

전광선속 측정을 위한 고니오광도계 제작

김용완 · 신동주 · 이인원

한국표준과학연구원, 광학그룹

Ⓣ 305-600, 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

최종운[†]

호남대학교, 정보통신공학부

Ⓣ 506-714, 광주광역시 광산구 서봉동 59-1

(2003년 4월 21일 받음, 2004년 2월 24일 수정본 받음)

조도단위계로부터 전광선속의 단위계를 실현하기 위해서 전광선속 측정장치를 제작하여 광도측정의 단위계를 복사선 측정의 기준으로 변환하였다. 제작된 전광선속 측정장치는 광원으로부터 전 방향으로 발산하는 광속을 측정하고, 광원 주위의 가상구면을 적분함으로써 전광선속을 측정하였다. 광검출기로 LMT사의 조명도계를 사용하여 광원의 중심과 조명도 기준면까지의 거리가 약 1.693 m 인 가상의 구면의 조명도를 측정하였다. 제작된 고니오광도계의 전광선속은 95% 신뢰수준에서 측정불확도는 1%이다.

주제어 : total luminous flux, irradiance, illuminance, imaginary surface.

I. 서 론

II. 측정 이론

수년 동안 한국표준과학연구원에서는 광도측정의 단위계를 복사선 기준으로 변환하는 작업을 수행한 결과, 광도측정 단위계를 직접적으로 파워나 와트와 같은 SI 단위계로 관련시킬 수 있었다. 이와 같은 작업의 완성은 한국표준과학연구원서 복사선 측정 단위로서 조도, 광도, 휘도 단위계를 채택할 수 있게 되었다. 또한 1979년 제 16차 국제도량형총회(CGPM)에서 지정된 새로운 광도(cd)의 정의에 따라 각국에서는 ECR(Electrically Calibrated Radiometer) 및 자체 교정된 실리콘 광다이오드 등을 이용한 광검출기 중심의 광도표준을 확립하였고^[1], 고니오광도계(goniophotometer)를 사용하여 전광선속 표준을 확립하여 그 표준을 산업체에 보급하고 있다.

측정표준 연구기관들이 전광선속을 측정하는 방법으로 일반적으로 두 가지 방법을 사용해 왔다. 첫째는 전입체각에 걸쳐 광도를 측정하고 적분하는 방법이고^[2], 둘째는 광원을 중심으로 가상의 전체 구면에 걸쳐 조명도를 측정하고 적분하는 방법이다^[3]. 이들 중에서 둘째 방법의 장점은 첫째 방법보다 더 짧은 측정거리(광원과 조명도계 사이)를 채택하여도 같은 정밀 정확도를 얻을 수 있고, 측정거리가 짧으므로 해서 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.

2.1. 측정원리

전광선속 Φ 는 특정한 전류나 전위차에서 2차 표준으로 사용할 수 있는 적절한 텅스텐 필라멘트 전구를 선택한 뒤, 각 전구에서 발산되는 광속을 입체각 $4\pi sr$ 로 적분하기 위한 전광선속 측정장치를 사용하여 일반적으로 실현된다. 광속을 적분하는 고전적인 방법은 많은 방향 (θ, ϕ) 에서 광도 $I(\theta, \phi)$ 를 측정하는 것이다. 즉 그림 1과 같이 구면좌표계에서 θ 를 극각(polar angle), ϕ 를 방위각(azimuthal angle)이라 하고, 전구를 원점에 위치시키면 가상구면을 만들 수 있다. 따라서 가상구면 상의 각 부분의 광도를 적분하면 전광선속을 측정할 수 있다.

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

그러나 광원 주위를 반경을 r 로 정한 가상공간의 표면에 존재하는 (θ, ϕ) 에서 광도 $I(\theta, \phi)$ 보다 조도 $E(\theta, \phi)$ 측정하는 것이 기술적으로 수월하다. 이 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

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

따라서 위 식을 바탕으로 실험 장치로 구현하면 전구와 검출기 사이의 거리를 짧게 할 수 있다. 작은 반경을 갖는 전광선속 측정장치에서 전체광속을 많이 샘플을 취하면 취할 수록 좌표계의 원점에 있는 광원의 위치 따른 오차를 작게 할 수 있다.

[†]E-mail: woon@honam.ac.kr

광원을 대략 구의 중심에 설치하고, 이 광원의 외곽에 설정한 가상 구면상에 임의의 한 점에서 조명도 $E(\theta, \phi)$ 를 측정할 수 있다. 이때 조명도계를 극각이 0에서 2π 라디안, 방위각이 0에서 π 라디안까지 주사하도록 구성하면 전구면의 조명도를 측정할 수 있다. 그러므로 광원에서 나오는 전광선속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Phi = \int \int E(\theta, \phi) dA$$

$$= \int_0^\pi \int_0^{2\pi} E(\theta, \phi) R^2 \sin \theta d\theta d\phi \quad (3)$$

그러나 아주 작은 수광 면적을 갖은 조명도계로 가상구면상에 존재하는 전구면에서의 조명도를 모두 측정하는 것이 불가능하다. 따라서 실제적으로는 구면에서의 한 부분에서 조명도를 측정하고 그 값을 그 주위 부분의 대표 값으로 취하고 이 값들을 모두 합하여 전광선속을 얻는다.

방위각을 $\Delta\phi$ 폭으로 M등분하는데 $\partial E(\theta, \phi)/\partial\phi \Delta\phi$ 이 적도록 하고, 극각을 $\partial E(\theta, \phi)/\partial\theta \Delta\theta$ 가 적게끔 $\Delta\phi$ 폭으로 N등분하여 입체각 $\Delta\theta\Delta\phi$ 내에서 조명도, $E(\theta, \phi)$ 값이 크게 변하지 않고 일정한 값 \bar{E} 로 볼 수 있도록 한다. 측정점 θ_i, ϕ_j 위치의 $\Delta\theta\Delta\phi$ 입체각내의 조명도를 E_{ij} 라고 하면 그 $\Delta\theta\Delta\phi$ 입체각내로 통과하는 광선속은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\Phi_{ij} = E_{ij} R^2 \int_{\phi_j - \Delta\phi/2}^{\phi_j + \Delta\phi/2} \int_{\theta_i - \Delta\theta/2}^{\theta_i + \Delta\theta/2} \sin \theta d\theta d\phi \quad (4)$$

$$= R^2 E_{ij} \Delta\phi_i \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right|$$

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

$$\Phi = R^2 \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N E_{ij} \Delta\phi_i \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right|$$

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

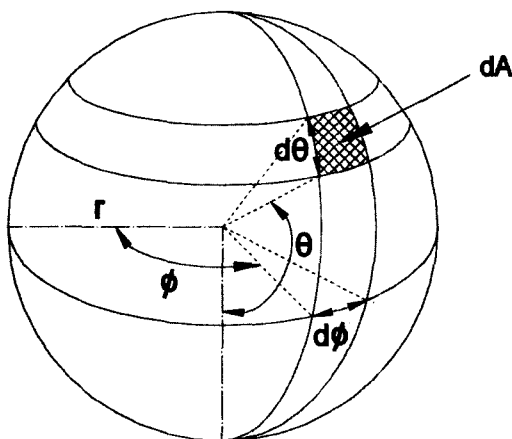


그림 1. 극좌표계를 사용한 가상구면(ϕ : azimuthal angle, θ : polar angle).

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

식 (5)를 근거로 하여 전광선속의 측정절차는 우선 조명도계를 교정해야 되고, 광원의 중심에서 조명도계의 조명도 기준면까지의 거리 R을 결정하고, $\Delta\theta$ 와 $\Delta\phi$ 를 선택한다. 그리고 그 다음에는 극각 θ 를 변화시켜가며 $E_{11}, E_{21}, \dots, E_{m1}$ 을 측정하고 $\sum_{i=1}^m \alpha_i A_{ij} \left| \cos\left(\theta_i - \frac{\Delta\theta}{2}\right) - \cos\left(\theta_i + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \right|$ 을 계산하고 이러한 절차를 방위각 ϕ 의 M개의 위치에 대해 반복하고 식 (5)로부터 전광선속을 계산하면 된다.

2.2. 전광선속 측정장치 구성

그림 2는 식 (5)에서 측정 가능한 변수를 얻기 위해서 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 강철 빔을 회전시켰다. 이를 위해서 강철 빔의 중심축을 정밀한 볼베어링으로 지지하였고, 서보모터와 기어박스를 사용하여 강철 빔을 회전시켰다. 축의 한쪽에 설치한 산란광 차단기는 측정하고자하는 전구의 후방을 효과적으로 흡수하고자 흑색페인트를 칠한 커다란 금속 꽃갈을 설치하였다. 전광선속 측정장치의 회전팔의 위치에 따른 광반응도가 일정한 LMT(Lichtmesstechnik GmbH Berlin, Germany)사의 조명도계를 사용하였다. 조명도계에서 발생한 광전류를 낮은 임피던스를 가지면서 이득조절이 가능한 저잡음 증폭기를 사용하여 증폭하였다. 증폭된 광신호는 4-1/2 디지털 출력력을 갖는 A/D변환를 통과시켜 디지털신호로 바꾼뒤 컴퓨터로 전송하였다.

전광선속 측정장치의 디지털 제어기는 실험실에서 제작하여 사용하였다. 검출기가 일정한 속도로 360°를 회전하는 동안 광속전구(flux lamp)를 고정시켜주었다. 측정기간 동안 검

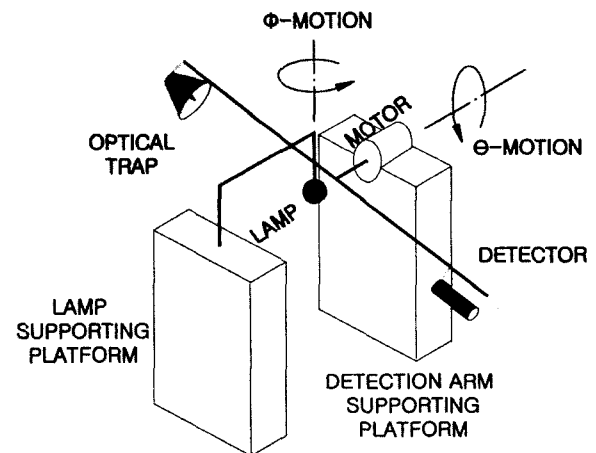


그림 2. 광원 주위의 가상 구면상의 조도분포를 측정하기 위한 기계적인 구성도(회전부 길이: 4 m).

출기 출력은 자동적으로 적분되었고, 극좌표의 일정한 각도 간격으로 기록하였다. 최하점에 도달하였을 때 램프는 방위 각 방향으로 회전하였고, 반대방향으로 검출기를 회전하는 것을 반복하였다. 이와 같은 동작은 전체 표면을 탐색할 때까지 반복하였다. 제어장치를 사용하여 극좌표의 각도($\Delta\theta$)를 0.1에서 10° 간격으로 변화시키도록 하였고, 이 기간 동안 적분하도록 하였다. 방위각 간격($\Delta\phi$)은 1°에서 9°간격으로 회전하였다. 회전 각도는 회전축에 설치한 엔코더에서 발생하는 펄스의 수를 세어서 측정하였다.

본 실험에서 사용한 대표적인 각도 증가율은 $\Delta\phi = 10^\circ$ 와 $\Delta\theta = 5^\circ$ 이다. 측정하지 못하는 사각 δ 는 편의상 1°이고, 필요시에는 좀더 작은 값을 사용할 수 있다. 이와 같은 조건하에서 전체 광에서 약 25%를 검출기에 입사시킬 수 있다. 실험적으로 얻은 결론은 이와 같은 백분율을 0.05% 이상 증가시키는 것은 어렵다는 것이다. 극좌표 주사 속도는 2.5 s^{-1} 이므로, 전체 가상구면을 주사하는데는 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 측정장치에 사용한 측정 및 제어 장치는 크게 3개 부분으로 나누어져 있다. 첫째는 광검출 및 회전각 검출기, 둘째는 측정하고자 하는 램프를 회전시키는 스텝모터 장치, 셋째는 검출기 뮌치를 정속으로 회전시키는 ARM 모터 장치이다. 이들 장치는 각각의 거리가 5 m 이상 떨어져 있으므로 컴퓨터와 데이터를 주고 받기 위해서 시리얼 전송방식(RS-232C)을 사용하였으며, 이를 위해서 각각의 장치에 마

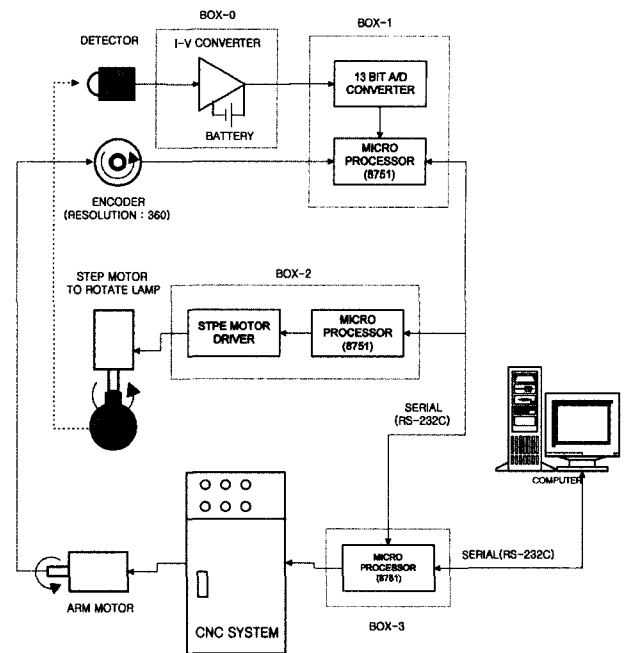


그림 3. 전광선속 측정을 위한 제어 및 측정부의 전기적인 구성도.

이크로 프로세서(INTEL: 8751)를 부착하였다. 한 개 시리얼 라인을 사용하는 관계로 각각의 장치의 동작을 정의하는 명령을 컴퓨터에서 하달할 경우에만 응답하도록 하였다. 컴퓨터에서는 Nation Instrument사의 LabView를 사용하여 각각의 장치를 통제하고 데이터를 수집하도록 프로그램 하였다. 검출기에서 발생한 전류신호를 I-V변환기(그림 3의 box-0)를 사용하여 신호처리에 편리한 전압신호로 바꾸었다. 이때 신호의 크기를 조절하기 위해서 저잡음 연산증폭기를 사용

표 1. NIST와 NIM 표준전구를 사용하여 얻은 전광선속 측정결과

표준전구명	file 명	성적서값 (lm)	KRISS측정값 (lm)	차이(%)	차이의 평균(%)	평균차이 (%)
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	
	NIM253R2		3973	-0.20		
	NIM253R3		3973	-0.20		
NBS 10340	NBS340R1	254	252.1	-0.73	-0.81	
	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	
	NBS666R2		1594	-1.40		
	NBS666R3		1593	-1.50		

표 2. 전광선속 불확도

Uncertainty factor	Relative expanded uncertainty (%) (k=2)	
	Type A	Type B
- Uncertainty of the illuminance responsivity of photometer	0.24	0.73
- Distance measurement uncertainty (2 mm in 1693 mm)		
- Repeatability of measurements	0.20	
- Uniformity of illuminance	0.50	
- Correction for photometer temperature variation		0.30
- Spectral mismatch correction		
- Linearity of the photometer	0.10	0.10
Combined uncertainty (k.uc)	1.0	

하여 증폭하였다. 측정장치 주위의 상용전원에서 발생하는 잡음의 영향을 최소화 하면서 검출된 아날로그 신호를 디지털화 하기 위하여 4-1/2 디지트 출력(약 13 비트 분해능)을 갖는 A/D변환기(ICL7135CPI, Intersil)를 사용하였다. A/D변환기에서 출력된 BCD(Binary Coded Decimal) 코드 데이터는 마이크로 프로세서를 사용하여 시리얼 신호(RS-232C)로 바꾸어 컴퓨터에 전송하였다.

회전팔의 각도는 360도의 절대값을 측정할 수 있는 encoder를 사용하여 측정한 뒤, 이 값을 마이크로 프로세서를 사용하여 시리얼 신호로 바꾸어 컴퓨터에 전송하였다. 광의 세기와 각도 데이터는 그림 3의 box-1에서 1도 단위로 측정된 광의 세기를 시리얼 라인을 통해서 전송하도록 하였다.

전구를 회전시키는 장치는 그림 3의 BOX-2이다. 전구를 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 전구 주위로 회전시키는 모터는 BOX-3에 의해서 시계방향으로 회전하도록 하였다. 4 m 길이의 회전장치의 관성을 고려하여 측정속도는 극각 360를 1도 간격으로 측정하는데 약 1분이 소요되도록 조절하였다. 방위각을 9도 간격으로 회전할 때 총 측정시간은 60분 정도 소요되었다.

III. 전광선속 측정 결과

제작된 전광선속 측정장치를 사용하여 5개의 개스 주입형 텅스텐 필라멘트 전구의 광도속을 측정하였다. 측정을 위해서 프랑스의 BIPM(Bureau International des Poids et Mesures)에서 1953년 오스트레일리아의 NML(National Measurement Laboratory)에 교정된 이래 한 번도 사용되지 않은 전구를 사용하였다. BIPM에서 교정된 것은 1952년 5개국간의 국제비교 이후에 국제적 평균 광도로 사용되고 있다. 1978년의 새로운 NML의 광도는 1952년의 평균 광도보다 1.5% 큰 것으로 밝혀졌다. 이 전구의 다음 국제비교는 1957, 1961, 1969년에 수행되었고, 8개 국가가 수행한 1969년 비교부터는 1952년의 평균 광도보다 0.6%가 커진 증거가 보인다.

그림 4는 표준 전구중 하나의 대표적인 극좌표에서의 수직면에서 주사한 조도분포를 보여준다.

Table 1은 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology) 및 중국의 NIM(National Institute of metrology)의 전광선속표준전구를 한국의 KRISS(Korea Research Institute of Standards and Science)의 goniophotometer를 사용하여 측정 한 결과를 요약하였다. 이 때 가상의 구면의 조명도 측정에 사용된 조명도계는 LMT 08A0392(illuminance responsivity: 4.5766E+07 lx/A)이며 광원의 중심과 조명도 기준면까지의 거리는 약 1.693 m이다. 측정결과 KRISS의 전광선속 scale이 NIST 표준전구보다는 약 1.3% 적게, NIM 표준전구보다는 약 0.4% 적음을 보여 주었다. Table 2는 KRISS의 전광선속 측정 불확도를 보여주고 있다.

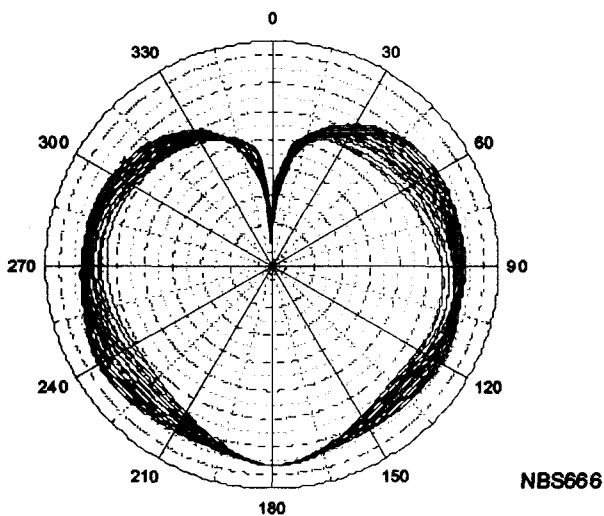


그림 4. 극좌표계에서 가상구면상에 위치한 임의의 수직면을 주사한 조도분포 (측정에 사용된 표준전구: NBS 10666).

IV. 결 론

가상의 구면의 조명도 측정에 사용된 조명도계는 LMT 08A0392(illumination responsivity: 4.5766E+07 lx/A)이며 광원의 중심과 조명도 기준면까지의 거리는 약 1.693 m 이다. 측정결과 KRISS의 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 조건하에서 적분되었다. 각 전구의 2개 조건하에서의 값은 0.1% 이상 차가 나지 않았으므로 랜덤 오차가 아주 작은 것을 말한다.

표 2는 측정시 고려된 계통오차의 원인을 나열하였다. 제작된 고니오광도계의 전광선속은 95% 신뢰수준에서 측정불확도는 1%이다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 과학기술부의 국제공동연구지원사업(M6-0142-00-0007)의 지원을 받아 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] A. Russell Schaefer, Kshitij Mohan, "A New Goniometer 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.

A goniometer for total flux measurements

Yong-Wan Kim, Dong-Joo Shin, and In-Won Lee

*Optics Group, Korea Research Institute of Standards and Science
Doroungdong, Daejeon, Korea*

Jong-Woon Choi[†]

*Department of Information and Communication, Honam University
Seobongdong 59-1, Gwoingju, Korea*

[†]E-mail: woon@honam.ac.kr

(Received April 21, 2003, Revised manuscript February 24, 2004)

We make a goniometer to realize the scales of total luminous flux and total spectral flux from standards of irradiance and illuminance. Transferring of the photometric scales to a radiometric base has been completed by using a new goniometer to realize a scale of total luminous flux from the scale of illuminance. This is done by measuring the flux emanating from an optical source in different directions and integrating it over an entire imaginary surface surrounding the source. This method is suggested for the realization of the scales of total luminous flux and geometrically total spectral flux. The combined uncertainty of a total flux in the KRISS goniometry is 1% in the condition of 95% reliance.

OCIS Codes: 120.5630, 120.3930, 220.4880.