

## 2 차 회절광 차단을 위한 분광 광도계 설계

홍영주\* (KAIST 대학원 기계공학과), 곽윤근(KAIST 기계공학과), 김수현(KAIST 기계공학과)

### Design Spectrophotometer for Blocking the 2<sup>nd</sup> diffracted Light

Y. J. Hong(Mech. Eng. Dept. KAIST), Y. K. Kwak(Mech. Eng. Dept., KAIST), S. H. Kim(Mech. Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

Stray light is the light except the light of the analytic wavelength and the source of measurement error of absorbance. Some experimental results showed that diffractive grating is the major factor of stray light in spectrophotometer. Through the ray tracing with the software tool, classified the paths of the diffractive light from grating and found the range of wavelength which reach the exit slit. The quantity of the stray light(0.025%) is more than the minimum limit of stray light(0.01%) of the single monochromator. A novel optical layout design method, which prevent the reflected rays entering the diffractive grating is proposed.

**Key Words** : Stray light (떠돌이 빛), Diffracted light (회절광), Spectrophotometer (분광 광도계), Monochromator (단색화장치)

#### 기호 설명

- $n$  : diffraction order
- $\lambda$  : wavelength(nm)
- $a$  : grating groove width(mm/lines)
- $\theta_i$  : incident ray angle
- $\theta_o$  : diffracted ray angle
- $f$  : focal length
- $\Delta\lambda$  : band-width(nm)
- $\alpha$  : angle between focusing and collimating mirrors
- $\beta$  : off-axis angle of mirror

#### 1. 서론

물질은 구성 성분, 농도에 따라 파장별 빛과 반응 특성이 다르다. 이처럼 물질의 파장별 흡광도, 투과도 차이로 물질을 분석할 수 있는데, 분광 특성을 측정하는 계측기가 분광 광도계 이다. 분광소자에 따라 단색필터, 프리즘, 음향광학변조필터, 회절 격자를 이용하는 방법이 있다. 현재 대부분의 상용제품에서는 반사형 회절 격자를 분광 소자로 사용하고 있다. 회절 격자를 이용하는 경우 분광 방식에 따라 Czerny-Turner, Littrow 방식으로, 측정

방법에 따라 단일빔, 이중빔 방식으로 나눌 수 있다.

측정기의 성능 평가 척도로는 측정 영역, 분해능, 재현성, 오차 등이 있다. 분광 광도계의 오차 문제 중 떠돌이 빛(stray light)은 설계 단계에서 해석이 쉽지 않으며, 발생 변수들을 명확히 파악하기 힘들다. 분광 광도계에서 떠돌이 빛을 측정하는 방법은 ASTM (American Society of Testing Materials)에 의해 표준으로 정해져 있으나,<sup>1</sup> 떠돌이 빛을 제거하는 체계적인 방법이 없으며, 상당 부분 제작사들의 노하우에 의존하고 있다. 분광 광도계에서 떠돌이 빛은 분석 파장 외에 다른 파장의 모든 빛을 의미하며, 흡광도 측정에 오차 원인이 된다.

떠돌이 빛 제거에 관한 연구는 위성 망원경에 대해 주로 연구 되어 왔다. C. Leinert 는 떠돌이 빛 제거를 위해, 광학면 처리 정도에 따른 산란 계수 변화를 측정하였고, 광 차단판에서 반사, 회절광을 측정하였다. 각 경우에 떠돌이 빛 감소 요인을 계산하여 광학 시스템의 총 떠돌이 빛 양을 예상하였다.<sup>2</sup> Andrew Buffington 은 광 차단판에서 회절광을 줄이기 위해 5 개를 연속으로 사용하여 떠돌이 빛 제거 성능을 높였다.<sup>3,4</sup> 최근에는 광선 추적 방법과 산란 모의 실험을 통해, 광 차단판의 설치 위치, 형

태를 결정한다.<sup>5</sup>

분광 광도계에서 체계적인 떠돌이 빛 제거에 관한 연구가 미흡하다. 본 연구에서는 반사형 회절 격자를 분광 소자로 하고 Czerny-Turner 분광 방식의 단일 단색화장치를 가지는 분광 광도계를 기반으로 하여 체계적인 떠돌이 빛 제거 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 분광 광도계 원리

Fig. 1 과 같이, 파장  $\lambda$  의 빛이 격자 간격  $a$  인 회절 격자에  $\theta_i$  각으로 입사할 때, 회절각  $\theta_o$  과의 관계는 다음과 같다.

$$a(\sin \theta_i + \sin \theta_o) = n\lambda \quad (1)$$

1 차 회절광에서 높은 효율을 얻기 위해 블레이징된 회절 격자를 사용한다. 분산은 차수  $n$ , 거울의 초점 거리  $f$  에 비례하고, 격자 간격  $a$  에는 반비례한다. Fig. 2 는 Czerny-Turner 형 단색화 장치의 광학계 구조를 보여주며, 이 경우 입사광과 회절광의 각도가  $2\alpha$  로 고정되어 있고, 회절 격자의 회절각  $\theta$  와 파장  $\lambda$  와의 관계는 다음과 같다.

$$n\lambda = 2a \cos \alpha \sin \theta \quad (2)$$

$\theta$  에 대해  $n\lambda$  는 상수이다. 임의 파장  $\lambda$  의 빛이  $k$  번째 차수에 나타나면, 같은 자리에  $k\lambda/n$  가  $n$  번째 차수로 나타난다. 이와 같은 차수의 중첩 현상은, 차수 구분 필터를 이용하여 해결한다.<sup>6,7</sup>

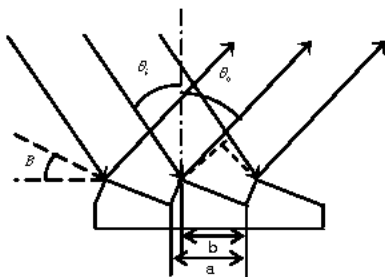


Fig. 1 Principle of diffraction at grating

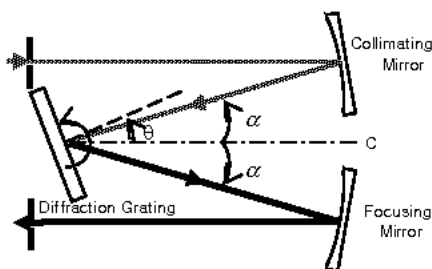


Fig. 2 Czerny-Turner type monochromator

### 2.2 떠돌이 빛의 정의

광학계 면에서는 정반사와 난반사가 함께 일어나며, 의도하지 않은 산란광을 떠돌이 복사 에너지라고 한다.

산란광은 회절 격자 코팅면이나 격자 간격이 빛의 파장 크기 정도로 불균일 할 경우, 회절 격자면에 먼지, 긁힘, 편흔들이 있을 때 생긴다.

분광 차수  $n$  의 분석 파장  $\lambda$  빛을 측정하는 광감지기에서 떠돌이 빛은  $\lambda$  와 다른 파장  $\lambda'$  이거나,  $n$  과 다른 차수  $n'$  의 빛으로 정의한다. 떠돌이 빛의 원인은 회절 격자에서의 산란, 다른 차수  $n'$  의 빛이 분광 광도계 내부면에서 난반사, 분석 파장  $\lambda$  근처 파장의 빛들이 산란 특성에 따라 광감지기에 도달하는 것이 있다. 떠돌이 빛을 측정하는 일반적인 방법은 광차단 필터(cutoff filter)를 이용하는 것이다. 떠돌이 빛은 외삽법을 적용할 수 없으므로, 여러 파장에 대해서 떠돌이 빛을 측정하는 것이 필요하다.

## 3. 떠돌이 빛 제거

### 3.1 떠돌이 빛 측정

ASTM 에서는 각 파장 영역에 따라 10 개의 필터를 이용하여 떠돌이 빛을 측정하도록 표준으로 정하고 있다. 자외선 영역은 가시광 영역에 비해 광량이 상대적으로 작아 떠돌이 빛에 큰 영향을 받는다. 220nm, 340nm 차단 영역에서 투과율이 0.001~0.003%인 필터(Fig. 3)를 이용하여 떠돌이 빛을 측정해 보았다. Fig. 4 는 차단 필터를 이용한 측정량이 실제 필터의 투과율과 비교하여 큰 것을 나타낸다. 220nm 필터의 경우가 340nm 필터의 경우보다 큰 값을 가지는 것을 확인 할 수 있는데, 220~340nm 파장 성분이 떠돌이 빛으로 나타나기 때문이다.

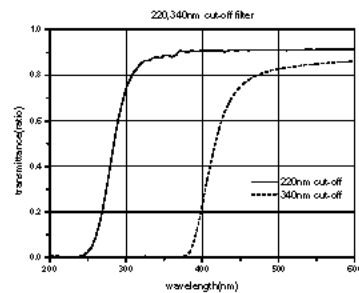


Fig. 3 Transmittance of 220nm & 340nm cutoff filter

분광 광도계 내부 광학계의 산란 특성에 따른 떠돌이 빛 특성을 측정해 보았다. Fig. 5(a)는 시준 거울에서 산란의 영향을 보기 위해 초점 거울과 회절 격자를 가리고 측정한 결과 이고, Fig. 5(b)는 시

준 거울과 회절 격자 산란의 영향을 함께 측정된 결과이다. Fig. 5(c)는 내부 벽면을 가리고 측정한 결과이고, Fig. 5(d)는 회절 격자만을 개방하고 측정한 결과이다. 실험 결과들로 부터 분광 광도계 내부 산란의 큰 요인으로 회절 격자를 생각 할 수 있다.

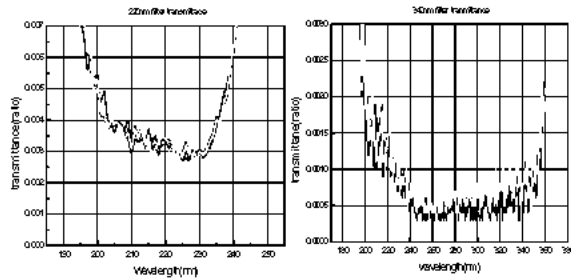


Fig. 4 Measured stray light with 220nm & 340nm cutoff filter

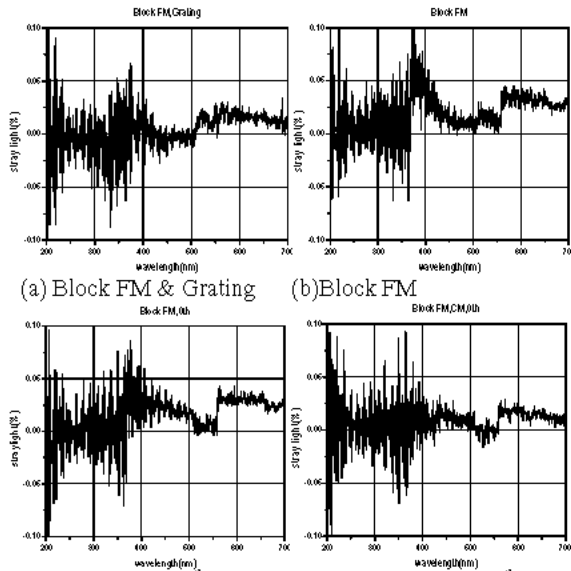


Fig. 5 Stray light caused by the each component

### 3.2 회절광의 파장별 진행 경로

차수 구분 필터를 이용하면 초점 거울에서 차수 겹침은 막을 수 있으나, 회절광은 연속적으로 분포하므로, 초점 거울 이외에 다른 면에 입사하는 성분이 존재하게 된다.

광학 소프트웨어를 이용하여, 회절광을 파장과 차수에 따라 그 진행 경로를 추적하였다. 초점 거울과 시준 거울 입사광의 파장과 차수는 식(2)로부터 얻을 수 있다. Fig. 6(a)은 초점 거울로 입사하는 차수별 파장을 나타내는데, 차수 구분 필터로 인해 차수 겹침이 없음을 확인 할 수 있다. 차수 구분 필터의 파장 영역은 Table 1 과 같다. Fig. 6(b)는 파장 주사시 시준 거울로 입사하는 차수별 회절광을

나타낸다. 각 파장 영역에 따라 1~3 차 회절광의 일부가 시준 거울로 입사하는 것을 확인 할 수 있다.

위의 차수와 파장 영역에서 단색화 장치 내 시준 거울, 회절 격자, 초점 거울, 슬릿을 거쳐 광선 추적을 하였고, 산란은 고려하지 않았다. 추적 결과 8 개 유형으로 나눌 수 있었다. 분광 분석에 쓰이는 A, 출구 슬릿에 평행광으로 진행하는 B,C 는 직접적인 영향을 미치게 되고, 입구 슬릿으로 역으로 진행하는 D-H 는 슬릿면에서 반사 산란되어 영향을 미치게 된다

- A : Ent-CM-G1st-FM-Ext (focusing)
  - B : Ent-CM-G2nd-CM-G1st-FM-Ext (collimating)
  - C : Ent-CM-G1st-FM-G1st-FM-Ext (collimating)
  - D : Ent-CM-G1st-CM-Ent (focusing)
  - E : Ent-CM-G2nd-CM-Ent (focusing)
  - F : Ent-CM-G3rd-CM-Ent (focusing)
  - G : Ent-CM-G2nd-CM-G2nd-CM-Ent (collimating)
  - H : Ent-CM-G3rd-CM-G3rd-CM-Ent (collimating)
- (Ent/Ext : Entrance/Exit slit, CM : Collimating Mirror , FM:Focusing Mirror, G#th: Grating #th order diffraction)

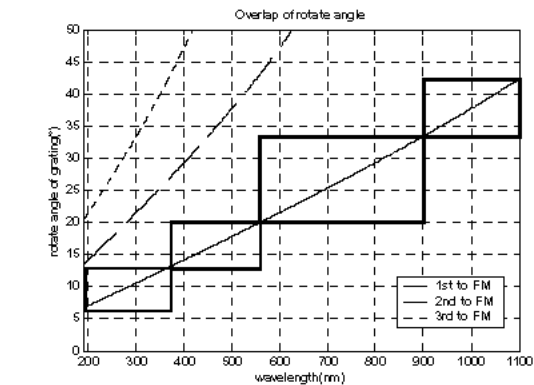


Fig. 6(a) wavelength & order of light incident into the focusing mirror

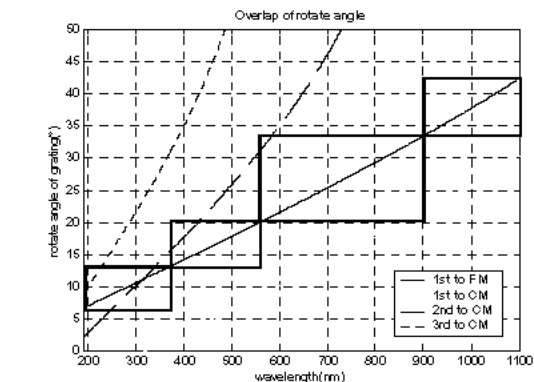


Fig. 6(b) Wavelength & order of light incident into the collimating mirror

Filter	From	To
A	190.0nm	369.9nm
B	370.0nm	429.9nm
C	430.0nm	509.9nm
D	510.0nm	1100nm

Table 1 Wavelength range of order sorting filter

### 3.3 수학적 모델

출구 슬릿으로 직접 영향을 미치는 B,C 형태에 대해 수학적 모델을 세워 예상되는 떠돌이 빛의 값을 구하였다. 파장별 분광된 빛의 세기를 계산하기 위해서는 광원 ( $S(\lambda)$ ), 광감지기 ( $R_d(\lambda)$ ), 광학면의 반사율 ( $R_m(\lambda)$ ), 회절 격자의 회절 차수별 효율 ( $G_{e1}(\lambda)$ :1 차,  $G_{e2}(\lambda)$ :2 차)의 파장별 정보가 필요하다.  $S(\lambda)$ ,  $R_d(\lambda)$ ,  $R_m(\lambda)$  값은 특성 그래프를 바탕으로, 선형화하여 파장별 값을 얻었다. 회절 격자의 회절 차수별 효율은 다음의 회절 차수 효율 공식을 이용하였다.<sup>8</sup>

$$G_m(\lambda) = \frac{\sin^2(\pi b(n - \lambda_B / \lambda) / a)}{(\pi b(n - \lambda_B / \lambda) / a)^2} \quad (3)$$

광경로 A 의 1 차 회절광의 세기를 계산하기 위해, 입구 슬릿이 출구 슬릿에 결상된다고 가정하였다. 출구 슬릿을 통하여 나오는 빛은 중심 파장을 기준으로 하여, 선형 분산양에 의해 슬릿 폭만큼 파장 분포를 가지게 된다. 출구 슬릿에 나타나는 빛의 세기는 파장에 따라 입구 슬릿의 크기가 컨볼루션(convolution) 되는 형태가 된다. 컨볼루션 계산에 쓰이는 변수들을 파장( $\lambda$ )에 대하여 나타냈고, 계산 파장 영역은 선형 분산의 역수  $D_{RL}(\lambda_0)$  에 슬릿폭( $w$ )의 곱으로 얻는다.

$$\lambda_d = D_{RL}(\lambda_0) \times w \quad (4)$$

분광 분석에 쓰이는 1 차 회절광은 광원의 빛이 시준 거울, 회절 격자, 초점 거울 순으로 광학면을 3 회 지나고, 1 차의 효율을 가지며, 광감지기에 측정되므로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{e1}(\lambda_0) = \int_{\lambda_0 - \lambda_d}^{\lambda_0} S(\lambda) \cdot h \cdot (w + D_r(\lambda_0)) \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$+ \int_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \lambda_d} S(\lambda) \cdot h \cdot (-w + D_r(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)) \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) d\lambda$$

광경로 B 의 2 차 회절광의 세기를 계산하기 위해서, 출구 슬릿으로 향하는 빛이 평행광이라는 가정을 하였다. 이 경우 입구 슬릿을 통해 들어온 빛이 출구 슬릿면에 결상되지 않고, 넓은 면적으로 흐리게 맺힌다. 이런 광속 면적은 슬릿의 면적에 비하여 상당히 크기 때문에, 출구 슬릿을 지나는 2

차 회절광의 파장 적분을 구할 수 있다. B 의 2 차 회절광은 광학면을 5 회 지나고, 2 차,1 차 효율을 가진다. 분석 파장  $\lambda_0$  에서 출구 슬릿을 지나는 B 의 파장 영역( $\lambda_s(\lambda_0) \sim \lambda_e(\lambda_0)$ )은 OSLO 를 이용하여 구하였다. 출구 슬릿을 향하는 빛이 평행광 이므로, A 의 집광되는 경우에 비한 상대적인 세기( $C_1$ )를 가진다. B 의 떠돌이 빛의 세기는 다음과 같이 계산할 수 있다.

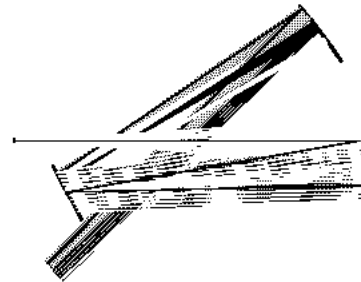
$$I_{e2}(\lambda_0) = \int_{\lambda_s(\lambda_0)}^{\lambda_e(\lambda_0)} S(\lambda) \cdot h \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot G_{e2}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) \cdot C_1 d\lambda \quad (6)$$

광경로 C 도 같은 방법으로 계산할 수 있다. 실제 계산은 MATLAB 을 이용하여,  $\Delta\lambda = 0.1nm$  간격으로 다음과 같이 수치 적분 하였다.

$$I_{e1}(\lambda_0) = \sum_{\lambda_0 - \lambda_d}^{\lambda_0} S(\lambda) \cdot h \cdot (w + D_r(\lambda_0)) \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) \Delta\lambda \quad (7)$$

$$+ \sum_{\lambda_0}^{\lambda_0 + \lambda_d} S(\lambda) \cdot h \cdot (-w + D_r(\lambda_0) \cdot (\lambda - \lambda_0)) \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) \Delta\lambda$$

$$I_{e2}(\lambda_0) = \sum_{\lambda_s(\lambda_0)}^{\lambda_e(\lambda_0)} S(\lambda) \cdot h \cdot (R_m(\lambda))^2 \cdot G_{e1}(\lambda) \cdot G_{e2}(\lambda) \cdot R_d(\lambda) \cdot C_1 \Delta\lambda \quad (8)$$



B : Ent-CM-Grat2nd-CM-Grat1st-FM-Ext(collimating)	
Stray Wavelength(nm)	Scan Wavelength(nm)
283 ~ 375	190 ~ 304

Fig. 7 Stray light path and wavelength

수치적 계산을 통해 얻은 값과 실제 떠돌이 빛으로 측정되는 양을 비교해 보았다. Fig. 7 에서와 같이 출구 슬릿에 직접 영향을 미치는 떠돌이 빛은 자외선 파장에서 나타난다. 자외선 영역의 광대역폭 필터가 없어, 220nm,340nm 차단 필터를 이용하여 측정된 두 값의 차이로 대역폭 필터 효과를 얻었다. Fig. 8(a), (b)는 각각 대역폭 영역과 파장 주사 영역이 겹치지 않는 190~245nm 영역에서 측정값과 해석값을 나타낸다.

수치적 계산으로 얻은 해석값이 0.025%로 측정값에 비해 1/10 정도인 것을 확인 할 수 있다. 광경로 B 에 의해 발생하는 떠돌이 빛의 양은 측정되는 떠돌이 빛에 비해 작은 양이다. 하지만, 단일 단색화장치의 떠돌이 빛 최소 한계양인 0.01%보다 큰 양이기 때문에, 단색화장치 설계 시 B,C 형태의 광경

로 진행을 고려하지 않는다면, 출입 수 없는 양이고, 단색화장치를 최대로 조율 했을 경우, 때물이 빛에 지배적인 영향을 미치는 요인이 된다.

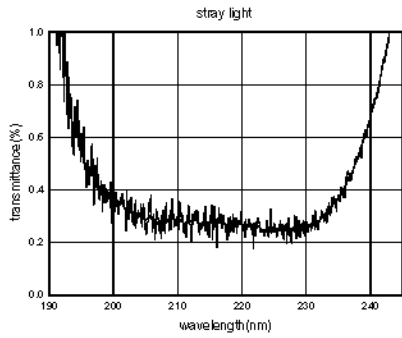


Fig. 8(a) Measured values of stray light

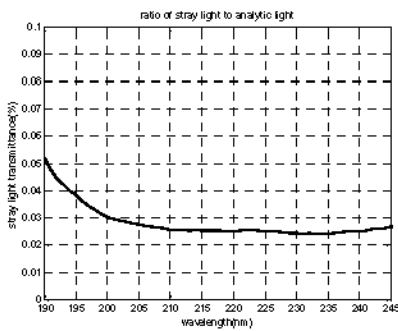


Fig. 8(b) Analytical values of stray light

### 3.3 회절 격자로 재입사 성분 제거

앞서 언급한 B-H 와 같은 광경로를 가지는 때 물이 빛이 생기는 것은, 파장 주사하는 동안 회절 광이 회절 격자로 재입사 하기 때문이다. 면 S1 에서 출발한 빛이 면 S2 에서 반사된 후에 S1 으로 재 입사하는 경우는 Fig. 9(a)와 같이 S2 면의 수직 선분들 중 S2 를 지나는 선분이 있는 경우이다. S1 으로 재입사 하지 않기 위해서는 Fig. 9(b)와 같이 S2 면의 모든 위치에서 수직 선분이 S1 을 지나지 않아야 한다.

Fig. 10(a)는 회절 격자로 재입사하는 성분을 고려하지 못한 기존의 단색화 장치의 광학계 배치를 나타낸다. 구면 중심과 거울의 외각의 점을 이은 선분이 회절 격자의 구동 반경 범위를 지나는 것을 확인 할 수 있다.

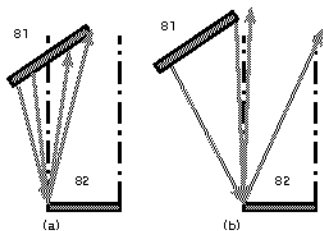


Fig 9. (a) Reincident ray exist (b) No reincident ray exist

Fig. 10(b)는 거울면의 수직 선분이 회절 격자의 구동 반경을 지나지 않도록 광학계 배치를 재설계한 것을 나타낸다. 단색화 장치의 분해능에 영향을 미치지 않도록 거울의 축외각을 변경하였다.

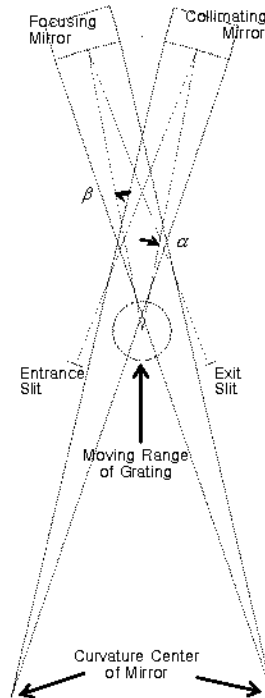


Fig. 10(a) An existing optical layout couldn't prevent reincident ray into the diffractive grating

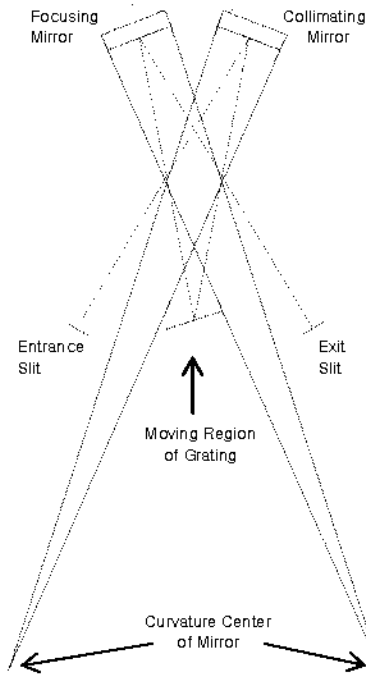


Fig. 10(b) A noble optical layout preventing reincident ray into the diffractive grating

제안한 방법에 의해 분광 광도계를 설계할 때, 제어할 수 있는 변수로는 대역폭에 영향을 미치는 두 거울의 사잇각과 수차에 영향을 미치는 축외각이 있다. Fig. 11(a)는 두 거울의 사잇각과 축외각의 관계를 나타낸다. 제한 조건에서, 사잇각의 변화에 따른 축외각이 일정함을 확인할 수 있다. 초기 설계 단계에서 회절 격자와 거울의 크기, 초점거리가 결정되면, 기하적인 관계에 의해 축외각이 결정된다. Fig. 11(b)은 두 거울의 사잇각과 분광 광도계의 대역폭 관계를 나타낸다. 사잇각이 작은 경우 대역폭이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

거울의 크기와 회절 격자의 거울 사이의 거리에 의해 결정되는 최소각을 선택함으로써, 분광 광도계의 분해능이 최상이 조건에서 2 차 회절광에 의한 떠돌이 빛 영향을 제거 할 수 있다.

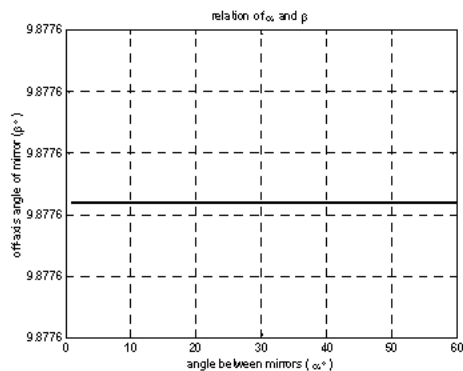


Fig. 11(a) The relation between off-axis angle  $\alpha$

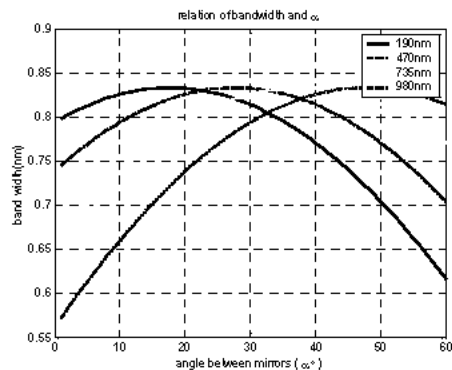


Fig. 11(b) The relation between bandwidth and  $\alpha$

#### 4. 결론

반사형 평면 회절 격자를 이용한 단일 단색화 장치에서 떠돌이 빛 제거를 위한 체계적인 방법을 제안 하였다. 상용 분광 광도계를 이용하여 ASTM에서 정한 표준 방법을 통해, 떠돌이 빛을 측정하였다. 분광 광도계 내 광학계에 의한 떠돌이 빛 특성을 정성적으로 얻었고, 회절 격자의 영향이 지배적임을 확인 하였다. 광학 소프트웨어 OSLO 를 이

용하여 광선 추적을 하였으며, 회절 격자에 재입사 되는 성분이 다시 회절 되어 떠돌이 빛으로 나타나는 것을 확인하였고, 그 양을 수치적 계산 방법으로 얻었다. 재입사에 의한 떠돌이 빛의 양은 0.025%로 필터를 이용한 측정값 0.27%에 비해 작지만, 단일 단색화 장치의 떠돌이 빛 최소 한계 0.01%보다 큰 값이다. 회절 격자로 재입사 되지 않는 설계 방법을 제안 하였다. 제안 조건에서 설계 변수들의 최적값을 얻었다. 본 연구에서 제안한 방법을 고려하여, 회절 격자로 재입사하는 성분에 의한 떠돌이 빛을 줄일 수 있다.

#### 참고문헌

1. ASTM. "Standard Test Method for Estimating Stray Radiant Ratio of Spectrophotometer by Opaque Filter Method", 1995.
2. C. Leinert and D. Kluppelberg, "Stray Light Suppression in Optical Space Experiments", Applied Optics, Vol .13, pp556-564, 1974.
3. Andrew Buffington et. al. "Wide-angle Stray Light Reduction for a Spaceborne Optical Hemispherical Imager", Applied Optics, Vol.35, pp6669-6673, 1996.
4. Andrew Buffington et. al. "Improved Design for Stray Light Reduction with a Hemispherical Imager", Applied Optics, Vol. 39, pp2683-2886, 2000.
5. G. Baudin, G. Maurel & P. Nicol, "Medium Resolution Imaging Spectrometer Straylight Design", SPIE Vol.2864, pp313-321, 1996.
6. 김대석, "단색 분광기의 회절 격자 정밀 구동 메커니즘의 개발 및 성능 평가", 한국과학기술원, 석사 학위 논문, 1997
7. Diffraction Grating Handbook - Richardson Grating Laboratory
8. 박희갑, "Czerny-Turner 형 적외선 주사형 분광기의 설계 제작 및 성능 평가", 한국과학기술원, 석사 학위 논문, 1980