

# 고주파방전 무전극 형광등(직관 및 환형) 광원 성능향상을 위한 신기술

김진중·고정태·원동호<세종대학교 공공학과>  
백용구·박해일·이태일<연세대학교 금속시스템 공학과>

## 1 서 론

일반 조명, 특수 조명, 외각 조명, 산업 조명, 등등에 사용하는 재래식 광원 램프의 반 이상이 전기 방전에 의존한다. 그 중 대부분이 전극을 사용하여 방전하므로 램프의 수명에 근본적인 제한이 있다. 이러한 방전등 중에 재래식 형광등은 1930년대 말 출현된 후 많은 개선과 발전을 하였으며, 현재 전 세계적으로 일반 조명에 사용되는 램프의 주종을 이루고 있는 것은 주지의 사실이다[1]. 이러한 재래식형광 램프는 전류 안정기의 필요성, 전극의 스퍼터링에 의한 흑화, 방전 조건의 변화에 따른 광속 유지율의 감소, 한정된 광 변환 효율, 수명 감소에 따른 폐기물의 과도한 방출, 등등, 많은 단점을 갖고 있다.

따라서 고주파를 이용한 무전극 방전 형광 램프의 개발이 오랫동안 연구개발 되어왔으며, 미국, 일본, 네덜란드 등 조명기술 선진국에서 고주파 방전을 이용한 무전극 형광 램프 개발에 힘쓰고 있다. 고주파 무전극 방전 램프는 50,000 시간 이상의 수명과 80 [lm/W] 이상의 좋은 효율이 가능하며, 내부 전극을 사용하지 않기 때문에 많은 문제를 해결한다.

현재 고주파 방전을 이용한 100[W] 급 환형 램프의 상용화는 극히 제한적이거나 무전극 램프의 원천 기술 보유국 기업체에서 실현된 상태며, 유도형 방전

기술을 사용한다. 그러나 100[W]급 직관형 무전극 형광등은 상용화가 되지 않고 있다. 그 배경에는 기술적 이유도 있지만 응용성에도 있는 것으로 사료된다. 즉 환형은 그 규격이나 모양새가 간단하고 간편하여 사용하기가 편하다는 장점이 있다. 또한, 유도결합에 의한 방전을 이루기가 가장 적합한 구조이기 때문이다. 따라서 제일 먼저 상용화를 성취하였다. 반면에 직관형은 기존의 전극형 40[W] 형광등을 대체하기에 경제성에서 경쟁하기가 어려운 이유 때문에 기술적으로는 환형과 비슷하나, 상용화가 늦어지고 있는 것으로 사료된다. 이러한 관점에서 볼 때 본 연구에서 거둔 직관형 및 환형의 형광 램프 광원 기술의 성과는 국산 상용화를 앞당기는데 좋은 계기가 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 고주파 방전에 의한 무전극 직관 및 환형 형광 램프 기술에 대해 새로운 기술적 접근 방법을 설명하고, 실험적 결과를 보고한다. 자세한 내용은 아래에서 기술한다.

## 2 본 론

### 2.1 기술적 접근 방법

재래식 형광등과 같이 전극이 방전관 내에 있는 경

우에는 플라즈마와 전극사이의 음극 강하(cathode fall)에 의한 에너지 손실이 불가피하다. 특히 cold cathode인 경우 cathode fall 이 수백 볼트가 되어 이에 의한 에너지 손실이 커지므로 광 효율이 좋지 않은 것이 일반적이다. 그러나 무전극 램프는 전극이 방전관 안에 없기 때문에 cathode fall에 의한 열적 에너지 손실이 전혀 없기에 기존의 형광등 보다 전력 소모가 절감되는 효과가 있다. 그러므로 무전극 램프는 (lm/W)를 고려 할 경우 광 효율에 있어서 매우 큰 이득을 얻을 수 있다. 특히 직관 타입 무전극 형광등의 경우 기존의 폐형광등을 재활용 할 수 있는 측면의 큰 장점도 갖고 있다. 직관램프의 경우 무전극 구조이므로 특별한 설비 없이 기존의 설비로도 램프를 생산하여 사용할 수 있다. 필요한 것은 외장 전극 개발 뿐이다.

무전극 형광 램프 광원에 사용되는 기술은 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 용량형 결합 [capacitive coupling (cc)]에서 성립되는 전기장을 이용한 방전 기술이고, 두 번째는 자기장의 시간적 변화에 따른 유도형 결합 [inductive coupling (ic)]으로 유도된 전기장을 이용한 방전 기술이 있다. 이 두 가지 방식은 모두 전기장 방전인 점에서 동일하다. 다만 사용되는 전기 회로가 다르고 주파수 및 가능 출력이 다르다. 그리고 전기장이 형성되는 구조가 달라 구조적인 접근 방법이 다르다. 방전 자체는 두 가지 다 전기장을 이용하지만, 전력과 방전 플라즈마 결합 메카니즘은 복잡하고, 그의 최적화를 위해서는 고도의 기술을 요구한다.

무전극 방전 램프를 환형 및 직관으로 나눈 배경을 설명을 여기서는 노하지 않는다. 본 논문에서는 용량형 방전 구조에 유도적 구조를 가미하여 방전 효율을 높이는 소위 혼합 방식으로 무전극 형광등 개발 추진하여 그 초기 결과를 발표하는 것이다. 즉 연세대학교 백홍구 교수 팀에서 제안한 유도+용량형 혼합 결

합 (hybrid capacitive-inductive coupling: cic) 을 이용한 방전을 이용한 형광등의 성능을 비교 검토하였다.

무전극 형광등을 개발 실험을 위하여 그림 1.에서와 같이 두 가지 접근 방법은 취하고 있다. (a)는 용량형 결합에 의한 무전극 방전 기술이고 (b)는 용량형+유도 혼합 결합 방전을 이용한 형광 램프 구조이다. 주파수는13.56(MHz)를 사용하였으나 다른 주파수도 시도 중이며, 환경친화적인 無수은 방전을 생각한 탐구적인 연구도 시도했다.

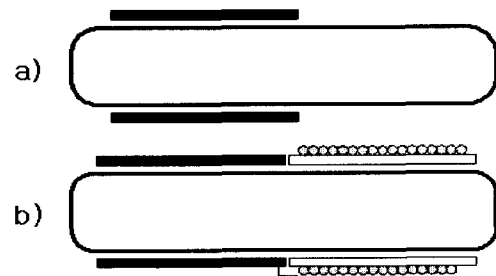


그림 1. a) 용량형 전극 구조  
b) 유도+용량형 전극 구조

### 2.3 수행 내용 및 결과

전력 변환 효율에 관계되는 한 궁극적인 쟁점은 광 변환 효율이 중요하다. 광변환 효율의 증대는 기술의 경제성을 통하여 다른 기술과 경쟁성을 높이는 가장 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 형광등 광원의 효율 향상에 일차적인 중점을 두고 있다.

본 실험에 사용한 환형 및 직관 형광등은 유도+용량형을 혼합한 방법으로 방전 플라즈마의 sheath를 절감시키는 메카니즘을 이용한 기술이다[2]. 사용한 램프 사양은 다음과 같다.

- 직관 직경 : 16(mm)
- 환의 직경 : 30(mm)

- 봉입 가스압 : Ar 2-3 torr
- 수은 봉입 양 : 3[mg]
- 주파수 : 13.56[MHz]
- 환형 전극의 길이 : 3[cm]
- 유도코일 감은 수 : 30회

가. 13.56(MHz) 유도+용량형 결합을 이용한 환형램프 방전 실험

본 실험에서는 순수한 용량형 결합에 의한 휘도 측정 결과와 유도+용량형 혼합 결합에 의한 휘도 결과를 비교하였다. 그림 2는 환형 형광램프 방전 시 휘도 측정 방법을 설명한다.

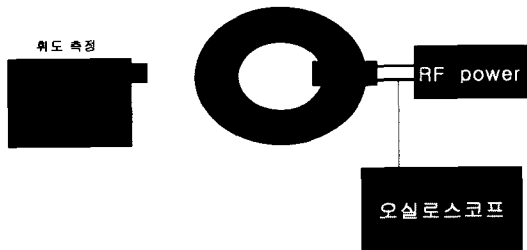


그림 2. 환형 형광램프 측정 구성도

그림 3은 유도+용량형 혼합 결합을 이용한 휘도 측정 시 환형 형광램프 방전 사진이다.

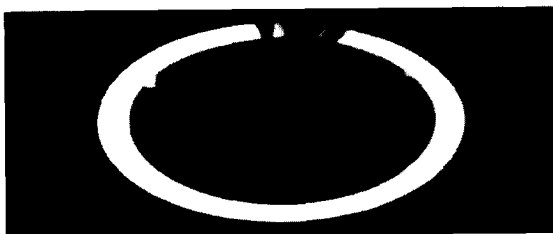


그림 3. 용량 + 유도 결합 무전극 환형 방전 모습

실험에서 얻은 결과를 그림 4, 5, 비교는 그림 6에

보인다. 정도의 차이는 있어도 모든 점에서 휘도의 증가를 보이고 있다. 아직 최적화 되지 않은 상태이지만 결과는 주목할 만하다.

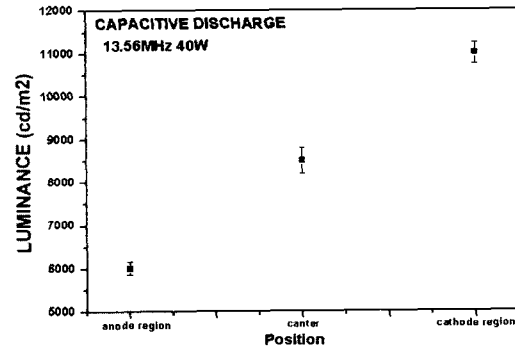


그림 4. 용량형 방전의 휘도

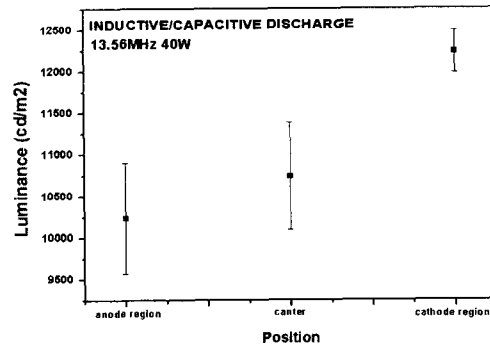


그림 5. 유도+용량형 결합 방전 휘도

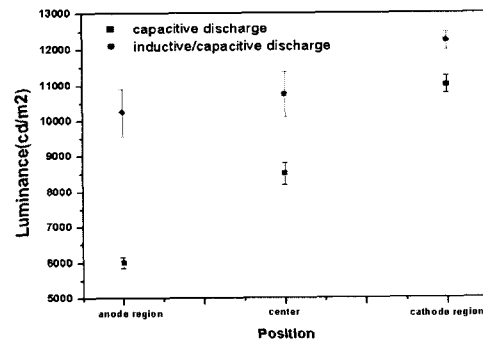


그림 6. 두전극간의 휘도 비교

상기 실험 결과가 보이듯 유도+용량형 결합 방식에 의한 휘도는 순수한 용량형 결합 방전의 경우 보다 평균 25% 이상 휘도가 개선 됐으며, 특히 anode 부근에서는 국부적이거나 40% 이상 개선된 것을 볼 수 있다. 이러한 성능 향상에 대한 설명은 다음과 같이 논 할 수 있다. 코일로 인해 형성된 자기장에 의하여 플라즈마의 밀도가 증가하게 되어 sheath의 전위가 감소한다. 그러므로 전체 방전 전압이 낮아지게 되고 방전관내에 형성된 칼럼의 전력 전달 효율이 증가하게 된다. 국부적인 측정에 의한 휘도의 증가이지만 모든 점에서 휘도가 증가 하였으므로 총 광속을 측정해도 성능 향상이 될 것은 당연히 기대된다. 이 측정은 차체에 실행할 것이며, 다른 곳에서 보고할 것이다.

나. 13.56(MHz) 유도+용량형 결합을 이용한 직관형 램프 방전 실험

그림 7은 직관램프의 휘도 측정 방법을 설명한다.

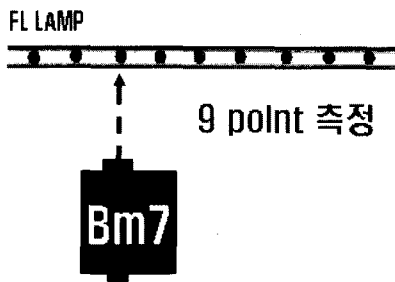


그림 7. 직관 휘도 측정

실험 결과는 그림 8에서 보인다. 직관에서는 유도+용량형 램프가 순수 용량형 보다 36% 증가하고, 전극형 일반 전극램프 보다 휘도가 평균 13% 증가한 것을 볼 수 있다.

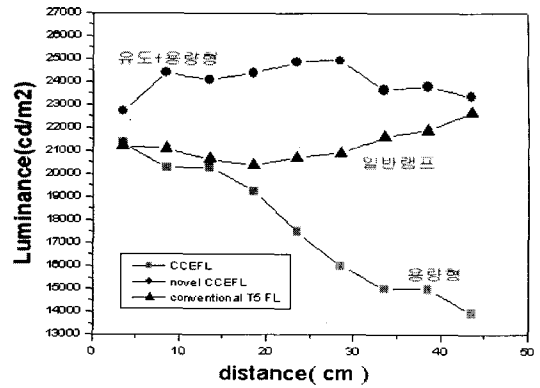


그림 8. 직관램프 전극간 휘도 비교

위 결과를 보면 직관형 램프 방전 시 유도+용량형 혼합한 방법으로 방전 플라즈마의 sheath를 절감하여 전반적인 휘도 효율의 증가이다.

두 실험에서 직관의 경우 휘도의 증가 외에도 광속 및 조도의 효율을 분석하고 있다. 환형 램프 결과에서는 약간 해석이 불분명한 면이 있다. 그것은 anode 부근에서는 약 40%이상의 개선이 있는 반면, cathode 부근에서는 14%정도의 증가를 보인다. 이는 물리적으로 근본적인 문제가 있는 것이 아니라 실험 조건의 불균형에서 나오는 실험적 artifact일 것으로 설명할 수 있다. 이것은 전기적 장치의 최적화로 쉽게 교정될 것이다. 차체에 더욱 개선된 실험으로 확인 할 것이다.

다. 60(kHz) 유도+용량형 결합을 이용한 직관형 램프 방전 실험

앞에서 언급했듯이 환경 친화적인 방전 기술 개발을 위해 수은은 사용하지 않고 방전 실험을 하였다. 방전관의 지름이 10(mm)이고 길이가 34(cm)인 석영관을 사용하였다. 발광 부분을 30(cm)로 설정하

고 나머지 부분은 외부 전극을 설치하였다. 램프 방전을 위하여 초기 진공을  $10^{-3}$  mtorr 까지 하고 순수 Xe 가스를 0.16 torr 채웠다. 전원은 60[kHz]의 사인 파형을 공급했고 방전의 전기적인 특성을 측정하기 위하여 램프 양단에 전류 probe와 전압probe를 설치하였다. 각각의 Probe는 오실로스코프 (HP Infinium Oscilloscope -500[MHz], 1 [GSa/s])에 연결하여 값을 표시하였다. 광학적 측면에서 828 [nm] 전자기파의 강도를 측정하기 위해 ACTON Spectra (pro. 300i)를 사용하였다. 전기적 특성과 광학적 특성을 측정하기 위한 실험 구조도는 그림 9에 나타내었다.

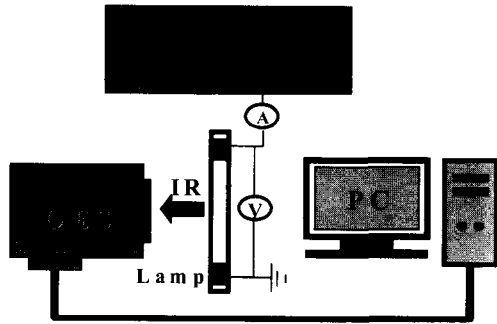


그림 9. 전기적, 광학적 특성 측정 실험 개략도

실험 결과 전기적인 특성을 보면 그림 11과 같다.

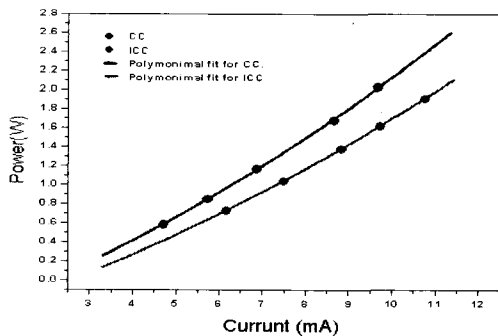


그림 10. 용량형과 유도+용량형에 대한 I-P 곡선

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

$$P = R I_{rms}^2 \quad (1)$$

그러므로 동일한 전력을 인가하여 높은 전류 값을 얻을 수 있는 유도+용량형의 경우가 전기적으로 용량형보다 광원으로서의 전기적 효율이 높음을 알 수 있다.

광학적 특성으로는 Xe 방전에서 광원으로 사용하는 여기 종은  $[Xe]^3P_1$ 에서  $[Xe]^1S_0$ 로 천이 될 때 나오는 147[nm]의 진공 자외선이다. 일반적으로 높은 에너지를 가진 전자에 의하여 중성 Xe 가스 분자는 Xe continuum level 까지 높게 여기 된 뒤  $^3P_1$ 상태로 천이될 때 828[nm]의 전자기파를 방출한다. 그 후 곧 바로 기저 상태인  $^1S_0$ 로 천이 하면서 147 [nm]의 전자기파를 방출한다. 그러므로 828[nm]의 강도는 147[nm]의 강도와 비례 관계에 있다[3]. 그림 11은 828[nm]의 강도와 전력에 대한 그래프를 보여준다. 유도+용량형의 경우 순수 용량형 보다 동일한 전력에 더 큰 IR의 강도를 가짐을 볼 수 있다. 이는 그림 10의 결과와 같은 경향을 나타내는 것이다. 플라즈마의 전류가 클수록 IR (infrared)의 강도가 크게 나옴을 알 수 있다.

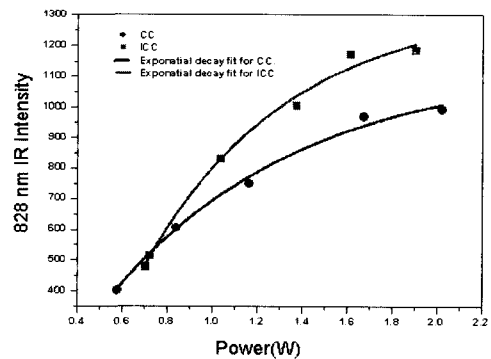


그림 11. 용량형과 유도+용량형에 대한 power에 대한 IR 강도

전력이 많이 공급되면 될수록 유도+용량형과 용량형 사이의 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 비례한다. 그러므로 전류가 많이 흐르게 되면 유도+용량형의 인덕션 효과가 증가하여 전극 부근에 이온화를 향상시키고 sheath 전위를 감소시키게 되어 전체적인 전력 분배가 램프의 양광주에 집중되므로 IR의 강도가 크게 되는 것이다.

### 3. 결 론

본 실험은 고효율의 고주파 방전 형광 램프 광원 기술을 개발하여 경쟁성 있는 원천 기술 개발을 궁극적인 목표를 갖고 수행하고 있다.

형광 램프의 효율을 높이는 실험을 일부 수행하여 괄목할 결과를 얻었다. 기술적으로 유도+용량형 결합의 혼합형 방전 방식이 순수한 용량형 결합 방전보다 전기적·광학적 면에서 우수함을 보였다. 그 결과로 휘도가 10% 이상, 국부적으로는 40% 이상 증가를 성취하였으며, 이 같은 결과는 직관형 및 환형 무전극 형광등에서 정도의 차이는 있으나 같은 경향의 결과를 성취하였다. 또한 직관의 경우 일반 제품을 이용한 실험이므로 활용가치가 높다고 할 수 있다. 더욱 정밀한 전기적 및 광학적 특성 조사를 준비 중이며, 그 결과는 다른 곳에서 발표할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 에너지관리공단 "에너지절약 기술 개발 사업"의 지원으로 수행되었음을 밝힌다.

### 참 고 문 헌

- (1) J. R. Coaton and A. M. Marsden (ed.), "LAMPS AND LIGHTING," (Arnold, London, 1997).
- (2) 이태일, 백홍구 "Development inductively enhanced capacitively coupled electrodeless fluorescent lamp," Joint International Plasma Symposium of 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Science & Technology, 2002.
- (3) R. Wendt and H. Lange, J. Phys. D: Appl. Phys. 31(1998) pp 3368-3372.

### ◇ 저 자 소 개 ◇



김진중(金振重)

1940년 1월 17일생. 1958~1962년 서울대학교 물리학 전공. 1966~1968년 미국 위스콘신 대학교 물리학 전공. 1969~1974년 미국 위스콘신 대학교 물리학 전공. 1982~1988년 미국 Univ. of New Mexico 전기학 교수. 1988~1995년 미국 Univ. of Central Florida-CREOL 레이저광연구소/물리학과 교수. 1996~1999년 한전 전력연구원 에너지환경고등연구원 소장. 1999~현재 태원전기산업(주) 부설연구소장(겸직). 2000~2001년 호서대학교/물리학과 교수. 2001~현재 세종대학교/광공학과 교수.



고정태(高正太)

1975년 6월 27일생. 2001년 호서대학교 물리학 졸. 2002년 세종대학교 광공학과 대학원 재학중.



**원 동 호(元東鎬)**

1977년 2월 12일. 2002년 건국대학교 응용물리학과 졸. 2002년 세종대학교 광공학과 재학중.



**백 흥 구(白弘九)**

1975년 연세대학교 금속공학과 졸업. 1997년 한국과학기술원 재료공학과 대학원 졸업(석사). 1982부터 1987년 University of Wisconsin Madison 졸업(박사). 한림원 정회원. 1988년부터 현재까지 연세대학교 신소재공학부 교수.



**박 해 일(朴海日)**

1998년 연세대학교 금속공학과 졸업. 1998년~현재 연세대학교 금속공학과 석박사통합과정 재학중.



**이 태 일(李泰日)**

2001년 연세대학교 금속공학과 졸업. 2003년 2월 연세대학교 금속공학과 대학원 졸업(석사), 현재 동대학원 박사과정 재학중.