

광복사 측정 표준의 변천 및 현황

정 영 봉 (한국표준과학연구원 양자연구부 책임연구원)

1. 서론

조명분야에서 필요로 하는 광복사 측정은 사람의 눈이 느끼는 빛의 밝기와 가시광, 자외선, 적외선 파장영역의 복사에너지이다. 이 중에서도 빛의 밝기는 국제표준단위계에서 칸델라를 기본단위로 정의하여 사용하고 있다.

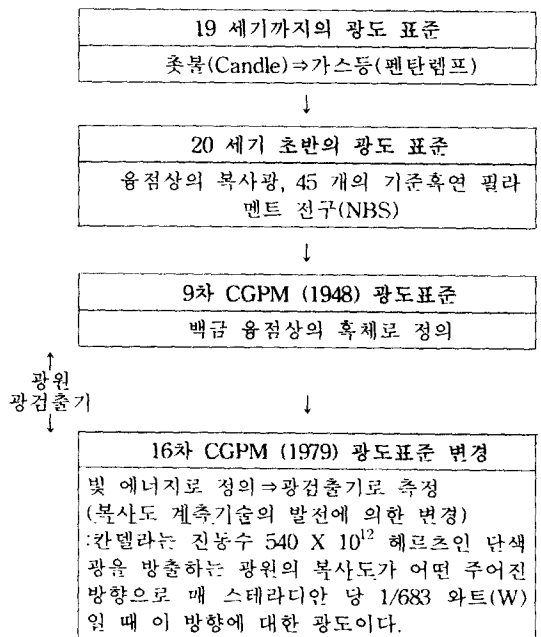
조명측정의 기본단위인 칸델라는 “진동수 540×10^{12} 헤르츠인 단색광을 방출하는 광원의 복사도가 어떤 주어진 방향으로 매 스테라디안 당 1/683 와트(W)일 때 이 방향에 대한 광도”로 정의되어 있다. 이러한 광도의 정의는 1979년 국제도량형총회(CGPM)에서 결의된 것으로 이 정의에 의해 광도를 재현하는 방법은 여러 가지가 있다. 이들 중 가장 진보된 방법은 광검출기를 이용해서 광도를 재현하는 방법이며, 흑체를 이용하는 방법도 분광복사측정에는 여러 가지 장점이 있어 계속 사용되고 있다. 여기서는 광도표준의 변천사 및 현재의 기술을 살펴보고자 한다.

2. 광도표준의 변화

표 1은 광도 표준의 변화 과정으로 광도의 정의가 비교적 자주 변화해 왔음을 보여주고 있는데 현재의 정의는 광도 재현방법을 제약하지 않고 있으므로 기

술발전에 의한 광도정의의 변화는 없을 것으로 예상된다. 이러한 광도의 정의는 1958년부터 국제도량형총회에서 결정해서 사용해 왔는데 광도표준의 기술적 문제를 해결하기 위해 국제도량형 위원회의 자문 위원회로 1933년 발족된 광복사 측정 자문위원회(CCPR)가 있다. 그 이전인 1930년에서 1933년까지

표 1. 광도 표준의 변화



지는 전기 자문위원회(CCE)에서 광측정을 관장하고 있었고 발족 당시인 1933년의 명칭은 광측정 자문위원회(CCP)였으나 1971년 광복사 측정 자문위원회(CCPR)로 변경되어서 현재에 이르고 있다.

CCPR의 가장 중요한 업무는 광도의 국제표준을 확립하는 일로서 광도표준의 변천과정이 바로 CCPR의 역사라고도 할 수 있다. 따라서 CCPR의 활동을 중심으로 광도표준 및 측정기술의 변화를 살펴보기로 한다.

3. 광복사 측정 자문위원회(CCPR)와 광도표준

3.1 광측정 자문위원회(CCP) 발족(1933년) 이전의 광도표준

역사적으로 제일 먼저 광도의 표준이 되었던 것은 촛불(candle)이었다. 광도의 단위명칭이 아직도 칸델라(candela)라는 이름을 유지하고 있는 것도 이때문인데 촛불은 밝기가 쉽게 변하기 때문에 표준으로 사용되기는 부적당했다. 따라서 보다 밝기가 안정된 광원이 개발되면 광도의 표준도 새로 정해지곤 했는데 19세기말에는 기체 불꽃과 용융점 상의 복사광 등이 이용되었으며 1909년에는 45개의 흑연 필라멘트 전구를 미국 NBS(미연방표준국)에 보관하고 이들의 평균값으로 표준을 삼기도 했다. 따라서 국제적인 광도표준은 없었으나 현재까지도 광복사 측정의 표준원기로 사용되는 흑체와 ECR(Electrically Calibrated Radiometer)은 19세기말에 이미 개발되기 시작했다. 최초의 광검출기를 이용한 복사 측정 표준원기는 19세기 옹스트롬¹⁾과 쾰 바움²⁾이 독립적으로 개발한 절대복사도계인데 옹스트롬은 절대복사도계를 지구표면에서의 태양복사를 측정하는데 사용했으며 쾰 바움은 복사도 측정에 기준한 광도표준원기를 개발하기 위해 사용했다. 비록 응용된 측정분야는 달랐지만 이들이 개발한 절대복사도계는 빛 에너지와 전기 에너지를 열에너지로 치환시켜 열검출기로 비교하는 동일한 원리를 사용했다. 이러한 복사도 원기를 ECR이라고 하는데 흑체의 복사특성을 ECR로 측정하는 것은 19세기말의 중요한 물리

실험 중 하나였다. 이 실험결과에서 유도된 플랑크 법칙은 새로운 물리학인 양자론의 탄생을 가져오게 한 가장 중요한 물리학의 이론적 발전으로 인정되고 있다.

3.2 백금용체가 광도표준으로 사용된 시기(1933~1979)

1933년 CCPR의 전신인 CCP가 발족되고 나서 백금 용고점의 흑체를 국제표준원기로 정의하는 안이 마련되었으나 제2차 세계대전으로 인해 전쟁이 끝난 1946년에 와서야 국제도량형 위원회에 의해 공포되고 1948년에 열린 제9차 국제도량형 총회에서 비준되었다. 백금 용고점의 흑체는 1979년 제16차 국제도량형 총회에서 개정될 때까지 약 30년간 국제표준원기로 사용되었으나 이상적인 흑체실현은 실험상의 문제점이 많고 새로운 복사측정방법이 개발됨에 따라 앞에서 언급한 것처럼 복사측정에 의해 광도가 새로 정의되었다. 이 기간 중에는 광복사 측정이 물리학의 주류에서는 멀어진 기간이었으나 1959년 이후 시작된 우주탐사와 TV등의 광전자 산업이 시작되어 분광복사 측정 분야가 크게 발전했으며 자외선 영역의 표준으로 싱크로트론 복사가 연구되기 시작했다. 또한 ECR의 정확도가 향상되고 레이저 및 반도체 등의 새로운 과학기술이 출현함에 따라 광복사 측정 정확도가 크게 향상될 수 있는 계기가 마련된 기간이다. 20세기에도 ECR은 계속 발전되어 광검출기를 기준으로한 복사도 측정에 활용되어왔으며 1960년대에 정확도가 0.1~0.3[%]에 접근했다.^{3)~5)} 이러한 기술의 출현으로 인해 1970년대에 개최된 7, 8, 9차 CCPR 회의에서는 복사측정에 의한 새로운 광도정의가 논의되었다. 위원회 명칭이 CCP에서 CCPR로 바뀐 1971년 7차 CCPR 회의에서 복사측정에 의한 광도 측정의 결과가 흑체를 이용한 방법보다 더 쉽고 정확할 수 있음이 발표된 후 1975년 8차 회의에서 광도의 새로운 정의가 제안되었고 1977년 9차 회의에서 각국의 측정결과와 의견을 종합하여 국제도량형 위원회(CIPM)에 제출된 개정안이 1979년 국제도량형 총회(CGPM)에서 비준되었다.

3.3 1979년 광도표준 개정이우(1979~현재)

광 복사측정 분야는 1980년대의 반도체기술과 레이저기술 혁신에 의해 놀라운 발전과 변화를 최근 10여년 사이에 이루어 냈다. 이러한 발전과 변화의 핵심내용은 “측정대상의 확대 팽창”과 “측정기술정확도의 혁신적 향상” 두 가지로 요약될 수 있다. “측정대상의 확대 팽창”은 반도체와 레이저 기술 등이 결합된 첨단제품의 시장확대에 의한 것이며 “측정기술정확도의 혁신적 향상”은 반도체 광검출기와 저온복사도계 개발 및 레이저의 응용에 의한 것이다. CCPR의 활동도 최근의 변화에 따라 종전의 표준전구 국제비교에서 보다 정확하고 발전된 방법인 광검출기의 특성비교로 전환하고 있다. 즉 광원 기준에서 광검출기를 기준으로하는 국제비교로 전환하는 과정에 있다. 이러한 전환은 광도의 표준 정확도 향상과 광섬유, 레이저 기술, 싱크로트론 복사, 우주 과학분야 등에서 필요로 하는 보다 정확한 복사도 표준을 위해 새로운 절대복사도계 개발연구에서 비롯되었다. 미국 NIST의 Geist와 Zalewski^{9)~10)}는 실리콘 광다이오드를 “자체교정방법”에 의해 정확도가 0.01[%]에 도달하는 복사도계를 개발했다. 또한 영국 NPL의 Quinn과 Martin은 흑체의 총복사에너지를 측정해서 2~3(mK)의 정확도를 가진 열역학적 온도표준을 개발하기 위해 액체 He 온도에서 작동하는 저온복사도계를 개발했다^{9)~11)}. 이 장치로 130~100[°C] 온도영역에서 수 [mK]의 오차 내로 온도측정을 했으며 복사도 측정정확도는 0.005[%]에 도달했다. 이러한 수준의 정확도는 종전의 절대 복사도계에 비해 정확도가 20배 향상된 것으로 광도 및 복사도 측정의 모든 분야가 새로운 변환기를 맞게 되었다. 1979년 이후의 CCPR활동은 각국의 광도 표준과 광검출기 국제비교에 중점을 두어왔다. 앞에서 살펴본 것처럼 1979년 이후의 광 복사측정 분야는 측정정확도의 향상과 측정분야의 확대 두 가지 면에서 큰 변화가 일어났으며 그 변화는 지금도 계속 진행되고 있다. 따라서 CCPR의 활동도 새로운 변화를 맞이하게 되었다. 개정된 광도의 정의에 의해 재현된 각국의 광도표준은 국제비교 결과 1982년, 1986년 10차 11차 CCPR에서 국제적으로 0.5

[%] 내로 일치함을 확인했다.

1980 년대에 CCPR이 주관한 국제비교는 표 2에 정리해 두었는데 광 측정분야의 국제비교 보다는 복사측정분야의 국제비교가 많아졌으며 표준전구에 의한 국제비교외에 광검출기에 의한 국제비교가 시작되었다는 점이 매우 주목할 점이라고 하겠다.

표 2. 1980년대 CCPR이 주관한 국제비교 내용

년도	국제비교 내용	참가국
10 차 CCPR(1982)	- 표준전구의 광도 및 전광선속	- CSIRO(호주), NPL(영국), NBS(미국), INM(프랑스)
제 11 차 CCPR(1982)	- 표준전구의 광도 및 전광선속 - 표준전구의 분광복사휘도 - 광검출기 분광감응도(488 [nm], 633 [nm])	- 전체 회원국(15 개국 참가) - NPL(영국),NBS(미국) - 11 개국 참가
제 12 차 CCPR(1990)	- 표준전구의 분광복사조도 - 광검출기 분광감응도(광통신용85 [nm], 1,300 [nm], 1,550 [nm])	- 14 개국 참가 - NIST(미국), NPL(영국), PTB(독일), CSIRO(호주)
제 13 차 CCPR(1994)	- 실리콘 광다이오드 분광감응도 (250-1000 [nm])	- 14 개국 참가 (한국포함)
제 14 차 CCPR(1997)	- 표준전구의 광도 및 전광선속 - Luminous Responsivity - 저온복사도계 분광감응도 비교	현재 국제비교 진행중

3.4 한국표준연구원의 CCPR활동

우리나라는 1988년 한국표준과학연구원이 회원으로 가입하게되어 1990년 제12차 CCPR 회의에 참석하고 1994년 발표된 실리콘 광검출기 분광감응도 국제비교에 참여했으며 그림 1과 같이 BIPM을 기준으로할 때 4~7위에 해당하는 우수한 실적을 거두고 있다. 표 3은 국제도량형국(BIPM)에서 국제비교용으로 한국표준연구소에 보낸 3개의 Hamamatsu S-1337 실리콘 광다이오드 분광감응도를 측정한

결과로 분광감응도가 서로 1[%]내에서 일치하고 있음을 보여준다. 이 결과는 3개의 광다이오드와 함께 BIPM 으로 다시 보내져서 다른 나라의 표준기관 측정결과와 비교되었다. 그림 1은 BIPM에서 발표한 실리콘 광검출기 분광감응도 국제비교 결과이다. 한국표준연구원의 분광감응도 표준값은 BIPM 과는 대부분의 파장영역에서 0.4¹¹⁾[%]내에서 서로 일치하고 있으며 영국의 NPL, 미국의 NIST, 캐나다 NRC 등의 표준기관과도 400~900(nm) 영역에서 0.5[%] 오차 내에서 잘 일치하고 있다. 표 4는 BIPM의 보고서 내용을 한국표준과학연구원을 기준으로 새로 정리한 결과로 특히 광도표준 확립에 사용되는 400~700(nm) 파장영역에서는 가장 정확한 표준을 유지하고 있다고 판단되는 NIST, NPL, BIPM 과 0.2[%] 내로 일치하고 있어서 매우 좋은 결과라고 생각된다. 이러한 국제비교결과로 현재 한국표준연구소가 교정하고 있는 각종 계측기의 검교정 신뢰성을 확보하게 되므로 그 파급효과가 매우 크다고 할 수 있다.

앞에서 살펴본 것처럼 광 복사측정 기술수준은 최근 들어 급격히 발전해왔다. 이러한 발전은 광 복사 측정분야에 출력안정화 레이저, 저온 ECR, 반도체 광검출기 등의 첨단장비가 응용되었기 때문에 가능해진 것이다. 이 연구들은 온도측정, 첨단 광전자산업 지원, 광도표준 정확도 향상의 목표를 가지고 수행되고 있으며 세부적인 기술로는 출력 안정도 0.002[%]인 레이저, 0.05[%] 균일성을 지닌 반도체

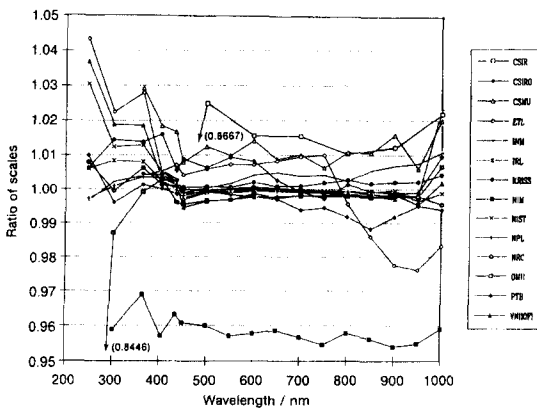


그림 1. 국제비교 참가국의 분광감응도 국가표준을 BIPM을 기준으로해서 비교한 그래프

표 3. 국제비교에 사용된 S-1337 실리콘 광검출기 분광감응도

Photo-diode Wave-length [nm]	F11	F20	F25
365.5	0.1465	0.1481	0.1485
404.7	0.1881	0.1896	0.1901
435.8	0.2135	0.2149	0.2153
450	0.2239	0.2253	0.2255
500	0.2565	0.2577	0.2579
550	0.2865	0.2876	0.2878
600	0.3157	0.3167	0.3169
650	0.3437	0.3445	0.3447
700	0.3715	0.3725	0.3726
750	0.3998	0.4005	0.4007
800	0.4276	0.4284	0.4286
850	0.4548	0.4556	0.4557
900	0.4823	0.4831	0.4832
950	0.5071	0.5079	0.5079
1,000	0.4845	0.4858	0.4856

광검출기, 광전자 소자 특성평가방법 등이 연구되고 있다.

이러한 연구는 표 5에 나타난 새로운 광도 표준체계의 확립을 위한 것으로 이러한 광도표준체계에서는 실리콘 광검출기의 분광감응도 측정정확도가 광도표준 정확도를 결정하게 된다. 따라서 1994년 발표된 CCPR 국제비교는 각국의 광도표준개발 능력을 보여준다는 점에서 중요성이 매우 크다고 할 수 있다.

현재 한국표준과학연구원에서는 제13차 CCPR 회의에서 결의된 Luminous Responsivity 및 Cryogenic radiometer 분광감응도 비교를 수행하고 있으며 이 결과는 1998년에 발표될 예정이다. 또한 표 3의 새로운 광도표준체계 확립을 위한 연구가 진행되고 있으므로 1998년에는 저온복사도계에 의한 광도의 국가표준이 확립될 것으로 기대된다.

4. 맺는 말

조명측정에서 가장 기본이 되는 광도 및 조도는 국제 단위계에서 칸델라와 럭스를 기본단위로 정의해서 사용한다. 이러한 광도 표준은 저온복사도계가

표 4. 국제비교 참가국의 분광감응도 국가표준을 한국표준연구소를 기준으로 비교한 결과

표준기관	파장 [mm]														
	365.0	404.7	435.8	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
NIST	1.0091	1.0014	1.0006	0.99694	0.99858	0.99884	0.99795	0.99898	0.99889	0.99767	0.99685	0.99757	0.99765	0.99438	0.99477
NPL	0.99946	0.99937	0.99975	0.99765	0.99899	0.99932	0.99795	0.99863	0.99837	0.99726	0.99667	0.99712	0.99588	0.996	1.0189
BIPM	0.99601	0.99615	0.99857	0.9996	0.99943	0.99965	0.9982	0.99929	0.99922	0.99824	0.9975	0.9985	0.99807	0.99798	0.99595
NRC	1.002	0.99752	0.99944	0.99955	0.99917	0.99993	0.9988	0.99965	0.99917	0.99738	0.99582	0.99632	0.99668	0.99601	0.99144
OMH	0.99635	0.99987	0.99532	0.99563	0.99606	0.99642	0.99688	0.99667	0.99738	0.9961	0.99547	0.99606	0.99604	0.99568	1.0026
VNIOFI	1.0147	0.9992	0.99986	0.99418	0.99574	0.99649	0.99579	0.99706	0.99726	0.99637	0.99585	0.99611	0.99656	0.9933	0.99776
PTB	1.0052	1.0089	1.0015	1.006	1.0038	1.0073	1.0051	1.0008	0.99755	0.99468	0.99821	0.99725	0.99639	0.99694	1.0087
CSIRO	0.99669	0.99583	0.9968	0.99801	0.99836	0.99775	0.99566	0.99619	0.99283	0.99248	0.98908	0.98659	0.98969	0.99294	0.98976
CSMU	1.0255	1.0148	1.0155	1.0077	1.0119	1.0095	1.0123	1.0081	1.0093	1.0046	1.0083	1.0091	1.0138	1.004	1.0158
ETL	1.0239	1.0013	1.0057	1.0037	1.0054	1.007	1.0054	1.0076	1.0088	1.0083	0.99299	0.98444	0.97572	0.97419	0.97912
INM	0.99984	1.0014	1.0014	0.99844	0.99983	1.0014	1.0024	1.0042	1.0031	1.0024	0.99998	1.004	1.0049	1.0055	1.0067
CSIR	0.86316				1.0242		1.0136		1.0146		1.0078		1.0102		1.0176
IRL	1.004	0.99833	0.99843	0.99642	0.99833	0.99843	0.99754	0.99855	0.99822	0.99705	0.99597	0.9965	0.99514	-	-
NIM	0.96555	0.95357	0.96185	0.9605	0.95942	0.95675	0.95604	0.95799	0.956	0.95291	0.95551	0.95486	0.95225	0.95294	0.95506

개발됨에 따라 국제적으로 0.05[%] 수준까지 측정 정확도가 향상될 것으로 기대된다. 1980년대 국제비교 결과가 0.5[%] 수준의 오차를 나타낸 것을 생각하면 큰 발전이라고 생각되며 한국표준연구원에서도 이러한 국제적 추세에 맞추어 저온복사도계를 기준으로 하는 광도표준을 개발하고 있으므로 CCPR 회원기관 중에서도 상위수준의 광도국가표준을 개발유지할 수 있을 것이다. 이러한 연구노력은 결국 우리의 조명측정 분야의 측정신뢰성을 세계적으로 확보하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Angstrom K, Nova Acta Soc. Sci. Upsal. ser. 3 16, 1, 1893.
- 2) Kurlbaum F, Ann. Phys. 287, 591, 1894.
- 3) Gillham E J, Proc. R. Soc. London Ser. A 269, 249, 1962.
- 4) Boivin L P and Smith T C, Appl. Opt. 17, 3067, 1978.
- 5) Wilson R C, Appl. Opt. 18, 179, 1979.
- 6) Geist J, Appl. Opt. 18, 760, 1979.
- 7) Zalewski E F and Geist J, Appl. Opt. 19, 1214, 1980.
- 8) Geist J, Zalewski E F and Schaefer A R, Appl. Opt. 19, 3795, 1980.
- 9) Quinn T J and Martin J E, Phil. Trans. R. Soc. London Ser A 316, 85, 1985.
- 10) Martin J E, Quinn T J and B Chu, Metrologia 25, 107, 1988.
- 11) Martin J E, Fox N P and Key P J, Metrologia 21, 147, 1985.

표 5. 현재 사용되고 있는 광도표준체계와 앞으로 개발될 광도표준체계

현재까지 사용된 광도표준체계

표준원기
1. 상온 ECR 2. 자체교정된 실리콘 광검출기

2 차 표준 (유지용 표준)
1. 실리콘 광검출기 2. 표준전구

3 차 표준 (교정용 표준)
1. 실리콘 광검출기 2. 표준전구

앞으로 개발될 광도표준체계

표준원기
저온복사도계

2 차 표준 (유지용 표준)
실리콘 광검출기

3 차 표준 (교정용 표준)
1. 실리콘 광검출기 2. 표준전구

◇ 著 者 紹 介 ◇



정 영 봉 (鄭永鵬)

1955년 8월 1일생. 1978년 고려대 물리학과 졸업(학사). 1980년 한국과학기술원 물리학과졸업(석사). 1992년 한국과학기술원 물리학과졸업(박사). 1980년~현재 한국표준과학연구원 양자연구부 광학그룹 책임연구원.