방전관 외부에 감겨진 유도코일에 의한 자속은 일정 단면적에 흐르는 자속밀도의 양을 나타내는 지표로 코일의 직경(d)과 권선수(N)와 투자율(μ_r)과 코일의 간격(l)에 따라 달라진다[5].

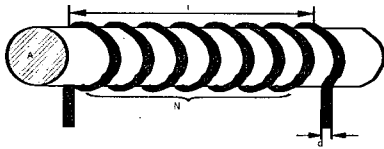


그림 1. 유도결합형 플라즈마 방전관.
Fig. 1. Inductively coupled plasma discharge tube.

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l + 0.45d} \quad (1)$$

유도결합형 플라즈마 방전은 13.56 MHz의 RF 전력을 인가하였을 때 패러데이 법칙에 의해 코일에 흐르는 전류 변화에 따라 자계가 생성된다. 시변자계에 의해 생성된 전기장으로 자유전자가 가속 및 충돌되어 중성분자를 이온화 시킴으로써 플라즈마가 발생 유지된다. 그림 2는 본 실험에서 사용한 방전관의 자기적 모드를 전기적인 등가회로로 나타낸 것이다. 등가회로는 1) 방전관에 고주파 인가를 위한 RF전원, 2) 출력의 효율적인 전달 뿐만 아니라 플라즈마 상태를 구현하기 위한 임피던스 정합회로, 3) 유도코일, 4) 플라즈마가 일어나는 방전관 등으로 구성된다.

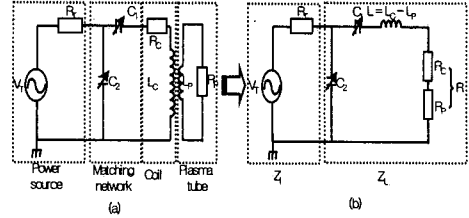


그림 2. 유도결합형 플라즈마 방전관의 전기적인 등가 회로.

Fig. 2. Electrical equivalent circuit of ICP discharge tube.

전기적인 등가회로는 그림 2의 (a)와 같이 표현할 수 있다. 13.56 MHz의 RF 전원은 전압원 V_1 와 동축케이블의 출력임피던스인 R_T 로 구성되며 유도 코일은 인덕턴스 성분 L_c 와 저항 성분 R_c 로 구성된다. RF 전원과 유도코일 사이에 임피던스 정합 회로는 다양한 형태가 있으나 일반적으로 두개의 가변 캐패시터 C_1, C_2 를 병렬로 연결한 L-type을 사용하였으며 인덕턴스 성분은 출력 손실의 한 요인이 될 수 있으므로 사용하지 않았다. 또 방전관 역시 인덕턴스 성분 L_p 와 저항성분 R_p 로 나타내었다. 그림 2의 (a)와 같은 등가회로를 임피던스로 단순화하면 그림 2의 (b)와 같이 나타낼 수 있다. RF전원은 출력임피던스 Z_i , 나머지 부분은 부하 임피던스 Z_L 로 단순화시켰을 때 RF전력이 플라즈마의 최대 출력으로 전달되기 위해서는 식 (2)와 같은 조건이 만족되어야 한다[3,6].

$$Z_i = Z_L \quad (2)$$

이러한 경우 임피던스 정합기 출력단의 임피던스를 계산하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_L = \frac{1}{\left(\frac{1}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C_1})} \right) + j\omega C_2} \quad (3)$$

식 (2)를 만족하기 위해서는 식 (3)의 Z_L 은 동축케이블의 임피던스 $R_T(50\Omega)$ 와 동일하여야 한다. 이와 같은 조건을 유도하여 보면 두개의 가변 커패시터 C_1 과 C_2 에 대해 식 (4)와 식 (5)으로 나타낼 수 있다. 즉 식 (3)의 조건은 커패시터 C_1 과 C_2 를 변화시켜 만족시킬 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{\omega} \frac{\omega L \pm \sqrt{\frac{R}{R_T} \sqrt{(\omega L)^2 + R(R - R_T)}}}{(\omega L)^2 + R^2} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{R}{R_T}} \frac{1}{\sqrt{(\omega L)^2 + R(R - R_T)}} \quad (5)$$

식 (4), (5)와 같이 두 커패시터 C_1 과 C_2 는 유도코일의 저항 R과 인덕턴스 L에 의해 결정되기 때문에 유도코일의 파라미터 변화는 원통형 유도 결합형 플라즈마의 특성을 결정하는데 중요한 요소가 된다.

RF 전력과 유도코일의 파라미터 변화에 따른 광학적 특성과 모드 변환 특성을 확인하기 위하여 그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였다.

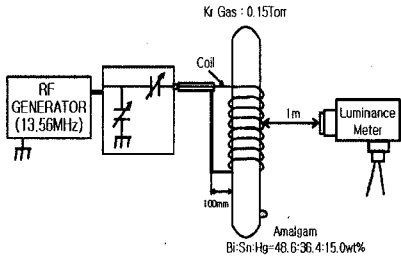


그림 3. 실험 장치 계략도.

Fig. 3. Schematic diagram of experimental equipments.

방전관 내부에 버퍼 가스로 순도 99.999 %의 크립톤 0.15 Torr를 주입하였고 UV 방출의 주된 매체인 아말감 (Bi : Sn : Hg =48.6 : 36.4 : 15.0 wt %)을 삽입하였다. RF 전원은 10 W 단위로 10~150 W의 전력을 인가하였다. 반사전력은 식 (3)을 만족하기 위하여 정합 회로의 가변 Capacitor C_1 과 C_2 를 변화시켜 조절하였고 반사전력의 크기를 1 %이내에 들도록 임피던스를 조정하였다. 휘도 측정은 코일의 직경(d), 간격(l), 권선수(N) 등의 인덕턴스 변수를 변화시켜 휘도계 (Minolta LS-100)를 사용하여 1 m거리에서 측정하였으며 전기적 모드에서 자기적 모드 변환 전력을 확인함으로써 인덕턴스에 따른 플라즈마 특성을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 4는 유도 코일의 직경 변화에 따른 식 (1)을 이용하여 계산된 인덕턴스와 임피던스 분석기(HP-4194A)를 이용하여 측정된 값을 비교한 것이다. 계산 및 측정된 수치는 거의 일치하였으며 유도 코일의 직경이 증가할수록 인덕턴스는 1.9~1.7 μH 로 감소함을 보였다. 이와 같은 조건에서 코일의 직경에 따라 RF 전력을 10 W 단위로 10~150 W까지 증가시켜 휘도 특성과 전기적 모드에서 자기적 모드로의 모드 변환 전력을 확인하였다. 구체적으로 코일간격은 100 mm, 권선수는 8회로 일정히 한 후, 코일의 직경을 0.3 mm ϕ 단위로 0.3~1.2 mm ϕ 까지 변화하여 그림 5와 같이 휘도 특성을 측정하였다. 전체적으로 자기적 모드 변화 시 급격한 휘도 증가 특성을 나타내었다. 그 결과 0.3 mm ϕ 의 경우 150 W에서 23,090 cd/m^2 의 가장 높은 휘도특성을 나타내었고 자기적 모드로의 전

환 전력은 1.2 mm ϕ 일 때의 120 W보다 높은 전력인 140 W에서 전환되었다.

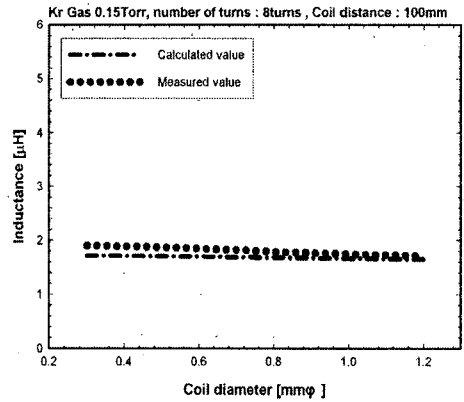


그림 4. 코일의 직경 변화에 따른 인덕턴스 특성.

Fig. 4. Inductance dependence on coil diameter.

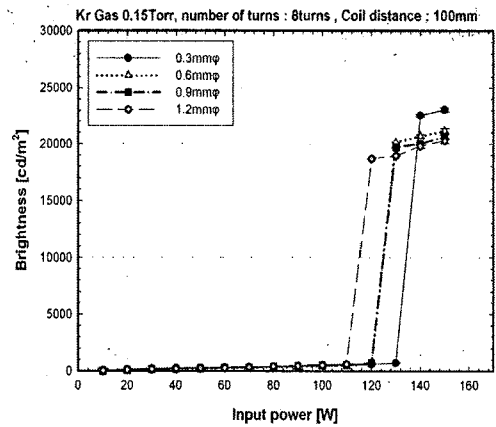


그림 5. 코일의 직경과 RF 전력변화에 따른 휘도 특성.

Fig. 5. Brightness dependence on coil thickness and RF power.

전기적, 모드의 경우 유도코일의 출력부분과 방전관 접지 사이의 전위차에 의해 형성되는 용량성 결합이다. 이때 유도코일의 출력부분의 전위가 진동하여 플라즈마 내의 시스를 진동하도록 유도하며 시스의 진동에 의해 전자가 이온화 에너지를 얻는다. 그림 6 (a)는 RF전력 100 W일 때 전기적 모드 상태의 방전관 점등을, 나타낸 것으로 전기적 모드의 경우 낮은 휘도특성을 보였으며 전체적으로 희미하게 방전특성이 나타남을 확인하였다. 그림 5, 6과 같이 낮은 휘도를 나타내는 전기적 모드의 분포는 유도 코일의 직경이 증가할수록 RF 전력 140 W에서 120 W로 이하에서 축소되었다. 자기적 모드의 경우 유도 코일 전류의 진동에 의해 유도되는 전자기파로 전자가 에너지를 흡수하는 유도성 결합이다. 그림 6 (b)는 RF 전력

140 W 자기적 모드일 때 방전 특성을 나타낸 것으로 전기적 모드와는 달리 높은 휘도특성과 안정된 방전 특성을 확인할 수 있었다. 18000 cd/m² 이상 높은 휘도를 나타내는 자기적 모드는 유도 코일의 직경이 0.3~1.2 mmφ로 증가할수록 RF 전력 140 W에서 120 W 이상으로 확장되었다. 결과적으로 유도코일의 직경의 증가가 인덕턴스를 감소시키고, 전기적 모드에서 자기적 모드로의 전환점을 확장시켰다.

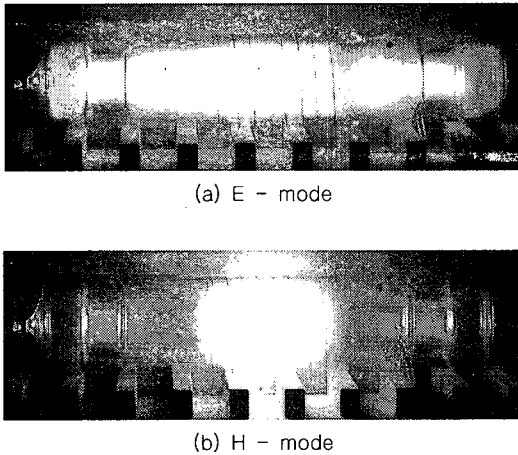


그림 6. 전기적 / 자기적 모드 방전특성.
Fig. 6. Discharge Characteristics in E-mode H-mode.

그림 7은 유도 코일의 권선수 변화에 따른 계산된 인덕턴스와 측정된 값을 비교한 것이다. 그림 4의 결과와 유사하게 계산 및 측정된 수치는 거의 일치하였으며 유도 코일의 권선수가 증가할수록 인덕턴스는 0.76~4.51 μH로 상대적으로 크게 증가하였다.

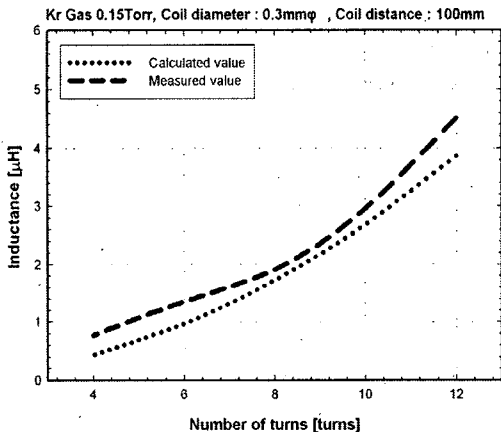


그림 7. 코일의 권선수 변화에 따른 인덕턴스 특성.
Fig. 7. Inductance Dependence on Coil turns.

인덕턴스 변화 조건을 바탕으로 코일의 권선수 변화에 따라 10 W단위로 10~150 W의 전력을 인가하였을 때 그림 8에서 휘도특성과 모드 변환 전력을 확인하였다. 그림 5에서 최대 휘도를 나타낸 0.3 mmφ인 코일을 사용하였다. 코일의 전체 간격은 100 mm로 일정히 한 후 2회 단위로 4 ~ 12회까지 변화시켜가면서 휘도 특성을 측정하였다. RF 전력 150 W, 8회의 코일을 감았을 때 23,090 cd/m²의 높은 휘도 특성을 보였다. 권선수를 감소할수록 높은 전력에서 자기적 모드로 전환이 이루어졌으며 코일의 권선수가 4~6회일 때 230 W 이상에서 자기적 모드로 전환하였다. 이와 같은 결과는 일정 거리에 따른 권선수가 증가할수록 상대적인 자속밀도를 증가시킨다. 증가된 자속밀도는 유도 코일에 의한 전자기파의 에너지 변환율을 강화시켜 보다 낮은 전력에서 모드 전환이 이루어진 것으로 사료된다. 결국 그림 5의 코일의 직경 변화에 따른 모드 변환 전력을 비교하였을 경우 그림 8의 권선수 변화에 대한 의존성이 더 크게 작용함을 알 수 있었다.

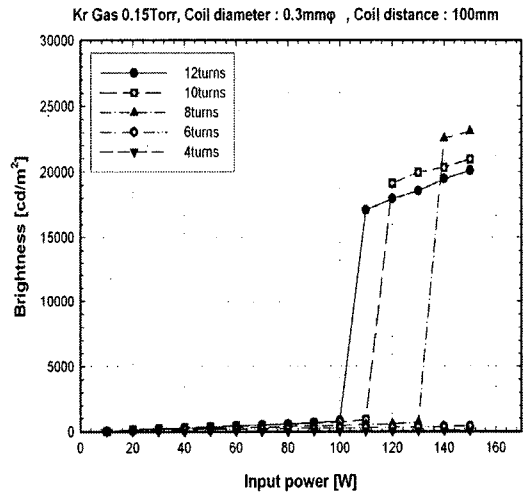


그림 8. 코일의 권선수와 RF 전력 변화에 따른 휘도 특성.
Fig. 8. Brightness Dependence on Coil turns and RF power.

20 mm 단위로 40~120 mm까지 코일간격 변화에 따른 인덕턴스의 특성을 확인한 결과 그림 9와 같이 코일간격이 커질수록 인덕턴스는 4.4~1.7 μH로 감소하였다.

그림 10은 코일 간격에 따라 10 W 단위로 10~150 W까지 RF 전력을 증가하면서 휘도특성과 모드 변환 전력을 확인하였다. 그림 5에서 코일의 직경 0.3 mmφ일 때, 그림 9에서 코일의 권선수는 8회일 때 가장 높은 휘도특성을 보였기 때문에 상기의 변수를 기준으로 코일 간격에 따른 휘도 특성을 확인하였다. 코일 간격을 20 mm 단위로 40~120 mm까지 증가한 결과 40 mm에서 150W의 전력

을 인가하였을 때 29,730 cd/m²의 가장 높은 휘도특성을 가졌다. 자기적 모드로의 변환 전력도 120 mm 150 W에서 40 mm의 70 W로 크게 작아짐을 확인하였다. 코일 간격이 줄어들수록 자속의 쇄수가 증가하여 유도 코일 내의 자속밀도와 전자기파 방출이 증가되므로 낮은 전력에서 자기적 모드로 전환되었다.

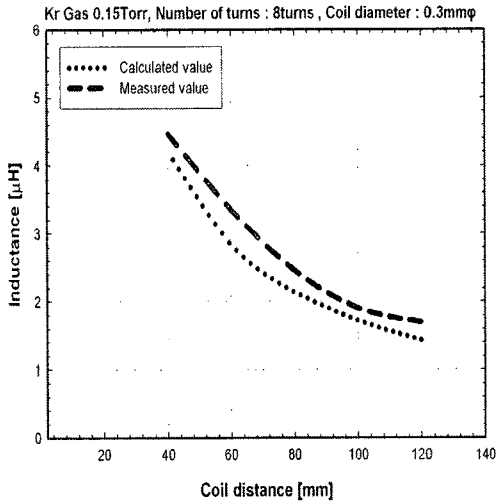


그림 9. 코일의 간격 변화에 따른 인덕턴스 특성.
Fig. 9. Inductance Dependence on Coil Distance.

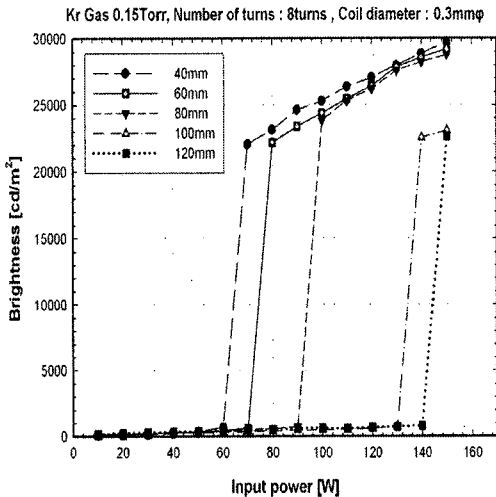


그림 10. 코일의 간격 변화에 따른 휘도 특성.
Fig. 10. Brightness Dependence on Coil Distance.

코일의 직경 0.3 mmφ, 권선수 8회, 간격 40 mm로 고정하고 RF 전력 변화에 따른 스펙트럼 특성을 그림 11과 같이 확인하였다. 특히 모드 전환의 영역인 50~80 W일 때 가시광선 영역의 스펙트럼 강도가 급격히 증가함을 보였고 70 W에서 전기적 모드에서 자기적 모드로 전환됨을

재확인 하였다. 또한 473.9 nm와 760.1 nm의 파장에서 스펙트럼 강도가 급격하게 증가하는 현상을 보았다[6.7].

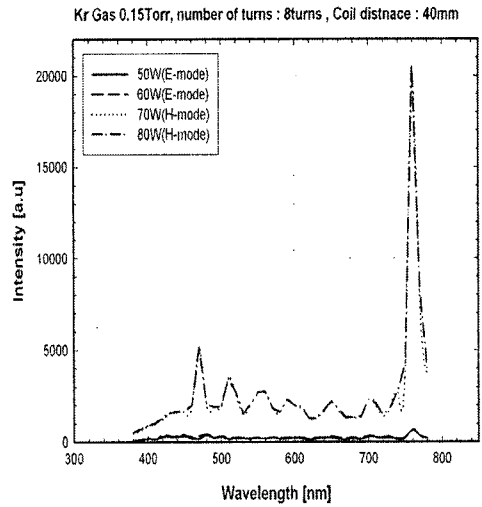


그림 11. RF 전력에 따른 스펙트럼 강도 변화.
Fig. 11. Spectrum Intensity Dependence on RF power.

평판형 광원의 전극위에 POP용 형광체를 도포한 유리판을 놓고 그 사이를 약 20mm정도 띄웠다. 그리고 휘도를 측정된 결과 가스 압력은 300 Torr이고 구동전압은 700V에서 약 250 cd/m²으로 저조한 휘도 값을 나타내었다. 그림 12는 평판형 광원의 스펙트럼을 측정된 것이다. 480nm, 580nm, 640nm의 각각의 주파장을 나타내었다.

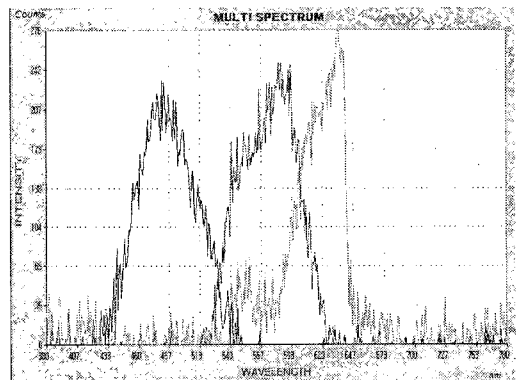


그림 12. 평판형 광원의 스펙트럼
Fig. 12. Spectrum for Lighting-Sources.

4. 결론

본 논문에서는 전자기 유도 결합형 플라즈마의 발광원리를 소유한 원통형 광원을 설계 및 제작하였고, 전기적

및 광학적 특성을 실험하였다. 또한 변압기 원리를 이용하여 원통형 광원을 전기적으로 등가회로 해석하여 수식화 하였다. 코일의 직경(0.3~1.2 mmφ), 권선수(4~12회), 간격(40~120 mm) 등의 전자기 유도의 파라메타 변화와 10~150 W의 RF 전력 변화에 따른 전자기적·광학적 특성을 이해함으로써 물리적인 메카니즘적 관계를 확인하였다.

- 1) 직경 52.5 mmφ, 길이 250 mm인 원통형 파이렉스 방전관 외부에 유도 코일의 직경(d)을 0.3~1.2 mmφ, 간격(l)을 40~120 mm, 권선수(N)를 4~12회로 변화하였을 때 인덕턴스를 계산 및 측정하였다.
- 2) 유도 코일의 직경을 0.3 mmφ 단위로 0.3~1.2 mmφ 까지 변화하였을 때 인덕턴스는 1.9~1.7 μH로 감소하였고 0.3 mmφ의 경우 150 W에서 23,090 cd/m²의 가장 높은 휘도특성을 나타내었다. 자기적 모드로의 전환 전력은 1.2 mmφ일 때의 120 W보다 높은 전력인 140 W에서 전환되었다. 즉 유도코일의 직경의 증가가 인덕턴스를 감소시키고, 전기적 모드에서 자기적 모드로의 전환점을 확장시켰다.
- 3) 최대 휘도를 나타낸 유도코일의 직경 0.3 mmφ 기준에서 코일의 간격은 100 mm로 고정하고, 권선수를 2회 단위로 4~12회까지 변화시켰을 때 휘도 특성결과는 RF 전력 150 W, 8회의 코일을 감았을 때 23,090 cd/m²의 높은 휘도 특성을 보였다. 권선수를 감소할수록 높은 RF 전력에서 자기적 모드로 전환이 이루어지는 것은 일정 거리에 따라 권선수의 증가가 상대적인 자속밀도를 증가시키기 때문이다. 또한 코일의 직경 변화에 따른 모드 변환 전력을 비교하였을 경우 권선수 변화에 대한 의존성이 더 크게 작용함을 알 수 있었다.
- 4) 코일의 직경 0.3 mmφ, 코일의 권선수는 8회일 때 코일의 간격을 20 mm단위로 40~120 mm까지 증가한 결과 40 mm에서 150W의 전력을 인가하였을 때 29,730 cd/m²의 가장 높은 휘도특성을 가졌다. 코일 간격이 좁아질수록 자속의 쇄교수가 증가하여 유도 코일 내의 자속밀도와 전자기파 방출이 증가되므로 낮은 전력에서 자기적 모드로 전환되었다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 전력산업 기초인력 양성사업 (I-2006-0-092-01)에 의해 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] A. Bogaerts, E. Neyts, R. Gilbels, J. van der Mullen, "Gas discharge and their applications", Atomic Spectroscopy, Vol. 57, No. 4, p. 638, 2002.
- [2] D. O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting", IEE Proceedings A, Vol. 140 Iss. 6, p. 465, 1993.
- [3] I. M. El-Fayoumi and I. R. Jones, "The electromagnetic basis of the transformer model for an inductively coupled RF plasma source", Plasma sources Sci. Technol., Vol. 7, No. 2, p. 179, 1998.
- [4] T. Czerwicz and D. B. Graves, "Mode transitions in low pressure rare gas cylindrical ICP discharge studied by optical emission spectroscopy", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 37, No. 20, p. 2827, 2004.
- [5] W. Bolton, "Electrical and magnetic properties of materials", p. 82, 1992.
- [6] S. Xu, K. N. Ostrikiv, "Hysteresis and mode transition in a low-frequency inductively coupled plasma", J. Vac. Sc. Technology A, Vol. 18 No. 5, p. 2185, 2000.
- [7] Lai, C., Breun, R. A, Sandstrom, P.W., Wendt, A.E, "Langmuir probe measurements of electron temperature and density scaling in multidipole radio frequency plasmas", Journal of vacuum science & technology. an official journal of the American Vacuum Society. A, Vacuum, surfaces, and films, Vol.11, No.4 p1199, 1993