복사측정 표준: 자외선부터 적외선까지

DOI: 10.3938/PhiT.19.032

박 승 남

Optical Radiation Measurement Standards

Seung-Nam PARK

We give a review of measurement standards for optical radiation. A description of the absolute cryogenic radiometer based on blackbody radiation is followed by a comparison of source-based and detector-based standards. The review moves on to the relationship between standards for radiation and temperature, and concludes with a discussion on future developments and challenges for optical radiometry.

서 론

복사측정학(radiometry)은 파장이 자외선부터 적외선까지 걸쳐 있는 전자기파의 특성을 파장별 세기, 편광 상태, 공간 및 각도별 세기 분포를 측정하거나 이를 측정하는 검출기의 감응도를 평가하는 측정과학을 통칭한다. 복사측정은 조명산업이나 안전규제와 같은 전통적인 산업 분야는 물론 고온측정학, 국방, 원격탐사에서 널리 이용되고 있는 분야이다. 최근에는 친환경 산업을 이끄는 핵심 분야로서 LED의 효율 향상에 따라 반도체조명, 차세대 태양전지 개발을 넘어 기후변화 연구까지 그 응용 범위가 넓어지고 있다. 복사측정이 포함하는 대부분의 측정은 파장 200 nm부터 30 μ m 정도까지를 말하지만 최근 과학과 산업의 발전과 병행하여 파장이 짧은 쪽으로는 진공자외선(VUV), 긴 파장 쪽으로 THz까지 활용 범위가 넓어지고 있는 추세이다.

국제단위계(SI)에서 복사측정의 기본단위는 광도 기본단위인 칸델라(cd)이다. 칸델라는 역사적인 이유 때문에 국제단위계 중에서는 유일하게 우리 눈의 작용함수를 가중치로 고려

저자약력

박승남 박사는 한국과학기술원 박사(1995)로서, 한국표준과학연구원 연구원, 호주국립측정연구소의 객원연구원을 거쳐 현재 표준과학연구원 온도광도센터의 책임연구원과 한국과학기술연합대학원대학 측정과학전공 책임교수로 재직 중이다. (snpark@kriss.re.kr)

Fig. 1. Links between the SI base units and the fundamental physical and atomic constants.

하여 적분한 물리생리학적 단위이며 가시광 영역의 복사측정에 기반을 두고 있다. 그림 1은 국제단위계 기본단위와 기본상수 사이의 관계를 나타낸 것이다.^[1] 칸델라는 전류와 마찬가지로 시간, 길이, 질량으로부터 얻어지지만, 현실적으로는 전력표준을 통하여 전기표준과 직접적으로 연결되어 있으며, 흑체복사와 관련되어 있기 때문에 온도표준과도 간접적으로 연결된다.

본 글에서는 복사측정의 측정표준을 어떻게 실현하는지 살펴보고자 한다. 먼저 이론적으로 예측할 수 있는 흑체 및 싱크로트론 등 표준광원과 이에 기반한 표준에 대하여 설명한다. 이어서 복사출력을 전기출력에 소급하여 측정할 수 있는 극저온 절대검출기와 검출기 기반 표준에 대하여 설명한 후 광원기반과 검출기 기반 표준의 비교를 통하여 온도표준과 광도표준이 어떻게 연결되는지 설명한다. 마지막으로 광자단위 복사측정 등 복사측정 분야의 새로운 발전방향에 대하여 논의할 것이다.

표준광원 (흑체와 싱크로트론)

흑체는 복사도 표준에서 가장 중요한 역할을 담당하는 도구

REFERENCES

- [1] http://www.bipm.org/en/si/si_constants.html.

Fig. 2. Measurement results of metal-carbon eutectic points realized in KRISS.

중 하나이다. 흑체는 복사체로 작동할 때는 같은 온도의 어떤 물체보다 가장 많은 복사를 방출하며 그 세기를 플랑크 (Planck) 복사법칙으로 정확하게 예측할 수 있다. 플랑크 복사법칙은 주어진 온도에서 분광복사휘도를 기본상수의 조합으로만 계산할 수 있으며 양자역학이 성립하는 영역에서 가장 근본적인 물리법칙으로 받아들여지고 있다. 하지만 흑체복사의 최대방출 파장은 빈(Wien)의 변위법칙에 따라 온도가 낮아지면 장파장 쪽을 이동하여 자외선 영역에서는 높은 복사세기를 얻기 어려운 단점이 있다. 또한, 온도제어를 통하여 재현 가능한 고온 흑체를 구현하기가 쉽지 않기 때문에 고온의 고정점(fixed point)을 찾는 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 금속-흑연 공융점(eutectic point)이 그 후보로 지목되어 가장 많이 연구되고 있다.^[2] 그림 2는 한국표준과학연구원서 측정된 두 종류의 금속-흑연 공융점의 용융 및 응고곡선이다.^[3]

자외선에서 세기가 약한 흑체의 결점을 보완할 수 있는 광원이 싱크로트론이다. 싱크로트론 복사는 고속으로 운동하는 전자가 힘을 받아서 진행방향이 바뀔 때 전자궤도의 접선방향으로 빛이 방출된다. 그 세기는 전자의 속도, 즉 전자의 에너지와 전자궤도의 곡률 반지름 및 방출 방향의 각도로부터 슈빙거(Schwinger) 방정식에 따라 이론적으로 예측할 수 있다.^[4] 표준광원으로 이용되는 싱크로트론은 그림 3과 같이 전자가 방출한 복사에너지가 측정위치에 직접 도달할 수 있는 빔라인으로 중간에 슬릿과 차폐가 설치되며 창이 설치되는 경우도 있다. 그림 4는 미국 표준기관인 NIST(National Institute of Science and Technology)이 보유한 싱크로트론 광원 SURF III와 포항가속기연구소가 보유한 PLS(Pohang Light Source)의 분광복사조도를 알려진 구조 파라미터로부터 계산한 결과이다.^[5]

절대복사계

흑체는 완전 복사체이면서 동시에 완전 흡수체이기도 하다.

Fig. 3. Geometry for calculation of spectral irradiance from a synchrotron radiation.

Fig. 4. Calculation results of spectral irradiance for the synchrotron radiator SURF-III of NIST and for the synchrotron radiator PLS in Pohang.

따라서 흑체를 수광부로 사용하여 열량계를 구성하면 복사출력을 전기출력(전력)으로 치환하여 측정할 수 있다. 그러나 일반적으로 수광부로 사용하는 흑체는 열전도율이 높은 무산소구리를 사용하며, 광선의 수광면적을 고려하여 설계하기 때문에 열용량을 작게 만드는 것에 한계가 있어 응답시간이 매우 느린 것이 단점이다. 복사계의 응답속도를 빠르게 하기 위한 방법은 온도를 낮추어 비열을 줄이는 것으로, 액체 헬륨의 온도에서 동작하는 흑체기반 전력치환 검출기를 흔히 극저온 절대복사계(absolute cryogenic radiometer, ACR)라 부른다.

ACR의 분해능은 흑체 수광부에 부착된 온도센서에 의하여

REFERENCES

- [2] E. R. Woolliams, G. Machin, D. H. Lowe, R. Winkler, *Metrologia* **43**, R11 (2006).
- [3] Y. Yamada, Y. Duan, M. Ballico, S. N. Park, F. Sakuma and A. Ono, *Metrologia* **38**, 203 (2001).
- [4] J. Schwinger, *Phys. Rev.* **75**, 1912 (1949).
- [5] Dong-Joo Shin, Ho Seong Lee and In Woon Lee, "Spectral Irradiance Calculation and Uncertainty Analysis of Synchrotron Radiation," 2005 KAPRA & KPS/DPP Joint Workshop.

Fig. 5. Schematic diagram of an absolute cryogenic radiometer used in KRISS.

결정된다. 현재 로듐-철 온도센서를 사용한 ACR이 표준과학 연구원을 비롯한 선진 국가측정대표기관에서 사용되고 있으며, 그것의 복사출력 측정 불확도는 0.01 % 수준이다. 그림 5는 한국표준과학연구원이 보유한 ACR의 개략도이다. 이 장비는 레이저의 복사출력을 측정하도록 설계되었으며 레이저 빔이 Brewster 창을 통하여 입사되므로 특정한 편광에 대해서만 사용할 수 있다. 현재 ACR을 직접 제작하는 연구자들은 흑체 수광부의 온도분해능을 높여서 측정의 불확도를 줄이고 감도도 높여 더욱 낮은 복사출력도 높은 정확도로 측정하려는 노력을 하고 있다.

광원기반 및 검출기기반 복사측정 표준

표준광원이나 ACR을 사용하여 구현한 일차표준을 전달하기 위해서는 광원과 검출기가 모두 필요하다. 그림 6은 광도, 복사도, 복사온도 단위의 상호연결을 보여주는 것으로 복사측정 표준과 관련된 모든 유도 단위들의 소급성을 설명한 것이다. 그림의 왼쪽 부분은 흑체복사로부터 출발하는 광원기반, 오른쪽 부분은 ACR로부터 출발하는 검출기기반 복사측정 표준의 실현 과정을 설명한다.

현재 정확도가 더 높은 것으로 알려진 검출기 기반 실현을 알아본다. 먼저 ACR로부터 검출기의 분광감응도 표준을 확립하는 것을 설명한다. ACR로부터 분광감응도 표준을 전달하기 위해서는 포획검출기와 열검출기를 사용한다. 포획검출기는 내부양자효율이 높은 실리콘 광다이오드를 광학적으로 여러 개 배치하여 표면에서 반사된 광선이 다른 광다이오드 중 하나에 포획되어 전체적인 양자효율을 거의 100 % 가깝도록 만든 검출기이다. 따라서 포획검출기를 하나의 파장에서 ACR에 비교하여 교정하면 다른 파장의 분광감응도를 예측할 수 있다. 다만 포획검출기가 100 % 양자효율을 가지는 파장 영역은 300 nm부터 900 nm까지로 제한적이므로 이외의 자외선 및 적외선 영역에 분광감응도 표준을 전달하기 위해서

Fig. 6. Traceability and links of photometry, radiometry, and radiation thermometry.

는 수광면이 골드블랙(gold black)으로 코팅되어 흡수율이 파장에 따라 거의 무관한 열검출기를 사용한다. 실리콘 포획검출기와 열검출기로 실현한 분광감응도 표준은 레이저 및 광섬유 출력의 상위 표준으로 사용된다. 포획검출기를 통하여 전달되는 분광감응도 표준은 표준광도계의 교정을 가능하게 하여 광조도(lx), 광도(cd), 전광선속(lm), 광휘도(cd/m²) 등 광도분야 단위를 실현하는데 기초가 된다.

다음은 그림 6의 왼쪽에 표시한 광원기반 실현을 알아본다. 광원기반 표준의 실현은 흑체 혹은 싱크로트론 등 표준광원이 될 수 있으며 한국표준과학연구원은 고정점 흑체로부터 출발하고 있다. 고정점 흑체의 경우 도가니와 흑체 공동으로 구성된 고정점 셀이 전기로 내부에서 가열하여 녹기 시작하면 광출력이 일정한 용융곡선을 얻을 수 있고, 다시 온도를 낮추면 응고평단부가 얻어진다. 이 평단부에서 고정점 온도에 해당하는 분광복사휘도 표준이 실현되는 것이다. 한편 온도가변 흑체의 온도는 분광복사휘도 비교기를 사용하여 고정점흑체의 응고 평단부에서 분광복사휘도를 비교함으로써 얻어진다. 이렇게 얻어진 온도가변 흑체의 온도는 복사온도와 분광복사휘도의 표준이 된다. 이때 분광복사휘도 비교기의 상대 분광감응도는 검출기 기반에서 얻어진 분광감응도 표준을 이용하여 측정한다. 분광복사휘도 표준이 확립된 흑체 앞에 정밀 개구를 놓으면 정해진 거리에서 분광복사조도 표준이 얻어지게 된다. 분광복사조도 표준은 운영이 어려운 고온흑체가 필요하기 때문에 선진화된 국가측정표준대표기관에서만 확립되어 있는 실정이다. 그림 7은 한국표준과학연구원(KRISS)을 포함한 미국 NIST, 러시아 VNIIOFI, 일본 NMIJ의 불확도를 보여준 것이다.

어떤 일정한 분광복사조도를 유지하고 있는 흑체 앞에 검출기 기반 복사도 표준으로 교정한 광조도계를 놓으면 이 흑체의 광도를 측정할 수 있으며, 이 광도에 해당하는 흑체의 온도를 결정할 수 있다. 이렇게 결정한 온도를 사용하면 ACR로부터 출발한 검출기 기반의 복사측정 표준이 완성되는 것이고, 분광감응도 비교기로 결정한 온도를 사용하면 온도표준으로부터 시작된 광원 기반 복사측정 표준이 완성되는 것이다.

Fig. 7. Uncertainty of spectral irradiance scale for selected national metrology institutes with a primary realization.

온도표준과 연결

앞 절에서 설명한 광원기반 표준과 검출기기반 표준에서 볼 수 있는 것처럼 광도표준과 온도표준은 직접적으로 연결되어 있다. ‘국제온도눈금-90’의 정의에 의하면 은(Ag)의 응고점 이상에서 온도표준은 플랑크 복사법칙으로 표현되는 분광복사휘도의 비로 정의된다.^[6] 이때 분광복사휘도의 표준이 되는 온도 고정점을 은, 금, 구리로 한정하고 이 고정점들의 온도를 일정한 값으로 고정하였다. 따라서 온도표준은 고정점 흑체와 임의 온도 흑체의 휘도비를 측정함으로써 실현되며 이렇게 실현한 온도와 검출기 기반 복사측정 표준으로 결정한 온도를 비교함으로써 복사측정 표준과 온도 표준을 연결할 수 있다. 이런 연관성 때문에 과거 한때 온도 표준의 수준 향상이 광도표준의 정확도 향상에 기여하였지만, 이제는 ACR 등 검출기 기반 복사측정 표준의 정확도가 높아져 광도표준을 통하여 온도표준의 발전에 기여할 수 있게 되었다. 현재 최고선진 국가표준기관에서는 복사측정 표준을 이용하여 온도표준의 정확도의 높이는 연구를 진행 중이며, 이러한 연구는 장기적으로 이 두 기본단위에 관련된 물리상수의 정확한 결정에도 기여할 수 있을 것이다.

복사측정 표준의 과제

복사측정 표준이 아직 도전해야 할 과제는 무엇보다 측정 영역의 확장이다. 먼저 파장영역의 확장으로 파장이 수십 nm의 매우 짧은 자외선 영역까지 표준을 확립하는 것이다. 자외선 영역 확장은 싱크로트론 등 강한 자외선 표준광원을 보유한 독일, 미국, 일본 등이 현재 주도하고 있다. 다른 한편 파장이 수십 μm 이상의 원적외선 영역의 측정표준도 요구되고 있다. (THz 영역으로 분류하기도 한다.) 이러한 원적외선 영역에서는 물질의 흡수율 또는 복사율 등 물성을 파장에 따라

측정하는 것이 중요하며 정밀한 저온 흑체와 FTIR 등 측정기술이 필요하다. THz 등 적외선 영역의 복사측정은 우주관측 등을 위한 인공위성 탑재체 응용분야에서 특히 중요한 기술로 주목받고 있다.

측정 가능한 출력의 측정표준 확장이 필요하다. 수 W급의 높은 복사출력은 레이저의 발명과 보급으로 많은 발전을 이루었으나 낮은 복사출력을 정확하게 측정하는 것은 아직 매우 도전적인 과제이다. 가시광 영역의 경우 감도가 높은 광전증배관(PMT) 혹은 광다이오드 검출기가 있어 수 pW까지 출력측정이 가능하나 적외선 영역으로 갈수록 감도가 높은 검출기를 찾기 어렵다. 또한 ACR이 높은 정확도로 측정할 수 있는 영역도 현재는 μW 수준으로 제한되어 있으며 이를 수십 pW까지 향상시키려는 연구가 추진되고 있다. 하지만 복사출력이 수십 fW 영역까지 내려가면 하나의 광자까지 측정할 수 있는 광자계수기를 사용할 수 있다. 이러한 광자계수 수준의 복사측정은 고감도 분광장치 및 카메라, 광학분석장치, 양자광학 및 양자정보 실험장치 등 많은 응용분야에 이미 널리 사용되고 있으나 확립된 복사측정 표준은 매우 제한적이며 정확도도 높지 않다. 특히 광자계수에 기반한 복사측정 표준을 확립하는 것은 그림 1과 같이 현재 온도와 전기출력에 연결되어 정의 및 실현되고 있는 광도 기본단위 칸델라를 독립적으로 기본상수에만 연결하여 정의 혹은 실현할 수 있는 가능성을 마련하고 있어 아주 흥미로운 주제이다. 현재 유럽의 국가표준기관 공동체는 복사측정 표준의 제3의 방법인 광자기반 실현을 활발하게 연구 중이다.^[7]

결론

자외선에서 적외선에 이르는 영역의 복사측정 표준은 흑체 및 싱크로트론 등 이론적으로 예측 가능한 표준광원과 높은 정확도로 전기출력과 연결하여 복사출력을 측정하는 절대복사계를 출발점으로 하여 실현한다. 따라서 복사측정 표준은 온도, 전기출력, 전자선속 등 다른 SI 기본단위 및 기본상수와 긴밀하게 연계되어 있으며 특히 흑체를 이용한 광원기반 실현과 검출기 기반 실현을 서로 비교하면 광도표준과 온도표준을 연결하여 서로 정확도를 높일 수 있는 연구를 할 수 있다. 미래의 복사측정 표준은 자외선 및 적외선 등 미실현 파장영역과 광자계수에 기반한 매우 낮은 출력에 대한 표준을 확립하는 것이 주요 과제이다.

REFERENCES

- [6] H. Preston-Thomas, *Metrologia* **27**, 3 (1990).
- [7] <http://www.quantumcandela.net>.