

2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발을 이용하는 평면결상형 연엑스선 분광기의 특성 해석

최일우[†]

동신대학교 광마이크로디바이스시스템연구센터
Ⓣ 520-714 전남 나주시 대호동 252번지

남창희

한국과학기술원 물리학과/결맞는 X-선 연구단
Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2002년 4월 1일 받음, 2002년 5월 31일 수정본 받음)

파장 50 Å 이하의 연엑스선 영역에서 사용될 평면결상형 연엑스선 분광기의 구성요소와 정렬조건을 결정하고 분광기의 분광학적 특성을 해석하였다. 평면결상형 연엑스선 분광기는 토로이드거울, 실틈, 비등간격 오목에돌이발, 연엑스선 검출기로 구성되어 있다. 토로이드거울과 홈간격이 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발을 사용하여 공간분해된 빛띠가 단일 평면 위에 결상되도록 분광기를 구성하였다. 토로이드거울은 연엑스선 광선이 에돌이발에 비스듬하게 입사할 때 발생하는 비점수차를 보상하기 위해 사용되었다. 파면수차 이론을 적용하여 분광기가 가지는 파장분해와 공간분해를 계산하고, 에돌이 현상에 대한 스킨라 이론을 적용하여 에돌이발의 에돌이효율을 계산하였다.

주제어 : spectrometer, X-ray spectroscopy, X-ray optics, diffraction grating, astigmatism.

I. 서 론

파장 300 Å 이하의 연엑스선(soft x-ray) 영역에서 사용될 에돌이발(diffraction grating) 분광기를 구성하려면 입사각이 80° 이상인 비스듬 입사(grazing incidence)로 에돌이발을 사용해야 한다. 고전적으로 널리 사용되어 온 분광기는 등간격으로 가공된 홈(groove)을 가지는 에돌이발과 로란원(Rowland circle)을 이용하는 분광기로서 에돌이발의 반지름을 지름으로 하는 원인 로란원 위에 실틈 slit, 에돌이발, 연엑스선 검출기를 설치하여 구성한다.^[1] 이러한 분광기에서는 연엑스선 검출기가 로란원을 따라 휘어져서 설치되어야 하므로, CCD(charge-coupled device)와 MCP(microchannel plate)와 같은 평면 광검출기를 사용하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Kita 등은 기계적 줄그움법(mechanical ruling method)을 이용하여 홈간격이 에돌이발 표면 위의 위치에 따라 변하는 비등간격 오목에돌이발(varied line-spacing concave grating)을 제작하였다.^[2,3] 연엑스선이 입사하는 쪽에서는 홈간격이 넓고 에돌이되는 쪽에서는 홈간격이 좁게 가공된 구면에돌이발을 사용하면 원하는 파장영역의 빛띠(spectrum)가 동일한 단일 평면 위에 결상되는 평면결상형 연엑스선 분광기(flat-field soft x-ray spectrometer)를 구성할 수 있다.^[4]

일본의 Hitachi 사는 연엑스선 영역에서 사용되는 여러 종류의 비등간격 오목에돌이발을 생산하고 있다.^[3] 호칭홈수(nominal groove number)가 1200 grooves/mm인 에돌이발

(Hitachi 사 물품번호 001-0437 또는 001-0266)을 사용하여 최소 30 Å까지의 연엑스선 빛띠를 얻을 수 있었고,^[2,5] 호칭홈수가 2400 grooves/mm인 에돌이발(Hitachi 사 물품번호 001-0450 또는 001-0471)을 사용하여 최소 15 Å까지의 빛띠를 얻을 수 있었다.^[6] 연엑스선 영역 중 50 Å 이하의 단파장 영역은 연엑스선 마이크로스코피(soft x-ray microscopy),^[7] 엑스선 레이저 개발,^[8] 고차 조화파 발생(high order harmonic generation),^[9] 원자번호가 낮은 이온으로 구성된 플라즈마의 진단^[10] 등의 분야에서 널리 연구되고 있는 파장영역이다. 호칭홈수가 1200 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발의 고차 에돌이빛에서도 이와 같은 단파장 영역의 빛띠를 관측할 수 있지만 고차 에돌이빛에 대한 파장분산이 작고 에돌이효율(diffraction efficiency)이 아주 낮으므로 빛띠를 효과적으로 관측하기 어렵다.^[5,11] 따라서 일차 에돌이빛에서 파장분산이 크고 에돌이효율이 높게 단파장 영역의 연엑스선을 관측하려면 호칭홈수가 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발을 사용해야 한다. 50 Å 이상의 장파장 영역에서 주로 사용되고 있는 1200 grooves/mm 에돌이발을 이용하는 분광기의 특성은 비교적 잘 분석되어 있지만^[4,5] 2400 grooves/mm 에돌이발을 이용하는 분광기의 특성은 잘 분석되어 있지 않다.

본 논문에서는 호칭홈수가 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발을 이용하는 평면결상형 연엑스선 분광기의 구성요소를 선정하고 각 구성요소의 정렬조건을 결정하였다. 원하는 파장영역의 빛띠가 동일한 단일 평면 위에 결상되도록 비등간격 오목에돌이발을 사용하고 연엑스선 광선이 에돌이발에 비스듬하게 입사할 때 발생하는 비점수차를 보상하기 위해 토로

[†]E-mail: iwchoi@black.dongshinu.ac.kr

이드거울(toroidal mirror)을 사용하였다. 분광기를 이용하여 연엑스선 빔미를 정량적으로 분석하는데 필요한 파장분해(spectral resolution), 공간분해(spatial resolution), 에돌이효율 등의 특성이 분석되었다.

II. 평면결상형 연엑스선 분광기의 구성

토로이드거울, 실틈, 비등간격 오목에돌이발, 분광면(spectral plane)으로 구성된 평면결상형 연엑스선 분광기의 구성도가 그림 1에 있다. 각 구성요소의 사양과 정렬조건은 표 1에 정리되어 있다. 분광면에는 CCD, MCP와 같은 평면형 연엑스선 검출기가 설치된다. 자오면(meridional plane)은 광원점, 토로이드거울의 중심, 에돌이발의 중심, 상점을 연결하는 중심 광선이 포함되어 있는 면으로 정의되고, 구결면(sagittal plane)은 이 중심 광선을 따라서 자오면에 수직인 면으로 정의된다. 자오면에서 광선을 추적해 보면 광원점에서 발산하여 나온 광선은 토로이드거울의 자오곡률에 의해 실틈 위에 집속되고, 실틈을 통과해 나온 광선은 에돌이발에 의해 파장에 따라 분해되어 분광면 위에 집속된다. 구결면에서 광선을 추적해 보면 광원점에서 나온 광선은 토로이드거울의 구결곡률에 의해 에돌이발 뒤로 거리 $|r_{s2}|$ 만큼 떨어진 위치에 집속되고, 이와 같이 수렴하면서 에돌이발에 입사한 광선은 에돌이발에 의해 약간 더 집속되어 분광면에 초점으로 형성된다. 토로이드거울은 자오방향과 구결방향으로 서로 다른 곡률반경을 가진 거울이므로 동일한 광원의 위치와 입사각에 대해 실틈 위와 에돌이발 뒤에 두 개의 초점선(focal line)을 형성할 수 있다.

일본의 Hitachi 사에서 판매되는 비등간격 오목에돌이발은 에돌이발 표면 위의 위치 χ_2 에서 홈간격 σ 가

표 1. 호칭홈수가 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발을 이용하는 평면결상형 연엑스선 분광기의 정렬조건

(a) 토로이드거울	
자오방향의 곡률반경	$R_1 = 5906.7 \text{ mm}$
구결방향의 곡률반경	$\rho_1 = 29.5 \text{ mm}$
입사각	$\alpha_1 = 87.0^\circ$
토로이드거울에서 광원까지의 거리	$r = 466.0 \text{ mm}$
토로이드거울에서 실틈까지의 거리	$r_{m1}' = 232.4 \text{ mm}$
토로이드거울에서 구결초점까지의 거리	$r_{s1}' = 706.5 \text{ mm}$
구경	$X_1 = 16.80 \text{ mm}$
	$Y_1 = 0.78 \text{ mm}$
실틈의 폭	$s_w = 40 \mu\text{m}$
(b) 비등간격 오목에돌이발 (Hitachi 사 물품번호 001-0450 또는 001-0471)	
파장영역	$\lambda = 5-100 \text{ \AA}$
호칭홈간격	$\sigma_0 = 1/2400 \text{ mm}$
구면의 곡률반경	$R_2 = 15920 \text{ mm}$
줄그음변수	$b_2 = 62$
	$b_3 = 4.0073 \times 10^3$
	$b_4 = 2.77256 \times 10^5$
브레이즈각	$\gamma_0 = 1.9^\circ$
표면 코팅 재료	금(Au)
입사각	$\alpha_2 = -88.65^\circ$
에돌이발에서 실틈까지의 거리	$r_{m2} = 237.0 \text{ mm}$
에돌이발에서 구결광원까지의 거리	$r_{s2} = -237.3 \text{ mm}$
에돌이발에서 분광면까지의 수직 거리	$L = 235.0 \text{ mm}$
구경	$X_2 = 38.18 \text{ mm}$
	$Y_2 = 0.26 \text{ mm}$
비점수차가 보상된 파장	$\lambda_s = 30 \text{ \AA}$

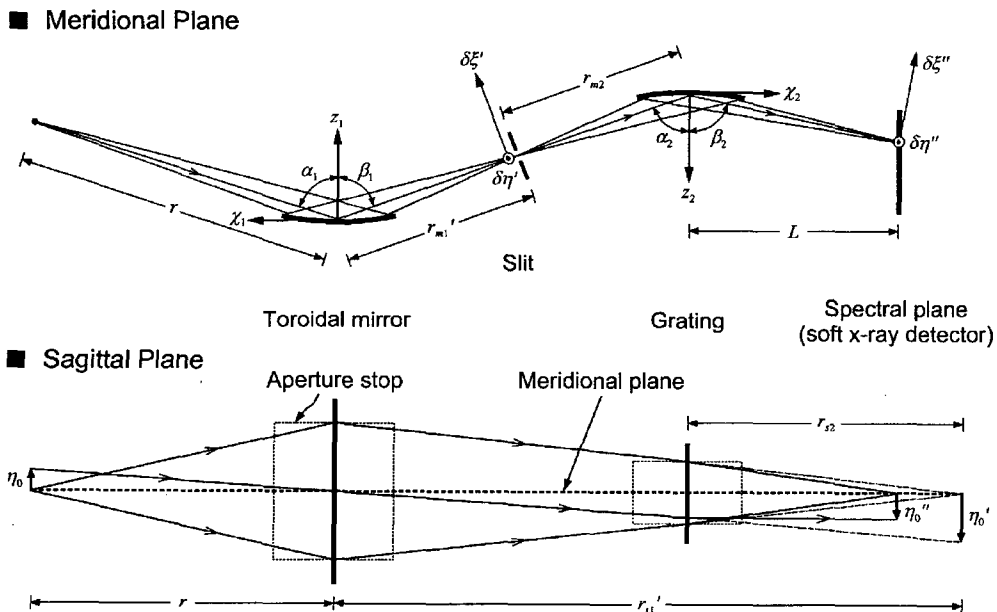


그림 1. 비등간격 오목에돌이발과 토로이드거울을 이용하는 평면결상형 연엑스선 분광기의 구성도. 각 정렬조건은 표 1에 정리되어 있다. 자오면으로부터 구결방향으로 높이 η_0 만큼 떨어진 점광원에서 나온 광선은 토로이드거울의 구결곡률에 의해 집속되어 높이 η_0' 로 에돌이발 뒤에 결상되고, 이와 같이 수렴하면서 에돌이발에 입사하는 광선은 에돌이발에 의해 약간 더 집속되어 분광면 위에서 높이 η_0'' 로 결상된다.

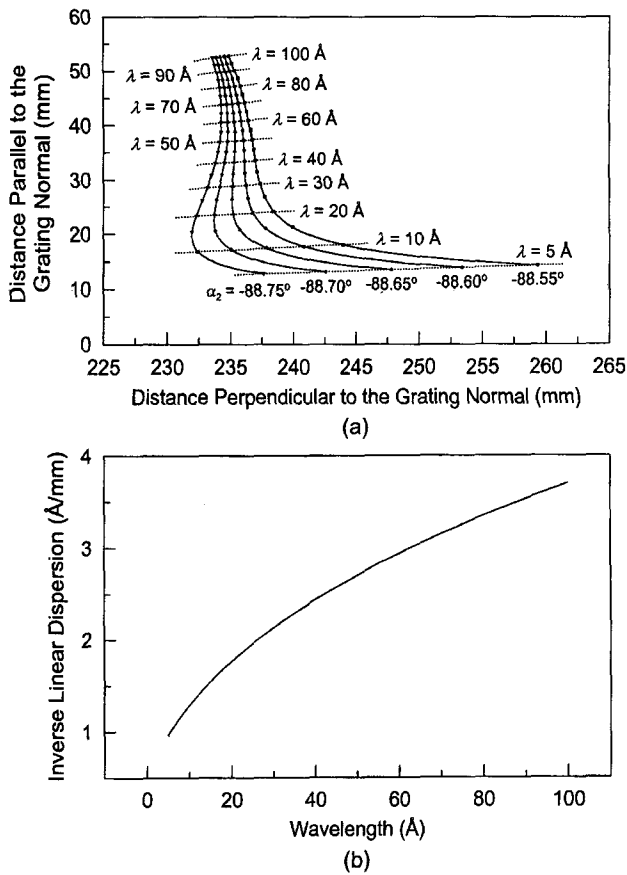


그림 2. 호칭홀수가 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발의 중심으로부터 237 mm 떨어진 위치에서 점광원이 입사할 때 일차 에돌이빛에 대한 에돌이발의 결상 특성. (a) 에돌이발에 대한 입사각(α_2)과 파장(λ)에 따라서 에돌이발에 의해 형성되는 자오초점의 위치. 가로 축은 에돌이발의 중심에 있는 법선에 대해 수직(그림 1에서 χ_2 방향)으로 측정된 자오초점의 위치이고, 세로 축은 이 법선에 평행한 방향(그림 1에서 z_2 방향)으로 측정된 자오초점의 위치이다. (b) 에돌이발에 대한 입사각이 -88.65° 일 때 일차 에돌이빛에 대한 역분산.

$$\sigma = \sigma_0 \left/ \left(1 + \frac{2b_2}{R_2} \chi_2 + \frac{3b_3}{R_2^2} \chi_2^2 + \frac{4b_4}{R_2^3} \chi_2^3 \right) \right. \quad (1)$$

이 되도록 가공된 것이다. 여기서 σ_0 는 호칭홀간격 즉, 에돌이발의 중심에서의 홈간격이고, R_2 는 에돌이발의 곡률반경, b_i 는 줄그음변수(ruling parameter)이다. 비등간격 오목에돌이발을 제작할 때는 원하는 파장영역의 빛띠가 동일한 단일 평면 위에 결상되도록 줄그음변수 b_2 를 조정하고, 빛띠가 결상되는 분광면 위에서 자오초점의 영상폭에 영향을 미치는 코마와 구면수차가 최소화되도록 나머지 줄그음변수 b_3 와 b_4 가 결정되었다.^[2] 자오초점은 자오면 안에 존재하는 광선들에 의해 형성되는 초점이다. 본 논문에서 논의할 평면결상형 연엑스선 분광기에 사용되는 비등간격 오목에돌이발(Hitachi 사 물품번호 001-0450 또는 001-0471)은 호칭홀수가 2400 grooves/mm이고 곡률반경이 15920 mm인 구면에돌이발이다. 이 에돌이발의

줄그음변수는 $b_2 = 62$, $b_3 = 4.0073 \times 10^3$, $b_4 = 2.77256 \times 10^5$ 이고, 홈이 그어진 방향으로 유효 폭이 26 mm, 그것에 수직인 방향으로 유효 폭이 46 mm이다.

이차 수차까지 고려할 때 비등간격 오목에돌이발에 의해 형성되는 자오초점의 위치가 그림 2(a)에 나타나 있다. 광원이 입사하는 쪽에서 홈간격이 넓고 에돌이되는 쪽에서 홈간격이 좁도록 구면에돌이발을 가공하면 원하는 파장영역의 빛띠가 동일한 단일 평면 위에 결상될 수 있다.^[4] 에돌이발의 중심으로부터 237 mm 떨어진 위치에 있는 점광원이 입사각 -88.65° 로 입사하면 에돌이발의 중심에 있는 법선으로부터 $L = 235$ mm 떨어진 위치에 파장 20–70 Å의 평면결상이 이루어짐을 볼 수 있다. 이 위치에 분광면 즉, 연엑스선 검출기를 설치하면 상퍼짐(defocus)이 보상된 빛띠가 형성된다. 이 파장영역보다 단파장과 장파장 쪽에 있는 파장은 에돌이발의 중심으로부터 다른 위치에 결상되므로 위의 분광면 위에서 작은 초점으로 결상되지 않고 영상의 폭이 넓어진다. 에돌이발에 대한 입사각이 0.1°만 변해도 자오초점의 위치가 크게 이동하므로 에돌이발의 각도 조정은 분광기의 파장분해에 큰 영향을 미치는 중요한 정렬요소임을 알 수 있다. 비등간격 오목에돌이발의 일차 에돌이빛에 대한 역분산(inverse linear dispersion)이 그림 2(b)에 있다. 단파장 영역에서는 역분산이 작으므로 파장분산이 효과적으로 일어나고, 파장이 길어지면 역분산이 증가하여 파장 차이가 작은 분광선을 분해하기 어려워진다. 파장 30 Å에서 역분산은 2.13 Å/mm이다. 파장 50 Å 이하의 단파장 영역에서 1200 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 이차 에돌이빛에 대한 역분산과 비교할 때 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 일차 에돌이빛에 대한 역분산이 좀더 작으므로 단파장 영역에서 빛띠를 관측할 경우, 이 에돌이발로 구성된 분광기를 사용하는 것이 좋다.

실틈의 위치에 있는 점광원에서 자오방향과 구결방향으로 발산하여 나온 광선이 비등간격 오목에돌이발에 비스듬하게 입사하면 에돌이발에 의해 자오방향으로는 광선이 집속되지만 구결방향으로는 광선이 거의 집속되지 못하므로 비점수차가 크게 발생하여 분광면에는 구결방향으로 긴 영상을 가진 빛띠가 형성된다.^[11] 따라서 에돌이빛의 강도가 약해지므로 빛띠를 검출하기 어렵고, 구결방향으로 서로 다른 위치에 있는 점광원들에 대한 긴 영상들이 구결방향으로 중첩되므로 구결방향으로 변하는 광원의 공간적인 강도변화를 측정하기 어려워진다. 에돌이발 앞에 별도의 거울을 추가하여 구결방향으로 수렴하는 광원이 에돌이발에 입사하도록 하면 발산하는 광원이 입사할 때보다 에돌이발에 더 가까운 위치에 구결초점이 형성된다. 이와 같은 목적으로는 구결방향으로 곡률을 가지는 원통형의 거울을 사용해도 충분한데 거울과 그것의 구결초점 사이에 에돌이발을 설치하면 수렴하는 광원이 에돌이발에 입사하게 된다. 분광기의 파장분해를 결정하기 위해 거울과 에돌이발 사이에 자오방향으로 폭이 좁은 실틈을 설치해야 할 경우, 광원에서 자오방향으로 발산하여 나온 광선은 거울에서 반사된 후에도 계속 발산하므로 상당한 양의 광선이 실틈에 의해 차단된다. 따라서 실틈을 통과하는 광선의 양을 증가시키려면 실틈 위에 광원의 자오초점이 형성되도록 거울은 자오방

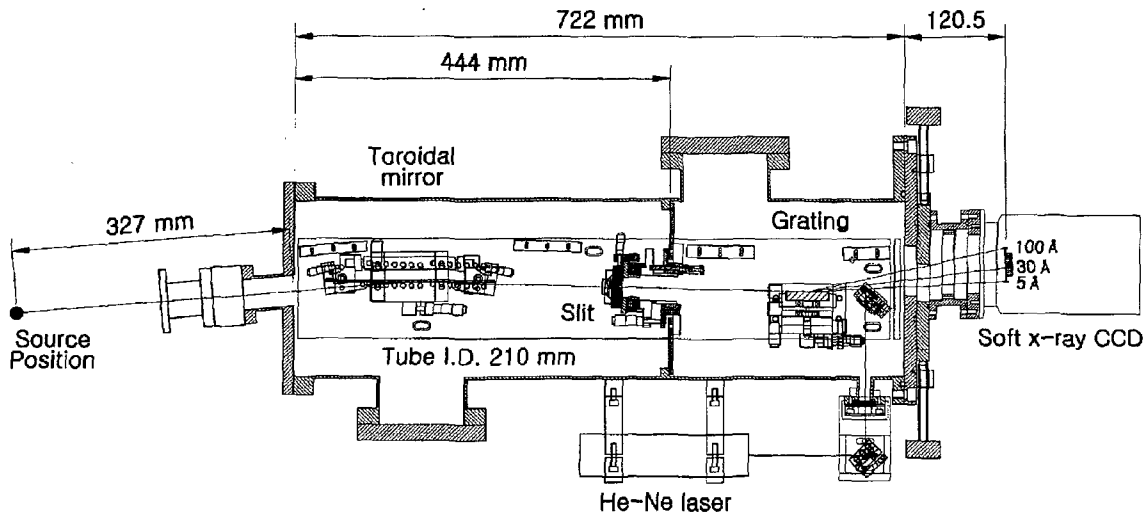


그림 3. 평면결상형 연엑스선 분광기의 설계도면.

향으로도 곡률을 가지고 있어야 한다. 그림 1과 같이 실틈 위와 에돌이발 뒤에 두 개의 초점선이 형성되려면 자오방향과 구결방향으로 곡률반경이 다른 토로이드거울을 사용해야 한다.

토로이드거울과 에돌이발을 그림 1과 같이 배치하면 토로이드거울에서 발생하는 비점수차와 에돌이발에서 발생하는 비점수차가 상호 보완적으로 보상되며, 실틈을 통과하는 광선의 양이 증가하고 분광면에 자오방향과 구결방향으로 집속된 초점이 형성되므로 광집속력이 크게 향상된다. 이와 같이 자오방향과 구결방향으로 광선이 집속되므로 자오면으로부터 구결방향으로 높이 η_0 만큼 떨어진 점광원에서 나온 광선은 분광면에서 구결방향으로 높이 η_0 만큼 떨어진 위치에 결상된다. 따라서 광원 위의 위치에 따라 변하는 강도의 변화가 공간적으로 분해되어 분광면에서 영상으로 형성되므로 분광면에는 구결방향으로 공간분해된 빔머가 형성된다.^[5] 표 1의 정렬조건은 파장 30 Å에서 비점수차가 보상되도록 결정되었으며 분광면 위에는 구결방향으로 1.5배 정도 확대된 광원의 영상이 형성된다.

제작된 분광기의 설계도면이 그림 3에 나타나 있다. 이 분광기는 호칭홈수가 1200 grooves/mm, 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발을 서로 교환하여 설치할 수 있도록 설계되어 있다. 분광하려는 파장영역을 바꾸려면 적당한 토로이드거울과 에돌이발을 선택하고 정해진 정렬조건에 따라 분광기를 다시 정렬해야 한다. 연엑스선 검출기로는 CCD를 사용할 수 있도록 설계하였고 진공용기와 모든 구성요소의 지지대(mount)는 10^{-6} Torr 정도의 진공에도 사용될 수 있도록 제작되었다. 광원의 위치를 정렬할 때 기준으로 사용될 He-Ne 레이저가 진공용기의 측면에 장착되어 있다. 이 He-Ne 레이저 광선은 분광기 안에서 연엑스선 광선과 역방향으로 진행하여 표적의 위치에 도달하므로 광원의 위치를 정렬할 때는 이 도달점의 위치에 광원이 형성되도록 관련된 구성요소를 조정하면 된다.

III. 평면결상형 연엑스선 분광기의 특성

토로이드거울과 비등간격 오목에돌이발로 구성된 평면결상

형 연엑스선 분광기의 파면수차(wave front aberration)를 구하고 이로부터 횡광선수차(transverse ray aberration)를 계산하여 실틈과 분광면 위에 형성되는 영상의 모양을 그려 보았다.^[5,12] 분광기 전체의 파면수차는 각 구성요소에 의한 파면수차의 합으로 표시되며, 횡광선수차는 이상적인 초점으로부터 수차광선의 편향을 나타낸다.

자오면 안에 있는 한 점광원에 대해 토로이드거울에 의해 실틈 위에 형성되는 영상이 그림 4(a)에 있다. $\delta\xi'$ 축에 평행한 점들의 궤적은 자오면에 평행하고 구결방향으로 일정한 높이에 있는 토로이드거울의 면에서 반사된 광선들에 의해 형성된 것이고, $\delta\eta'$ 축을 따라 휘어진 점들의 궤적은 구결면에 평행하고 자오방향으로 일정한 위치에 있는 토로이드거울의 면에서 반사된 광선들에 의해 형성된 것이다. 실틈 위에 형성되는 영상은 휘어져 있고, 코마와 구면수차에 의해 자오방향으로 영상의 폭이 넓어져 있다. 토로이드거울에 설정된 구경(aperture)이 자오방향으로 커지면 자오방향의 영상의 폭이 넓어지고, 구결방향으로 구경이 커지면 구결방향의 영상의 길이가 길어진다. 토로이드거울과 에돌이발에서 자오방향의 구경(X_1, X_2)은 실틈 위에 형성되는 영상의 폭이 실틈의 폭과 일치하도록 설정되었고, 구결방향의 구경(Y_1, Y_2)은 휘어진 영상이 실틈의 양쪽 가장자리에 걸치도록 설정되었다. 실틈 위에 형성되는 영상이 휘어져 있으므로 그림 4(a)의 왼쪽에 있는 실틈의 가장자리에 의해 광선의 일부가 차단되어 실틈을 통과하지 못하게 된다. 위와 같이 설정된 토로이드거울의 구경에서 반사된 광선이 실틈을 투과하는 비율은 자오면 안에 있는 점광원에 대해 0.85 정도이다.

그림 4(b)는 자오면 안에 있는 점광원에 대해 분광면에 형성되는 파장 30 Å인 영상의 모양을 보여주고 있다. $\delta\xi''$ - $\delta\eta''$ 좌표계의 원점 근처에 있는 점들은 토로이드거울의 중심과 에돌이발의 중심 근처에서 반사된 광선들에 의해 형성된 것이다. 구결방향($\delta\eta''$ 축 방향)으로 휘어진 점들의 궤적은 에돌이발의 한 홈에서 반사된 광선들에 의해 형성된 것이고, 자오방향($\delta\xi''$ 축 방향)으로 배열된 점들의 궤적은 에돌이발의 홈에 수직이

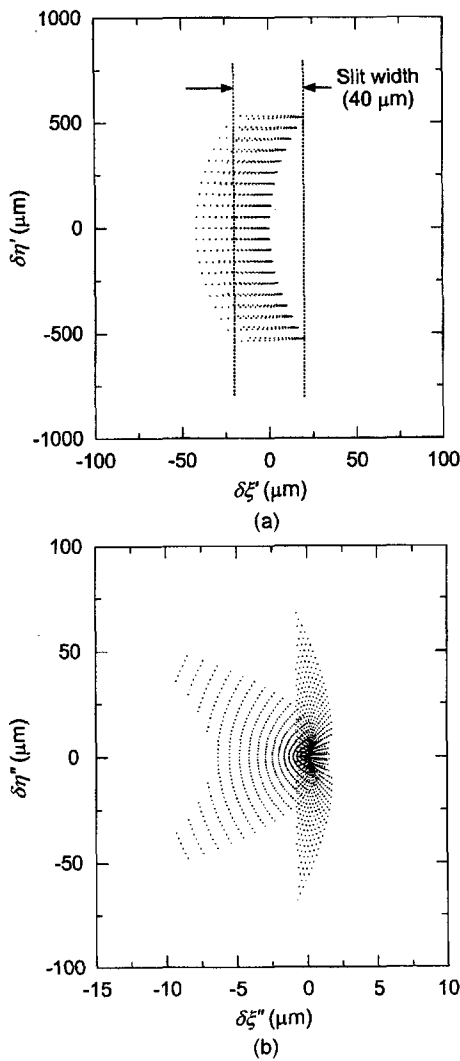


그림 4. 평면결상형 연엑스선 분광기에서 자오면 안에 있는 한 점 광원($\eta_0=0$)에 대한 영상의 모양. (a) 토로이드거울에 의해 실틈 위에 형성되는 영상. $\delta\xi''$ 은 자오면에 평행한 방향이고, $\delta\eta'$ 은 구결면에 평행한 방향이다. 두 점선은 폭 $40 \mu\text{m}$ 인 실틈의 양쪽 가장자리에 해당한다. (b) 폭 $40 \mu\text{m}$ 인 실틈을 사용하는 분광기의 분광면 위에 형성되는 파장 30 \AA 인 일차 에돌이빛의 영상. $\delta\xi''$ 은 자오면에 평행한 방향이고, $\delta\eta''$ 은 구결면에 평행한 방향이다.

고 구결방향으로 일정한 높이에 있는 에돌이발의 면에서 반사된 광선에 의해 형성된 것이다. 그림 4(b)의 영상에서 궤적의 일부가 끊기는 것은 그림 4(a)와 같이 광선의 일부가 실틈에 의해 차단되기 때문이다. 코마와 구면수차에 의해 자오방향으로 영상의 폭이 다소 넓어져 있지만 대부분의 광선이 중심 근처에 집중되고 있다. 또한 토로이드거울에 의해 비점수차가 보상되어 구결방향으로 영상의 길이가 짧아지므로 점광원에서 나온 광선은 분광면 위에 작은 초점으로 형성된다. 이와 마찬가지로 자오면으로부터 구결방향으로 일정한 높이에 위치한 점광원에서 나온 광선은 분광면 위에서 구결방향으로 다른 위치에 작은 초점으로 형성된다. 따라서 구결방향으로 분포된 긴 광원의 영상이 일대일로 대응되어 분광면 위에 형성되므로 분

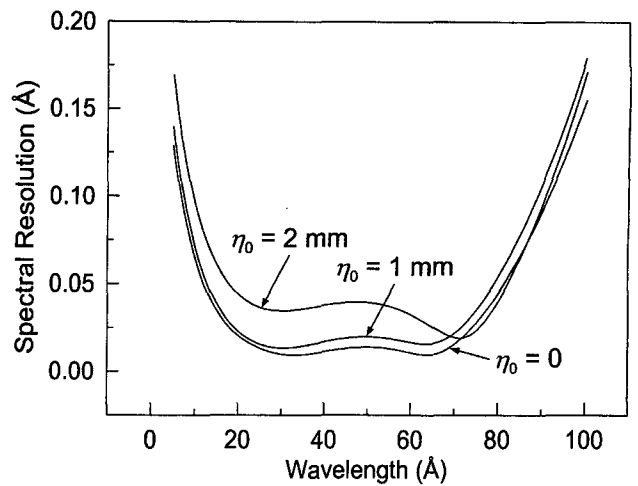


그림 5. 평면결상형 연엑스선 분광기의 파장분해. 자오면으로부터 구결방향으로 높이 η_0 만큼 떨어진 한 점광원에서 연엑스선이 입사하고 폭 $40 \mu\text{m}$ 인 실틈이 사용된다고 가정하여 계산한 일차 에돌이빛에 대한 파장분해이다.

광면에는 구결방향으로 공간분해된 빛띠가 형성된다.

평면결상형 연엑스선 분광기에서 자오면으로부터 점광원의 높이에 따른 파장분해가 그림 5에 있다. 점광원에 대한 파장분해는 자오방향의 황광선수차의 제곱평균제곱근 점크기(*root-mean-square spot size*)에 역분산과 기울어질 배수 $1/\sin\beta_2$ 를 곱하여 계산되었다. 제곱평균제곱근 점크기는 황광선수차의 표준편차에 2를 곱한 크기로 정의되었다.^[5] 자오면 안에 있는 점광원에 대해 파장 30 \AA 에서 파장분해는 9.8 m\AA 이고 파장영역 $20\text{--}70 \text{ \AA}$ 에서 25 m\AA 보다 좋은 파장분해를 가진다. 그러나 10 \AA 이하와 80 \AA 이상의 파장에서는 파장분해가 급격히 나빠지므로 주의해야 한다. 그림 5에 의하면 파장분해가 점광원의 높이에 따라 $\eta_0=2 \text{ mm}$ 까지 크게 변하지 않는다. 따라서 공간분해된 빛띠를 이용하면 특정한 한 파장에 대해 광원 위의 위치에 따라 변하는 파장폭의 변화를 거의 일정한 파장분해를 가지고 측정할 수 있다.

분광면 위에 연엑스선 검출기를 설치하여 단색광(*monochromatic light*)을 관측할 때 실제로 얻을 수 있는 파장분해는 (가) 분광기의 구성요소에 의한 수차, (나) 실틈의 기하광학적 영상의 폭, (다) 구경의 유한한 크기에 의한 에돌이 폭, (라) 연엑스선 검출기를 구성하는 단위 감광소자, 예를 들면, CCD 화소(*pixel*)의 유한한 크기에 의해 저해된다. 본 논문에서 논의하는 파장영역에서는 항목 (다)의 영향이 무시될 수 있다. 연엑스선 검출기에 관측되는 단색광의 실제 파장폭은 위의 각 항목에 의한 영향이 컨벌루션(*convolution*) 형태로 합성되어 복잡하게 나타나지만 이들의 제곱합제곱근(*root sum of square*)으로 간단하게 추산할 수 있다. 파장 30 \AA 에서 항목 (가)에 해당하는 파장폭이 9.8 m\AA , (나)에 해당하는 파장폭이 16.6 m\AA , 화소의 크기가 $20 \mu\text{m}$ 인 CCD를 사용할 때 (라)에 해당하는 파장폭이 42.6 m\AA 이므로 예상되는 실제 파장분해는 0.05 \AA 정도이다. 이와 같이 연엑스선 검출기의 단위 감광소자의 크기가 파장분해에 큰 영향을 미치므로 단색광의 파장폭을 정밀하게

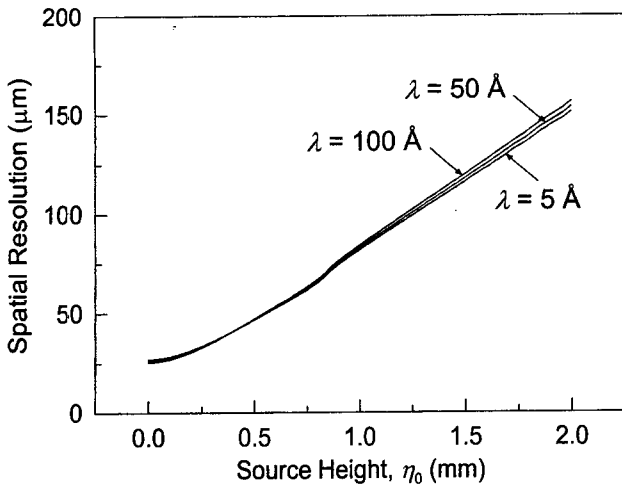


그림 6. 평면결상형 연엑스선 분광기의 공간분해. 자오면으로부터 구결방향으로 높이 η_0 만큼 떨어진 한 점광원에서 연엑스선이 입사하고 폭 $40 \mu\text{m}$ 인 실 틈이 사용된다고 가정하여 계산한 일차 에돌이빔에 대한 공간분해이다.

측정하려면 단위 감광소자의 크기가 작은 연엑스선 검출기를 사용해야 한다.

그림 6은 자오면으로부터 구결방향으로 점광원의 높이에 따른 광원공간에서의 공간분해를 보여주고 있다. 점광원에 대한 광원공간에서의 공간분해는 구결방향의 회광선수차의 제곱평균제곱근 점크기를 분광기 전체의 구결방향의 배율(대부분의 파장영역에서 1.5 정도)로 나누어 계산된 것이다. 비점수차가 30 \AA 에서 보상되도록 분광기가 정렬되었다 하더라도 점광원의 한 높이에 대한 공간분해가 $5\text{--}100 \text{ \AA}$ 의 파장영역에서 거의 변하지 않는다. 파장영역 $5\text{--}100 \text{ \AA}$ 에서 자오면 안에 있는 점광원에 대한 공간분해는 $25 \mu\text{m}$ 정도이고, 점광원의 위치가 구결방향으로 높아짐에 따라 공간분해가 나빠지지만 점광원의 높이 2 mm 까지 $150 \mu\text{m}$ 보다 좋은 공간분해를 가진다. 점광원의 한 높이에 대한 공간분해가 파장에 따라 거의 변하지 않으므로 광원 위의 특정한 위치에서 나오는 빛띠의 파장에 따른 강도의 변화를 전 파장영역에 걸쳐 거의 일정한 공간분해를 가지고 측정할 수 있다. 그림 5와 그림 6의 결과를 종합하면 분광면 위에서는 파장의 분산방향에 수직인 구결방향으로 공간분해된 빛띠가 형성되고 광원의 각 위치에서 나오는 빛띠의 구조를 거의 비슷한 파장분해를 가지고 광원 위의 위치에 따라 분해하여 분석할 수 있다.

그림 7은 호칭홈수가 2400 grooves/mm 인 비등간격 오목에돌이발의 에돌이효율 특성을 보여주고 있다. 에돌이효율은 에돌이발의 홈가공면(groove facet)에 의해 형성되는 경계면에서 전자기파에 대한 맥스웰 방정식과 경계조건을 적용하여 계산할 수 있다. 그러나 연엑스선 영역에서와 같이 입사광의 파장이 입사광이 보는 홈간격보다 충분히 작으면 스칼라 이론(scalar theory)으로 에돌이 현상을 취급할 수 있다.^[13] 비등간격 오목에돌이발에서는 홈간격이 위치에 따라 변하고 에돌이발 표면이 구면이므로 각 홈에 대한 연엑스선 광선의 입사각과 브레이즈각(blaze angle)이 위치에 따라 달라진다. 따라서 에돌이발

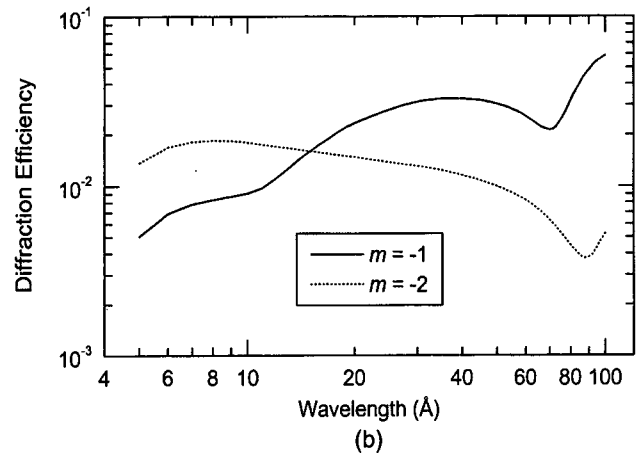
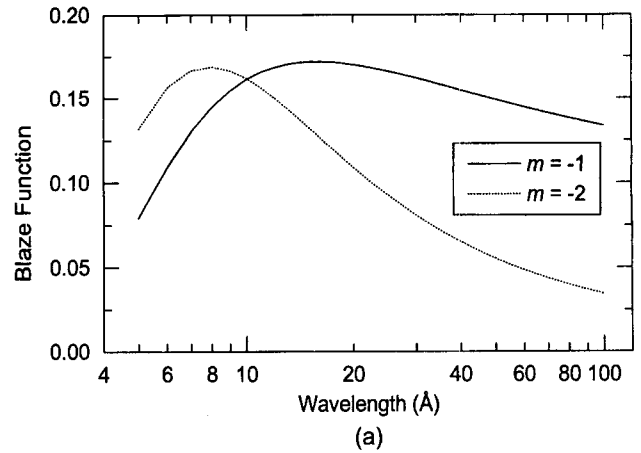


그림 7. 파장과 에돌이차수(m)에 따른 호칭홈수가 2400 grooves/mm 인 비등간격 오목에돌이발의 에돌이효율. (a) 비등간격 오목에돌이발의 홈가공면의 반사율이 1이라고 가정할 때 얻을 수 있는 에돌이효율. 이를 브레이즈 함수라고 정의한다. (b) 홈가공면이 금으로 코팅된 비등간격 오목에돌이발의 에돌이효율.

의 구면을 따라 각기 다른 홈간격과 브레이즈각을 가지는 미소 에돌이발이 연결되어 비등간격 오목에돌이발을 형성하고, 에돌이발 전체의 에돌이효율은 이들 미소 에돌이발에 의한 에돌이효율의 평균으로 정의된다고 가정하여 비등간격 오목에돌이발의 에돌이효율을 계산하였다.^[4] 미소 에돌이발은 비등간격 오목에돌이발의 구면에 접하는 접평면 위로 사영된 홈간격(σ'_i)과 이 접평면에 대해 정의되는 입사각(α_i), 에돌이각(β_i), 브레이즈각(γ_i)을 가지는 평면에돌이발이라고 가정하였다. N 개의 미소 에돌이발로 이루어진 비등간격 오목에돌이발에서 에돌이차수 m , 파장 λ 인 에돌이빔에 대한 에돌이효율은^[4,14]

$$\eta_m = \frac{1}{N} \sum_i R_m(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i) D_m^2(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \sigma'_i) \quad (2)$$

$$D_m(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \sigma'_i) = f_i \text{sinc} \left\{ \frac{\pi f_i \sigma'_i}{\lambda \cos \gamma_i} [\sin(\alpha_i + \gamma_i) + \sin(\beta_i + \gamma_i)] \right\} \quad (3)$$

로 표현된다. 첨자 “ i ”가 붙여진 변수는 비등간격 오목에돌이발을 구성하는 한 홈에 대한 양이다. 여기서 $R_m(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 은 미소 에돌이발의 홈가공면에서 연엑스선의 반사율이고 f_i 는 홈

간격 σ' 중 입사광선에 의해 조명되는 홈의 비율이다. $\text{sinc}(x)$ 보기는 $\text{sinc}(x) \equiv \text{sinc}(\pi x)$ 로 정의된다.

비등간격 오목에돌이발의 브레이즈 함수(blaze function)가 그림 7(a)에 나타나 있다. 브레이즈 함수는 홈가공면의 반사율이 1이라고 가정할 때 얻을 수 있는 에돌이효율으로 정의한다. 즉, 식 (2)에서 $R_m(\alpha_i, \beta_i, \gamma) = 1$ 로 설정하여 얻어지는 에돌이효율이다. 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 중심에서 브레이즈각이 $\gamma_0 = 1.9^\circ$ 이고 입사각이 $\alpha_0 = -88.65^\circ$ 이므로 에돌이차수 m 에 대한 에돌이발의 중심에서의 브레이즈파장(blaze wavelength) λ_{b0} 은

$$m\lambda_{b0} = \sigma_0 [\sin\alpha_0 + \sin(-\alpha_0 - 2\gamma_0)] = -15.7 \text{ \AA} \quad (4)$$

이다. 따라서 그림 7(a)와 같이 일차 에돌이빛은 15.7 Å, 이차 에돌이빛은 7.8 Å에서 브레이즈 함수의 봉우리(peak)가 나타난다.

그림 7(b)는 홈가공면이 금(Au)으로 코팅된 비등간격 오목에돌이발의 에돌이효율을 보여주고 있다. 이것이 본 논문에서 논의하는 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 실제 에돌이효율이다. 일차 에돌이빛에 대한 브레이즈 함수는 파장 15.7 Å을 기준으로 완만하게 감소하지만 파장이 길어짐에 따라 금 표면의 반사율이 증가하므로 일차 에돌이빛의 에돌이효율도 파장에 따라 점진적으로 증가한다. 그러나 이차 에돌이빛에 대한 브레이즈 함수가 파장이 길어질수록 급격히 감소하므로 금 표면의 반사율이 파장에 따라 증가하더라도 이차 에돌이빛에 대한 에돌이효율은 파장에 따라 점진적 감소한다. 파장 80 Å 근처에서 에돌이효율이 갑자기 낮아지는 이유는 파장이 증가함에 따라 브레이즈 함수는 작아지지만 금 표면의 반사율은 이 근처에서 갑자기 증가하기 시작하므로 이들의 복합 효과가 나타나기 때문이다. 파장 30 Å에서 일차 에돌이빛에 대한 에돌이효율은 3.1%, 이차 에돌이빛은 1.3% 정도이다.

일반적으로 에돌이발을 이용하는 분광기의 분광면에는 단파장의 고차 에돌이빛이 장파장의 저차 에돌이빛에 중첩되어 나타나므로 장파장 영역에서 빛띠를 관측할 때 단파장의 고차 에돌이빛의 기여 정도를 추정해야 한다. 그림 7(b)에 의하면 10 Å 근처에 있는 파장의 이차 에돌이빛에 대한 에돌이효율이 20 Å 근처에 있는 파장의 일차 에돌이빛에 대한 에돌이효율과 거의 비슷하다. 따라서 파장 20 Å 근처에서 빛띠를 관측할 때 10 Å 근처의 이차 에돌이빛도 중첩되어 함께 관측될 수 있다는 사실에 주의해야 한다. 10 Å 이하의 파장에서 이차 에돌이빛에 대한 에돌이효율이 일차 에돌이빛에 대한 에돌이효율보다 큰 이유는 그림 7(a)와 같이 브레이즈함수가 더 크기 때문이다. 파장 50 Å 이하의 단파장 영역에서 1200 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 이차 에돌이빛에 대한 에돌이효율과 비교하여 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 일차 에돌이빛에 대한 에돌이효율이 훨씬 크므로 단파장 영역에서 빛띠를 관측할 때 이 에돌이발로 구성된 분광기를 사용하는 것이 좋다. 그림 5와 그림 7에 의하면 파장영역 20-70 Å에서 파장분해와 에돌이효율 모두가 우수하고 20 Å 이하와 70 Å 이상의 파장영역에서 파장분해가 다소 나빠지지만 전 파장영역 5-100 Å으로 확장하여 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발을 사

용할 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

토로이드거울, 실트, 호칭함수가 2400 grooves/mm인 비등간격 오목에돌이발, 연엑션 검출기로 구성되는 평면결상형 연엑션 분광기의 분광학적 특성이 분석되었다. 파면수차 이론을 적용하여 분광기의 파장분해와 공간분해를 계산하였고, 에돌이 현상에 대한 스칼라 이론을 적용하여 에돌이효율을 계산하였다. 토로이드거울에 의해 비점수차가 보상되어 구결방향으로 공간분해된 빛띠가 형성된다. 이 분광기는 한 파장에 대해 구결방향으로 점광원의 위치에 따라 크게 변하지 않은 파장분해를 가지고, 한 점광원의 위치에 대해 파장에 따라 거의 변하지 않는 공간분해를 가진다. 분광기의 이러한 특성을 이용하면 광원의 각 위치에서 나오는 빛띠의 구조를 거의 비슷한 파장분해를 가지고 광원 위의 위치에 따라 분해하여 분석할 수 있다. 1200 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발의 특성과 비교하면 2400 grooves/mm 비등간격 오목에돌이발은 파장 50 Å 이하의 단파장 영역에서 우수한 파장분산과 에돌이효율을 가지므로 단파장 영역에서 빛띠를 관측할 때 이 에돌이발로 구성된 분광기를 사용해야 한다.

참고문헌

- [1] J. A. R. Samson, *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967), Chapter 2-3.
- [2] T. Kita, T. Harada, N. Nakano, and H. Kuroda, "Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 4, pp. 512-513, 1983.
- [3] <http://www.hii.hitachi.com>.
- [4] 최일우, 평면결상형 극자외선 분광기의 특성해석과 $3\alpha/2$ 방출을 이용한 엑션 레이저 플라즈마의 분석(한국과학기술원 박사학위논문, 대전, 1997).
- [5] I. W. Choi, J. U. Lee, and C. H. Nam, "Space-resolving flat-field extreme ultraviolet spectrograph system and its aberration analysis with wave-front aberration," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 7, pp. 1457-1466, 1997; 최일우, 신현준, 조성호, 조민식, 이병훈, 남창희, "파장영역 30-300 Å의 분광을 위한 평면결상형 극자외선 분광기의 개발," *새물리*, 36권 1호, pp. 1-10, 1996; 최일우, 신현준, 남창희, "비점수차가 보정된 평면결상형 극자외선 분광기에서 공간분해된 빛띠의 형성," *새물리*, 36권 1호, pp. 11-19, 1996.
- [6] N. Nakano, H. Kuroda, T. Kita, and T. Harada, "Development of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer and its application in picosecond XUV spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 14, pp. 2386-2392, 1984.
- [7] M. Berglund, L. Rymell, M. Peuker, T. Wilhein, and H. M. Hertz, "Compact water-window transmission X-ray microscopy," *J. Microsc.*, vol. 197, pt 3, pp. 268-273, 2000.
- [8] H. Daido, S. Sebban, N. Sakaya, Y. Tohyama, T. Norimatsu, K. Mima, Y. Kato, S. Wang, Y. Gu, G. Huang, H. Tang, K.

- Murai, R. Butzbach, I. Uschmann, M. Vollbrecht, and E. Förster, "Experimental characterization of short-wavelength Ni-like soft-x-ray lasing toward the water window," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 16, no. 12, pp. 2295-2299, 1999.
- [9] H. J. Shin, D. G. Lee, Y. H. Cha, J.-H. Kim, K. H. Hong, and C. H. Nam, "Nonadiabatic blueshift of high-order harmonics from Ar and Ne atoms in an intense femtosecond laser field," *Phys. Rev. A*, vol. 63, pp. 053407-1-9, 2001; Z. Chang, A. Rundquist, H. Wang, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "Generation of coherent soft x rays at 2.7 nm using high harmonics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 79, no. 16, pp. 2967-2970, 1997.
- [10] I. W. Choi, H. Daido, N. Sakaya, Y. Tohyama, N. Izumi, R. Kodama, Y. Kitagawa, K. A. Tanaka, and K. Mima, "Prepulse effect for recombining plasma produced by ultrashort high-intensity lasers," *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*, vol. 40, no. 3A, pp. 1443-1447, 2001.
- [11] W. Schwanda, K. Eidmann, and M. C. Richardson, "Characterization of a flat-field grazing-incidence XUV spectrometer," *J. X-ray Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 8-17, 1993.
- [12] M. P. Chrisp, "Aberrations of holographic toroidal grating systems," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 10, pp. 1508-1518, 1983; M. P. Chrisp, "X-ray spectrograph design," *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 10, pp. 1519-1529, 1983.
- [13] E. G. Loewen and M. Neviere, "Simple selection rules for VUV and XUV diffraction gratings," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 7, pp. 1087-1092, 1978.
- [14] A. P. Lukirskii and E. P. Savinov, "Use of diffraction gratings and echelettes in the ultra-soft x-ray region," *Opt. Spectrosc.*, vol. 14, pp. 147-151, 1963.

**Analysis of a flat-field soft x-ray spectrometer
using a 2400-grooves/mm varied line-spacing concave grating**

Il Woo Choi[†]

Center for Optical Micro Device System, Dongshin University, Chonnam 520-714, KOREA

[†]E-mail: iwchoi@black.dongshinu.ac.kr

Chang Hee Nam

*Department of Physics/Coherent X-Ray Research Center,
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA*

(Received April 1, 2002 ; revised manuscript received May 1, 2002)

The components and alignment parameters of a flat-field soft x-ray spectrometer used in the wavelength range below 50 Å are determined, and the characteristics of the spectrometer are analyzed. It consists of a toroidal mirror, a slit, a varied line-spacing concave grating, and a soft x-ray detector. The space-resolved spectral image of a source is formed on a single plane using the toroidal mirror and the 2400-grooves/mm varied line-spacing concave grating. The former is used to compensate for the astigmatism caused by the grazing incidence of soft x-ray light on the concave grating. The spectral and spatial resolutions of the spectrometer are calculated by applying the wave front aberration theory, and the diffraction efficiency is calculated by applying the scalar diffraction theory.

Classification codes : SM.020, SP.010, DI.010, SM.010.