

단색 분광기 회절격자의 정밀 구동 기구에 관한 연구

김대석*, 최기봉*, 김수현*, 곽윤근*

A Study on Precision Drive Mechanism for Monochromator Grating

Dae-Suk Kim*, Kee-Bong Choi*, Soo-Hyun Kim* and Yoon Keun Kwak*

ABSTRACT

The extent of absorption and transmittance of the light that passes through some material is changed as the wavelength of the light varies, and which makes it possible to estimate characteristics of the material. Spectrometer is a measurement system that can analyze the characteristics of material by using this principle. Its application field is so wide that it can be applied to all the areas that are concerned with analyzing materials : biological, environmental, medical and chemical area etc. This study is focused on developing precision sine drive mechanism for grating monochromator which is the most important part of the spectrometers. It is designed to be simple in structure. It is achieved to derive basic principles to manipulate precision sine drive mechanism : it should be aligned with a condition that β , the angle between grating normal and grating rod should be the same as γ , the one between moving nut's normal and sliding guide. And also, it's found that the mis-alignments of the grating and mirrors are not the main factor in guaranteeing the linearity of sine drive mechanism. Performance evaluation is achieved by a standard sample by comparing experimental results with standard values. It results in wavelength accuracy of $\pm 0.5nm$ and resolution of $1nm$. Conclusively, it can be verified that the sine drive mechanism developed in this study is not only simple in structure, but also stable and excellent in performances.

Key Words: Spectrometer(분광광도계), Monochromator(단색분광기), Grating(회절격자), Sine-drive mechanism(사인구동기구)

1. 서론

분광광도계(spectrometer)는 빛의 파장별 물질에 따른 흡광(absorption) 및 투과도(transmittance)의 차이를 측정하여 시료의 물성치를 분석할 수 있는 계측 기기

이다. 그 적용 분야로는 생화학 물질 분석, 환경 분야에서의 오염 물질 분석, 의학·생물 분야에서의 시료 분석 및 다양한 생산 라인에서의 물질 분석 등을 들 수 있다^(1,2).

분광광도계를 구현하기 위해 빛을 분광하고 측정하는 방식에는 회절격자(grating)의 구동과 단일 광센서를 이

* 한국과학기술원 기계공학과

용한 단색분광 방식과 센서로 광다이오우드 어레이를 사용하여 회절격자의 구동 없이 파장에 대한 정보를 얻는 다중채널 광다이오우드 어레이 방식으로 구분할 수 있다.⁽⁵⁾ 다중채널 광다이오우드 어레이 방식은 한번의 측정으로 넓은 영역에 대한 정보를 얻을 수 있어 빠른 시간 내에 측정이 가능하다는 장점이 있지만, 고가이며 파장영역이 작고 고분해능 측정에 한계성을 갖는 단점을 가지고 있다. 반면에 회절격자 구동방식의 단색분광기(monochromator)는 측정 속도면에서는 단점이 있지만 고분해능을 구현할 수 있다는 중요한 장점을 갖고 있기 때문에 거의 대부분의 고분해능의 분광광도계는 회절격자 구동방식의 단색분광기를 채택하고 있다.

단색분광기는 분광광도계의 성능을 좌우하는 핵심부분으로서 이것은 회절격자를 구동시키는 구동기구에 의해 성능이 결정된다. 회절격자에 의해 분광된 빛의 파장은 회절격자 구동각의 사인(sine)함수값에 비례하며, 따라서 사인구동이 필요하게 된다. 사인구동방법은 소프트웨어에 의해 구현하는 방법과 하드웨어적으로 구현하는 방법으로 개발되어 오고 있다.⁽⁴⁾ 소프트웨어적 구동방법은 하드웨어적 구동방법에 비해 비교적 간단하면서도 용이하지만 구동 모터에 사인값을 직접 입력하기 때문에 구동기의 분해능을 높이기 위해서는 고분해능의 구동 모터가 요구되는 단점이 있다. 이에 비해 하드웨어적 구동방법은 비용대비 성능면에서 소프트웨어적 구동방법에 비해 우수한 능력을 보이고 있으며, 이러한 이유로 많은 연구가 진행되어 오고 있다.

하드웨어적 구동방법으로 캠 프로파일(cam profile)에 의해 사인구동을 구현하는 방식이 있다.⁽⁶⁾ 이 방식은 회전 액츄에이터의 구동에 의해 회절격자를 구동시킬 때 회절격자에 부착된 캠에 의해 사인구동이 이루어지며 치차의 결합에 의해 원하는 분해능을 구현한다. 하지만 캠에 의한 사인구동기구는 캠의 정밀한 프로파일 가공의 난점과 치차의 복잡성 등의 단점을 갖는다. 이러한 이유로 보다 간단한 구조인 리드 스크류에 의한 직선 구동을 회절격자의 사인구동으로 변환시키는 방식이 개발되었다.^(6,7) 이 방식은 치차의 복잡성 및 측정오차를 최소화한 방식으로, 고분해능을 얻을 수 있다. 이와 같이 사인구동기구는 단순화, 안정화 및 고성능화의 추세로 계속 발전하고 있으며, 이에 대한 연구의 필요성과 관심이 날로 증가하고 있다.

본 연구에서는 리드 스크류를 이용한 하드웨어적 방법에 의해 보다 단순하고 안정된 방식의 새로운 사인구동기

구를 개발하고자 한다. 이것을 위하여 단색분광기의 이론적 해석을 수행하여 이것에 근거한 새로운 사인 구동기구를 제시하고 설계 제작한다. 또한 사인구동에 미치는 광학적 비정렬의 영향을 해석하여 광학계와 구동계의 상관관계를 규명하며 실험에 의해 개발된 사인구동기구를 검증하여 그 우수성 및 상관관계를 입증하고자 한다.

2. 단색분광기의 광학계

2.1 회절격자 이론

Figure 1과 같이 단색분광기에서 빛을 분광시킬 때 회절격자는 다음 식으로 표현된다⁽⁶⁾.

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

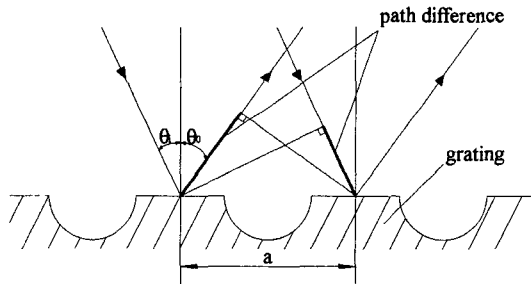


Fig.1 Diffraction of grating

여기서 θ_i 및 θ_o 는 반사형 회절격자면의 수직면과 이루는 빛의 입사각 및 회절격자에 의한 회절각이고, a 는 회절격자의 격자폭, λ 는 회절된 빛의 파장 그리고 n 은 정수이다.

단색분광기에서는 회절된 여러 차수의 파장 중 첫번째 차수를 사용한다. 그 이유는 입사광과 회절광의 벌어진 각도가 너무 커지면 광학 설계상 단색분광기가 너무 커지거나 모양이 이상해 지며, 0번째 차수는 거울과 같은 역할을 할 뿐 의미가 없기 때문이다. 또한 두번째 차수 이상은 차수가 커짐에 따라 분산의 정도는 커지지만 효율이 떨어지고 회절의 점침 현상이 발생하기 때문이다.

회절격자의 회전을 통한 주사형(scanning type)의 분광기를 설계할 때는 θ_i 와 θ_o 의 값이 회절격자가 회전함에 따라 계속적으로 변하기 때문에 식 (1)을 다른 형태로 바꾸어 사용할 필요가 있다.

Figure 2는 체르니-터너(Czerny-turner)형 광학 장치(mounting)이다. 이 경우 출력측에서 바라본 입사광

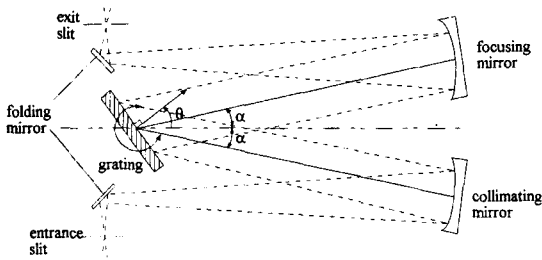


Fig. 2 Czerny-turner type mounting

과 회절광의 각도가 2α 로 고정되어 있기 때문에 식 (1)은 다음 식으로 변형할 수 있다⁽⁹⁾.

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

여기서 θ 는 회절격자의 회전각이다. 식 (2)에서 보통 이 θ 와 λ 는 사인함수의 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 입력과 파장 λ 사이에 선형의 관계를 가질 수 있도록 사인 구동기구를 도입하면 입력값의 분해능에 따라 빛의 파장 분해능을 결정할 수 있는 구동기구를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 광학 설계

체르니-터너형 단색분광기를 구성하고 있는 광학 요소는 입구 슬릿(entrance slit), 출구 슬릿(exit slit), 조준(collimating) 거울, 모음(focusing) 거울 및 회절격자이며 이들의 상대적인 위치는 광학 설계에 의해 결정되어야 한다. 본 연구에서 광학 설계는 다음의 기본 사항을 준수하며 수행되었다^(6,9): 첫째, 오목 거울의 비축(off-axis)으로 인한 수차 즉 코마(coma) 및 비점수차(astigmatism)를 최소화 하기 위해 두 거울의 간격은 빛이 회절격자의 구동에 의해 차단되지 않는 범위 내에서 가능한 작아야 한다. 둘째, 결상면상의 상을 평면에 가깝도록 하기 위해 회절격자의 위치는 모음 거울의 곡률 반경 R 에 대해 곡률 중심에서 $1/\sqrt{3}R$ 의 위치에 있어야 한다. 셋째, 전체 광학계는 대칭 구조를 이루며, 조준 거울과 모음 거울의 중심과 각 슬릿 사이를 지나는 두 직선은 평행하게 설계 되어야 한다.

본 연구에서는 200nm에서 1100nm의 파장영역을 갖는 홀로그래픽 회절격자(holographic grating)를 사용하였으며 조준 거울 및 모음 거울은 각각 200mm의 초점 거리를 갖도록 하였다. 본 연구에서 개발할 사인 구동기구에

의해 구동될 분광광도계의 사양은 Table 1과 같다. Table 1의 사양과 위의 설계 기본 사항을 준수하면서 수행한 광학 설계변수는 Table 2와 같다.

Table 1 Specifications of the spectrometer

Item	Content
Wavelength Range	200 ~ 1100 nm
Focal length	200 mm
Dispersion	4 nm / mm
Resolution	1 nm (slit width = 250 μm)
Wavelength Reproducibility	< 0.1 nm
Mounting	Czerny-turner type
Precision Driving	sine drive mechanism
F-number	6.7
Off-axis angle	11.4°

Table 2 Optical design parameters

Parameter	Description	Value
a	Grating groove width	1/1200 mm
N	Grating total groove number	40800
f	Focal length of mirror	200 mm
α	Off-axis angle	11.4°
m	Position of grating	169.2 mm
d	Slit width	250 μm

광학계의 교정은 헬륨-네온 레이저(He-Ne laser)와 텅스텐-할로젠 램프(Tunsten-halogen lamp)를 이용하여 수행되었다. 우선 헬륨-네온 레이저에 의해 광축을 조정하였으며 광축의 교정과 연계하여 최고의 효율을 얻기 위해 CCD 카메라를 이용하여 상의 윤곽과 밝기를 측정함으로써 시준 및 초점 거울의 교정을 수행하였다.

3. 회절격자 구동기구

3.1 사인 구동기구의 해석

식 (2)에서 알 수 있듯이 빛의 파장 λ 와 회절격자의 회전각 θ 사이에 사인함수의 관계가 있다. 여기에서 사인함수를 기구적으로 수행하여 파장 λ 와 모터의 스텝수 $\Delta\chi$ 사이에 선형적인 관계가 만족되도록 하는 것이 사인 구동기구의 궁극적 목적이다.

사인함수 구현의 해석을 위해 Fig.3의 기구를 고려한다. 이 그림에서 회절격자는 회절격자 막대(grating rod)와 부착되어 있으며 B점에서 힌지(hinge)에 의해 고정되어 있다고 가정하자. 회절격자 막대의 한쪽 끝은 이동 너트(moving nut)의 경사면에서 미끄럼 운동을 할

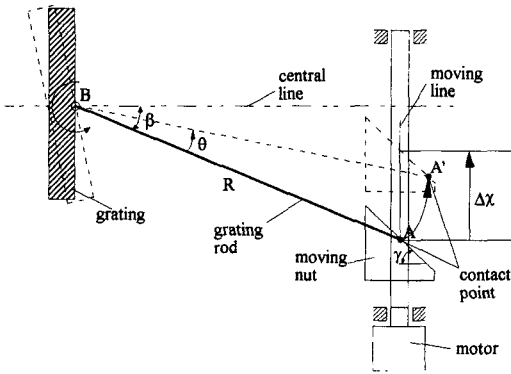


Fig. 3 Schematic diagram for deriving the relationship between ΔX and θ

수 있게 되어 있고, 이동 너트는 스텝 모터의 회전운동에 의해 리드 스크류 상에서 직선 운동한다. 초기에 회절격자 막대가 이동 나사의 경사면 A에 위치해 있을 때 스텝 모터의 회전에 의해 이동 나사가 ΔX 만큼 상향으로 이동한다고 가정하자. 이 때 회절격자 막대의 한쪽 끝은 이동 너트의 경사면에서 미끄럼 운동에 의해 A'로 이동하며 결과적으로 회절격자 막대는 각 θ 만큼 점 B에 대해서 회전 운동한다. 이 회전 운동은 회절격자를 점 B에 대해서 각 θ 만큼 회전 운동시킨다. 이 때, 회절격자 면에 수직인 방향과 회절격자 막대가 이루는 각도를 β 라 하고 이동 너트의 이동 수직 방향과 미끄럼 가이드 봉 사이의 각도를 γ 라 놓으면, 회절격자의 회전각 θ 와 모터의 스텝수 ΔX 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\Delta X = R(\sin\beta - \sin(\beta - \theta) + \tan\gamma \cos(\beta - \theta) - \tan\gamma \cos\beta) \\ = R((\sin\beta - \cos\beta \tan\gamma)(1 - \cos\theta) - (\cos\beta + \tan\gamma \sin\beta)\sin\theta) \quad (3)$$

여기서 R 은 회절격자 막대의 길이를 나타낸다. 위의 식에서 $\gamma = \beta$ 라 놓으면 ΔX 는 다음과 같다.

$$\Delta X = \frac{R \sin\theta}{\cos\beta} \quad (4)$$

식 (2)와 (4)로부터 $n=1$ 이라 놓으면, 파장 λ 는

$$\lambda = \frac{2a \cos\alpha}{R \cos\beta} \Delta X \quad (5)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 식 (5)로부터 a, R, α, β 가 변하지 않는 조건에서 λ 와 ΔX 사이에 선형적인 관계가 성립함을 알 수 있다. 이와 같이 사인 구동기구의 구현을 위

해서는 $\gamma = \beta$ 로 설계하여야 한다. 본 연구에서는 구동계의 단순화 및 제작의 정확도를 추구하기 위해 $\gamma = \beta = 0^\circ$ 으로 설계하였다.

사인 구동기구가 정확하게 설계 되었다 하더라도 광학계의 정렬이 잘못되어 있다면 스텝수와 파장 사이의 선형적인 관계가 성립되지 않기 때문에 광학계의 분해능 및 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 즉 광축이 한 평면상에 존재하고, 거울이 초점 거리에 정확히 설치되어야 하며, 회절격자의 회전 중심이 회절격자면 상의 중심축과 항상 일정하게 유지되어야 설계상의 예측과 일치하게 됨을 예상할 수 있다.

사인 구동기구에서 선형화에 관계하는 광학 설계변수는 식 (5)에서 알 수 있듯이 a, α 및 R 이다. 이 값들은 회절격자의 회전구동 위치에 관계없이 항상 일정해야 한다. a 는 회절격자의 격자 간격으로 일정하다 볼 수 있다. α 는 조준 및 모음 거울의 중심과 회절격자 중심을 연결한 선이 대칭축과 이루는 각으로 0번째 차수의 회절격자의 위치를 기준으로 두 거울에 대해서 같도록 설치되어야 한다. 만약 조준 거울과 모음 거울에서 α 를 각각 α_1 과 α_2 라 하고 이들 값이 서로 일치하지 않는다면 다음 식 (6)과 같이 빛의 파장은 회전각의 사인 및 코사인(cosine)항으로 이루어져 있으며 코사인항이 빛의 파장에 영향을 주기 때문에 비선형 구동의 원인이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

$$\lambda = (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2)\sin\theta + (\sin\alpha_1 - \sin\alpha_2)\cos\theta. \quad (6)$$

식 (6)에서, α_1 과 α_2 의 차이가 0.5° 이하가 되도록 광학계를 정렬할 수 있다면, 코사인 항이 전체의 약 0.05% 이하로 되기 때문에 선형 관계에 무시 가능한 오차로 간주할 수 있다. 그리고, 조준 거울이 정확한 초점 위치에 있다면 회절격자에 평행광이 들어 오기 때문에 회절격자 위치에 ΔR 만큼의 비정렬(mis-alignment)이 있을 때 회절격자의 중심과 미니어처 베어링(miniature bearing)의 중심간의 거리 R 은 회전각에 관계 없이 $R + \Delta R$ 로 일정하다고 볼 수 있다. 즉 회절격자의 비정렬로 인한 비선형 구동으로의 영향은 거의 없는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 구동기구의 구조 및 구동원리

Figure 4는 본 연구에서 개발된 사인 구동기구의 개념도를 나타낸다. 직선 운동을 하는 너트에 연결된 미끄럼

봉(sliding rod)은 회절격자 막대에 설치된 미니어처 베어링을 포함하고 있는 미끄럼 가이드(sliding guide)부를 통해 장착되며 너트의 직선 구동을 회절격자의 회전구동으로 변환시켜 주어 사인구동을 실현한다. 개념도에서 보듯이 가이드부와 미끄럼봉이 분리되었던 종전의 구동 방식에서 이 두 부분을 통합하여 하나의 구동부를 구현함으로써 구동계의 단순화를 이루었다.

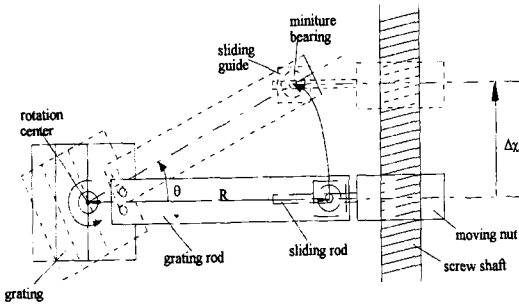


Fig. 4 Developed sine drive mechanism

Figure 5는 광학계와 구동부를 모두 포함한 전체 단색 분광기를 상부에서 바라본 모습이다. 구동계는 2상 스텝 모터 및 회절격자 막대에 회전 구동을 전달하는 직선 운동부로 구성되어 있다. 모터는 커플링(coupling)에 의해 리드 스크류와 연결되어 있다. 리드 스크류는 모터의 구동을 자유로이 전달하기 위해 볼베어링을 포함한 두 개의 하우징(housing)에 의해 지지되어 있다. 너트에는 미끄럼봉이 연결되어 있어 회절격자 막대를 통해 회절격자를 사인 구동시킨다. 회절격자의 회전각은 약 40°로 이 영역에서 사양으로 정한 전 파장을 주사할 수 있다. 회절격자의 지지부도 볼베어링에 의해 중심축이 연결되어 있기 때문에 자유로운 회전 운동을 할 수 있다. 리드스크류로 인해 발생하는 백래쉬의 영향 및 미끄럼봉 틈새로 인해 발생하는 백래쉬의 영향은 Fig. 5와 같이 너트부의 양 방향에 스프링을 비대칭적으로 설치하여 감소시켰다. 즉, 그림에서와 같이 너트부에 비대칭적으로 설치된 스프링은 리드스크류의 한 방향으로 인장력을 발생시키기 때문에 너트부의 운동에 따른 백래쉬의 영향을 감소시키며, 동시에 너트부에 한 방향의 회전력을 작용시키기 때문에 미끄럼 가이드부 틈새로 인한 백래쉬 영향을 감소시킨다.

이 시스템의 기구적 설계변수는 Table 3과 같다. 단순 모터 구동에 의하면 한 스텝 당 약 0.17nm의 파장 주사가 이루어지며 설계 사양에 따른 0.1nm이하의 파장 주사

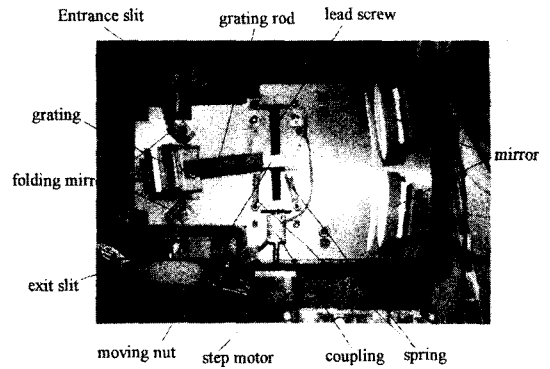


Fig. 5 Photograph of the developed monochromator

를 실현하기 위하여 마이크로 스텝핑 기법^(10,11,12)에 의해 1스텝을 6분주하여 사용하였다. 기계적 분해능은 모터의 스텝각과 리드 스크류의 피치 및 회절격자 막대의 길이에 의해 결정된다.

Table 3 Mechanical design parameters

Parameter	Description	Value
R	Grating rod rotation radius	60 mm
p	Lead screw pitch	1.25 mm
β	Reference rod angle	0°
γ	Reference guide angle	0°

4. 검증 및 성능 평가

4.1 분광 광도계의 구성

회절격자 정밀 구동 메카니즘의 성능 평가를 위해 광원부, 시료부, 광감지부, 신호처리부를 구성하였다. 광원부는 가시광선 영역의 분광 특성을 위해 텅스텐-할로겐 램프를 사용하였으며 시료부는 단색 분광기를 통과한 분광된 빛이 다른 외부의 빛에 의해 완전히 차단되어질 수 있도록 암실을 구성하였으며 시료셀의 정확한 장착을 위해 시료 고정부를 구성, 장착하였다. 광감지부는 시료셀을 통과하여 나온 각 파장별로 투과된 빛의 세기를 감지하는 부분으로 이것 또한 외부의 빛으로부터 완전히 차단하였으며 셀을 통과한 미소한 빛의 세기를 측정하기 위해 신호 증폭 기능을 갖춘 광전자 증배관(photomultiplier tube)을 사용하여 구성하였다. 그리고 이렇게 감지되어진 신호를 처리하기 위해서 주사된 파장 영역의 투과도를 측정할 수 있는 디스플레이 시스템을 LCD로 구성하여 성능 평가를 수행하였다.

Figure 6은 분광 광도계 시스템의 전체 개요도이다. 그림에서 보듯이 단색 분광기의 출력 슬릿을 통해 나온 연속적인 파장의 빛을 샘플(sample)시료를 통과시킨 후 광감지기로 감지함으로써 시료의 투과도, 흡광도, 농도 등을 측정하여 시료 물질의 특성을 분석할 수 있다.

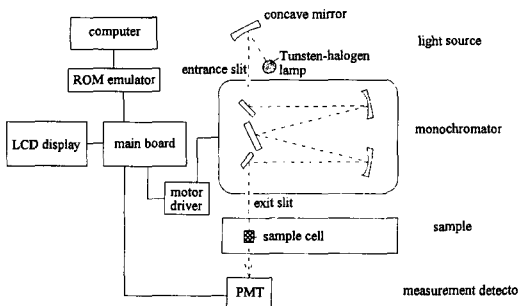


Fig. 6 Schematic block diagram of overall system

4.2 분석 및 검증

지금까지 언급된 광학계 및 구동계의 설계 요건에 따라 개발된 단색 분광기의 성능 분석 및 검증을 수행하였다. 성능 평가는 400nm~800nm까지의 파장 영역에서 한국 표준과학연구소에서 제작된 파장 교정용 인증 표준 물질 CRM5209-001을 사용하여 제공된 13점의 특성값을 측정하여 비교함으로써 수행하였다.

Figure 7은 구동기구의 비선형성에 대한 검증을 위해 $\gamma = 0^\circ, \beta = 17^\circ$ 로 기구를 설치한 후 실험한 결과값을 나타낸다. 이 그림으로부터 실험값은 모의 실험을 통한 값과 거의 일치하는 비선형의 관계가 있음을 알 수 있다.

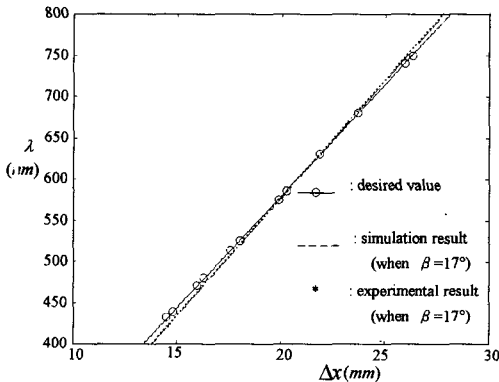


Fig.7 Nonlinearity due to mis-aligned sine-drive mechanism

Figure 8은 시준 거울과 초점 거울의 각 α_1 및 α_2 의 차이가 약 0.5° 일 때 이들의 오차로 인한 사인 구동기구의 비선형성 실험결과이다. 이론적 해석에서 이미 접근한 바와 같이 조준 및 모음 거울의 위치 오차는 비선형성에 대한 영향이 매우 작기 때문에 사인 구동 기구의 선형화에는 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

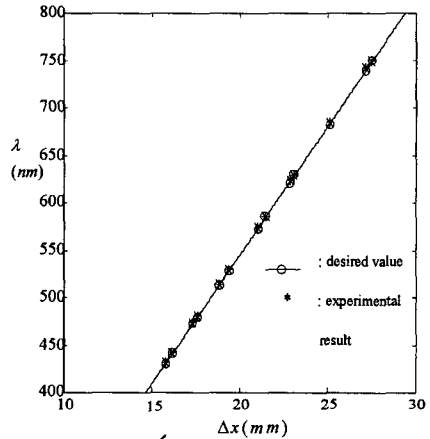


Fig. 8 Effect of mis-alignment of mirrors ($\alpha_1 - \alpha_2 = 0.5^\circ$)

Figure 9는 회절격자가 $\Delta R = 3mm$ 만큼의 위치 오차가 있을 때 이 오차에 의한 파장에 대한 영향을 실험에 의해 나타낸 것이다. 회절격자의 회전 중심과 회절격자 면의 일치 여부도 광학계의 정렬에 있어서 핵심 고려 사항이 아님을 Fig.9의 결과를 통해 알 수 있다.

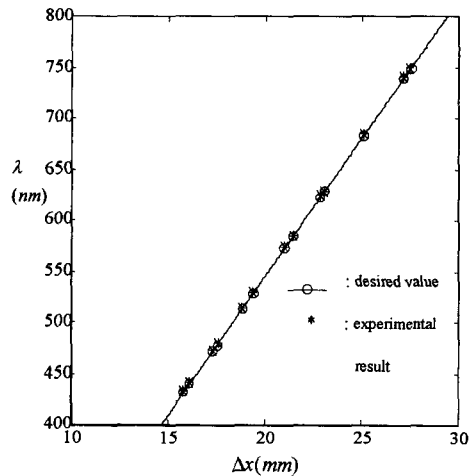


Fig.9 Effect of mis-alignment of grating ($\Delta R \cong 3mm$)

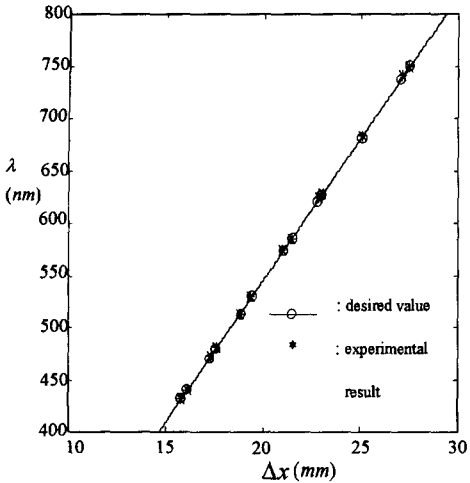


Fig.10 Experimental results with correct alignment ($\gamma = \beta = 0^\circ$)

Figure 10은 기구의 선형화 및 모든 광학계의 설치를 최대한 설계 사양에 부합되도록 한 후 얻은 단색 분광기의 실험결과를 나타낸다.

개발한 구동기구의 정확도는 표준 물질의 절대 특성값과의 비교를 통해 얻을 수 있다. 실험 결과 약 $\pm 0.5nm$ 의 파장 정확도를 얻었으며, 슬릿의 폭은 약 $250\mu m$ 까지 가능했다. 이 때의 파장 분해능은 $1nm$ 를 얻을 수 있었다. 이와 같은 해석에 따른 검증을 통해 본 연구에서 구현한 단순화된 사인 구동기구는 구조의 단순화는 물론 성능면에서도 매우 안정적이며 우수함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 단색분광기 회절격자의 정밀구동 기구에 대한 이론적 해석과 광학계의 비정렬이 단색분광기 구동계의 선형화에 미치는 영향에 대한 해석을 통해 단색분광기의 설계에 필요한 기반 이론을 유도하였다. 또한 종전의 구동방식을 개선한 단순화된 새로운 사인구동기구를 제시하였고, 이에 대한 성능평가를 수행하였다. 단색분광기 회절격자의 정밀구동 기구에 대한 해석 및 성능평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 구동기의 사인구동을 위해서는 회절격자 막대가 회절격자의 수직 방향과 이루는 각 β 와 미끄럼 가이드가 직선구동 너트의 수직방향과 이루는 각 γ 가 같아야 한다.

- (2) 비대칭적인 조준 및 모음 거울의 설치와 회절격자 면의 회전 중심의 위치 오차는 실제적으로 광학 정렬에서 발생할 수 있는 오차 범위 내에서 사인 구동 기구의 비선형화에 거의 영향을 미치지 못한다.
- (3) 이론적 해석을 통하여 개발된 단색분광기의 성능 평가 결과 약 $0.5nm$ 의 정확도 및 $1nm$ 의 파장 분해능을 얻었다.
- (4) 본 연구에서 제시된 사인구동기구는 구조적으로 매우 간단하며 성능면에서도 안정적이고 우수함이 실험을 통하여 입증되었다.

참 고 문 헌

1. Duke S. "Spectrometers Have Become Basic Tools on the Production Line", Quality Progress, pp.82~84, 1991.
2. King D. M., Kaufman Y. J., Menzel W. P. and Tanre D., "Remote Sensing of Cloud, Aerosol, and Water Vapor Properties from the moderate Resolution Imaging Spectrometer", IEEE Trans. On geoscience and remote sensing, Vol.30, No.1, pp.2~24, 1992.
3. 김동호, 김창순, 전병혁, "분광 분석기 개발", 한국 표준과학연구원, 1994.
4. Polmen C. and Loewen E., Diffraction Grating Handbook 2nd ed., Milton Roy, Rochester, New York, pp.3~11, 1994.
5. HR, HR 640 Monochromator Instruction manual (Part No.31.026.071), pp.12~13, 1986.
6. James J. F. and Sternberg R. S., The Design of Optical Spectrometers, Chapman and Hall Ltd., 2 New Fetter Lane London, pp.75~80, 191~193, 1969.
7. Oriel Corporation, Monochromators & Spectrometers, Vol.2, pp.2~20~2-21, 1994.
8. 김대석, "단색분광기의 회절격자 정밀구동 메커니즘의 개발 및 성능평가", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1994.
9. 박희갑, "Design, Fabrication, and Performance assessment of the Czerny-turner type

- infrared scanning spectrometer", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1980.
10. Pavlat J., "A New Look at Microstepping", Machine Design, pp.79~82, 1989.
11. Rahman M.F. and Poo A.N., "Application Oriented Test Procedure for Designing Microstepping Step Motor Controller", IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol 35, No.4, pp.542~546, 1988.
12. M. F. Rahman, A. N. Poo & C. S. Chang, "Approaches to design of ministepping step motor controllers and their accuracy considerations", IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol.32, No 3, pp.229~233, 1985.