

光測定, 輻射測定分野의 用語解説 및 한국표준연구소의 測定能力

(Terminology in photometry and radiometry
and the measurements ability of Korea Standards Research Institute)

김 용 완
(표준연구소 광학연구실)

1. 머리말

광측정 및 복사측정분야(photometry and radiometry)는 빛의 양을 측정하는 계측 분야로, 광측정은 사람의 눈이 느끼는 빛의 양, 복사측정은 빛의 물리적 에너지량을 측정하는 계측분야로 구별된다. 일반적으로 광원에서 방출되는 빛은 그 양이 빛의 방출방향에 따라 다르고 빛을 받는 쪽도 그 위치에 따라 다르기 때문에 빛을 정의하는 단위 또한 여러 가지가 있어서 일반사용자는 물론 전문가들도 많은 혼동을 일으키고 있다.

본 해설에서는 혼동이 되는 여러가지 단위와 복사 및 광측정에 사용되는 용어들에 대해 설명하였고 (이 분야에서 설명될 측정량과 단위는 현재 국제조명위원회(CIE)에서 쓰고있는것으로 영문표기하였고 국문으로는 표준연구소에서 실제사용을 위해 권하고 있는것으로 기술하였다.) 광측정 및 복사측정분야에서의 현재 표준연구소의 측정능력을 소개하였다.

2. 광측정의 물리적관점 및 시각적관점

2.1 광측정의 목적

광측정의 목적은 정상적인 사람의 눈이 느끼는 빛의 양을 측정하는데 있다. 이를 위해서는 눈에 들어오는 복사에너지와 빛의 복사에너지에 대해 사람의 눈이 감응하는 특성 두가지 면을 고려해야 한다.

2.2 광측정의 물리적 관점

복사에너지는 물리학에서 일반적으로 쓰이는 물리적인 양과 단위를 사용하여 순수하게 물리적인 용어로 기술될 수 있으며, 이 복사에너지의 측정은 복사측정분야(radiometry)에 속하게 된다. 이 복사측정분야는 전자파 스펙트럼의 어떠한 영역에서의 복사측정도 포함될 수 있으나 본 해설에서의 관심은 주로 가시광선 영역에 있다. 부록B에서 광측정 및 복사측

정분야에서 쓰이는 중요한 양과 단위가 그 기호와 함께 표시되어 있다. 이 스펙트럼 내에 있는 단색광을 가장 명확히 표현하는 방법은 광학매체에 무관한 그 진동수 f 로 기술하는 것이다. 그러나 광측정에서는 공기중에서의 파장 λ 을 전통적으로 쓰고 있으며 여기서도 파장을 사용하려고 한다. f 와 λ 의 값은 (1)식으로 표현된다.

$$f\lambda = c/n_a \dots\dots\dots (1)$$

c 는 진공 속에서의 빛의 속도이며 그 값은 $2.99792458 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 이고 n_a 는 공기의 굴절률이다. n_a 의 값은 공기의 성분요소들의 부분압에 따라 다르며 또한 파장에 따라 다르다. 그러나 표준공기(CO_2 가 부피로 0.03% 포함되고 101325Pa의 기압과 온도 15°C 인 건조한 공기)에 대해 n_a 값은 전 가시광선 영역에서 약 1.00028이다. 3.6절에서 칸델라(candela : 광도의 단위)의 정의에서 단색광의 진동수 $540 \times 10^{12} \text{Hz}$ 는 표준공기에서 파장 555.016nm에 해당된다. 사람의 눈이 빛을 느끼기 위해서는 360~830nm의 파장영역 내에서 충분한 세기의 전자파가 눈에 들어와야 하며 그외의 파장영역의 빛이 아무리 충분한 세기로 눈에 들어와도 감지하지 못한다.

2.3 광측정의 시각적 관점

사람이 시각기관(눈, 시신경, 시각담당의 두뇌)에 의해 빛을 느낀다는 것은 매우 복잡한 현상이며 주관적 성격이라 할 수 있다. 이렇게 현상이 복잡한 이유 중의 하나는 망막(retina)에 두가지 다른 종류의 감광세포 즉 원추세포(cone)와 간상세포(rod)가 있기 때문이며, 원추세포는 광휘도가 높은 영역에서, 간상세포는 광휘도가 낮은 영역에서 빛을 감지하는 기능을 갖고 있으며, 광휘도가 중간인 영역에서는 이들 두세포 모두가 빛을 감지하는 기능을 발휘한다. 그런데 두 세포는 빛을 감지하는 특성이 다르므로 광휘도의 영역에 따라 3가지광측정 범위를 정의하고 있으며 사람마다 약간씩 눈의 특성이 다르므로 표준관측자를 정의하여 사용하고 있다.

a) 밝은빛 시각(photopic vision)

2 foot lambert(fL) 이상의 광휘도 수준에서 원추세포에 의해서 주로 빛을 느끼게 될때 밝은 빛 시각이라고 정의한다.

b) 어두운빛 시각(scotopic vision)

0.01fL 이하의 광휘도 수준에서 간상세포에 의해 주로 빛을 감지하게 될 때 어두운빛 시각이라고 정의한다.

c) 희미한빛 시각(mesopic vision)

0.01-2fL 사이의 광휘도 수준에서는 간상세포와 원추세포에 의해 빛을 감지할 때 희미한빛 시각이라고 정의한다.

1940년경까지는 광측정에서 눈으로 직접 비교하는 측정방법을 주로 써왔다. 전형적으로 관측자는 동시에 혹은 연속적으로 보여진 두 개의 시계(visual field)의 밝기를 같도록 맞추어 측정하였다. 모든 측정에서 시각기관을 직접 사용하는 것은 광측정의 근본 목적과 잘 맞는 장점이 있지만 눈을 사용하는 광측정은 불편하고 정밀도와 재현성이 낮으며 또 정상인 관측자들 사이에서까지 생기는 측정의 차이 때문에 요즘은 거의 사용되지 않고 있다. 그러나 눈을 사용하는 광측정은 vision research에 항상 중요한 위치를 차지하고 있으며 이 기술은 망각되어서는 안될 것이다.

2.4 분광시각효율(spectral luminous efficiency)

분광시각효율은 파장 λm 인 단색광과 파장 λin 단색광이같은 밝기로 느껴질 때의 복사속(radiant flux)의 비율로 정의되며, λm 은 분광시각효율이 최대인 파장을 가리키므로 이때의 분광시각효율은 1이 된다.

국제조명위원회(CIE)에서는 밝은빛 시각(photopic vision)과 어두운빛 시각(scotopic vision)의 광휘도 수준에서 표준관측자의 분광시각효율을 각각 정의하였는데, 밝은빛 시각에서의 분광시각효율 $V(\lambda)$ 는 국제조명위원회에서 채택되어 360에서 830nm의 파장영역에서 1nm 간격으로 정의되어 있고, 어두운 빛 시각에서의 분광시각효율 $V'(\lambda)$ 는 380에서 780nm의 파장영역에서 1nm 간격으로 정의되어 있다. 그리고 그림1은 밝은빛 시각과 어두운빛 시각에서의 분광시각효율 $V(\lambda)$ 와 $V'(\lambda)$ 를 나타낸 것이다. 그리고 희미한빛 시각에서의 시각효율은 아직 정의되어 있지 않다. 이들 시각효율은 1nm 간격으로 정의되어 있으므로 그 사이 파장에서의 시각효율이 필요할 때는 선형내삽(linear interpolation) 방법에 의해

구한다.

3. 광 및 복사측정에 관련된 양 및 단위

3.1 측정량의 명칭을 붙이는 원칙

임의의 광원에서 빛이 나올때 측정량이 물리적 에너지에 관련된 양이면 단위명 앞에 “복사”라는 용어를 사용하여 정의하고, 사람의 눈이 감지하는 빛의 양은 “광”이라는 용어를, 파장에 따른 측정량은 “분광”이란 용어를 사용함을 원칙으로 한다.

3.2 복사속과 분광복사속(radiant flux and spectral radiant flux)

복사속 혹은 복사출력(기호: ϕ_e , 단위: W)은 복사의 형태로 방출, 전달, 입사된 빛의 단위시간당의 에너지를 나타낸다. 분광복사속(기호: $\phi_{e,\lambda}$: 단위: $W \cdot m^{-1}$)은 임의의 파장에서 복사속의 양이 얼마인가를 나타낸다. 따라서 복사속 ϕ_e 와 분광복사속 $\phi_{e,\lambda}d\lambda$ 는 적분에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_e = \int_0^\infty \phi_{e,\lambda}(\lambda)d\lambda \dots\dots\dots (2)$$

3.3 광선속(luminous flux)과 전광선속(total luminous flux)

광선속(기호: ϕ_v (밝은빛 시감), ϕ'_v (어두운빛 시감): 단위: 루멘, lm)은 분광복사속과 국제조명위원회(CIE)에서 채택한 표준관측자의 분광시감효율

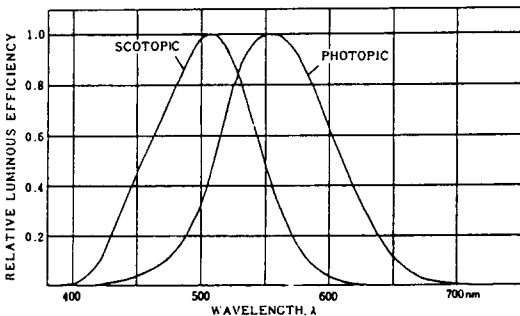


그림1. 표준관측자의 분광시감효율
a) photopic b) scotopic

합수 $V(\lambda)$ 에 의해 아래와 같이 표현된다.

$$\phi_v = K_m \int_{360nm}^{830nm} \phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda)d\lambda \dots\dots\dots (3)$$

여기서 K_m 은 밝은빛 시감에서의 최대 분광시감 효능(maximum spectral luminous efficacy)으로 부록A에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$K_m = 683.002lm \cdot W^{-1} \approx 683lm \cdot W^{-1} (3a)$$

(3)식을 다른 말로 표현하면 분광복사속에 그 파장에서의 표준관측자의 눈이 느끼는 가중치를 곱한 것을 전 가시광선영역에 걸쳐 적분하고 K_m 즉 복사 측정단위에서 광측정단위로 바꾸어주는 최대분광시감효능을 곱해주면 표준관측자의 눈이 느끼는 빛(광)의 총량 즉 광선속(ϕ_v)이 된다는 것이다.

어두운 빛 시감에서의 광선속 ϕ'_v 역시 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 주어진다.

$$\phi'_v = K'_m \int_{360nm}^{780nm} \phi_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda)d\lambda \dots\dots\dots (4)$$

$$K'_m = 1700.06lm \cdot W^{-1} (4a)$$

광선속을 광측정의 기본단위로 삼는 것이 논리적이지만 전통적으로 사용되어오던 칸델라(candela)가 국제단위계(SI)에서는 기본단위로 정해져 있다. 따라서 광선속의 단위인 루멘도 칸델라에 의해 다음과 같이 정의된다. “루멘은 광도가 1 칸델라인 등방 점광원이 단위 입체각으로 방출하는 광선속이다 ($lm = cd \cdot sr$)”. 여기서 입체각의 개념과 단위에 대해 친숙해지는 것이 여러가지 광 및 복사측정의 단위들 사이의 관계를 이해하는데 도움을 준다.

임의의 파장이 단색광에 대한 분광시감 효능(기호: $K(\lambda)$, $K'(\lambda)$: 단위: $lm \cdot W^{-1}$)은 복사속에 대하여 그의 상응하는 광선속의 비율로 표시된다. 이 양은 밝은빛 시감과 어두운빛 시감에 대해 다음 식에서부터 계산될 수 있다.

$$K(\lambda) = K_m V(\lambda) \dots\dots\dots (5)$$

$$K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda) \dots\dots\dots (6)$$

전광선속(全光線束, total luminous flux)은 조명도(illuminance)를 가상의 전구면(全球面)으로 적분하여 얻는 측정량으로 다음식으로 표현될수 있다.

$$\phi_v = \int_{\text{전구면}} E_v dA \dots\dots\dots (7)$$

윗식에서 E_v 는 조명도, dA 는 구면상의 미소면적

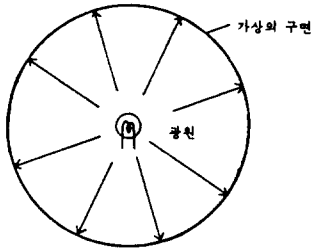


그림2. 全光線束의 정의: $\phi_v = \int E_v dA$

이다. 그림2는 전광선속을 나타내고 있다.

3.4 광측정의 세가지 협약

(3)에서 (6)까지의 식에서의 수학적 표현에서 광측정의 세가지 협약을 발견할 수 있다. 첫째로는 복사 측정량에 분광가중치를 주기 위하여 분광시감효율함수 $V(\lambda)$ 와 $V^*(\lambda)$ 를 사용하며, 둘째는 광측정량이 더할 수 있는 양이므로 적분으로 표현할 수 있으며, 셋째로는 K_m 과 $K(\lambda)$ 을 사용하여 복사측정에서 쓰는 단위와 다른 독립적인 단위를 사용한다는 것이다.

3.5 적분방법

광측정 및 복사측정에서는 식(3), (4)와 같이 적분에 의해 표현하는 경우가 많으며 실제 계산에 있어서는 식(8)처럼 덧셈에 의해 적분을 행하고 있다.

$$\phi_v = K_m \sum \phi_{e, \lambda(\lambda_p)} V(\lambda_p) \Delta\lambda_p \dots\dots\dots (8)$$

따라서 덧셈이 좁은 파장간격으로 행해지면 측정 정확도가 높아지지만 대부분의 경우 10nm의 파장간격이면 충분히 오차가 적다고 알려져 있다. 실제로 온도가 1500K에서 10000K 사이인 흑체는 10nm 파장간격으로 덧셈한 것과 1nm 파장간격으로 덧셈한 것과 비교할 때 0.001%의 작은 오차만을 나타내고 있다.

3.6 복사도 및 광도 (radiant intensity and luminous intensity)

복사도 및 광도는 그림3과 같이 광원의 특정한 방향으로 나오는 복사속 및 광선속을 나타낸다.

복사도(기호: I_e ; 단위: $W \cdot sr^{-1}$)는 단위입체각으로 복사되는 복사속이며 (9)식과 같이 표현된다.

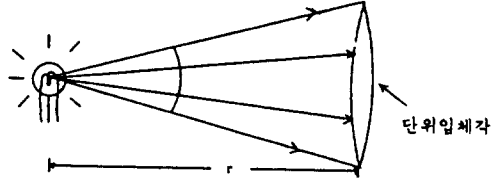


그림3. 광도 및 복사도의 정의: $I = \frac{d\phi}{d\Omega}$

$$I_e = d\phi_e / d\Omega \dots\dots\dots (9)$$

광도(기호: I_v ; 단위: 칸델라, cd)는 광선속 ϕ_v 에 의해서 (10)식으로, 분광복사도 $I_{e, \lambda}$ 에 의해서는 (11)식으로 표현된다.

$$I_v = d\phi_v / d\Omega \dots\dots\dots (10)$$

$$I_v = K_m \int I_{e, \lambda} V(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (11)$$

따라서 칸델라는 스테라디안당 루멘($cd \equiv lm \cdot sr^{-1}$)과 동일하다. 국제단위계에서는 칸델라가 광측정의 기본단위로 1979년 국제도량형 총회의 결의에 의해 아래와같이 정의되었다.

“칸델라(candela)는 주파수 $540 \times 10^{12} Hz$ 인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 때 스테라디안(sr)당 $1/683 W$ 일 때 이 방향에 대한 광도이다.”

이 정의에 의해 최대광시감효능 K_m 도 부록A에서와 같이 결정된다.

3.7 복사휘도와 광휘도 (radiance and luminance)

이들 측정량은 그림4와 같이 단위면적에서 단위입체각으로 방출하는 광선속 및 복사속을 나타내기 위하여 사용된다. 복사휘도(기호: L_e ; 단위: $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$)는 복사속 ϕ_e 에 의해,

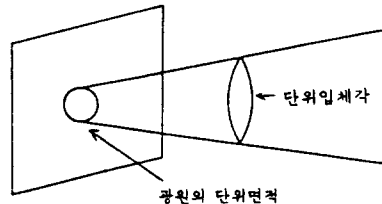


그림4. 광휘도 및 복사휘도의 정의: $L = \frac{d^2\phi}{d\Omega dA}$

■ 技術解説

$$L_e = d^2 \phi_e / d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta \dots\dots\dots (12)$$

로 주어지며 dA는 특정한 점을 포함하는 미소면적이고 dΩ는 미소입체각, θ는 면적 dA에 수직한 방향과 관측방향 간의 각도이다.

광휘도(기호: L_v : 단위: $cd \cdot m^{-2}$)는 광선속 ϕ_v 와 분광복사휘도 L_e , λ에 의해 (13) (14)식으로 주어진다.

$$L_v = d^2 \phi_v / d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta \dots\dots\dots (13)$$

$$L_v = K_m \int L_e, \lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (14)$$

3.8 복사조도와 조명도(irradiance and illuminance)

이들 측정량은 그림5와 같이 측정하는 면의 단위면적에 입사하는 복사속 및 광선속을 나타낸다. 따라서 복사조도(기호: E_e : 단위: $W \cdot m^{-2}$)는 (15)식으로, 조명도(기호: E_v : 단위: lx, $lm \cdot m^{-2}$)는 (16)식으로 표현된다.

$$E_e = d\phi_e / dA \dots\dots\dots (15)$$

$$E_v = d\phi_v / dA \dots\dots\dots (16)$$

조명도 E_v 는 분광복사조도 $E_e, \lambda(\lambda)$ 에 의해(17)식으로도 표현할 수 있다.

$$E_v = K_m \int E_e, \lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (17)$$

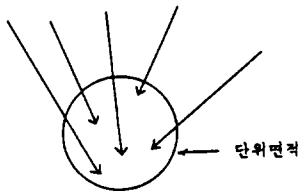


그림5. 광조도 및 복사조도의 정의: $E = \frac{d\phi}{dA}$

3.9 복사출사도와 광출사도(radiant exitance and luminous exitance)

이들은 그림6과 같이 어떤 표면의 단위면적에서 방출하는 복사속 및 광선속을 나타낸다.

복사출사도(기호: M_e : 단위: $W \cdot m^{-2}$) M_e 는,

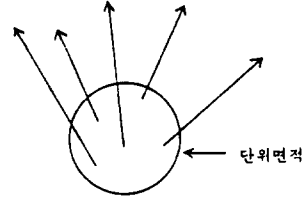


그림6. 광출사도 및 복사출사도의 정의: $M = \frac{d\phi}{dA}$

$$M_e = d\phi_e / dA \dots\dots\dots (18)$$

로 주어지고 광출사도(기호: M_v : 단위: $lm \cdot m^{-2}$) M_v 는 광속 ϕ_v 와 분광복사출사도 M_e, λ 에 의해,

$$M_v = d\phi_v / dA \dots\dots\dots (19)$$

$$M_v = K_m \int M_e, \lambda(\lambda) V(\lambda) d\lambda \dots\dots\dots (20)$$

로 주어진다.

3.10 플랑크법칙과 분포온도(Planck's law and distribution temperature)

플랑크법칙에 의해 흑체의 분광복사휘도 $L_e, \lambda(\lambda, T)$ 는,

$$L_e, \lambda(\lambda, T) = dL_e(\lambda, T) / d\lambda = (c_1 n^{-2} \lambda^{-5} / \pi \Omega_0) [\exp(c_2 / n\lambda T) - 1]^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

으로 주어진다. 여기서 T는 절대온도, $C_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = hc/k$, h는 플랑크상수, k는 볼츠만 상수, c는 광속, n은 매질의 굴절률, Ω_0 는 입체각이다. 또한 절대온도 T는 국제실용온도를 사용하며 IPTS-68에 의해 $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} W \cdot m^2$ 를 사용하고 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} m \cdot K$ 를 사용하고 있다.

분포온도(단위: K)는 가시광선영역에서 광원의 상대적인 분광출력분포를 나타내기 위해 사용되는 양으로서, 백열전등과 같이 흑체와 분광분포가 비슷한 광원에 한하여 사용할 수 있다. 분포온도 T는 다음과 같은 수학적 표현에 의해 계산할 수 있다.

$$\Delta = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} [1 - S(\lambda) / a S_b(\lambda, T)]^2 \Delta\lambda \dots\dots\dots (22)$$

식(22)에서 Δ값이 극소가 되는 온도 T를 분포온도라 볼 수 있다. 여기서 S(λ)는 분포온도를 측정하려는 광원의 상대분광출력분포이며 a는 임의의 상

수, 그리고 $S_b(\lambda, T)$ 는 온도 T 인 흑체의 상대적인 분광출력분포로서 (21)식에 의해 유도된다. 이러한 방법에 의한 분포온도측정은 $S(\lambda)/S_b(\lambda, T)$ 가 가시광선영역에서 $\pm 5\%$ 변화 이내로 일정하게 주어질 때 사용해야 한다. 실제 계산에 있어서 파장영역 λ_1, λ_2 와 파장간격 $\Delta\lambda$ 는 어느 정도 범위 내에서는 임의로 결정할 수 있는데 리본이나 코일형의 텅스텐 필라멘트전구는 $\lambda_1 = 400\text{nm}$, $\lambda_2 = 750\text{nm}$, $\Delta\lambda = 50\text{nm}$ 로 하여 $\pm 4\text{K}$ 의 오차 내에서 분포 온도를 측정할 수 있다.

3.11 광원의 색좌표(Chromaticity Coordinates of light source)

색(color)이란 일정한 분광분포를 갖는 광원의 빛이 눈에 들어와 어떠한 감각을 일으키는 자극을 말한다.

따라서 색은 사람의 개별적 시각특성에 의하여 다른색으로 인지될 가능성이 있기때문에 1931년 국제조명위원회(CIE)에서 사람의 시각을 분석하여 파장에 따라 3가지로 시각분포를 갖는 스펙트럼 3자극치(spectral tristimulus values) x, y, z (그림7 참조)를 정의하였다. 이렇게 정의된 스펙트럼 3자극치를 가지고 어떠한 광원의 색을 수치화하여 보다 객관화 시켰으며 이 색을 표현하기 위해 1931년 CIE x, y, z 색좌표계가 많이 사용되며 다음식으로 표현된다.

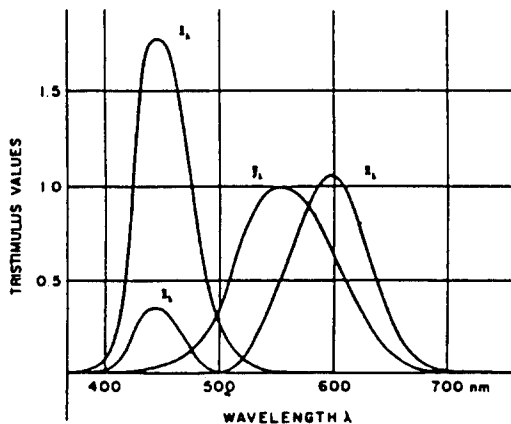


그림7. 1931년 2도 시야 CIE 스펙트럼 3자극치, x, y, z

$$\begin{aligned} X &= K_m \sum_{360\text{nm}}^{630\text{nm}} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= K_m \sum_{360\text{nm}}^{630\text{nm}} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= K_m \sum_{360\text{nm}}^{630\text{nm}} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (24)$$

위식에서 $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ 는 스펙트럼 3자극치, $S(\lambda)$ 는 광원의 상대분광복사조도, K_m 는 최대분광시각 효능으로 약 683lm/W 이며, $\Delta\lambda$ 는 보통 10nm 를 사용한다.

위의 측정치를 표시할때는 원칙적으로 x, y 로 표시한다.

3.12 색온도(color temperature)와 상관색온도(correlated color temperature)

어떤 광원이 흑체(blackbody)의 색좌표와 같을 경우 이때의 흑체의 온도를 이 광원의 색온도로 정의한다(단위: K).

흑체의 온도가 올라가면 분광복사휘도(spectral radiance) 값이 증가함과 동시에 상대분광복사휘도(relative spectral radiance) 즉 복사에너지 파장분포가 변하여서 결과적으로 광원의 색좌표(색)가 변하게 된다. 이와같은 개념을 색온도라고 하는데 그림8에서와 같이 흑체의 온도와 색좌표와는 1대 1 대응 관계를 가지고 있다. 또 어떤 색좌표계내에서 흑체온도의 변화에 따라서 그려내는 색좌표의 변화 즉 궤적을 플랑크 궤적(Plankian locus)이라고 하는데 모든 흑체는 이 궤적안의 한점을 차지하게 된다.

그러나 실제로 사용되는 광원들은 이러한 흑체로부터 다소간 벗어난 분광분포를 갖고 있기때문에 이 플랑크 궤적으로 부터 벗어난 색좌표값을 갖게 되는데 이때에는 그 색좌표로부터 플랑크 궤적상의 가장 가까운 거리에 있는(1960년 CIE UCS 색좌표 상에서) 점의 색온도값을 취한다. 이러한 경우 엄밀한 의미에서의 색온도값과 구분하기 위해 상관색온도라고 부르며 그림9에서와 같이 등온도선(isotem-

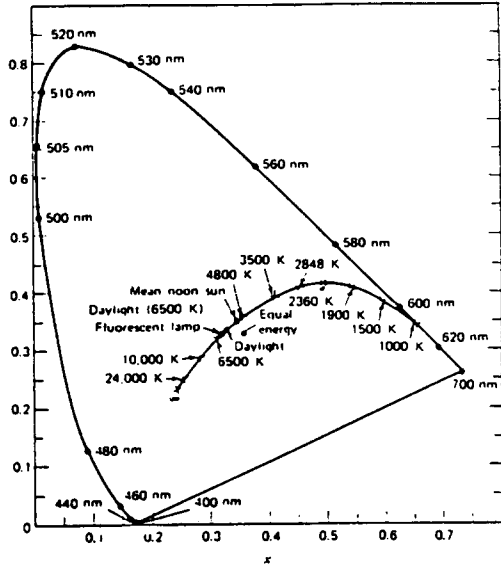


그림8. 1931년 CIE 색좌표계 : 말굽모양과 같이 생긴 스펙트럼의 궤적, 흑체의 궤적 및 몇개의 잘 알려진 광원의 색좌표를 나타내고 있다.

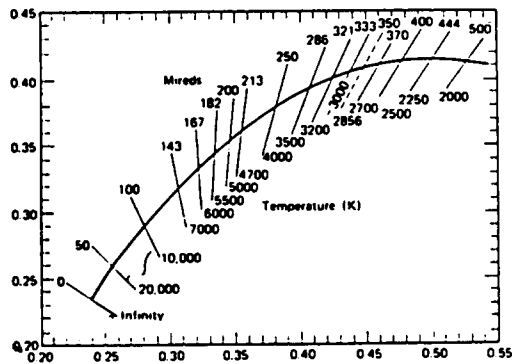


그림9. CIE 1931 색좌표계에서 흑체궤적 부근에 그려진 등온도선 : 이 등온도선을 사용하여 흑체 궤적 근방의 색좌표를 갖는 광원의 상관 색온도를 구할 수 있다.

perature line)을 그어 그 광원의 색좌표와 등온도선과 일치할때 그 등온도선의 온도를 상관색온도라고 한다.

3.13 광원의 연색지수(color rendering index)

연색현상(color rendition)이라 함은 색의 3요소 즉 색시료(물체), 광원, 눈(eye) 중 광원의 특성에

의한 것으로 똑같은 색시료가 광원의 특성에 따라 다르게 보이는 현상을 말한다.

가령 야외에서는 아름답게 보이던 양복색이 형광등 불빛 아래서 색이 죽어 보인다는가 혹은 그 반대의 현상등이 우리가 쉽게 접할수 있는 연색현상중의 하나이다.

특히 형광등의 경우는 자연광(태양광)과 비슷한 색온도를 갖고 있음에도 불구하고 그 분광분포는 자연광의 것과 아주 다른 양상을 띄고 있다. 따라서 광원의 이러한 연색성을 규정해줄 어떤 척도가 필요하게 되는데 그 기준은 자연광(daylight)과 흑체(Plankian radiator)의 분광분포를 기준으로 하여 평가한다.

연색지수를 규정하는 방법으로는 spectral band method와 test color method가 소개되어 있으나 CIE에서는 test color method의 성능을 인정하여 이 방법을 추천하였다.

spectral band method는 광원의 분광분포를 파장범위별로 일정한 가중치를 주어 온도범위에 따라 흑체 혹은 자연광과 얼마나 다른지를 나타냈다.

한편 test color method(color shift method)는 표1과 같은 여러색시편의 색(color)을 기준광원(시험

표 1. 시험편색(CIE/TC-3.2)

시험색 번호	Munsll 표시값	day light에서의 색상
1	7.5R 6 / 4	light greyish red
2	5Y 6 / 4	dark greyish yellow
3	5GY 6 / 8	strong yellow green
4	2.5G 6 / 6	moderate yellowish green
5	10BG 6 / 4	light bluish green
6	5PB 6 / 8	light blue
7	2.5P 6 / 8	light violet
8	10P 6 / 8	light redish purple
9	4.5R 4/13	strong red
10	5Y 8/10	strong yellow
11	4.5G 5 / 8	strong green
12	3PB 3/11	strong blue
13	5YR 8 / 4	살색
14	5GY 4 / 4	연녹색

광원의 색온도와 같은 온도의 흑체 혹은 자연광) 아래의 색차표값과 시험광원 아래의 색차표값을 비교하여 그 색차(color difference), ΔE_1 를 가지고 다음과 같이 계산한다.

$$R_1 = 100 - 4.6\Delta E_1 \dots\dots\dots (25)$$

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \dots\dots\dots (26)$$

위식에서 R_1 는 각색시편에 해당하는 특수연색지수, ΔE_1 는 각시편에 대하여 CIE 1964 Unifor Color Space에서의 값을 계산한(기준광원과 시험광원을 사용하여) 색차, R_a 는 일반적으로 많이 쓰이는 시편색번호 1~8번까지의 특수연색지수(R_i)값들을 평균한 값으로 일반연색지수라고 한다.

4. 광 및 복사측정 분야에서의 표준연구소의 측정능력

4.1 국가표준원기

국제단위계(SI)에서 정의한 광 및 복사 측정단위를 실현(realization)하기 위해 사용되는 국가표준원기에 대해서 간단히 살펴보면 다음과 같다.

4.1.1 자체 교정된 실리콘 광다이오드(Self Calibrated Si Photodiode) 1982년에 개발된 이 실리콘 광다이오드의 분광감응도(Spectral response)는

$$R(\lambda) = \{1 - \rho(\lambda)\} \epsilon_0(\lambda) \cdot \lambda / K \dots\dots\dots (27)$$

로 주어진다. 자체 교정방법이란 파장 λ 에서 반사도 $\rho(\lambda)$ 와 내부양자효율 $\epsilon_0(\lambda)$ 를 측정하여 분광감응도 $R(\lambda)$ 를 결정하는 방법으로 여기서 K는 1239.85nm WA^{-1} 인 상수이다. 이 실리콘 광다이오드는 약 300~1000nm 파장영역의 단색광의 강도를 절대적으로 측정하는데, 임의의 광검출기 분광감응도 측정의 원기로, 그리고 가시광선영역에서 간섭필터와 조합하여 광도의 표준원기로도 사용될 수 있다.

이 실리콘 광다이오드의 분광감응도 측정불확도(uncertainty)는 약 $\pm 0.2\%$ 이내이다.

4.1.2 전기적으로 교정된 복사조도계(Electrically Calibrated Radiometer)

1986년에 개발된 이 절대 복사조도계(ECR)는

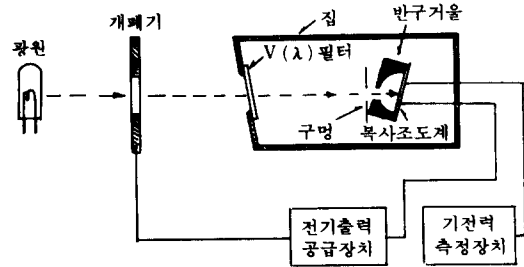


그림 10. ECR의 개략도

검출기 자체의 특성이 전기적으로 교정되는 것으로 이 ECR을 사용하여 단위시간당의 복사에너지인 복사출력을 측정하는 원리는 복사출력을 전기출력과 비교하는 것으로 입사면적을 고려하면 복사조도의 표준원기로 쓸수 있다.

그림 10은 이 ECR의 개략도이다.

이 ECR의 장점은 그 분광감응도가 일정하고 측정 파장이 자외선, 가시광 및 적외선 영역에서까지 사용될 수 있다는 것이다. 이 ECR의 복사조도 측정불확도는 약 $100\mu W/cm^2$ 수준에서 $\pm 0.3\%$ 이며, 제작된 $V(\lambda)$ 필터와 함께 사용하여 광도의 국가표준원기로도 쓰일 수 있다.

표 2. KSRI의 측정능력(1989 8월 현재)

분야 (측정량)	기호	정밀정확도 (uncertainty)	비고
광도	cd	$\pm 0.3\%$	각도에 따른 광도측정 가능
광선속	lm	$\pm 0.3\%$	표준원기(goniophotometer)개발중
전광선속	lm	$\pm 2\%$	
조명도	lx	$\pm 0.3\%$	
광휘도	cd/m ²	$\pm 0.3\%$	
복사속	W	$\pm 0.3\%$	근자외선, 가시광선, 근적외선
전복사속	W		국가표준 미확립
복사조도	W/m ²	$\pm 0.3\%$	근자외선, 가시광선, 근적외선
분광복사조도	W/m ² nm	$\pm 1\%$	250~1050nm
복사휘도	W/m ² · sr	$\pm 0.3\%$	근자외선, 가시광선, 근적외선
레이저출력	W	$\pm 1.6\%$	가시광선, 10 ⁻⁶ ~10W
광원의 색차표		$\pm 1\%$	CIE x, y, z(1931)
광원의 색온도	K	$\pm 20K$	
광원의 연색지수	R _a		CIE No 13.2(TC-3.2)의 방법 사용

* 원자외선 및 원적외선 영역에서의 복사측정분야의 국가표준은 미확립된 상태이다.

4.2 KSRI 측정능력

현재 광및 복사측정분야에 대하여 한국표준연구소 광학연구실에서의 측정능력을 다음 표 2에 요약하였다.

5. 맺음말

광 및 복사측정은 인간의 생활환경을 밝혀주는 조명산업, 광섬유를 이용한 광통신분야, 적외선을 이용한 건조장치 및 태양에너지를 이용하는 에너지 절약산업, 고출력 레이저를 이용한 재료의 절단, 염색공업, 적외선을 사용해 적을 식별할 수 있는 야시장비 등의 방위산업, 자외선을 이용하는 비파괴 시험, 정밀측정, 또한 자외선에 의한 살균 및 레이저를 이용한 수술 등의 의료분야, 도로교통신호등 및 표지판, 각종 스포츠조명 및 TV, 오락분야 등에서 중요한 요소로서 생산품의 품질향상, 인간의 건강생활 등에 많은 영향을 주고 있다.

이러한 광및 복사분야의 정밀측정을 위해 한국표준연구소 광학연구실에서는 국가표준원기로 자체교정된 실리콘 광검출기 및 ECR을 개발하여 국가표준을 확립하였고 또한 미국표준국(NIST)에서 교정받은 각종 표준전구 및 표준기준물(SRM)을 보유하고 있어 특수한 경우를 제외하고는 적절히 표준을 유지하고 있어 광및 복사측정분야에 대한 측정지원업무에 만전을 기하고 있다. 특히 1988년 10월에는 국제도량형위원회(CIPM)의 8개 자문위원회중에 하나인 광측정 및 복사측정자문위원회(CCPR)의

회원국으로 가입되는 영광을 얻었다.

본 해설에서는 광 및 복사측정분야의 용어와 단위들을 되도록 쉽게 그리고 체계적으로 설명하려고 노력하였다. 이 측정분야들과 관련된 산업체와 기관에서 종사하시는 분들이 광및 복사측정에 대해 이해하는데 도움이 되기를 바라며 측정기기의 주기적인 교정과 생산품의 정기적인 검사로 제품의 품질향상과 신뢰도가 높은 연구결과를 얻을수 있게 되기를 기대한다.

부록A. 최대분광시감효능 K_m, K'_m 의 계산

광도의 정의는 “칸델라는 주파수 540×10^{12} Hz인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 매 스테라디안(sr)당 1/683W일때 이 방향에 대한 광도이다”로 표현된다. 이때 표준공기중에서 540×10^{12} Hz인 단색광의 파장 λ_d 는 약 555.016 nm이므로 위에 주어진 칸델라의 정의에 의해 이 파장에서의 분광시감효능(spectral luminous efficacy)은 정확히 $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 이다. 그런데 555.016 nm 파장에서의 분광시감효율(spectral luminous efficiency)을 선형내삽방식에 의해 구해 보면 $V(\lambda_d)$ 는 0.999998이고, $V'(\lambda_d)$ 는 0.401750이 된다. 따라서 밝은빛 시감과 어두운빛 시감의 최대분광시감효능 K_m 과 K'_m 은,

$$K_m = K(\lambda_d)/V(\lambda_d) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} / 0.999998 = 683.002 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ 이고}$$

$$K'_m = K'(\lambda_d)/V'(\lambda_d) = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} / 0.401750 = 1700.06 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1} \text{ 이 된다.}$$

부록 B. 복사 및 광측정량과 단위표

양	기호	단위명	단위기호	정의식
복사에너지 (radiant energy)	Q_e, Q, P	줄(joule) * kilowatt-hour	J kWh	$Q_v = \int Q_e \lambda d\lambda$
광량 (quantity of light)	Q_v, Q	루멘·초 (lumen-second)	$\text{lm} \cdot \text{s}$	$Q_v = K_m \int Q_e \lambda V(\lambda) d\lambda$ ($K_m = 683.002 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$)
luminous energy				

양	기호	단위명	단위기호	정의식
복사속 (radiant flux)	ϕ_e, ϕ, P	와트(watt) * erg per second	W erg/s	$\phi_e = \int \phi_{e, \lambda} d\lambda$
광선속 (luminous flux)	ϕ_v, ϕ	루멘(lumen)	lm	$\phi_v = K_m \int \phi_{e, \lambda} V(\lambda) d\lambda$ ($K_m = 683.002 \text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$)
복사도 (radiant intensity)	I_e, I	와트 매 스테라디안 (watt per steradian)	W/sr	$d\phi_e/d\Omega$
광도 (luminous intensity) * candle power	I_v, I	칸델라(candela) * lumen per steradian	cd lm/sr	$I_v = d\phi_v/d\Omega = K_m \int I_{e, \lambda} V(\lambda) d\lambda$
복사휘도 (radiance)	L_e, L	와트 매 스테라디안 · 제곱미터 (watt per steradian square meter)	$W/(sr \cdot m^2)$	$L_e = d^2\phi_e/d\Omega \cdot dA \cos\theta$
광휘도 (luminance) * photometric brightness	L_v, L	칸델라 매 제곱미터 (candela per square meter) * nit (=cd/m ²) * stib (=cd/cm ²) * foot lambert (=cd/πft ²) * lambert(cd/πcm ²) * apostilb(cd/πm ²)	cd/m ² nt sb fL L asb	$L_v = d^2\phi_v/d\Omega \cdot dA \cos\theta$ (1nt = 1cd/m ²) (1sb = 10000cd/m ²) (1fL = 3.426cd/m ²) (1L = 3183cd/m ²) (1asb = 0.3183cd/m ²)
복사조도 (irradiance)	E_e, E	와트 매 제곱 미터 (watt per square meter)	W/m^2	$d\phi_e/dA$
조명도 (illuminance)	E_v, E	럭스(lux) * foot candle (lm/ft ²) * phot(lm/cm ²)	lx fc ph	$d\phi_v/dA$ (1fc = 10.764lx) (1ph = 10000ph)
복사출사도 (radiant exitance)	M_e, M	와트 매 제곱미터 (watt per square meter)	W/m^2	$d\phi_e/dA$
광출사도 (luminous exitance)	M_v, M	루멘 매 제곱미터	lm/m^2	$d\phi_v/dA$
스테판-볼츠만상수	σ	와트 매 제곱미터 · 켈빈 4승	$W(m^2 \cdot K^4)$	$\sigma = \frac{(\pi^2/60)k^4}{15C^2}$ = (5.67051 ± 0.00019) × 10 ⁻⁸ W/m ² · K ⁴)
일차 복사상수	c_1		$W \cdot m^2$	$M_e, \lambda(\lambda) = c_1 \frac{\lambda^{-5}}{\exp(c_2/\lambda T) - 1}$

■ 技術解説

양	기호	단위명	단위기호	정의식
이차 복사상수	c_2		$m \cdot K$	
분광시감효율 (spectral luminous efficiency)	$V(\lambda)$			$V(\lambda) = K(\lambda) / K_m$
복사율 (emissivity)	ϵ			$\epsilon = M_e / M_e(\text{blackbody})$
분광복사율 (spectral emissivity)	$\epsilon(\lambda)$			$\epsilon(\lambda) = M_{e, \lambda} / M_{e, \lambda}(\text{blackbody})$
노출 (light exposure)	H	럭스시	$lx \cdot h$	$\int E_v dt$
시감효능 (luminous efficacy)	K	루멘 매 와트	lm/W	$K = \phi_v / \phi_e$
분광시감효능 (spectral luminous efficacy)	$K(\lambda)$			$K(\lambda) = \phi_v / \phi_e$ $K(\lambda) = K_m V(\lambda)$
최대(분광)시감효능 (maximum spectral luminous efficacy)	K_m	루멘 매 와트	lm/W	$K_m = K(\lambda) / V(\lambda)$ ($K(\lambda)$ 의 최대값) $\approx 683 lm/W$
시감효율 (luminous efficiency)	V			$V = K / K_m$

* 표 한것은 SI 단위계 이외의 단위임

