

수은의 밀도차에 의한 무전극 램프의 광특성 분석

이 계 승*, 이 재 민**

Optical Characteristic Analysis of Electrodeless Lamp due to the Density Difference of Mercury

Kye-Seung Lee*, Jae-Min Lee**

요 약 무전극 램프의 광학적 특성 분석을 위한 연구에서는 램프 표면의 온도를 모두 동일하게 취급해 왔었다. 그러나 이러한 방법에 의해 광학적 특성을 해석하는 것은 정확도를 고려할 때 충분하지 않은 문제점을 가지고 있었다. 본 논문에서는 이러한 문제를 극복하고자 벌브 내부를 열점과 냉점의 두 부분으로 나누어 서로 다른 온도에 의한 수은의 밀도 차이를 분석하였다. 여기서는 온도와 밀도의 분포가 선형적임을 가정하였다. 열점과 냉점의 밀도의 재분배를 통한 광 특성의 영향을 분석하였다. 또한, 재분배된 방전기체 간의 밀도의 비가 광 특성의 포화에 지대한 영향을 미치고 있음도 확인하였다. 따라서 가정을 통한 설계 방법이 실제의 설계에서 매우 유용함을 입증하였으며, 또한 광 특성이 안정되는 시간을 단축하는 방법에 대한 성과도 확보하였다. 이러한 결과를 토대로 원통형 무전극 방전램프의 효율적인 설계의 한 방안을 제시하였다.

Abstract For the analysis of the optical characteristics of electrodeless lamps, all the lamp surface temperatures have been treated the same. However, the interpretation of optical properties in this way has not been sufficient in terms of accuracy. In this paper, to overcome this problem, we divided the inside of the bulb into two parts, hot spot and cold spot, and analyzed the density difference of mercury by different temperatures. Here, it is assumed that the distribution of temperature and density is linear. The effect of optical characteristics through redistribution of hot spot and cold spot density was analyzed. It was also confirmed that the ratio of the density of the redistributed discharge gas has a great influence on the saturation of the optical characteristics. Therefore, it is proved that the design method through the domestic setting is very useful in the actual design, and the method for shortening the time for stabilizing the optical characteristics is obtained.

Key Words : Cold Spot, Electrodeless Lamp, Gas Density, Hot Spot, Mercury Vapor Pressure

1. 서론

무전극 램프는 수십 W에서 수백 W까지 넓은 개발 범위와 긴 수명으로 주목받아 2000년도 중반부터 국산화에 성공하였다. 하지만 초기 가격 경쟁력, 보급정책 등의 문제로 활성화가 지연되어 200 W까지만 개발이 이루어진 상태이며, 당면한 기술의 문제는 국내의 램프제조 관련기술이 매우 취약하다는 것이다[1]. 무전극 램프에 있

어서 광학적 특성은 램프 내부의 방전현상, 플라즈마 특성 그리고 안정기 특히 커플러와의 매칭 특성 등이 복합적으로 나타난 결과이다. 광학적 특성은 수은의 여기 전리와 관련이 깊으며 이 과정에서 발생하는 수은의 자외선 파장과 강도에 가장 큰 영향을 받는다. 수은의 충돌, 여기 및 전리는 수은의 입자 분포에 영향을 받으며 이를 대표할 수 있는 것이 밀도 분포이다.

지금까지의 기체 분포에 대한 해석은 램프 전체가 동

*Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University

**Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University

Received October 14, 2017

Revised October 19, 2017

Accepted November 02, 2017

일한 온도라고 가정을 하였다. 이는 냉점이라는 특성을 가지고 있는 무전극 램프의 해석에 있어서 온도 구배의 영향을 생략한 것으로 현상 분석의 정확성을 충분히 보장하지 않는다. 단순하게 방전이 주로 발생하는 램프의 중심부에서의 해석은 가능할 수 있으나 실제로는 적지 않은 오류를 포함하고 있다. 램프의 표면 온도가 동일하다면 기체의 상태방정식에서 온도가 상승할 때 압력도 상승한다. 밀도는 일반적으로 압력에 비례하므로 온도의 상승과 함께 상승하는 것으로 해석하고 있다. 그러나 실제 환경에서는 온도의 구배가 존재하고 있고 열평형이 일어나도 국부적 열평형이므로 밀도 역시 구배가 일어나게 되며 여기에 온도가 두 배로 상승하면 더욱 확실하게 온도 구배가 형성될 것이다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 램프 내의 온도를 열점과 냉점의 두 부분으로 나누고 이에 따른 밀도의 차이를 분석하고자 한다. 온도 구배가 발생하는 이유는 대류에 의한 냉각이 전도에 의한 열전달과 평형을 이루며 열은 상향으로 이동하기 때문으로 예측된다. 이와 같은 조건에서는 열점에서의 밀도는 기체의 팽창에 의해 감소하고 감소한 만큼 냉점으로 이동할 것이다. 확산에 의한 현상을 간략하게 하기 위해 다음과 같이 가정한다. 첫째, 온도 구배는 선형의 기울기를 가지고 있다. 둘째, 밀도 구배 역시 선형적인 기울기를 가지고 있다. 셋째, 밀도는 사를의 법칙을 따른다.

광학적 특성의 안정 시간이 빨라지면 여러 가지 이점이 많아진다. 이러한 가정을 기반으로 광학적 특성의 초기 안정화를 위한 분석을 병행한다. 또, 방전 기체의 혼합비율은 페닝효과(Penning Effect)와 관련되어 광학적 특성을 결정하는 요인 중 하나이다. 여기서는 주입하는 압력 보다는 방전 시 내부에서의 기체 밀도를 분석하여 이를 통해 안정화 시간의 단축을 살펴본다. 열점의 평균온도는 고온과 저온을 4등분하여 고온 쪽에서 사분의 일 지점의 온도로 대표한다. 여기에 램프 내부의 온도에 의한 기체의 밀도비가 방사조도의 안정화와 관련이 있을 것으로 예측하여 광학적 특성을 분석하고 이를 통해 무전극 램프에 대한 새로운 설계 방안을 제안한다.

2. 설계 변수 분석

수은의 증기압과 수은램프의 발광효율은 그림 1과 같이 나타난다.

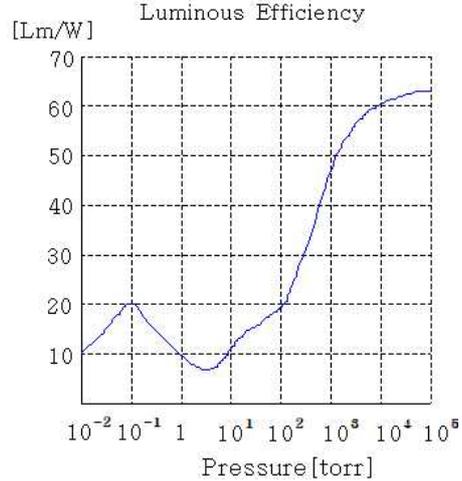


그림 1. 수은증기압에 대한 발광효율
Fig. 1. Efficiency to Hg vapor pressure

그림 1에서 보면 수은의 압력이 약 0.1torr 일 때 가장 효율이 좋다[2]. 실온에서는 수은의 증기압이 약 10^{-3} torr 이며 수은증기압을 1torr 근처로 제어하는 것이 가능하다. 그림 2의 그래프는 수은의 증기압을 나타낸 것이다.

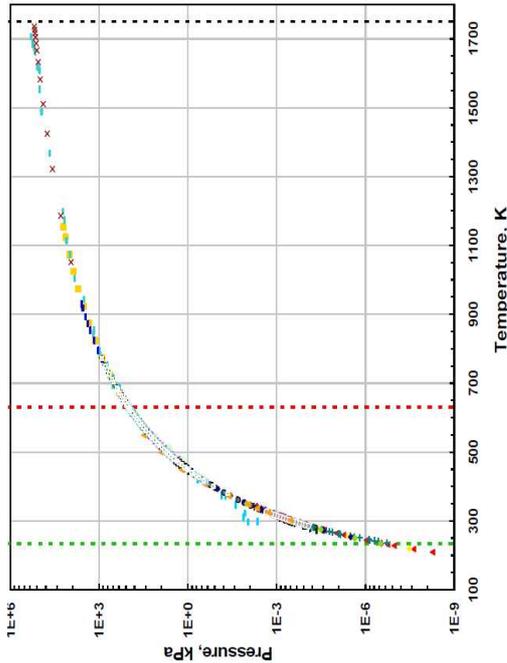


그림 2. 수은 증기압
Fig. 2. Vapor pressure for mercury

수은 증기압은 온도 증가에 따라 증가하며, 다음의 식들로 계산할 수 있다[3-5].

$$\ln(p_{vp}) = A - \frac{B}{C + T} \quad (1)$$

$$P_{vs} = 1.36 \times 10^{10} \exp(-7345/T) \quad (2)$$

$$\log P = 15.36072 - 0.795 \times \log T - \frac{3305}{T} \quad (3)$$

여기서, 온도단위는 절대온도, 압력단위는 Pa이다. 이처럼 정확한 증기압을 표현하기 위해 수많은 연구들이 있었으며 그 중에서도 가장 일반적인 형태의 방정식이 다음의 식 (4)이다.

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T}\right) \sum_i a_i \tau^{i/2} \quad (4)$$

$\tau = 1 - T/T_c$ 는 와그너와 그 동료들에 의해 주어진 것이며, 다양한 유체의 증기압에 성공적으로 사용되었

다. 여기에 열·용량 데이터가 추가되고 증기압 데이터를 수정하여 최종적으로 얻은 방정식이 다음 식(5)이다 [6].

$$\ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = \left(\frac{T}{T_c}\right) \left(\frac{a_1 \tau + a_2 \tau^{1.89} + a_3 \tau^2}{+ a_4 \tau^8 + a_5 \tau^{8.5} + a_6 \tau^9} \right) \quad (5)$$

여기서는 식 (5)에 의한 증기압을 적용하였다.

이상의 식들은 모두 온도의 함수로서 수은 증기압을 표현하고 있음도 알 수 있다. 압력이 주어지면 밀도를 환산하여 계산할 수 있다. 기체분자는 고에너지 전자와 충돌하여 여기 및 이온화 된다. 이때 플라스마 밀도에 직접적인 영향을 미치는 충돌은 이온화를 일으키는 충돌이다[7]. 각 원자들의 플라스마 발생비율은 이온화 충돌 주파수와 전체 충돌 주파수의 비의 값으로 주어지며, 방전을 위한 플라스마 밀도의 대부분은 수은 밀도이다 [8]. 혼합기체의 전자에너지 분포함수는 혼합비에 따라 약간의 차이는 나타나며 대체로 순수 아르곤 기체의 전자에너지 분포함수와 거의 같은 경향을 나타내고 있다 [9].

글로벌 방전에서는 입자의 평균자유행정이 길어서 이상기체로 적용할 수 있으며, 입자 사이의 충돌확률이 상대적으로 감소한다. 관벽 온도 T_w 에서의 수은원자밀도 n 을 특정한 근사식으로 회귀시켜 얻은 결과가 다음의 식 (6)이며[10] 단위는 $[m^{-3}]$ 이다.

$$\log [n(T_w)] = A_0 + \frac{A_1}{T_w} + A_2 \log(T_w) \quad (6)$$

$$A_0 = 3.676 \times 10^1$$

$$A_1 = -3.391 \times 10^3 [m^{-3} \cdot K]$$

$$A_2 = -2.262$$

플라스마의 기본량으로서 전자온도나 전자밀도의 파악은 중요하며 [11], 주파수가 변하면 전자온도의 분포가 변한다[12]. 전자온도와 밀도는 상호 독립적이지 않으며 전자밀도는 볼츠만 방정식을 따른다[13]. 일반적으로 코일에 고주파 전류를 흘려서 만드는 유도결합형 플라스마 장치는 대체로 원통형 내외부에 나선형형태의

코일을 감은 Helical 형과 평판위에 나선형 형태의 코일을 감은 Spiral형이 있다. 이런 장치에서 만들어지는 플라즈마의 밀도는 $10^{17} \sim 10^{18} [m^{-3}]$ 이고 직경은 30[cm] 정도이다[14]. 또한, 플라즈마와 안정기와의 매칭도 중요하다. 2004년에 등장한 무전극 램프는 135[kHz]의 주파수를 적용하여 효율을 향상시키고 고주파노이즈를 줄였다[15].

이와 같이 무전극 램프의 설계 변수는 여러 요인들의 복합적인 결합으로 나타난다. 그렇지만 광원 자체에 대해서는 입자밀도 분포가 핵심요소 중 하나임은 사실이며, 기존에는 램프의 온도를 동일한 하나의 온도만으로 해석해 왔는데 여기에 문제점이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 온도에 의존하는 밀도를 열점과 냉점의 두 부분으로 분리하고, 이를 적용한 램프의 광학적 특성을 기존의 방식과 비교분석하여 제시하는 설계방안의 타당성을 입증한다.

3. 제안하는 밀도차에 의한 설계방법

식 (6)에서는 램프 표면의 온도를 동일하게 보고 있어 온도가 올라가면 밀도도 증가한다. 여기서는 관벽 온도가 올라가면 열점 부위의 수은 기체의 밀도는 감소하고 냉점 부위의 수은 밀도는 온도에 의해 결정된다. 냉점 부위는 단일 온도로 적용하고 열점의 경우에는 평균온도의 개념을 적용해야 할 것으로 생각된다. 원통형의 광원에서 온도와 밀도의 구배는 상하의 방향으로 가정할 수 있으며 일차원적인 해석이 가능하다. Fick의 제 2법칙 $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ 의 해는 지수함수이며, 다음의 식 (7)로 나타낼 수 있다[16].

$$C = \frac{A}{t^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (7)$$

여기서, D는 확산계수, x는 위치, A는 상수이다. 경계조건 t=0 일 때, C=C₀, t>0, x=0일 때, C=C₁을 밀도에 적용하면 다음 식 (8)과 같다.

$$n = n_h + (n_c - n_h) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (8)$$

여기서, 첨자 c와 h는 각각 냉점과 열점을 나타낸다. 여기서 확산거리는 $x \approx \sqrt{Dt}$ 이므로 함수 값을 적용하면 다음의 식 (9)를 얻는다.

$$n = 0.48n_c + 0.52n_h \quad (9)$$

식 (9)에서의 n은 열점에서의 밀도 n_h를 보정한 값이다. 여기서 냉점은 수은의 증기를 공급하는 source이자 열점에서 밀려오는 수은 증기를 받아들이는 sink의 역할도 수행한다. 또한, 냉점에서의 수은은 열점에서의 오는 수은 증기를 받아 들여도 밀도의 변화는 없을 것으로 생각된다. 이를 방전 기체의 혼합비와 함께 적용하여 방전의 안정화에 주는 효과를 분석해 본다.

3.1. 실험 장치 구성

적용한 램프는 방전의 안정을 기준으로 적정 Ar 압력과 적정 Hg 양을 주입한다.

그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였는데 측정을 위하여 입력 전력은 PM-B200-U, 스펙트럼은 Avantes Auto-2048, 온도는 Chino AH-3725 등의 기기를 사용하였다. 왼쪽 그림은 광원의 점등과 온도 및 입력전력 측정을 위한 기본 장치이다. 여기에 오실로스코프를 연결하면 전기적 특성을 평가하고, hole에 스펙트럼 측정기의 센서를 연결하여 광학적 특성을 평가한다. 왼쪽 그림의 위에 보이는 것은 방열판이며 오른쪽 위는 안정기이고, 중앙은 전력계, 그리고 아래의 일부는 온도를 측정하는 레코더이다.



그림 3. 광학적 특성 측정 장비
Fig. 3. Optical characteristic measuring device

3.2 실험 결과 및 검토

3.2.1 방전 기체의 자외선 방사 특성

표1. 수은의 강한 방사 특성

Table1. Strong radiation of mercury

λ [nm]	Rad.	state	E[eV]	Rad.[%]
165.0	1,000	2	7.52	20.8
184.9	1,000	1	6.71	20.8
194.2	1,000	2	6.39	20.8
205.3	400	2	6.04	8.3
226.2	400	2	5.48	8.3
253.7	1,000	1	4.89	20.8

표2. 아르곤의 강한 방사 특성

Table2. Strong radiation of argon

λ [nm]	Rad.	state	E[eV]	Rad.[%]
67.2	1,000	2	18.5	29
72.3	1,000	2	17.2	29
104.8	1,000	1	11.8	29
106.7	500	1	11.6	14

위의 표1과 표2에서[16] 수은은 자외선 영역에서 상대적으로 강한 방사특성을 보이고 있으며, 아르곤의 경우에는 진공자외선과 X선 영역에서 상대적으로 강한 방사 특성을 보이고 있다.

점등 초기의 아르곤과 수은의 스펙트럼 특성을 보면, 점등 초기에는 낮은 온도 때문에 수은의 증기압이 매우 작으므로 대부분 아르곤 파장이 주를 이룬다. 특히, 아르곤의 경우에는 자외선 영역과 가시광선 영역에서는 거의 방사하지 않고, 진공자외선의 끝부분과 적외선 영역에서의 방사가 주를 이루고 있다. 반면에 수은의 경우에는 점등 초기에는 방사가 거의 없다가 점점 자외선 영역과 가시광 영역에서의 방사가 강해진다. 특히 자외선 영역에서는 253.7nm의 방사조도가 기타 파장의 방사조도보다 10배 이상 많게 나타나고 있어 대부분을 차지하고 있다.

그림 4는 주위 온도가 낮은 경우 점등 초기 특성을 나타내고 그림 5는 주위 온도가 높은 경우 점등 초기의 특성을 나타내고 있다. 온도에 의한 수은의 증기압이

높아짐에 따라 253.7 nm의 파장에서 방사조도가 현저한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

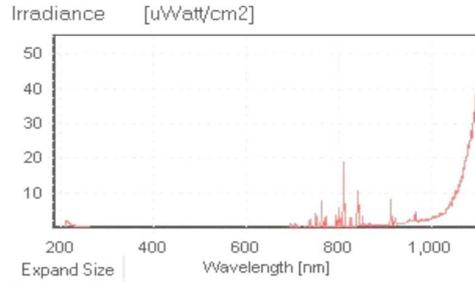


그림 4. T1의 방사조도
Fig. 4. Spectral irradiance of T1

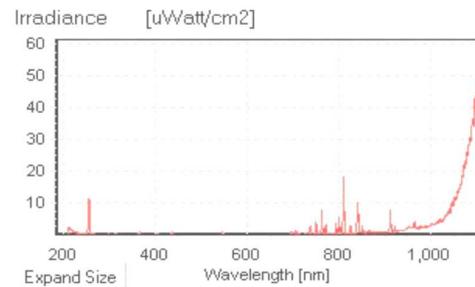


그림 5. T4의 방사조도
Fig. 5. Spectral irradiance of T4

그림 6은 자외선과 254nm 파장의 방사조도를 나타낸 것이다. 자외선의 기준은 통상 200nm 보다 작은 파장을 진공자외선, 200 ~ 280nm를 자외선 C, 280 ~ 320nm를 자외선 B, 320 ~ 400nm를 자외선 A라고 한다. 여기서는 기기에 입력되어 있는 값을 기준으로 하였고, 250nm ~ 260nm를 자외선 254nm로 대표하여 산정하였다.

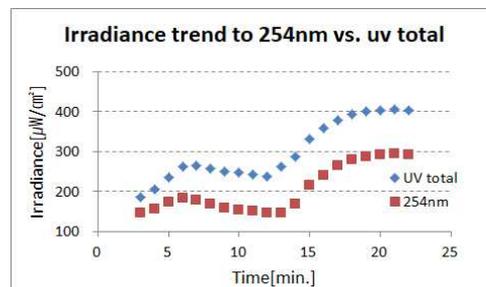


그림 6. 254nm와 자외선의 방사조도
Fig. 6. Irradiance of 254nm vs. UV

자외선 C와 254nm는 상관관계가 있는 것으로 판단되며 이는 천이 확률에 의한 것으로 생각할 수 있다. 또 준안정 상태를 가지고 있어서 특정 에너지 레벨에서 머무는 시간이 길어지고 이 때문에 다른 입자와의 충돌 확률이 증가하기 때문으로 분석된다. 또, 방전이 안정되면 그 비율이 거의 일정하게 나타나며, 상대 강도는 기본 데이터가 아니므로 광원 및 여기 조건에 따라 달라진다[17]. 여기에서도 상대 강도는 실제와는 다른 양상을 보였다. 또, 전혀 예상하지 못했던 226nm의 파장이 점등 초기에 매우 높은 방사조도 값을 나타냈다.

3.2.2 수은 밀도의 분포 특성

온도에 따른 수은 증기압의 기본적인 자료는 참고문헌 [6]을, 유량 변화에 대한 것은 참고문헌 [18]을 참조하였다. 우선, 참고문헌의 보정식과 관벽 온도로 밀도를 계산하는 식 (5)와 식 (6)을 비교해 보면 계산된 결과는 오차범위 3% 이내에서 일치하고 있다. 이를 표3에 나타내었다.

표3. 수은의 밀도 [ea./liter]
Table3. Density of mercury

Time (min.)	10	15	20
hot-spot (°K)	498	506	510
equation (5)	7.24E+20	8.91E+20	9.88E+20
equation (6)	7.11E+20	8.74E+20	9.69E+20

여기서 가정한 온도에 의해 밀도차가 발생하여 이들에 의해 확산이 일어남을 전제로 하고 열점의 온도를 평균온도로 설정하여 식 (9)를 적용한 결과가 표 4이다. 표3과 비교해보면 밀도에 있어서 현격한 차이가 발생함을 알 수 있다.

표4. 수정된 수은의 밀도 [ea./liter]
Table4. Modified density of mercury

Time (min.)	10	15	20
hot-spot(°K)	498	506	510
equation(9)	9.16E+16	1.50E+17	1.96E+17

그림 7과 그림 8은 각각 온도를 열점과 냉점으로 나눈 것과 동일 온도로 설정한 것으로 A, B, C 각각에 대한 밀도의 추이가 많은 차이를 보여주고 있다. 여기서

A와 B는 안정기 A와 안정기 B를 적용한 것을 나타낸다. C는 A와 B에서 얻은 결과를 참조하여 배기관의 Tip 길이를 설정한 램프를 말한다. C에서는 안정기 B로 점등하였다.

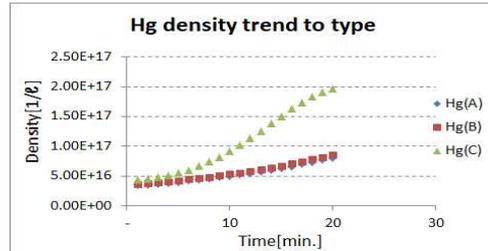


그림 7. 방식별 밀도의 추세
Fig. 7. Density trend to type

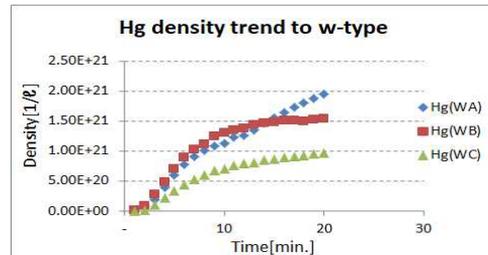


그림 8. W 형의 밀도비율 추세
Fig. 8. Mercury density to W type

3.2.3 온도 변화에 의한 광학적 특성

점등 초기 특성으로 벌브 표면의 온도 증가에 따른 자외선 방사조도에 대해 대표적인 두 파장을 비교한 것이 그림 8이다.

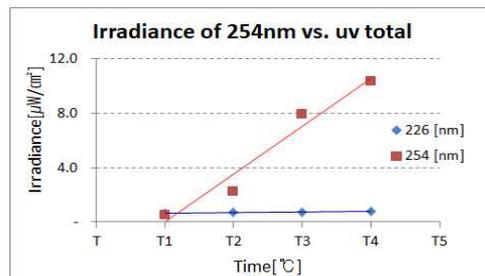


그림 9. 226nm와 254nm의 방사조도 비교
Fig. 9. Irradiance comparison of 226 & 254 nm

그림 9는 온도를 T1, T2, T3 및 T4등으로 상향 조정하면서 그 때의 방사조도를 나타낸 것이다. 그림 9의 두 파장은 자외선 영역에서 전체의 95% 이상을 차지하고 있다. 254nm는 온도와 함께 상승하지만 226nm는 거의 일정한 수준을 보이고 있다.

열점과 냉점의 경우에도 온도가 높은 순서대로 방사조도가 같은 순서로 나타나는 특성을 보였다. 낮은 주위 온도에서는 254nm의 방사조도가 큰 영향을 주지 못하지만 높은 온도로 갈수록 포화되는 시점이 앞당겨지는 경향이 뚜렷해짐을 알 수 있다.

3.2.4 열점과 냉점의 영향

온도 분포가 형성되는 것은 비대칭적 구조에 의한 온도 차, 전계 분포의 불균형에 따른 온도 차, 대류 냉각의 효과에 의한 온도 차, 그리고 증력의 영향에 의한 온도 차 등이다. 수은과 같이 분자량이 크고 비중도 큰 경우에는 상향과 하향 점등의 특성이 달라진다. 그림 10과 표5는 냉점과 열점의 온도에 기인한 결과로 기체 혼합비율과 광 특성의 안정과의 관련되는 특성을 나타낸 것이다.

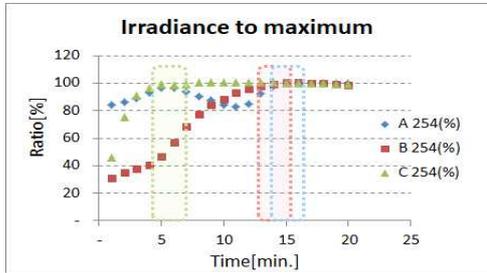


그림 10. 254nm의 방사조도 추이
Fig. 10. Irradiance trend of 254nm

표5. 혼합비율에 있어서 방사조도 안정시간
Table5. Optical characteristic to ratio.

Time (min.)	6	13	14	15
Ratio (A)	122	167	175	184
Ratio (B)	131	179	188	197
Ratio (C)	176	365	401	438
Ratio (WA)	202	368	400	425
Ratio (WB)	235	393	402	404
Ratio (WC)	109	211	222	229

표5는 열점에서의 수은 밀도와 아르곤 밀도의 비의

추이를 나타낸다. Ratio는 $n_h(Hg)/n_h(Ar)$ 를 말하며, (A), (B), (C)는 식 (9)를 적용한 A, B 및 C 방식을, (WA), (WB), (WC)는 식 (5)를 적용한 경우는 W를 앞에 붙였다. 또, 시간은 그림 10에 나타난 것처럼 방사조도가 포화되는 지점의 시간을 말한다. 기존의 방식은 혼합기체의 밀도비와 방사조도의 상관관계를 알 수 없지만 제한한 방식은 확실한 상관관계를 나타내고 있다. 그림 11은 점등 초기의 254nm의 방사조도 추이를 나타낸다. 온도는 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$ 순이며 온도가 더 상승하면서 포화되고 더 상승하면 overshoot 현상이 발생한다. 이는 곧 $T_3 < T_c < T_4$ 에 냉점이 있음을 의미한다.

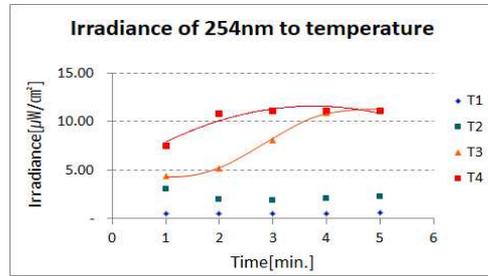


그림 11. 254nm의 방사조도 추이
Fig. 11. Irradiance trend of 254nm

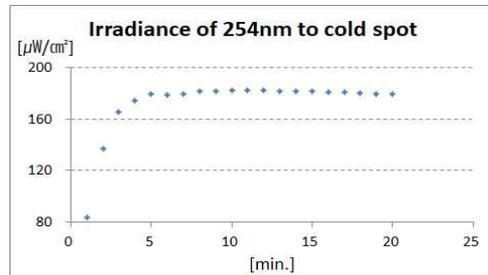


그림 12. 냉점설계에 의한 254nm의 방사조도
Fig. 12. Irradiance trend of 254nm to cold spot

3.3 무전극 램프의 새로운 설계 방안

이상의 실험에서 램프 표면의 온도를 적용할 때 서로 다른 가정에 대한 수은 밀도는 완전히 다른 양상을 보이고 있으며 온도가 상승하면 밀도도 상승하는 결과는 잘못된 것으로 보인다. 열점부위에는 처음에 잠시 동안은 제외하고는 액상의 수은이 존재하지 않을 것이므로 밀도가 상승해야할 근거가 없다고 할 수 있다. 또

한, 기존의 방식을 적용하면 분석이 불가능했던 안정화 관련 부분도 여기서 설정한 가정을 적용하면 결과가 잘 일치한다. Ratio (A)와 Ratio (B)에서의 결과는 Ratio 값이 175에서 179 사이에 254nm의 방사조도가 포화 되는 지점이 존재함을 말해주며 Ratio (C)에서 이를 확인하였다. 한편, 식 (5)을 이용하고 별브의 표면을 동일 온도로 적용한 경우는 Ratio 값에 상관성이 없다. 이는 냉점이 광학적 특성에 어떻게 기여하고 있는지에 대한 메카니즘을 규명하지 못해서 발생한 것으로 보이며 설계에도 기여할 수 없음을 의미한다.

여기서는 램프의 내부에서는 열점과 냉점의 온도차에 의해 밀도 차이가 형성된다. 냉점은 source로 작용하여 열점으로 증기를 공급하며 열점은 팽창에 의해 그 일부를 냉점으로 보내므로 냉점은 sink의 역할도 수행할 것이다. 따라서 냉점은 온도만의 함수이기에 열점으로부터 오는 수은 증기가 있음에도 밀도가 상승하지 않고 일정하게 유지되면서 열점과 냉점의 순환 구조를 형성한다. 열점과 냉점을 구분한 밀도와 혼합비율을 Type A, Type B에 적용하여 분석하고 이를 Type C에 적용한 결과 예상과 잘 일치함을 확인하였다.

따라서 여기에서는 다음과 같은 새로운 접근방법에 의한 설계 방안을 제시하고자 한다. 첫째, 램프내의 온도를 열점과 냉점의 두 부분으로 나눈다. 둘째, 열점의 밀도를 온도에 대한 샤를의 법칙을 적용하여 구하고 냉점은 증발에 의한 밀도를 구한다. 셋째, 확산의 법칙을 활용하여 열점의 밀도를 평균온도로 대체하여 보정한다. 넷째, 밀도에 의한 기체의 혼합비를 계산하고 포화 현상이 발생하는 값의 범위를 설정한다. 다섯째, 이를 토대로 냉점의 온도를 설정한다.

4. 결론

본 논문에서는 밀도차에 의한 무전극 램프의 광학적 특성을 분석하고 이를 토대로 보다 효과적인 새로운 설계 방안을 제시하였다.

별브 내부를 열점과 냉점이라는 두 부분의 상호 순환 관계의 구조로 설정, 온도 구배를 선형으로 가정하였다. 냉점과 열점 사이를 밀도의 확산에 의한 재분배로 수정된 밀도를 적용하고 열점의 온도를 평균온도의 개념으로 적용하였다. 그리고 기체의 밀도 비율에 적정 범위

가 존재할 것으로 예측하였으며 이를 통해 광학적 특성을 설계하였다.

이와 같은 가정을 적용하여 매우 만족할만한 결과를 얻었으며 다음과 같은 네 가지 결론에 의해 효율적인 무전극 램프를 설계할 수 있다.

첫째, 무전극 램프의 광학적 특성은 열점과 냉점 간의 수은증기 밀도에 의한 확산작용의 상호결합의 결과로 나타난다.

둘째, 밀도와 온도 구배는 선형으로 적용하여 해석을 할 수 있다.

셋째, 열점에서의 혼합기체의 적정한 밀도 비는 방사조도의 포화 및 안정과 관련이 있다.

넷째, 열점의 온도와 밀도 비를 산출하여 냉점의 온도를 설계하면 광학적 특성의 안정화 시간이 빠른 광원을 얻을 수 있다.

REFERENCES

- [1] Y. I. Chung, D. C. Jung, Y. K. Kim, D. H. Park, Study of the Characteristic and Optimization of Induction Lamp according to Gas Pressure and Amalgam Type, JKIIECT, Vol. 10, No. 1, Feb., 2017.
- [2] Nippon Denki Academy, Hoden Handbook, pp. 165, Nippon Denki Academy, 1973.
- [3] S. W. Rhee, Characteristics of mercury concentration in fictitious fire due to fracture of compact fluorescent lamp, Korean Chem. Eng. Res., Vol. 52, No. 5, pp. 652-656, 2014.
- [4] P. Hickson, R. Cabanac, S. E. M. Watson, A Study of Mercury Vapour Concentrations at the UBC/Laval 2.7-metre Liquid Mirror Observatory, Department of Geophysics and Astronomy University of British Columbia, Canada, 13 November, 1993.
- [5] L. F. Kozin, S. Hansen, Mercury Handbook, pp. 10-13, Royal Society Chemistry, 2013.

- [6] M. L. Huber, A. Laesecke, D. G. Friend, Correlation for the Vapor Pressure of Mercury, American Chemical Society, 2006.
- [7] M. J. Lee, E. J. Chung, Experimental Analysis on the 0 Dimensional Plasma Model in an Inductively Coupled Plasma (ICP), New Physics: Sae Mulli vol. 66, pp. 1183-1180, 2016.
- [8] J. H. Bong, Y. J. Kim, H. C. Hwang, D. J. Jin, J. M. Jeong, J. H. Kim, J. H. Ko, G. S. Cho, Mercury Quantity in a Fluorescent Lamp for a Backlight of LCD-TVs, Applied Science and Convergence Technology, Vol. 17, No. 6, pp. 495~500., 2008.
- [9] S. C. Ha, Y. H. Paek, A Study on the Characteristics Transport and electron energy distribution function in Hg-Ar, Ministry of Education, 1993.
- [10] M. S. Ryou, J. W. Yi, C. K. Chee, The analysis of electron energy distribution function using the approximated collision cross section in the low-pressure mercury discharge, The Proceedings of The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 3, No. 4, December 1989.
- [11] H. Kakehashi, A. Sato, T. Yanai, H. Fukunaga, T. Uetsuki, Analyzing Density in an Induction-coil-type Electrodeless Lamp, J. Illum. Engng. Inst. Jpn., Vol. 93, No. 11, 2009.
- [12] T. Uetsuki, M. Ueda, S. Nimata, M. Saimi, H. Kakehashi, Effect of Operating Frequency on Plasma Characteristics of Inductively Coupled Electrodeless Lamp, J. Light & Vis. Env., Vol. 34, No. 1, 2010.
- [13] Yinchang Du and Yangfang Li, Plasma Density Distribution in Asymmetric Geometry Capacitive Coupled Plasma Discharge System, International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering Vol:6, No:11, 2012.
- [14] H. Sugai, K. Ohe, Plasma Electronics, Ohmsha, Ltd., pp. 149-152, 2000.
- [15] H. Kakehashi, S. Yamamoto, T. Ninomia, Analyzing Charge-pump Inverter Circuit for Induction-coil Type Electrodeless Lamp, J. Illum. Engng. Inst. Jpn., Vol. 93, No. 2, 2009.
- [16] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, pp. 1-16, Oxford University Press, 1975.
- [17] NIST, Handbook of Basic Atomic Spectroscopic Data, NIST, https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable2_a.htm
- [18] H. Kumagai, G. Tominaga, Y. Tuzi, G. Horikshi, Vacuum Science and Engineering, pp. 103-110, 376-380, Syokabo Tokyo, 1970.

저자약력

이 계 승(Kye-Seung Lee) [정회원]



- 1986년 2월 : 한양대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
- 1989년 4월 ~ 1998년 9월 : 삼성SDI 중앙연구소 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 2017년 11월 : 가톨릭관동대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 무전극 램프, 태양광 발전 시스템

이 재 민(Jae-Min Lee) [정회원]



- 1979년 : 한양대학교(공학사)
- 1981년 : 한양대학교 대학원 (공학석사)
- 1987년 : 한양대학교 대학원 (공학박사)

- 1990년 ~ 1991년 : 일리노이대학Urbana-Champaign Post-Doc. (한국연구재단)
- 1992년 ~ 1994년 : 관동대학교 전자계산소 소장
- 1994년 ~ 1996년 : 대한전자공학회 강원지부장
- 2001년 ~ 2002년 : 뉴욕주립대(Buffalo) 연구교수
- 2011년 ~ 2013년 : 관동대학교 공과대학 학장, 방재대학원장
- 2011년 ~ 2013년 : 관동대학교 공학교육혁신센터장
- 2010년 ~ 현재 : 한국정보전자통신기술학회 부회장

<관심분야> SoC 및 컴퓨터회로 설계, 태양발전시스템, LED 감성조명, 공학교육콘텐츠설계, 적정기술