

외부전극 형광램프의 발광 및 플라즈마 특성

안상현·이민규·정종문·김정현·유동근·구제환·강준길·홍병희·최은하·조광섭*

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2007년 3월 30일 받음)

외부전극 형광램프(EEFL)에서 빛의 방출 전파 신호의 관측법에 의하여 플라즈마의 전자 온도와 밀도를 진단하는 새로운 방법을 소개한다. 직경 4.0 mm이고 램프 길이 860 mm인 37인치 LCD-TV용 외부전극 형광램프에 대하여, 전압 인가 방식에 따른 두 가지의 구동법에 의한 발광 형태와 플라즈마의 특성을 조사한다. 램프 양단에 고전압을 인가하는 구동 방식에서, 빛은 고전압이 인가된 램프 양 끝에서 중앙으로 빛의 방출이 전파되며, 램프 길이 전체에 대하여 휘도가 균일하다. 램프 한쪽에 고전압을 인가하고 다른 한쪽은 접지한 구동에서, 빛의 방출은 고전압이 인가된 전극에서 접지된 전극 방향으로 전파되며, 고전압 쪽의 휘도가 높고 접지 쪽의 휘도가 낮아 램프 길이 방향으로 휘도가 불균일하다. 이러한 발광 전파 신호로부터 전자의 표류 속도를 계산하여, 전자의 온도와 밀도를 얻는다. 외부전극 형광램프의 사용 휘도의 영역인 10,000~15,000 cd/m²에 대하여, 전자 온도 (kT_e)는 1.3~2.7 eV, 플라즈마의 밀도 (n_e)는 $(1.6\sim3.6)\times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 를 얻었다.

주제어 : 방전, 플라즈마, 플라즈마 진단, 외부전극 형광램프(EEFL), LCD, 백라이트(Backlight)

I. 서 론

외부전극 형광램프(External Electrode Fluorescent Lamp: EEFL)와 이들을 채용한 백라이트 유닛(Backlight Unit)은 2000년부터 대면적 액정 디스플레이(Liquid Crystal Display, LCD) 백라이트의 새로운 기술로 소개되었다 [1-3]. 최근에 외부전극 형광램프의 휘도 및 효율이 향상되어 현재 널리 사용되고 있는 냉음극 형광램프(Cold Cathode Fluorescent Lamp, CCFL)의 성능과 대등하게 되었다. 특히, EEFL은 CCFL의 구동과 동일한 100kHz 이하의 구동 주파수를 사용하여 고 휘도를 실현하고, 다중의 EEFL을 배치한 백라이트를 하나의 인버터로 구동할 수 있다. 그 외에 EEFL은 전극이 방전 공간 내부에 없기 때문에 수명이 유리하며, 제조상의 수월성과 저렴한 가격 등의 장점이 있다. 최근에 EEFL-백라이트를 채용한 32인치 및 37인치 LCD-TV가 상용화되었다.

EEFL은 교류 전원에 의한 벽전하(wall charges)의 교차에 의하여 발광한다. EEFL의 양단 외부전극에 전압을 인가하는 방식에 따라서 발광의 형태가 달라진다. 램프의 구동 방식에 따른 발광의 형태는 백라이트의 성능에 영향을 미치는 주요한 변수가 될 수 있다. 최근에 EEFL-백라이트의 구동 기술은 LCD 화면과 연계하여 연구되고 있다. 이러한 기술의 목표는 LCD-TV의 전체 소모 전력의 90%를 차지하는 백라이트의 소모 전력을 줄이는 것이다. 이를 위하

여 EEFL의 발광 특성을 이해하고 성능 향상을 위한 관련 기술의 개발이 필요하다.

본 연구는 EEFL 및 CCFL과 같이 직경이 수 mm인 세관의 구동 방법에 따른 발광 특성과 방전관 내부에 생성된 플라즈마의 특성을 조사하는 것이다. EEFL과 CCFL의 구동은 고전압의 인가 방식에 따라서 두 가지 방식을 사용한다. 양단에 고전압을 인가하는 'Center Balance Swing: CBS 구동'과 한 쪽에 고전압을 인가하고 다른 쪽은 접지하는 '종래 구동'이다. 이들 두 가지 방식에 따른 발광 형태를 관측하고, EEFL의 플라즈마의 특성을 규정하는 기초 변수인 플라즈마의 전자 온도와 밀도를 조사한다.

EEFL과 같이 관경이 수 mm인 세관에서의 플라즈마의 전자 온도와 밀도에 대하여 실험적인 제측 결과는 보고된 바 없다. 일반적으로 글로우 방전(glow discharge)의 특성을 갖는 플라즈마에 대하여 전자의 온도와 플라즈마의 밀도가 각각 $kT_e \sim 2 \text{ eV}$ 및 $n_e \sim 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 로 알려져 있다 [4,5].

실험적으로 전자의 온도와 밀도를 진단하는 방법은 플라즈마 내부에 탐침을 설치하거나 특별하게 디자인하여 설치한 전극으로부터 전기적인 신호를 분석하는 것이다. 이러한 전기적인 신호로부터 전자의 온도를 계산하거나 혹은 전자의 표류 속도(drift velocity)나 mobility를 얻는다 [6,7]. 그리고 전자의 표류 속도로부터 전자의 온도와 밀도를 계산한다. 그러나 EEFL과 같이 관경이 수 mm인 세관의 내부에 진단용 전극이나 탐침을 설치하는 것은 어려움

* [전자우편] gscho@kw.ac.kr

이 있다.

본 연구에서는 EEFL에서 전자의 표류 속도를 결정하는 새로운 실험적인 진단법을 소개한다. EEFL의 유리관 길이 방향의 양극으로부터 빛의 방출 신호를 계측하는 방법을 사용한다. 이 방법은 EEFL과 같은 세관의 내부에 탐침을 삽입하는 직접적인 방법이 아니라 램프 외부에서 빛의 발광 신호를 계측하는 간접 진단법으로서 최초의 방법이다.

II. EEFL의 광 신호 계측

상용화된 외부전극 형광램프(EEFL)는 대개 주파수 65 kHz의 교류 전압으로 구동된다. EEFL의 방전은 외부전극과 유리관 벽이 자체적으로 커패시터 역할을 하는 전기 용량성 결합 방전(Capacitive Coupled Discharge)이다. 한 쪽 전극에 positive 전압이 인가되었을 때, 유리관 내벽에 전자(벽전자)가 축적된다. 극성이 positive에서 negative로 변환될 때, 이들 벽전자들은 플라즈마 공간으로 빠르게 방출되어 벽전하의 교차에 의하여 발광한다. 이러한 전자

의 중성 원자와의 충돌로 유리관 내에 플라즈마가 발생되고, 발생된 플라즈마로부터 자외선이 방출되며, 자외선이 EEFL 내벽에 도포된 형광체를 발광시킨다. 따라서 발광의 방전관 길이 방향의 전파(propagation)는 전자의 흐름과 관계된다. 이러한 전자의 흐름으로부터 EEFL의 플라즈마 공간에서 플라즈마의 기초 변수인 밀도와 전자 온도를 규명한다. 본 절에서는 램프의 길이 방향의 각각의 위치에서 발광 신호를 계측하고 이로부터 발광의 전파 시간을 측정한다.

그림 1은 EEFL의 3개의 지점에서 광 신호를 계측하기 위한 회로의 개념도이다. 램프의 구동은 일반적으로 사용되는 2가지 방법을 사용한다. 그림 1(a)의 CBS 구동은 트랜스포머의 2차측 코일 중앙이 접지되고, 램프 양 끝의 전극에 각각 고전압이 인가된다. 램프 양단에 각각 $+V_0/2$ 및 $-V_0/2$ 가 교차 인가된다. 양 전극의 전압 차는 V_0 이다. 그림 1(b)의 종래 구동은 한 쪽 전극에 $\pm V_0$ 전압이 인가되며, 다른 쪽 전극은 접지된다. AC 전원으로서는 DC-AC 인버터를 사용하며, 구동 주파수는 약 65 kHz이다. 광 신호는 유리관의 ①, ②, ③ 지점에서 측정한다. 램프의 측정 지점 ①과 ③은 외부전극으로부터 각각 10 mm 떨어진 지

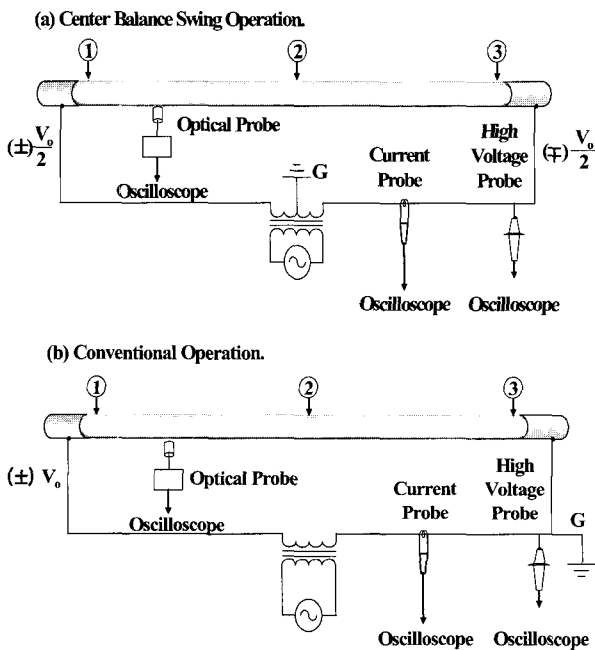


그림 1. EEFL의 구동 방식에 따른 광 신호 측정 위한 회로도이다. (a)는 양단 전극에 고전압을 인가하는 CBS 구동. (b)는 왼쪽 전극에 고전압 $\pm V_0$ 가 인가되고, 오른쪽 전극은 접지된 종래구동. 광 신호는 램프 양단 ① 및 ②, 그리고 램프 중앙 ③의 위치에서 광 프로브에 의하여 계측한다.

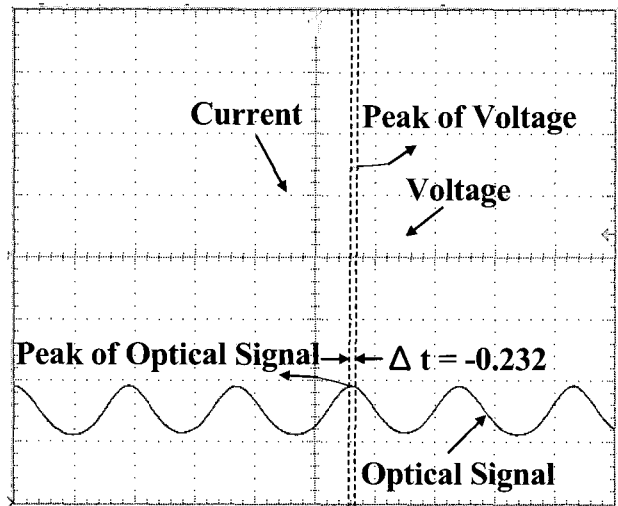


그림 2. 램프의 휘도가 $15,000 \text{ cd/m}^2$ 일 때, 전류 및 전압, 그리고 광 신호의 오실로스코프 파형이다. 전류와 전압은 중앙의 가로 선을 기준으로 극성이 교차하는 정현파이다. 광 신호는 바닥의 선을 기준으로 맥류파의 형태이다. 광 신호는 그림 1(a)의 측정지점 ①에서 측정하였다. 전압은 +극성의 최고치와 -극성의 최저치의 시간 근처에서 각각 광 신호의 최고치를 나타낸다. 전압 신호의 최고치의 시간을 기준 시간 $0 \mu\text{s}$ 로 하여, 광 신호 최고치의 시간과의 시간차는 $-0.232 \mu\text{s}$ 이다.

점이다. 측정지점 ②는 램프의 중앙이다. 램프의 각 지점의 광 신호를 계측하기 위하여 광섬유(optical fiber)를 통하여 빛을 전압으로 변환하는 광센서 증폭기를 사용한다.

본 실험에서 사용한 방전 램프는 외경이 4.0 mm, 두께가 0.5 mm, 그리고 길이 860 mm의 보로실리케이트 유리이며, 37인치 LCD-TV용 광원이다. 유리관 내벽은 RGB 삼원색의 형광체로 코팅되어 있다. 방전기체는 네온과 아르곤이 97:3의 비율로 혼합된 기체이다. 또한 방전 램프의 내부압력은 35 Torr이며, 미량의 수은을 포함한다. 유리관 양 끝의 외부전극은 금속 paste로 코팅하여 형성하였다.

그림 2는 휘도가 15,000 cd/m²일 때, 램프의 전압, 전

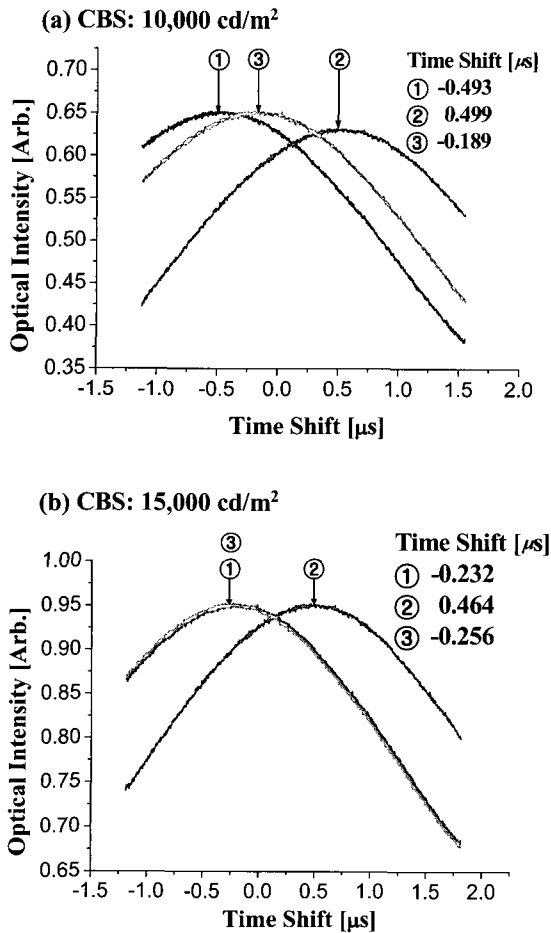


그림 3. CBS 구동에 의한 측정지점 ①, ②, ③의 광 신호이다. 발광의 전파는 고전압측인 ①과 ③에서 중앙인 ②로 전파한다. (a)는 램프의 평균 휘도가 10,000 cd/m²일 때이고, (b)는 휘도가 15,000 cd/m²일 때의 광 신호이다. (a)에서 각 측정지점에서의 전압의 최고치 시간과의 시간차 Δt 는 -0.493, +0.499, -0.189 (μs)이다. (b)에서 각 측정지점의 시간차 Δt 는 -0.232, +0.464, -0.256 (μs)이다. 이들 광 신호의 시간차를 통해 램프 길이 방향의 발광 전파 시간을 알 수 있다.

류, 그리고 광 신호를 나타내는 오실로스코프 신호이다. 구동 주파수는 65 kHz이며, 한 주기는 15 μs 에 해당한다. 전압과 전류 신호의 위상차(phase shift)는 약 60°이다. 위상차는 램프 전기용량 C와 램프 저항 R의 RC-지연 시간으로부터 발생한다. 오실로스코프 상의 광 신호의 주파수는 130 kHz이다. 광 신호는 전압과 전류 주파수의 2배이다. 이는 전압의 +극성의 상승이나 -극성의 하강 시에 각각 빛을 방출하기 때문이다. 그림 2의 광 신호는 그림 1(a)의 측정지점 ①에서 측정하였다. 광 신호의 최고치는 전압 신호의 최고치로부터 -0.232 μs 만큼의 시간차를 갖는다.

그림 3은 외부전극 형광램프(EEFL)를 CBS 구동으로 구동하였을 때, 측정된 전압 신호와 그림 1에 나타난 측정지점 ①, ②, ③에서의 광 신호이다. 그림 3(a)는 EEFL의 길이 방향의 평균 휘도 10,000 cd/m²에 대한 광 신호이며, 그림 3(b)는 평균 휘도 15,000 cd/m²일 때이다. 이 구동법에서는 램프의 휘도가 길이 방향으로 균일하여 램프의 측정 위치에 따라서 광 신호의 높이가 거의 같다. 그림 3에서 전압의 최고치의 시간을 기준시간 0 μs 로 하여, 광의 최고치와의 시간차(time shift)를 Δt 로 나타낸다. 그림 3(a)에서 전압의 최고치 시간과 광의 최고치 시간의 시간차 Δt 는 측정지점 ①, ②, ③에서 각각 -0.493, +0.499, -0.189(μs)이다. 그림 3(b)의 각 측정지점의 시간차는 -0.232, +0.464, -0.256 (μs)이다. 이와 같이 빛의 방출은 고전압이 인가되는 시점에 램프 양단에서 시작하여 램프의 중앙으로 전파된다. 따라서 램프 전체길이의 반인 ①~②, ②~③에서 발광 전파의 시간은 휘도 10,000 cd/m²에서 각각 0.992, 0.688 (μs)이며, 평균 시간은 0.840 μs 이다. 휘도 15,000 cd/m²에서는 각각 0.696, 0.720 (μs)이며, 평균 시간은 0.708 μs 이다. 휘도가 10,000 cd/m²일 때와 15,000 cd/m²일 때의 램프 전류 (I_{rms})는 각각 5.35, 8.94 (mA)이고, 램프 양단에 인가된 전압($V_{rms}=V_o/2$)은 각각 857, 1,032 (V)이다.

그림 4는 종래 구동에서 램프 위치별 광 신호이다. 위치별 광 신호의 시간은 측정 위치 ①, ②, ③의 순서이다. 이는 고전압이 인가된 위치 ①이 먼저 발광하고 이어서 접지 쪽으로 발광이 전파된다. 한 쪽 전극에 고전압이 인가되고, 다른 쪽 전극이 접지된 구동에서 램프의 길이 방향의 휘도의 불균형이 심하다. 고전압 위치의 휘도가 높고, 접지 쪽으로 갈수록 휘도가 낮아진다. 그림 4(a)는 위치별 평균 휘도가 10,000 cd/m²일 때의 광 신호이다. 전압 최고치 시간

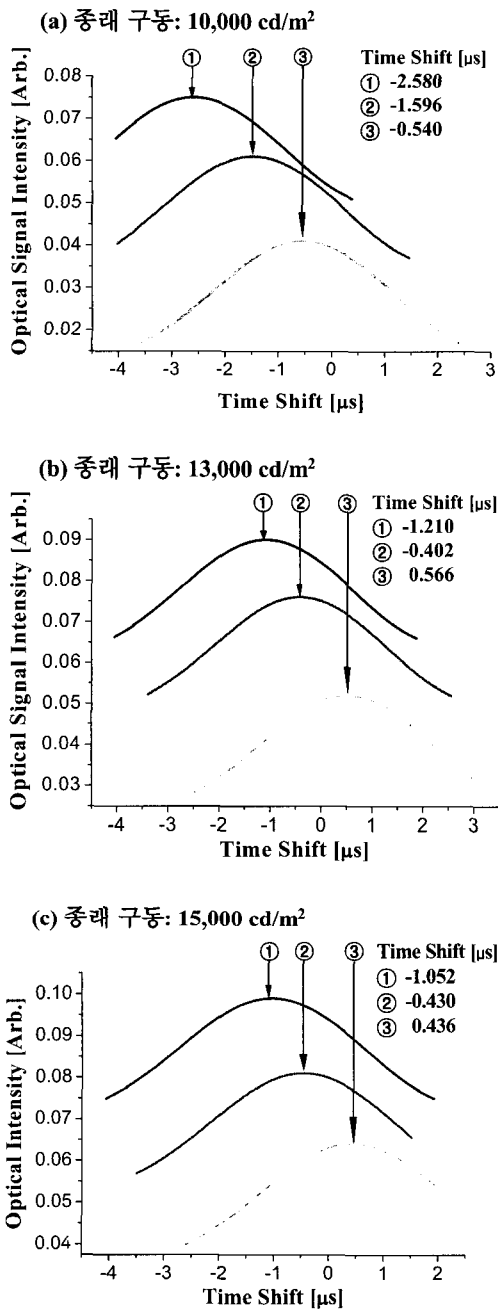


그림 4. 종래 구동에서 측정지점 ①, ②, ③의 광 신호이다. 발광의 전파는 고전압측인 ①에서 시작하여 ②를 거쳐서 ③의 위치로 전파한다. (a)는 평균 휘도가 10,000 cd/m²이다. (b)는 평균휘도가 13,000 cd/m²이며, (c)는 평균 휘도가 15,000 cd/m²이다. 고전압이 인가된 쪽인 ①의 위치의 휘도가 가장 높고, ② 및 ③의 순으로 휘도가 낮아 휘도의 불균일이 심하다. 전압의 최고치의 시간을 0으로 하여, 광 신호의 최고치의 시간과의 시간차 Δt는 각 측정지점에 대하여 (a)는 각각 -2.580, -1.596, -0.540 (μs), (b)는 각각 -1.210, -0.402, 0.566 (μs), 그리고 (c)는 각각 -1.052, -0.430, 0.436 (μs)이다. 이들 광 신호의 시간차를 통해 램프 길이 방향의 발광의 전파 시간을 알 수 있다.

과 광 신호의 최고치 시간의 시간차 Δt는 측정지점 ①, ②, ③에서 각각 -2.580, -1.596, -0.540 (μs)이다. 따라서 ①~③ 사이의 발광 전파 시간은 2.040 μs이다. 측정지점 ①, ②, ③에서 휘도는 각각 16,010, 9,355, 6,797 (cd/m²)로서 휘도가 불균일하다. 이때의 램프 전류(I_{rms})는 10.93 mA이고, 고전압이 인가된 전극의 전압(V_{rms})은 2,245 V이다.

그림 4(b)는 램프의 평균 휘도가 13,000 cd/m²일 때의 광 신호이다. 전압의 최고치 시간과의 시간차 Δt는 측정지점 ①, ②, ③에서 각각 -1.210, -0.402, 0.566 (μs)이다. 따라서 램프 양단의 발광 전파 시간은 1.776 μs이다. 측정지점 ①, ②, ③에서 휘도는 각각 17,310, 12,750, 10,180 (cd/m²)이다. 램프 전류(I_{rms})는 12.82 mA이며, 전압이 인가된 전극의 전압(V_{rms})은 2,545 V이다.

그림 4(c)는 램프의 평균 휘도가 15,000 cd/m²일 때의 광 신호이다. 전압의 최고치 시간과의 시간차 Δt는 측정지점 ①, ②, ③에서 각각 -1.052, -0.430, 0.436 (μs)이다. 램프 양단의 전파 시간은 1.488 μs이다. 측정지점 ①, ②, ③에서 휘도는 각각 18,510, 15,360, 11,640 (cd/m²)이다. 램프 전류(I_{rms})는 15.46 mA이며, 전압이 인가된 전극의 전압(V_{rms})은 2,728 V이다.

그림 3의 CBS 구동에서, 발광의 전파는 유리관의 양 끝에서 중앙으로 진행된다. 평균 휘도가 각각 10,000과 15,000 cd/m²일 때, 램프 전체 길이 860 mm에서 발광 시간과 전파 속도 (u_p)는 각각 0.840, 0.708 (μs)과 4.70×10⁵, 5.58×10⁵ (m/s)이다. 그림 4의 종래 구동에서, 빛은 고전압이 인가된 전극에서 접지된 전극으로 전파된다. 평균 휘도가 각각 10,000, 13,000, 15,000 cd/m²일 때, 빛이 유리관 전체 길이 860 mm에 전파되는 시간은 각각 약 2.040, 1.776, 1.448 (μs)이다. 전파 속도 (u_p)는 각각 3.87×10⁵, 4.45×10⁵, 5.46×10⁵ (m/s)이다. 두 가지 구동방법 모두에서 휘도가 증가할수록 빛 발광의 전파 시간이 짧아지고 전파 속도는 빨라진다.

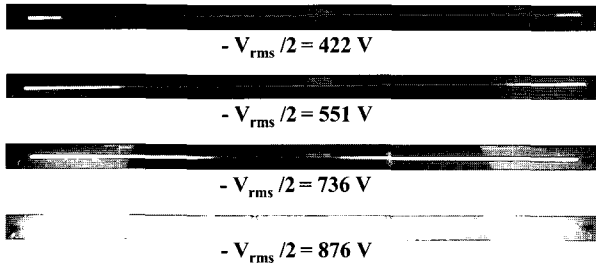
III. 방전모우드 및 전자의 운동

3.1 방전모우드

그림 5는 두 가지 구동 방법으로 EEFL을 구동하였을

때, 구동 전압의 증가에 따른 발광과정을 나타낸 사진이다. 그림 5(a)의 CBS 구동에서, 전극에 인가된 전압 $V_0/2$ 는 각각 442, 551, 736, 876 (V)이다. 낮은 전압에서 램프의 빛은 램프 양 전극 주변에서 먼저 발광한다. 인가되는 전압이 증가함에 따라, 발광영역은 램프 양 전극에서 중앙으로 확대된다. 최종적으로 타운젠드 방전 전압 이후, 전압이 876 V일 때, 발광영역은 램프 전체로 확대된다. 램프의 전체 길이에 대하여 휘도가 비교적 균일하다. 그림 5(b)의 종래 구동은 고전압이 인가된 전극에서 먼저 발광하기 시작하며, 이때 전압 V_0 은 490 V이다. 램프 중앙까지 발광영역이 확대되었을 때, 전압 V_0 은 1,036 V이다. 인가된 전압이 1,687 V일 때, 발광영역은 램프 전체로 확대된다. 그러나 램프의 오른쪽 전극영역은 방전 프로세스가 아직 타운젠드 방전에 도달하지 못했기 때문에 여전히 왼쪽 전극영역 보다 밝지 않다. 그러나 종래 구동에서는 타운젠드 방전 전압인 1,687 V를 넘어서도 램프는 발광영역 전체에 대하여 휘도가 균일하지 않다. 고전압이 인가된 쪽의 휘도가 높고, 접지 쪽 방향이 휘도가 낮다. 보통 종래의 구동 방식에서도 램프의 길이가 짧은 경우는 휘도가 비교적 균일하다. 그러나 본 실험과 같이 램프의 길이가 긴 경우에는 길이 방향으

(a) Center Balance Swing Operation.



(b) Conventional Operation.

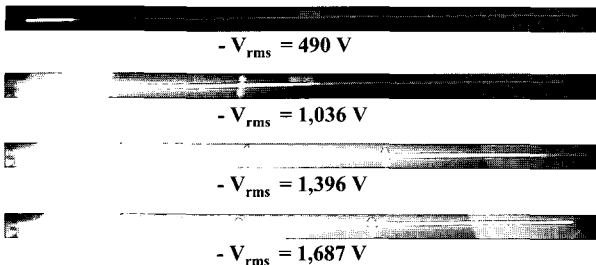


그림 5. (a)는 종래 구동에 의해 동작하는 EEFL의 발광과정이고, (b)는 CBS 구동에 의해 동작하는 EEFL의 발광과정이다. CBS 구동은 빛이 램프 양 전극에서 중앙으로 전파된다. 종래 구동은 빛이 구동전압이 증가함에 따라 전압이 인가된 전극에서 접지된 전극으로 전파된다.

로 휘도의 불균일이 심하다.

3.2 발광 전파 및 전자의 운동

그림 6은 CBS 구동에서 빛 발광 전파와 전자의 운동을 나타내었다. 그림 6(a)와 6(b)에서 빛은 동시에 양 전극 영역에서 발광하기 시작하며 램프 중앙으로 전파한다. 이러한 빛의 전파를 전자의 움직임으로 설명하였다. 전극에 인가된 극성이 positive일 때, 전극 주변의 전자들이 먼저 가속되어 움직이기 시작하고 이어서 램프 길이 방향으로 전자들이 따라서 이동한다. 전극에 인가된 전압의 극성이 negative일 때, 전자들은 전극으로부터 가속되고 접지 쪽으로 이동한다. $+V_0/2$ 의 전압이 왼쪽 전극에 인가되고 $-V_0/2$ 의 전압이 오른쪽 전극에 인가되었을 때, 측정지점 ①과 ③에서 전자들은 왼쪽으로 가속되어 이동하기 시작하고, 이어서 다른 위치의 전자들도 왼쪽으로 이동한다. 극성이 바뀌었을 때, 전자 이동의 방향은 반대로 바뀌며, 양 전극 주변의 측정지점 ①과 ③에 있는 전자들이 먼저 가속되며 움직이는 것은 동일하다. 그림 6(c)는 램프 내부의 전압분포(potential profile)의 개념도이다. 전위는 고전압이 인가된 양 전극에서 램프 중앙으로 갈수록 빠르게 감소한다. 이때 전위의 크기는 같으며 극성은 서로 반대이다.

그림 7의 종래 구동은 발광 전파와 전자의 이동방향을 나타내었다. 빛은 고전압이 인가된 전극 영역에서 접지된

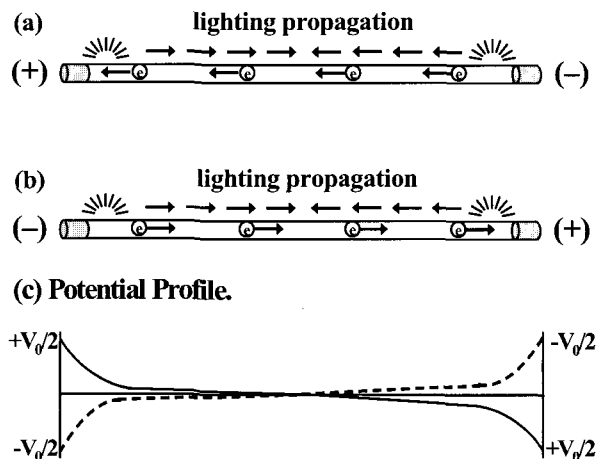


그림 6. CBS 구동에서 빛 발광전파와 전자의 운동을 나타내었다. (a)와 (b)에서 빛은 동시에 양 전극 영역에서 발광하기 시작하고, 램프 중앙으로 전파한다. 이는 고전압이 인가되는 전극 부분의 전자가 먼저 움직이고, 이어서 저 전압 쪽의 전자들이 움직이기 때문이다.

전극 방향으로 전파한다. 빛의 전파 방향은 전압의 극성이 변하여도 동일하다. 마찬가지로 전자의 움직임도 고전압 쪽에 위치한 전자가 먼저 가속을 받아서 움직이고, 이어서 다른 위치의 전자들이 움직인다. 이러한 전자의 움직임이 결과적으로 발광 전파의 방향이다. 그림 7(a)와 7(b)에 고전압의 양 극성에 따른 발광의 전파와 전자의 움직임을 나타내었다. 그림 7(c)는 potential profile이다.

IV. 전자 온도와 플라즈마 밀도

본 절에서는 앞의 2절에서 측정한 발광 전파 속도 u_p 와 전자의 표류 속도(drift velocity) u_d 의 관계를 얻는다. 그리고 전자의 표류 속도 u_p 와 전자의 열속도(thermal velocity) u_{th} 의 관계로부터 전자의 온도(kT_e)를 계산한다. 플라즈마의 밀도(n_e)는 램프의 전류 밀도(J)와 전자 표류 속도와의 관계로부터 얻어진다. 이들 값들이 램프의 구동 방법과 휘도변화에 따라서 어떠한 값을 갖는지를 알아본다.

앞의 2절에서 측정한 발광 전파는 전자의 표류에 의한 것이다. 즉, 전극에 고전압이 인가되면 고 전기장의 신호가 발생하고 이는 전자의 표류에 유발하여 빛은 방출되고 전파된다. 이때 얻어진 발광의 전파 속도는 전자의 표류 속도와 같다. 즉, 발광의 전파 속도와 같은 전자의 표류 속도는 그림 3~4에서와 같이 전압의 최고치가 인가된 짧은 시간

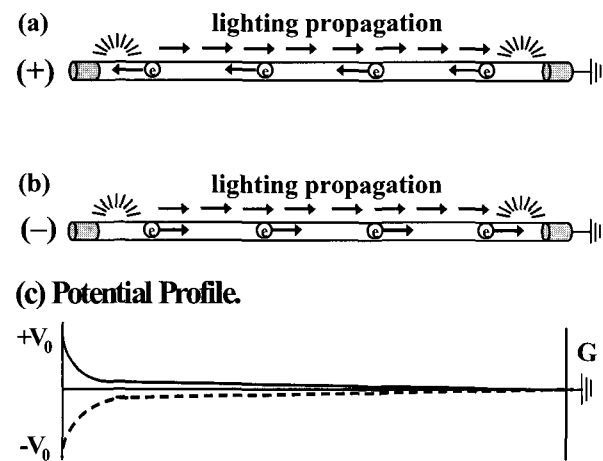


그림 7. 종래 구동은 빛 발광전파와 전자의 이동방향이 동일하다. 빛은 고전압이 인가된 전극 영역에서 접지된 전극 방향으로 전파된다. 발광의 전파는 전자의 표류에 의한 것으로서, 고전압측의 전자가 먼저 가속되고 이어서 접지 전압 쪽의 전자들이 표류한다.

(약 1 μ s)동안의 속도이다. 즉, 램프의 외부전극에 전압 $V(t)=V_0\sin\omega t$ 가 인가되면, 전압 최고치 $\pm V_0$ 에 해당하는 전자의 표류 속도는 광의 전파 속도인 $\pm u_p$ 이다. 전압이 0V이면, 전자의 표류 속도도 거의 0에 해당한다. 따라서 전압에 대응하여 전자의 표류 속도를 $u_d(t)\sim u_p\sin\omega t$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로 실효 전압 V_{rms} (root mean square)은 전압의 최고치 V_0 와 $V_{rms}=V_0/\sqrt{2}$ 의 관계가 있다. 마찬가지로 전자의 표류 속도(u_d)는 실효치 $\langle u_d^2(t) \rangle^{1/2}$ 로부터 광의 전파 속도(u_p)와 $u_d=u_p/\sqrt{2}$ 의 관계로 주어진다.

한편, 전자의 열 속도(u_{th})와 전자의 표류 속도(u_d)의 관계는 다음과 같다. 전기장에 의해 전자들이 가속되었을 때, 전자의 전파 속도는 유리관 내에 있는 가스 입자들 간의 충돌로 인해 제한된다. 전자 온도는 $kT_e=\kappa \lambda e\langle E \rangle$ 이다[8]. 여기서 κ 는 열화 상수(thermalization form factor)이고, λ 는 전자의 평균 자유행정이다. 전자의 표류 속도는 운동 방정식에서 $u_d=e\langle E \rangle/mv_c$ 이고 [11], 전자의 중성원자와의 충돌 주파수 $\nu_c=u_{th}/\lambda$ 로부터, $kT_e=\kappa mu_d u_{th}$ 이다. 여기서

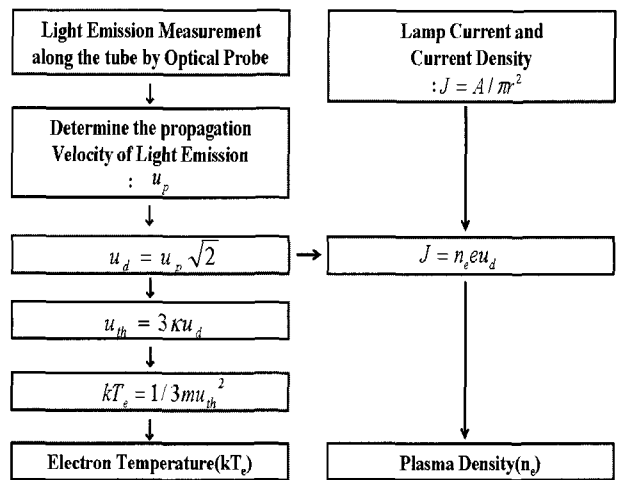


그림 8. 전자 온도와 플라즈마의 밀도를 얻는 방법에 대한 알고리즘을 정리하였다. 전자 온도를 얻는 방법은 다음과 같다. 먼저, 램프 길이 방향에 대한 각 위치에서 광 프로브(optical probe)를 사용하여 램프의 발광에 의한 광 신호를 오실로스코프로 측정한다. 그 다음으로 램프 위치별 광신호의 시간차로부터 발광 전파 속도 u_p 를 측정한다. 전자의 평균 표류 속도(rms 값)는 $u_d=u_p/\sqrt{2}$ 이다. 마지막으로 전자의 열 속도와 표류 속도와의 관계, $u_d=3\kappa u_{th}$ 로부터 전자 온도 $kT_e=mu_d^2/3$ 를 계산한다. 플라즈마의 밀도를 얻는 방법은 다음과 같다. 먼저, 램프의 관전류를 측정한다. 측정된 전류값으로부터 전류 밀도 J 를 얻는다. 얻어진 전류 밀도 $J=n_e eu_d$ 에 u_d 값을 대입하여 플라즈마의 밀도 n_e 를 얻는다.

열은 kT_e 를 전자의 열에너지와 운동에너지의 관계인 $3kT_e/2 = mu_{th}^2/2$ 에 대입하면, 전자의 열 속도 u_{th} 와 표류 속도 u_d 의 관계는 $u_{th} = 3\kappa u_d$ 를 얻는다. 여기서 열화 상수 κ 는 대개 1이다. 전자의 열 속도와 표류 속도는 에너지의 획득과 손실의 균형으로부터 위와 유사한 관계를 얻을 수 있다 [12-14].

앞의 2절에서 얻어진 광 신호의 전파 속도로부터 전자의 표류 속도와 전자의 온도를 구한다. CBS 구동에서 휘도가 각각 10,000과 15,000 (cd/m^2)일 때, 전자의 표류 속도는 $u_d = u_p/\sqrt{2}$ 로부터 각각 3.32×10^5 , 3.95×10^5 (m/s)이다. 열 속도는 $u_{th} = 3u_d$ ($\kappa=1$)로 부터 각각 9.96×10^5 , 1.19×10^6 (m/s)이고, 전자 온도는 각각 1.9, 2.7 (eV)이다.

종래 구동 방식에서 휘도가 각각 10,000, 13,000, 15,000 (cd/m^2)일 때, 전자의 표류 속도는 각각 2.74×10^5 , 3.15×10^5 , 3.86×10^5 (m/s)이다. 전자의 열 속도는 각각 8.22×10^5 , 9.45×10^5 , 1.16×10^6 (m/s)이고, 전자 온도는 각각 약 1.3, 1.7, 2.6 (eV)이다.

플라즈마 밀도는 전류밀도 $J = n_e e u_d$ 로부터 얻는다. CBS 구동에서 휘도가 10,000, 15,000 (cd/m^2)일 때, 각각의 전류는 5.35, 8.94 (mA)이다. 램프의 내경은 3.0 mm이다. 따라서 전류밀도는 각각 8.39×10^2 , 1.27×10^3 (A/m^2)이고, 전자 플라즈마의 밀도는 각각 1.58×10^{16} , 2.01×10^{16} (m^{-3})이다.

종래 구동에서 휘도가 10,000, 13,000, 15,000 (cd/m^2)일 때, 각각의 램프 전류는 10.93, 12.82, 15.46 (mA)이다. 각 휘도에 대한 전류밀도는 1.55×10^3 , 1.81×10^3 , 2.19×10^3 (A/m^2)이다. 각 휘도에 대한 전자 플라즈마의 밀도는 3.54×10^{16} , 3.60×10^{16} , 3.55×10^{16} (m^{-3})이다.

각각의 구동 방법에 대하여, 휘도의 증가에 따라서 전자의 온도는 증가하고, 플라즈마의 밀도의 변화는 일정하지 않다. 한편, CBS 구동이 종래 구동보다 전자의 온도와 플라즈마 밀도가 낮다.

위에서 광신호의 전파로부터 얻어진 EEFL의 양광주의 전자의 온도(kT_e)와 밀도(n_e)가 각각 (1~3) eV와 $(1.6 \sim 3.6) \times 10^{16} m^{-3}$ 이며, 이는 글로우 방전의 전형적인 값과 잘 일치 한다[4,5].

V. 결 론

EEFL의 교류 전원에 의하여 CBS 구동과 종래 구동에서

발광 모드와 발광의 전파를 관측하였다. 발광의 형태는 고전압이 인가된 전극 쪽에서 접지 쪽으로 발광하는 특징이 있다. 따라서 발광의 전파(propagation)도 고전압부에서 접지 쪽으로 전파한다. 외부전극 형광램프(EEFL)에서 길이 방향의 발광 신호를 관측하여 양광주 플라즈마의 전자 온도와 밀도를 진단하는 새로운 플라즈마 진단법을 제시하였다. 전자와 중성 원자와의 충돌에 의한 발광의 전파는 고전압이 인가되는 전극 쪽에서 접지 쪽으로 전파한다. 이러한 발광의 전파는 전자의 표류에 의하여 전파된다. 즉, 고전압에 의한 전기장의 신호에 대하여 전자의 움직임으로 나타나고, 전자의 움직임으로 발광이 전파한다. 따라서 발광 신호의 전파 속도로부터 전자의 표류 속도를 얻는다. 그리고 전자의 표류 속도로부터 플라즈마의 밀도와 전자의 온도를 얻는다. 이와 같이 램프의 길이 방향의 발광 신호를 관측 방식은 종래의 프로브를 플라즈마 공간에 삽입하여 전기적인 신호를 분석하여 플라즈마의 밀도와 온도를 얻는 방법보다 관경이 수 mm인 세관에 쉽게 적용할 수 있다.

본 연구에서는 CCFL과 EEFL과 같은 관경이 작은 세관의 램프에서 플라즈마의 밀도와 전자 온도를 진단하는 새로운 방법을 제시하였다. 플라즈마의 밀도와 전자 온도를 얻는 방법에 대한 알고리즘을 그림 8에 정리하였다. i) 램프 길이 방향에 대한 각 위치에서 광 프로브(optical probe)를 사용하여 램프의 발광에 의한 광 신호를 오실로스코프로 측정한다. ii) 램프 위치별 광 신호의 시간차로부터 발광 전파 속도 u_p 를 측정한다. iii) 전자의 평균 표류 속도(rms 값)는 $u_d = u_p/\sqrt{2}$ 이다. iv) 램프의 전류 밀도 $J = n e u_d$ 로부터 플라즈마 밀도 n 을 계산한다. v) 전자의 열 속도와 전자의 표류 속도의 관계, $u = 3\kappa u_d$ 에서 전자 온도 $kT_e = mu^2/3$ 를 계산한다.

본 실험에 사용한 EEFL의 길이는 860 mm, 외경은 4.0 mm, 그리고 두께는 0.5 mm이며, 37" LCD-TV의 광원이며, 구동 주파수는 가장 일반적으로 가장 많이 사용하는 65 kHz이다. EEFL의 일반 사용 휘도 10,000~15,000 (cd/m^2)에 대하여, 플라즈마의 기초 변수인 전자 온도와 밀도를 얻었다. CBS 구동에서 전자 온도는 1.9~2.7 (eV)이며, 전자 밀도는 $(1.6 \sim 2.0) \times 10^{16}$ (m^{-3})이다. 종래 구동에서 전자 온도는 1.3~2.6 (eV)이다. 전자 밀도는 $(3.5 \sim 3.6) \times 10^{16}$ (m^{-3})이다. 휘도 증가에 따라서 전자의 온도는 증가한다. 그러나 휘도에 따른 플라즈마 밀도의 변화는 일정하지 않다. 이 실험의 전자의 온도와 밀도는 글로우 방전관의 양광

주에서 알려진 값과 잘 일치 한다[4,5].

감사의 글

본 연구는 교육인적자원부에서 지원받은 2006년 광운대학교 대학특성화사업(차세대 신성장 동력산업을 위한 실감 IT 전문인력 양성사업)의 일환으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] D. Joh, D. Gill, H. Kim, Y. Kim, J. Ko, D. Kim, C. Lee, Y. Seo, E. Choi and G. Cho, the 6th Asian Symp. Information Display(ASID), Xi'an, P. R. China, p. 470, (2000).
- [2] T. Cho, Y. Kim, N. Kwon, S. Kim, J. Kang, E. Choi, G. Cho: Jpn. J. Appl. Phys. **41**, L355, (2002).
- [3] G. Cho, J. Lee, D. Lee, S. Kim, H. Song, J. Koo, B. Kim, J. Kang, E. Choi, U. Lee, S. Yang, J. Verboncoeur, IEEE Trans. Plasma Science **33**, 1210 (2005).
- [4] Francis F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 1: Plasma Physics*, 2nd ed. (Plenum, New York, 1984), Chap. 1, p. 13.
- [5] Michael A. Lieberman and Allen J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharge and Materials Processing*, (John Wiley & Sons, Inc. 1994), Chap. 1, p. 8.
- [6] Francis F. Chen and Jane P. Chang, *Principles of Plasma Processing*, (Plenum & Kluwer Publishers, 2002), Part B5, p. 79 ~ 97.
- [7] Francis F. Chen and Jane P. Chang, *Principles of Plasma Processing*, (Plenum & Kluwer Publishers, 2002), Part A7, p. 75 ~ 93.
- [8] Blake E. Cherrington, *Gaseous Electronics and Gas Lasers*, (Pergamon Press Inc. U.S.A., 1979), Chap. 8, p. 149.
- [9] A. Salop and H. H. Nakano, Phys. Rev. A **2**, 127(1970).
- [10] Paul M. Bellan, *Fundamental of Plasma Physics*, 1st ed. (Cambridge Univ.Press), Chap. 1, pp. 16~17.
- [11] N. A. Krall and A. W. Trivelpiece, *Principles of Plasma Physics*, (McGraw-Hill, New York 1973), Chap. 6.
- [12] E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, (Wiley-Interscience, 1970), Chap. 6, p. 183.
- [13] L. Loeb, *Fundamental processes of Electrical Discharge in Gases*, (John Wiley & Sons, Inc., 1939), Chap. 4, p. 177.
- [14] A. von Engel, *Ionized Gases*, 2nd ed. (Oxford University Press, 1965), Chap. 4, p. 122.

Light Emission and Plasma Property in the External Electrode Fluorescent Lamps

S. Ahn, M. Lee, J. Jeong, J. Kim, D. Yoo, J. Koo, J. Kang, B. Hong, E. Choi, G. Cho*

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

(Received March 30, 2007)

A new diagnostics of plasma electron temperature and plasma density is introduced with the observation of the light emission along the tube of external electrode fluorescent lamps. With two different methods operating an external electrode fluorescent lamp of outer diameter 4.0 mm and length 860 mm for the back-light source of 37-inch LCD-TVs, the lighting modes and the plasma properties are investigated. In the center balance operation, the light-emission propagates simultaneously from both sides of the high voltage electrodes to the center of the lamp, while in conventional operation the light-emission propagates from the one end of a high voltage to the other ground electrode. In the operation value of luminance 10,000~15,000 cd/m², the electron plasma thermal energy (kT_e) is about 1.3~2.7 eV with the electron density (n_e) is about $(1.6\sim3.6)\times 10^{16}$ m⁻³.

Keywords : Discharge, Plasma, Plasma diagnostics, External Electrode Fluorescent Lamp(EEFL), LCD, Back-light

* [E-mail] gscho@kw.ac.kr