

원자외선의 분광복사도 측정

신 동 주 (한국표준과학연구원 양자연구부 선임연구원)

1. 서론

전자기파의 파장영역에서 빛은 진공중에서의 파장이 700[nm] 이상인 적외선, 700[nm]~400[nm]인 가시광선, 400[nm] 이하인 자외선으로 구분할 수 있다. 이 중에서 자외선은 경우에 따라 표 1과 같이 경우에 따라 여러가지로 구분된다.

표 1. 자외선의 분류와 명칭

	명 칭	파 장
1	자외선 (UV)	400 [nm] ~ 10 [nm] 4000 [Å] ~ 100 [Å] 0.4 [μm] ~ 0.01 [μm] 3 [eV] ~ 120 [eV]
2	근자외선 (NUV)	400 [nm] ~ 300 [nm]
	중간자외선 (MUV)	300 [nm] ~ 200 [nm]
	원자외선 (FUV)	200 [nm] ~ 100 [nm]
	극자외선 (EUV)	100 [nm] ~ 10 [nm]
3	진공자외선 (VUV)	200 [nm] ~ 10 [nm]
	심자외선 (Deep UV)	350 [nm] ~ 190 [nm]
	연엑스선	200 [Å] ~ 1 [Å]
	자외선-A	400 [nm] ~ 320(315) [nm]
	자외선-B	320(315) [nm] ~ 280 [nm]
자외선-C	280 [nm] ~ 200 [nm]	
4	진공자외선 (VUV)	200 [nm] ~ 0.2 [nm]
	슈만자외선	200 [nm] ~ 125 [nm]
	극자외선 (XUV)	100 [nm] ~ 0.2 [nm]
	연엑스선	30 [nm] ~ 0.2 [nm]

파장이 200[nm] 이하인 빛은 공기(특히 산소)중에서 흡수가 커서 측정장치에 공기가 없어야 측정이 가능하기 때문에 진공자외선이라고 하는데 슈만은 1893년에 처음으로 형석프리즘을 이용한 진공분광기를 사용하여 200[nm]~125[nm] 파장의 빛을 측정하였다. 따라서 파장이 200[nm]~125[nm]인 영역을 슈만스펙트럼이라 한다. 약 100[nm] 이하의 파장영역은 극자외선(EUV 또는 XUV)이라고 하는데 약 30[nm] 이하에서 연엑스선과 중첩된다.

복사측정분야에서는 파장이 약 50[nm]~300[nm]인 영역을 원자외선으로 나타내는데 광자의 에너지로 약 4[eV]~30[eV]로서 약 1.5[eV]~3[eV]에 해당하는 가시광선보다 상당히 큰 에너지의 빛으로서 화학적 또는 생물학적 반응을 일으키고 조절하는데 이용될 수 있다. 예를들면 원자외선은 페인트를 탈색시키지만 적당량을 조사하면 재료의 보호막형성등에 이용할 수 있고, 피부가 원자외선에 과다하게 노출되면 피부암이 유발되지만 조사량을 조절하여 조사하면 원자외선은 치료에 이용될 수 있다.

본고에서는 원자외선광원의 분광복사도 측정방법에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 원자외선광원의 분광복사도 측정장치

광원의 분광복사도 특성중에서 가장 기본적인 양으

로 분광복사회도와 분광복사조도가 있는데 분광복사회도 [$W m^{-2} nm^{-1} sr^{-1}$]는 광원의 단위면적당 (m^2), 단위입체각당 (sr), 단위파장당 (nm)의 복사출력을 나타내며 분광복사조도 [$W m^{-2} nm^{-1}$]는 단위면적 (m^2)에 조사되는 단위파장당 (nm) 입사출력을 나타낸다.

원자외선광원의 분광복사도를 측정하기 위해서는 표준광원, 분광기 및 검출기로 구성된 측정장치가 필요하며 측정하는 방법에는 2가지가 있다. 첫째는 분광복사회도 또는 조도를 알고 있는 표준광원을 이용하는 방법이며 둘째는 측정장치의 분광투과율과 검출기의 분광감응도를 각각 구한 다음 광원의 분광복사도를 측정하는 방법이다.

표준광원을 이용한 원자외선광원의 분광복사도 측정에서는 표준광원의 분광복사회도 또는 분광복사조도를 알고 있기 때문에 검출기의 출력으로부터 전체 측정장치의 효율을 구하고, 다른 광원의 분광복사도는 검출기의 출력과 측정된 효율로부터 구할 수 있다. 즉, 광원만 표준광원과 교체하여 측정함으로써 광원의 분광복사도를 측정할 수 있다.

두 번째 방법은 표준광원을 이용하여 분광기의 분광투과율을 구하고 표준검출기를 이용해서 검출기의 분광감응도를 구한 다음 광원의 분광복사도를 측정하는 방법이다. 그러나 분광기의 분광투과율과 검출기의 분광감응도를 각각 측정하여 광원의 분광복사도를 구하는 방법은 어렵고 오차도 커지기 때문에 자주 사용되지는 않는다.

일반적으로 원자외선광원의 분광복사도는 표준광원을 이용해서 측정하고, 검출기의 분광감응도는 표준검출기를 사용해서 측정한다.

1) 표준광원

표준광원은 1차 표준광원과 2차 표준광원으로 구분할 수 있다. 1차 표준광원은 절대분광복사회도를 이론적인 계산으로 구할 수 있는 광원으로서 원자외선영역에서 주로 사용되고 있는 1차 표준광원에는 흑체복사광원, 관벽안정화 수소아크광원 및 싱크로트론 방사광이 있으며 주로 2차 표준 광원의 분광복사회도 및 조도교정에 이용된다.

2차 표준광원은 1차 표준광원으로 교정되어 실험실간의 상호비교 및 다른 광원의 교정에 이용되는데 원자외선영역에서 주로 사용되고 있는 2차 표준광원으로는 텅스텐전구, 저기압 수은광원, 중수소광원, 알곤아크광원 등이 있다. 표 2는 원자외선영역에서 표준광원으로 사용되는 광원의 특성을 나타낸다.

가. 1차 표준광원

어떤 광원을 1차 표준광원으로 사용하기 위해서는 광원의 온도, 광원에 흐르는 전류, 전자밀도 또는 전자의 속도 등과 같은 측정가능한 변수로부터 그 광원의 분광복사회도를 계산할 수 있어야 한다.

현재 원자외선영역에서 1차 표준광원으로 사용할 수 있는 광원은 표 2와 같으며 선진국의 표준기관에서 주로 사용하는 1차 표준광원 으로는 플랑크의 법칙에 의해서 분광복사회도를 계산할 수 있는 흑체복사광원, 수소원자의 양자역학적 흡수계수를 사용하여 분광복사회도를 계산할 수 있는 관벽안정화 수소아크광원, 그리고 고속전자의 싱크로트론 방사이론에 의해서 분광복사회도를 계산할 수 있는 전자저장링 등이 있으며 이 표준광원들의 선택은 사용하고자 하는 파장에 의해서 결정된다.

흑체복사광원의 분광복사회도는 플랑크의 법칙에 의해서 계산되며 복사속이 최대가 되는 파장 λ_{max} 는 빈의 변위법칙인

$$\lambda_{max} \cdot T = 0.2898 (\text{cm} \cdot \text{K})$$

에 의해서 구할 수 있다. 즉, λ_{max} 는 온도가변흑체에서 $T=2600\text{K}$ 일 때 $1100[\text{nm}]$, 탄소아크광원에서 $T=3800\text{K}$ 일 때 $760[\text{nm}]$ 로서 가시광선이상의 파장이 되며 원자외선영역에서의 복사속이 매우 작다. 따라서 흑체 복사광원은 약 $250[\text{nm}]$ 이상의 파장영역에서 1차 표준광원으로 사용된다.

관벽안정화 수소아크광원은 수소원자의 흡수계수와 분광학적 데이터가 잘 알려져있기 때문에 수소플라즈마의 온도와 입자밀도를 정확하게 측정하면 원자외선영역의 파장에서 복사계수를 계산할 수 있다. 플라즈마가 균일하다고 가정하면 수소아크광원의 분광복사회도는 복사계수와 플라즈마 길이의 곱으로 나타낼 수 있다. 수소의 연속스펙트럼 복사계수는

표 2. 원자외선 표준광원의 종류 및 특성

Source	Synchrotron radiation	Wall stabilized arc	Transition radiation	Cerenkov radiation	Branching ratio technique	Discharge & deuterium lamps
Standard (A or R) ¹	A	A ^b , R	A	A	A	R
Line(L) or continuous(C)	C ^a	C	C	C	L	L, C
Wavelength range (nm)	>1	130-360	>50	>120	90-130 ^c	>30.4 ^d
Max.intensity	Bright ^f	Bright	Dim ^g	Dim	Intermediate	Intermediate
Scalable in intensity ?	Yes	Limited ^e	Yes	Yes	Limited	Limited
f number	Small (f/500)	Small	Large (f/10)	Large	Large	Large
Polarized ?	Yes	No	Yes	Yes	No	No
Vacuum in source	High	Poor	High	High	Poor	Poor
Physical size	Massive	Large	Small	Small	Small	Small

¹Relative (R) or Absolute (A). ^aAdjustable wavelength distribution, ^bOnly Hydrogen arc, ^cUsable only at selected wavelengths, ^dUsable only at selected wavelengths, ^eOver factor of ten, ^fAbout 10¹⁶ photons/s · Å · sr, ^gAbout 10¹⁰ photons/s · Å · sr.

잘 알려져 있으며 수소플라즈마의 온도와 전자의 밀도가 주어지면 170(nm)이상의 파장에서 ± 2 [%]이내의 오차로 구할 수 있다. 관벽안정화 수소아크광원은 124(nm)~360(nm)영역의 1차 표준광원으로 이용되고 있다.

싱크로트론방사광은 고속의 전자가 진공중에서 자장에 의해서 전자의 진행방향과 수직으로 가속을 받아 전자의 궤도가 휘어질 때 전자궤도의 접선방향으로 방출되는 빛으로서 예리한 지향성, 넓은 연속스펙트럼 및 고휘도특성을 갖는다. 특히, 싱크로트론방사광은 가시광선에서 엑스선영역까지 연속스펙트럼을 갖는 유일한 광원으로써 진공자외선 및 연엑스선 영역의 표준광원으로 유용하다. 또한 언들레이터를 전자저장링의 직선부분에 설치하여 싱크로트론방사광을 발생시키는 경우에 언들레이터의 변수를 조절함으로써 파장가변단색광을 얻을 수 있고 방출되는 방사광의 분광복사휘도를 이론적으로 계산할 수 있기 때문에 싱크로트론방사광을 파장가변 단색광원으로 이용하기 위한 연구도 진행되고 있다. 다만 장치가 거대하고 건설비용이 많이 드는 단점이 있다.

나. 2차 표준광원

원자외선 영역에서 사용되고 있는 2차 표준광원은

파장영역에 따라 텅스텐 전구, 저기압 수은광원, 중수소광원 및 알콘아크광원 등이 이용되고 있다.

(1) 텅스텐전구

텅스텐전구는 2가지 형태로써 분광복사휘도 표준광원과 분광복사조도 표준광원으로 이용된다. 텅스텐전구는 이용기술이 잘 알려져 있고 1차 표준광원인 흑체복사광원과 1~3[%]의 오차로 교정된다.

그러나 자외선영역에서 복사속이 작기 때문에 250(nm)이하의 파장에서는 사용이 곤란하다. 예를 들면 230(nm)에서의 복사휘도는 400(nm)에서의 복사휘도 값의 1/1000이하가 된다.

(2) 저기압 수은광원

저기압 수은광원은 253.7(nm)파장에서 복사조도 표준광원으로 이용될 수 있는데 0.5~30(W/cm²)의 조도에서 약 5[%]의 오차를 갖는다.

(3) 중수소아크광원

중수소아크광원은 165(nm)~ 350(nm)영역에서 분광복사휘도 표준광원으로, 200(nm)~350(nm)영역에서 분광복사조도 표준광원으로 이용되는데 원자외선영역에서 복사속이 크고 소형이며 전력소모가 적은 반면에 정렬이 어렵고 시간에 따라 특성이 변

하는 단점이 있다.

(4) 알곤아크광원

1기압상태에서 관벽안정화 아크방전으로 동작하는 알곤아크광원은 114[nm]~350[nm]영역에서 분광복사휘도 표준광원으로 이용되는데 자외선영역에서 복사속이 크고 수명이 길며 넓은 스펙트럼분포를 가지고 있는 반면에 광원의 동작방법이 다른 광원에 비해서 복잡하기 때문에 상용화되지는 않고 있다.

(5) 공동음극광원

공동음극광원은 40[nm]~125[nm]파장영역의 복사도표준광원으로 연구되고 있는 광원으로서 사용 기체와 음극재질에 따라서 13[nm]이상의 파장에서 복사도가 큰 스펙트럼을 갖는다.

2) 분광기

광원의 분광분포를 측정하기 위해서는 분광기를 사용해야 하는데 원자외선 영역에서는 거울로 사용되는 물질의 반사율이 작기 때문에 원자외선영역에서 사용되는 분광기에는 집광거울과 분광을 하나의 회절격자로 할 수 있는 오목회절격자가 주로 사용된다.

오목회절격자를 사용하는 경우에는 구면수차와 비점수차를 고려해야 하는데 회절격자, 슬릿 및 검출기의 위치와 측정시 이동방법에 따라 여러 가지 형태로 구분할 수 있다. Paschen-Runge mounting은 입사슬릿과 회절격자는 Rowland circle 위에 위치하며 출사슬릿은 Rowland circle위에서 이동하는 형태이며 Eagle mounting은 입사각과 회절각이 거의 같으며 비점수차가 작은 형태이다. Seya-Namioka mounting은 광학소자들은 Rowland circle에서 약간 벗어나 있으며 회절격자는 중심을 축으로 회전하는데 회전각도를 크게 할 수 있는 반면에 비점수차가 크고 회절격자의 폭이 작은 형태로서 분해능이 크게 요구되지 않는 경우에 이용되며, Johnson-Onaka mounting은 비점수차는 Seya-Namioka mounting보다 작지만 분광이 가능한 스펙트럼분포가 약 100[nm]로 좁고, Wadsworth mounting은 곡면거울을 1개 더 사용하여 비점수차를 제거한 형태로서 회절상은 회절격자의 수직선 근처에 맺히게

되는데 선형분산은 동일한 회절격자를 사용하는 경우에 Paschen-Runge mounting의 절반정도이다. 그 외에도 ARC(Acton Research corp.)와 McPHERSON 사에서는 수차를 최소화하고 분광효율을 최대로 할 수 있는 입사슬릿과 출사슬릿사이의 각도가 15°인 진공분광기를 제작·판매하고 있다.

30[nm]이하의 파장영역에서는 회절격자의 반사율이 매우 작기 때문에 사입사분광기를 사용해야 한다.

3) 표준검출기

검출기가 포함된 분광측정시스템을 이용해서 광원의 분광복사도를 측정하는 경우에는 분광복사도를 알고 있는 표준광원을 이용한 분광시스템의 교정이 편리하다. 그러나 광전자방출, 광전도도, 광이온화등의 분광분포를 측정하는 경우에는 입사된 광자에 대한 방출된 입자의 비율을 구해야 하기 때문에 입사되는 광자의 수를 측정해야 한다. 광자의 수를 측정하기 위해서는 검출기의 분광감응도를 측정해야 하는데 이러한 경우에는 표준검출기를 이용해서 측정하는 방법이 편리하다.

원자외선영역에서 사용되는 표준검출기로는 적외선영역에서부터 원자외선영역까지 파장에 관계없이 흡수율이 큰 열전기터미검출기 또는 저온복사도계와 불활성기체의 광이온화반응을 이용한 이온함이 있는데 이온함의 경우에 측정파장영역은 제논의 이온화에너지인 102.2[nm]에서 헬륨의 이온화에너지인 25[nm]까지이다.

2차 표준검출기로는 5[nm]~122[nm]영역에서는 광음극으로 Al_2O_3 를 사용한 창이없는 광다이오드가 사용되며 116[nm]~254[nm]영역에서는 반투과 광음극으로 CsTe를 사용하고 MgF_2 창이 있는 광다이오드가 사용되고 있다.

3. 원자외선광원의 분광복사도 측정방법

원자외선광원의 분광복사휘도는 광원의 발광면적 및 입체각을 결정할 수 있는 구멍과 분광복사도계로 구성된 측정장치에서 분광복사휘도 표준광원과 비교

하여 측정되며, 분광복사조도는 분광복사휘도 표준광원과 분광복사도계 및 표준광원의 발광면적과 입체각을 결정할 수 있는 광학계 또는 측정하고자 하는 광원과 중첩되는 파장을 가지고 있는 가시광선 영역의 분광복사조도 표준광원을 사용하여 측정된다.

1) 원자외선광원의 분광복사휘도 측정방법

원자외선광원의 분광복사휘도는 표준광원과 비교하여 측정되는데 광원의 분광복사휘도를 L_λ , 발광면적을 A , 입체각을 Ω , 파장폭을 $\Delta\lambda$, 그리고 측정장치의 효율을 ϵ_λ 라 하면 분광복사도계의 출력신호 S

$$S = \epsilon_\lambda \cdot L_\lambda \cdot A \cdot \Omega \cdot \Delta\lambda$$

로 표시할 수 있다.

동일한 분광복사도계로 측정되는 표준광원(R)과 측정하고자하는 광원(X)에 대한 검출기 출력신호의 비율은

$$\frac{S_X}{S_R} = \frac{\epsilon_\lambda L_{\lambda X}}{\epsilon_\lambda L_{\lambda R}} \cdot \frac{A_X}{A_R} \cdot \frac{\Omega_X}{\Omega_R} \cdot \frac{\Delta\lambda_X}{\Delta\lambda_R}$$

가 되며 동일한 분광복사도계에서 측정하기 때문에 A , Ω , $\Delta\lambda$ 가 같다. 따라서 측정하고자하는 광원의 분광복사휘도는

$$L_{\lambda X} = (S_X/S_R) \cdot L_{\lambda R}$$

이 된다.

2) 원자외선광원의 분광복사조도 측정방법

분광복사휘도 표준광원이 복사표면에서 균일한 휘도를 갖는다면 이 광원으로부터 일정한 거리에서의 분광복사조도는 쉽게 계산될 수 있다. 그러나 대부분의 분광복사휘도 표준광원은 비균질이기 때문에 균질성을 가정할 수 있는 아주 작은 부분에 대해서만 분광복사휘도가 교정되어 있다. 따라서 광원의 분광복사조도를 측정하는 경우에는 분광복사휘도 표준광원의 교정된 영역에서 방출되는 빛만 측정장치에 입사되도록 해야 한다. 이것은 광학적결상 또는 시준구멍의 사용으로 가능하다. 원자외선광원의 경우에는 광학적결상에 사용되는 광학소자의 반사 또

는 투과율이 매우 낮기 때문에 시준구멍을 이용하는 방법이 효과적이다.

시준구멍을 이용한 분광복사조도 교정방법에서는 광원에서 발광특성이 균일한 부위에서 방출된 빛만 측정할 수 있도록 2개의 구멍을 설치하는데 1개는 분광기의 입사슬릿에 설치하고 1개는 광원에 가깝게 설치하면 분광기의 입사슬릿에 설치된 구멍에서의 분광복사조도는 1차 표준광원의 분광복사휘도와 기하학적 인자의 곱으로 나타낼 수 있다.

기하학적 인자는 광원의 유효면적, 입사슬릿에 설치된 구멍에 입사되는 빛의 입체각 및 구멍크기의 함수로서 측정이 가능한 양이지만, 분광복사휘도 표준광원과 교정되는 광원의 측정에서 동일한 측정장치를 사용하는 경우에는 이 변수들을 직접 측정하지 않고도 분광복사조도를 결정할 수 있다. 즉, 2개의 구멍, 분광기 및 검출기로 구성된 분광복사도계를 이용하여 분광복사휘도 표준광원에 대해서 측정하면 분광복사조도의 상대적인 효율을 결정할 수 있으며, 교정되는 광원에 대해서 측정하여 표준광원과 비교하면 상대적인 분광복사조도를 결정할 수 있다.

측정된 상대분광복사조도의 파장영역이 가시광선 또는 근자외선영역의 복사조도 표준광원을 이용할 수 있는 범위가 되면 적어도 1파장에서 광원의 복사조도를 결정할 수 있으며 이 값을 이용하여 틀맞춤하면 측정하고자 하는 광원의 분광복사조도를 측정할 수 있다.

그러나 위와 같이 분광복사조도를 결정하는 경우에는 분광복사도계의 효율이 빛이 입사하는 각도와는 무관하고 회절효과는 무시될 수 있다는 가정이 포함되어 있다. 따라서 광원의 크기가 서로 다르고 분광복사도계의 회절격자의 반사효율이 균일하지 않은 경우에는 입사슬릿에 설치된 구멍뒤에 빛확산자를 사용하여 입사각도에 대한 복사조도의 변화가 없도록해야 하며 광원의 발광면적이 광원에 설치된 구멍의 크기보다 큰 경우에는 각각의 발광점에서 방출된 빛의 일부가 회절에 의해서 입사슬릿에 설치된 구멍을 통과 하지 못하는 점을 고려해야 한다.

원자외선영역에서 빛확산자로는 MgF_2 창을 한 면만 갈아서 사용하는 경우가 있는데 이 빛확산자는

가시광선 및 근자외선영역에서 사용되는 적분구보다는 성능이 나쁘지만 아주 작은 각도에서는 빔확산자로 적합하며 아주 얇은 테프론박막을 사용하는 경우도 있다.

4. 결 론

원자외선은 그 동안 우주탐사 또는 플라즈마물리 연구분야등에서 부분적으로 연구 및 응용되어왔으나 최근에는 태양의 스펙트럼중에서 공기를 통과하는 200[nm]이상의 자외선의 측정을 비롯한 광화학, 살균, 환경측정 및 정화, 의료분야, 핵융합연구, 천체물리학, 고체물리, 자외선레이저 연구 및 고집적반도체가공등에 다양하게 이용되고 있다. 이러한 이용분야에서는 원자외선복사도를 정확하게 측정해야 되며

본 고에서는 원자외선광원의 분광복사도 측정방법에 대해서 소개하였다. 원자외선의 응용 및 복사도측정 등의 연구를 위해서는 사용이 간편하고 소형의 원자외선광원 및 원자외선영역에서 사용할 수 있는 광학소재와 특성측정기술의 개발이 선행되어야 할 것이다.

◇ 著 者 紹 介 ◇



신 동 주(申東洲)

1960년 11월 15일생. 1985년 서울대 대학원 원자핵공학과 졸업(석사). 1985년~현재 한국표준과학연구원 양자연구부 광학그룹 선임연구원