

Measurement and Characterization of Three Dimensional Luminous Flux

崔鐘云* · 劉燠鍾**

(Jong-Woon Choi · Moon-Jong Yoo)

Abstract - This paper describes the construction, measurement, and characterization of an instrument for the distribution of luminous flux. This is done by measuring the flux around a light source while a detector and a source is rotating, and integrating it over an entire imaginary surface surrounding the source. We make a gonio radiometer to realize the scales of total luminous flux and geometrically integrate to get total spectral flux from standards of irradiance and illuminance. The uncertainties of a total flux in the gonioradiometry are 1.3%, and 0.4% below the standard lamps of NIST and NIM for each other.

Key Words : 광선속, 광도측정, 표준전구, 가상구면

1. 서론

국제도량형총회(CGPM: 1976)에서 지정된 광도(cd)의 정의에 따라 각국에서는 ECR(Electrically Calibrated Radiometer) 및 자체 교정된 실리콘 광다이오드 등을 이용한 광검출기 중심의 광도표준을 확립하였고[1], 고니오광도계(gonio-photometer)를 사용하여 전광선속 표준을 확립하여 그 표준을 산업체에 보급하고 있다. 즉 광도측정의 단위계를 복사선 기준으로 변환하는 작업을 수행하여 광도측정 단위계를 직접적으로 파워나 와트와 같은 SI 단위계로 통일시킬 수 있다. 이와 같은 단위계의 완성으로 인하여 광원을 사용하는 연구자들은 복사선 측정 단위로서 조도, 광도, 휘도 단위계를 사용할 수 있게 되었다.

광원 주위의 전광선속을 측정하는 방법으로 두 가지 방법이 주로 사용된다. 첫째는 전입체각에 걸쳐 광도를 측정하고 적분하는 방법이고[2], 둘째는 광원을 중심으로 가상의 전체 구면에 걸쳐 조도를 측정하고 적분하는 방법이다[3]. 이 둘째 방법의 장점은 첫째 방법보다 더 짧은 측정거리(광원과 조도계 사이의)를 채택하여도 같은 정밀정확도를 얻을 수 있고, 측정거리가 짧으므로 고니오광도계의 크기를 줄일 수 있고, 또한 측정 점의 수를 줄일 수 있어 측정시간을 단축시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 둘째 방법을 택하여 전광선속을 측정한 실험 결과를 기술하였다.

2. 3차원 광선속 측정

2.1 측정원리

전광선속은 특정한 전류나 전위차에서 2차 표준으로 사용

할 수 있는 적절한 텅스텐 필라멘트 전구를 선택한 뒤, 각 전구에서 발산되는 광속을 입체각 $4\pi sr$ 로 적분하기 위한 전광선속 측정장치를 사용하여 일반적으로 실현된다. 이 방법에서 대부분의 가능한 변수는 설명할 것이고 참고문헌을 참고할 수 있다. 광속을 적분하는 고전적인 방법은 많은 방향 (θ, ϕ) 에서 광도 $I(\theta, \phi)$ 를 측정하는 것이다. 여기에서 θ 와 ϕ 는 구좌표계의 극각과 방위각이다. 여기에서 전구는 원점에 위치시켰고, 방정식을 풀기 위한 적절한 수치합산 방법을 사용하였다.

$$\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \phi) |\sin \theta| d\theta d\phi \quad (1)$$

그러나 광원 주위를 반경을 r 로 정한 가상공간의 표면에 존재하는 (θ, ϕ) 에서 광도 $I(\theta, \phi)$ 보다 조도 $E(\theta, \phi)$ 측정하는 것이 이점이 있다. 이 방정식을 풀기 위한 수치합산을 사용하면,

$$\Phi = r^2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} E(\theta, \phi) |\sin \theta| d\theta d\phi \quad (2)$$

실제적으로 이는 전구와 검출기 사이의 아주 짧은 거리를 허용할 수 있다. 따라서 작은 전광선속 측정장치에서는 전체광속을 많이 샘플을 취하면 할수록 좌표계의 원점에 있는 광원의 위치가 덜 중요한 위치가 된다.

그림 1과 같이 구면좌표계에서 θ 를 극각(polar angle), ϕ 를 방위각(azimuthal angle)이라 한다. 광원을 대략 구의 중심에 설치하고, 이 광원의 외곽에 설정한 가상 구면상에 임의의 한 점에서 조도 $E(\theta, \phi)$ 를 측정할 수 있다. 이때 조도계를 극각이 0에서 2π 라디안, 방위각이 0에서 π 까지 주사하게 구성하면 전구면의 조도를 측정할 수 있다. 그러므로 광원에서 나오는 전광선속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

* 正會員 : 湖南大 工大 光電子工學科 教授

** 準會員 : 湖南大 工大 光電子工學科 研究員

接手日字 : 2003年 4月 30日

最終日字 : 2003年 5月 26日

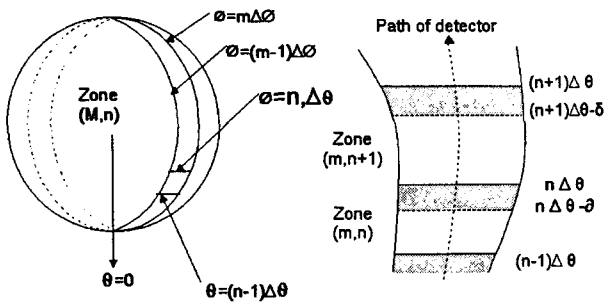


그림 1 극좌표계를 사용한 가상구면
 Fig. 1 Virtual surface in the polar coordinate system
 (Φ : azimuthal angle, Θ : polar angle)

$$\begin{aligned} \phi &= \int \int E(\theta, \phi) dA \\ &= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} E(\theta, \phi) R^2 \sin \theta d\theta d\phi \end{aligned} \quad (3)$$

그러나 아주 작은 수광 면적을 갖은 조도계로 가상구면 상에 존재하는 전구면에서의 조도를 모두 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 구면에서의 한 부분에서 조도를 측정하고 그 값을 그 주위 부분의 대표 값으로 취하고 이 값들을 모두 합하여 전광선속을 얻는다.

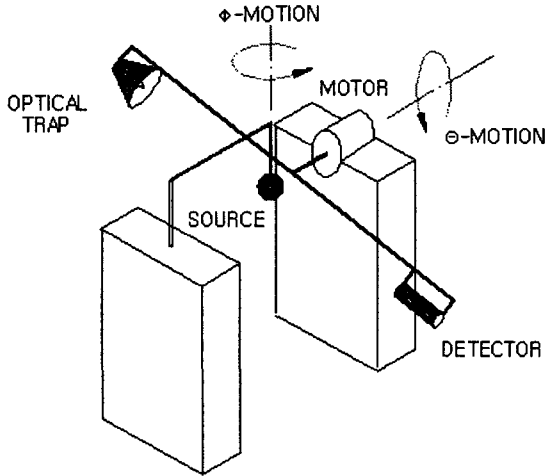


그림 2 가상구면상의 조도분포 측정장치 구성도
 Fig. 2 Luminous flux measurement system on the virtual surface

방위각을 그림 2와 같이 $\Delta\phi$ 폭으로 M 등분하는데 $[\partial E(\theta, \phi)/\partial\phi]\Delta\phi$ 이 적도록 하고, 극각을 $[\partial E(\theta, \phi)/\partial\theta]\Delta\theta$ 가 적게끔 $\Delta\theta$ 폭으로 N 등분하여 입체각 $\Delta\theta\Delta\phi$ 내에서 조도, $E(\theta, \phi)$ 값이 크게 변하지 않고 일정한 값 \bar{E} 로 볼 수 있도록 한다. 측정점 θ_i, ϕ_i 위치의 $\Delta\theta\Delta\phi$ 입체각내의 조도를 E_{ij} 라고 하면 그 $\Delta\theta\Delta\phi$ 입체각내로 통과하는 광선속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{ij} &= E_{ij} R^2 \int_{\phi_i - \Delta\phi/2}^{\phi_i + \Delta\phi/2} \int_{\theta_i - \Delta\theta/2}^{\theta_i + \Delta\theta/2} \sin \theta d\theta d\phi \\ &= R^2 E_{ij} \Delta\phi_i \cdot \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 전구면을 통해 나가는 전광선속은 식 (4)와 같은 광선속을 모두 합하면 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi &= R^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N E_{ij} \Delta\phi_i \cdot \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \\ &= R^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \alpha_i A_{ij} \Delta\phi_i \cdot \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right| \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)로 부터 조도의 균일도에 따라서 $\Delta\theta\Delta\phi$ 의 크기를 결정해야 한다. 위 식에서 cosine항의 가중치로 볼 수 있으며, α 는 조도계의 조도감응도(illuminance responsivity)이고, A_{ij} 는 그 위치에서의 조도계의 광전류이다.

식 (5)를 근거로 하여 전광선 속의 측정절차는 우선 조도계를 교정해야 되고, 광원의 중심에서 조도계의 조도 기준면까지의 거리 R 을 결정하고, $\Delta\theta$ 와 $\Delta\phi$ 를 선택한다. 그리고 그 다음에는 극각 θ 를 변화시켜가며 $E_{11}, E_{21}, \dots, E_{N1}$ 을 측정하고

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i A_{i1} \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right|$$

을 계산하고, 이러한 절차를 방위각 ϕ 의 M 개의 위치에 대해 반복하고 식(5)로 부터 전광선속을 계산한다.

2.2 전광선속 측정장치 구성

그림 2는 식 5에서 측정가능한 변수를 얻기위해서 설계한 전광선속 측정장치의 구성도이다. 검출기와 산란광 차단기는 전체 길이가 4 m인 강철 빔의 위쪽 끝에 각각 설치하였다. 광원 주위의 전광선속을 연속적으로 측정하기 위해서 검출기와 산란광 차단기가 설치된 강철빔을 회전시켰다. 이를 위해서 강철빔의 중심 축을 정밀한 볼베어링으로 지지하였고, 서보 모터와 기어박스를 사용하여 강철빔을 회전시켰다. 측정하고자하는 전구의 후방을 효과적으로 흡수하고자 흑색 무광 페인트를 칠한 커다란 금속 고깔을 검출기의 반대쪽 축에 설치하여 산란광을 차단하도록 하였다. 전광선속 측정장치의 회전팔의 위치에 따른 광반응도가 일정한 LMT사의 조도계를 사용하였다. 조도계에서 발생한 광전류를 낮은 임피던스를 가지면서 이득조절이 가능한 저잡음 증폭기를 축전지 전원을 사용하여 증폭하였다. 증폭된 광전신호는 노이즈의 영향을 피하기 위하여 16 비트 A/D변환을

행하여 디지털신호를 컴퓨터로 직렬 전송하였다.

전광선속 측정장치의 디지털 제어기는 실험실에서 제작하여 사용하였다. 검출기가 일정한 속도로 360°를 회전하는 동안 광속전구(flux lamp)를 고정시켜주었다. 측정기간 동안 검출기 출력은 자동적으로 적분되었고, 극좌표의 일정한 각도간격으로 기록하였다. 최하점에 도달하였을 때 램프는 방위각 방향으로 회전하였고, 반대방향으로 검출기를 회전하는 것을 반복하였다. 이 동작을 전체 표면을 모두 탐색할 때까지 반복하였다. 제어장치를 사용하여 극좌표의 각도를 0.1에서 10°간격으로 변화시키도록 하였고, 이기간 동안 적분하도록 하였다. 방위각 간격은 1°에서 99°간격으로 회전하였다. 회전 각도는 회전축에 설치한 엔코더에서 발생하는 그레이 코드를 이진수로 변환하여 사용하였다.

본 실험에서 사용한 대표적인 각도 증가율은 $\Delta\phi = 10^\circ$ 와 $\Delta\theta = 5^\circ$ 이다. 측정하지 못하는 사각 δ 는 편이상 1°이고, 필요시에는 좀더 작은 값을 사용할 수 있다. 이와 같은 조건에서 전체 광에서 약 25%를 검출기에 입사시킬 수 있다. 실험적으로 얻은 결론은 이와 같은 백분율을 0.05% 이상 증가시키는 것은 어렵다는 것이다. 극좌표 스캔은 $2.5^\circ s^{-1}$ 비율이고, 한 번 전체를 스캔하는데는 약 1시간이 소요된다. 이것은 전구의 안정성을 고려하면 아주 적절한 시간이다. 최하점에서의 조도를 반복하여 측정하는 것은 전구와 검출기의 안정성을 점검하는 것을 제공한다.

2.3 측정 및 제어 장치

전광선속 측정장치를 측정하고 제어하기 위한 장치는 그림 3에서 MCU를 중심으로 하여 3개 부분으로 구분할 수 있다. MCU-1은 광검출 및 회전각 검출기, MCU-3는 측정하고자 하는 램프를 회전시키는 스텝모터 장치, MCU-2는 검출기 뮌치를 정속으로 회전시키는 ARM 모터 장치이다.

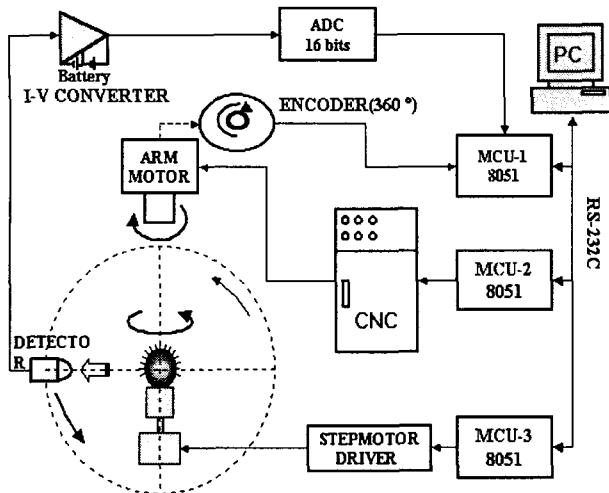


그림 3 전광선속 측정을 위한 제어 및 측정부 구성도
Fig. 3 Block diagram of a data acquisition parts for the total flux measurement

이들 장치는 각각의 거리가 5 m 이상 떨어져 있으므로 컴퓨터와 데이터를 주고받기 위해서 시리얼 전송방식(RS-232C)을 사용하였으며, 데이터 전송 및 제어를 위해서 각각의 장치에 마이크로 프로세서(INTEL: 8751)를 부착하였다. 한 개 시리얼 라인을 사용하는 관계로 각각의 장치의 동작을 정의하는 명령을 컴퓨터에서 하달할 경우에만 응답하도록 하였다. 컴퓨터에서는 National Instrument사의 LabVIEW를 사용하여 각각의 장치를 통제하고 데이터를 수집하도록 프로그램 하였다.

검출기에서 발생한 전류신호는 I-V변환기를 사용하여 신호처리에 편리한 전압신호로 바꾸었다. 이때 신호의 크기를 조절하기 위해서 저잡음 연산증폭기를 사용하여 증폭하였다. 증폭된 신호를 16 비트의 A/D 변환기를 사용하여 수치화 하였고, 수치화한 데이터는 마이크로 프로세서를 사용하여 시리얼 신호로 바꾸어 컴퓨터에 전송하였다.

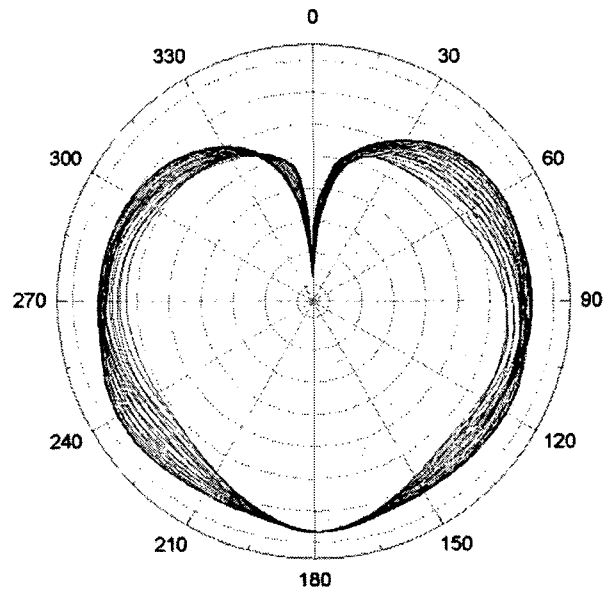


그림 4 극좌표계에서 가상구면을 스캔한 조도 분포
Fig. 4 Distribution of optical flux on the virtual surface in the polar coordinate system

회전팔의 각도는 360도의 절대값을 측정할 수 있는 encoder를 사용하여 측정된 뒤, 이 값을 마이크로 프로세서를 사용하여 시리얼 신호로 바꾸어 컴퓨터에 전송하였다. 1도 단위로 측정된 광의 세기와 측정순간의 회전팔 각을 시리얼 라인을 통해서 전송하도록 하였다.

광원을 회전시키기 위해서 0.9도 단위로 회전할 수 있는 스텝모터를 사용하였다. 이는 시리얼 라인으로 전송된 컴퓨터의 명령에 의해서 기계적으로 정해진 원점으로부터 한 스텝씩 회전할 수 있도록 하였다. 검출기를 광원 주위로 회전시키는 모터는 CNC 제어판넬을 이용하여 시계방향으로 회전하도록 하였다. 4 m 길이의 회전장치의 관성을 고려하여 측정속도를 1회전(360도)을 1도 간격으로 측정하는데 약 1분이 소요되도록 조절하였다. 방위각을 9도 간격으로 회전할 때 총 측정시간은 20분 정도 소요되었다.

가상구면상의 각 지점에서 측정된 값은 컴퓨터에 ASCII 형태의 파일로 저장하였고, 측정이 완료된 뒤 저장된 파일을 Matlab을 사용하여 분석하였다. 그림 4는 표준전구 중 하나를 대표적인 극좌표에서의 수직면에서 측정한 조도분포를 보여준다. 극좌표의 0도 부근은 광원의 전기적인 소켓 위쪽 부분으로 소켓에 의해서 광원이 가려지므로 측정된 조도가 0에 근접하는 것을 확인할 수 있다.

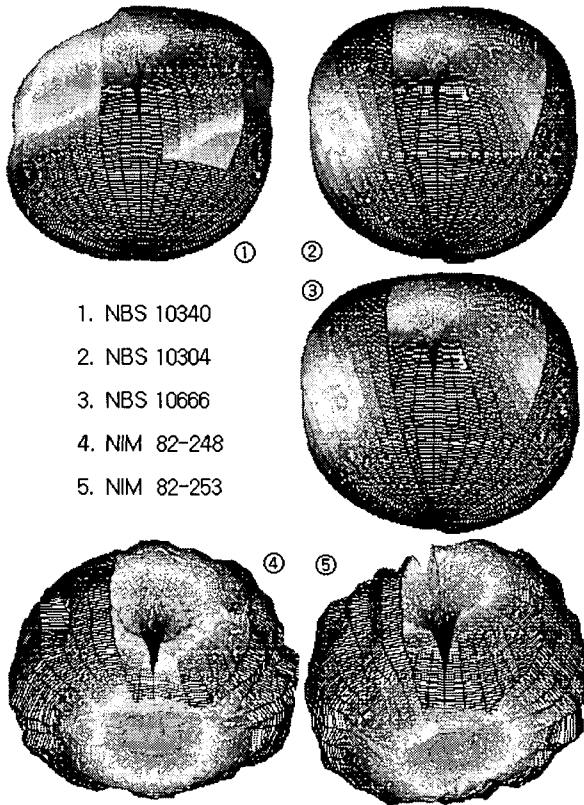


그림 5 NIST와 NIM 표준전구를 사용하여 얻은 전광선속 측정결과

Fig. 5 Three dimensional distributions of the total flux of standard lamps from NIST and NIM

고니오메터에서 측정된 데이터는 극좌표계를 기준으로 저장된다. 이 데이터를 분석이 용이하도록 3차원 형태로 표시하기 위해서는 직각좌표계로 변환하는 것이 편리하다. 본 실험에서는 Matlab을 사용하여 좌표변환을 한 뒤 측정 데이터를 3차원으로 표시하였다. 그림 5는 5개 표준전구의 전광선속을 3차원으로 표시한 것으로 가상구면의 내부를 관찰할 수 있도록 일부 구면을 제거한 형태로 표시하였다.

3. 결 론

가상의 구면의 조도 측정에 사용된 조도계는 LMT 08A0392(illumAminance responsivity:4.5766E+07 lx/A) 이며 광원의 중심과 조도 기준면까지의 거리는 약 1.693 m 이다.

측정결과는 표 1에 요약되어 있으며, KRISS 전광선속 scale이 NIST 표준전구보다는 약 1.3 % 적게, NIM 표준전구보다는 약 0.4 % 적게 측정되었다.

8개 표준구 각각의 전체 광도선속(luminous flux) 앞에서의 방법을 사용하여 2개의 조건에서 적분하였다. 각 전구의 2개 조건에서의 값은 0.1 % 이상 차가 나지 않았으므로 무작위오차가 아주 작다는 것을 말해 주고 있다.

표 1 측정데이터 비교

Table 1 Comparison of the measurement results

표준 전구명	file 명	성적서 값 (lm)	KRISS 측정값 (lm)	편차 (%)	편차의 평균 (%)	평균 편차
NIM 82-248	NIM248R1	3953	3936	-0.43	-0.50	-0.35
	NIM248R2		3934	-0.48		
	NIM248R3		3930	-0.59		
NIM 82-253	NIM253R1	3981	3971	-0.24	-0.21	-0.35
	NIM253R2		3973	-0.20		
	NIM253R3		3973	-0.20		
NBS 10340	NBS340R1	254	252.1	-0.73	-0.81	-1.3
	NBS340R2		252.0	-0.80		
	NBS340R3		251.7	-0.89		
NBS 10304	NBS304R1	1666	1638	-1.70	-1.63	-1.3
	NBS304R2		1639	-1.60		
	NBS304R3		1639	-1.60		
NBS 10666	NBS666R1	1617	1596	-1.30	-1.40	-1.3
	NBS666R2		1594	-1.40		
	NBS666R3		1593	-1.50		

감사의 글

본 연구는 2002년도 과학기술부의 국제공동연구지원사업(M6-0142-00-0007)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] A. Russell Schaefer, Kshitij Mohan, "A New Goniordimeter for Total Flux Measurements," pp. 349-353, Journal of IES, July 1974.
 [2] G. Sauter, "Goniophotometry: new calibration method and instrument design," Metrologia, Vol. 32, pp. 685-688, 1995/96.
 [3] W. J. Brown, "Realization of the NML Scale of Total Luminous Flux," Metrologia Vol 15, pp 167-171, 1979.

저 자 소 개



최 종 운 (崔 鐘 云)

1959년 2월 16일생. 단국대학교 전자공학과 학사, 석사, 박사. 1985~1988 : 해태전자중앙연구소, 연구원. 1988년~2000 한국표준과학연구원 레이저그룹, 연구원, 선임연구원, 책임연구원. 2000년~현재 호남대학교 광전자공학과 교수
E-mail : woon@honam.ac.kr



유 문 종 (劉 旻 鍾)

1957년 10월 14일생. 1983년 전남대학교 물리학과 졸업. 2003년 호남대학교 정보통신공학 (공석). 2003년 호남대학교 광전자공학과 연구원
E-mail : caobr@chollian.net