

무전극 램프의 성능 향상을 위한 커플러의 열특성 연구

이 계 승*, 이 재 민**

A Study on the Thermal Characteristics of a Coupler to Improve the Performance of Electrodeless Lamp

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

요 약 무전극 램프의 열특성은 램프의 설계와 성능을 결정하는 주요 요소 중 하나이다. 커플러는 열에 의해 임피던스 특성이 변화하며 그 사용온도가 보통 약 150℃ 이내이다. 본 연구에서는 지금까지 논의했던 150℃ 이상의 온도에 커플러가 노출되었을 때의 현상에 대해 관찰하였다. 벌브의 안쪽 내관과 커플러와의 이격거리가 다른 두 종류의 커플러 A와 커플러 B에 대해 방열 조건과 열 차단 조건을 달리하여 전기적 특성, 열적 특성, 광학적 특성과의 연계성 및 열화 특성 등을 분석하였다. 우선 시스템의 임피던스를 구하여 이를 통한 전기적 특성을 분석하는 기준으로 삼았다. 두 종류의 커플러의 직경차는 1mm이며, 실험 결과에서 커플러의 직경이 1mm 작아서 발생하는 자계강도의 손실을 상쇄할 수 있는 조건을 찾을 수 있었다. 따라서 이러한 결과를 토대로 커플러가 약 200℃의 고온에 노출될 때, 이에 대응하는 효율적인 설계 방안을 제시하였다.

Abstract The thermal characteristics of the electrodeless lamp are one of the main factors that determine the design and performance of the lamp. The coupler changes the impedance characteristic by heat and its use temperature is usually within about 150 °C. In this study, we observed the phenomenon when the coupler was exposed at a temperature of 150 °C or higher, which has not been discussed so far. Two types of coupler A and coupler B with different spacing between the inner tube and the coupler were analyzed for electrical, thermal and optical properties and deterioration characteristics with different heat and heat shielding conditions. First, the impedance of the system is obtained and used as a criterion for analyzing the electrical characteristics through it. The diameters of the two types of couplers are 1 mm, and the experimental result shows that the coupler diameter is 1 mm, which can cancel out the loss of the magnetic field strength. Therefore, based on these results, when the coupler is exposed to high temperature of about 200 °C, the efficient design method corresponding thereto is proposed.

Key Words : Deterioration, Electrodeless Lamp, Impedance Matching, Induction Coil, Life-Time of Lamp

1. 서론

최근까지 무전극 방전램프에 대한 다양한 연구가 시도되어 왔다[1-4]. 무전극 램프의 가장 큰 장점은 장수명이다. 무전극 램프는 60,000 시간 이상의 매우 긴 수명을 가지므로 유지 보수가 어려운 경우에 주로 사용된다[5]. 이처럼 수명이 8년이 넘어가면 가속수명 시험으로

램프의 수명을 결정하는 것이 유리하지만 특수 램프를 제외하고는 아직 실증적 연구는 보고된 바가 없었다. 전력은 램프와 안정기의 상호 매칭에 의해 결정되므로 안정기 자체만의 출력 전력의 조절에 의한 가속수명은 결정하기 어려우며 형광체의 열화는 90℃까지의 가속수명이 적용되지 않는다[6].

열화(deterioration)는 무전극 형광램프와 같이 전

*Department of Electronic Engineering, Catholic Kwandong University

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

Received October 19, 2017

Revised October 22, 2017

Accepted October 30, 2017

극이 없는 경우에 형광체의 열화, 재료의 기체방출(outgassing), 그리고 안정기의 열화 등 세 가지가 주를 이루고 있다. 하지만 형광체의 열화에서 전자나 이온의 충격에 대한 것과 재료의 기체방출은 코팅 및 열처리로 어느 정도 해결이 가능하다. 형광체는 도포 후의 소성 공정에서 400°C~600°C에 노출되면서 열화가 가장 심하게 일어난다. 현재 상용화 되고 있는 무전극 램프의 표면온도는 150°C를 넘지 않으므로 고온에 의한 가속수명은 형광체 자체의 열화만이 해당될 것으로 보인다. 따라서 광원 자체의 열화 특성 보다는 안정기의 열화 문제를 중점적으로 분석해 보아야 한다. 현재 전구형 무전극 램프에서는 200W가 가장 큰 고출력 램프이고 벌브 표면의 온도는 150°C를 넘지 않으며 커플러(coupler) 주변의 온도 역시 150°C를 넘지 않게 설계하도록 권장하고 있다. 그러나 향후에는 300W 이상의 고전력 광원이 개발되거나, 램프 안쪽 내관의 온도가 150°C 이상이 될 수 있다. 따라서 고온일 때의 현상을 분석하여 이에 대응할 수 있는 연구는 반드시 필요하다.

지금까지 커플러에 대한 주요 설계는 안정기 회로와의 관련을 제외하면 권선의 재료 및 설계, 플라즈마와의 접근성, 그리고 방열 등이 있으나 상호 결합에 의한 특성으로 큰 방향에 대한 설계만이 알려져 있다. 예를 들면, 커플러와 가까우면 전자계에서 유리한 점이 있으나 너무 접근하면 방열의 흐름을 방해하여 커플러의 온도가 올라가서 그에 따른 단점이 발생하므로 상황에 알맞게 결정해야 한다는 것이다. 그러나 이러한 부분은 실제 설계에 적용했을 때 유용하지 않다는 문제점이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 '내관과 커플러의 직경의 차(접근성)가 1mm 정도라면 접근성에 의한 불리함 보다 방열의 흐름을 좋게 하고 냉점을 안정하도록 하는 것이 더 유리한 결과를 가져다 줄 것이다.'라고 결론을 미리 예측하였다. 이러한 예측은 경험에 의한 것이며, 이를 확인하기 위해 고온의 무전극 램프를 적용하고 시간의 경과에 따른 안정기의 상태 변화를 분석하기로 한다. 램프 내관의 온도가 약 200°C인 램프를 적용했을 때의 여러 현상들을 관찰하고 이러한 실험의 결과를 통해 유용한 설계의 방향을

제시하고자 한다.

2. 커플러의 설계변수 분석

무전극 램프에 있어서 전력은 용량성이거나 유도성에 의해 전달된다. 무전극 조명 제품은 전력변환의 효율성 때문에 낮은 동작 주파수의 유도결합을 이용한다.[7] 주파수 200 kHz 이상, 전력 100-200 W, 15W 미만의 낮은 코일 전력 손실 및 효율 90% 이상인 유도방전을 이용한 페라이트가 없는 램프에 대한 연구[8], 램프 방전과 코일을 램프 전원에 의존하는 내성과 리액턴스로 모델링[9] 하는 등 여러 연구들이 수행되었다. 통상 전구형 무전극 램프는 코일이 나선형으로 감겨있어 저항에 따른 손실이 일어나며 온도에 의해 인덕턴스의 값이 변하게 된다[10].

적용하려는 무전극 램프는 열에 강한 석영관 벌브로 제작되어 고온실험에 유리하다. 무전극 램프에서는 전기적 특성을 파악하기 위해 전기적 모델링이 적용되는데, 보통 변압기 형태의 등가회로를 이용한다. 식 (1)은 커플러와 플라즈마의 전력비를 나타낸 것인데, R 은 커플러의 실저항, L_{11} 은 커플러의 인덕턴스를 표시한다. 이때 플라즈마 내부에 발생하는 전류에 의한 유효 인덕턴스가 L_{22} 이며, R_p 는 플라즈마 저항이고 결합상수는 k 이다.

$$P_{coupler} : P_{plasma} = R : k^2 R_p \frac{L_{11}}{L_{22}} \quad (1)$$

커플러 실저항이 클 경우에는 고주파 전력이 플라즈마에 전달되지 못하고 커플러의 발열로 소모되므로 효율을 높이려면 커플러의 저항을 감소시키거나 결합상수를 1에 근접시켜야 한다. 결합상수를 높이려면 커플러와 플라즈마 사이 간격을 최소화하거나 자화율이 높은 물질을 사용해야 한다. 커플러의 코일 횡수를 늘이는 방법은 효과가 있지만, 역효과도 있으므로 전원장치의 임피던스와 부하의 임피던스가 복소공액 형태의 관계를 가지도록 매칭해야 한다 [11]. 전극이 없는 유도 램프에서 유도 결합된 Ar-Hg 플라즈마는 H 모드에서 보다 높은 효율로 나타나며, [12] 중심 유도 코일을 가진 전

구형 무전극 램프의 경우에는 100kHz에서 수 MHz 사이의 무선 주파수 범위에서 작동되는 동축 트랜스포머이다 [13]. 또한, 무전극 램프와 같은 유도코일을 사용하는 경우에는 권선에 단선을 사용하면 고주파에 의한 표피효과가 발생하고 권선 간의 근접효과로 교류저항이 증대한다[14]. 사실 저주파 유도결합 플라즈마는 결합계수가 거의 1에 가깝고 유도된 저항 성분이 리액턴스 성분을 무시할 수 있을 정도로 크기 때문에 변압기 매칭을 이용할 수 있으며, 전압과 전류 사이의 위상차에 의한 전력의 발생은 크지 않다[15]. 실 전력 151 W 무전극 램프에서 안정기 손실은 8.5 W(약 5.6%)이고, 커플러 손실은 약 3.4 W(약 2.3%)로 나타난다[15].

시스템 임피던스는 무전극램프의 전기적 특성에서 중요한 역할을 하고 있다. 지금까지의 연구에서는 결합계수를 1에 근접시키려면 벌브 안쪽 내관과 커플러가 최대한 근접하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 너무 근접하면 방전 시에 램프의 발열이 영향을 미치고 또한 내관과의 이격이 너무 협소하면 방열의 흐름을 방해하므로 이러한 방향성만으로는 실제 설계에 적용하는데 어려움이 있다. 여기서 접근성이 1mm 정도라면 경험상 접근성보다 다른 설계 조건이 우선시 될 것으로 보인다. 상용화된 제품에서는 내관과 커플러의 이격거리는 약 2mm이다. 여기서 직경이 1mm 차이가 나는 두 커플러A와 B에 대한 열특성을 살펴보고자 한다.

고온의 램프 안쪽 내관의 지름은 34mm로 하고, 접근성이 5mm(커플러 A)와, 4mm(커플러 B)가 되도록 한다. 우선 소비전력과 연계되는 시스템의 임피던스를 구하여 전기적 특성을 살펴본다. 다음에 이를 활용하여 다음과 같이 단계적으로 접근한다. 첫째, 시스템의 부하특성과 이를 통한 안정기의 전기적 특성을 해석한다. 둘째, 열린 공간에서와 닫힌 공간에서의 램프 구동 시의 현상을 분석한다. 셋째, 방열판과 연결되어 있는 유도코일부인 커플러와 램프의 내관과의 사이에 열을 차단할 때와 안할 때의 램프의 동작 특성과 안정기의 변화를 관찰한다. 이와 같은 세 가지의 결과를 통해 고온 원통형 무전극 램프에서의 효과적인 설계방안을 제시한다.

3. 실험 및 설계 방법 제안

3.1. 실험 장치 구성

실험 대상 램프를 서로 다른 두 회사의 제품인 안정기A와 안정기B로 구동하여 특성을 평가하였다. 커플러 A, 커플러B도 두 회사 A와 B의 제품을 나타낸다. 안정기와 커플러는 매칭 특성이 있어서 회사에 대해 하나의 세트로 적용하였다. 전기적 특성 평가는 원통형 무전극 램프를 구동하여 안정기 입력 전력과 커플러 양단의 전압 및 전류를 측정하였다. 그림 1과 같이 입력 전력은 PM-B200-U, 전압은 DL 7480 Oscilloscope, Probe는 P6015 1000:1 및 100:1, 전류는 i30s, 온도는 AH-3725 등의 기기를 사용하였다.



그림 1. 전기적 특성 측정 장치
Fig. 1. Electric characteristic measuring device

3.2 실험 결과 및 검토

3.2.1 원통형 무전극램프 임피던스

원통형 무전극 램프에 안정기 B를 적용하여 커플러 양단의 전압과 커플러에 흐르는 전류에 대해 살펴보았다. 이는 무전극 램프를 부하로 적용하여 나타난 결과이므로 산출한 임피던스는 무전극 램프의 시스템 임피던스로 보아도 문제가 되지는 않는다.

그림 2는 점등 순간에 나타난 출력 파형이며 그림 3은 초기 특성을 나타낸다. 황색은 전압을 녹색은 전류를 나타내고 있다. 점등 시의 파형이 3 부분으로 나타나고 있는데 이는 램프와 안정기와의 조합의 문제일 가능성이 있다. 점등 초기에 출력이 갑자기 증가하는 특성을 보이며 이는 스위치의 단락 특성이거나 램프와의 유도결합에 의한 방전 개시 특성에 의한 것으로 판단할 수 있다.

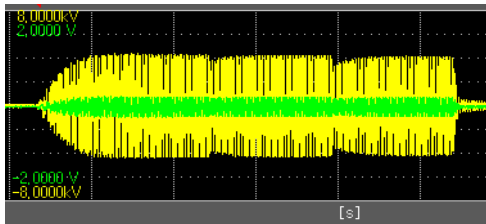


그림 2. 점등 순간의 출력 특성
Fig. 2. Output characteristics of lighting moment

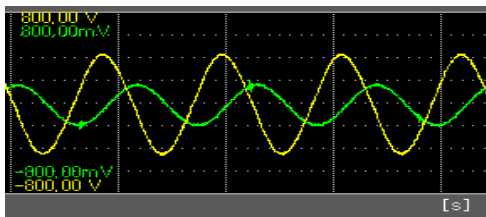


그림 3. 안정기의 출력 특성
Fig. 3. Output characteristics of ballast

임피던스는 R^2 값이 1에 근접하는 추세선 중에서 공통적인 함수인 지수함수를 선정하였으며 다음 식 (2)와 같은 형태로 나타난다.

$$Z_s(w) = \alpha e^{-\beta w} \quad (2)$$

여기서, w 는 입력 전력이며 안정기의 상태가 나빠질수록 그림 4와 같이 α 와 β 는 수치가 작아지는 경향을 보였다.

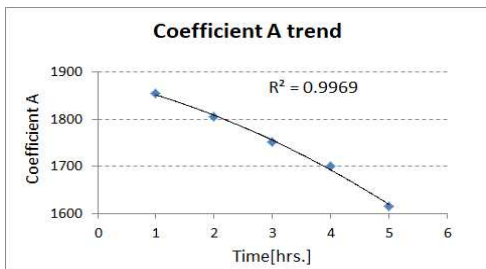


그림 4. 계수 A값의 추이
Fig. 4. Coefficient A trend

그림 4에서 점등하여 전압 및 전류를 측정하여 다음 소등하기를 1시간 간격으로 반복한 결과 $\alpha=1884.4$, $\beta=0.003$ 를 얻었다. 따라서 시스템의 임피던스는 식 (3)과 같이 되며 이를 표현하면 그림 5와 같다.

$$Z_s(w) = 1884.4e^{-0.003w} \quad (3)$$

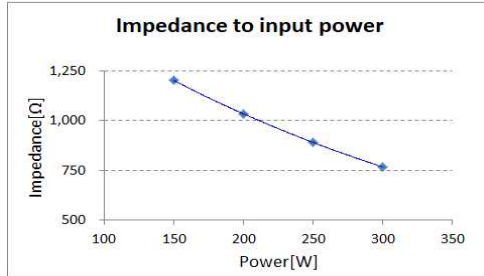


그림 5. 입력전력에 대한 임피던스
Fig. 5. Impedance to input power

다음 표1에서 전력이 증가하면 전압과 전류는 상승하고 임피던스는 줄어든다. 이는 전력이 높을수록 저항 성분이 줄어들어 효율이 향상됨을 의미한다.

표1. 시스템의 전기적 특성

Table1. Electrical characteristics of system

| Power[W] | 150 | 200 | 250 | 300 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Voltage[V] | 425 | 455 | 472 | 479 |
| Current[mA] | 0.353 | 0.440 | 0.530 | 0.626 |
| Impedance[Ω] | 1,202 | 1,034 | 890 | 766 |

3.2.2 안정기 A의 전기적 특성

안정기 A로 점등을 하였을 때의 전기적 특성의 추이를 나타낸 것이 표2와 그림 6이다. 전류는 약 10분 이후 하향 안정화 되고 있다.

표2. 안정기A의 전기적 특성

Table2. Electrical characteristics of ballast A

| Time[min.] | 5 | 10 | 15 | 20 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|
| Voltage[V] | 476 | 476 | 475 | 474 |
| Current[mA] | 569 | 575 | 556 | 545 |

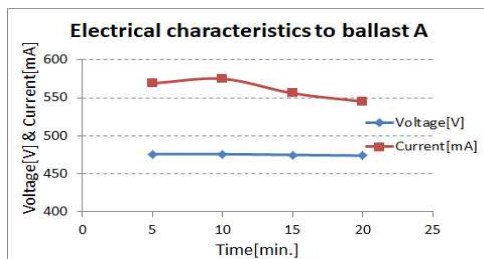


그림 6. 안정기 A의 전기적 특성
Fig. 6. Electrical characteristic of ballast

3.2.3 안정기 B의 전기적 특성

안정기 B의 전기적 특성을 나타낸 것이 표3과 그림 7이다. 전압은 점등 중 안정적이었지만 전류의 경우에는 점등 후 10분 이후에도 전류는 안정되지 않고 있었다.

표3. 안정기 B의 전기적 특성
Table3. Electrical characteristic of ballast

| Time[min.] | 5 | 10 | 15 | 20 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|
| Voltage[V] | 463 | 461 | 461 | 463 |
| Current[mA] | 477 | 468 | 466 | 477 |

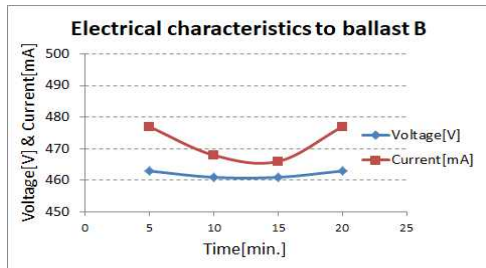


그림 7. 안정기 B의 전기적 특성
Fig. 7. Electrical characteristics of ballast

3.2.4 개폐 공간에서의 특성

원통형 무전극 램프를 나무 상자 안에 넣고 문을 닫은 경우(close)와 열어놓은 경우(open), 램프 표면의 최고온도 상대적 변화를 그림 8에 나타내었다.

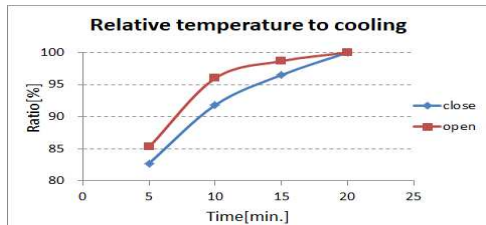


그림 8. 냉각 조건에 대한 상대온도 추이
Fig. 8. Relative temperature trend to cooling

벌브 표면의 온도는 닫힌 쪽이 열린 쪽보다 온도가 높게 나타난다. 하지만 그림 8에서 볼 수 있듯이 온도가 포화되는 시간은 열린 쪽이 오히려 짧게 나타난다.

3.2.5 커플러의 열 차단 특성

원통형 무전극 램프의 안쪽 공간에 램프 열을 차단하지 않은 경우(none)와 두꺼운 종이로 차단한 경우(shield)에 대한 내관의 최고온도(열점) 추이 및 최저온도(냉점)의 온도 변화의 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다.

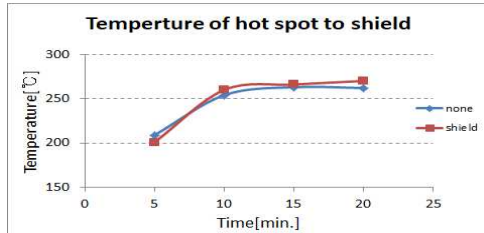


그림 9. 내관 차단에 대한 열점온도
Fig. 9. Maximum temperature to inner shield

그림 9와 그림 10에서, 열 차단을 한 경우, 벌브 표면의 온도는 낮고 냉점의 온도는 높았다. 반대로 차단을 하지 않은 쪽은 벌브 표면의 온도가 더 높은 대신 냉점의 온도는 낮았다.

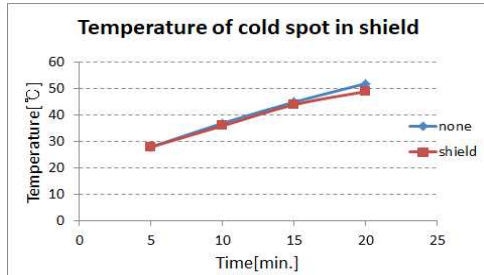


그림 10. 내부 차단에 대한 냉점 온도
Fig. 10. Minimum temperature to inner shield

그림 10을 보면 열 차단을 한 쪽이 냉점의 온도가 더 낮으며 안정적인 특성을 보이고 있다. 그림 11에서 나타난 바와 같이 차단의 유무와 관계없이 경향은 동일하지만 열 차단을 한 쪽이 전력이 높다. 전력이 높으면 전류가 크므로 광학적 특성에서 유리해진다.

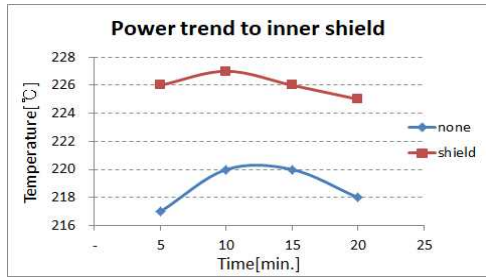


그림 11. 내부 차단에 대한 전력 추이
Fig. 11. Power trend to inner shield

그림 12에서 알 수 있듯이 밸브 안쪽 내관의 공간에서는 차단하는 쪽이 차단하지 않은 쪽보다 온도가 더 높게 나왔으며, 점등 후 7분 정도 경과한 시점을 기준으로 온도의 기울기가 확연하게 달라짐을 보이며 열 차단 유무와 관계없이 동일한 패턴을 보이고 있다. 이와 같이 열 차단 유무에 대한 결과를 표5에 나타내었다.

표5. 열 차단에 대한 온도 비교
Table5. Temperature comparison to shield

| Temp. | hot spot | cold spot | inner tube |
|--------|----------|-----------|------------|
| none | low | high | low |
| shield | high | low | high |

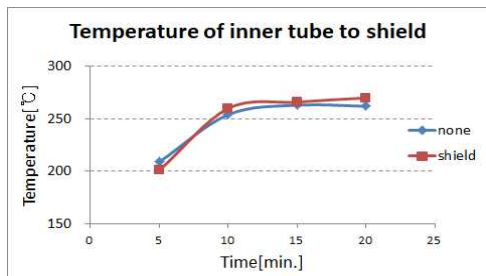


그림 12. 차단에 대한 내관 온도
Fig. 12. Temperature of inner tube to shield

그림 13은 온도에 의한 임피던스 변화를 살펴보기 위해, 커플러 B를 코일선경 0.6mm의 구리선으로 만들어져 있고 인덕턴스는 160uH로 가정하였을 때의 임피던스 특성을 나타낸다. 이는 내관의 열 차단 특성과 동일한 경향을 보이고 있다. 이는 코일의 저항이 온도를 반영한 결과라고 생각된다.

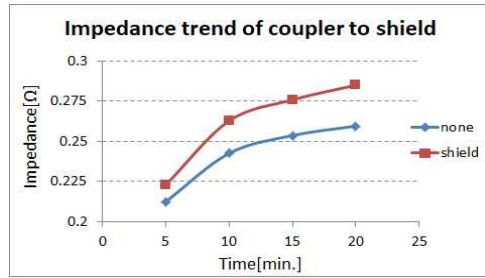


그림 13. 차단에 대한 커플러의 임피던스 추이
Fig. 13. Impedance trend of coupler to shield

표6은 열 차단의 유무에 대해 커플러와 연결된 방열판의 온도를 나타낸 것이다. 방열판의 온도는 열차단의 유무와 관계없이 큰 차이를 보이지 않고 있다.

표6. 차단에 대한 방열판의 온도 추이
Table6. Temperature trend of heat sink to shield

| Time [min.] | 5 | 10 | 15 | 20 |
|-------------|----|----|----|----|
| None [°C] | 25 | 26 | 29 | 32 |
| shield [°C] | 25 | 27 | 30 | 33 |

3.2.6 무전극 램프 특성분석

전구형 무전극 램프는 유도결합 플라즈마를 이용한 것으로 두 개의 200W급 안정기 A와 B를 적용하였다. 여기서 적용한 램프는 방전이 안정되었을 때, 열점온도가 300°C 정도로 절대온도로 보면 실온의 약 2배에 해당하는 온도여서 커플러는 방열이 신속하게 이루어져야 한다. 무전극 램프를 나무 상자 안에 넣고 실험을 한 결과 닫힌 공간에서 온도와 전력이 높았다. 반면에 열린 공간에서는 온도와 전력 모두 안정화 되는 추세를 보였다. 이것은 닫힌 공간에 대한 방열 면적이 다소 부족한 것으로 분석된다.

한편, 밸브 안쪽 내관에 두꺼운 종이를 끼워 램프의 발열이 커플러로 가는 것을 차단해 보았다. 차단된 쪽이 차단하지 않은 경우보다 오히려 관벽 온도와 전력이 더 높았다.

표7은 커플러 A와 B의 특징을 비교한 것이다.

표7. 커플러 A와 B의 특징 비교
Table7. Feature comparison in couplers A vs. B

| Item | A | | B |
|-------------|------|---|--------|
| Diameter | big | > | small |
| Coil turn | many | < | few |
| Shield tape | thin | < | thick |
| Bulb gap | wide | > | narrow |

커플러 직경은 A가 더 커서 밸브 안쪽의 내관과 커플러와의 간격이 A가 더 크다. 또, 열차단 테이프도 A는 내열 수지 필름만을 사용했고, B는 수지필름의 위에 테프론 테이프가 더 있었다.

냉점의 온도 변화를 보면 열 차단을 한 쪽이 더 낮은 온도에서 안정적으로 유지되었다. 그림 14는 내관과 커플러 사이의 단열 유무에 의한 원통형 무전극 램프의 커플러에 흐르는 전류를 계산한 것이다.

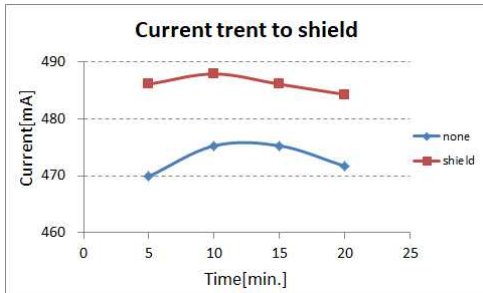


그림 14. 차단에 대한 전류 추이
Fig. 14. Current trend to shield

단열 차단을 한 쪽이 전류가 더 많이 흐름을 확인할 수 있다. 여기서 적용한 무전극 램프는 내관 측의 온도는 약 200℃ 정도이지만 50시간도 경과하기 전에 커플러의 단열 테이프가 연소해버렸다. 또한 주변에 금속 도체의 물질이 있을 때에도 안정기 B는 점등을 시키지 못하였다. 고온에 노출된 상태도 안정기 A의 단열테이프 상태가 더 낫은 점으로 보아 고온에 노출되었을 때의 설계의 방향성을 발견할 수 있다. 전력변화는 초기 상태보다 방전 안정 시의 전력이 점점 감소하였고 90W 이하가 된 이후에는 점등을 하지 못하였다.

3.3 새로운 설계방안

기존 대비 약 50℃~70℃ 정도의 온도 상승에도 안정기는 100시간도 되지 않아 쉽게 고장이 발생하였다. 내관과 커

플러의 접근성이 5mm인 커플러 A가 4mm인 커플러 B에 비해 효율의 불리한 점이 발견되지 않았다. 또한, 254 nm 파장은 대체로 전류의 경향과 동일한 곡선을 나타내므로 단열 차단한 쪽이 전류가 약간 높은 것으로 미루어 볼 때 램프의 광학적 특성에서 더 유리할 것으로 보인다. 이는 냉점의 온도의 안정에 의한 효과로 생각된다. 이러한 실험결과를 토대로 새로운 설계방안을 제시하면 다음과 같다.

첫째, 200W 무전극 램프에서 소비전력의 함수로서의 시스템 임피던스를 활용하여 전류의 변화를 예측한다. 둘째, 밸브 안쪽의 내관과 커플러와의 사이는 2~3mm 정도의 여유 공간을 두고 설계한다. 셋째, 임피던스의 변화 추이를 분석하여 포화현상이 빨리 되는 조건을 찾는다. 넷째, 밸브 안쪽의 내관과 커플러 사이에는 코팅이나 원통형 차단 판을 설치하되 냉점이 빨리 안정되는 조건을 찾는다.

4. 결론

본 논문에서는 커플러가 고온에 노출되었을 때 광원과 안정기의 특성 분석을 통해 안정기의 설계 방향을 제시하고자 하였으며 안정기는 별도의 위치에 두었기에 안정기에 직접 열전달이 이루어지지 않도록 하였다. 실험을 통합하여 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달할 수 있었으며 커플러의 설계에서 내관과 커플러의 근접성 보다는 열 차단이 우선임을 확인하고 이를 통해 확실한 방향의 설계를 제시할 수 있었다.

첫째, 밸브 안쪽의 온도가 약 50℃ 정도만 올라가도 안정기는 치명적인 손상을 받으므로 내관으로부터 커플러로 오는 열을 차단해야 한다.

둘째, 내관과 커플러와의 접근성은 5mm 정도로 하여 방열 공간을 확보하는 것이 광학적 특성에서 유리하다.

셋째, 밸브 내관과 커플러의 사이에 단열을 형성하는 것이 최우선적인 방향이며, 램프안정과 광학적 특성에서 보다 유리하다.

전술한 바와 같이 설계 방향을 결정하였으며, 향후에는 여기에 열 차단에 관한 방법, 소재, 그리고 구조에 대한 연구를 계속하여 진행하려고 한다.

REFERENCES

- [1] E. Statnic, V. Tanach., A New Approach to The Evaluation of The Discharge Parameters of The Electrodeless Fluorescent Lamps, *Plasma Sources Science & Technology*, Vol. 13, pp. 515 - 521, 2004.
- [2] X. Yang, M. Cheng, D. Guo, M. Wang, X. Li, Characteristics of Temporal Evolution of Particle Density and Electron Temperature in Helicon Discharge, *Plasma Sci. Technol.*, Vol. 13, 105402 (9pp.), 2017.
- [3] Y. I. Chung, D. C. Jung, D. H. Park, Y. K. Kim, A Study on The Characteristic Analysis and Optimization According to Ballast Design of Induction Lamp, *JKIIECT*, Vol. 10. No. 1, Feb. 2017.
- [4] T. Uetsuki, M. Ueda, S. Nimata, M. Saimi, H. Kakehashi, Effect of Operating Frequency on Characteristics of Inductively Coupled Electrodeless Lamp, *J. Light & Vis. Env.*, Vol. 34, No. 1, 2010.
- [5] K. M. Cho, W. S. Oh, J. E. Yeon, D. S. Kim, H. J. Kim, Electronic Ballast of the Electrodeless Lamp for the Group Lighting System, *Conference Paper*, 53 Reads, December 2009.
- [6] U. H. Jeong, J. P. Hyung, S. Y. Lim, H. W. Lim, J. S. Jang, High Temperature Reliability Study of Low Frequency Indoor Electrodeless Lamp, *International Journal of Reliability and Applications*, Vol. 14, No. 3, pp. 203-207, 2014.
- [7] B. Yaakov, S. Shvartsas, M., A Behavioral SPICE Compatible Model of an Electrodeless Fluorescent Lamp, *IEEE APEC*, pp. 948-954, 2002.
- [8] O. A. Popov and R. Chandler, Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160-1000 kHz, *Plasma Sources Sci. Technol.* 11, pp. 218-227, 2002.
- [9] D. Silva, M. F. Chagas, N. B. Fraytag, J. Marchesan, R. N. Bisogno, F. E. Pinto, R. A. Prado, N. Ricardo, Model for Electrical Characteristics of Electrodeless Fluorescent Lamps, *Industry Applications (INDUSCON), 2012 10th IEEE/IAS International Conference on 2012 Nov*, pp. 1-6, 2012.
- [10] T. Eichhorn, Estimate Inductor Losses Easily in Power Supply Designs, *Power Electronics Technology*, 2005.
- [11] S. W. Lee, Design of an Inductively Coupled Plasma Source with Consideration of Electrical Properties, *Journal of the Korean Vacuum Society*, Vol. 18, No. 3, pp 176-185, 2009.
- [12] Q. Long, Y. Chen, D. Chen, Hysteresis and Mode Transitions in Inductively coupled Ar-Hg Plasma in the Electrodeless Induction Lamp, *Journal of physics. Applied Physics*, v.39, no.15, pp. 3310-3316, 2006.
- [13] E. Statnic, V. Tanach, Investigation of the Electrical Discharge Parameters in Electrodeless Inductive Lamps with a Reentrant Coupler and Magnetic core, *Plasma Sources Science & Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 465 - 473, 2006.
- [14] H. Katsumi, K. Harada, Y. Ishihara, T. Tada-ka, F. Okamoto, A Study of Winding Losses in an Induction Coil and Radiated Emissions of Electrodeless Lamps, *T. IEE Japan*, Vol. 122-A, No. 8, 2002.
- [15] S. W. Cho, J. Y. Bang, Y. K. Lee, C. W. Chung, The Impedance Matching Network for A Ferromagnetic Inductively Coupled Plasma Driven at 400 kHz, *Journal of The Semiconductor & Display Equipment Technology*, Vol. 6, No. 2, June 2007.

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 설계, 태양광 발전 시스템

이 재 민(Jae-Min Lee) [정회원]



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

- 1990년 ~ 1991년 : 일리노이대학(Urbana-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 ~ 현 재 : 한국정보전자통신기술학회 부회장
- <관심분야> 태양발전시스템, LED 감성조명, 공학교육콘텐츠설계, 적정기술