

무전극 형광등 시스템의 성능평가 및 분석

(Performance evaluation and analysis of Electrodeless Fluorescent Lamp System)

김현숙* · 이세현 · 신상욱 · 황명근

(한국조명기술연구소)

Hyun-Sook Kim* · Se-Hyun Lee · Sang-Wuk Shin · Myung-Keun Hwang

(Korea Institute of Lighting Technology)

Abstract

In this paper, We measured an electric and optical characteristics for electrodeless fluorescent lamp system. We used the CCD(charged couple device) and Integrating Sphere Photometer to detect the accurate variation of data and got a characteristic of output voltage and current, luminance, luminous flux etc. And then we come to understand that the efficiency of electrodeless fluorescent lamps are similar to CFLs(compact fluorescent lamp) or HID(high intensity discharge lamp).

1. 서론

1927년 J. J. 톰슨에 의해 고주파 방전에 대한 기본 원리가 이론적으로 확립된 후, 전기 및 전자공학 등의 더딘 발전으로 인한 현재의 고주파(high frequency) 전원 구동부는 근래까지 완벽하게 개발되지 못한 상태에 이르러있다.[1],[2]

그러나 수백 kHz부터 수 GHz까지의 구동회로 제작이 수 년전부터 가능해지면서 고주파 방전의 구현도 점차 현실화되고 있다. 일반적으로 고주파 방전은 수십 Hz부터 수십 kHz의 전압을 방전관 내부의 전극에 인가하는 구동 방식에 비해, 벌브(bulb) 내부의 발광에 도움을 주는 물질만 존재해도 방전이 가능한 형태로서 장수명이 보장된다는 장점이 있다.[3]

기존의 일반적인 램프의 수명(life time)은 전극의 손실과 더불어 가스배출(outgassing)에 의해 좌우되는데[4],[5] 무전극 램프는 발광관 내부에 전극이 존재하지 않아 장수명을 얻을 수 있으며, 백열전구나 원형 형광램프의 형태로 만들어 사용할 수도 있기 때문에 상업적으로 새로운 가능성을 부여해 주고있다.[2],[9]

무전극 형광등 시스템은 이미 미국과 유럽에서 수 년전부터 개발을 시작, 제품화하여 시판하고 있다. 이러한 무전극 형광등의 발광 메커니즘으로는 벌브 외부의 유도코일로부터 발생한 자기방전

(H-discharge)이 벌브내의 플라즈마 방전을 발생시키는 것이다. 그 중에서도 유도방전(inductive discharge)을 기본으로한 안정적인 방전이 이루어지기 위해 정확한 램프의 임피던스 값을 결정해 줘야 하는 데, 이것은 램프와 구동회로의 완벽한 결합에 의한 기술이라 할 수 있다.[6],[7],[9]

이러한 고주파로 인해 발생된 유도 방전의 발광 시스템은 기존의 백열전구, 형광등, 고압 방전등이 대부분이었던 조명시장을 바꾸기에 충분한 것으로 사료되며, 그 응용기술의 가능성은 무한하다고 판단되어진다.[8],[9],[10],[11]

이에 본 논문에서는 현재 국외에서 제품화되어 있는 무전극 램프를 전력과 형태별로 나누어 전기적, 광학적 특성을 측정하였으며, 각 측정데이터를 기존 램프의 특성과 비교·분석함으로써 무전극 램프 시스템에 대한 특성을 알아보았다. 또한 국내업계에서 시제품 개발시와 제품 관련규격 제정시에도 제특성의 결정에 많은 도움이 되리라 사료된다.

2. 본론

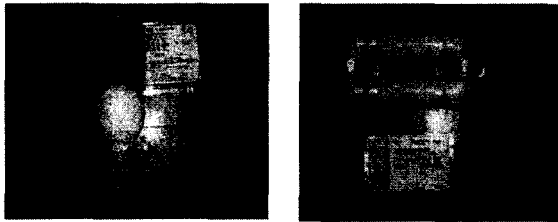
2.1. 측정대상

전기적, 광학적 특성평가를 위한 시료선정은 2차전압 및 2차전류 등의 측정값을 용이하게 측정할 수 있도록 다음의 두종의 안정기 외장형 무전극 형광등 시스템을 선택하였으며, 첫 번째로 전구 형태를 갖는

무전극 시스템 두 종류(55W, 85W)와 두 번째로 환형 형태를 갖는 무전극 시스템 두 종류(100W, 150W)를 각각 선정하였다. 이러한 무전극 형광등의 종류와 안정기를 결합한 전체 무전극 시스템의 모습을 각각 그림 1, 2에 나타내었다.



그림 1. 무전극 형광등의 종류(전구형, 환형)
Fig. 1. Electrodeless Fluorescent Lamp



(가)전구형 무전극 형광등 시스템 (나)환형 무전극 형광등 시스템

그림 2. 무전극 형광등 시스템
Fig. 2. Electrodeless Fluorescent Lamp System

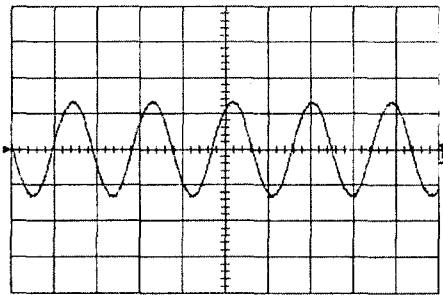


그림 3. 출력 전압
Fig. 3. Output Voltage

2.2. 측정방법

전기적인 특성을 측정하기 위해 안정기의 1, 2차 측을 오실로스코프(LC584AM)를 사용하여 측정하였으며, 측정의 정밀도를 높이기 위해 주파수 샘플링을 1GHz로 측정하였다. 또한 광학적인 특성 측정을 위해 CCD(ProMetric 6.0)와 적분구(LIS-2000) 및 휘도계(CS-1000)를 사용하였으며, 실험의 재현성 및 불확도를 낮추기 위해 광속실험의 경우 모든 램프를 100 시간 에이징 한 후 실험을 진행하였고, 기타 전기적 특성 실험이 정격

220V 60Hz, 상온 $25\pm 1^\circ\text{C}$ 을 유지하였다.

2.2.1 전기적 특성

램프는 각기 매칭되는 안정기가 있는데 전구형 무전극 램프의 경우 특이할 사항은 출력측 전선의 길이가 길어지면 회로의 임피던스값의 변화로 전류가 많이 흐르는 현상이 발견되었다. 또한 전구형 무전극 형광등 시스템의 유도 플라즈마 발생은 내부의 페라이트 봉에서 유도 전력이 발생되고, 환형 무전극 형광등 시스템의 경우 램프를 감싼 원형 모양의 페라이트 코아에서 유도 전력이 발생됨을 알 수 있다.[12],[13]

출력 전압의 측정은 전구형 무전극 램프의 경우 폐회로에 다른 회로가 구성되어 적절한 실험 진행이 되지 않을 것이라 판단되어 출력 전류 위주로 확인하였으며, 전류 측정 역시 직접연결시 새로운 회로가 구성됨을 우려하여 전류 프로브를 사용하여 측정하였다.[14] 이러한 출력 전압파형을 그림 3에 나타내었으며, 측정된 파형은 CISPR 15(2.2~3.3MHz 규제) 규격에서 규제되고 있는 사인파 형태를 만족하고 있음을 알 수 있다.[15] 안정화가 된 후의 주파수 변동은 전구형이 약 $\pm 1\%$, 환형이 약 $\pm 2\%$ 의 주파수 변동율이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 그림 4는 전구형 무전극 램프의 방전개시 출력전류 파형으로서 전구형은 램프에서 각각 검은선과 적색선이 나오는데 이를 Black 과 Red 로 표기하였다. 55W 와 85W 램프의 방전개시 시간은 약 $60\sim 85\mu\text{s}$ 동안 가해주는데 이때 동일 램프의 출력단 2선의 출력 전류 값은 비슷하였으며, 가해주는 시간의 차는 적색선이 약 $10\mu\text{s}$ 내외로 파형이 좀 길게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 램프 전력별로 85W 전구형 무전극 램프의 파형이 안정되게 나타났으나 대신 전류값은 55W가 더 높음을 알 수 있다. 이러한 방전개시 시간은 약 $300\mu\text{s}$ 이후에 안정화되었다. 그림 5는 환형 무전극 램프의 방전개시 전류 파형이다. 환형 무전극 램프는 전구형 램프와 달리 램프 외부에 페라이트 코아가 감겨져 있는 구조로서 외부에서 페라이트 코아를 관측할 수 있는 형태이다. 출력단자가 각각 파란색, 노란색, 적색으로 구분되어 있는데, 도표에는 각각 Blue, Yellow, Red로 구분하였다. 이는 전구형 방식과 달리 각기 다른 출력파형을 나타내었으며 각각의 전력과 출력단자의 색깔에 따라 많은 차이가 나타났다. 100W 는 전원 인가 후 약 $0.15\sim 0.2\text{ms}$ 의 시간동안 방전개시 전류가 흘렀으며, 전류값은 전체적으로 약 $2\sim 5\text{A(Vp)}$ 로 측정되었다. 150W는 순간적인 임펄스 전류가 수 십 μs 동안

최대 약 40A(Vp)까지 측정되었다. 그림 3 ~ 5는 무전극 형광램프 시스템의 방전개시 시부터 안정화 된 후의 전압, 전류 파형으로 안정화 이후는 안정된 전압과 전류의 사인파형이 측정되었다.

전구형은 주파수 2.65MHz, 환형은 주파수 250kHz의 출력 사인 파형이 나오는데, 이러한 파형

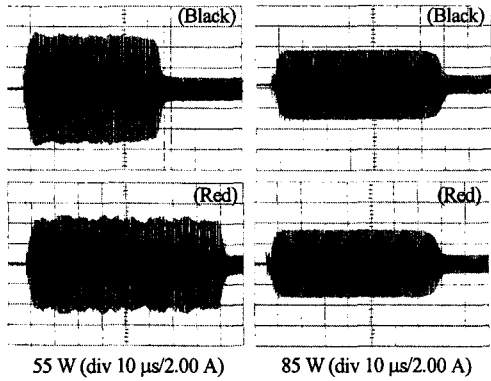


그림 4. 전구형 무전극 램프의 방전개시 전류
Fig. 4. Firing Current of Compact Type Electrodeless Fluorescent Lamp

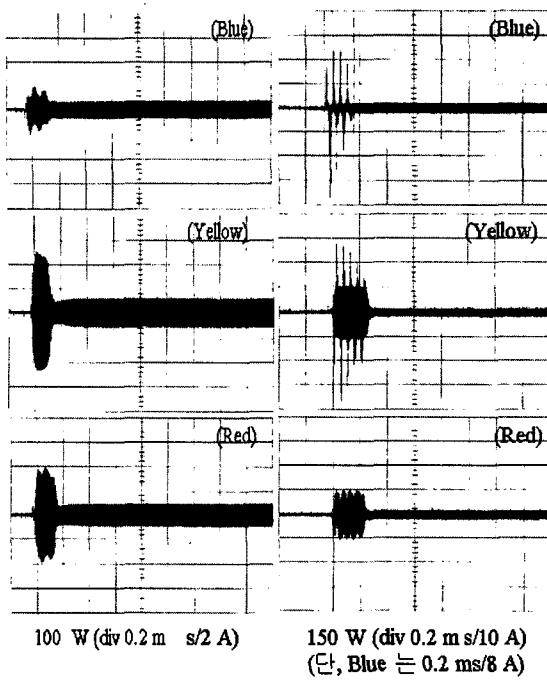


그림 5. 환형 무전극 형광램프의 방전개시 전류
Fig. 5. Firing Current of Circular Type Electrodeless Fluorescent Lamp

들의 차이는 초기 방전 개시를 위한 인가 전압 및 주파수에 따른 것이며, 결국 램프에 고주파만 인가

하여 해결되는 문제가 아닌 램프의 형태별, 전력별 그리고 각 제조사별에 따라 안정기와 램프가 최적으로 매칭되어야 하는 문제임을 알 수 있다. 특히, 전구형 무전극 램프의 경우 약 40cm의 출력 전선의 길이 역시 최적 매칭에 의한 그 제조사의 결과라고 할 수 있다.

2.2.2 광학적 특성 I

광학적 특성을 알아보기 위해 시료램프의 휘도(luminance)와 광속(luminous flux), 스펙트럼 분포(spectrum distribution), 연색성(color rendering index), 색온도(color temperature), 색도좌표(chromaticity coordinates) 등을 측정하였다. 휘도는 휘도계를 사용하였고 전구형의 경우 램프의 정 중앙 부분을, 환형의 경우 양광주 부분이 넓은 직관 부위중 정중앙 부분을 측정하였다. 광속 등의 측정은 지름이 2.0m인 광속구를 사용하여 측정하였다.

표 2. 무전극 형광램프 시스템의 휘도, 광속
Table 1. Luminance & Luminous Flux of Electrodeless Fluorescent Lamp System

구분		휘도 [cd/m^2]	광속 [lm]
환형	150 W	52,480	12,900
	100 W	49,530	8,640
전구형	85 W	69,450	5,900
	55 W	68,600	3,730

표 1은 각 무전극 형광램프 시스템의 휘도와 광속 값이며 환형 무전극 형광램프 150W의 휘도는 $52,480\text{cd/m}^2$, 100W는 $49,530\text{cd/m}^2$ 으로 측정되었다. 전구형은 각각 $69,450\text{cd/m}^2$ 과 $68,600\text{cd/m}^2$ 으로 약간의 차이밖에 나지 않았는데, 이는 같은 특성으로 많은 유도 플라즈마가 발생하여 비슷한 값으로 측정된 것으로 볼 수 있다. 광속의 경우 환형 150W는 12,900lm, 100W는 8,640lm 이 측정되었고 전구형 85W는 5,900lm, 55W는 3,730lm으로 각각 측정되었다. 이 값은 각 제조회사에서 제시하는 광속값(순서대로 12,000lm, 8,000lm, 6,000lm, 3,500lm)과 크게 다르지 않았다.

무전극 형광램프는 형광체를 이용한 발광관으로 기존의 형광램프와 비교되고, 또한 고출력이라는 점에서 고압방전등과 비교되어 본 논문에서는 이 두가지 점에서 광속값을 비교해 보았다. 각 비교대상은 무전극 형광램프인 환형 100W, 150W는 고압방전등 메탈헬라이드 램프 100W와 150W와 비교하였고, 무전극 형광램프 전구형 55W는 콤팩트 형광램프 55W와 비교하였다. 전구형 85W는 비교

대상이 없어 근접한 메탈헬라이드램프 70W와 비교하였다. 각 비교 근거는 KSC 7601 형광램프(일반조명용 2001) 와 KSC 7607 메탈헬라이드램프(1999)에 명시해 놓은 광속값과 비교하였다. 표 2는 광원의 광속 비교표이다.[16],[17]

표 2에서 알 수 있듯이 같은 전력의 메탈헬라이드램프보다 무전극 형광램프의 광출력이 더 많음을

표 2. 광원의 광속 비교표
Table 2. Luminous Flux Distribution

구분	메탈헬라이드램프 [lm]	컴팩트 형광램프 [lm]	무전극형광램프 [lm]
150 W	11,250	-	12,900 (환형)
100 W	6,500	-	8,640 (환형)
85 W	-	-	5,900(전구형)
70 W	5,000	-	-
55 W	-	4,200	3,730(전구형)

알 수 있었으나 대신 컴팩트 형광램프 55W와 전구형 무전극 형광램프 55W는 컴팩트 형광램프의 광속값이 더 높았지만 램프 효율, 그리고 수명 등 전체적인 특성으로 보서는 단순히 어떤 램프가 더 우수하다는 평가를 내리기는 힘들다. 특히 램프의 형태상 컴팩트 형광 램프는 긴 형광등을 구부려 놓은 듯한 형상으로 양광주를 최대한 살리면서 사이즈를 작게 만든 효율 및 기능 향상형 램프이기에 더 많은 광속이 나오는 것은 당연할 수 있다.

표 3. 무전극 광원의 연색성, 색온도, 색도좌표
Table 3. CRI, Color Temperature and Chromaticity Coordinate

구분	연색성 [Ra]	색온도 [K]	색도좌표 (x,y)
환형 150 W	78	4,020	0.380, 0.379
환형 100 W	77	4,051	0.381, 0.386
전구형85 W	73	3,969	0.395, 0.394
전구형55 W	75	3,924	0.388, 0.382

표 3은 램프의 광속 측정시 동시에 측정한 값들로서 각 광원의 연색성, 색온도, 색도좌표를 나타낸 것이며, 연색성은 약 73 ~ 78Ra 정도이고 색온도는 대부분 약 4,000K으로 측정되었으며 색도좌표(x,y)는 0.380 ~ 0.390으로 측정 되었다.

2.2.3 광학적 특성 II

램프의 방전 개시부터 안정화 될 때까지의 진행

되는 플라즈마의 진행 방향 및 안정화 된 이후의 플라즈마 분포를 보기 위한 실험으로써 측정을 위해 실시간(real time)으로 휘도, 색온도 등의 분포가 확인되는 CCD 카메라가 장착된 장비(ProMetric 6.0)를 사용하였다.

그림 6은 150W 환형 무전극 램프의 수직방향으로 위치하였을 때 휘도분포의 변화도이며 각 그림 위의 좌측 상단의 숫자는 점등 스위치를 ON 한 뒤 경과 시간 (분)을 나타낸 것이다.

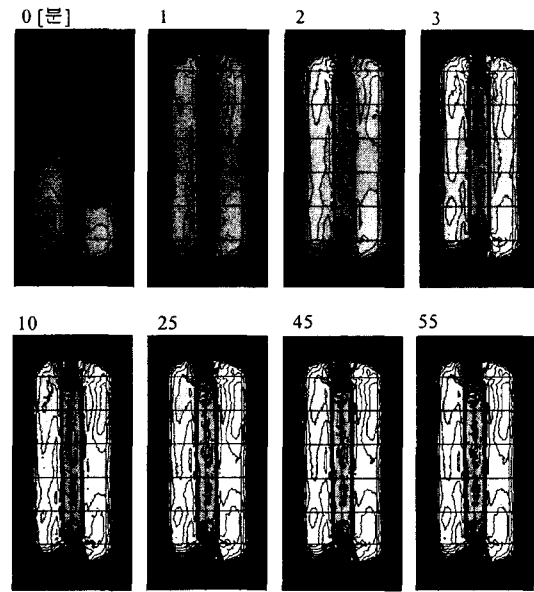


그림 6. 환형 무전극 형광램프의 휘도분포(150 W)

Fig.6. Luminance Distribution of Circular Type Electrodeless Fluorescent Lamp(150 W)

초기 방전개시에는 램프의 하측부분이 34,000 cd/m²로 위상측부분 18,549cd/m²보다 강방전을 하였다. 참고로 하측부분은 안정기를 통해 공급되는 선이 있는 부분이다. 방전 개시 1분후 약 34,000cd/m²의 휘도분포가 형성, 3분 후에는 네 모서리를 중심으로 55,600cd/m²의 휘도 분포가 형성되었다. 10분후 유도전류를 발생시키는 페라이트 코어 부분에는 약 77,230cd/m²의 높은 휘도가 발생되었다. 안정화 시간 55분 후 별브의 굴곡이 있는 부분에는 55,647 ~ 68,013cd/m²의 휘도 분포가, 그리고 중성 플라즈마가 밀집된 직선부근에는 약 52,555 ~ 55,647cd/m²의 안정된 분포도를 확인하였다.

그림 7은 환형 무전극 형광램프의 색온도 분포도를 나타낸 것이고 전체적으로 3,000 ~ 5,000K 의 변화를 보이며 램프의 전체 발광이 나타나기 전에 색온도 값은 측정장비에서 정확히 읽어들이 수가 없

어 0 [분]에서는 발광사진으로 대신하였다.

색온도 분포도에서 벌브 굴곡의 네 모서리 부분에서는 색온도 분포가 4,000K 이상의 값이 나왔고 초기 1분에서는 3,800K 정도로 전체 분포가 나타났고 약 10분 후 부터는 네 모서리 부분은 직관부분 보다 약 300K 이상의 높은 색온도를 보이기 시작했다. 이후 이런 경향은 발광 25분 후에는 잠시 사라졌다가 50분후 다시 나타났다. 이것은 플라즈마 방전에 대한

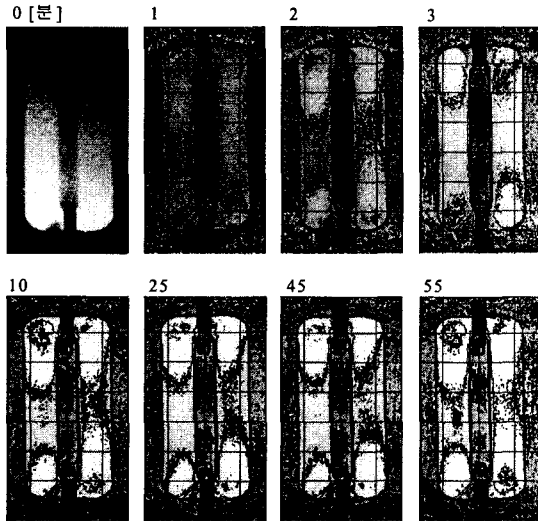


그림 7. 원형 무전극 형광램프의 색온도분포(150 W)

Fig. 7. Color Temperature Distribution of Circular Type Electrodeless Fluorescent Lamp(150 W)

램프내부의 가스의 안정화 외에도 형광체가 안정화 될 때 까지의 시간도 필요함을 보여준 것이라 생각 된다. 즉 가스와 형광체간에 상호 충분한 안정화 시간은 약 50분 이상임을 알 수 있었다.

그림 8은 85W 전구형 무전극 형광램프의 휘도 분포도로서 그림에서 볼 수 있듯이 전구형 무전극 램프는 초기 방전개시부터 강방전의 현상을 보이고 있다.

방전개시 0분부터 램프의 정 중앙부분은 $58,738\text{cd/m}^2$ 의 높은 휘도가 나타났고 1분후에는 $74,196\text{cd/m}^2$ 가 측정되었다. 특이한 사항은 전원을 인가한 후 15분 후에는 $77,287\text{cd/m}^2$ 가 측정되었으나 20분후에는 $71,140\text{cd/m}^2$ 로 다시 서서히 낮아졌으며 이후 계속 낮아지다가 방전개시 50분 후 다시 안정화되어 최종적으로 $68,013\text{cd/m}^2$ 가 측정되었다. 참고적으로 휘도분포도에서 램프에 표시된 그물선은 휘도의 분포경향을 보인 것으로 중심으로부터 각 선당 $3,000\text{cd/m}^2$ 의 휘도로 낮아진다.

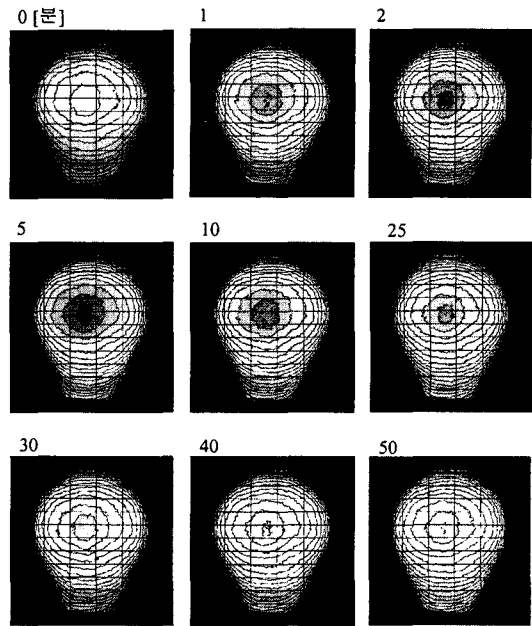


그림 8 전구형 무전극 형광램프의 휘도분포(85 W)

Fig. 8. Luminance Distribution of Compact Type Electrodeless Fluorescent Lamp (85 W)

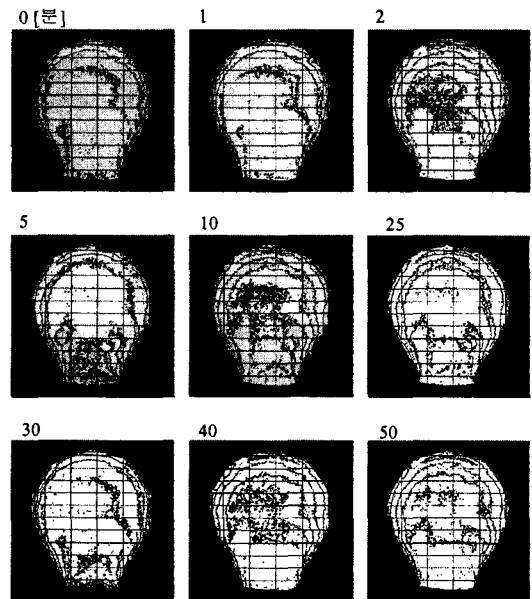


그림 9. 전구형 무전극 형광램프의 색온도분포(85 W)

Fig. 9. Color Temperature Distribution of Compact Type Electrodeless Fluorescent Lamp(85 W)

그림 9는 전구형 무전극 형광램프의 색온도 분포도를 나타낸 것으로서 방전개시 1분 후 램프의 상

측부분이 4,250K의 높은 값을 갖다가 2분 후엔 램프의 중심에서도 같은 값이 나왔다. 그러나 다시 5분 후에 색온도가 초기 방전시와 비슷한 색온도 4,250K가 측정되었으며 이러한 경향은 약 15분까지 계속되었다. 그러나 25분 이후부터는 다시 안정화되어 최종적으로 약 4,000K의 색온도가 측정되었다.

3. 결론

본 논문에서는 국외에서 제품화되어있는 무전극 형광등 시스템을 형태와 전력별로 나누어 각각의 전기적, 광학적 특성을 분석하였으며, 이를 기존 램프의 측정 값들과 비교·분석하였다.

무전극 형광등 시스템의 전기적인 특성과 관련해서는 안정화된 이후 출력전압이 안정된 사인(sine) 파형임을 측정하였으며, 방전개시시 전류를 측정하여 램프의 전원 인가 방법에 대해 확인한 후, 각 제조사와 램프별 구동 방식이 램프와 안정기의 적절한 임피던스 매칭에 의한 회로 구성임을 알 수 있었다. 광학적 특성과 관련해서는 각 램프의 휘도, 광속, 연색성, 색온도 및 색도좌표를 측정하였으며, 램프 방전시부터 안정화 될 때까지의 램프 전체의 휘도 분포도 변화와 색온도의 분포도 변화를 측정하여 램프의 안정화라는 것이 시각적으로 보이는 휘도의 포화 상태 외에도 형광체의 포화시간을 포함한 안정화 시간이라는 것을 실험을 통해 알 수 있었다.

무전극 형광등 시스템의 개발은 앞으로도 안정되고 높은 광출력과 연색성 등의 광학적 특성과 고주파로 구동되면서 효율이 좋고, 전자파로부터 보호받을 수 있는 안정된 전기적 특성의 구동 회로들로 개발되어 새로운 조명기기로서의 가능성을 부여해 줄 것이라 사료된다.

참 고 문 헌

[1] J.J. Thomson, "The Electrodeless Discharge through Gases", Phil. Mag. S. 7. Vol. 4. No 25. Suppl. pp. 1128 ~ 1160, Nov. 1927.
 [2] G.I. Babat, "Electrodeless Discharge and some applied problems", J.IEE, vol/94, pt3, pp.27-37, 1947.
 [3] D.O. Warmby, "Electrodeless lamps for lighting : a review", IEE Proceedings A, Vol 140, No 6, Nov., 1993.
 [4] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes", pp.77-138, 1980
 [5] M.N. Hirsh, H.J. Oskam, "Gaseous electronics", pp. 173

- 215, 1978.
 [6] R B Piejak, V A Godyak and B M Alexandrovich, " A Simple Analysis of an Inductive RF discharge", Plasma Sources Sci. Technol. 1, 179-186, 1992.
 [7] J.R. Coaton and A.M. Marsden, "Lamp and Lighting", Arnold, Fourth Edition, pp. 216 ~ 226.
 [8] Randall Blanchard, "Optimized LCD Backlight for Outdoor and High Brightness Applications", SID 01 Digest, pp.295-297, 2001.
 [9] 황영근, 박대회, "무전극 램프의 기술동향과 전망" 한국조명전기설비학회 학술대회 논문집, pp. 23 ~ 26. 2001. 11.
 [10] Hyun-Sook Kim, Dai-Geun Joh, Young-Guon Kim, Jae-Jun Ko, Dae-Il Kim, Chun-Soo Lee, Eun-Ha Choi, and Guangsup Cho, " LCD Planar Backlight Employing the External Electrode Fluorescent Lamps Driven by Square Pulses from Switching Inverter", SID 01 Digest, pp.687-689, 2001.
 [11] Stanley Lyons, "Lighting for Industry and Security -A handbook for providers and users of lighting-", pp.93-95, 1992.
 [12] OSRAM Endura, Product Information.
 [13] Philips QL lamp system, Product Information, 2001.
 [14] Fred Whitney, "Measurements of Inductively-Coupled RF Fluorescent Lamp Lumen Properties", IEEE, pp. 1988-2002, 1994.
 [15] CISPR 15. Edition 5-2. 1999-04.
 [16] 한국표준협회, KSC 7601 형광램프(일반조명용), 2001.
 [17] 한국표준협회, KSC 7607 메탈할라이드램프, 1999.