

지 철 근
 서울 대학교

문 석 찬 오
 서울 대학교

A STUDY ON THE VARIATION OF INCANDESCENT LAMP CHARACTERISTICS BY MEANS OF THE SHAPE OF FILAMENT

Chee, Chol Kon
 Seoul National University

Moon, Seok Chan
 Seoul National University

ABSTRACT

Generally an incandescent lamp is made in the bulb with a horizontal position filament. In this paper the position of filament was changed into a vertical position. When the position of filament is changed into a vertical position, efficacy is increased and color rendering is somewhat improved. In this subject the heat loss by a filling gas is important.

The heat loss by a filling gas was calculated theoretically. The results in an incandescent lamp experiment can be analyzed through the heat loss by a filling gas. As a filling gas the mixture of argon and nitrogen is used. The variation of lamp characteristics by the shape of filament will be considered. The change of filament position to a vertical position is required in the field of power consumption saving of lighting system.

1. 서 론

일반적으로 백열전구 내의 텅스텐 필라멘트는 수평 위치가 되도록 제작되고 있다.

본 논문에서는 텅스텐 필라멘트의 형상을 수직으로 변화시켜서 효율을 높이고자 한다.

필라멘트가 수직형인 백열전구는 수평형에 비해서 열손실이 줄어들어 발광 효율이 높아진다. 뿐만 아니라 연색성도 더 좋아진다.

이 관계를 이론적으로 분석하고 정량적인 값으로 나타내고자 한다.

2. 본 론

전공 전구는 전기적 입력이 전부 방사에너지로 바뀌어 빛을 낸다. 그러나 텅스텐 필라멘트의 증발율이 너무 커서 수명이 짧으며 증발된 텅스텐 원자에 의한 흑화 현상이 심해서 빛의 감소가 생긴다.

그리고 텅스텐 필라멘트의 온도를 2500 K 이상으로 점등하기가 곤란하다. 그래서 이러한 결점을 보완하기 위해 불활성 가스인 아르곤 가스를 넣어서 만든 전구가 출현 되었으며 이것이 가스든 전구이다.

가스든 전구는 봉입 가스로 인한 열손실이 생긴다. 100 W 전구에서는 보통 12 W 정도가 봉입 가스에 의한 열손실이 된다.²

그림 1은 225 V, 100 W 백열전구에서 램프의 소비전력이 변화함에 따라서 봉입가스에 의한 열손실 즉, 가스가 어떻게 변화하는가를 알 수 있는 그림이다.² 1번 곡선은 봉입가스가 없을 때의 측정 광속을 나타낸 것이고, 2번 곡선은 8.5%의 nitrogen 이 함유된 700 torr 와 argon 이 봉입가스로 들어 있을 때의 측정 광속을 나타낸 것이다.

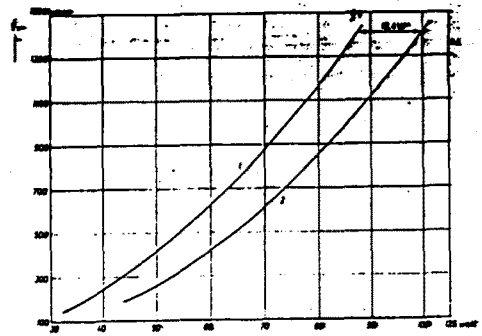


그림 1 백열전구 소비전력에 따른 필라멘트 온도

그림 1에서 같은 광속을 발산하기 위해서 필요로 하는 소비전력의 값을 읽고 이 두 값의 차를 계산하면 이 값이 바로 가스손이 된다.

측정광속이 증가함에 따라 가스손이 점점 증가함을 알 수 있다.

백열전구 내의 유동입자의 흐름을 아는 것은 봉입가스에 의한 열손실을 이해하는 데 큰 도움을 준다. 2, 3 백열전구 내에서 유동하고 있는 입자로는 봉입가스로 들어가는 아르곤 가스와 filament에서 증발되는 원자 상태의 tungsten 이 있다.

이들 입자의 흐름은 실험을 통해서 쉽게 알 수 있다. 그리고 이론적으로도 예측할 수 있다. 구체적으로 이들 입자의 흐름은 다음과 같다.

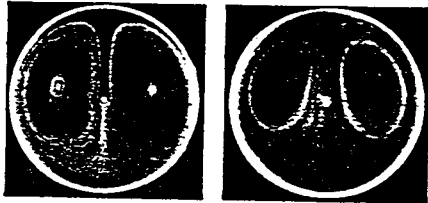


그림 2

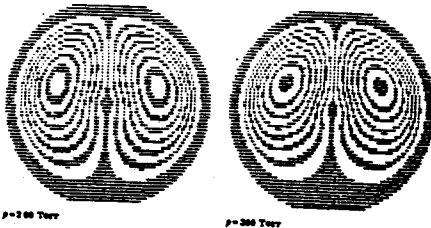


그림 3

그림 2와 그림 3은 전구내 gas flow 의 stream-line 들을 보여주고 있다.³

봉입가스의 압력이 200 torr 일때와 300 torr 일때의 경우가 표시 되어 있다.

그림 2는 백열전구를 사진으로 찍은 것이다. 그림 3은 이론적인 수식들을 이용해서 computer로 풀어서 그린 것이다.

그림 2와 그림 3을 비교해 보면 아주 비슷함을 알 수 있다.

따라서 이론과 실험이 잘 일치함을 알게 된다. 그림 2와 그림 3에서 중심부에는 filament coil 이 있다. 봉입가스의 흐름은 filament 의 주울열에 의해 위로 상승했다가 다시 아래로 내려오게 된다.

그림 4는 전구내 tungsten flow의 stream-line 들을 보여주고 있다.³

봉입가스의 압력이 50 torr 일때와 200 torr 일때의 경우가 표시되어 있다.

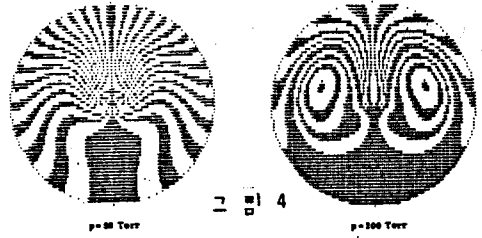


그림 4

50 torr 에서 200 torr 로 압력이 증가함에 따라서 양쪽에 소용돌이가 생겨서 필라멘트 일부는 계속 순환하게 됨을 알 수 있다. 또한 전구의 위쪽에 필라멘트 원자가 많이 부착하게 됨을 알 수 있다.

백열전구 내에서는 고온의 텅스텐 필라멘트로 인하여 봉입 가스의 대류 현상이 일어나고 있다. 텅스텐 필라멘트를 수평위치에서 수직위치로 세우면 봉입 가스에 의한 열손실이 줄어드는 방향으로 봉입 가스의 대류 현상이 진행된다. 구체적으로 텅스텐 필라멘트 아래 부분의 아르곤 가스가 위로 상승하면서 필라멘트 중간 부분과 상단 부분의 열손실을 감소시켜 준다. 그래서 필라멘트의 중간 부분과 상단 부분은 열손실이 줄어들어 더 많은 빛을 발산하게 된다.

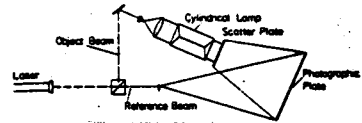


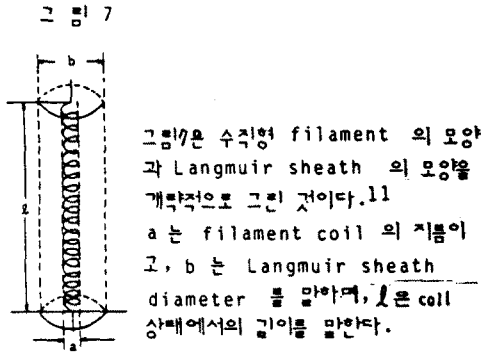
그림 5



그림 6

그림 6은 그림 5와 같은 Holographic measurement system 을 구성하여 백열전구 내에서의 온도 분포를 측정 한 것이다.^{2,3} 이 그림을 통해서 Filament coil 주 위에는 봉입가스의 온도 변화가 매우 심한 것을 알 수 있다.

Langmuir 는 1910년대에 이 사실을 발견해서 백열전구 내에서의 봉입가스에 의한 열손실을 계산할 수 있는 이론적인 토대를 제시하였다. '지금부터 봉입가스에 의한 열손실이 수식적으로 어떻게 표현되는지를 기술하겠다.'



열손실 Q 는 다음과 같이 표시된다.²

$$Q = \frac{2 \pi \lambda(\bar{T}) l (T_f - T_w)}{\ln(b/a)} = \frac{2 \pi \lambda(\bar{T}) l \theta_w}{\ln(b/a)}$$

Nusselt 의 열소비 이론에 의하면 다음과 같이 된다.

$$Nu = \frac{2}{\ln(b/a)}$$

$$Nu \lambda \exp(-2/Nu) = \frac{(Gr \times Pr)^{1/2}}{8.45} \quad (1)$$

단, 수직형 전구에서는 C = 8.45 수평형 전구에서는 C = 7.2

Gr 은 용입가스의 종류와 filament 의 온도에 의존하는 값이다.

단, $\lambda(\bar{T})$ 는 Langmuir Sheath 내에서의 thermal conductivity 의 평균치. l 은 coil 의 길이. θ_w 는 $T_f - T_w$

T_w : 전구 표면의 온도. T_f : filament 의 온도

따라서 열손실 Q 는 다음과 같다.²

$$Q = Nu \times \pi \lambda(\bar{T}) \theta_w \quad \text{그리고,}$$

(1)식을 Graph 로 표시하면 그림8과 같이 된다.²

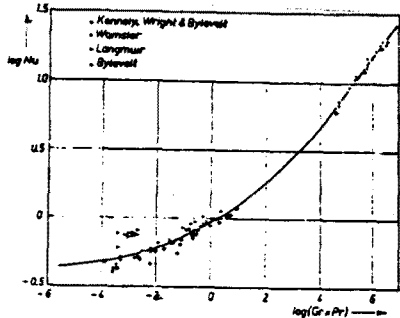


그림 8 (실린더형 전구에만 성립)

열손실 Q 를 Langmuir Sheath 내의 평균온도의 함수로 나타낼 수 있는데, Graph 로 표시하면 그림 9와 같다.

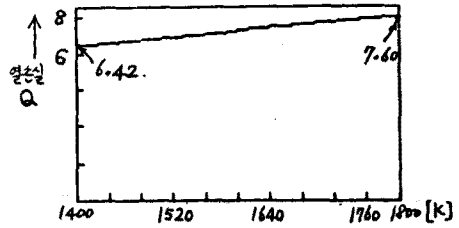


그림 9

단, $l=0.02$ [m] $\bar{T}=2300$ [K] 용입가스: Ar85% N_2 15% (실린더형 전구에만 성립)

그림 9 를 통해서 열손실 Q 의 변화는 온도변화에 민감하지 않다는 결론을 얻게 된다.

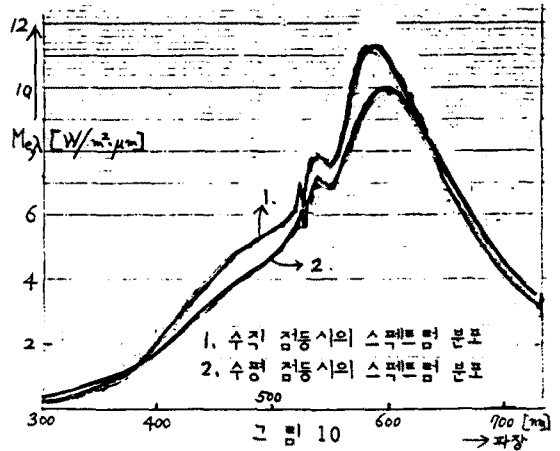


그림 10

그림 10과 그림 11은 수직형 filament로 만든 110V 100W 백열전구에서 base up 의 상태로 점등했을 때와 base 를 옆으로 놓은 상태에서 각각의 spectrum 을 측정 한 것이다.

base up 의 상태로 점등한 경우 즉 filament 가 수직 위치로 점등되는 경우가 base 가 옆으로 놓여진 상태에서 점등되는 경우 즉 filament 가 수평 위치로 점등되는 경우보다 가시영역인 380-760 nm 에서 더 많은 빛을 방출하고 있음을 알 수 있다. 따라서 연색성이 더 좋고 발광 효율이 향상된다. (단, 이 실험에서 사용한 monochrometer 의 특성으로 인하여 650nm 이상부터는 신뢰할 수 없는 측정값들이다.)

필라멘트의 형상에 따른 백열전구 특성변화에 관한 연구

현재 사용중인 백열 전구의 filament 는 그 모양이 수평형이면서 U 자형이 되도록 만들어진다.

본 논문에서는 filament 를 수직형이면서 직선형인 것과 수직형이면서 V 자형인 것을 만들어서 실험해 보았다.

본 논문의 실험에 사용된 백열전구의 사양(specification)은 다음과 같다.

l = 0.02 [m]

voltage : 110V

power : 60W

표 1. 일반형(수평형 필라멘트)

watt	lumens	efficacy
60.7	789.7	13.01
60.2	782.0	13.03
59.9	791.2	12.98
59.1	775.4	13.12
58.9	728.6	12.37

표 2. 수직형 필라멘트

watt	lumens	efficacy
60.5	850	14.05
59.4	968.9	16.31
59.95	859.4	14.33
58.63	831.1	14.18
58.52	831.1	14.20

표 1과 표 2는 수평형 필라멘트 백열전구 5개와 수직형 백열전구 5개를 가지고 실험한 결과표이다.

평균 발광효율을 구하면 전자의 경우에는 12.902 [lm/W] 이고 후자의 경우에는 14.614 [lm/W] 이다. 따라서 60 W 의 전구에서 수직형 filament 전구가 수평형 filament 전구보다 발광효율이 더 크게 나타난다.

수직형 전구는 필라멘트의 중간 부분과 상단 부분의 열손실이 줄어들어 더 많은 빛을 방사하게 된다. 그림 10과 그림 11을 통해서 수직형 전구가 수평형 전구보다 filament 온도가 더 높음을 알 수 있다.

filament 에서 방사되는 빛의 양은 filament 의 온도 변화에 민감함을 스테판-볼프만의 법칙($S = \sigma T^4$)을 통해 알 수 있다.

따라서 수직형 전구가 수평형 전구보다 효율이 높아서 표 1과 표 2의 결과를 얻게 되었다.

3. 결 론

백열전구의 필라멘트를 수평형에서 수직형으로 형상을 바꾸면 60 W 전구의 경우 발광효율이 13% 정도 향상되고 100 W 전구의 경우에는 조금 더 향상된다. 분광에너지 분포를 보면 가시광선 부분이 수직형 전구의 경우에는 수평형 전구의 경우보다 증가하게 된다. 전력소비를 절감시키기 위해서는 수직형 필라멘트 전구가 제작 보급되는 것이 조명 효율 향상 측면에서 요청된다.

4. 참 고 문 헌

1. 지철근, 전기 응용, 문운당, 1987
2. W. ELENBAAS, LIGHT SOURCES, MACMILLAN, ENGLAND, 1972
3. E. FISCHER AND J. FITZGERALD, J. APPL. PHYS., VOL. 45, NO. 7, JULY 1974, P2895-1902
4. E. FISHER, J. FITZGERALD AND H. HÖRSTER, J. OF IES, JULY 1975, P271-278
5. E. J. COVINGTON AND J. H. INGOLD, J. OF IES, APRIL 1975, P198-203
6. H. B. B. VAN DAM & J. R. DE BIE, LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY, VOL. 9, NO. 2, 1977, P107-111
7. STEPHEN H. HOWE, J. OF IES, APRIL, 1985, P581-588
8. J. R. COATON, MSc, PhD, C.Eng, FIEE, MInstP, LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY, VOL. 9, NO. 1, 1977, P25-30
9. J. R. COATON, M. Sc., C.Eng., M. I. E. E, L. Inst. P., LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY, VOL. 3, NO. 2, 1971, P163-164
10. F. H. R. ALMER & J. de RIDDER, LIGHTING RESEARCH & TECHNOLOGY, VOL. 8, NO. 1, 1976, P31-32
11. 강기호, "THE DESIGN OF INCANDESCENT LAMPS CONSIDERING THE HEAT AND MASS LOSS", 서울대 석사학위 논문, 1986