

전광선속 표준전구 개발

(Development of Total-Luminous-Flux Standard Lamps)

서정철* · 김용완** · 정영봉*

(Jung-Chul Seo · Yong-Wan Kim · Young-Bong Jung)

요 약

조명업체에서 적분구를 이용한 광원의 전광선속을 측정하는데 기준광원으로 활용하기 위하여 신뢰성 높은 전광선속 표준전구를 개발하였다. 전광선속 표준전구는 공간세기분포가 균일하도록 되어 있으며, 사용시간 100[h] 동안에 전광선속 변화율이 0.5 % 이내로 양호한 안정도를 갖는다.

Abstract

High-quality standard lamps of total luminous flux were developed to be used as a reference source for measuring light output of optical sources using an integrating sphere in the lighting industry. These standard lamps have the uniform spatial intensity distributions and the stability better than 0.5 % for the burning time of 100[h].

1. 서 론

광원의 전광선속(total luminous flux)은 전공간으로 퍼져나가는 광속을 나타내는데, 조명제품의 효율을 판단할 수 있는 기본 측정량으로 광도계측(photo-metry) 분야에서 중요하게 인식되고 있다. 최근 들어 광원의 전광선속을 보다 정확하게 측정 하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 측정 정확도를 크게 향상시킬 수 있었다[1-3]. 광원의 전광선속을 측정하는데 있어서 일반적으로 각도주사형 조명도계(goniophotometer)를 이용한 절대 측정 방법 및 적분구를 이용한 비교 측정 방법이 많이 이용된다[4]. 각도 주사형

조명도계를 이용한 전광선속의 절대 측정은 1차 표준유지급의 정밀 측정에 주로 사용되는데 측정 시간이 길며, 측정 장치를 구성하고 유지하는데 어려움이 많다는 단점이 있다. 그러므로 2차급 기관이나 일반 조명업체에서 측정시간이 짧으며 사용하기 간편한 적분구를 이용한 비교 측정 방법이 많이 이용된다

한편 적분구를 이용한 전광선속 비교측정에서 텅스텐 전구 형태의 표준 광원으로 적분구를 교정하여 시험 광원의 전광선속 값을 결정하게 되는데, 이와 같은 표준 광원과 시험 광원의 비교 측정에서의 정확도는 근본적으로 표준 광원 및 측정 장치의 성능에 의존한다. 그러므로 전광선속을 정확하게 측정하기 위해서는 안정성 및 공간 특성이 우수한 표준 전구가 개발될 필요성이 있다. 이와 같은 전광선속 표준 전구가 근본적으로 갖추어야 할 안정도는 사용시

*정회원 : KRISS 광학그룹 책임연구원, 이학박사
**정회원 : KRISS 광학그룹 책임기술원, 이학사
접수일자 : 2000년 8월 9일

전광선속 표준전구 개발

간 동안에 1.0 % 이내로 전광선속 값이 유지되어야 한다[4,5].

본 연구에서는 조명산업체에 신뢰성 높은 표준 광원을 보급하기 위하여 전광선속 표준전구를 개발하였다. 개발된 표준전구의 성능을 평가하였는데 공간 균일성이 양호하며, 안정도는 사용시간 100 시간 동안에 전광선속 변화가 0.5 % 이내이다.

2. 전광선속 측정 실험

광원의 전광선속을 측정하기 위하여 Fig. 1과 같은 적분구를 이용한 전광선속 측정 장치가 구성되었다. 그림에서 적분구의 내부 중심에 표준광원 및 시험광원을 교대로 위치시키고 조명도계를 적분구 면에 위치시킨 다음, 조명도계에 입사하는 각각의 조명도 신호를 읽어서 비교하여 시험광원의 전광선속을 알아내게 된다.

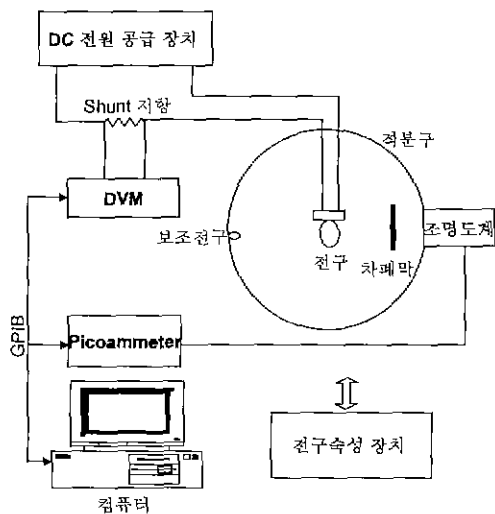


그림 1. 전광선속 측정 장치의 블럭도
Fig. 1. Block diagram of total-luminous-flux measurement system

그림에서와 같이 적분구를 이용하여 광원의 전광선속을 정확하게 측정하기 위해서는 성능이 우수한 적분구, 조명도계, 전원공급장치, 계수식 전압계(digital voltmeter), picoammeter, shunt 저항 및 전광선속 표준전구 등이 필요하다. 사용된 적분구는 직경이 2[m] 인 속이 비어 있는 공모양처럼 생긴 것으

로, 적분구의 frame은 제작이 용이하고 경도가 높은 재질인 FRP(fiber reinforced plastic)으로 되어 있다. 적분구에 사용한 페인트는 가시광 영역에서 확산 반사도가 균일하고 그 값이 90 % 이상인 BaSO₄를 사용하였다. 적분구 중심에 표준전구를 설치하고 전원을 공급하면 광원에서 나온 빛들이 적분구 내면에서 여러 번 반사를 하는 동안 이 적분구 전 표면의 조명도를 같게 만들어 준다. 한편 적분구 안에 설치된 차폐막은 광원에서 직접 조명도계로 빛이 입사되는 것을 막기 때문에 광원의 공간 불균일성에 의한 오차를 감소시키게 된다. 사용된 조명도계는 UDT사 제품의 실리콘 광검출기와 V(λ) 필터 및 확산판 등이 포함되어 있는데, 상대 분광감응도는 표준관측자의 상대 시감효능과 0.2 % 이내로 일치한다. 정밀정확도가 0.01 % 이하를 갖는 계수식 전압계(DVM)를 사용하여 전구에 걸여주는 전압 및 전류 값을 측정하게 되며, 조명도계에 의해서 검출되는 광 전류는 picoammeter를 사용하여 수[μA] 정도의 광전류를 측정하게 된다. 이와 같은 측정 장치는 컴퓨터와 GPIB Interface로 연결하여 조명도계에서 검출된 광전류, 광원에 공급되는 전류 및 전압 신호를 읽어 들일 수 있도록 하였다. 한편 광원에 0.01 % 이하의 정확도로 전원을 공급하기 위하여 DC 전원공급장치를 사용하여 전압을 0 - 120[V], 전류를 0 - 15[A] 영역에서 사용하였으며, 광원에 공급되는 전류를 정확하게 측정하기 위하여 shunt 저항(0.09998 Ω)이 사용되었다.

한편 적분구를 이용한 전광선속 비교 측정에서의 측정 정확도는 광원의 흡수도 차이, 광원의 공간 분포, 광원의 크기, 적분구의 확산 반사율, 색온도 차이 등의 오차 요인에 의존하게 된다[4,6,7].

광원의 공간 분포 차이에 의해서 발생하는 오차는 적분구 내면의 공간 균일성이 양호하며, 광원의 공간 세기 분포가 균일하도록 제작되면 제거할 수 있다. 한편 흡수율 차이에 의한 오차를 보정해 주기 위해서 색온도 2856[K] 정도의 안정성이 좋은 보조 전구를 적분구의 조명도계 반대 방향에 설치하게 된다. 이와 같은 광원을 이용하여 표준광원 및 시험광원의 자체 흡수비를 측정하여 보정인자를 결정할 수 있다. 적분구를 이용하여 표준 광원과 시험광원을 비교 측정할 경우에 적분구의 반사율이 가시광 영역에서 일정하지 않고, 조명도계의 상대 분광감응도(relative spectral response)가 표준관측자의 상대 분광시감효

을과 정확하게 일치하지 않고 있기 때문에, 표준광원과 시험광원의 분광 분포가 차이가 있을 경우에는 측정 오차가 발생되게 된다. 색오차를 제거하기 위해서는 적분구의 확산 반사율이 가시광 영역에서 파장에 일정하도록 하며, 상대분광감응 특성이 우수한 조명도계를 사용하며, 표준광원과 시험광원의 색온도가 2700 - 2800[K] 영역이 되도록 해야한다.

한편 실험에 사용된 시험광원은 전광선속 표준 유지 및 조명업체에 보급하기 위하여 제작된 전광선속 표준 전구로 색온도는 NIST(미국립표준기술연구원) 표준전구와 비슷한 영역인 2700 - 2800[K]이며, 광속 안정도 및 공간세기분포 특성이 양호하도록 되어 있다. 전광선속 표준용 전구의 필라멘트는 단코일 형태로 원형으로 제작되었으며, 필라멘트 떨림을 방지하기 위하여 주 지지대 2 개와 부 지지대 4 개를 사용하여 튼튼하게 지지되도록 하였다. 사용된 주지지대의 재질은 니켈, 부지지대는 몰리브덴으로 되어 있다. 유리구 형상은 등근형태로 전구 내면은 프러스트(frost)되어 있어 공간 균일성이 향상되도록 하였다. 또한 유리구 내부의 진공도는 10^{-2} Torr 이며, 필라멘트의 증발을 억제하기 위하여 Ar 및 질소를 8 : 2 로 투입하였다.

한편 시험광원의 숙성 정도에 따라 안정도를 평가하기 위하여 숙성 장치를 제작하였으며, 그림 1과 같은 측정 장치를 이용하여 숙성시간 24 시간마다 약 300 시간 동안 전광선속의 변화를 측정하였다. 각각의 시험광원들이 숙성되고 측정되는 정전압 및 정전류는 초기의 색온도가 2700[K] - 2800[K] 정도가 되도록 하였다. 안정도 시험을 통하여 안정성을 확인하고 전구의 표면상태가 양호한 것을 선별하여 최종적으로 전광선속 표준 전구로 개발되게 된다.

3. 결과 및 토의

전광선속 표준용 전구의 안정도를 평가하기 위하여 숙성 시간 매 24 시간마다 정전압, 정전류에서의 전광선속을 측정하여 분석하였다. NIST 표준전구를 전광선속 측정의 기준으로 사용하였는데, Fig. 2에서 볼 수 있듯이 여러 종류의 NIST 표준전구 중에서 평균값을 갖는 N10666을 기준 광원으로 이용하였다. 기준 광원으로 교정된 지름 2[mm]의 적분구를 사용하여, 약 10 분간 warm-up을 한 후 광전류를 측정

하여 교정인자를 결정하였다. 정전류 유지는 0.01 % 이내로 하였으며, 약 20 번 측정하여 평균값을 취하여 최종 전광선속 값을 계산하였다.

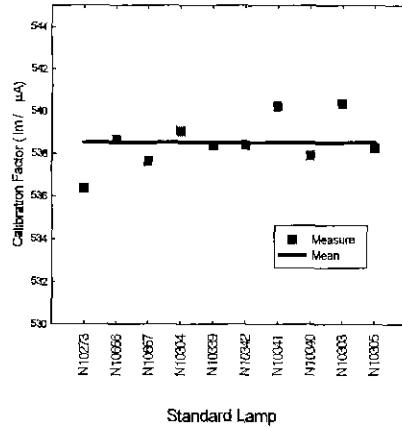


그림 2. NIST 표준전구로 교정된 적분구 장치의 교정인자

Fig. 2. Calibration factors of integrating-sphere system calibrated with NIST standard lamps

한편 Fig. 3은 60[W]용 표준전구를 24 시간마다 숙성시킨 후 전류를 일정하게 유지하면서 측정된 전광선속 및 전구에 걸리는 전압의 변화를 보여주고 있다. 이 때 설정된 전류는 0.523[A]이며, 초기의 전압은 106.3[V], 전광선속 값은 530.9[lm]이다. 그림에서 알 수 있듯이 숙성시간 약 50 시간 이후에는 200 시간이 경과되어도 전광선속이 안정되게 유지된다. 그러나 전구에 걸리는 전압은 숙성시간이 경과될수록 점점 증가되는데, 이와 같은 현상은 전구의 필라멘트가 얇아져 저항이 증가되므로 같은 전류에 대하여 전압이 증가되기 때문이다. 일반적으로 텅스텐 전구는 사용 시간이 경과되면 전광선속이 감소(drift)되는 특성을 갖고 있는데, 그림에서와 같이 오랜 시간 동안 전광선속 값이 일정하게 유지되는 것은 전구에 걸리는 약간의 전압 증가에 의하여 drift 효과가 상쇄되기 때문으로 판단된다. 그림에서와 같이 60[W]용 전광선속 표준전구는 50 시간 숙성시킨 후에 CC mode, 즉 전류가 일정한 상태로 사용하면 안정도가 매우 우수한 표준광원으로 사용 가능하다.

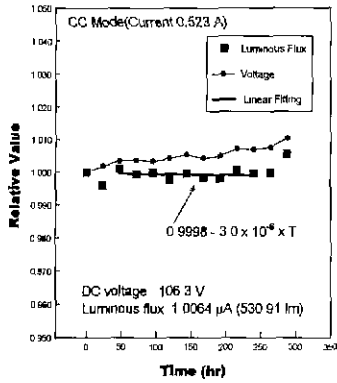


그림 3. CC mode에서 60 W 전구의 속성 특성
Fig. 3. Aging characteristics of the 60 W lamp in CC mode

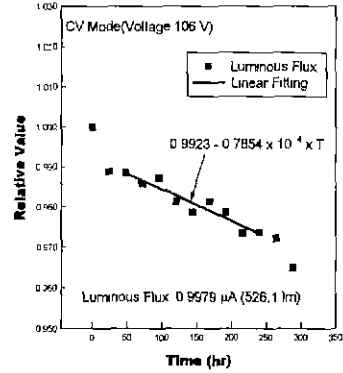


그림 4. CV mode에서 60 W 전구의 속성 특성
Fig. 4. Aging characteristics of the 60 W lamp in CV mode

한편 Fig. 4는 CV mode, 즉 전압을 일정하게 유지하면서 측정된 전광선속의 변화를 보여 주는 것으로, CC mode 로 측정된 Fig. 3과 상당히 다르게 시간이 경과될수록 전광선속 값이 감소한다. 이러한 현상은 주로 필라멘트 변형에 의한 저항의 증가로 같은 전압에 대하여 전구에 공급되는 전류가 낮아지기 때문이다. 그러므로 안정성이 높은 전광선속 표준전구를 개발하기 위해서는 50 시간 정도 속성시킨 후 색온도가 2700[K] - 2800[K] 정도가 되도록 전류를 설정하여 CC mode 로 사용해야 됨을 알 수 있다.

Fig. 5는 일정한 전류를 유지하면서 측정된 60[W] 용 전광선속 표준전구의 안정도를 보여 주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 유효시간 100시간 동안에 전광선속 값은 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 일반적으로 60[W]용 전구의 유효시간 동안에 전광선속 값의 변화는 0.2 % 이내로 측정되었다.

한편 Fig 6은 100[W]용 표준전구를 24 시간마다 속성시킨 후 CC mode로 측정된 전광선속 및 전구에 걸리는 전압의 변화를 보여 주고 있다. 그림에서 설정된 전류는 0.850[A]이며, 초기의 전압은 104.6[V], 전광선속은 1093[lm] 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 속성시간 약 72 시간 이후에는 사용시간 100 시간 동안에 전광선속 값이 0.2 % 이내로 안정하게 유지된다. 그러나 60[W] 보다는 전광선속의 안정도가 저하되는데, 이와 같은 안정성 저하는 흑화 현상에 의하여 전광선속이 drift되기 때문으로 판단된다

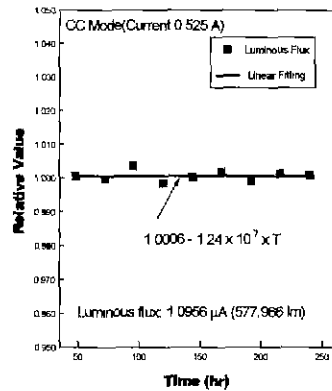


그림 5. 60 W 전구의 전광선속 안정도
Fig. 5. Total-luminous-flux output stability of the 60 W lamp

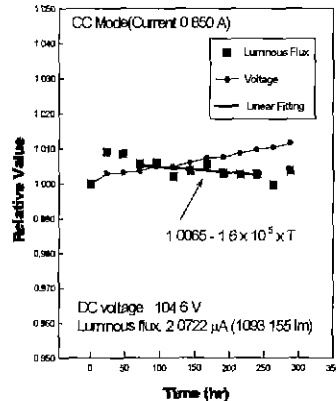


그림 6. CC mode에서 100 W 전구의 속성 특성
Fig. 6 Aging characteristics of the 100 W lamp in CC mode

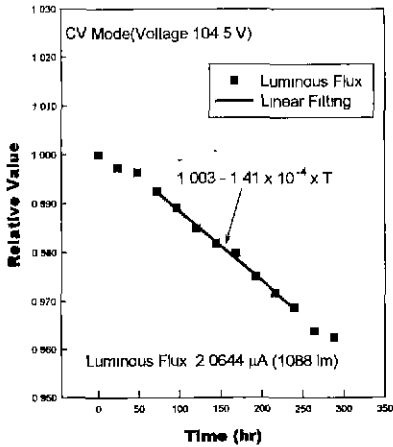


그림 7. CV mode에서 100 W 전구의 속성 특성
Fig. 7. Aging characteristics of the 100 W lamp in CV mode

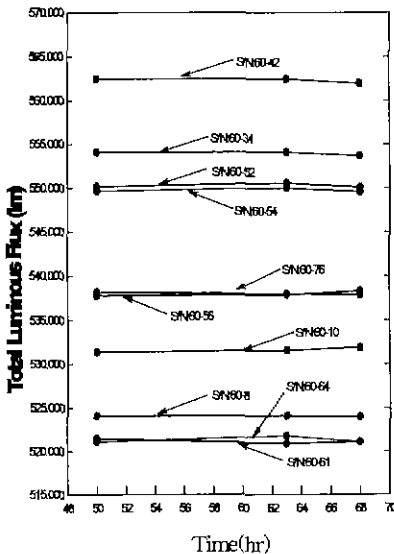


그림 8. KRISS 전광선속 표준전구의 안정도
Fig. 8. Stability of KRISS total-luminous-flux standard lamps

또한 Fig. 7에서와 같이 CV mode로 측정하면 속 성시간에 따라 급격하게 전광선속이 감소하였다. 이 러한 현상은 앞에서 설명하였듯이 필라멘트 변형에 의한 저항의 증가로 같은 전압에 대하여 전류가 낮

아지므로 전광선속이 감소되는 효과가 있으며, 또한 100[W]용 표준전구에서는 흑화 효과가 작용되고 있 기 때문이다. 그러므로 100[W]용 전광선속 표준전구 를 개발하기 위해서는 72 시간 정도 숙성한 다음에, 정전류를 설정하고 안정성이 있는 표준전구를 선별 해야 됨을 알 수 있다. 일반적으로 100[W]용 전구는 유효시간 동안에 전광선속 값의 변화가 0.5 % 이내 로 유지되었다.

한편 Fig. 8은 개발된 전광선속 표준광원의 특성 을 보여 주고 있다. 그림은 60[W]용 전구를 50 시간 숙성시킨 다음 색온도가 2700[K] - 2800[K]가 되도록 전류를 설정하고, 정전류를 유지하면서 측정한 결과 이다. 이와 같은 표준전구는 안정성이 0.5 % 이내로 유지되기 때문에 KRISS 표준유지용 전광선속 표준 광원으로 활용될 뿐만 아니라, 분광복사속 표준광원 으로 사용될 수 있을 것이다.

한편 비교 측정에서의 측정 정확도는 전구의 흡수 도 차이, 전구의 크기, 방향성, 적분구의 확산 반사율, 조명도 측정에서의 오차 요인 등에 의하여 결정된다. 그런데 개발된 표준전구는 기준이 되는 NIST 표준 전구와 모양 및 색온도가 비슷하게 제작되어 비교 측정에서 발생하는 오차 효과가 감소되도록 하였다. 한편 공간 불균일 특성에 의한 오차가 제거될 수 있 도록 하기 위해서 개발된 표준전구는 유리구 내면이 프러스트 상태로 되어 있다. 그러므로 전구 내면에서 빛이 확산되기 때문에 공간세기분포가 균일하여 공 간 불균일성에 의한 오차를 감소시킬 수 있었다.

4. 결 론

적분구를 이용한 전광선속 측정에서 기준 광원으 로 이용하기 위하여 전광선속 표준전구를 개발하였 다. 개발된 전광선속 표준전구는 유리구 내면이 프루 스트되어 있어 공간 균일성이 양호할 뿐만 아니라, 유효시간 100 시간 동안에 전광선속 변화율이 0.5 % 이내로 우수한 성능을 갖고 있음이 확인되었다. 이와 같은 광원을 조명 산업체에 보급하여 조명제품의 전 광선속 측정에서 기준 광원으로 활용되고 있으며, 또 한 안정성 및 공간균일성이 우수하기 때문에 gonio- photometer를 이용한 전광선속 측정 및 분광복사속 측정에서 표준광원으로 활용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Ohno, "New method for realizing a luminous flux scale using an integrating sphere with an external source", J. IES, vol. 24, pp106-115, 1995.
- [2] G. Sauter, "Goniophotometry: new calibration method and instrument design", Metrologia, vol. 32, pp685-688, 1996.
- [3] Y. Ohno, M. Lindemann, and G. Sauter, "Analysis of integrating sphere errors for lamps having different angular intensity distributions", J. IES, vol. 26, pp107-114, 1997.
- [4] C. DeCustis, "Handbook of applied photometry", American Institute of Physics, New York, 1997.
- [5] E. F. Zalewski, A. R. Schaefer, K. Mohan, and A. McSparron, "Optical Radiation Measurements: Photometric Instrumentation and Research", NBS Technical Note 594-2, pp21-24, 1972.
- [6] M. Nonaka, T. Kashima, and Y. Kondo, "A 5-m integrating sphere", Appl. Opt., vol. 6, pp757-764, 1967.
- [7] H. K. Hammond III, and H. L. Mason, "Precision Measurement and Calibration", NBS Special Publication 300, vol 7, pp409-454, 1971.

◇ 저자소개 ◇

서 정 철 (徐汀喆)

1962년 10월 28일생, 1984년 공주사범대학 물리교육학과 졸업(이학사), 1986년 KAIST 물리학과 석사과정 졸업(이학석사), 1997년 KAIST 물리학과 박사과정 졸업(이학박사). 1986-2000년 현재 한국표준과학연구원 책임연구원.

김 용 완 (金容完)

1950년 2월 1일생, 1979년 고려대학교 물리학과 졸업(이학사), 1979-2000년 현재 한국표준과학연구원 책임기술원.

정 영 봉 (鄭永鵬)

1955년 8월 1일생, 1978년 고려대학교 물리학과 졸업(이학사), 1980년 KAIST 물리학과 석사과정 졸업(이학석사), 1992년 KAIST 물리학과 박사과정 졸업(이학박사). 1980-2000년 현재 한국표준과학연구원 책임연구원.