



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

경북대학교 교육학석사학위논문

3D 프린터를 이용한 스마트폰 분광기 제작

교육대학원 물리교육전공

우 유 라

2018년 6월

경북대학교 교육대학원

3D 프린터를 이용한 스마트폰 분광기 제작

이 논문을 교육학석사 학위논문으로 제출함

교육대학원 물리교육전공

우 유 라

지도교수 주 영 구

우유라의 교육학석사 학위논문을 인준함

2018년 6월

위원장	인
	인
	인

경북대학교 대학원위원회

목 차

I. 서 론	1
II. 이 론	
2.1 다중 슬릿에 의한 간섭-회절무늬	3
2.2 회절격자	7
III. 실 험	
3.1 실험장치	14
3.2 실험방법	21
IV. 결과 및 토의	
4.1 분광기	30
4.2 스마트폰 분광기	36
4.3 3D프린트 스마트폰 분광기	49
V. 결론	52
참 고 문 헌	53
영 문 초 록	54

표 목차

〈표 1〉 수은등의 θ_1 에 대한 각도	23
〈표 2〉 수은등의 θ_2 에 대한 각도	24
〈표 3〉 수은등의 파장 λ 을 구한 값	24
〈표 4〉 아르곤등의 θ_1 에 대한 각도	26
〈표 5〉 아르곤등의 θ_2 에 대한 각도	26
〈표 6〉 아르곤등의 파장 λ 을 구한 값	26
〈표 7〉 네온등의 θ_1 에 대한 각도	29
〈표 8〉 네온등의 θ_2 에 대한 각도	29
〈표 9〉 네온등의 파장 λ 을 구한 값	29

그림 목차

〈그림 1〉 다중 슬릿 간섭	2
〈그림 2〉 투과격자	4
〈그림 3〉 회절격자	5
〈그림 4〉 반사격자의 원리	6
〈그림 5〉 경사면 반사위상격자	7
〈그림 6〉 분광기 전체구조	8
〈그림 7〉 스마트폰 분광기의 만든 순서	9
〈그림 8〉 3D프린터 스마트폰 분광기	11
〈그림 9〉 3D프린터 스마트폰 분광기 슬릿과 슬릿을 확대한 모습	13
〈그림 10〉 Stray light 방지를 위한 Baffle	14
〈그림 11〉 3D 프린터 분광기 구조 내부에 Baffle이 있을 때와 Baffle이 없을 때의 Stray light 차이	14
〈그림 12〉 분광기 정렬	15
〈그림 13〉 회전대에 설치한 회절격자	16
〈그림 14〉 스펙트럼 측정	18
〈그림 15〉 스마트폰 분광기 착용 모습	19
〈그림 16〉 3D프린터 스마트폰 분광기로 촬영하는 모습	20
〈그림 17〉 3D 프린터 스마트폰 분광기를 착용 모습	21
〈그림 18〉 수은등	22
〈그림 19〉 수은등을 분광기로 관찰 하였을 때 나타나는 스펙트럼	23
〈그림 20〉 아르곤등	25
〈그림 21〉 분광기로 관찰한 아르곤등의 스펙트럼	25
〈그림 22〉 네온등	28
〈그림 23〉 오른쪽에서 왼쪽 방향의 스펙트럼	28

〈그림 24〉 스마트폰분광기로 수은등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	32
〈그림 25〉 스마트폰분광기로 아르곤등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하 고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	34
〈그림 26〉 스마트폰분광기로 네온등의 스펙트럼을 ios(감도)는 500으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	36
〈그림 27〉 3D 프린터 스마트폰분광기로 수은등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으 로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	38
〈그림 28〉 Hg spectrum	39
〈그림 29〉 종이 간이 스마트폰 분광기, 3D 프린트 스마트폰 분광기의 분해능 비교	40
〈그림 30〉 스마트폰 픽셀 위치를 파장으로 변환하기 위한 추세선 공식 추출	41
〈그림 31〉 Hg spectrum intensity as a function of wavelength	42
〈그림 32〉 3D프린터 스마트폰 분광기로 아르곤등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000 으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	44
〈그림 33〉 Argon spectrum	44
〈그림 34〉 Argon spectrum intensity as a function of wavelength	45
〈그림 35〉 3D 프린터 스마트폰분광기로 네온등의 스펙트럼을 ios(감도)는 500으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정	47
〈그림 36〉 Neon spectrum	48
〈그림 37〉 Neon spectrum intensity as a function of wavelength	49

I. 서 론

파동광학실험에는 간섭, 회절, 분산, 편광, 산란 등에 대한 실험들이 있다. 분광기를 활용한 실험이 그 중에 빛의 회절 및 분산에 해당한다. 실제 물리Ⅱ 교육과정에서 파동과 빛이라는 단원이 있고 여기서 회절과 간섭을 다루게 된다. 대학교에서는 분광기와 회절격자를 이용하여 광원의 스펙트럼을 측정하는 실험을 한다.

실제 학생들은 이론만으로 수업을 하기 보단 실험 수업이 이해를 하는데 도움이 많이 된다. 그렇기 때문에 분광기 실험 또한 회절격자를 이해하기 위한 실험인 것이다. 하지만 실제로 고등학교에서 분광기를 다루기란 여러 가지 어려운 점이 있다. 따라서 분광기 실험 위한 장비를 좀 더 쉽게 구할 수 있고 간편하게 할 수 있는 방법을 고안하기 위해 본 실험을 하게 되었다. 최근 들어서 웹사이트에서 DIY (Do it yourself) 접근 방식이나 교육 봉사 프로그램의 일환으로 종이로 만든 간이 분광기 제작 방식이 소개되고 있다[1, 2]. 종이로 만든 간이 분광기는 하우징을 종이로 만들고 CD (compact disc)를 잘라서 회절격자로 사용하기 때문에 비용이 적게 들어 중고등학생들이 분광기를 제작하고 그 원리를 이해하는데 도움을 줄 수 있는 요소가 많다. 실제로 이러한 종이로 만든 분광기로 기체 방전관을 관찰해 보면 빛이 여러 개의 선 스펙트럼으로 갈라지는 것을 관찰할 수 있어서 학생들이 과학에 대한 관심을 일으키는 좋은 효과를 보인다고 할 수 있다. 하지만 관찰된 선 스펙트럼의 선폭이 매우 커서 실제 교과서에 나오는 선스펙트럼 모양과는 상당히 달라서 학생이나 교육자에게 실망을 줄 수 있다. 보통은 저렴한 부품을 사용했기 때문에 스펙트럼 선폭이 커진다고 생각하지만 자세히 살펴보면 스마트폰의 특징을 고려한 광학적 설계가 부족한 이유가 크다.

본 논문에서는 스마트폰의 광학적 특성을 고려해 스마트폰 분광기 구조를 설계하고, 3D 프린터를 이용하여 스마트폰 분광기의 제작하였다. 이렇게 제작된 스마트폰 분광기를 이용하여 기체 방전관에서 나오는 빛의 스펙트럼을 관측하고 스펙트럼 이미지를 분석하여 분해능과 같은 분광기의 성능을 평가하였다. 또한 스펙트럼 이미지를 정량적 데이터로 변환하고 기존의 분광기에서 측정한 파장 정보를 사용하여 파장에 따른 스펙트럼의 세기 정보를 추출하였다. 또한 기존의 분광기의 데이터와 종이로 만든 간이 분광기, 3D 프린터로 만든 스마트폰 분광기의 스펙트럼 데이터를 분석하고 각 분광기의 성능을 비교하였다.

따라서 이 논문에서 제안한 3D 프린터 스마트폰 분광기는 기존에 사용되어지고 있는 실험용 분광기나 종이로 만든 간이 분광기보다 훨씬 간편하고 자세하고 세밀하게 분해할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 빛, 원자, 화학 그리고 물리학 분야에서 학생들의 과학에 대한 깊은 이해를 돕는 교육 도구로 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

Ⅱ. 이 론

2.1 다중 슬릿에 의한 간섭-회절무늬 [3, 4]

다중 슬릿은 광학 기기, 물질의 분석 등에서 매우 중요하다. 1mm당 수백 개의 슬릿이 새겨진 회절격자로 고분해능 분광 분석이 가능하다. 원자나 분자 수준에서는 결정의 규칙적인 원자 배열이 회절격자처럼 작용하여 결정 구조를 밝히는 엑스선 무늬를 만든다.

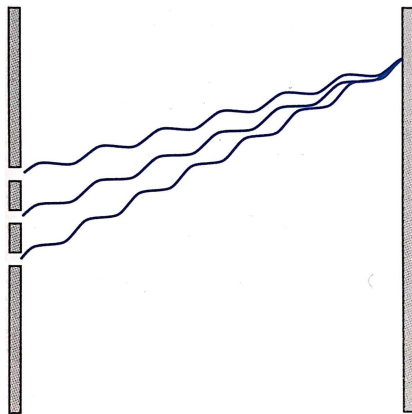


그림 1. 다중 슬릿 간섭 [5]

위 그림은 세 슬릿에서 나온 파동이 스크린에 간섭하는 모습이다. 경로차가 파장의 정수배이면 즉, 두 위상이 맞으면 극대 세기가 된다. 이중 슬릿 간섭무늬에서 극대 조건은 $a \sin \theta_m = m\lambda$ (m 은 정수)이다.

다중 슬릿에서도 a (각 슬릿의 간격)가 균일하다면 세 번째 파동은 자동적으로 극대 조건을 만족한다. 따라서 N 슬릿의 극대 조건은 다음과 같다.

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (\text{다중 슬릿 간섭 극대 조건, } m = 0, 1, 2, \dots)$$

이중슬릿 간섭 회절무늬 형태는 다음과 같다.

$$I = 4I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2}\Phi}{\frac{1}{2}\Phi} \right)^2 \cos^2 \frac{1}{2}\delta \quad (1)$$

이것은 식 $I = I_0 \left(\frac{\sin \frac{1}{2}\Phi}{\frac{1}{2}\Phi} \right)^2$ 단일슬릿 회절무늬 형태에 대한 세기로 이중슬릿에서

각 슬릿의 세기를 대체한 이중슬릿 간섭무늬 형태 $I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2}\delta$ (위상차로 표현한 광세기)로부터 이중슬릿 간섭 회절무늬의 세기를 계산할 수 있다.

여기서 Φ 는 이중슬릿의 맨 위 꼭대기와 맨 밑에서 나온 광파들 사이의 위상차를 의미하며 이는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\phi = \frac{a \sin \theta}{\lambda} 2\pi \quad (2)$$

그리고 식(1)에서 δ 는 이웃한 두 슬릿의 가운데에서 나온 광파들 사이의 위상차를 의미하며 슬릿 폭과는 다음과 같은 식이 된다.

$$\delta = \frac{a \sin \theta}{\lambda} 2\pi \quad (3)$$

따라서, 식(1)에서 I_0 는 슬릿이 하나일 때 $\theta = 0$ 에서의 세기가 된다.

2.2 회절격자 [4, 6]

회절격자는 광원을 분석하는 데 매우 유용한 장치로 일정한 간격으로 된 아주 많은 평행 슬릿들로 이루어져 있다. 전형적인 회절격자는 mm당 수백 개의 선을 가지고 있다. 다시 말해 회절구멍이나 장애물이 주기적으로 배열되어, 출사파의 위상이나, 진폭, 또는 위상과 진폭 모두에게 주기적인 변화를 주는 장치를 회절격자 (diffraction grating)라 한다. 이를 여러 번 반복하여 격자로 사용하였는데 이 장치를 통과한 파면은 불투명한 부분과 투명한 부분이 교대로 반복되는 배열에 의하여 진폭변조를 받는다. 따라서 다중슬릿 배열을 투과진폭격자라 한다.

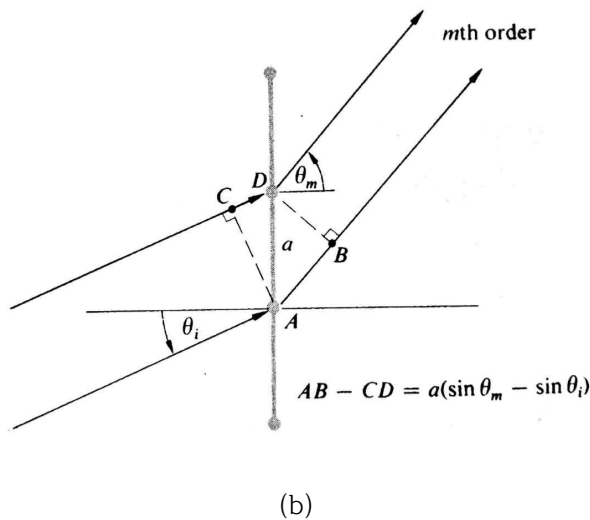
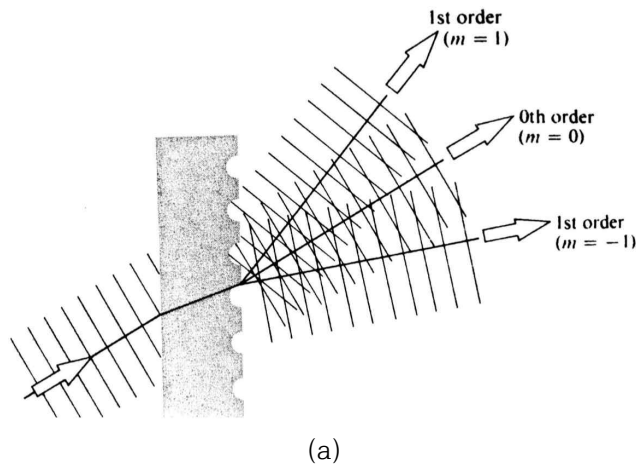


그림 2. 회절격자 [7] (a) 전형적인 회절격자 (b) 투과 진폭 격자

위 그림 2의 (a)와 같이 보다 일반적인 투과 격자는 편평하고 투명한 유리판의 표면에 나란하게 줄을 긋거나 파서 만든다. 여기서 각각의 줄은 산란광원 역할을 하고, 전체적으로는 서로 평행하고 규칙적인 선광원의 배열을 구성한다. 각 슬릿은 회절을 일으키고 이 회절된 광속은 다른 회절된 광속과 간섭무늬를 일으킨다. 진폭변조 없이 빛을 완전 투과하나, 광학적인 두께가 규칙적으로 변화된 격자는 위상변조를 일으키며, 이를 투과위상격자라고 한다. 격자에서 빛을 반사하면 표면의 주기적인 형태에 의해 산란된 빛은 명확한 위상관계를 가지고 점에 도달하는데 반사에 의해 형성된 회절무늬는 투과에 의한 것과 매우 비슷하다. 이러한 기능을 갖도록 특별하게 설계된 격자를 반사위상격자라 한다.

$$a \sin \theta_m = m\lambda \quad (4)$$

극대 회절이 일어나는 각도 이외의 다른 각도에서 나오는 빛은 회절격자의 다른 슬릿에서 나오는 빛과 거의 완벽하게 상쇄 간섭한다.

다중슬릿에서 다루었던 위 식을 다시 보면 이 식은 수직 입사에 대한 회절격자 방정식이다.

m 은 주요 최대치 값의 차수 또는 회절 차수이다.

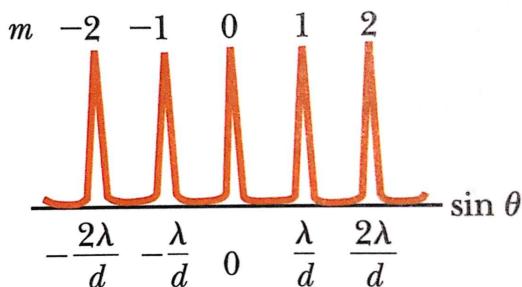


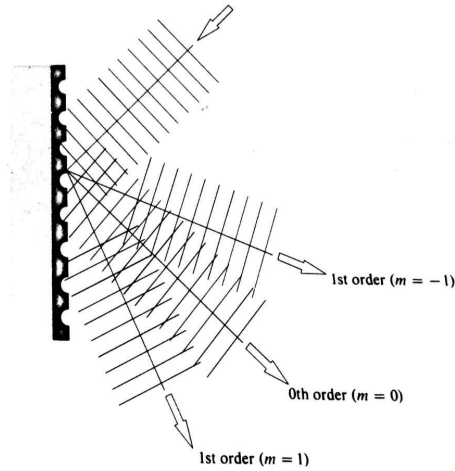
그림 3. 회절격자의 회절 무늬 세기 [8]

회절격자에서 $\sin \theta$ 에 대한 회절 무늬의 세기가 그림 3에 나타나 있다.

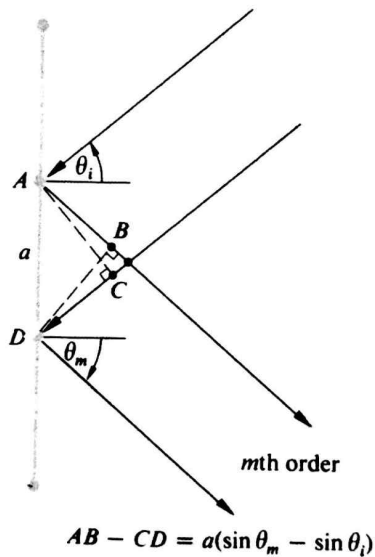
이러한 쌍들의 빛은 모두 그 방향에서 거의 없거나 사라진다. 식 (4)를 이용하면 격자 간격과 편향각 θ 를 구할 수 있다. 정수 m 은 회절무늬의 차수이다. 입사광이 여러 개의 파장으로 이루어져 있다면, 각 파장들의 빛은 식 (4)를 만족하는 특정한 각도로만 편향될 것이다. 모든 파장의 빛들은 $m=0$ 에 해당하는 $\theta=0$ 에 모인다. 이 지점을 0차 극대라 한다. 1차 극대는 $m=1$ 에 해당하는 $\sin \theta \approx \lambda/d$ 를 만족하는 각도에서 관측되며, 2차 극대는 $m=2$ 에 해당하는 보다 더 큰 각도에서 관측된다.

다시 말해, 넓고 연속적인 스펙트럼을 가진 광원에서 $m=0$ 인데 0번째 차수의 상은 항상되지 않은 $\theta=0$ 인 백색광에 해당한다. 이 지점을 0차 극대라고 한다. 1차 극대는

$m = 1$ 에 해당하는 $\sin\theta \approx \lambda/d$ 를 만족하는 각도에서 관측되며, 2차 극대는 $m = 2$ 에 해당하는 보다 더 큰 각도에서 관측된다. 이 방정식은 λ 에 의존하므로 m 이 0이 아닌 값에 약간씩 다른 각도에 대응하여 분산되는 여러 색의 상은 연속적인 스펙트럼을 형성하게 된다. 따라서 a 가 작으면 관측되는 회절 차수의 수도 작아지게 된다.



(a)



(b)

그림 4. 반사격자의 원리 [3] (a) 반사 격자에서 회절되는 빛 (b) 반사 회절 격자의 광경로차

평행광선이 비스듬히 입사하는 보다 일반적인 상황을 보면 투과(그림 2)와 반사(그림 4) 어느 경우에도 회절격자 방정식은 $a(\sin\theta_m - \sin\theta_i) = m\lambda$ 이다. 여기서는 투과격자 자체의 굴절률에 무관하다. 대부분의 입사광선은 평면거울처럼 거울반사를 한다. 회절격자 방정식으로부터 $\theta_m = \theta_i$ 의 조건은 0번째 차수인 $m = 0$ 에 해당한다. 0이 아닌 차수의 방향인 θ_m 의 값은 a 와 λ , 특히 θ_i 에 의해 결정된다. 반면 어느 한 개의 홈의 표면에 의한 회절무늬의 최대조각의 방향은 그 표면에서의 거울 반사해 해당하는데 이는 홈의 경사각 γ 에 의존하며 θ_m 과는 무관할 수 있다.

입사파가 경사면 반사격자 평면에 수직으로 입사한 경우를 생각해 보면 $\theta_i = 0$, $m = 0$, $\theta_0 = 0$ 이다.

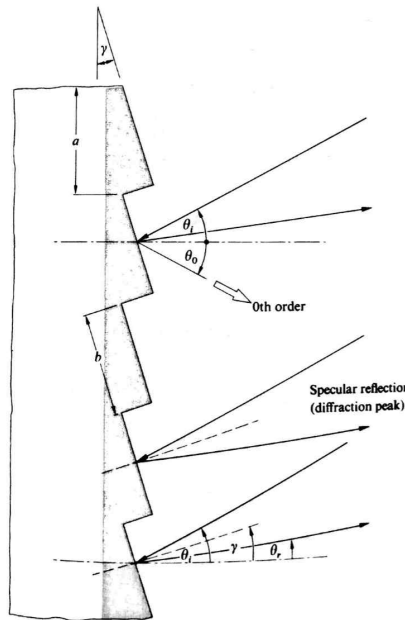


그림 5. 경사면 반사위상격자 [6]

그림 5는 경사면 반사위상격자의 단면을 나타낸 것이다. 거울반사에서 $\theta_i - \theta_r = 2\gamma$ (γ 는 홈의 경사각)이고 회절된 대부분 복사는 $\theta_r = -2\gamma$ 에서 일어난다. (입사광선과 반사광선이 격자에 수직인 법선에 대해 같은 부분에 있기 때문에 θ_r 은 음수가 된다.) $\theta_m = -2\gamma$ 인 경우, 빛의 방향은 0차가 아닌 중앙에서 어느 한 쪽의 특정차수에 대응할 것이다. 즉, λ 와 m 에 대해 $a \sin(-2\gamma) = m\lambda$ 가 성립한다.

Ⅲ. 실험

3.1 실험장치

1) 분광기

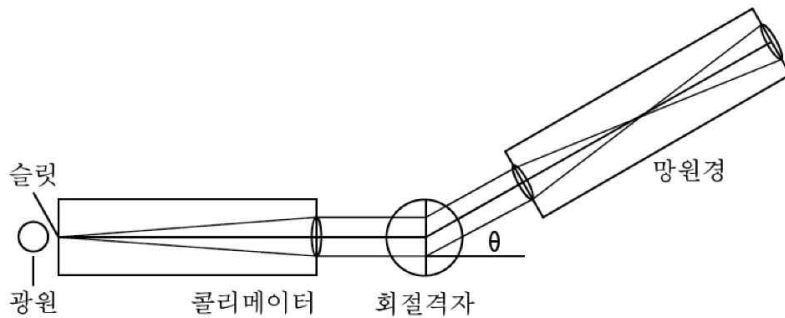
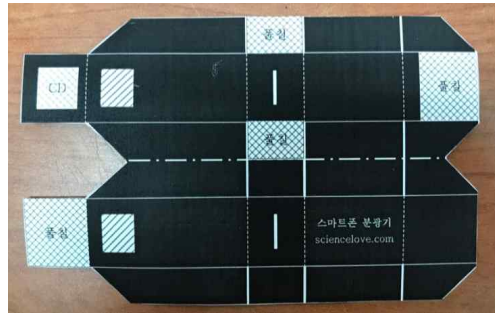


그림 6. 분광기 전체 구조

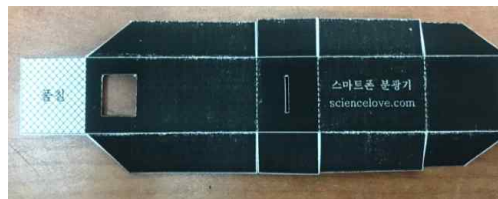
분광기의 구조는 왼쪽에 광원이 있고 광원에서 나온 빛은 슬릿을 통과하여 콜리메이터를 통하여 평행광선이 된다. 가운데 원형의 지지대 위에 회절격자가 놓여 있어서 색깔(파장)별로 분리되어 망원경으로 들어간다. 여러 가지 색깔을 포함한 광원 일 때는 회절각도 θ 가 각각의 색깔에 따라 달라져서 망원경을 조절함에 따라 각각을 볼 수 있다. 위 그림은 한 가지 색깔에 대해서만 그린 것이다.

실험에 사용하는 보통 회절격자 1mm에 500~600개 정도의 미세한 금이 그어져 있는 투과형 회절격자이다. 콜리메이터에서 렌즈의 초점위치에 있는 좁은 슬릿을 통하여 분석될 빛이 콜리메이터로 들어간다. 슬릿을 통하여 들어온 모든 빛은 렌즈에 의해 평행광선이 되어서 회절격자에 수직으로 입사하도록 해준다. 망원경은 회절격자에서 회절된 평행광선을 선명하게 관측할 수 있다. 대안렌즈의 내부에는 십자로 금이 그어진 기준선이 있어서 콜리메이터의 슬릿의 실상과 일치시킬 수 있게 되어 있다. 받침에 각도눈금이 붙어 있어 망원경에서 관측되는 빛이 회절격자로부터 회절된 각도를 측정할 수 있다. 각도 측정용 버어니어는 분광기의 기저에 원형으로 각도 눈금이 새겨져 있다. 또한 회전할 수 있도록 망원경에도 기저에 접한 쪽에 버어니어가 붙어 있어 망원경의 회전 각도를 1분까지 측정할 수 있다.

2) 종이로 만든 간이 스마트폰 분광기 [1]



(a)



(b)



(c)



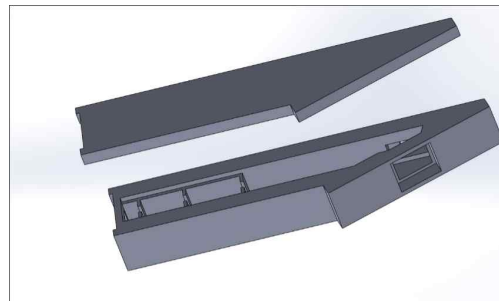
(d)

그림 7. 종이 간이 스마트폰 분광기의 만든 순서 (a) 전개도 (b) 반으로 접은 모습
(c) 조립한 모습 (d) 오른쪽 구멍에 보이는 반사형 회절격자

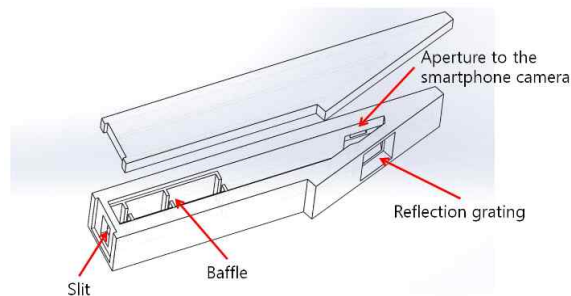
종이로 만든 간이 스마트폰 분광기를 다음과 같이 만들 수 있으며 순서를 그림 7에도 나타내었다. 먼저 학생들이 사용하는 (a) 스마트폰 분광기 용지를 프린트 한 뒤에 모양에 맞게 자른다. 그리고 (b) 빛이 들어오는 반사 회절 격자를 대신해 CD를 알맞게 오려 부착한다. 그래서 완성하면 (c)와 (d)의 모습이 된다. 이 슬릿을 통해 들어온 광원이 CD에 반사되면서 색깔(파장)별로 분리되는 것이다. 분광기에서는 여러 스펙트럼을 보기 위해서 망원경을 좌우로 돌려야하는 반면에 스마트폰 분광기로는 한 광원에 대한 스펙트럼들을 스마트폰 카메라 렌즈를 통해 한꺼번에 확인할 수 있다는 차이점이 있다.

3) 3D 프린터 스마트폰 분광기

3D 프린터 스마트폰 분광기의 형태는 그림 8과 같다. 반사 회절 격자를 위 분광기에 부착하고 분광기를 카메라에 고정을 시킨다. 광원에서 나온 빛이 슬릿을 통과하여 반사 회절 격자에서 파장별로 분리되어 반사되면서 카메라 렌즈를 통해 관찰이 가능하고 촬영 또한 가능한 형태이다. 스마트폰에 부착할 때는 슬릿을 통과하는 빛을 제외한 외부의 빛이 분광기나 스마트폰 카메라에 들어올 수 없도록 완전히 차단해야 한다.



(a)



(b)

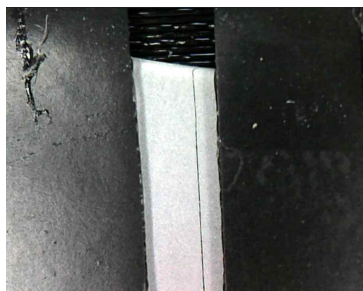
그림 8. 3D프린트 스마트폰 분광기 CAD 이미지
(a) 옆에서 본 모습 (b) 분광기 구조

3D 프린터 스마트폰 분광기의 슬릿을 자세히 확대한 모습은 그림 9에 나와 있다. 그림 8의 스마트폰 분광기와는 달리 3D 프린터 스마트폰 분광기에는 매우 좁은 슬릿이 부착되어 있다. 슬릿의 폭을 측정하기 위해서 USB(universal serial bus) 현미경을 사용하여 분광기의 슬릿을 촬영하고 동일한 배율에서 현미경 자를 촬영하여 슬릿 폭을 측정하였다. 그림 9-(c)와 9-(d)는 동일한 배율에서 측정한 사진이다. 그림 9-(c)에서 슬릿의 제일 작은 눈금 하나가 10마이크론이다. 따라서 제일 큰 눈금은 100마이크론이 된다. 그림 9-(d)에서 슬릿의 폭은 30마이크론 정도이다.

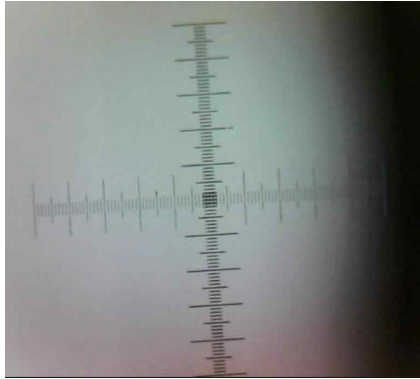
그리고 3D 프린터 스마트폰 분광기의 내부에는 미광(stray light)을 방지하기 위한 구조를 갖추고 있다. 그 모습은 그림 10과 같다. 미광을 방지하기 위해서 그림 10-(a), (b)의 배플(baffle)을 그림 10-(c)와 같이 분광기 안에 넣는다. 그리고 배플이 있음으로 인해서 미광을 방지할 수 있는지를 비교해보면 그림 11-(a)와 같이 있을 때는 스펙트럼의 구조가 선명하였지만 그림 11-(b)와 같이 없을 때는 미광이 굉장히 퍼져 있는 모습을 볼 수 있다. 미광은 주로 슬릿에 입사각이 큰 광선이 스펙트로미터 하우징 벽면에 맞으면서 산란되는 현상에 의해서 발생한다. 자세한 이론적 계산은 조명 설계소프트웨어로 시뮬레이션을 필요로 하지만 여기서는 이론적 계산 대신 그림 11에 나온 것과 같이 배플 구조가 있을 때와 없을 때의 실험 결과를 비교하는 것으로 그 효과를 증명하였다.



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 9. 3D프린터 스마트폰 분광기 슬릿 사진 (a) 저 배율 (b) 중 배율
(c) 고 배율에서 사용한 현미경 자 (d) 고 배율



(a)



(b)



(c)

그림 10. 미광 방지를 위한 배플구조

(a) 옆에서 본 모습 (b) 위에서 본 모습 (c) 배플을 3D 프린터 분광기 내부에 장착한 모습



(a)



(b)

그림 11. 3D프린터 분광기 구조 내부에 배플이 있을 때와 배플이 없을 때 스펙트럼 차이 (a) 배플이 있을 때 (b) 배플이 없을 때

3.2 실험방법

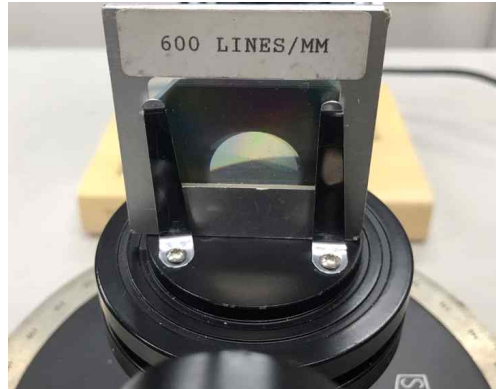
1) 분광기 정렬

분광기를 평평하고 안정된 실험대 위에 설치한다. 이때 분광기 밑에 있는 높이나 조절나사들을 조절하여 분광기가 수평이 되도록 한다. 망원경과 콜리메이터를 받치고 있는 지렛대의 양쪽에 두 개의 조절나사를 잘 조절하여 수평이 되도록 한다. 망원경이 분광기에 수직인 회전축을 중심으로 잘 회전할 수 있도록 해준다. 망원경을 들여다보고 가운데 십자선이 명확하게 보이도록 대안렌즈를 앞뒤로 조절한다. 그리고 십자선의 한 선이 수직이 되도록 돌려준다. 망원경을 들여다보면서 오른쪽의 조절 손잡이를 조절하여 무한대에 초점을 맞춘다. 콜리메이터 끝에 붙어 있는 슬릿을 조금 열고 콜리메이터와 망원경을 나란하게 한다. 망원경을 들여다보고 슬릿을 통해 들어오는 밝은 빛을 화면 가운데 오도록 한다. 콜리메이터에 붙어 있는 초점조절 나사를 조절하여 망원경으로 슬릿의 선명한 상을 볼 수 있도록 한다. 그리고 슬릿의 폭을 최대한 줄여 상을 가늘게 하고 이 선과 십자선의 수직과 일치시킨다. 망원경의 고정 나사를 조여 준다.



그림 12. 분광기 정렬

2) 회절격자 설치하는 법



(a)



(b)



(c)

그림 13. 회전대에 설치한 회절격자 (a) 회절격자(600lines/mm) (b) 회절격자가 버어니어 눈금 0°와 수평 (c) 회절격자가 버어니어 눈금 180°와 수평

가운데 있는 회전대의 밑 부분을 회전시켜 그 회전대 양쪽의 버어니어 눈금이 0°와 180°를 가리키도록 한 후 더 이상 회전하지 못하도록 고정한다. 회절격자를 가운데의 설치대에 끼운다. 이때 회절격자로 불빛을 보아서 회절격자의 격자선이 그려져 있는 방향을 알아내고, 그 격자선이 정확하게 수직이 되도록 설치대에 끼운다. 콜리메이터의 슬릿 앞에 광원을 설치한 후, 망원경을 들여다보아 슬릿을 통해서 들어오는 가는 불빛이 선명하게 보이도록 '분광기정렬'에서처럼 조절을 다시 한다. 망원경을 회

전시켜서 어느 각도에 이르러 회절 된 무지개 색깔의 스펙트럼이 화면의 중앙에 배치되어 있는지 확인한다. 그렇지 않다면 회절격자가 수직으로 잘 놓이지 못한 경우일 것이다. 회절격자를 미세하게 기울여서 스펙트럼을 화면의 중앙에 오도록 한다. 망원경을 콜리메이터와 다시 나란하게 하여서 이때의 망원경의 각도가 0을 가리키도록 적당히 조절한다.

3) 스펙트럼 측정법



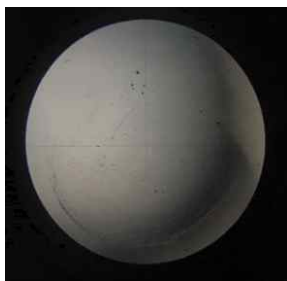
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 14. 스펙트럼 측정 (a) 수은등 (b) 아르곤등 (c) 네온등 (d) 망원경 속 십자선

스펙트럼을 측정하고자 하는 광원을 켜서 슬릿에 밀착하여 슬릿 속으로 불빛이 들어가도록 한다. 여기서 그림 14-(a)는 수은등을 그림 14-(b)는 아르곤등을 그림 14-(c)는 네온등을 각각 나타내고 있는 등이다. 망원경을 들여다보고 광원에서 슬릿을 통과한 빛을 관측한다. 잘 되어 있지 않으면, 3.2-2) <회절격자 설치법>에서의 방법을 되풀이한다. 망원경을 회전시키면 색깔 별로 분리된 스펙트럼들을 볼 수 있을 것이다. 각각의 색깔에 대하여 그림 14-(d) 화면속의 십자선의 수직선에 일치시키고 그때의 각도를 기록해 둔다. 이때 각각의 무늬들의 색깔을 같이 적어두어 참고하도록 한다. 그리고 광원에 따라서 너무 많은 색으로 분리되는 경우가 있는데, 그중 밝은 것들 10개정도만 측정하여도 좋다. 측정한 각도들로부터 파장을 계산하여 기존의 알려진 값과 비교한다. 광원을 바꾸어서 위의 측정 과정을 되풀이한다.

4) 종이로 만든 간이 스마트폰 분광기

스마트폰 카메라에 잘 고정시킨 뒤 광원 가까이에 흔들리지 않도록 고정시켜준다. 카메라 어플에 들어가서 전문가 모드로 설정한 뒤 빛의 세기와 빛의 노출 시간을 조절하고 감도를 알맞게 설정한 뒤 각 시간마다의 촬영을 하고 어떻게 맞췄을 시 여러 가지 선스펙트럼이 가장 선명하게 측정되는지 관찰한다. 분광기로 측정한 스펙트럼과 비교해보고 광원을 바꾸어서 위의 측정 과정을 되풀이 한다. 실험에 사용된 스마트폰은 LG사의 G4 이다.



그림 15. 스마트폰 분광기 착용 모습

5) 3D프린트 스마트폰 분광기



(a)

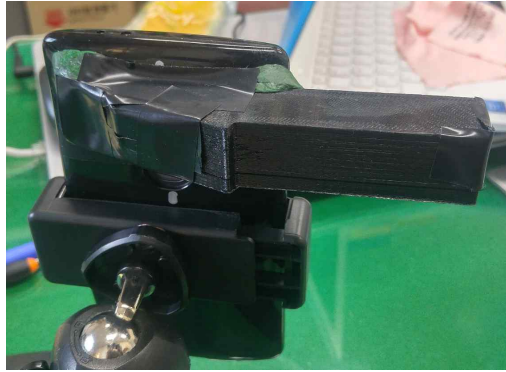


(b)



(c)

그림 16. 3D프린터 스마트폰 분광기로 촬영하는 모습
(a) 수은등 (b) 아르곤등 (c)네온등



(a)



(b)

그림 17. 3D프린트 스마트폰 분광기를 착용 모습 (a) 뒷 모습 (b) 옆 모습

3D 프린트 스마트폰 분광기를 카메라 중심에 맞춰서 케이스에 부착해준다. 여기서 그림16-(a)는 수은등, 그림16-(b)는 아르곤등 그림16-(c)는 네온등을 나타낸다. 슬릿을 통하여 광원의 빛이 들어와 반사 회절격자에 반사되어 색깔(파장)별로 분리되면서 카메라 렌즈로 스펙트럼을 볼 수 있는 원리이다. 실험에는 edmund optics사의 #43-751 반사 회절 격자를 사용하였다. 이 반사형 회절격자는 비교적 가격이 저렴하면서도 가시광선에서 좋은 효율을 보이는 경사면 반사 회절격자이다. 슬릿을 광원 가까이 가져간 뒤 움직이지 않게 고정시킨다. 이때 움직임을 방지하기 위해 삼각대를 사용한다. 카메라 어플에 들어가서 전문가 모드로 설정한 뒤 빛의 세기와 빛의 노출 시간을 조절해가며 사진을 찍고 어떻게 맞췄을 시 스펙트럼이 가장 선명하게 측정되는지 찾고 촬영한다. 빛이 들어오는 시간과 빛의 세기를 조절하고 감도를 알맞게 설정하면서 여러 가지 선스펙트럼들을 관찰할 수 있었다. 분광기로 측정한 스펙트럼과 비교해보고 광원을 바꾸어서 위의 측정 과정을 되풀이한다. 실험에 사용된 스마트폰은 LG사의 G4 이다.

IV. 결과 및 토의

4.1 분광기

기존의 분광기를 이용하여 여러 가지 기체 방전관의 스펙트럼을 관찰하고 각 선 스펙트럼의 파장을 측정하고자 한다. 광원은 수은등, 아르곤등, 네온등 총 세 가지를 사용하였다.

1) 수은등(Mercury)

수은등은 겉보기에 파란 빛만 주로 보이지만, 분광기를 이용하면 여러 개의 스펙트럼선을 관찰할 수 있다.

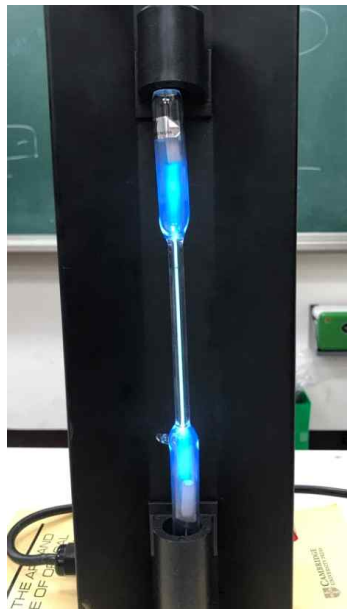


그림 18. 수은등

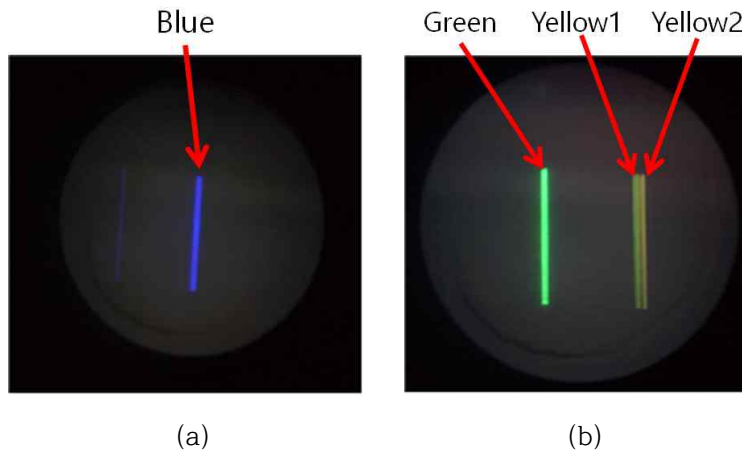


그림 19. 수은등을 분광기로 관찰 하였을 때 나타나는 스펙트럼 (a) 각도가 $96^{\circ}29'$ 일 때 나타나는 파란색 스펙트럼 (b) 각도가 각각 $100^{\circ}05'$, $101^{\circ}04'$, $101^{\circ}22'$ 로 초록, 노랑1, 노랑2의 순서대로 나타난 스펙트럼

수은등에서 제일 처음 나타나는 각도는 그림 19-(a)과 같이 파란색이고 그림 19-(b)와 같이 두 번째는 초록색 세 번째와 네 번째는 노란색을 띤다. 파란색만 다른 스펙트럼과 거리가 있었고 나머지 선명한 스펙트럼은 가까이 있는 것을 발견할 수 있다. 이 외에 다른 빛은 관찰하기 힘들었다. 이는 왼쪽과 오른쪽 모두 동일하였고 그에 대한 각도를 다음과 같이 계산 하였다. 표 1에서 θ_1 은 왼쪽의 각도를 측정한 것이고, 표 2의 θ_2 는 오른쪽의 각도를 측정한 것이다. 각 표에서 분(arc minute)으로 측정한 가도를 소수점을 포함한 도로 환산하였다.

①왼쪽(θ_1)

표1. 수은등의 θ_1 에 대한 각도

색깔	θ_1	θ_1 각도($^{\circ}$)
Blue	192°	192
Green	196°	196
Yellow1	$197^{\circ}12'$	197.2
Yellow2	$197^{\circ}16'$	197.27

②오른쪽(θ_2)

표2. 수은등의 θ_2 에 대한 각도

색깔	θ_2	θ_2 각도($^\circ$)
Blue	161.5°20'	161.7
Green	157.5°13'	157.41
Yellow1	156°25'	156.4
Yellow2	156°15'	156.3

③결과 값

위의 θ_1 과 θ_2 를 통해 입사된 파장 λ 를 식 $a \sin(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}) = m\lambda$ 을 통해 구할 수 있다. 위의 실험에서 사용한 슬릿은 600 lines/mm 이므로 간격 $a = 1.67\mu\text{m}$ 이다.

표3. 수은등의 파장 λ 을 구한 값

색깔	λ 파장(nm)
Blue	436.435
Green	551.86
Yellow1	582.089
Yellow2	584.435

수은등 기체의 스펙트럼은 파란색, 초록색, 노란색이 관찰되었다. 분광기의 왼쪽의 각도는 표 1과 표 2의 측정 각도를 파장을 구하는 식에 대입하여 계산한 값이 표 3에 나와 있다. 구한 파장의 값을 nm 로 나타내었다. 육안으로 관찰한 스펙트럼 사이의 거리처럼 실제 계산한 결과 값은 파란색과 초록색이 가장 넓은 거리를 두고 있었으며 노란색1과 노란색2는 서로 아주 근접해 있다는 것을 알 수 있었다.

2) 아르곤등(Argon)

두 번째로 사용한 아르곤등은 보라색 빛을 띠고 있다. 그러나 수은등과 마찬가지로 분광기를 이용하여 여러 스펙트럼선을 관찰할 수 있다.



그림 20. 아르곤등

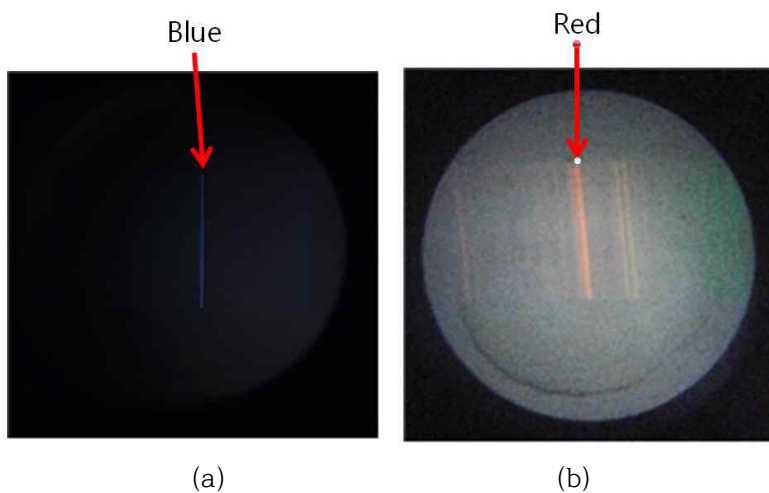


그림 21. 분광기로 관찰한 아르곤등의 스펙트럼 (a) 파란선 (b) 빨간선
아르곤등은 수은등에 비해서 빛이 매우 약한 편이었다. 따라서 대부분 희미한 스펙

트럼을 가지고 있었고 그중에서 가장 선명한 그림 21-(a) 파란색과 그림 21-(b) 빨간색의 스펙트럼을 차례대로 측정해 보았다. 두 스펙트럼 또한 거리를 두고 관찰할 수 있었다. 표 4에서 θ_1 은 왼쪽의 각도를 측정한 것이고 표 5의 θ_2 는 오른쪽의 각도를 측정한 것이다. 각 표에서 분으로 측정한 각도를 소수점을 포함한 도로 환산하였다.

①왼쪽(θ_1)

표 4. 아르곤등의 θ_1 에 대한 각도

색깔	θ_1	각도 $\theta_1(^{\circ})$
Blue	97.5°21'	97.85
Red	105.5°05'	105.58

②오른쪽(θ_2)

표 5. 아르곤등의 θ_2 에 대한 각도

색깔	θ_2	각도 $\theta_2(^{\circ})$
Blue	63.5°01'	63.52
Red	57°59'	57.92

③결과 값

위의 θ_1 과 θ_2 를 통해 입사된 파장 λ 를 식 $a \sin(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}) = m\lambda$ 을 통해 구할 수 있다. 위의 실험에서 사용한 슬릿의 간격 $a = 1.67\mu m$ 이다.

표 6. 아르곤등의 파장 λ 을 구한 값

색깔	λ 파장(nm)
Blue	491.97
Red	674.70

아르곤등은 빛이 매우 약함에도 불구하고 광원에 대한 기체의 스펙트럼은 육안으로는 파란색과 빨간색을 선명하게 관찰할 수 있었다. 그리고 실제 촬영을 하였을

때에는 육안으로 관찰하기에는 굉장히 색이 열었던 주변의 다른 스펙트럼도 볼 수 있었다. 표 4과 표 5의 측정 각도를 파장을 구하는 식에 대입하여 계산한 값이 표 6에 나와 있다. 구한 파장의 값을 수은등과 동일하게 nm 로 나타내었다. 육안으로 관찰한 스펙트럼 사이의 거리처럼 실제 계산한 결과 값은 파란색과 빨간색은 거리를 두고 있었으며 빨간색 주변의 다른 스펙트럼들은 근접해 있다는 것을 알 수 있었다.

3) 네온등(Neon)

마지막으로 네온등은 수은등과 아르곤등에 비해 매우 강한 광원을 가지고 있었다. 이를 분광기를 사용하여 스펙트럼을 관찰해 보았다.

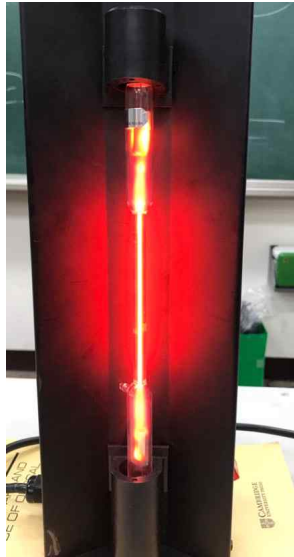


그림 22. 네온등

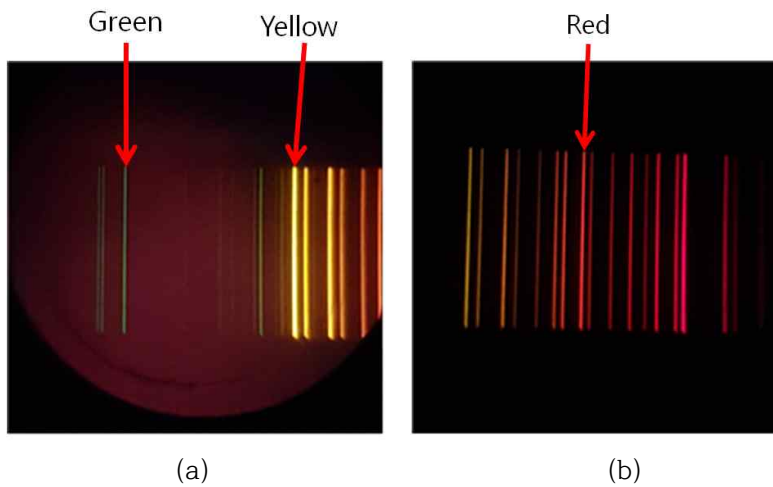


그림 23. 네온 등의 스펙트럼

(a) 단 파장 부분 또는 녹색 부분 (b) 장 파장 부분 또는 적색 부분

네온등은 굉장히 강한 빛을 가지고 있다. 그래서 스펙트럼 또한 무수히 많이 있었다. 그 중에서 가장 강한 빛을 그림 23-(b)에서 그림 23-(a)의 순서로 빨강, 노랑, 초록으로 측정되었다. 다음 표에서 θ_1 은 왼쪽의 각도를 측정한 것이고 θ_2 는 오른쪽의 각도를 측정한 것이다. 각 표에서 분으로 측정한 각도를 소수점을 포함한 도로 환산 하였다.

①왼쪽(θ_1)

표 7. 네온등의 θ_1 에 대한 각도

색깔	θ_1	각도 $\theta_1(^{\circ})$
Green	196°17'	196.28
Yellow	198°25'	198.42
Red	200°	200.0

②오른쪽(θ_2)

표 8. 네온등의 θ_2 에 대한 각도

색깔	θ_2	각도 $\theta_2(^{\circ})$
Green	158°04'	158.67
Yellow	156°24'	156.40
Red	154°22'	154.27

③결과 값

위의 θ_1 과 θ_2 를 통해 입사된 파장 λ 를 식 $a \sin(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}) = m\lambda$ 을 통해 구할 수 있다. 위의 실험에서 사용한 슬릿의 간격 $a = 1.67\mu m$ 이다.

표 9. 네온등의 파장 λ 을 구한 값

색깔	λ 파장(nm)
Green	538.32
Yellow	598.75
Red	649.57

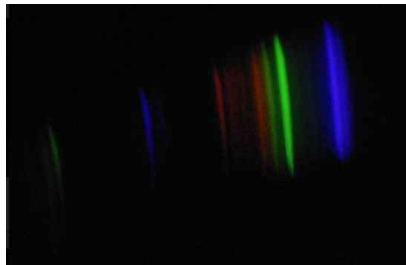
네온등의 광원은 보기에다 굉장히 강한 빛을 띠고 있고 실제 기체의 스펙트럼을 관찰함에 있어서도 수은등과 아르곤등에 비해서 매우 다양한 스펙트럼을 관찰할 수 있었다. 그 중에서 초록색, 노란색, 빨간색이 대표적인 색이었고 이 색들 또한 하나의 스펙트럼이 아니라 수많은 스펙트럼을 이루고 있었다. 표 7과 표 8의 측정 각도를 파장을 구하는 식에 대입하여 계산한 값이 표 9에 나와 있다. 구한 파장의 값을 위의 광원들과 동일하게 nm 로 나타내었다. 네온등은 수은등과 아르곤등처럼 넓은 거리를 두고 있지는 않았다. 동일한 색 계열의 수많은 스펙트럼이 서로 근접해 있었기 때문에 파장 λ 의 값 사이에도 여러 스펙트럼들을 관찰할 수 있었다. 그리고 네온등은 다른 등에 비해서 매우 밝은 편이라 아르곤등보다 스펙트럼을 관찰하기에는 훨씬 수월했다.

4.2 종이로 만든 간이 스마트폰 분광기

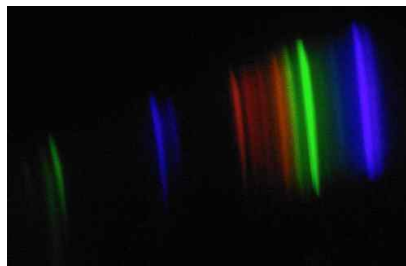
종이로 만든 간이 스마트폰 분광기를 사용해서 기존의 분광기로 측정했던 기체 방전관 세 가지에 대한 스펙트럼을 다시 관찰하였다.

1) 수은등

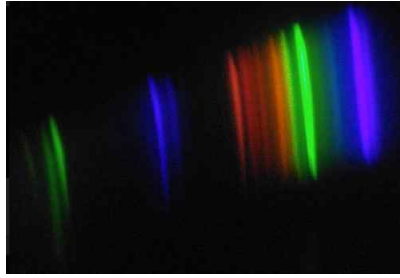
감도는 1000으로 설정하였고 빛의 세기가 각각 다르기 때문에 빛의 노출 시간을 그림 24와 같이 (a) 1/30s, (b) 1/15s, (c) 1/8s, (d) 1/4s, (e) 1/2s, (f) 1s로 나누어 측정한 것이다. 시간을 짧게 했을 때 빛이 강한 파랑색, 초록색, 노란색이 보였고 빛의 노출 시간을 점차 늘릴수록 기존의 빛은 강해지고 보이지 않던 보라색, 빨간색과 기존 같은 색의 여러 가지 스펙트럼이 보여 진다. 실험용 분광기에 비해서 선폭이 상당히 크지만 노출 시간을 늘림에 따라서 선의 밝기가 밝아짐을 알 수 있다. 맨 눈으로 보기 힘들었던 선들도 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만 분해능이 좋지 않기 때문에 스펙트럼에 따른 파장을 구하기는 힘들었다.



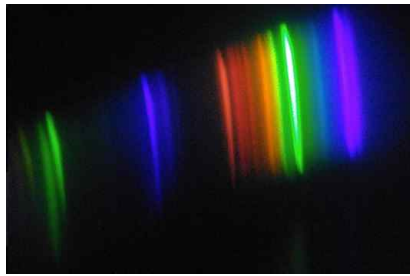
(a)



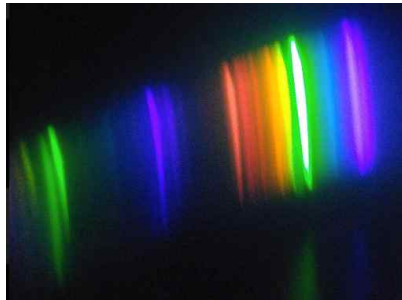
(b)



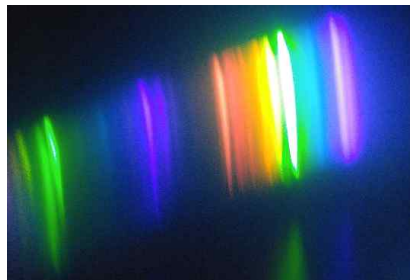
(c)



(d)



(e)

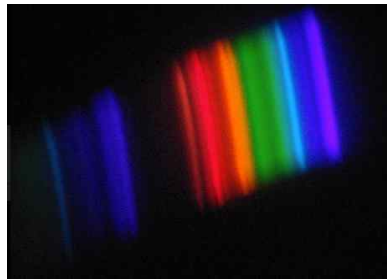


(f)

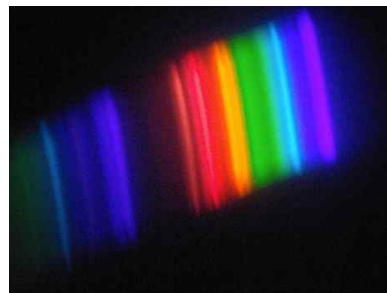
그림 24. 간이 스마트폰 분광기로 수은등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) 1/30s (b) 1/15s (c) 1/8s (d) 1/4s (d) 1/4s (e) 1/2s (f) 1s

2) 아르곤등

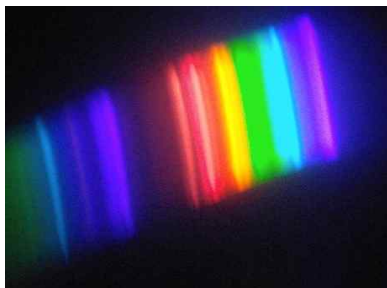
아르곤등은 빛의 세기가 세 가지 중 가장 약한데도 불구하고 시간을 다른 등보다 길게 측정을 하여서 여러 가지 스펙트럼을 관찰하기 수월하다. 감도는 1000으로 설정을 하였고 빛의 노출 시간은 그림 25과 같이 (a) 1/4s, (b) 1/2s, (c) 1s, (d) 2s로 네 번 측정을 하였다. 시간을 길게 할수록 기존의 빛의 세기가 강한 것을 점점 밝아지고 약한 빛들이 잘 관찰이 된다. 기존에 관찰할 수 없었던 초록색이 관찰이 되고 같은 여러 가지 색의 스펙트럼들을 볼 수 있다. 수은등과 마찬가지로 배플 구조가 없고 빛의 차단이 완전히 되지 않아 분해능이 좋지 않아서 스펙트럼이 뚜렷하지 않아서 파장을 구하기 힘들었다.



(a)



(b)



(c)



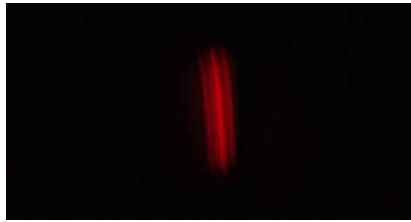
(d)

그림 25. 간이 스마트폰 분광기로 아르곤등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) 1/4s (b) 1/2s (c) 1s (d) 2s

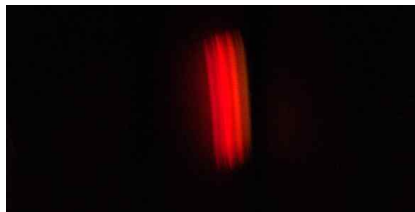
3) 네온등

네온등은 빛의 세기가 매우 강하여 감도를 500으로 설정하였고 빛의 노출 시간을 최소한으로 하여 그림 26과 같이 (a) 1/6000s, (b) 1/4000s, (c) 1/2000s, (d) 1/1000s, (e) 1/500s, (f) 1/250s, (g) 1/125s로 측정한 것이다. 스펙트럼의 밝은 부분이 점차 강해지는 것을 볼 수 있고 빛의 노출시간이 길어질수록 기존에 볼 수 없던 스펙트럼들을 관찰할 수 있었으며 선명한 스펙트럼관찰은 힘들다. 빛의 강한 부분으로 인해 다른 스펙트럼을 관찰하는데 어려움이 있다. 또한 종이 스마트폰 분광기에는 배플이 없어 미광을 막지 못해서 스펙트럼 빛이 퍼지게 보인다는 것도 알 수 있다.

다른 등과 마찬가지로 배플 구조가 없고 빛의 차단이 완전히 되어지지 않아 분해능이 좋지 않아서 스펙트럼이 뚜렷하지 않아서 파장을 구하기 힘들었다.



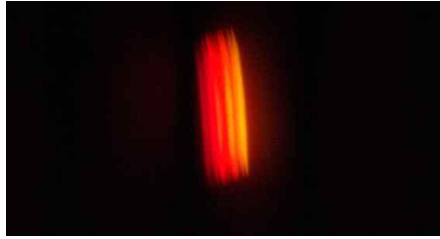
(a)



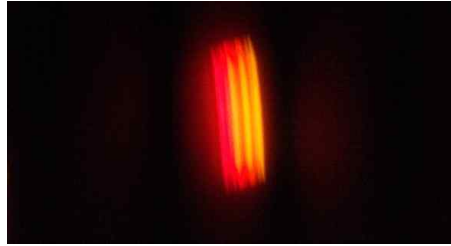
(b)



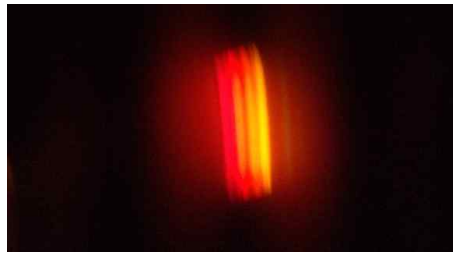
(c)



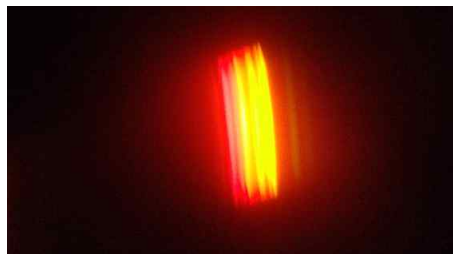
(d)



(e)



(f)



(g)

그림 26. 간이 종이형 스마트폰 분광기로 네온등의 스펙트럼을 ios(감도)는 500으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) 1/6000s (b) 1/4000s (c) 1/2000s (d) 1/1000s (e) 1/500s (f) 1/250s (g) 1/125s

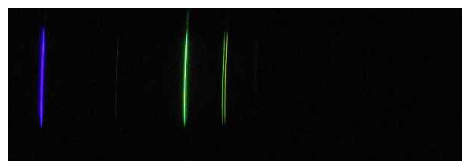
4.3 3D 프린터로 만든 스마트폰 분광기

3D 프린터를 이용한 스마트폰 분광기로 3가지 기체 방전관의 스펙트럼을 촬영하였다. 기체 방전관의 종류는 앞서 두 실험에서 사용한 수은등, 아르곤등, 네온등이며 기존의 분광기로 측정한 특정 선 스펙트럼의 파장과 이미지 프로세싱을 이용하여 파장에 따른 스펙트럼의 세기 변화 데이터를 추출하였다.

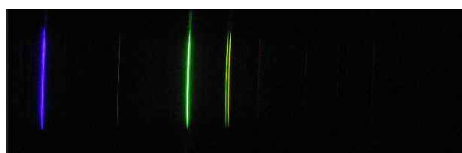
1) 수은등

수은등 기체의 스펙트럼을 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰할 수 있다. 여기서는 수은등의 스펙트럼을 스마트폰 분광기로 노출 시간을 달리하면서 촬영하고 파장에 따른 스펙트럼 곡선을 추출하는 결과를 얻어 내었다.

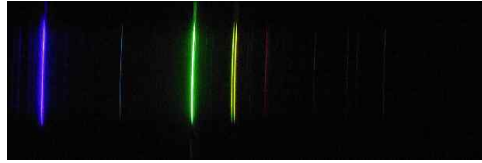
분광기에서의 수은등 광원은 파란색, 초록색, 노란색이 관찰되었다. 그림 27-(a)를 보면 수은등의 보이는 색 또한 파랑, 초록, 노란색이다. 여기서 스마트폰 전문가 모드로 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 각각 그림 27-(a) 1/4s, (b) 1/2s, (c) 1s, (d) 2s, (e) 4s로 다르게 하여 측정한 결과 기존에는 파란색, 초록색, 노란색만 보이던 스펙트럼이 빛을 받아들이는 시간이 길수록 비슷한 색의 다른 선 스펙트럼들이 관찰되고 잘 보이지 않던 빨간색이 발견되는 반면 기존에 보이던 색들은 빛이 너무 밝아 퍼지는 모습을 볼 수 있다. 이는 분광기로 관찰할 때도 발견하기 힘든 어두운 부분이 빛의 시간을 늘리면서 관찰된 것이다. 기존 스마트폰분광기와 비교를 하더라도 3D 프린트 스마트폰 분광기가 빛의 차단이 훨씬 효과적이어서 더욱 선명하고 정확한 스펙트럼을 관찰할 수 있다.



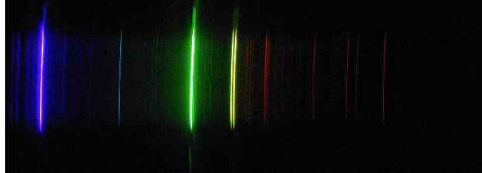
(a)



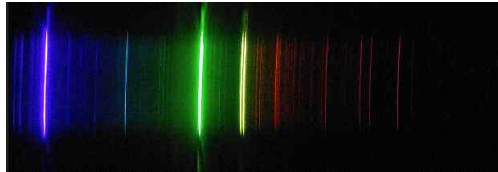
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 27. 3D프린터 스마트폰분광기로 수은등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) $1/4s$ (b) $1/2s$ (c) $1s$ (d) $2s$ (e) $4s$

수은등을 좀 더 면밀히 관찰하고자 빛의 노출시간을 달리하여 측정한 여러 스펙트럼 결과 중에 그림 27-(e)의 스펙트럼을 그림 28의 그래프로 나타내 보았다. 이때 사용한 방법은 스펙트럼 사진을 이미지 프로세싱 소프트웨어인 ImageJ를 사용하여 가로 축 방향으로 픽셀의 밝기 정보를 추출 하는 방식이다. 가로축에서 Blue는 183 번째 픽셀에 해당하고 Green이 1118 번째 픽셀, Yellow1이 1365 번째 픽셀, Yellow2가 1380 번째 픽셀에 해당한다. 파란색, 초록색, 노란색의 광원이 세기 때문에 그래프 또한 높게 나타났다. 따라서 기존 분광기를 이용한 관찰에서 약하게 보였던 수은등 선 스펙트럼들을 스마트폰 분광기를 통해서 좀 더 정밀하게 관찰 할 수 있었다. 초록색은 스펙트럼 위쪽이 잘려 나간 것처럼 보이는 데, 이것은 노출 시간을 늘리다 보니 밝기가 포화되어 최댓값인 255를 넘어섰기 때문이다. 따라서 초록색의 선폭은 원래 선폭 보다 크게 나왔다.

간이 종이 분광기 결과인 그림 2-(a)와 3D 프린트 분광기 결과인 그림 7-(a)를 비교 분석해 보면 가장 두드러진 특징은 선폭에 있다. 같은 550 nm에 해당하는 초록색 선을 볼 때 3D 프린트 분광기의 선폭이 훨씬 작음을 눈으로도 확인 할 수 있다. ImageJ를 사용해서 스펙트럼 선폭을 분석한 결과를 그림 29에서 확인할 수 있다. 종이 분광기의 초록색(550 nm) 선의 반치전폭(FWHM: full width at half maximum)은 초록색(550 nm)과 청색선(436 nm) 간격의 6/31 정도에 해당하고 3D 프린트 분광기 경우 같은 초록색 스펙트럼선(550 nm) FWHM은 초록색과 청색선 간격의 2/206 정도에 해당하였다. 이것은 20 배 정도의 차이를 나는 것으로 매우 큰 차이를 보이고 있다. 스펙트럼 선폭의 FWHM 값은 분광기의 분해능을 나타내는 수치로서 얼마나 가까운 파장 간격을 구분할 수 있는지를 나타내는 성능 수치이다. 3D 프린트 분광기의 분해능을 측정하기 위해 가장 작은 선폭을 측정한 결과 496 nm 부근의 스펙트럼선의 FWHM이 약 0.4 nm 로서 매우 높은 분해능을 보이고 있었다.

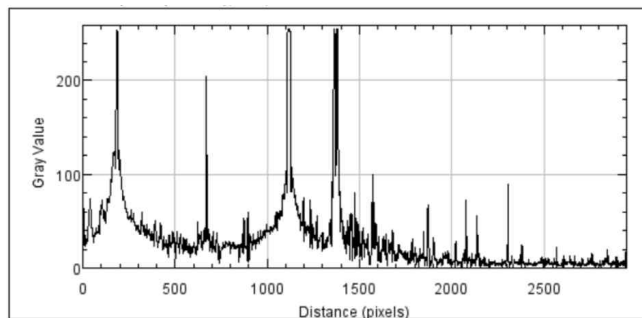
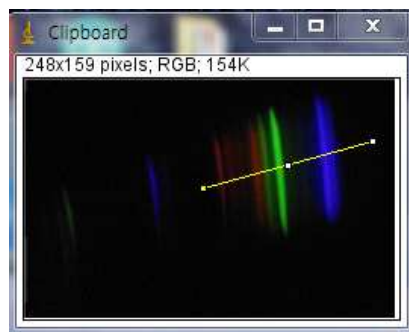
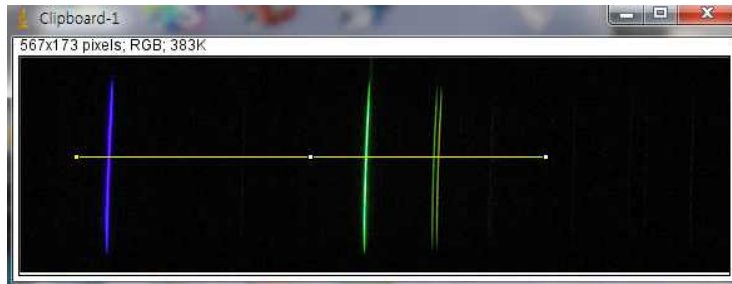


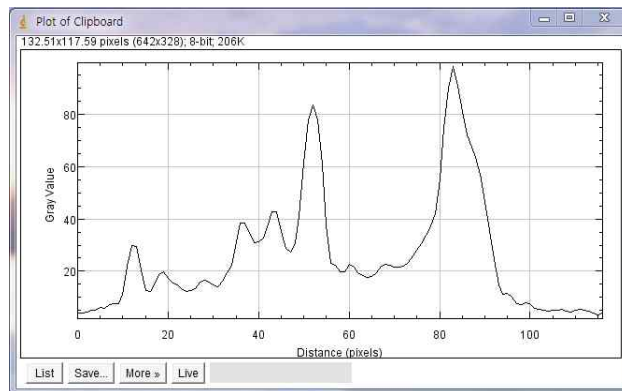
그림 28. Hg spectrum



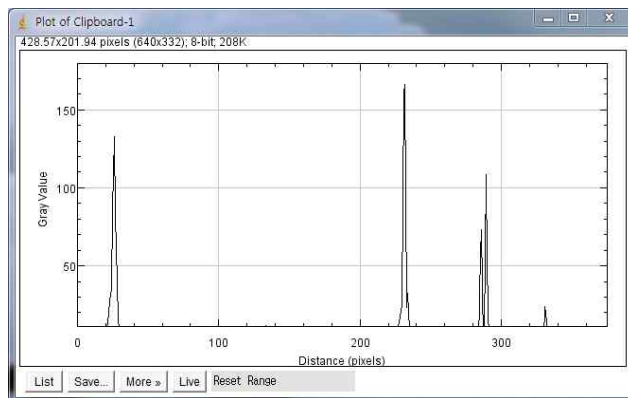
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 29. 종이 간이 스마트폰 분광기와 3D 프린트 스마트폰 분광기의 분해능 비교
 (a) ImageJ를 사용한 종이 간이 분광기 스펙트럼 프로파일 플롯 스캔 라인 (b)
 ImageJ를 사용한 3D 프린트 스마트폰 분광기 스펙트럼 프로파일 플롯 스캔 라인
 (c) ImageJ를 사용한 종이 간이 분광기 스펙트럼 프로파일 (d) ImageJ를 사용한
 3D 프린트 스마트폰 분광기 스펙트럼 프로파일

기존 분광기로 관찰한 수은등의 스펙트럼에서 가장 밝은 4개 선의 파장을 측정하였기 때문에 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰한 수은등 스펙트럼에서 이에 대응되는 선들의 파장 값을 알 수 있고, 나머지 픽셀의 위치를 파장으로 변환할 수 있다.

기존의 분광기로 관찰한 수은등 스펙트럼에서는 Blue, Green, Yellow1, Yellow2 선이 제일 강하게 나타났는데 실제 그림 28의 그래프에서도 가장 높았고 두 개의 Yellow 스펙트럼이 가까운 위치에 자리 잡고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 28에서 4개 스펙트럼선의 파장 값은 기존 분광기로 측정한 결과인 표 3에서와 구할 수 있으며 각각 436 nm, 552 nm, 582 nm, 584 nm 이다. 이들 스펙트럼선의 픽셀 값은 그림 28에서 구할 수 있으며 각각 183, 1118, 1365, 1380 위치에 있는 픽셀들이다. 그림 30에는 네 개 스펙트럼선의 픽셀 위치와 파장을 그래프로 그리고, 실험값과 가장 잘 맞는 일차식으로 된 추세선의 공식이 그래프 안에 표시되어 있다. 이 공식을 사용하면 네 개의 파장 이외의 픽셀 위치에서도 파장 값을 구할 수 있게 된다. 픽셀을 파장으로 변환한 다음 스펙트럼 세기와 파장 사이의 그래프를 그리면 그림 31과 같은 파장 대 스펙트럼 세기의 그래프가 얻어진다.

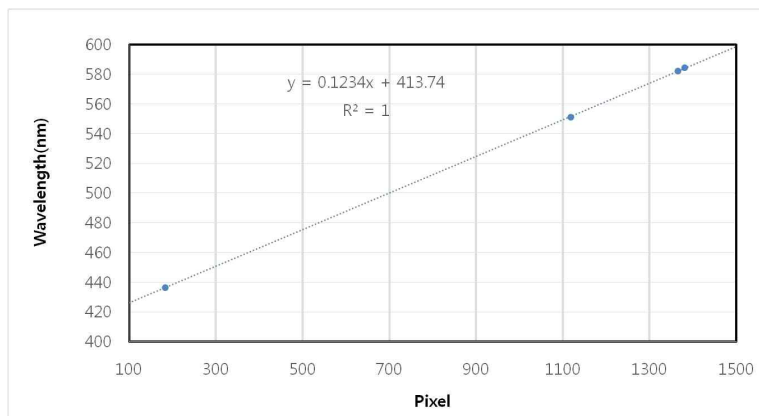


그림 30. 스마트폰 픽셀 위치를 파장으로 변환하기 위한 추세선 공식 추출

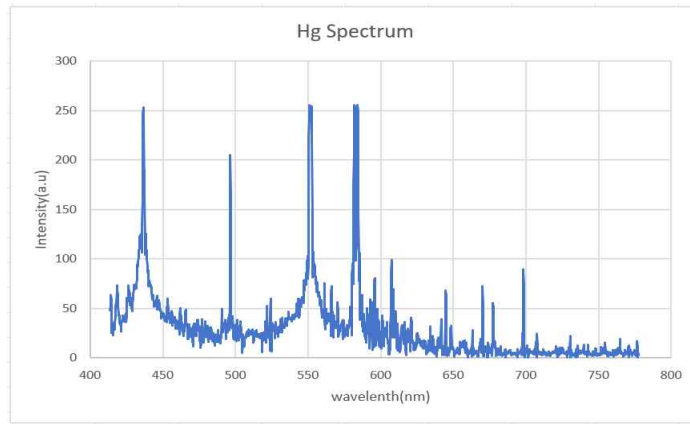


그림 31. Hg spectrum intensity as a function of wavelength

2) 아르곤등

수은등 이외에 다른 기체의 스펙트럼을 스마트폰 분광기로 관찰하였다. 여기서는 아르곤 등의 스펙트럼을 스마트폰 분광기로 노출 시간을 달리하면서 촬영하고 파장에 따른 스펙트럼 곡선을 추출하는 결과를 보이고자한다.

아르곤등은 다른 등보다 기존 색 자체가 어두운 편이다. 노출 시간이 1/2초인 경우 수은 등인 그림 27-(b)와 아르곤등인 그림 32-(a)를 비교해 보면 아르곤 등이 훨씬 어두운 것을 알 수 있다. 또한 분광기로 관찰하였을 때는 청록색과 빨간색밖에 볼 수 없었지만 스마트폰 분광기에서 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 그림30과 같이 (a) 1/2s, (b) 1s, (c) 2s, (d) 4s, (e) 8s로 점차 늘려 좀 더 세밀하게 관찰한 것이다. 처음에는 스펙트럼을 관찰하기 힘들지만 빛의 노출 시간을 늘릴수록 파란색, 빨간색이 먼저 관찰되고 그다음엔 초록색 스펙트럼과 기존 색의 다른 여러 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 기존 스마트폰분광기와 비교를 하더라도 3D 프린트 스마트폰 분광기가 빛의 차단이 훨씬 효과적이어서 더욱 선명하고 정확한 스펙트럼을 관찰할 수 있다.



(a)



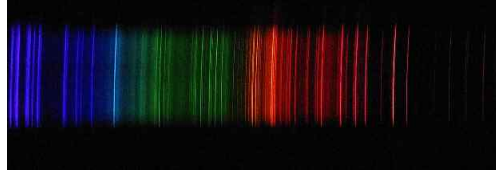
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 32. 3D프린터 스마트폰 분광기로 아르곤등의 스펙트럼을 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) $1/2s$ (b) $1s$ (c) $2s$ (d) $4s$ (e) $8s$

아르곤등을 좀 더 면밀히 관찰하고자 빛의 노출시간을 달리하여 측정한 여러 스펙트럼 결과 중에 그림 32-(e)의 스펙트럼을 그림 33의 그래프로 나타내 보았다. 이 때 사용한 방법은 스펙트럼 사진을 이미지 프로세싱 소프트웨어인 ImageJ를 사용하여 가로 축 방향으로 픽셀의 밝기 정보를 추출 하는 방식이다. 가로축에서 Blue는 641 번째 픽셀에 해당하고 Red가 2328픽셀에 해당한다. 파란색, 빨간색의 광원이 세기 때문에 그래프 또한 높게 나타났다. 따라서 기존 분광기를 이용한 관찰에서 약하게 보였던 아르곤등 선 스펙트럼들을 스마트폰 분광기를 통해서 좀 더 정밀하게 관찰 할 수 있었다. 파란색과 빨간색 스펙트럼이 다른 스펙트럼에 비해 퍼져 보이는 데, 이것은 노출 시간을 늘리다 보니 밝기가 포화되어 최댓값인 255를 넘어섰기 때문이다. 따라서 빨간색과 파란색의 선폭은 원래 선폭 보다 크게 나왔다.

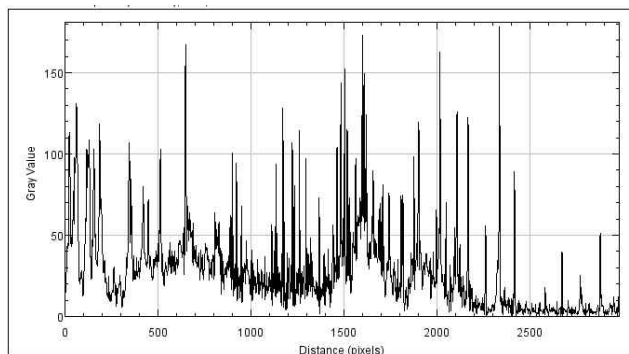


그림 33. Argon spectrum

기존 분광기로 관찰한 아르곤등의 스펙트럼에서 가장 밝은 2개 선의 파장을 측정하였기 때문에 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰한 수은등 스펙트럼에서 이에 대응되는 선들의 위치를 calibration 할 수 있고 각 픽셀의 위치를 파장으로 변환할 수 있다.

분광기로 관찰한 아르곤등에서는 Blue, Red의 스펙트럼이 제일 강하게 나타났는데 실제 그림 34의 그래프에서도 가장 높았다는 것을 알 수 있다. 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰한 결과를 가지고 분광기 실험의 결과를 도입하여 파동을 구해보았다. 그림 33의 그래프를 보았을 때 Blue는 641, Red는 2328로 확인할 수 있었다. 두 개의 선 스펙트럼의 파장과 픽셀 값이 비례하도록 일차 변환 식을 만든 후에 픽셀을 파장으로 변환하면 그림 34와 같은 파장 대 스펙트럼 세기의 그래프가 얻어진다.

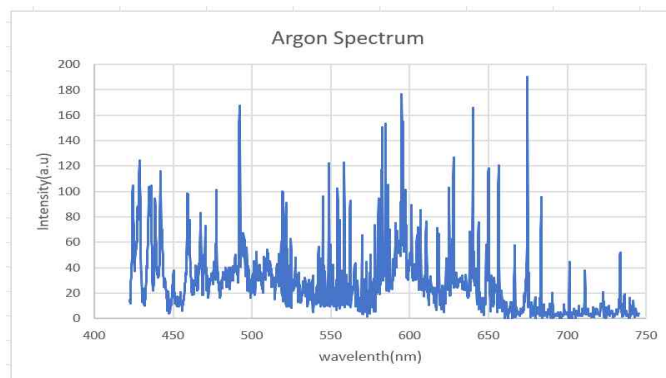
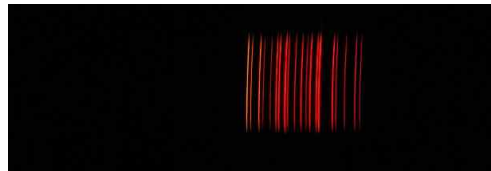


그림 34. Argon spectrum intensity as a function of wavelength

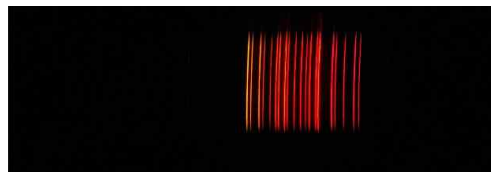
3) 네온등

마지막으로 네온등 기체의 스펙트럼을 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰할 수 있다. 여기서는 네온등의 스펙트럼을 스마트폰 분광기로 노출 시간을 달리하면서 촬영하고 파장에 따른 스펙트럼 곡선을 추출하는 결과를 보이고자한다.

네온등은 다른 기체들보다 광원의 세기가 강한 편이다. 따라서 빛의 노출시간 그림 35-(g) $1/2s$ 가 가장 밝은 편에 속한다. 노출 시간이 $1/2$ 초인 경우 수은 등인 그림 27-(b)와 아르곤등인 그림 32-(a)를 비교해 보면 그림 35-(e)의 네온등이 훨씬 밝다는 것을 알 수 있다. 그림 35을 보면 다른 등에 비해서 빛의 세기가 강했기 때문에 ios(감도)는 500으로 설정하고 다른 등보다 빛의 노출 시간을 그림 35-(a) $1/125s$, (b) $1/60s$, (c) $1/30s$, (d) $1/15s$, (e) $1/8s$, (f) $1/4s$, (g) $1/2s$ 로 줄이고 다양한 시간으로 관찰한 결과이다. 처음에는 약간의 노란색과 대체적으로 붉은 빛만 관찰이 되는 것을 볼 수 있고 점차 노란색이 먼저 선명하게 보여 지면서 빛의 노출시간을 늘릴수록 초록색이 관찰되고 기존 색의 다른 다양한 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 기존 스마트폰분광기와 비교를 하더라도 3D프린트 스마트폰 분광기가 빛의 차단이 훨씬 효과적이어서 더욱 선명하고 정확한 스펙트럼을 관찰할 수 있다.



(a)



(b)



(c)



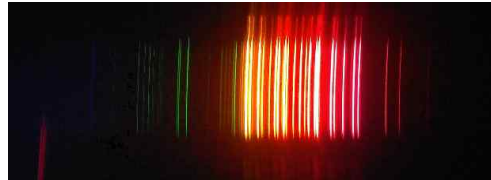
(d)



(e)



(f)



(g)

그림 35. 3D프린터 스마트폰분광기로 네온등의 스펙트럼을 ios(감도)는 500으로 설정하고 빛의 노출 시간을 다르게 하여 측정 (a) $1/125s$ (b) $1/60s$ (c) $1/30s$ (d) $1/15s$ (e) $1/8s$ (f) $1/4s$ (g) $1/2s$

네온등을 좀 더 면밀히 관찰하고자 빛의 노출시간을 달리하여 측정한 여러 스펙트럼 결과 중에 그림 35-(g)의 스펙트럼을 그림 36의 그래프로 나타내 보았다. 이 때 사용한 방법은 스펙트럼 사진을 이미지 프로세싱 소프트웨어인 ImageJ를 사용하여 가로 축 방향으로 픽셀의 밝기 정보를 추출 하는 방식이다. Distance(pixels)를 보면 광원이 1350에서 2150사이가 집중적으로 높게 나타난다는 것을 볼 수 있다. 가로축

에서 Green이 1085 번째 픽셀에 해당하고 Yellow가 1637 번째 픽셀, Red가 2038 번째 픽셀에 해당한다. 초록색, 노란색, 빨간색의 광원이 세기 때문에 그래프 또한 높게 나타났다. 따라서 기존 분광기를 이용한 관찰보다 아르곤등 선 스펙트럼들을 3D 프린트 스마트폰 분광기를 통해서 좀 더 정밀하게 관찰 할 수 있었다. 노란색과 빨간색은 스펙트럼 위쪽이 잘려 나간 것처럼 보이는 데, 이것은 노출 시간을 늘리다 보니 밝기가 포화되어 최댓값인 255를 넘어섰기 때문이다. 따라서 초록색의 선폭은 원래 선폭 보다 크게 나왔다.

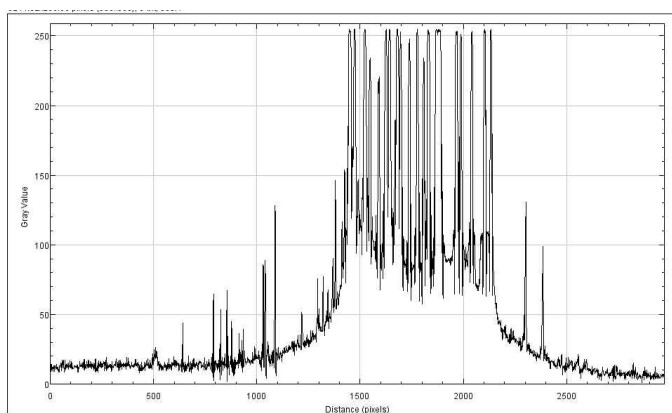


그림 36. Neon spectrum

기존 분광기로 관찰한 수은등의 스펙트럼에서 가장 밝은 3개 선의 파장을 측정하였기 때문에 3D스마트폰 분광기로 관찰한 수은등 스펙트럼에서 이에 대응되는 선들의 위치를 calibration 할 수 있고 각 픽셀의 위치를 파장으로 변환할 수 있다.

분광기로 관찰한 아르곤등에서는 Green, Yellow, Red의 스펙트럼이 제일 강하게 나타났는데 실제 그림 37의 그래프에서도 가장 높았다는 것을 알 수 있다. 3D 프린트 스마트폰 분광기로 관찰한 결과를 가지고 분광기 실험의 결과를 도입하여 파동을 구해보았다. 그림 37의 그래프를 보았을 때 Green이 537 nm, Yellow가 601 nm, Red가 649 nm의 순으로 알 수 있었다. 세 개의 선 스펙트럼의 파장과 픽셀 값이 비례하도록 일차 변환 식을 만든 후에 픽셀을 파장으로 변환하면 그림 37와 같은 파장 대 스펙트럼 세기의 그래프가 얻어진다.

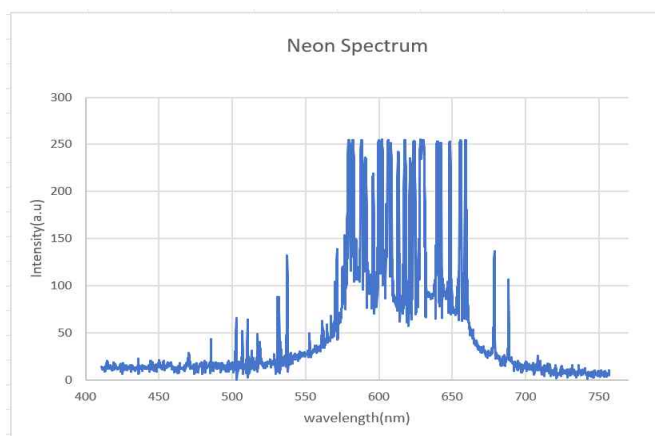


그림 37. Neon spectrum intensity as a function of wavelength

V. 결 론

본 논문에서는 3D 프린터를 이용하여 제작한 스마트폰 분광기를 제안하고, 기존에 대학 실험에서 사용하던 분광기와 종이로 만든 간이 분광기와 함께 성능을 비교 분석하였다.

첫 번째로, 기존의 분광기를 사용하여 수은등과 아르곤등, 네온등의 스펙트럼을 보고 이의 회절 각도를 각각 측정하였다. 위의 실험에서 사용한 슬릿의 간격을 $a = 1.67\mu m$ 로 하고 θ_1 과 θ_2 를 통해 입사된 파장 λ 를 식 $a \sin(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}) = m\lambda$ 에 대입하여 $\mu m = 1000nm$ 로 결과 값을 구했다. 그 결과, 수은등의 파장이 436.4nm(파란색), 551.9nm(초록색), 582.1nm(노란색1), 584.4nm(노란색2)가 나왔고 아르곤등의 파장이 491.97nm(파란색), 674.70nm(빨간색)이 나왔다. 마지막으로 네온등의 파장이 538.32nm(초록색), 598.75nm(노란색), 649.57nm(빨간색)의 순서로 나왔다. 이러한 파장은 많은 스펙트럼 선 중에서 빛의 세기가 가장 강하고 선명한 스펙트럼 위주로 측정한 것이다.

두 번째로, 종이로 접는 간이 스마트폰 분광기를 만들어서 스마트폰에 부착한 뒤 스펙트럼을 관찰하는 실험을 하였다. 종이로 만든 분광기 구조물과 반사 회절 격자로는 중고등학교 실험에서 많이 사용하는 CD를 이용하였다. 또한 스마트폰은 LG G4의 카메라에서 전문가모드를 사용하여 촬영하였고 삼각대를 이용하여 고정을 시켰으며 각각의 스펙트럼의 빛의 세기가 달라서 빛의 노출시간을 다르게 하여 측정해 보았다. 수은등은 ios(감도)를 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간(s)를 각각 1/30, 1/15, 1/8, 1/4, 1/2, 1로 나누어 측정을 하였다. 기존의 강한 빛의 스펙트럼인 파란색, 초록색이 관찰되었고 빛의 노출시간을 길게 할수록 노란색, 보라색, 주황색과 기존 색의 다른 스펙트럼들까지 관찰이 가능했다. 아르곤등은 ios(감도)를 1000으로 설정하고 빛의 세기가 다른 등에 비해서 약한 편이어서 빛의 노출 시간(s)를 1/4, 1/2, 1, 2로 길게 하여 측정하였다. 처음 관찰 되었던 스펙트럼은 파란색과 빨간색이었고 빛의 노출 시간을 늘릴수록 보라색, 초록색의 다양한 스펙트럼을 관찰할 수 있었으며 기존 색의 수많은 스펙트럼들 까지 관찰이 가능했다. 네온등은 빛의 세기가 다른 등에 비해서 월등히 강했기 때문에 ios(감도)를 500으로 두고 빛의 노출 시간(s)을 최소한으로 하여 1/6000, 1/4000, 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/125로 다양하게 관찰해 보았다. 기존의 빨간 빛이 너무 강렬하여 빛의 노출 시간을 많이 늘리기도 힘들었고 조금씩 길게 할수록 노란색이 먼저 관찰되었으며 희미한 초록색까지 관찰할 수가 있었다.

세 번째로, 3D 프린터로 스마트폰 분광기를 기계적 구조를 만들고, 반사형 회절 격자를 부착한 뒤 스마트폰 카메라에 고정시켰다. 스마트폰은 LG G4 기종을 사용하였고 카메라에서 전문가모드를 사용하여 촬영하였으며 카메라로 촬영을 할 때 흔들림을 방지하기 위하여 위와 같은 삼각대를 사용하여 고정시켰다. 각각의 스펙트럼의 빛의 세기가 달라서 빛의 노출시간을 다르게 하여 측정해 보았다.

수은등의 ios(감도)는 1000으로 설정하여 빛의 노출 시간(s)은 1/4, 1/2, 1, 2, 4로 각각 측정해 보았다. 먼저 파란색, 초록색, 노란색등 강한 선 스펙트럼이 관찰되었고 시간을 늘릴수록 미세한 스펙트럼 구조들을 볼 수 있었다. 그리고 기존 분광기에서 측정한 선 스펙트럼의 파장을 사용하여 스펙트럼 이미지를 파장에 따른 스펙트럼 세기 그래프로 변환하였다. 아르곤등의 ios(감도)는 1000으로 설정하고 빛의 노출 시간(s)은 1/2, 1, 2, 4, 8로 하였다. 빛의 세기가 다른 등에 비해 약하기 때문에 처음부터 노출 시간을 길게 하여 측정하였다. 먼저 빨간색을 관찰할 수 있었고 시간을 늘릴수록 파란색이 먼저 관찰되고 다른 파장에 위치하는 많은 스펙트럼선들이 관찰되었다. 수은등과 마찬가지로 기존 분광기의 파장 정보를 사용하여 스펙트럼 이미지를 파장에 따른 스펙트럼 그래프로 변환하였다. 네온등은 세기가 매우 강한 등으로 ios(감도)를 500으로 줄이고 빛의 노출 시간(s) 또한 짧게 하여 1/125, 1/60, 1/30, 1/15, 1/8, 1/4, 1/2로 측정하였다. 처음에는 빛의 세기가 약한 노란색과 수많은 빨간색이 관찰되었고 시간을 길게 할수록 미세한 스펙트럼 구조를 관찰할 수 있었다. 다른 램프와 마찬가지로 스펙트럼 이미지로부터 파장에 따른 스펙트럼 세기를 수치화 하였다.

종이 스마트폰 분광기와 비교 했을 때, 3D 프린트 스마트폰 분광기는 훨씬 좋은 분해능을 보여 주었다. 종이 분광기에서는 스펙트럼선이 굵게 보였지만, 3D 프린트 분광기에서는 매우 좁은 선으로 관찰되었다. 이러한 차이의 주요한 원인은 광학 설계에 있다. 종이 분광기는 슬릿에서 렌즈 구멍까지 길이가 너무 짧고, 슬릿의 폭이 너무 커서 스펙트럼선이 매우 굵게 나타난다. 이러한 분광기 선폭은 해상도(resolution)에 비례하며 정밀한 분광기의 성능을 나타내는 지표이다. 3D 프린트 스마트폰은 광학 설계를 가미해서 슬릿 폭을 30 μm 까지 줄이고 길이를 충분히 길게 해서 스마트폰 카메라의 분해능 한계까지 선폭을 줄인 것이 특징이다. 이에 더해서 배플 구조를 설계에 포함함으로써 해서 미광에 의한 스펙트럼의 잡음을 크게 줄였다. 배플 구조로 인해 카메라 노출 시간을 줄여도 선폭이 번지는 현상이 줄어들었으며 미세한 크기의 스펙트럼 신호까지 검출이 가능했다. 마지막으로 3D 프린터를 이용한 스마트폰 분광기 데이터는 이미지 프로세싱 소프트웨어를 사용해서 파장에 따른 수치 데이터로 변환하였다. 이러한 기능을 스마트폰 어플로 구현한다면 기존의 분광기를 대체할 수 있는 휴대형 또는 교육용 분광기로 사용이 가능하다고 보여 진다.

분광기 중고등학생들에게는 내용이 생소하고 어려운 편이라 분광기 실험을 접하기란 쉽지 않다. 학생들은 대학교에 입학한 후에야 이 실험을 접할 수 있게 된다. 실험을 하는 과정에서도 복잡한 편이라 학생들이 어려움을 겪는다. 그래서 이를 좀 더 간편하게 실험할 수 있고 중고생들에게도 편리하고 간편한 접근이 가능하게 하기 위하여 분광기 대신에 스마트폰분광기를 사용하는 것이 분광기와는 어떤 차이점이 있는지 또한 어떤 한계점이 있고 이점은 무엇인지, 결과적으로 스마트폰분광기가 기존의 분광기나 종이 분광기 대신으로 실험하기에 적합한지 알아본 연구이다. 기존의 분광기로는 관찰하기 힘들었던 미세한 스펙트럼까지도 스마트폰으로는 관찰이 가능하였고 무엇보다 학생들이 실험하기에 간편하였다. 따라서 중고생들도 쉽게 접근할 수 있다는 점에 있어서 실험의 의미가 충분히 있다고 할 수 있었다.

참고문헌

1. Science love website, <<http://sciencelove.com/1998>>
2. Public lab website,
<<https://publiclab.org/notes/warren/11-30-2017/build-a-papercraft-spectrometer-for-your-phone-version-2-0>>
3. 조재흥 · 장 수 · 황보창권 · 조두진 저(2008), 광학(제 4판), 두양사, p.618
4. Paul A. Tipler · Gene Mosca 저, 물리학교재편찬위원회 역(2010), 물리학(제 6판), 청문각
5. Richard Wolfson 저, 김하슬 · 심경무 · 임기건 역(2016), 핵심물리학(제 3판), 자유아카데미, p.647
6. 조재흥 · 장 수 · 황보창권 · 조두진 저(2008), 광학(제 4판), 두양사, p.619
7. 조재흥 · 장 수 · 황보창권 · 조두진 저(2008), 광학(제 4판), 두양사, p.616
8. Serway · Vuille 저, 이재희 · 이원식 역(2017), 핵심 일반물리학(제 9판), 북스힐, p.597

Fabrication of smartphone spectrometer for education using 3D printer*

Yura Woo

*Physics Education Major
Graduate School of Education,
Kyungpook National University
Daegu, Korea
(Supervised by Professor Ju, Young-Gu)*

(Abstract)

In this paper, we developed a smartphone spectrometer for education using 3D printer and characterized the performance by comparing with a conventional spectrometer and a paper craft spectrometer.

Firstly, we measured the spectra of Mercury lamp, Argon lamp, Neon lamp by using a conventional spectrometer, which is generally used for college laboratory class. The measurement of the diffraction angles provided the wavelengths of the strong spectral lines seen from each gas discharge lamp.

Secondly, we made simple smart-phone spectroscopy by folding the paper and inserting the reflection grating made of a compact disk. The fabricated spectroscopy showed strong spectral lines of the lamps although the line width of the spectrum is large compared to that of the conventional one. It can be ascribed to the lack of the optical design regarding the resolution of spectrometer. The photos of spectra were taken by a smart phone, LG G4, in a professional setting, and the phone was fixed by a tripod. We could increase the exposure time of a phone camera to amplify the low intensity of the spectrum.

* A thesis submitted to the Council of the Graduate School of Kyungpook National University in partial fulfillment of the degree of Master of Education in June, 2018.

Thirdly, we fabricated the smartphone spectrometer using 3D printer and reflection grating, and a slit. The spectrometer was attached to a smart phone with a tripod. Since the optical design applied to the spectrum, the accurate image of a slit was formed on the image sensor leading to much better resolution than that of a paper craft spectrometer. The measured spectral resolution of the 3D-printed smartphone spectrometer was 0.4 nm. The increased exposure time of the phone camera also revealed the fine structure of the spectrum together with the fine resolution. The baffle structure inside the spectrometer proved to be effective to remove the noise when the exposure time increased.

The 3D printed smartphone spectrometer can make students observe different types of spectrum, which is usually hard for them to observe. We expect that the 3D printed smartphone spectrometer proposed in this paper can be a useful education tool for students to understand the various features of light, atoms, chemistry, and physics in high schools.