

극저온 절대복사계에 소급한 칸델라 국가표준 실현

박승남[†] · 김용완 · 이동훈

한국표준과학연구원 광기술표준부
Ⓣ 305-340 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2004년 7월 29일 받음, 2004년 9월 20일 수정본 받음)

국제단위계 중의 하나인 칸델라 눈금을 두 개의 광도계를 사용하여 실현하였다. 광도계의 분광감응도는 광출력을 전기출력으로 치환하여 측정하는 극저온 절대복사계에 소급하여 측정하였다. 광도계 외부에 설치된 정밀 개구는 다이아몬드 회전가공기로 가공하였으며 그 면적은 불확도 0.05%(k = 1) 이내로 측정하였다. 이 광도계를 사용하여 광도 벤치 위에서 1 kW FEL 전구로 칸델라 단위를 실현할 때 불확도를 분광감응도, 감응도의 공간 균일도, 개구 면적, FEL 전구의 색온도와 위치 재현성을 고려하여 평가한 결과 0.25%(k = 1)를 얻었다. 실현한 눈금의 유효성을 확인하기 위하여 미국 NIST의 눈금과 비교한 결과 0.1% 이내에서 일치하였다.

주제어 : Radiometry, Photometry, Candela.

I. 서 론

칸델라(candela)는 국제단위계(SI; Le Système International d'Unités)의 7개 기본 단위 중의 하나로 모든 광학 측정의 기본이 되는 양이다. 1979년에 열린 제 16차 국제도량형총회(CGPM)에서 “칸델라(candela)는 주파수가 540×10^{12} Hz인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 단위입체각(sr) 당 1/683 와트일 때 이 방향에 대한 광도이다”라는 정의를 받아들였다. 이 정의는 파장이 555 nm인 단색광의 복사도에 기초한 것이기 때문에, 연속광원의 광도를 정의하기 위해서는 국제조명위원회(CIE)에서 정의한 표준관찰자의 분광시감효능 함수(photopic spectral efficacy function) $V(\lambda)$ 가 반드시 필요하다.^[1] 이 함수는 칸델라를 정의하는 보조 수단으로 1982년 국제도량형위원회(CIPM)에서 공인되어 사용되고 있다.

칸델라를 비롯한 광도 표준을 현시하기 위해서는 원하는 방향으로 필요한 세기의 광도를 방출하는 광원을 갖추거나 (광원기반 표준), 광도 눈금이 매겨진 광도계를 갖추면 된다(검출기기반 표준). 광원기반 표준은 흑체의 분광복사휘도(spectral radiance, 단위 $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$)가 플랑크 복사법칙으로 기술될 수 있다는 사실로부터 출발하여 얻어진다. 흑체 입구와 이 입구로부터 일정한 거리에 정밀 개구를 설치하여 입체각을 한정하면 두 번째 개구를 통과한 분광복사조도(spectral irradiance, 단위 $W/(m^2 \cdot nm)$)을 얻을 수 있다. $V(\lambda)$ 함수를 가중치로 고려하여 이 양을 파장에 대하여 적분하면 원하는 지점에서 조명도(illuminance, 단위 lx)가 얻어진다.

흑체로부터 출발하는 광원기반 표준은 분광분포가 알려진 연속광원을 제공하는 장점이 있지만, 흑체의 열역학적 온도

를 정확하게 측정할 수 있을 때 실현할 수 있기 때문에 온도 표준의 도움을 받을 수 밖에 없는 한계가 있다. 따라서, 극저온 절대복사계가 개발된 이후, 많은 국가표준 대표기관에서 극저온 절대복사계로부터 출발하는 검출기기반의 광도표준을 확립하기 위하여 노력하고 있다.^[2,3]

이 논문에서는 검출기기반의 광도표준을 실현하기 위한 이론과 한국표준 과학연구원(KRIS)에서 사용하고 있는 실험장치와 방법을 기술하고, 실현한 칸델라 눈금의 불확도를 평가하였다. 또한 실현한 칸델라 눈금의 유효성을 확인하기 위하여 미국 국가표준 대표기관인 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 눈금과 비교 측정하였다.

II. 칸델라 단위의 실현 원리와 이론^[4]

분광복사조도(spectral irradiance)가 $E(\lambda)$ 인 광원의 조명도(illuminance) E_v 는 다음의 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E_v = K_m \int E(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (\text{in lx}); \quad K_m = 683 \text{ lm/W} \quad (1)$$

한편 분광감응도가 $S(\lambda)$ 이고 개구의 면적인 A 인 광도계로 이 광원의 복사조도를 측정하면 생성되는 전류는 식 (2)와 같다.

$$U = A \cdot \int_{\lambda} E(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda = A \cdot S_{555} \int_{\lambda} E(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda \quad (\text{in A}) \quad (2)$$

따라서 광원의 조명도에 대한 이 광도계의 감응도 R_v 는 다음과 같이 주어진다.

[†]E-mail: snpark@kriss.re.kr

$$R_{vi} = \frac{A \cdot S_{555} \int_{\lambda} E(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{\lambda} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda} = \frac{A \cdot S_{555} \int_{\lambda} e(\lambda) s(\lambda) d\lambda}{K_m \int_{\lambda} e(\lambda) V(\lambda) d\lambda} = \frac{A \cdot S_{555}}{K_m \cdot f(e)} \quad (\text{in A/lx}) \quad (3)$$

여기에서 S_{555} 는 파장 555 nm에서 광도계의 절대 분광감응도, $s(\lambda)$ 는 555 nm에서 규격화한 상대 분광감응도, $e(\lambda)$ 는 측정하는 광원의 상대분광분포, $V(\lambda)$ 는 상대 시감효능이고, $f(e)$ 는 광도계의 색보정인자(color correction factor)로 다음과 같이 정의하였다.

$$f(e) = \frac{\int_{\lambda} e(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} e(\lambda) s(\lambda) d\lambda} \quad (4)$$

점광원, 혹은 넓은 광원이지만 그 크기에 비해서 먼 거리에서 측정하기 때문에 점광원으로 근사할 수 있는 광원의 조명도를 이 광도계로 측정하여 U 의 전류 얻었다면 광도계가 바라본 방향에서 이 광원의 광도는 아래의 (5) 식으로 구할 수 있다.

$$I_v = \frac{d^2 \cdot U}{R_{vi}} = \frac{d^2 \cdot U \cdot K_m \cdot f(e)}{S_{555} \cdot A} \quad (\text{in cd}) \quad (5)$$

여기서 d 는 광원과 광도계 개구 사이의 거리이다. 표준 분광분포 $e_s(\lambda)$ 를 갖는 광원에 대하여 계산한 조명도 감응도를 가지고 다른 분광분포 $e(\lambda)$ 를 갖는 시험광원을 측정할 때는 측정한 조명도나 광도 값에 다음과 같은 색보정인자를 곱해야 한다.

$$F(e, e_s) = \frac{f(e)}{f(e_s)} \quad (6)$$

일반적으로 광도표준을 실현하기 위하여 표준광 A로 알려진, 색온도 T_c 가 2856 K인 흑체복사를 표준광원으로 사용한다. 따라서 규격화 색보정인자는 다음과 같이 정의한다.

$$F^* = F(e, e_\lambda) \quad (7)$$

광도표준을 실현할 때 광원의 색온도 불확도는 규격화 색보정인자를 통하여 광도에 전파된다. 일반적으로 규격화 색보정인자의 색온도 의존성을 계산한 후 다음과 같은 다항식의 계수를 결정해 놓고 사용한다.

$$F^*(T_c) = \sum_{j=0} a_j \cdot T_c^j \quad (8)$$

III. 측정 장치

3.1. 광도계

칸데라 눈금을 실현하기 위하여 LMT사에서 공급한 두 개의 광도계를 사용하였으며, 각각을 KRP01과 KRP02로 명명하였다. 광도계 내부의 시감효능 필터는 외부 제어기를 통하여 온도가 안정화되며, 광도계 입구에는 외부 개구를 부착하였다. 이 외부 개구는 다이아몬드 회전가공기로 끝이 칼날 같이 가공된 것으로 KRISS의 개구측정장치로 그 면적을 측정하였다. 이 개구와 광도계를 플라스틱 원통관 속에 넣고 고정하였다. 광도계의 광전류는 외부 제어기의 포트를 통하여 측정할 수 있다.

3.2. 분광감응도 비교기

분광감응도 비교기는 극저온 절대복사계로 교정된 포획검출기(trap detector)를 기준으로 분광감응도 교정용 표준기를 교정하여 이를 기준으로 광도계의 분광감응도를 측정하는데 사용된다. 이 장치는 그림 1과 같이 일축 이송대에 설치된 5개의 홀더를 사용하여 5개 검출기를 동시에 비교할 수 있다. 이 중 한 개의 검출기 홀더는 3축 이송대 설치되어 있어 검출표면에 대한 감응도의 공간적 분포를 자동으로 측정할 수 있다. 각 검출기로부터 나오는 광전류는 저전류 스위치를 통하여 전류계(electrometer)로 측정한다. 검출기들은 이중회절발 분광기($f = 300 \text{ mm}$)의 출구에 설치된 원형 개구에서 나오는 광속을 거울로 집속($f/6$)하여 얻어지는 직경 1.5 mm의 스폿으로 조명된다. 광도계의 분광감응도를 측정할 때에는 분광기의 입구를 100 W 텅스텐 할로젠 전구로 조명하고, 분광기의 분해능은 4 nm가 되도록 슬릿을 조절한다. 이 때 검출기에 떨어지는 스폿의 광 출력은 파장 555 nm에서 약 3 μW 이다.

3.3. 개구측정장치

개구측정장치는 핀란드 HUT가 제안한 가우스 광선 중첩법^[6]과 광학적 가장자리 검출법^[7] 두 가지 방법으로 광도계 외부 개구의 면적을 측정하는데 사용하였다. 두 검출방법은 레이저 경로에 현미경 렌즈를 추가 혹은 제거함으로써 동일한 장치에서 동시에 구현될 수 있다. 이 두 측정 방법에서

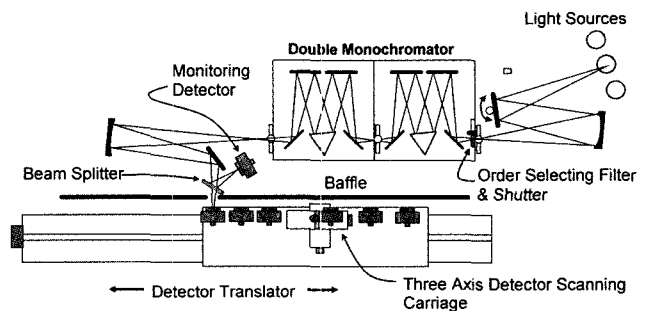


그림 1. 분광감응도 비교기.

개구의 위치는 디지털 피드백(feedback) 알고리즘을 적용하여 제어되는데, 이 제어의 오차 신호는 분해능이 10 nm인 x-y 2개의 선형 엔코더로부터 얻어진다. 이 장치를 사용하여 광도계 외부 개구 면적 측정할 때 불확도는 0.01 % ($k = 1$) 이하이다.

3.4. 광도측정 벤치

조명도 감응도가 측정된 광도계를 사용하여 칸델라 눈금을 실현하거나, 광도계를 비교하기 위해서 길이가 4 m인 광도 측정 벤치를 사용하였다. 광원으로는 1 kW FEL 전구를 사용하였으며 광원의 색온도는 분광복사도계를 사용하여 2856 K으로 조절하였다. 광원 색온도의 측정 불확도는 2586 K에서 15 K ($k = 1$)이다. FEL 전구 위치조절 재현성은 0.1 mm 이고, 광도계의 위치 재현성은 0.01 mm이다. 광도측정 벤치에서 광도계의 전류는 pA 수준의 감도를 가지는 전류계를 사용하여 측정하였다.

IV. 측정 절차 및 방법

검출기로부터 광도표준을 실현하기 위해서는 먼저 광도계의 분광감응도를 측정하여야 한다. 가장 정확한 분광감응도 측정은 극저온 절대복사계(Absolute Cryogenic Radiometer, ACR)로부터 출발한다.^[5] 그림 2는 칸델라 눈금을 실현하는 절차를 그린 것이다.

ACR은 전력치환 복사계의 일종으로 입사된 레이저의 광출력에 상당하는 전기출력을 측정함으로써 광출력을 정확도 0.01% 수준으로 측정한다. 안정화된 레이저 출력을 ACR과 실리콘 포획 검출기(QED-200, Grasby Optronics)로 교대로

측정 비교하면 레이저 파장에서 포획검출기의 절대 분광감응도와 외부 양자효율을 정확히 구할 수 있다. 포획 검출기는 내부 양자효율이 매우 높은 3개의 실리콘 광다이오드로 구성되어 있는데, 검출기의 표면에서 반사되는 광속을 다음 검출기들이 잡아낼 수 있도록 기하학적으로 배치되어 있어서 350 nm부터 700 nm 파장영역에서 외부 양자 효율이 거의 100%이다. 몇몇 레이저 파장에서 이 양자효율을 ACR로 측정하고, 적당한 방법으로 내삽하면 포획검출기가 작동하는 모든 파장영역에서 분광감응도 절대값을 구할 수 있다. 포획 검출기 사용영역 외의 파장에서는 분광감응도가 파장에 관계없이 일정한 초전복사계(pyroelectric radiometer)의 분광감응도를 포획검출기의 절대 분광감응도와 350 nm와 700 nm에서 연결하여 사용한다. 이렇게 얻어진 분광감응도 눈금은 분광감응도 비교기를 사용하여 교정용 표준기(실리콘 광다이오드)에 전달해 두고 유지한다.

분광감응도 다음 단계는 광도계의 광선속 감응도와 조명도 감응도를 측정하여 조명도 눈금을 실현하는 것이다(그림 2 참조). 광선속 감응도 측정을 위해 먼저 광도계의 상대 분광감응도를 외부 개구를 제거한 상태에서 측정하였다. 측정은 분광감응도 비교기를 사용하여 350 nm부터 1100 nm까지 파장 범위에서 2.5 nm 간격으로 이루어졌다. 그림3은 광도계 KRP01의 상대 분광감응도를 측정된 결과를 시감효능함수와 표준광 A의 상대분광분포와 함께 그린 것이다. 광도계의 상대 분광감응도와 시감효능함수는 파장 555 nm 근처에서 잘 일치하나 양 방향으로 갈수록 차이가 나는 것을 확인 할 수 있으며 이러한 불일치 정도는 광선속 감응도의 불확도가 된다. 시감효능함수 $V(\lambda)$ 가 780 nm까지 정의되어있지만 1100 nm까지 측정하는 것은 표준광 A의 기여분이 자외선 보다 적외선 쪽에서 더 크고, 실리콘 검출기가 응답하는 파장영역에서 시감효능필터의 적외선 누출이 발생할 수 있어 중요한 불확도 요인으로 고려해야 하기 때문이다.

또 다른 광선속 감응도의 중요한 불확도는 광도계 표면의 분광감응도 균일도이다. 그림 4는 광도계 KRP01의 분광감

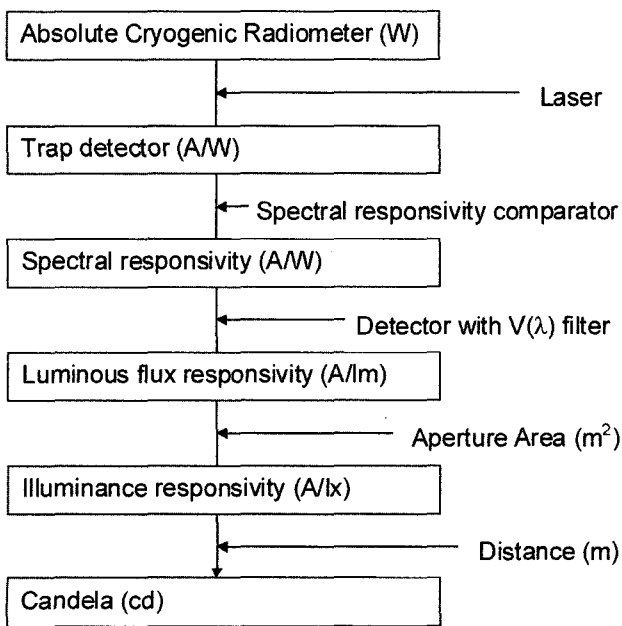


그림 2. 칸델라 눈금의 소급성.

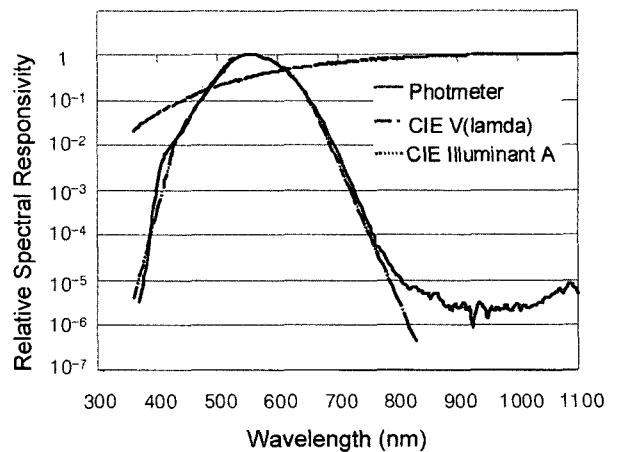


그림 3. 광도계의 상대 분광감응도 측정 결과.

응도 균일도를 분광감응도 비교기를 사용하여 측정된 결과이다. 등고선의 간격은 0.1%이기 때문에 지름이 7 mm인 외부 개구를 부착했을 때 측정되는 영역까지의 균일도는 0.1% 이내이다.

광도계의 절대 분광감응도는 파장 555 nm에서 실리콘 포획 검출기를 기준으로 직접 비교 측정하였다. 이로부터 상대 분광감응도 측정결과와 함께 시감효율 파장영역에서의 광선속 감응도를 구하고, 따로 측정된 외부 개구의 면적을 고려하여 주면 식 (3)에 따라 광도계의 조명도 감응도를 결정할 수 있다. 표 1은 두 광도계의 측정 결과를 요약한 것으로 색보정 계수는 모두 0.5% 이내로 매우 좋은 것을 확인할 수 있으며, 조명도 감응도는 각각 11.149 nA/lx, 10.384 nA/lx를 얻었다.

마지막으로 광도눈금은 광도측정 벤치에서 색온도가 측정된 광원을 두고 일정한 거리에서 위와 같이 조명도 감응도가 결정된 광도계의 광전류를 측정함으로써 식 (5)에 따라 결정된다.

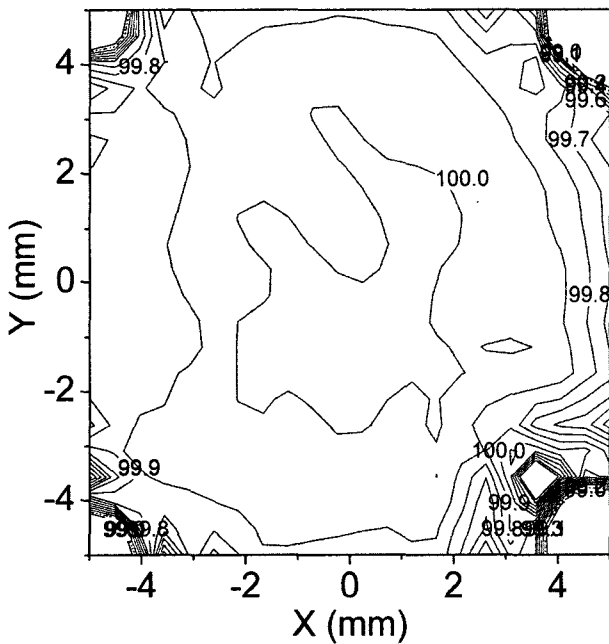


그림 4. 광도계 감응도의 공간 균일도

표 1. 광도계의 조명도 감응도 측정 결과

| Standard photometer | KRP01 | KRP02 |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Absolute responsivity at 555 nm (A/W) | 0.1971 | 0.18437 |
| Aperture Area (m ²) | 3.8492×10^{-5} | 3.844×10^{-5} |
| Color correction factor | 0.9963 | 0.99934 |
| Illuminance responsivity (nA/lx) | 11.149 | 10.384 |

V. 광도 눈금의 불확도와 유효성 평가

표 2는 광도계를 사용한 칸델라 실현의 불확도 성분과 표준불확도를 정리한 것이다. 파장 555 nm에서 광도계의 절대 분광감응도 불확도는 분광감응도의 기준으로 사용하는 포획 검출기의 불확도와 광도계와 포획검출기의 f수 차이에 의해 결정된다. 두 검출기의 f수가 다르면 검출면에 도달하기 전에 광선이 일부가 잘리는 것에 의해 손실이 달라지게 되기 때문이다. 비선형성에 의한 불확도는 사용한 광도계에 대하여 일반적으로 알려진 값을 사용하였으며, 공간적 불균일도에 의한 불확도는 앞 절에서 측정된 결과와 같이 직경 7 mm 이내에서 최대 불균일도 0.1%의 반으로 취하였다. 색보정 계수에서 발생하는 불확도 중 가장 중요한 파장눈금 불확도 0.11%는 0.1 nm의 파장 오프셋 불확도와 0.03 nm의 파장 마구잡이 설정 불확도에서 상관계수를 0.4, 측정간격을 5 nm로 가정하여 계산한 것이다. 광도계의 시감효능 필터에서 적외선이 누출하여 발생하는 불확도는 파장 830 nm부터 실리콘 검출기의 cut-off 파장인 1100 nm까지 분광감응도 측정 결과로부터 계산하였다. 이 불확도는 표준광 A의 분광분포와 광도계의 분광감응도를 곱한 값을 전체 측정 영역에서 적분한 값에 대한 830 nm 이상 영역에서 적분한 값의 비율로 산출하였다. 외부 개구의 면적 측정 불확도는 충분히 크게 책정하였다. 광원의 측정과 관련된 불확도 중에서 FEL 전구의 색온도 불확도는 색보정 계수와 색온도의 관계(그림

표 2. 실현한 칸델라 눈금의 불확도

| Uncertainty Component | $10^4 \times$ standard uncertainty |
|---|------------------------------------|
| Photometer (LMT) | |
| Absolute responsivity at 555 nm | 19 |
| Non-linearity | 3 |
| Spatial non-uniformity | 5 |
| Photocurrent measurement | 2 |
| Color-correction factor | |
| Wavelength scale of responsivity comparator | 11 |
| Measurement repeatability | 5 |
| Out-of-band leakage | 3 |
| Aperture area | 5 |
| Inter-reflections in the photometer | 1 |
| Measurement related | |
| Color temperature of FEL lamp | 2 |
| Operating current of the lamp | 1 |
| Distance measurement | 2 |
| Stray light | 2 |
| Repeatability of angular alignment and distance setting | 7 |
| Combined standard uncertainty | 25 |

5)를 사용하여 계산하였다. 모든 불확도 요인을 고려하여 계산한 칸델라 눈금의 합성 표준불확도는 포함인자 $k = 1$ 조건에서 0.25%이다.

앞에서 실현한 칸델라 눈금의 유효성을 평가하기 위해서 두 개의 광도계에 독립적으로 칸델라 눈금을 실현한 후 서로 비교하였으며, 미국 국가측정표준 대표기관인 NIST의 칸델라 눈금을 담고 있는 광도계 두 개와도 비교하여 결과는 표 3에 정리하였다. 표에서 KRP1과 KRP2는 KRISS에서 자체 교정한 두 개의 광도계를 표시한 것으로 조명도 수준 190 lx에서 비교한 결과 0.1% 이내에서 일치하였다. 이 두 광도계로 측정된 평균 조명도 189.44 lx를 NIST1과 NIST2로 명명된 NIST 광도계로 측정하여 조명도 감응도를 계산한 후 NIST의 교정 성적서에 명시된 조명도 감응도와 비교한 결과 역시 0.1%이내에서 일치하는 것을 확인하였다.

VI. 결 론

광학 분야의 국제단위계 중의 하나인 칸델라의 대한민국

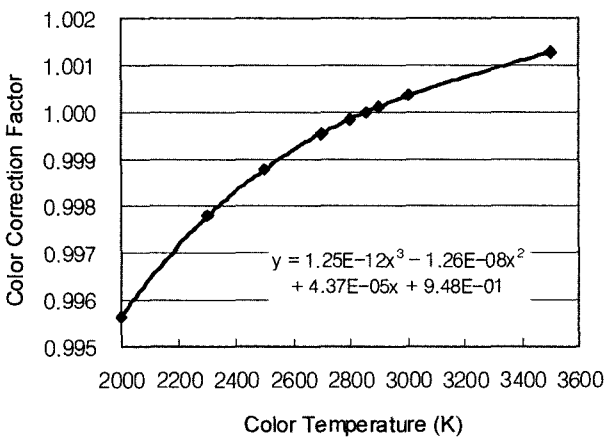


그림 5. 광원의 색온도 변화에 의한 칸델라 눈금의 보정값.

표 3. KRISS 광도 눈금과 NIST 눈금의 비교

| Photometer | Current (µA) | Illuminance (lx) | Calibration of illuminance responsivity | | |
|------------|--------------|------------------|---|--------------|------------|
| | | | KRISS (nA/lx) | NIST (nA/lx) | NIST/KRISS |
| KRP01 | 2.1132 | 189.54 | | | |
| KRP02 | 1.9662 | 189.34 | | | |
| NIST1 | 8.9283 | 189.44 | 47.129 | 47.17 | 1.0009 |
| NIST2 | 9.2153 | | 48.644 | 48.681 | 1.0008 |

국가표준을 전기출력 표준에 소급하여 불확도 0.25%($k = 1$) 이내에서 실현하였다. 광도계의 분광감응도 측정 소급성은 실리콘 포획검출기를 매개로 광출력을 전기출력과 치환하여 가장 정확하게 측정할 수 있는 극저온 절대복사계와 연결된다. 분광감응도로부터 광도계의 조명도 감응도를 측정하고 외부 개구의 면적과 점광원으로 근사할 수 있는 광원까지의 거리 측정결과를 사용하여 광원의 광도를 측정하였다. 불확도 평가에는 광도계의 분광감응도, 감응도의 공간 균일도, 개구 면적, 광원과의 거리, 광원의 색온도와 위치 재현성 등 광도의 실현에 기여하는 모든 성분을 포함하였다. 두 대의 광도계에 독립적으로 실현한 광도 눈금을 비교하여 0.1% 이내에서 일치하는 것으로 확인하였으며, 미국 NIST의 광도 눈금과 비교하여 역시 0.1% 이내에서 일치하는 것을 확인하였다.

이 분야에서 세계 최고수준으로 평가되는 미국 NIST와 영국 NPL(National Physical Laboratory)의 1 cd에서 10,000 cd 영역에서 교정측정 불확도가 0.5%($k = 2$)인 것을 고려하면^[8] 이 연구를 통해서 실현한 칸델라 국가표준은 세계 수준에 도달하였다는 것을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] *Principles of Light Measurement, Commission Internationale de l'Éclairage(CIE)* Pub. no. 18(E-12), 1970.
- [2] E. Ikonen, P. Kärhä, A. Lassila, F. Manoonchetri, H. Fagerlund and L. Liedquist, "Radiometric realization of the candela with a trap detector," *Metrologia*, vol. 32, pp. 689-692, 1996.
- [3] Albert Parr, "The candela and photometric and radiometric measurements," *Research Journal of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 106, pp. 151-186, 2000.
- [4] Yoshi Ohno, *Handbook of Applied Photometry*, (edited by Casimer DeCusatis, AIP, New York, 1997) pp. 55-98.
- [5] J. E. Martin, N. P. Fox, and P. J. Key, "A cryogenic radiometer for absolute radiometric measurements," *Metrologia*, vol. 21, pp. 147-155, 1985.
- [6] A. Lassila, P. Toivanen, and E. Ikonen, "An optical method for direct determination of the radiometric aperture area at high accuracy," *Measure. Sci. Technology*, vol. 8, pp. 973-977, 1997.
- [7] 강창호, 김석원, 박승남, "레이저 스폿의 칼날주사 방법에 의한 복사계 개구 면적의 정밀측정," *한국광학회지*, 제15권 제3호, pp. 258-262, 2004.
- [8] BIPM, "Calibration and Measurement Capabilities of National Metrology Institute," (<http://kcdb.bipm.org/AppendixC>).

Realization of the national standard of candela traceable to the absolute cryogenic radiometer at KRISS

Seung Nam Park[†], Yong Wan Kim, and Dong Hoon Lee

Division of Optical Metrology, KRISS, Daejeon 305-340, KOREA

[†]*E-mail: snpark@kriss.re.kr*

(Received July 29, 2004, Revised manuscript September 20, 2004)

We realized the national standard of the candela, one of the SI units, by using two photometers with the spectral responsivity measured in reference to the absolute cryogenic radiometer. The external apertures of the photometers were fabricated using a diamond turning machine, and measured in terms of area with uncertainty of 0.05 %($k = 1$). The candela is realized using a 1 kW FEL lamp and the characterized photometers on an optical bench. The uncertainty is budgeted to be 0.25 %($k = 1$) considering the uncertainty of the spectral responsivity and the response uniformity of the detectors, the area of the external apertures, the color temperature of the lamp, and the positioning reproducibility of the photometers and the lamp. We verified the realized scale by comparing with the scale of National Institute of Standards and Technology, USA. They coincided with each other within 0.1%.

OCIS Codes : 120.5240, 120.5630, 120.6650.