제논 혼합가스를 이용한 고효율 면광원과 국부적 밝기 제어 방식

(High Luminous Efficiency Flat Light Source with Xe mixture Gas Discharge and Areal Brightness Control Method)

정재철* · 서인우 · 오병주 · 황기웅
(Jae-Chul Jung · In Woo Seo · Byung Joo Oh · Ki-Woong Whang)
(플라즈마 연구실, 서울대학교 전기. 컴퓨터공학부)

Abstract

A Highly efficient Mercury-free Flat Fluorescent Lamp (MFFL) with dielectric barrier Xe gas discharge was developed for an alternative of conventional line-type Cold Cathode Fluorescent Lamps (CCFLs) which shows a wide voltage margin and a stable discharge operation for diffuse glow discharge with an application of a auxiliary electrode. Electro-optic characteristics of the MFFL were examined through the changes in ambient temperature, total pressure and Xe partial pressure. the single cell is expanded into a multi-structured configuration to realize a large sized lamp by a simple repetition of the single cells, and a new driving scheme is proposed for an adaptive brightness control using dual auxiliary electrodes and bi-polar drive scheme. In addition, interesting application of this ultra high luminance flat lamp by the optimization of the gas condition and the pattern of the rear phosphor layer is suggested as a good alternative of daylight lamp source

주제어: 무 수은 면광원, 국부 밝기 제어, 제논 램프, 평판 조명

1. 서 론

일반 가정을 비롯한 사무용 공간에서 수은(Hg)가스가 봉입된 냉음극관 형광램프(CCFLs: Cold Cathode Fluorescent Lamps)광원이 널리 이용되고 있다. 이는 수은 플라즈마의 높은 자외선 여기 특성을 이용하여 휘도 및 발광효율이 매우 우수한 장점을 이용한 것이다. 그러나 수은 플라즈마를 이용한 CCFLs은 최근 환경 문제와 더불어 오염물질 사용 및 제품화에 심각한 제한을 받는 추세이다. 일례로 EU의 경우 전기. 전자제품 유해물질 사용제한 지침(WEEE: RoHS, Directive 2002/95/EC)을 통하여 유해물질인 수은의 사용 금지를 명문화 하였고, 뒤이어 폐기물 처리 지침(WEEE, Directive 2002/96/EC)을 통하여 상당부분 회수 처리 될 수 있도록 명문화하고 있어, 향후 수은을 포함한 유해물질의 제품사용은 극히 제한 받게 될 것이다 [1-2]. 또한 최근 LCD-TV 시장의 급속한 성장과 함께 기존 백라이트로 쓰이는 CCFLs 역시 여러 기술적 문제에 직면하고 있다. 수은의 증기압 변화로 인하여 주위 온도환경에 따라 광 특성이 변하고, 반사판 및 확산판 등의 부가적 부품으로 인한 비용 상승뿐만 아니라 광 변환에 따른 최종 전달 광량의 급격한 감소 및 를 통한 전력소비의 증가는 큰 문제가 되고 있다.

이러한 이유로, 최근 LED(Light Emitting Diode)와 같이 수은을 대체할 수 있는 새로운 광원에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있고 배면광원으로써 전자소자로의 응용뿐만 아니라 일반 가정용 조명으로 적용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 하지만 발광 재료의 접합 온도에 따른 휘도변화, 색온도 특성 및 고가격, 여러 광학 부품의 사용과 함께 낮은 변환 효율 등의 문제점을 가지고 있다. 특히 조명으로의 적용에 있어서 휘도 효율의 향상이 요구되어지고 있다[3-4]

본 논문에서는 고 휘도 고 효율 특성을 가지는 무 수은 면광원 구조를 제안하고 전기. 광학적 특성을 조사하였다. 보조전극의 적용에 따른 방전특성을 살펴보고, 형광체 최적화를 통하여 고 휘도, 고 효율 특성을 주요 적용 분야인 일반 가정용 조명(daylight) 및 LCD-TV의 백라이트의 요구조건에 대하여 분석하였다.

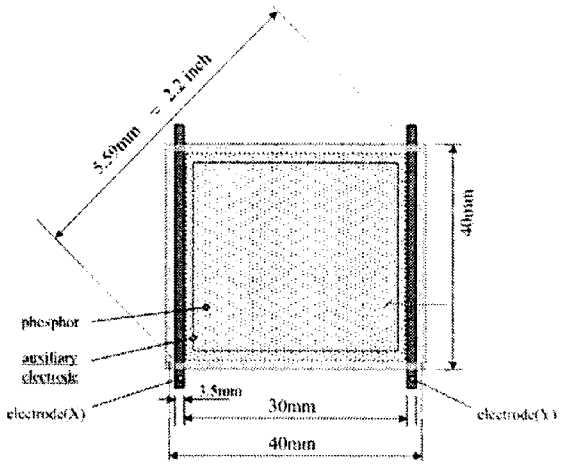

그림 1 2.2인치 대각 크기를 가지는 무 수은 평판 형광램프(면광원)의 구조

Fig. 1Structure of the Mercury-free Flat Fluorescent Lamp (MFFL) with a 2.2 inch diagonal size

2. 본 론

2.1. MFFL의 기본 구조

MFFL은 그림1에서와 같이 높이 2~4mm 인 격벽과 상,하 평판형 두 유리 기판에 의해 분리된 방전 공간을 가진다. 두 전극이 방전 공간 내 한 유리면위에 평행하게 위치하고 그 위에 80um 두께의 유전체가 형성된다. Ne-Xe혼합 가스가 방전 공간에 채워지는데 Xe의 혼합비는 4~30%이며 전체 압력은 75~160Torr이다. 방전 공간은 40x40mm 크기이며 전극의 폭은 3mm이다. 광원 내부에는 백색의 형광체를 상-하판 모두에 형성하였다. 또한 낮은 구동 전압에서 보다 안정적인 방전을 일으키기 위해 반대 유리 기판에 보조전극을 형성하였다. 제작된 광원의 구동은 구형파 전압을 두 전극 사이에 교번되게 인가하여 작동하였으며, 2~3kV 크기의 구동전압 및 10~20kHz의 구동 주파수에서 실험하였다(그림2).

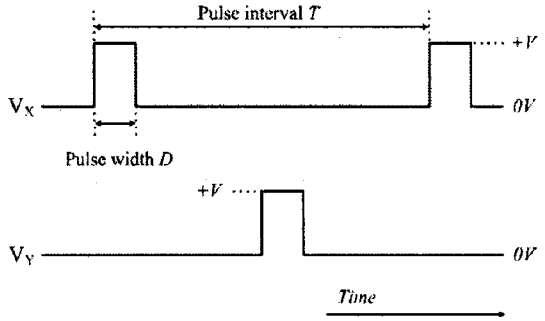

그림 2. 기본 구동 전압 파형
Fig. 2. Basic drive voltage waveform

2.2. 전기·광학적 방전 특성

절연된 두 전극 사이에 방전 개시 조건이 충족되면 방전 공간의 중성기체가 플라즈마화 되어 방전이 형성된다. 최초 방전이 형성된 뒤에는, 충분하게 프라이밍된 공간 전하와 유전층 위에 형성된 벽 전하들이 존재하게 되고 인가전압의 상승과 함께 발광영역이 방전 공간 전체로 확장되게 된다[5].

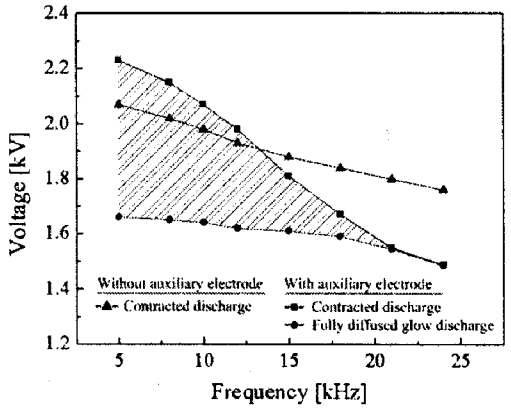

그림 3. 전원전압 변동에 따른 여러 가지 종류 안정기의 무효전력 변화
Fig. 3. Variation of reactive power of various ballast type as a function of potential

보조전극이 형성되지 않은 경우, 인가전압의 상승뿐만 아니라, 방전 직후 수축 방전 형태 (Contracted discharge mode)로 전이하는 확률이 증가하게 된다. Xe 분압의 증가와 더불어 이러한 불균일한 전하 밀도 분포는 전체적인 휘도의 감소와 큰 전력소비를 초래하게 된다[6].

그림 1에서와 같이 방전 공간 내 사각 구조의 보조전극이 형성되는 경우 구동 주파수 변화에 따른 방전 특성을 그림 3에 도시하였다. 보조전극이 없는 경우, 방전이 발생함과 동시에 수축방전형태로 전이함을 보이며, 구동 주파수에 따라 수축방전 전압은 감소함을 나타내고 있다. 그러나 보조전극(Floating전위)이 형성된 경우, 낮은 구동전압에서 전면 방전(Diffuse glow discharge)이 형성되고 수축방전 형성까지 수백V의 전압마진을 보임을 알 수 있다[6-7].

그림4에서와 같이 방전이 개시된 이후 적절한 인가전압의 증가에 따른 방전 형성 과정을 도시하였다. 방전 개시 전압을 만족하게 되면 주전극과 보조전극 사이 국부적인 방전을 일으키게 되고, 더욱 구동 전압을 증가시킴에 따라 방전 경로가 확장되면서(그림4-b) 방전 공간 전체에 대한 균일한 글로우 방전이 일어나게 된다(그림2-c). 보다 높은 전압을 인가하게 되면 불균일성에 의하여 방전 수축에 의한 교란이 발생하게 된다(그림2-d)[5-6, 8].

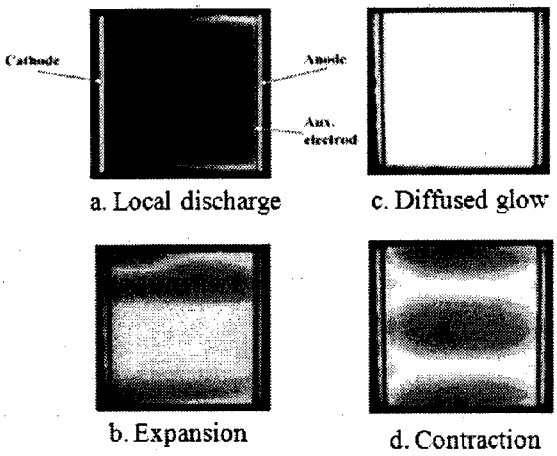

그림 4 전원전압 변동에 따른 여러 가지 종류 안정기의 무효전력 변화
Fig. 4 Variation of reactive power of various ballast type as a function of potential

그림5는 주위 온도 변화에 따른 방전 개시 특성을 측정한 결과이다. 주위 온도가 40°C에서 -15°C까지 변화할 때 펄스전압 인가 후 방전형성 지연시간(formative delay time) 및 통계적 지연시간(statistical delay time)을 도시하였다. 방전형성 지연시간은 주위 온도 변화에 따라 최도 265ns에서 195n, 형성지연 시간은 10ns 에서 40n로 두 경우 수백 ns.범위로 매우 빠른 방전 특성을 나타내고 있다. 이는 제안된 무 수은 면광원의 방전개시 특성이 수은이 포함된 기존 CCFLs과는 달리 주위 온도에 거의 영향을 받지 않음을 보여준다.

Xe분압의 증가는 VUV량의 증가를 수반하여 더 높은 휘도 및 방전 효율을 기대할 수 있다. 그러나 본 논문에서의 MFFL와 같이 두 전극간 간격이 상 하판 격벽 높이에 비해 매우 큰 aperture ratio를 가지는 구조에서

전면방전(diffuse glow discharge)를 형성하는 경우에는 구조적 방전 불안정성에 의해 쉽게 수축방전으로 전이하게 된다[9]. 또한 Xe분압의 증가는 구동 전압의 상승을 초래하게 되어 구조적 방전 불안정성과 더불어 방전 형성을 통한 하전 입자의 불균일성 및 열적 불안정성에 의해 수축방전으로의 전이 빈도를 높이게 된다.

그림 6은 Xe분압에 따른 전면 방전을 위한 구동 전압 범위와 상관관계를 보여준다. 일정한 전체 압력에서 Xe분압이 증가할수록 구동 전압 범위가 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 일정한 Xe 분압 하에서 전체 압력의 증가 역시 구동전압의 상승을 초래한다. 하지만 그림 6과 같이, Xe분압의 상승과 함께 적절한 전체압력의 조정을 통하여 유사한 구동전압 범위 내에서 휘도 및 방전 효율을 개선할 수 있음을 알 수 있다.

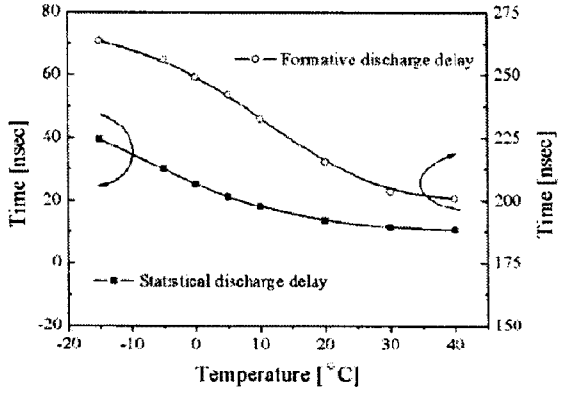

그림 5. 주위 온도 변화에 따른 방전 개시 특성
Fig. 5. Discharge delay time with the variation of the ambient temperature with Ne-Xe(18%), 13.3 kPa, 2.4 kV of applying voltage pulse, 15 kHz of frequency

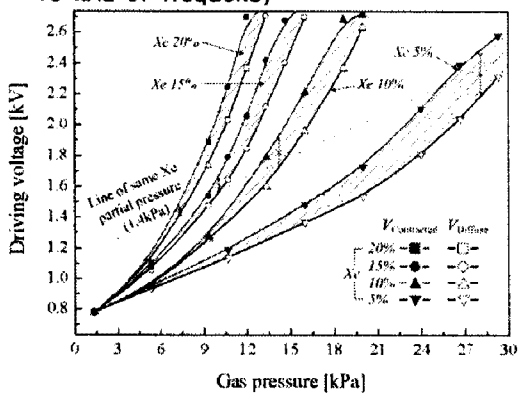

그림 6. 전원전압 변동에 따른 여러 가지 종류 안정기의 무효전력 변화
Fig. 6. Voltage margin with Xe partial pressure and total gas pressure at 15 kHz of operating frequency.

2.3. 형광체 도포 면적 최적화

방전 가스 및 Xe분압의 최적화와 더불어 발광 효율 개선을 위하여 형광체 두께 및 도포면적을 증가시키기 위한 실험을 수행하였다. 최적화 된 형광체 표면 외형이 그림 7과 같이 형성되었다. 돌출부 높이(Y)는 250um이고 돌출부와 침하부의 폭(X)이 각각 1mm, 0.5mm인 경우에 평면 형광체 형성시에 비해 25% 및 50%의 형광체 표면적 증가가 있다.

그림 8은 하판 형광체 구조에 따른 휘도 효율 특성을 보여준다. 실험에 사용된 램프는 Ne-Xe(20%), 100Torr이며, 12kHz의 구동 주파수가 사용되었다. 형광체 표면적 증가에 의해 기존 대비 동일 휘도에서 크게 개선된 효율 특성을 보인다. 휘도 4,000nit에서 구조가 형성되지 않은 평판형 형광체의 경우 36*lm/W*인 휘도가 25% 표면적 증가시 48*lm/W*, 50%의 표면적 증가의 경우 54*lm/W*의 효율을 나타내었고, 10,000nit 휘도에서 25*lm/W*에서 각각 29*lm/W*, 31*lm/W*으로 증가함을 보인다.

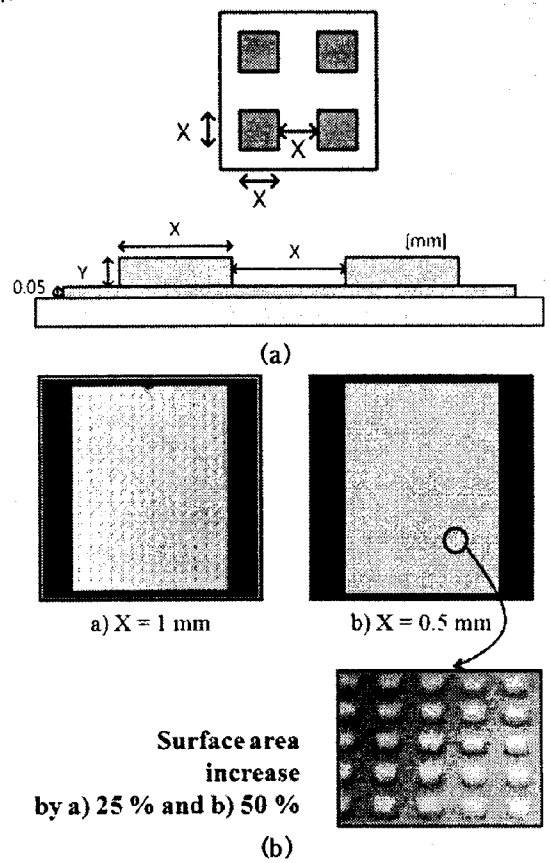

그림 7. 휘도 효율 향상을 위한 하판 형광체층 구조
Fig. 7. : Optimization of the phosphor layer: (a) schematic diagram of the optimized phosphor profile, (b) Real images of rear phosphor

Xe 첨가비를 25%로 증가하는 경우, 그림 9에 도시한 바와 같이 휘도 2,800nit에서 최고 효율 66 lm/W, 최고 휘도 17,000nit에서 32.5lm/W의 효율을 나타내었다. 본 실험은 7000nit에서 (0.25, 0.23)인 색좌표를 가지는 램프에서 측정된 것이며, 고전압 전압 프로브 및 전류 프로브를 이용하여 측정된 전압, 전류로부터 인가 전력을 계산하였으며, 램프의 발광 면적을 9개 영역으로 균등하게 나눈 후 휘도계(BM7)로 측정된 평균치를 사용하였고, 수식 η(efficacy)=πLS/P (L:휘도, P:인가전력)을 적용하여 계산하였다.

그림 10은 백색 형광체의 조합비를 조절하여 자연광에 가까운 색좌표인 (0.33, 0.33)인 램프를 제작하여 그림8에 얻어진 휘도, 효율과 비교한 그림이다. 두 경우 모두 70um의 하판 형광체 두께위에 X=0.5mm의 돌출부 패턴을 적용하였다. Ne-Xe(25%), 100Torr의 압력조건과 12kHz의 구동주파수 조건에서 3,315nit에서 18,780의

넓은 휘도 범위를 얻을 수 있었다. 휘도 4,000nit에서 최고 효율 72lm/W, 최고 휘도 14,000nit에서 46lm/W의 고효율 특성을 나타내었으며, 색 좌표(0.25, 0.23)대비 16~18%효율 향상을 보였다.

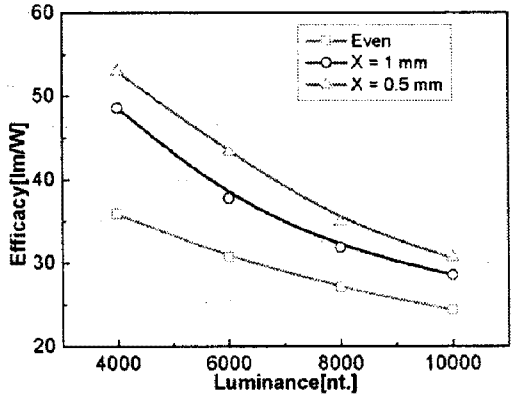

그림 8. 하판 형광체 패턴에 따른 휘도 대비 효율
Fig. 8. luminance efficacy and the luminance with variation of the rear phosphor pattern

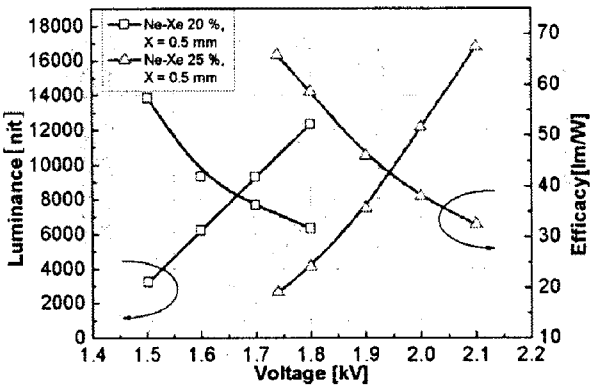

그림 9. X=0.5mm의 하판 형광체 패턴에서 Xe contents 증가에 따른 휘도, 효율
Fig. 9. luminance efficacy and the luminance with Xe contents variation of the rear phosphor with X=0.5mm

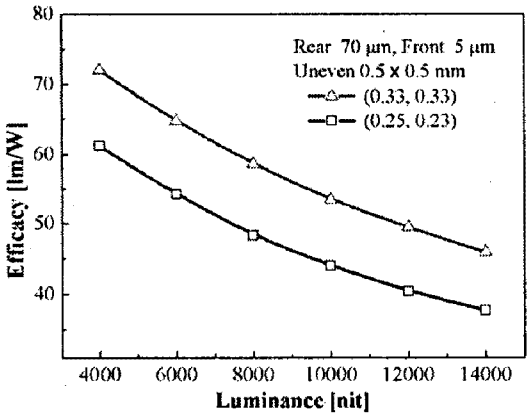

그림 10. X=0.5mm의 하판 형광체 패턴의 색 좌표 변화에 따른 휘도 효율 특성
Fig. 10. luminance efficacy and the luminance with color coordinates of the rear phosphor with X=0.5mm

2.4. 멀티 구조 면광원의 대형화

기본전극 구조를 유지한 채 단순 램프 크기의 증가는 구동 전압의 상승 뿐 아니라 안정적인 구동 전압 마진의 감소를 초래한다. 본 연구에서는 그림 11-(a)에 도시된 바와 같이 단일 기본 구조의 무 수은 면광원을 종 방향 및 횡 방향으로의 단순 확장을 통한 멀티 구조 대 화면 면광원을 제안한다. 멀티구조 대 화면 면광원의 구동 전압 특성은 기본 2인치 크기의 단위 램프의 전압 특성과 유사하다. 또한 32인치(10x16) 크기의 멀티 구조 면광원에 대한 발광 사진이 아래 그림 11-(b)에 도시되었다.

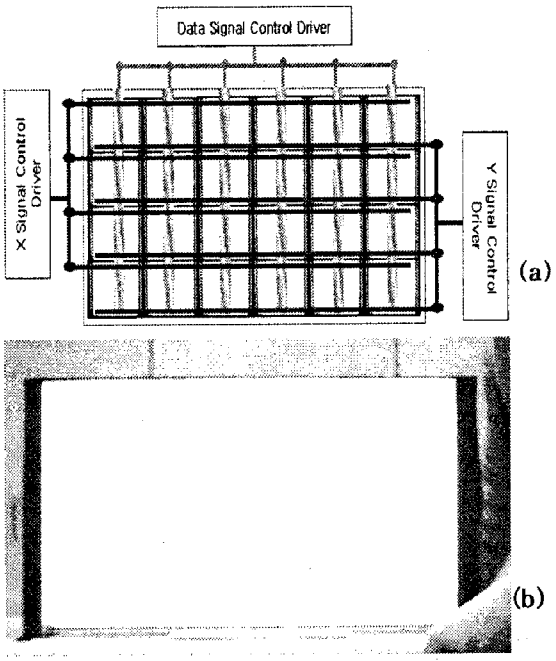

그림 11. M x N 크기의 멀티 구조 MFFL
Fig. 11. Multi-structured MFFL with MxN matrix array

2.5. 선택적 발광 제어를 이용한 dimming

멀티 구조 MFFL의 자유로운 확장성은 기존 가정용 형광등에서 거실 천장의 직접조명, 바닥 혹은 벽면의 인테리어 조명을 포함한 LCD-TV의 배면 광원 등 고휘도 램프로의 적용을 가능하게 한다. 뿐만 아니라 보조 전극에 인가되는 전압 상태의 제어를 통하여 선택적인 방전 온/오프 상태를 결정할 수 있다[10].

그림12와 같이 단일 보조전극을 듀얼 보조 전극 형태로 변형하고 동시에 양극 펄스 구동방식(Bipolar pulse drive)을 적용함으로써 단일 인버터 시스템의 멀티구조 면광원 구조에서 단위 셀별 휘도레벨을 제어할 수 있는 구동 방법을 제안한다.

그림 12에 보이는 바와 같이 듀얼 보조전극을 형성하고, 양극성 구동 전압 펄스를 인가함에 따라 전면 방전의 전이과정은 그림 4와 같다.

듀얼 보조 전극에 인가되는 스위칭 신호의 유무에 따라 각 단위셀의 방전 유무을 선택적으로 제어하게 된다. 본 논문에서는 임의의 시간(1/60Hz)에 대해 2개의 서로 다른 발광 시간을 가지는 서브 영역으로 나누고 각각의 듀얼 보조 전극의 연결 유무에 의해 각 단위 램프의 밝기를 선택적으로 제어하도록 하였다. 임의의 멀티 구조 면광원 구조에서 전체 램프(0차원 휘도 제어)에 대한 휘도 제어뿐만 아니라, 행 방향 혹은 종 방향의 휘도제어(1차원 휘도제어) 및 각 단위 램프(2차원 휘도

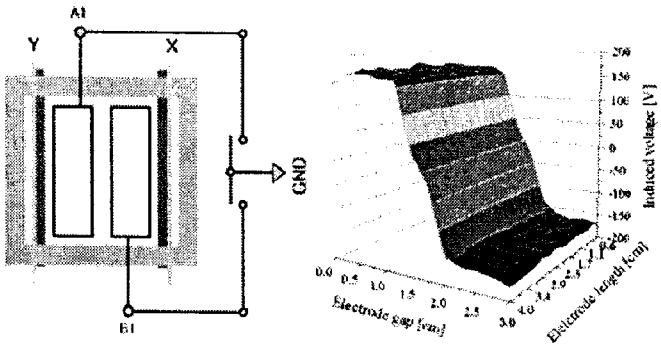

그림 12. 듀얼보조전극 연결유무에 따른 방전 제어 (좌)듀얼보조전극 및 스위치 개념도, (우)분리시 보조전극에 유기전압 분포

Fig. 12. Dual auxiliary electrodes and switching diagram (left) and induced voltage distribution when dual auxiliary electrodes are separated

제어) 각각에 대한 휘도제어를 영 레벨에서부터 세 번째 밝기 레벨까지 총 4단계의 밝기를 조절할 수 있음을 그림 13과 같이 구현하였다.

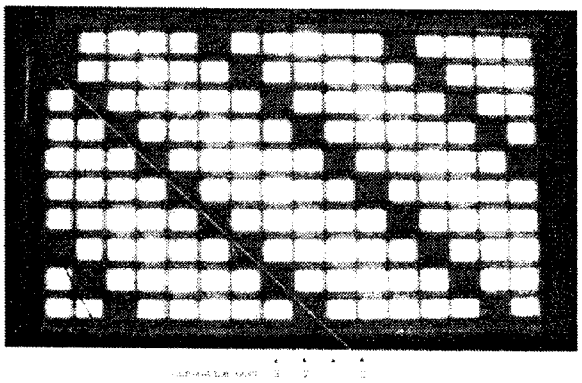

그림 13. 16 x 10 크기의 멀티 구조 MFFL에서 선택적 제어 모습

Fig. 13. Areal selective dimming image of the Multi-structured MFFL with 10x16 matrix array

3. 결 론

본 연구에서, Xe 혼합가스를 이용한 고휘도 고효율의 무 수은 면광원을 제안하였다. 새로운 무수은 면광원은 단순한 구조를 가진 유전층 장벽 방전을 이용하며, 보조전극의 이용으로 400V이상의 넓은 전압마진을 얻을 수 있었다. 보조전극의 적용에 따른 전면방전의 형성 과정 및 주위 온도변화에 따른 방전 개시 특성을 조사하였고 Xe분압 및 가스 압력에 대한 방전 전압 범위의 의존성을 분석하였다. 최적화된 가스 조건 및 형광체 최적화를 통하여 3,315nit에서 18,780의 넓은 휘도 범위를 얻을 수 있었다. 휘도 4,000nit에서 최고 효율 72lm/W, 최고 휘도 14,000nit에서 46lm/W의 고효율 특성을 얻었다. 단일 램프의 단순 확장을 통해 구동 전압의 상승 없이 단일 인버터로 32인치 크기의 멀티 구조 대화면 램프를 제작하였으며, 듀얼 보조전극과 양극성 구동 펄스를 적용함으로써 능동적인 국부적 밝기 제어가 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)

[2] DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment.

[3] Zwanenburg M J 2004 High-efficiency LEDs for LCD backlights Int. Symp. of the Society for Information Display 2004 Digest (Seattle, WA) pp 1222-5

[4] Chhajed S, Xi Y, Li Y-L, Gessmann Th and Schubert E F Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes J. Appl. Phys.99 053104 2006

[5] Yuri P. Raizer "Gas Discharge Physics" Springer-Verlag, pp 230~244.

[6] Jae-Chul Jung et al, electro-optic characteristics and areal selective dimming method for a new highly efficient mercury-free flat fluorescent lamp" J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (2009) 125205

[7] J. C. Jung, IMID'06 Technical Digest, p.877 (2006).

[8] Chapman B 1980 Glow Discharge Processes (New York: Wiley)

[9] B. J. Oh, J. C. Jung, I. W. Seo, H. Kim, and K.-W. Whang, "Improvement of the Luminous Efficiency of Mercury-free Flat Fluorescent Lamps via Structural and Complex Gas Mixture Changes", IMID Technical Digest, pp. 809-812(2008).

[10] J.-C. Jung, I. W. Seo, B. J. Oh, J. K. Kim, and K.-W. Whang, "New Areal Selective Dimming Method of Mercury-free Flat Fluorescent Lamp with bipolar drive scheme and the dual auxiliary electrodes for LCD Backlight", IMID Technical Digest, (2008).