

## 분광복사휘도 측정용 광검출기의 특성 평가

서정철†

한국표준과학연구원 정보통신표준센터

Ⓣ 305-600 대전 유성구 도룡동 1번지

박승남 · 김봉학

한국표준과학연구원 광기술표준부

Ⓣ 305-600 대전 유성구 도룡동 1번지

(2001년 5월 14일 받음, 2001년 8월 7일 수정본 받음)

광원의 분광복사휘도를 측정하기 위한 실험 장치를 구성하였으며, PMT, Si, InGaAs 및 IR enhanced InGaAs 광검출기의 특성을 평가하였다. 구성된 분광복사휘도 측정 장치의 파장 영역은 250~2500 nm이며, 1.0  $\mu$ A 이하의 신호에서 비선형 감응도가 0.1% 이하로 선형성이 우수하므로 분광복사휘도의 국가 표준 장치로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

분류코드 : OE.040, SM.030.

### I. 서 론

분광복사휘도(spectral radiance)는 광원의 출력을 나타내는 단위 중의 하나로 분광복사도(spectroradiometry) 분야에서 기본이 되는 측정량이다.<sup>[1-5]</sup> 분광복사휘도는 광원의 분광복사도(spectral irradiance), 색온도(color temperature), 광휘도(luminance) 등의 측정과 관련이 있으며, LCD(liquid crystal display) 및 CRT(cathode ray tube) 등과 같은 각종 display 장치의 특성 평가에 활용되기 때문에 분광복사계측 분야에서 중요하게 인식되고 있다.<sup>[2-5]</sup>

한편 최근 들어 광원의 분광복사휘도를 정확하게 측정하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 측정 정확도를 크게 향상시킬 수 있었다.<sup>[4,6,7]</sup> 분광복사휘도 측정은 고온 흑체 광원(high temperature blackbody)을 기준광원으로 하는 방법과 저온 ECR(cryogenic electrically calibrated radiometer)를 원기로 하는 필터 복사도계(filter radiometer)를 이용하는 방법이 있다.<sup>[1,2,7-9]</sup> 필터 복사도계를 이용하여 광원의 분광복사량을 특정한 파장에서 높은 정확도로 측정할 수 있는 장점이 있으나, 자외선, 가시광선, 적외선을 포함하는 넓은 파장영역에서 광원의 분광복사량을 측정하는 데는 많은 어려움이 있다. 그러므로 최근에는 고온 흑체 광원과 필터 복사도계를 접목하여 넓은 파장영역에서 광원의 분광복사량을 높은 정확도로 측정하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>[4,7,10-12]</sup>

한편 고온 흑체 광원을 기준으로 하여 광원의 분광복사휘도를 측정하기 위해서는 분광복사휘도 표준 광원(spectral radiance standard lamp), 분광복사휘도 측정용 광학계, 광검출 장치 등이 구성되어야 된다. 국가 표준기급의 분광복사휘도 측정 장치에서는 자외선, 가시광선, 적외선 영역에서 광원의 분

광복사휘도를 국제적 수준으로 측정할 수 있는 분광감응특성(spectral responsivity) 및 선형성(linearity)을 갖는 광검출 장치를 이용하게 된다.<sup>[2,5]</sup> 자외선 영역 및 가시광선 영역의 분광복사휘도 측정에는 PMT 광검출기가 일반적으로 사용되며, 가시광선 및 근적외선 영역에서는 선형성이 우수한 Si 광검출기가 많이 이용된다. 또한 적외선 영역에서는 Ge 광검출기, InGaAs 광검출기, PbS 광검출기, InSb 광검출기, HgCdTe 광검출기 등이 이용되고 있다.

한편 광원의 분광복사휘도를 측정하는데 있어서 사용되는 광검출장치의 선형성, 분광감응특성, 안정성(stability) 등은 측정 정확도에 직접적으로 영향을 미치게 된다.<sup>[2,5,13,14]</sup> 특히 광검출기의 비선형 특성은 광원의 분광복사량의 많고 적음에 따라 측정불확도에 크게 영향을 미치는 경우가 많으므로 광검출기가 입사되는 빛의 양에 따라 얼마나 선형적으로 반응하는가를 측정할 필요가 있다.

본 논문에서는 250 nm~2500 nm 파장영역의 분광복사휘도 국가 표준기에 사용되는 PMT 광검출기, Si 광검출기, InGaAs 광검출기, IR enhanced InGaAs 광검출기의 분광감응 특성 및 선형성 등의 성능을 평가하였다.

### II. 분광복사휘도 측정 장치

Fig. 1에서와 같이 파장 영역이 250~2500 nm에서 광원의 분광복사휘도를 측정하기 위하여 고온 흑체 광원을 이용한 광원 중심의 분광복사휘도 1차 표준 장치가 구성되었다. 분광복사휘도 1차 표준 장치는 분광복사휘도 표준 광원, 분광복사휘도 측정용 광학계, 분광 장치, 광검출 장치, 자동제어 및 신호처리 장치 등으로 되어 있다.

분광복사휘도 장치의 표준 광원 부분은 고온 흑체 광원, 분광복사휘도 표준 전구, 전원 공급 및 측정 장치 등으로 이루어

†E-mail: seo@kriss.re.kr

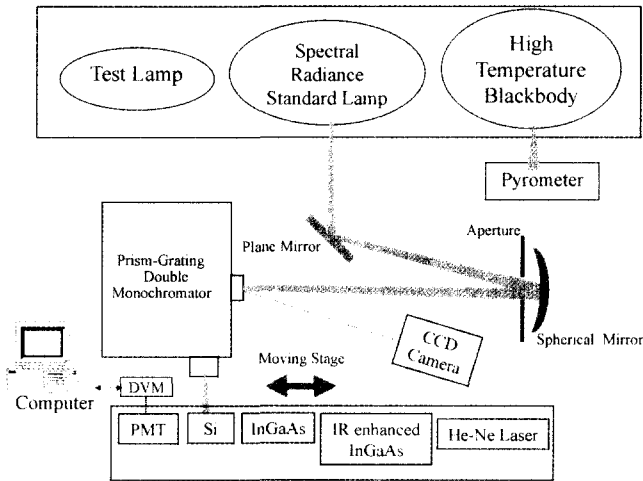


Fig. 1. Schematic diagram of KRISS spectral radiance standard system.

어져 있다. 광학계는 표준 광원의 영상을 단색화 장치의 입사 구경에 맞춰서 하기 위하여 250~2500 nm 파장 영역에서 반사율이 높은 알루미늄 거울을 사용하였는데, 평면 거울은 직경이 5 cm이며, 구면거울은 직경이 10 cm, 곡률반경이 100 cm로 되어 있다. 분광 장치는 빛의 산란(scattering) 및 고차수(higher order) 회절이 제거되면서 광원이 분광되도록 하기 위하여 prism-grating double monochromator를 사용하였다.

한편 광검출 장치는 250~2500 nm 파장 영역에서 분광복사휘도 신호를 검출하기 위하여 PMT, Si, InGaAs 및 IR enhanced InGaAs 광검출기가 자동 이동 장치에 탑재되어 각각의 파장에 해당되는 영역의 빛을 측정하게 된다.

(1) PMT 광검출기

사용된 광검출기 중에서 250~800 nm 파장 영역에서 광원의 분광복사휘도를 측정하기 위해서 냉각 장치가 장착된 head-on 형태의 PMT 광검출기를 사용하였다. 한편 PMT head는 선형성을 향상시키기 위하여 D type의 소켓에 설치되며, 암전류를 제거하여 미약한 자외선 영역의 광원을 검출할 수 있도록 하였다. PMT에 전압 공급 장치를 이용하여 -500 V 정도가 인가되며, 광전류 신호는 제작된 C/V converter로 입력되게 된다. 또한 전압으로 전환된 신호의 증폭율은 높은 이득 상태(high gain mode)에서  $10^8$  V/A이며, 낮은 이득 상태(low gain mode)에서는  $10^6$  V/A이다.

(2) Si 광검출기

파장 영역 350~1000 nm에서 분광복사휘도를 측정하기 위하여 선형성이 우수한 Si 광검출기를 사용하였다. Si 광검출기에서 나오는 광전류 신호는 C/V converter를 거쳐서 디지털 전압계(digital voltmeter)로 입력되는데, 높은 이득 상태는 증폭율이  $10^8$  V/A이며, 낮은 이득 상태에서는  $10^6$  V/A이다.

(3) InGaAs 광검출기 (InGaAs 1)

파장 영역 850~1600 nm에서의 분광복사휘도는 DC 모드로 사용할 수 있으며 암전류가 낮은 특성을 갖는 InGaAs 광검출기를 이용하여 측정하게 된다. 사용된 광검출기의 직경은 3 mm 이며, 신호 대 잡음비(signal to noise)를 높이기 위해 냉

각 장치를 사용하여 -30°C까지 냉각시킬 수 있도록 되어 있다. 이와 같은 광검출기로 검출된 신호는  $10^5$ ,  $10^6$  및  $10^7$  V/A의 증폭율을 가지는 preamplifier를 통하여 적정 이득 상태로 증폭시키게 된다.

(4) IR enhanced InGaAs 광검출기 (InGaAs 2)

파장 영역 1000~2500 nm에서는 IR 파장 영역이 확대된 IR enhanced InGaAs 광검출기를 사용하였다. 직경 3 mm의 적외선 영역이 확대된 InGaAs 광검출기는 표준형인 InGaAs 1 광검출기보다도 암전류가 100배정도 높을 뿐만 아니라 냉각 온도에 매우 민감하므로, 냉각 장치의 온도를 -30°C에서 안정화시킨 후 사용하게 된다. 이와 같은 광검출기로 검출된 신호는 preamplifier를 통하여 전압신호로 변화되어 계기에 입력되게 되는데,  $10^5$ ,  $10^6$  및  $10^7$  V/A의 증폭율을 갖고 있다.

한편 구성된 분광복사휘도 측정 장치는 측정 파장, 광검출기, 광원 등이 자동으로 선택 및 제어되도록 하였다. 이와 같은 자동이동장치는 측정하려고 하는 파장에 해당되는 광검출기를 선택하여, 정밀하게 이동시키는 역할을 하게 된다. 또한 디지털 전압계로 입력된 신호는 컴퓨터로 입력되어 처리되게 된다. 한편 표준 광원, 광학계, 분광장치 및 광검출기가 모두 수평이 유지되도록 하기 위하여 광축 정렬용 He-Ne 레이저가 설치되어 있다.

III. 분광감응 특성 측정

Fig 2는 4개의 광검출기가 설치된 분광복사휘도 측정 장치의 분광감응특성을 보여주고 있다. 분광감응특성의 측정은 NIST(미국표준기술연구원) 분광복사휘도 표준전구(Q105 텡스텐 리본 필라멘트 램프)를 사용하여 수행되었는데, 이 전구는 회전이 가능한 전구 설치대에 설치되었다. 제작된 전구 설치대의 회전 장치, 높이 조절 장치 및 x-y 이동 장치를 이용하여 분광복사휘도 표준전구를 정렬하였다. 분광 장치의 입력 구경은 0.6×0.8 mm 정도의 slit를 제작하여 사용하였으며, 분광 장치의 출력 구경은 2×5 mm 정도가 되도록 조절하였다. 상대 분광감응도를 측정하기 위하여 5회 반복 측정으로 평균값 및 상대 측정 불확도(uncertainty)를 계산하였다.

한편 250~800 nm 파장 영역에서 분광복사휘도를 측정하기 위하여 사용되는 PMT의 분광감응특성은 PMT의 구동전압 -500 V에서, 파장 20 nm 간격으로 200~800 nm 범위에서 측정하였다. 신호의 최대값은 600 nm 근방에서 광전류가 35  $\mu$ A 정도이고, 암전류는 10 pA 이하이었다. 한편 300~800 nm 파장 영역에서 신호의 측정 불확도는 0.1% 이하로 양호한 특성을 갖고 있다. 그러나 300 nm 이하에서는 잡음에 의하여 측정 불확도가 2.5% 정도까지 증가되므로 자외선 영역에서 빛의 양을 증가시킬 필요가 있다.

한편 350~1000 nm 파장 영역에서 분광복사휘도를 측정하기 위하여 사용되는 Si 광검출기의 분광감응 특성은 파장 10 nm 간격으로 350~1200 nm 범위에서 측정하였다. 그림에서 신호는 C/V converter의 증폭율이  $10^6$  V/A인 경우로, 신호의 최대값은 1000 nm 근방에서 0.3 V 정도이므로 광전류는 0.3  $\mu$ A에 해당된다. 그림에서 알 수 있듯이 측정 파장 영역에서 신

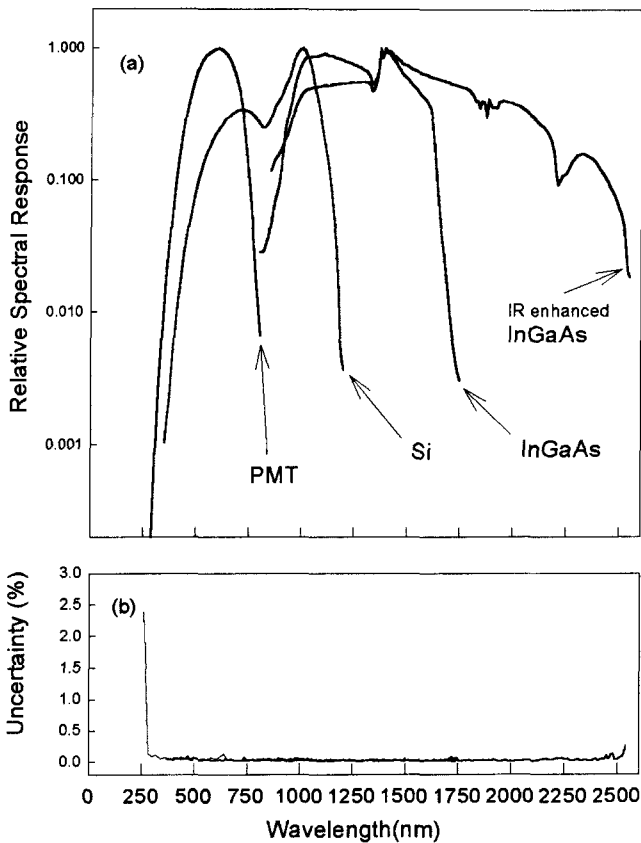


Fig. 2. Relative spectral responsivity (a) and random uncertainty (b) of the spectral radiance measurement system.

호의 측정 불확도는 0.1% 이하로 양호한 특성을 갖고 있다. 850~1600 nm 파장 영역에서 분광복사휘도를 측정하기 위하여 사용되는 표준형 InGaAs 광검출기(InGaAs 1)의 분광감응 특성은 파장 10 nm 간격으로 800~1750 nm 범위에서 측정하였다. 그림에서 측정 신호는 C/V converter의 증폭율이  $10^6$  V/A인 경우이다. 암전류 효과를 최소로 하기 위하여 냉각 장치의 온도를  $-30^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 30분 정도 안정화시킨 후 분광감응특성을 측정하였다. 신호의 최대값은 1400 nm 근방에서 0.4 V 정도이므로 광전류는  $0.4 \mu\text{A}$ 에 해당된다. 한편 측정 파장 영역에서 잡음에 의한 신호의 측정 불확도는 0.1% 이하로 양호한 특성을 갖고 있다. 그림에서와 같이 구성된 분광복사휘도 장치의 분광 감응 특성은 1350 nm, 1400 nm 근방에서 수분에 의한 흡수 현상이 나타난다.

한편 1000~2500 nm 파장 영역에서 분광복사휘도를 측정하기 위하여 사용되는 IR 영역이 확대된 InGaAs 광검출기(InGaAs 2)의 분광감응 특성은 파장 10 nm 간격으로 850~2550 nm 범위에서 측정하였다. 표준형 InGaAs 광검출기와 마찬가지로 암전류 효과를 최소로 하기 위하여 냉각 장치의 온도를  $-30^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 30분 정도 안정화시킨 후 분광감응 특성을 측정하였다. 그림에서 측정 신호는 C/V converter의 증폭율이  $10^6$  V/A인 경우이다. 신호의 최대값은 1400 nm 근방에서 0.2 V 정도이므로 광전류는  $0.2 \mu\text{A}$ 에 해당된다. 한편 2500 nm 이하의 측정 파장 영역에서 잡음에 의한 신호의

측정 불확도는 0.1% 이하로 양호하였으나, 그 보다 긴 파장에서는 0.3% 정도가 되었다. 표준형과 마찬가지로 1350 nm와 1400 nm 근방에서 dip을 볼 수 있으며, 또한 1850 nm 및 2200 nm에서도 분광 감응도가 상대적으로 감소되는 현상이 나타남을 알 수 있다. 흡수 현상을 보이는 파장 영역에서는 분광 감응도가 파장에 급격하게 변화하므로 파장 설정 오차에 의한 불확도 효과가 증가 될 수 있다. 그러므로 일반적으로 이러한 파장을 제외한 영역에서 광원의 분광복사휘도를 측정하게 된다.<sup>[5]</sup>

본 실험으로부터 개발된 측정 장치를 이용하여 자외선, 가시광선, 적외선을 포함하는 넓은 파장 영역에서 광원의 분광복사휘도를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

#### IV. 비선형성 측정

광원의 분광복사량 측정에서 측정 정확도에 크게 영향을 미치는 요인 중에 하나는 광검출 장치의 비선형 특성이다.<sup>[2,5]</sup> 비선형 특성을 측정하기 위하여 점광원의 역제곱법칙(inverse square law)을 이용하는 방법, 투과율을 알고 있는 필터를 이용하는 방법, 광합산(beam addition) 방법 등을<sup>[2,14-16]</sup> 많이 이용한다. 이외에도 다중 구경(multiple aperture)을 이용하는 방법, 분할 판(sectored disk)을 이용하는 방법, 흑체를 이용하는 방법 등도<sup>[17-19]</sup> 있지만 분광복사도 표준기급 측정 장치에서는 측정 정확도가 높은 광합산 방법을 이용한다. Fig. 3은 두개의 광을 이용한 광합산 방법으로 4개의 광검출 장치의 비선형 특성을 측정하기 위한 장치도이다. 그림에서와 같이 광원은 두개의 텅스텐 리본 필라멘트 전구를 사용하였으며, 250~2500 nm의 넓은 파장영역에서 beam을 비슷한 세기로 나누기 위하여 metallic beam splitter를 사용하였다.

한편 개발된 분광복사휘도 측정 장치의 비선형 특성은 두개의 shutter를 사용하여 광원이 교대로 광검출 장치에 입사되도록 하여, 두 광원이 모두 입사되었을 때의 광검출기에서 나오는 신호와, 각각의 광원이 입사된 경우의 각각에서 나오는 신

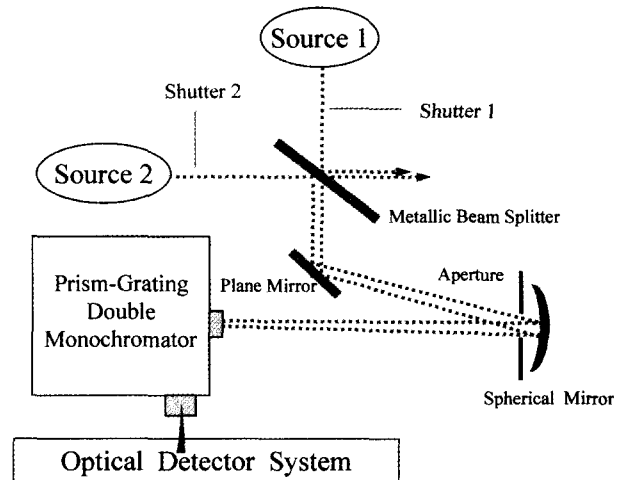


Fig. 3. Two-source beam conjoiner for determining nonlinearity by beam addition.

호를 합산하여 비교함으로써 광검출 장치의 비선형 특성을 측정하게 된다. 그러므로 광검출기의 비선형 감응도 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Nonlinearity } (S_c) = \frac{S_c}{S_a + S_b} - 1 \quad (1)$$

여기에서  $S_a$ ,  $S_b$ 는 두개의 shutter를 사용하여 광원이 교대로 광검출 장치에 입사된 경우의 각각의 신호이며,  $S_c$ 는 두 광원이 모두 입사되었을 때의 광검출기에서 나오는 신호이다.

한편 개발된 분광복사휘도 측정 장치에서 사용되는 4개의 광검출 장치의 비선형성은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4(a)는 PMT 광검출기의 비선형성을 보여 주고 있는데, PMT의 구동 전압은 -400 V이며, 파장 500 nm에서 측정하였다. 그림에서 C/V converter의 높은 이득 상태는  $10^8$  V/A이며, 낮은 이득 상태는  $10^6$  V/A이다. 그림에서 알 수 있듯이 PMT 신호가  $1.0 \mu\text{A}$  이하에서는 선형성을 갖고 있지만 그 보다 높은 입력 신호에서는 급격한 비선형성을 보이고 있다. 그러므로 구성된 장치로 분광복사휘도를 정확하게 측정하기 위해서는 PMT 광검출기의 선형적인 감응도를 갖도록 PMT 광검출기의 신호가  $1.0 \mu\text{A}$  이하가 되도록 조절해야 됨을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이  $1.0 \mu\text{A}$  이상의 신호에서 광검출기의 감응도 증가에 의한 비선형 현상이 관찰되는데, 이런 현상은 일반적으로 PMT에서 나타나는 비선형 특성과 일치하고 있다.<sup>[16]</sup>

한편 Fig. 4(b)는 Si 광검출기의 비선형 특성을 보여 주고 있는데, 파장이 900 nm에서 측정하였으며, C/V converter의 높은 이득 상태는  $10^8$  V/A이며, 낮은 이득 상태는  $10^6$  V/A이다. 그림에서 알 수 있듯이 Si 광검출기는  $1.0 \mu\text{A}$  근방에서 약한 감응도 포화(saturation) 현상을 보이지만, 측정 영역에서 강한 비선형 특성을 갖고 있지 않으므로 Si 광검출기의 신호가 500 nA 이하 영역에서 사용하면 비선형 특성에 의한 분광복사휘도 측정 오차는 발생되지 않게 된다.

한편 850~1600 nm 파장영역의 분광감응도를 갖는 InGaAs 광검출기(InGaAs 1)의 비선형성을 측정한 결과는 Fig. 4(c)와 같은데, 파장이 1400 nm이며, 냉각 장치의 온도를  $-30^\circ\text{C}$ 로 설정하고 30분 정도 경과 후 측정하였다. 그림에서 C/V converter의 높은 이득 상태는  $10^7$  V/A이며, 낮은 이득 상태는  $10^6$  V/A이다. InGaAs 광검출기는 Si 광검출기와 마찬가지로 측정영역에서는 강한 비선형 특성을 보이지 않으므로 500 nA 이하에서 사용하면 광검출기의 비선형 감응 특성에 의한 분광복사휘도 측정 오차는 발생되지 않을 것이다. 또한 1000~2500 nm 파장 영역에서 분광 감응 특성을 갖는 IR 영역이 확대된 InGaAs 광검출기(InGaAs<sub>2</sub>)를 사용하여 광 검출기의 비선형성을 측정하였는데, Fig. 4(d)는 파장이 2000 nm에서의 비선형 특성을 보여주고 있다. 그림에서 C/V converter의 높은 이득 상태는  $10^7$  V/A이며, 낮은 이득 상태는  $10^6$  V/A이다. InGaAs 2에서의 비선형성 측정은 냉각 장치의 온도를  $-30^\circ\text{C}$ 로 설정하고 안정화 된 상태에서 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 InGaAs 2에서도 InGaAs 1에서와 같이 측정 신호 범위에서 강한 비선형 특성이 관찰되지 않았다.

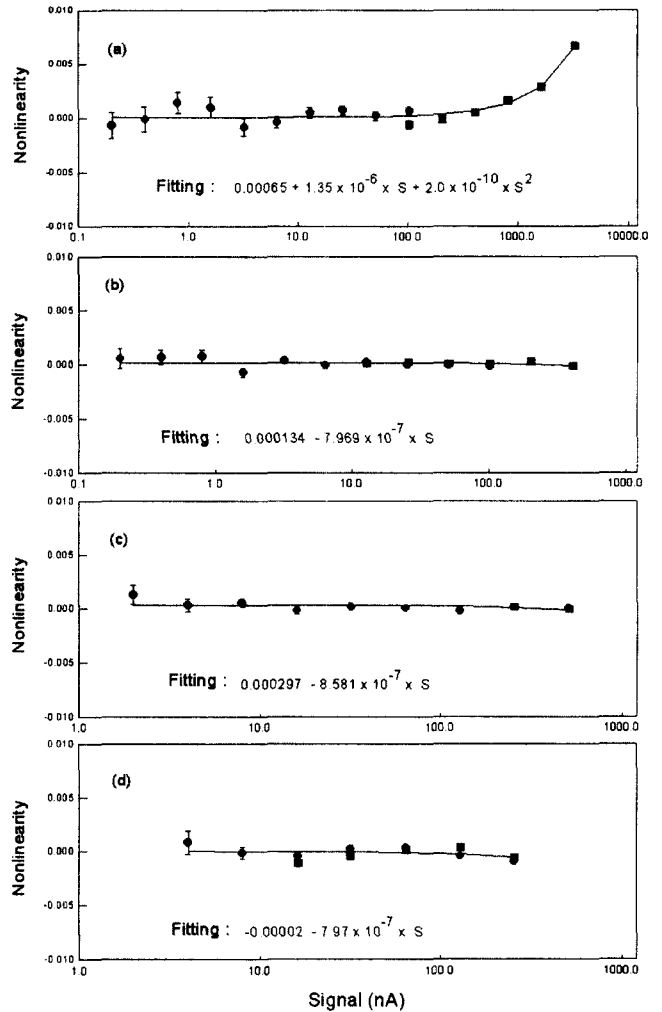


Fig. 4. Nonlinearity of (a) PMT, (b) Si, (c) InGaAs, and (d) IR enhanced InGaAs detectors. The error bars indicate the measurement uncertainty. High gain mode (circle), low gain mode (rectangle).

본 연구 결과에서 알 수 있듯이 개발된 분광복사휘도 측정 장치는 신호가  $1.0 \mu\text{A}$  이하에서는 비선형성이 0.1% 이하로 NIST의 분광복사휘도 측정 장치보다도 우수한 선형성을 갖고 있다.<sup>[5]</sup> 그러므로 구성된 분광복사휘도 측정 장치는 넓은 측정 신호 범위에서 광검출기의 비선형성에 의한 영향을 받지 않고 광원의 분광복사휘도를 측정할 수 있는 장점이 있음을 알 수 있다.

## V. 결 론

광원의 분광복사휘도를 측정하기 위한 장치를 구성하였으며 성능 평가를 수행하였다. 분광복사휘도 측정 장치는 표준광원, 광학계, 분광장치, 광검출장치, 자동제어 및 데이터 처리 장치 등으로 되어 있다. 광검출장치는 PMT 검출기, Si 광검출기, InGaAs 광검출기, IR enhanced InGaAs 광검출기를 사용하였는데, 250~2500 nm 파장영역에서 분광감응특성을 측정하여

분석하였다. 또한 광검출기의 비선형 특성을 측정하였는데, Si 광검출기, InGaAs 광검출기 및 IR enhanced InGaAs 광검출기는 측정 범위에서 비선형 특성이 관측되지 않았으나, PMT 광검출기는 신호가 1.0  $\mu\text{A}$  이상에서는 강한 비선형 특성이 관측되었다. 그러므로 PMT를 이용하여 자외선 및 가시광선 영역의 분광복사휘도를 정확하게 측정하기 위해서는 1.0  $\mu\text{A}$  이하가 되도록 신호를 조절할 필요가 있음을 알 수 있었다.

본 연구 결과로부터 개발된 분광복사휘도 측정 장치는 250~2500 nm의 넓은 파장 범위를 갖으며, 1.0  $\mu\text{A}$  이하의 신호에서 비선형성이 0.1% 이하로 우수한 선형성을 갖고 있으므로 분광복사휘도의 국가 표준 측정 장치로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] K. D. Mielenz, R. D. Saunders, A. C. Parr, and J. J. Hsia, "The 1990 NIST scales of thermal radiometry," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 95, no. 6, pp. 621-629, 1990.
- [2] H. J. Kostkowski, *Reliable Spectroradiometry* (Spectroradiometry Consulting, Maryland, USA, 1997), Chapters 2, 9.
- [3] C. DeCustis, *Handbook of Applied Photometry* (American Institute of Physics, New York, USA, 1997), Chapter 2.
- [4] R. D. Saunders, C. E. Gibson, K. D. Mielenz, V. I. Sapritsky, K. A. Sudarev, B. B. Khlevnoy, S. N. Mekhonstsev, and G. D. Harchenko, "Results of a NIST/VNIIOFI comparison of spectral-radiance measurements," *Metrologia*, vol. 32, no. 6, pp. 449-453, 1996.
- [5] J. H. Walker, R. D. Saunders, and A. T. Hattenburg, *NBS measurement services: spectral radiance calibrations* NBS Spec. Publ. 250-1 (US Government Printing Office, Washington, USA, 1987), pp. 1-25.
- [6] R. P. Lambe, R. Saunders, C. Gibson, J. Hollandt, and E. Tegeler, "A CCPR international comparison of spectral radiance measurements in the air-ultraviolet," *Metrologia*, vol. 37, no. 1, pp. 51-54, 2000.
- [7] V. I. Sapritsky, "Black-body radiometry," *Metrologia*, vol. 32, no. 6, pp. 411-417, 1996.
- [8] P. Karha, P. Toivanen, F. Manoochehri, and E. Ikonen, "Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380-900-nm spectral range," *Appl. Opt.*, vol. 36, No. 34, pp. 8909-8918, 1997.
- [9] T. Kubarsepp, P. Karha, F. Manoocheri, S. Nevas, L. Ylianttila, and E. Ikonen, "Spectral irradiance measurements of tungsten lamps with filter radiometers in the spectral range 290 nm to 900 nm," *Metrologia*, vol. 37, no. 4, pp. 305-312, 2000.
- [10] N. P. Fox, J. E. Martin, and D. H. Nettleton, "Absolute spectral radiometric determination of the thermodynamic temperatures of the melting/freezing points of gold, silver and aluminium," *Metrologia*, vol. 28, no. 4, pp. 357-374, 1991.
- [11] H. W. Yoon, B. C. Jonnson, D. Kelch, S. Biggar, and P. R. Spyak, "A 400 nm to 2500 nm absolute spectral radiance comparison using filter radiometers," *Metrologia*, vol. 35, no. 4, pp. 563-568, 1998.
- [12] N. White, N. P. Fox, V. E. Ralph, and N. J. Harrison, "The characterization of a high-temperature black body as the basis for the NPL spectral-irradiance scale," *Metrologia*, vol. 32, no. 6, pp. 431-434, 1996.
- [13] K. D. Mielenz, R. D. Saunders, and J. B. Shumaker, "Spectroradiometric determination of the freezing temperature of gold," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 95, no. 1, pp. 49-67, 1990.
- [14] A. Thompson and H.-M. Chen, "Beamcon III, a linearity measurement instrument for optical detectors," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 99, no. 6, pp. 751-755, 1994.
- [15] L. Coslovi and F. Righini, "Fast determination of the non-linearity of photodetectors," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 18, pp. 3200-3203, 1980.
- [16] R. D. Saunders and J. B. Shumaker, "Automated radiometric linearity tester," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 20, pp. 3504-3506, 1984.
- [17] E. Pitz, "Nonlinearity measurements on photometric devices," *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 9, pp. 1360-1362, 1979.
- [18] L. P. Boivin, "Automated absolute and relative spectral linearity measurements on photovoltaic detectors," *Metrologia*, vol. 30, no. 4, pp. 355-360, 1993.
- [19] K. D. Mielenz and K. L. Eckerle, "Spectrophotometer linearity testing using the double-aperture method," *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 10, pp. 2294-2303, 1972.

## Characteristics of photodetectors for spectral radiance measurements

Jung-Chul Seo<sup>†</sup>

*Center for Information and Telecommunication Standards,  
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, KOREA*  
<sup>†</sup>*E-mail: seo@kriss.re.kr*

Seung Nam Park and Bong Hak Kim

*Division of Optical Technology Metrology Standards  
Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, KOREA*

(Received May 14, 2001 ; revised manuscript received August 7, 2001)

We have fabricated a spectroradiometric system to measure spectral radiance of optical sources and evaluated its characteristics such as spectral responsivity, nonlinearity, and so on. The measurement system with PMT, Si, InGaAs, and IR-enhanced InGaAs detectors has shown a good linearity and a wide spectral responsivity of 250~2500 nm. This spectroradiometric system will be used as the primary national standard system of spectral radiance measurements.

*Classification codes* : OE.040, SM.030.