

## 분광복사조도 측정 장치 개발

(Development of Spectral Irradiance Measurement System)

서정철\*

(Jung-Chul Seo)

### 요 약

광원의 분광복사조도를 250~1600[nm] 파장 영역에서 정확하게 측정하기 위한 분광복사조도 측정 장치를 개발하였다. 분광복사조도 측정 장치는 광원 장치, 광학계, 분광장치, 광검출장치, 신호 처리 장치 등으로 이루어져 있다. 광검출 장치는 PMT, Si, InGaAs 및 IR enhanced InGaAs 광검출기를 이용함으로써 자외선, 가시광선, 적외선을 포함하는 넓은 파장 범위에서 광원의 스펙트럼을 측정할 수 있다.

개발된 측정 장치를 이용하여 1[kW] quartz-halogen 텅스텐 전구의 분광복사조도를 측정하여 비교하였는데, 측정 결과와 NIST에서 측정된 결과와는 차이는 450~700[nm] 파장 영역에서 3% 이하이며, 700~1600[nm] 파장영역에서는 3.5% 이하이며, 250~400[nm] 파장영역에서는 5% 이하로 측정되었다.

### Abstract

Spectral irradiance measurement system was developed to measure the spectral irradiance of optical sources in the wavelength range from 250[nm] to 1600[nm]. Our system is composed of source system, fore-optics, monochromator system, optical detector system, and automatic control system. Optical detector system with PMT, Si, InGaAs, and IR enhanced InGaAs detectors is used to measure the wide spectrum of optical sources in ultraviolet, visible, and infrared wavelength regions.

Spectral irradiance of the 1[kW] quartz-halogen tungsten lamp was measured and compared in the wavelength range from 250[nm] to 1600[nm]. The differences between our results and those reported by NIST are below 3%, 3.5%, and 5% in the wavelength range of 450~700[nm], 700~1600[nm], 250~400[nm], respectively.

Key Words : Spectral irradiance, Spectroradiometry, Measurement standards

## 1. 서 론

광원의 분광복사조도(spectral irradiance)는 임의의 파장에서 단위 면적 및 단위 파장으로 입사되는 빛의 출력을 나타내는데, 분광복사도(spectroradiometry) 분야에서 가장 많이 활용되는 측정량이다

\* 주저자 : 한국표준과학연구원 책임연구원, 이학박사

Tel : 042-868-5208, Fax : 042-868-5022

E-mail : seo@kriss.re.kr

접수일자 : 2004년 8월 5일

1차심사 : 2004년 8월 9일

심사완료 : 2004년 8월 26일

[1,2]. 분광복사조도는 광원의 전분광복사속(total spectral radiant flux), 색온도(color temperature), 전광선속(total luminous flux) 등의 측정에 활용될 뿐만 아니라, 각종 분광 분석 장치를 평가할 수 있기 때문에 분광복사도 분야에서 중요하게 인식되고 있다[1~4]. 한편 광원의 분광복사조도를 측정하기 위한 방법으로는 고온 흑체(high temperature blackbody) 광원 및 표준 전구(standard lamp)와 같은 기준 광원(reference sources)을 이용하는 광원 표준(source standard)과 저온 ECR(cryogenic electrically calibrated radiometer)과 같은 기준 광검출기를 이용하는 광검출기 표준(detector standard)으로 나눌 수 있다[5~10]. 분광복사조도 측정에서의 광검출기 표준은 측정 정확도가 높은 장점을 갖고 있으나, 측정 가능한 파장 영역이 좁은 단점을 갖고 있다. 그러므로 적외선, 가시광선, 자외선을 포함하는 넓은 파장에서 광원의 분광복사조도를 측정하기 위해서는 기준 광원을 이용하는 광원 중심의 분광복사도 측정 표준이 필요하게 된다.

본 연구에서는 조명산업체에 분광복사조도 표준 광원을 보급할 뿐만 아니라 국제적 수준의 측정 표준을 확립하기 위하여 분광복사조도 측정 장치를 개발하였다. 분광복사조도 측정 장치는 광원 장치, 광학계(fore-optics), 분광 장치(monochromator system), 광검출 장치(optical detector system), 신호 처리 장치 등으로 이루어져 있다. 개발된 분광복사조도 표준 장치의 광검출부는 PMT, Si, InGaAs 및 IR enhanced InGaAs 광검출기가 복합적으로 장착되어 있으므로 자외선, 가시광선, 적외선을 포함하는 넓은 파장 범위에서 광원의 분광복사조도를 측정할 수 있다.

## 2. 분광복사조도 측정 장치

분광복사조도는 주어진 파장에서 수광면에 입사되는 빛의 단위면적 당, 단위파장 당의 출력으로 나타내며, 단위는  $[W/cm^2] \cdot [nm]$  및  $[W/cm]$  등이 사용된다. 이와 같은 분광복사조도를 정확하게 측정하기 위해서는 그림 1 및 그림 2에서와 같이 광원 장치, 광학계, 분광장치, 광검출 장치, 신호 처리 장치 등이

필요하다.

### 가) 광원 장치

광원 장치에는 분광복사조도 기준 광원, 시험 광원, 전원 공급 장치 등으로 이루어져 있는데, 분광복사조도 기준 광원 및 시험 광원(test source)은 산란된 빛(stray light)을 차폐시킬 수 있도록 그림 2에서와 같이 암막 안에 설치되어 있다. 사용된 기준 광원은 NIST(미국표준기술원) 표준 전구(NIST FEL 134)이며, 사용된 시험 광원은 1[kW] quartz-halogen 텅스텐 전구인데, 이와 같은 광원은 위치 및 방향을 조절할 수 있도록 되어 있으며, 전원 공급 장치에 의해서 7.9[A] 정도의 안정된 전류가 기준 광원 및 시험 광원에 공급되게 된다.

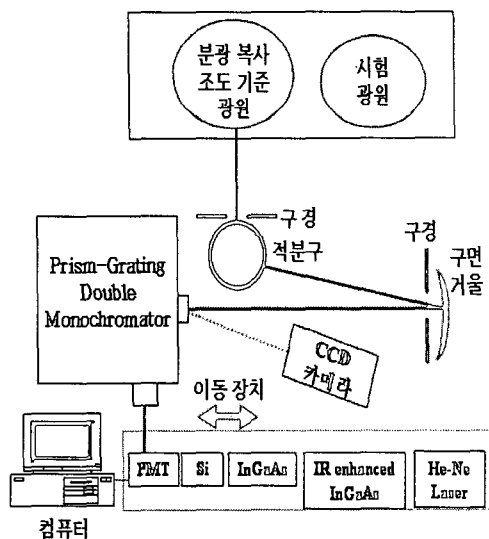


그림 1. 분광복사조도 측정 장치의 블럭도  
Fig. 1. Block diagram of spectral irradiance measurement system

이와 같은 기준 광원 및 시험 광원에 정밀 전원 공급 장치(HP6675A DC power supply)로부터 정전류가 공급되는데, 공급 전압의 범위는 0~120[V]이며, 공급 전류의 범위는 0~18[A] 이다. 한편 광원에 흐르는 전류를 정밀하게 측정하기 위하여 고정밀 shunt 저항(15[A], 100[mΩ])을 사용하였다. 각각의 shunt 저항에 흐르는 전압을 계수식 전압계(HP

## 분광복사조도 측정 장치 개발

34401[A], 6.5digit)로 측정하여 0.01[%] 이내의 정확도로 안정된 전류를 기준 광원 및 시험 광원에 공급시킬 수 있었다.

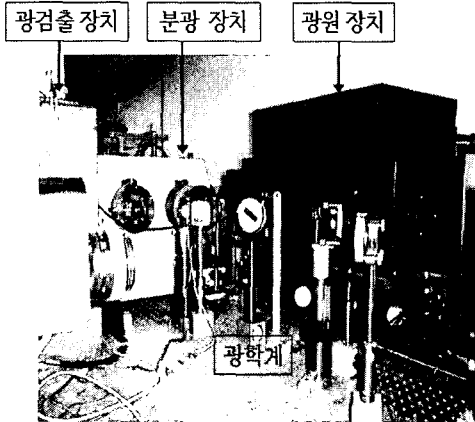


그림 2. 분광복사조도 측정 장치의 사진  
Fig. 2. Photography of spectral irradiance measurement system

### 나) 광학계

분광복사조도를 측정하기 위한 광학계는 기준 광원 및 시험 광원에서 나오는 빛을 받아서 다중 반사에 의해서 공간적으로 균일하게 할 뿐만 아니라, 무편광된 빛으로 만들기 위해서 직경 2.5[cm]인 적분구(integrating sphere)가 사용되었다. 사용된 적분구의 입사 구경(entrance aperture)은 직경 11.3[mm]으로 면적이 약 1[cm<sup>2</sup>]이며, 출구 구경(exit aperture)은 3[mm]×12[mm]의 slit 형태를 갖도록 되어 있다. 또한 입사 구경과 출구 구경이 이루는 각도는 약 100[°]이며, 적분구의 내면은 반사율이 높은 PTFE(poly-tetrafluoroethylene)로 코팅되어 있다. 한편 적분구의 출구 구경에서 나오는 빛을 단색화 장치의 입사 구경에 1 : 1로 상(image)을 맺히게 하기 위해서 250~1600[nm] 파장 영역에서 반사율이 높은 알루미늄 거울(직경 7.62[cm], 곡률 반경 40.62[cm])이 사용되었다. 이와 같은 광학계에서 적분구의 출구 구경에서 나오는 약한 신호도 측정할 수 있도록 분광복사조도 측정용 광학계가 구성되어 신호대잡음 비율이 향상되도록 하였다.

한편 단색화 장치의 입사면에 맺힌 적분구의 출구

slit의 상은 20배의 배율을 갖는 CCD 카메라로 실시간으로 적분구의 위치, 거리 및 방향을 조절하게 된다. 분광복사조도를 측정하기 위한 단색화 장치의 입사구경은 2[mm]×10[mm] 정도이므로 적분구의 출구 구경의 상이 단색화 장치의 입사 구경에 거의 포함되게 된다.

### 다) 분광 장치

분광복사조도를 측정하기 위하여 사용된 분광장치는 산란 효과(scattering effect)가 최소화되고 고차수 파장이 제거되면서 광원이 분광되도록 하기 위하여, McPHERSON 사의 prism predisperser(608M1)가 장착된 prism-grating double monochromator(207)를 사용하였다. 광원이 prism predisperser에서 분광된 다음에 grating monochromator의 중심에 입사되도록 하였다. 사용된 단색화 장치의 초점거리(focal length)는 0.67[m]이며, f/N은 F/4.7 이다. 이와 같은 단색화 장치는 600[G/mm]의 grating을 사용할 경우에 분산(dispersion)이 2.5[nm/mm]이며, 분해능(resolution)은 0.06[nm], 파장범위는 185~2600[nm]으로 250~1600[nm] 파장 영역의 분광복사도 표준을 확립하는 데에 적당하다. 이와 같은 분광 장치는 GPIB로 컴퓨터와 연결되어 있어 파장을 자동으로 제어하게 된다.

### 라) 광검출 장치

파장 영역이 250~1600[nm] 에서 분광복사조도 신호를 검출하기 위하여 PMT, Si, InGaAs 및 IR enhanced InGaAs와 같은 광검출기가 자동 이동 장치(SAR1625T-400)에 탑재되어 각각의 파장에 해당되는 영역의 빛을 측정하게 된다. 이와 같은 광검출기는 선형성(linearity), 안정성(stability), 재현성(repeatability) 등에서 우수한 특성을 갖는다. 자동 이동장치의 최대 이동속도는 500[mm/sec]이고, 반복위치결정 정도는 0.05[mm] 이내이며, 백래쉬는 0.1[mm] 이하로 4 개의 광검출기를 정밀하게 이동되게 된다.

#### (1) PMT 광검출기

사용된 광검출기 중에서 자외선 및 가시광선 영역에서 광원의 분광복사조도를 측정하기 위해서 TE

(thermoelectric) 냉각장치가 장착된 head-on 형태의 광전자증배관(photomultiplier tube, Hamamatsu R374)를 사용하였는데, 광전음극(photocathode)은 185~850[nm] 파장 영역의 분광 감응을 갖는 multialkali 재질로 되어 있다. 또한 최대 분광감응 파장은 420[nm]이며, window는 uv glass, 양극과 음극 간의 최대 인가전압은 1000[V]이다. 양극전류 최대치는 0.1[mA]이며, 음극 감응도는 150[ $\mu$ A/lm], 양극 암전류(dark current)는 3[nA], 상승시간(rise time)은 15[ns]의 특성을 갖는다. 한편 PMT head는 선형성을 향상시키기 위하여 D type의 소켓(Hamamatsu E1135-502)에 설치되며, 암전류를 제거하여 미약한 자외선 영역의 광원을 검출하기 위하여 TE 냉각 장치(Hamamatsu C659)를 사용하였다. 이와 같은 냉각 장치의 온도를 일정하게 유지하기 위하여, 저온형 순환기(VTRC-620)를 이용하여 외부에서 섭씨 18 도로 유지시킨 냉각수를 공급할 수 있도록 하였다. PMT에 인가될 고전압 전원은 Hamamatsu 모델 C3830을 사용하며, 검출된 신호는 제작된 C/V 변환기(current voltage converter)로 입력되게 된다. 한편 측정되는 광전류는 입력되는 분광복사조도에 선형적으로 반응되도록 1[ $\mu$ A] 이하가 되도록 하였다.

#### (2) Si 광검출기

파장 영역 350~1050[nm]에서 분광복사조도를 측정하기 위하여 선형성이 우수한 Si photodiode(Hamamatsu S1337-1010BQ)를 사용하였다. 이와 같은 광검출기는 검출기 안정성 및 선형성이 매우 양호하기 때문에 가시광을 포함한 적외선 및 자외선 일부 영역에서 분광분포를 측정하게 되며, PMT와 InGaAs 광검출기로 측정된 분광복사조도는 항상 Si 광검출기로 측정된 결과로 검증하도록 하였다.

#### (3) InGaAs 광검출기

파장 영역 1050~1600[nm]에서의 분광복사조도는 DC 모드로 사용할 수 있으며 암전류가 낮을 뿐만 아니라, 광감응도, 선형성이 우수한 2단 TE 냉각 장치가 부착된 형태의 (two-stage TE cooled type) InGaAs photodiode(Hamamatsu G5832-23)를 이용하여 측정하게 된다. 사용된 광검출기의 직경은 3[mm]이며, 신호대잡음 비율을 높이기 위해 냉각 장

치(Hamamatsu C1103-04)를 사용하여 243[K]까지 냉각시킬 수 있도록 되어 있다. 1050~1600[nm] 파장 영역에서 사용되는 표준형 InGaAs photodiode는 검지도(detectivity)가  $3 \times 10^{13}$ , 감응도는 0.95 [A/W], 암전류는 0.5[nA]이다. 이와 같은 광검출기로 검출된 신호는 preamplifier(Hamamatsu C4159-03)를 통하여 증폭된 다음에 계기에 입력되게 된다.

#### (4) IR enhanced InGaAs 광검출기

파장 영역 1600[nm] 이상에서는 IR enhanced InGaAs photodiode(Hamamatsu G5853-23)를 사용하게 된다. 이와 같은 광검출기는 표준형과 마찬가지로 DC 모드로 사용할 수 있으며 암전류가 상대적으로 낮을 뿐만 아니라, 광감응도, 선형성이 우수한 2단 TE 냉각 장치가 부착된 형태로 되어 있다. 사용된 광검출기의 직경은 3[mm]이며, 신호대잡음 비율을 높이기 위해 냉각장치(Hamamatsu C1103-04)를 사용하여 섭씨 -30도까지 냉각시킬 수 있도록 되어 있다. 적외선 영역이 확대된 InGaAs 광검출기는 표준형인 InGaAs 광검출기보다도 암전류가 100배정도 높을 뿐만 아니라, 냉각온도에 매우 민감하므로 냉각온도가 243[K]에서 안정화시킨 후 사용해야 된다. 이와 같은 광검출기로 검출된 신호는 preamplifier(Hamamatsu C4159-03)를 통하여 전압신호로 변화되어 계기에 입력된다.

#### 마) 신호 처리 장치

구성된 분광복사조도 측정 장치는 파장, 광검출기, 광원 등이 자동으로 선택 및 제어되도록 하였는데, 광검출기가 설치된 자동이동장치를 제어하기 위하여 stepping 모터(PK569-A)와 controller(PS-101C)를 사용하였다. 이와 같은 자동이동장치는 측정하려고 하는 파장에 해당되는 광검출기를 선택하여, 정밀하게 이동시키는 역할을 하게 된다. 한편 사용된 광학 테이블은 크기가 1.5[m]×3[m] 로, 여러 표준 광원을 비교 측정하기 위하여 자동으로 이동될 수 있도록 하였다. 광학 테이블 이동 장치를 제어하기 위하여 servo 모터(CSM-08BH1AN3), servo 드라이버(CSD-08BH1P) 및 controller(PS-101C)를 사용하였다. 한편 표준 광원, 광학계, 분광장치 및 광검출기가 모두 수평이 유지되도록 하기 위하여, 광축 정렬용 He-Ne 레이저가 설치되어 있다.

### 3. 측정 실험 및 토의

개발된 분광복사조도 측정 장치를 이용하여 광원의 분광복사조도를 측정하였다. 기준 광원은 NIST에서 교정된 FEL 134 분광복사조도 표준 전구를 사용하였는데, 개발된 측정 장치를 교정한 결과는 표 1과 같다. 개발된 분광복사조도 측정 장치의 교정 인자(calibration factor)는 다음과 같은 식을 이용하여 결정하게 되며, 단위는 W/(m<sup>2</sup>)/V를 사용한다.

$$C_f(\lambda) = \frac{L_{ref}(\lambda)}{S(\lambda)} \quad (1)$$

여기에서  $L_{ref}(\lambda)$ 는 NIST 표준 전구(FEL 134)의 분광복사조도이며,  $S(\lambda)$ 는 4 개의 광검출기를 이용하여 측정된 각각의 파장에서의 측정 신호이다. 측정 파장 영역은 사용된 표준 전구의 교정 영역인 250~1600[nm]에서 수행하였다. 또한 분광복사조도 측정 장치의 교정 인자를 구하기 위한 측정에서 광원과 적분구까지의 거리는 50[cm]로 설정되었으며, 기준 광원에 공급된 정전류는 7.9[A]이다.

분광복사조도 장치의 교정에서 자외선 영역인 250~350[nm] 파장에서는 PMT 광검출기를 사용하였으며, 400~900[nm]에서는 Si 광검출기를 사용하였다. 또한 1050~1600[nm] 파장 영역에서는 InGaAs 광검출기를 사용하였는데, 암전류 효과를 최소화하기 위해서 TE 냉각 장치의 온도를 243[K]로 설정하여 사용하였다.

한편 Table 1에서와 같은 분광복사조도 측정 장치의 교정 인자로부터 시험 광원의 분광복사조도는 다음과 같은 식에 의하여 결정된다.

$$L_{test}(\lambda) = C_f(\lambda) S_{test}(\lambda) \quad (2)$$

여기에서  $L_{test}(\lambda)$ 는 개발된 측정 장치를 이용하여 측정된 시험 광원의 분광복사조도 측정값이며,  $S_{test}(\lambda)$ 는 교정된 측정 장치로 측정된 시험 광원의 측정 신호이다. 분광복사조도 장치의 교정 인자와 시험 광원의 측정 신호를 이용하여 측정된 1[kW] quartz-halogen 텅스텐 시험 전구의 분광복사조도는 그림 3과 같다. 개발된 분광복사조도 장치를 이용하여 측정한 결과와 NIST에서 인증한 값과의 차이는 450~700[nm] 파장 영역에서 3[%] 이하로 양호하였다. 또한 700~1600[nm] 파장 영역에서는

3.5[%] 이하로 측정되었으며, 250~400[nm] 파장영역에서는 5[%] 이하로 측정되었다.

표 1. 분광복사조도 측정 장치의 교정 인자  
Table 1. The calibration factor of spectral irradiance measurement system

파장 ([nm])	분광복사 조도(W/cm <sup>2</sup> )	신호(V) x 10 <sup>-2</sup>	교정인자 ((W/cm <sup>2</sup> )/V)	광검출기
250	0.1457	0.000965	15104.71	PMT
260	0.2587	0.00349	7414.09	PMT
270	0.4404	0.01133	3886.89	PMT
280	0.7015	0.03049	2300.83	PMT
290	1.065	0.07577	1405.57	PMT
350	6.897	0.75141	917.87	PMT
400	19.01	0.47322	4017.16	Si
450	38.99	1.92337	2027.17	Si
500	65.17	4.60906	1413.95	Si
555	97.63	8.50321	1148.15	Si
600	124.6	11.32805	1099.92	Si
654.6	153.9	12.84799	1197.85	Si
700	174.4	13.24050	1317.17	Si
800	204.4	10.28355	1987.64	Si
900	214.3	16.17719	1324.70	Si
1050	205.7	2.02549	10155.57	InGaAs
1150	189.3	2.16488	8744.13	InGaAs
1200	181.4	2.01126	9019.22	InGaAs
1300	163.0	1.64673	9898.40	InGaAs
1540	121.9	1.00514	12127.66	InGaAs
1600	111.9	0.79540	14068.39	InGaAs

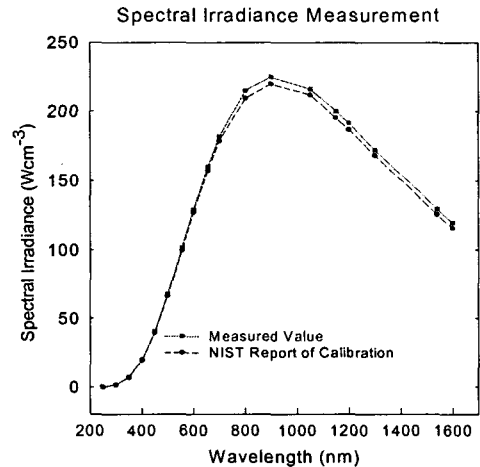


그림 3. 1[kW] quartz-halogen 텅스텐 전구의 분광복사조도

Fig. 3. Spectral irradiance of 1[kW] quartz-halogen tungsten lamp

## 4. 결 론

과장 영역 250~1600[nm]에서 광원의 분광복사조도를 정확하게 측정하기 위하여 분광복사조도 측정 장치를 개발하였다. 개발된 장치는 크게 광원 장치, 광학 장치, 분광 장치, 광검출 장치, 신호처리 장치 등으로 나뉠 수 있다. 광원 장치는 분광복사조도 기준 광원, 시험 광원, 전원 공급 장치 등으로 이루어져 있으며, 광학계는 광원 장치에서 발생하는 빛을 모을 수 있는 적분구, 상을 맺히게 하는 반사 거울, 상을 실시간으로 진단할 수 있는 CCD 카메라 등으로 이루어져 있다. 또한 분광 장치는 산란 효과가 최소화되고 고차수 파장이 제거되면서 광원이 분광되도록 하기 위하여 prism-grating double monochromator를 사용하였다. 한편 광검출 장치는 자동 이동 장치에 PMT, Si, InGaAs, IR enhanced InGaAs 광검출기를 장착하여 자외선 영역은 PMT 검출기, 가시광선 영역은 Si 검출기, 적외선 영역은 InGaAs 및 IR enhanced InGaAs 검출기를 사용하여 넓은 파장에서 분광복사조도를 측정할 수 있도록 하였다. 이와 같은 장치는 자동 제어되며, 측정되는 신호는 컴퓨터로 입력되어 자동으로 분석할 수 있다.

개발된 분광복사조도 측정 장치를 이용하여 1 [kW] quartz-halogen 텅스텐 전구의 분광복사조도를 넓은 파장 범위에서 높은 정확도로 측정할 수 있었다. 이와 같은 분광복사조도 측정 장치를 이용하여 광원 및 분광 계측 장비를 250~1600[nm] 파장 영역에서 교정하는데 활용되며, 조명산업체에 분광복사조도 표준을 보급하여 각종 광원의 측정 신뢰성 향상에 크게 기여하게 된다.

## References

- [1] H. J. Kostkowski, "Reliable spectroradiometry", Spectroradiometry Consulting, Maryland, 1997.
- [2] C. DeCustis, "Handbook of applied photometry", American Institute of Physics, New York, 1997.
- [3] J. H. Walker, R. D. Saunders, J. K. Jackson, and K. D. Mielenz, "Results of a COPR intercomparison of spectral irradiance measurements by national laboratories", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. vol. 96, pp.647~668, 1991.
- [4] A. Thompson, E. A. Early, and T. R. O'Brian, "Ultraviolet spectral irradiance scale comparison: 210(nm) to 300(nm)", J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. vol. 103,

pp.1~13, 1998.

- [5] P. Sperfeld, K.-H. Raatz, B. Nawo, W. Moller, and J. Metzdorf, "Spectral-irradiance scale based on radiometric black-body temperature measurements", Metrologia, vol. 32, pp.435~439, 1996.
- [6] P. Karha, P. Toivanen, F. Manoocheri, and E. Ikonen, "Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380-900-(nm) spectral range", Appl. Opt., vol. 36, pp.8909~8918, 1997.
- [7] 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, pp.305~312, 2000.
- [8] H. W. Yoon, C. E. Gibson, and P. Y. Barnes, "The realization of the NIST detector-based spectral irradiance scale", Metrologia, vol. 40, pp.172~176, 2003.
- [9] K. D. Stock, K.-H. Raatz, P. Sperfeld, J. Metzdorf, T. Kubarsepp, P. Karha, E. Ikonen, and L. Liedquist, "Detector-stabilized FEL lamps as transfer standards in an international comparison of spectral irradiance", Metrologia, vol. 37, pp.441~444, 2000.
- [10] N. J. Harrison, E. R. Woolliams, and N. P. Fox, "Evaluation of spectral irradiance transfer standards", Metrologia, vol. 37, pp.453~456, 2000.

## ◇ 저자소개 ◇

## 서정철 (徐汀喆)

1962년 10월 28일생. 1997년 KAIST 물리학과 박사과정 졸업(박사). 1986~2000년 현재 한국표준과학연구원 책임연구원.