

냉음극 및 외부전극 형광램프의 특성 연구

조미령¹, 신상욱¹, 이세현¹, 황명근¹, 김영욱¹, 이대홍², 이주영², 송혁수², 길도현², 조광섭², 김명문³, 양순철³
 한국 조명기술 연구소¹, 광운대학교², 목포대학교³

Characteristics of the Cold Cathode and External Electrode Fluorescent Lamps

M. Cho¹, S. Shin¹, S. Lee¹, M. Hwang¹, Y. Kim¹, D. Lee², J. Lee², H. Song², D. Gill², G. Cho², M. Kim³, S. Yang³
 Korea Institute of Lighting Technology¹, Kwangwoon University², Mokpo University³

Abstract - 전극 양단에 캐패시터를 포함한 냉음극 형광램프와 외관전극의 용량성 결합으로 동작되는 외부전극 형광램프는 동일한 전류-전압 특성을 갖는다. 냉음극 형광램프 양단에 부착하는 캐패시터의 크기는 외부전극 형광램프의 전극의 길이와 등가적으로 대응되며, 캐패시터가 클수록 그리고 외관 전극의 길이가 길수록 저 전압에서 고 휘도를 얻는다.

즉, 외부전극 형광램프는 외관전극과 유리관벽이 자체적으로 캐패시터 역할을 하는 전기 용량성 결합 방전관(capacitive coupled discharge lamp)이며 유전층 장벽에 쌓이는 벽전하의 교번에 의한 방전을 특징으로 한다. 본 연구는 CCFL과 EEFL의 전류-전압 특성의 특성을 실험을 통하여 비교 분석한다.

1. 서 론

관경이 수 mm인 냉음극 형광램프(CCFL: Cold Cathode Fluorescent Lamp)는 LCD 백라이트의 광원으로 널리 사용하고 있다. 일반적으로 CCFL은 DC-AC 인버터(inverter)의 트랜스포머(transformer)를 통하여 교류 전압을 인가하여 구동한다. 이때 CCFL의 한쪽 전극에는 안정 캐패시터(ballast capacitor)를 부착하여 고 전압을 인가하고, 다른 쪽 전극은 트랜스포머의 2차측 코일과 연결하여 접지한다. 대개 CCFL을 복수개를 사용할 때는 각각에 안정 캐패시터를 부착하고 하나의 CCFL에 대하여 하나의 인버터로 개별 구동한다. 이러한 안정 캐패시터는 CCFL의 전류의 급격한 상승을 방지하기 위하여 부착한다. CCFL의 관내에 흐르는 전류량을 제어하기 위하여 CCFL의 어느 한쪽 전극에 안정 캐패시터나 안정 저항(ballast resistor)을 부착하여 램프에 흐르는 전류량을 제어한다. 그러나 교류형 전원으로 CCFL을 구동하는 경우는 안정 저항 자체의 전력 손실이 발생하므로 안정 캐패시터를 사용하는 것이 일반적이다.

외부전극 형광램프(EEFL; External Electrode Fluorescent Lamp)는 플라즈마 방전연구 초창기부터 장수명의 관점에서 대두되었으며[1-7], 이러한 램프는 주로 고주파(MHz)에 의한 구동이 연구되었다[1, 2]. 그 이유는 저주파에 의한 구동으로는 고휘도를 얻을 수 없었기 때문이었다. 최근까지도 LCD 백라이트용 광원으로 세관형 램프에 대하여 수 MHz의 고주파 구동으로 고휘도를 보고하였다[3, 4]. 이러한 고주파 구동 방식은 전자기파의 방사 문제뿐만 아니라, 고주파 발생 장치의 소형화가 불가능하여 LCD 백라이트용 광원으로 채용되기 어렵다. 그러나 최근에 이러한 세관형 EEFL을 100 kHz 이하의 저주파에 의한 구동으로 고휘도를 달성하였다[5-7]. 특히, EEFL은 다수 개를 병렬 연결하여 하나의 인버터로 구동이 용이하여 직하형 백라이트 광원으로의 가능성을 보였다[5-7].

외부전극 형광램프는 방전 공간 내부에 전극이 없으며, 유리관 양끝 외부에 설치된 외관전극의 용량성 결합에 의하여 작동된다. 냉음극 형광램프는 방전관 내부의 양 끝에 설치된 금속전극을 통하여 직접 전극으로 전류가 흐르는 직류형 방전인 반면에, 외부전극 형광램프는 방전관 내부의 양끝에 하전 입자가 쌓여서 플라즈마 전류가 방전관 내에 교차적으로 흐르는 교류형 방전이다.

2. 본 론

2.1. CCFL과 EEFL의 특성실험

본 연구에서는 그림 1(a)와 같이 CCFL의 전극 양단에 동일한 크기의 캐패시터를 부착하여 구동한다. CCFL의 종래 구동방법은 전극 한쪽은 캐패시터를 부착하고 다른 쪽은 접지하여 구동하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 그림 1(a)의 CCFL 양단에 동일한 크기의 캐패시터를 부착하여 구동하는 새로운 방법을 제시한다. 이와 같이 종래의 CCFL의 구동에 있어서, 어느 한쪽은 접지하고 다른 한 쪽은 고 전압을 인가하면, 고 전압이 인가되는 부분이 먼저 발광하고, 고 전압이 인가된 전극 부분이 상대적으로 쉽게 손상된다. 그러나 CCFL 양단에 캐패시터를 부착하고 동일한 크기의 전압을 인가하면, 방전 개시 점에서 램프 양끝에서 동시에 발광이 시작되며 보다 안정된 방전을 얻는다. CCFL의 양단에 캐패시터를 부착하여 구동하는 형태는 EEFL의 구동과 전기적으로 동가성을 갖는다.

그림 1(b)는 유리관 양단의 외부전극과 유리관벽이 캐패시터의 역할을 하는 EEFL의 구동 회로이다.

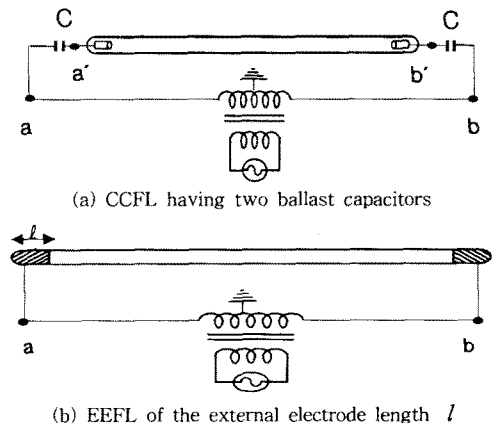


그림 1. Schematic drawings of the experiment circuits

본 실험에서 사용하는 방전 램프는 외경이 2.6 mm이고 두께 0.3 mm인 길이 376 mm의 보로실리케이트 유

리관이다. 유리관 내벽은 RGB의 삼원색 발광 형광체를 코팅한다. 방전 기체는 97%의 네온과 3%의 아르곤의 혼합기체를 80 Torr의 압력으로 주입하여 미량의 수은을 넣고 유리관 양끝을 봉입한다. 본 연구에서 CCFL과 EEFL은 전극의 유무를 제외하고 동일한 조건이다. CCFL은 그림 1(a)와 같이 동일한 크기의 캐패시터 C를 부착한다. 그림 1(b)의 EEFL은 양끝의 유리관에 알루미늄 재질의 외관 전극을 테이핑(taping) 방식으로 설치한다. 외관 전극의 길이는 l 이다.

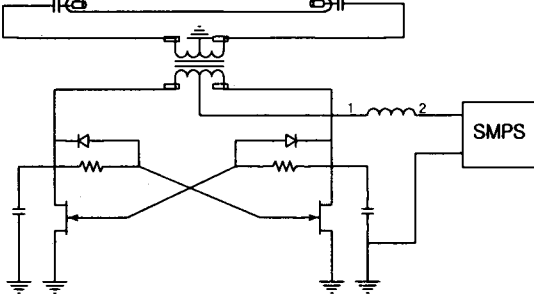


그림 2. Schematic circuit of the multi-vibrator inverter for the operation of CCFL and EEFL.

본 연구에서의 램프 구동용 인버터는 그림 2와 같은 다중 진동자(multi-vibrator) 인버터를 사용한다. 다중 진동자 인버터는 자력식 발진을 특징으로 하며, 트랜스 1차측 구동은 반파 정류된 정현파 형태이고 2차측은 정현파 형태를 갖는다. 이 인버터는 좌우 대칭으로 배치된 스위칭 소자(FET)와 중간탭을 갖는 트랜스, 초크 코일, 콘덴서로 구성된다. 초크 코일을 통한 전원은 트랜스 1차를 거쳐 각각의 콘덴서에 충전 혹은 방전의 역할을 담당한다. 이때 두 능동 소자의 스위칭을 위해 드레인 전압은 다이오드 및 병렬로 연결된 저항을 통하여 게이트를 ON/OFF 하게 된다. 스위칭 형태의 대칭적 구동으로 인하여 출력 파형은 초크 코일과 콘덴서의 공진형으로 정현파의 전류 공진을 가지며 따라서 2차측에 고압을 발생하도록 한다.

발진 주파수는 초크 코일 및 트랜스 1차의 L 성분과 EEFL 혹은 CCFL의 부하 용량성과 합성된 C 값에 의하여 결정되며 이때 부하 전류의 증가 필요성에 따라 C 값을 증가시켜 충방전 전류를 공급하도록 한다. 이때 C의 증가는 발진 주파수의 하락을 야기시키므로 이에 대응하는 초크의 L 값과 트랜스 1차의 권선수를 선택하여야 한다.

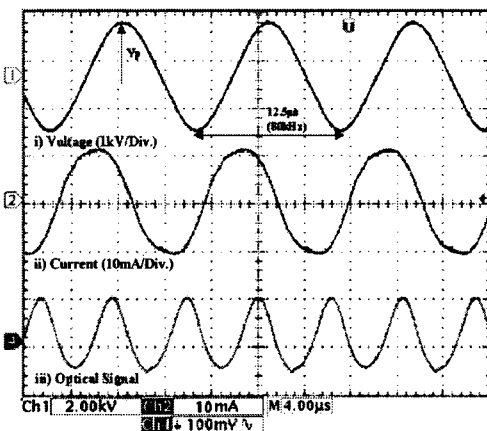
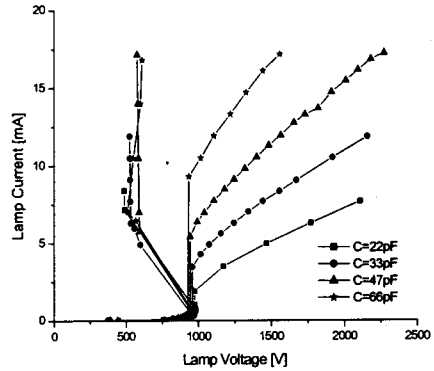


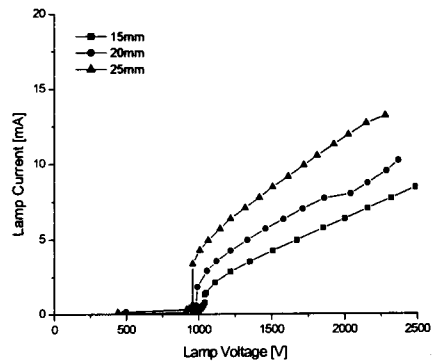
그림 3. Oscilloscope signals of the electrical voltage (i) and current (ii), and optical probe pulses (iii) operating with the multi-vibrator inverter.

EEFL 혹은 CCFL 램프가 (6 램프 이상) 병렬로 연결된 구조에 적합하며 양호한 효율을 갖는 인버터로서 동작한다. 그림 3은 다중 진동자 인버터를 사용하여 그림 1의 램프 구동에 따른 오실로스코프 파형이다. 그림 3에서 전압은 그림 1에서 점 a 혹은 b의 전압으로서 V_a 혹은 V_b 에 해당한다. 구동 파형에서 전압과 전류의 위상차는 약 $\frac{\pi}{2}$ 이다. 이는 자력식 발진에서 CCFL의 양단의 캐패시터와 EEFL의 자체 전기용량에 의한 것이다. 그림 3에서 광신호의 피크치는 전류의 피크치와 일치하는 것이 특징이다.

2.2. 실험결과 및 논의



(a) CCFL



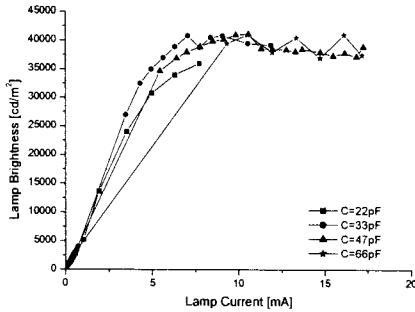
(b) EEFL

그림 4. Plots of current versus voltage

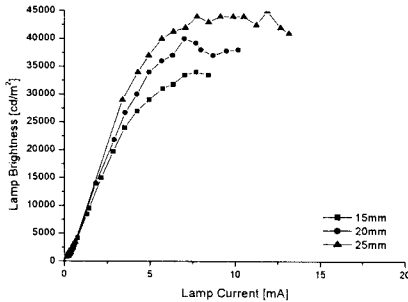
그림 4는 CCFL과 EEFL의 I-V 특성 곡선이다. CCFL의 특성 곡선인 그림 4(a)에서 전압은 그림 1(a)에서 CCFL의 양단의 캐패시터를 포함한 V_{ab} 와 캐패시터를 포함하지 않는 $V_{a'b'}$ 로 구분한다. CCFL의 양단에 부착하는 C는 22, 33, 47, 66 pF 이다. 그림 4(a)에서 I- $V_{a'b'}$ 는 CCFL의 관전류와 양단전압의 관계로서 급속 전류를 통하여 직접 전류가 흐르는 직류형 방전의 전형적인 형태이다. 점화 전압은 약 1kV로서 Townsend 방전 이후 음극 강화에 의한 음성 저항(negative resistance)의 영역을 거쳐서 정상 불꽃 방전(normal glow discharge) 영역에서 약 600V의 전압이 유지된다. 반면에 캐패시터를 포함한 I- V_{ab} 는 점화 전압 1kV에서 전류량이 급격하게 증가하고 이후 전압 증가에 따라서 관전류는 증가한다. 이때 CCFL 양단에 부착하는 캐패시터의 크기가 클수록 점화 전압에서의 전류량의 증가폭이 크다. 또한 C가 크면 상대적으로 관전류도 커진다. 이는 C가 크면

동일한 인가전압 V_{ab} 에 대하여 CCFL 양단에 인가되는 전압이 C에 인가되는 전압보다 크다. 이와 같이 C가 증가하면, 램프 양단에 인가되는 관전압(V_{ab})보다 C 자체에 인가되는 전압이 작아서 작은 구동전압에서 전류량이 커진다. 그림 4(b)는 EEFL에서 전극의 길이는 각각 15, 20, 25 mm 이다. 점화전압은 약 1kV이며, 이때 전류가 급격히 증가한다. 전압 증가에 따른 전류의 증가율은 전극 길이가 길수록 크다. 또한, 전극 길이가 크면 전류량도 크다. 이와 같이 EEFL의 점화 전압은 CCFL과 거의 동일하며, CCFL의 안정 캐패시터를 포함한 전압에 대한 전류의 증가 형태도 유사하다.

그림 4의 I-V 특성에서 C를 포함한 CCFL과 EEFL의 동작 전압(V_{ab})과 관전류의 특성은 동일하다. 즉, CCFL의 구동전압이 약 600V인 것은 안전 캐패시터를 제외한 전압이다. 구동 주파수는 CCFL의 경우 C값의 변화에 따라서 휘도 30,000 cd/m^2 일 때 각각 79, 80, 80, 81 kHz 이고 EEFL은 휘도 30,000 cd/m^2 일 때 전극길이 15, 20, 25 mm에 대하여 각각 78.5, 79.4, 80 kHz 이다.



(a) CCFL



(b) EEFL

그림 5. Plots of brightness versus current

그림 5는 CCFL과 EEFL의 관전류에 대한 휘도 곡선이다. 그림 5(a)에서 CCFL의 발광은 C가 66 pF 이면 관전류가 급격하게 변화하여 10.7 mA에서 40,000 cd/m^2 의 휘도이고, 전류 변화에 따른 휘도는 포화된다. 이때 17.5 mA로 증가하면 램프가 극히 불안정하고 급기야 전극부분이 녹아버린다. C가 22 pF으로 적으면 점화 전압에서 관전류의 증가율이 적다. 따라서 전류 상승에 대한 휘도의 상승이 연속적인 변화를 갖는다. 그러나 전류가 7.5 mA 이상에서는 인가전압이 2100V로 커지고 이 CCFL의 전극부분에 고열과 함께 손상된다. 따라서 CCFL이 10,000 cd/m^2 의 낮은 휘도에서 40,000 cd/m^2 포화점의 고휘도에 이르기까지 연속적인 변화를 갖는 휘도를 얻기 위하여 부착되는 캐패시터의 C값은 33 pF - 47 pF이 바람직함을 알 수 있다.

그림 5(a)의 결과로부터 램프 양단에 동일한 크기의 캐패시터를 부착한 CCFL은 캐패시터의 크기에 따라서

방전 특성이 달라진다는 것을 보여준다. CCFL의 양단에 22 pF에서 66 pF의 캐패시터를 부착한 경우 최고 휘도는 35,000 ~ 40,000 cd/m^2 을 갖는다. C = 22 pF에서는 점화 전압에서 전류량이 작고, 전압 상승에 대하여 램프 전류와 휘도가 연속적으로 상승한다. 그러나 C가 클수록 전압 상승에 따른 램프 전류와 휘도의 상승률도 증가한다. C가 66 pF이면 점화전압에서 전류량이 급격하게 증가하여 곧바로 최고 휘도에 도달하고, 이후 전압 상승에 대하여 불안정한 방전을 보인다. 즉, C가 크면 램프 전류와 휘도의 조정이 어렵다. 따라서 인가전압에 따라서 램프 전류와 휘도의 안정적인 조정을 위하여 C 값의 범위가 22 pF에서 47 pF이 적당하다. C 값이 22 pF보다 작으면 인가전압의 상승에 따른 전류와 휘도의 증가가 완만하지만, 최고 휘도 값이 작아진다. C가 66 pF 이상에서는 전압의 상승으로 곧바로 최고 휘도치에 도달하고 전류와 휘도의 조정이 매우 어렵다.

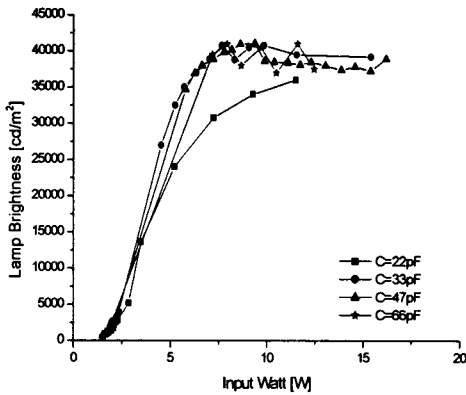
그림 5(b)의 EEFL은 전극길이에 따라서 포화되는 최고 휘도의 값이 달라진다. 그러나 EEFL의 휘도의 변화는 CCFL에 비하여 연속성을 보여준다. EEFL의 경우 포화점 이상의 고전류에서 EEFL은 핀홀이 발생한다. 핀홀이 발생하는 전류는 전극길이가 25 mm 이면 13.5 mA 이고, 전극길이가 15 mm이면 약 8.3 mA에서 핀홀이 발생한다. EEFL의 I-V 특성은 양단에 캐패시터를 포함한 CCFL과 동일한 특성을 갖는다. 암전류에서 약한 발광을 하고, CCFL과 동일한 점화 전압에서 전류량이 약간 증가하여 휘도도 증가하는 2차 발광을 보인다. 그러나 CCFL의 램프 양단의 전압-전류와 같은 음성 저항은 나타나지 않는다. 2차 발광의 점화 전압에서 전류량의 증가는 외부전극의 길이에 따라서 달라진다. 외부전극의 길이가 길수록 점화 전압에서의 전류 상승과 휘도 변화가 커진다. 또한 외부전극이 길수록 램프 전류량이 크고 휘도의 상승률도 커진다. 일반적으로 램프 전류와 입력 전력의 증가로 휘도가 증가하며 최고 휘도치에서 포화된다. 외부전극의 길이가 길수록 휘도의 최고치는 증가한다. 외부전극의 길이 15 mm - 25 mm에 대하여, 최고 휘도는 35,000 cd/m^2 - 45,000 cd/m^2 을 갖는다. 최고 휘도에서의 램프 전류는 7 mA - 12 mA이며, 입력 전력은 9 W - 13.5 W이다. 따라서 EEFL 구동을 위한 한계치는 최고 휘도에 도달하는 휘도인 램프 전류와 입력전력이다.

EEFL의 구동에서 입력 전력과 램프 전류를 휘도 최고치 이상으로 증가하면 EEFL의 외부전극에 핀홀(pin-hole)이 발생하여 램프는 꺼진다. 핀홀의 발생점은 외부전극의 길이에 따라서 다소 차이가 있다. 외부전극의 길이가 15 mm이면, 램프전류 8.3 mA와 입력 전력 13.4 W에서 핀홀이 발생한다. 외부전극의 길이가 25 mm로 길어지면 램프 전류 13.5 mA와 입력 전력 15.3 W에서 핀홀이 발생한다.

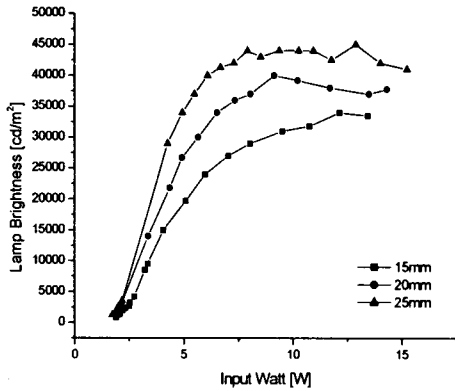
그림 6은 인버터에 입력되는 전력에 대한 휘도이다. 그림 6(a)에서 CCFL의 경우 C = 22 pF로 작은 경우를 제외하고 C = 33 pF 이상에서는 입력전력에 대하여 거의 동일한 휘도값을 보이며 6W 이상에서 포화 휘도가 약 30,000 cd/m^2 이다. 그림 6(b)에서 EEFL은 입력 전력에 대하여 전극 길이에 따라서 휘도가 달라진다.

이와 같이 전극 양단에 캐패시터를 부착하는 CCFL과 일정한 길이의 외부전극을 갖는 EEFL은 등가회로의 특성을 보인다. CCFL은 안전 캐패시터 용량이 클수록 동일한 인가 전압에 대하여 전류량이 크다. 즉, C가 클수록 구동전압은 낮아진다. 그러나 램프 휘도의 연속성을 위하여 최대의 C값에 존재한다. C값이 작으면 최고의 휘도를 얻지 못한다. 따라서 최고의 휘도값과 휘도의 연속성을 위하여 적절한 C값의 영역이 있다. 본 실험에서는 33 pF - 47 pF이 적당하다. 또한 CCFL은 포화 휘도 15 mA 이상의 전류에서 장시간 동작하면 전극부분에 고열이 발생하여 전극이 손상된다. EEFL도 전극의 길이가 길수록 구동전압은 낮고 동일한 전압에서 전류량이

크다. 또한 전극 길이가 길수록 포화 휘도의 값이 크다. 따라서 EEFL의 외부전극의 길이는 CCFL의 안전 캐패시터와 등가적인 휘도의 특성을 갖는다.



(a) CCFL



(b) EEFL

그림 6. Plots of brightness versus input power

3. 결 론

전극의 양단에 캐패시터를 부착한 냉음극 형광램프와 용량성 결합에 의한 외부전극 형광램프의 특성을 조사하였다. 램프의 길이가 376 mm이고 직경이 2.6 mm인 동일한 방전 기체가 주입된 CCFL과 EEFL을 비교하였다. 램프 양단에 동일한 크기의 캐패시터를 부착한 CCFL의 전류-전압 특성에서 램프 양단 전압은 전형적인 직류형 방전관의 타운젠트(Townsend discharge) 방전의 I-V 특성을 보인다. 즉, 램프 전압의 초기 상승으로 램프 전류는 증가하며(암전류에 의한 약한 발광), 점화 전압 약 1kV에서 전류량이 급격하게 증가하여 음성 저항(negative resistance)의 특성을 나타낸다. 이후 인버터의 입력 전압의 증가에 대하여 램프 양단 전압은 약 600 V로 유지되며, 전류량이 증가하는 정상 불꽃 방전(normal glow discharge) 영역을 보여준다. 한편, 전극 양단에 부착된 두 개의 캐패시터를 포함한 전압은 암전류 이후 점화 전압에서 급격하게 전류가 상승하고, 이후 음성 저항의 영역이 없이 전압 증가에 따라서 전류도 증가한다. 램프 양단에 동일한 크기의 캐패시터를 부착한 CCFL은 캐패시터의 크기에 따라서 방전 특성이 달라진다. CCFL의 양단에 부착하는 캐패시터의 크기가 작으면, 전류량이 작고, 전압 상승에 대하여 램프 전류와 휘도가 연속적으로 상승한다. 그러나 C가 클수록 전압 상승에

따른 램프 전류와 휘도의 상승률도 증가한다. C가 상당히 크면, 점화전압에서 전류량이 급격하게 증가하여 곧바로 최고 휘도에 도달하고, 이후 전압 상승에 대하여 불안정한 방전을 보인다. 즉, C가 크면 램프 전류와 휘도의 조정이 어렵다. 따라서 인가전압에 따라서 램프 전류와 휘도의 안정적인 조정을 위하여 C 값의 범위가 존재하며, 본 실험에서는 22 pF에서 47 pF가 적당하다. C 값이 22 pF보다 작으면 인가전압의 상승에 따른 전류와 휘도의 증가가 완만하지만, 최고 휘도 값이 작아진다. C가 66 pF 이상에서는 전압의 상승으로 곧바로 최고 휘도치에 도달하고 전류와 휘도의 조정이 매우 어렵다.

CCFL은 인버터의 입력 전력이 대개 8.5 W 일 때 최고 휘도를 갖는다. 최고 휘도 이후에 램프 전류가 12 mA 이상이거나 입력 전력이 약 13 W 이상이면 램프의 휘도는 최고치보다 오히려 작아지고 급기야 불안정한 방전에 의하여 램프가 깜박거리거나 전극 부분이 손상된다. 따라서 CCFL의 안정된 사용범위는 램프 전류 10 mA 이하, 입력 전력 10 W 이하이며, 이를 위하여 캐패시터는 22 pF에서 33 pF의 범위가 적당하다.

EEFL의 I-V 특성은 양단에 캐퍼시터를 포함한 CCFL과 동일한 특성을 갖는다. 암전류에서 약한 발광을 하고, CCFL과 동일한 점화 전압에서 전류량이 약간 증가하여 휘도도 증가하는 2차 발광을 보인다. 그러나 CCFL의 램프 양단의 전압-전류와 같은 음성 저항은 나타나지 않는다. 2차 발광의 점화 전압에서 전류량의 증가는 외부전극의 길이에 따라서 달라진다. 외부전극의 길이가 길수록 점화 전압에서의 전류 상승과 휘도 변화가 커진다. 또한 외부전극이 길수록 램프 전류량이 크고 휘도의 상승률도 커진다. 일반적으로 램프 전류와 입력 전력의 증가로 휘도가 증가하며 최고 휘도 값에서 포화된다. 외부전극의 길이가 길수록 휘도의 최고치는 증가한다.

결론적으로 EEFL은 양단에 캐패시터를 부착한 CCFL과 등가회로의 특성을 갖는다. EEFL의 외부전극과 유리관의 전기적인 용량은 CCFL에 부착한 캐패시터에 해당한다. 캐퍼시터가 클수록 낮은 전압에서 고 휘도를 얻을 수 있다. 그러나 캐퍼시터가 크면, 저 휘도에서 불안정하여 저 휘도의 구현이 어렵기 때문에 캐패시터의 크기에 한계가 주어진다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. J. Thomson, *Philosophical Magazine*, 32, pp. 32-445 (1891).
- [2] N. Tesla, *Electrical Engineer*, 7, pp. 549 (1891).
- [3] G. I. Babat, *J. IEE*, vol. 94, Pt. 3, pp. 27-37 (1947).
- [4] T. Shiga, K. Hashimoto, Y. Baba, S. Mikoshiba, S. Takaku, S. Nishiyama, *The Sixth Asian Symposium on Information display & Exhibition Proceedings, ASID'00, Xi'an, P. R. China, Oct. 18-21, pp. 165-169 (2000)*.
- [5] Y. Baba, M. Izuka, T. Shiga, S. Mikoshiba, and S. Nishiyama, *Society for Information Display, 2001 International Symposium, Digest of Technical Papers, Vol. 32, pp. 290-293 (2001)*.
- [6] D. G. Joh, D. H. Gill, H. S. Kim, Y. G. Kim, J. J. Ko, D. I. Kim, C. W. Lee, Y. H. Seo, E. H. Choi, G. S. Cho, *The Sixth Asian Symposium on Information display & Exhibition Proceedings, ASID'00, Xi'an, P. R. China, Oct. 18-21, pp. 470-474 (2000)*.
- [7] H. Kim, D. Joh, Y. Kim, J. Ko, D. Kim, C. Lee, E. Choi, G. Cho, B. Hong, H. Sohn, and B. Yu, *Society for Information Display, 2001 International Symposium, Digest of Technical Papers, Vol. 32, pp. 687-689 (2001)*.
- [8] N. Kwon, Y. Kim, H. Kim, S. Kim, D. Gill, T. Cho, Y. Kim, J. Ko, E. Choi, G. Cho, B. Hong, H. Sohn, and B. Yu, *Proceedings of the 21st International Display Research Conference in conjunction with the 8th International Display Workshops, Nagoya, Japan, pp. 625-628 (2001)*.