

Fabrication of a Mach-Zehnder interferometer for education using a rotating glass plate and a 3D printer

Seong-Hun Jang and Young-Gu Ju[†]

¹Department of Physics Education, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

(Received August 15, 2017; Revised September 9, 2017; Accepted September 15, 2017)

This paper proposes how to fabricate an educational Mach-Zehnder interferometer that is easy to align and inexpensive, using 3D printers and semiconductor lasers. The interferometer consists of a body 165 mm × 120 mm × 57 mm in size, mirror mounts, a laser holder, beam splitters, and so on. The laser path is adjusted by 4 mirror mounts, each comprised of rubber bands, small metal wires, and a screw. The interference fringe is enlarged by the lens at the final stage. The refractive index of a slide glass was measured by counting the number of moving interference fringes while the slide glass, inserted into one of the two interferometer arms, is rotating. The formula for the refractive index as a function of the optical-path difference and rotation angle was obtained, and used to calculate the refractive index of glass from the interferometer experiment. The use of a rotating glass in one arm of the interferometer nullifies the need for a precision stage, which despite its high cost is often required to observe the moving interference fringe in the classroom. Therefore, the 3D-printed Mach-Zehnder interferometer proposed in this paper can be very useful for education, because of its affordability and performance. It enables students to perform both qualitative and quantitative studies using a 3D-printed interferometer, such as measuring the refractive index of a glass sample, and the wavelength of light.

Keywords: Mach-Zehnder interferometer, 3D printer, Refractive index

OCIS codes: (000.2060) Education; (120.3180) Interferometry; (260.3160) Interference

회전 유리판과 3D 프린터를 이용한 교육용 마흐젠더 간섭계 제작

장성훈 · 주영구[†]

경북대학교 물리교육과

☎ 41566 대구광역시 북구 대학로 80

(2017년 8월 15일 받음, 2017년 9월 9일 수정본 받음, 2017년 9월 15일 게재 확정)

3D 프린터와 반도체 레이저를 사용하여 정렬하기 쉽고 저렴한 교육용 마흐젠더 간섭계를 제작하는 방법을 제안하였다. 간섭계는 165 mm × 120 mm × 57 mm 크기의 몸체, 거울 마운트, 레이저 홀더, 광분할기 등으로 구성된다. 레이저 경로는 고무 밴드, 작은 금속 막대 및 나사로 구성된 4개의 거울 마운트로 조정하였다. 간섭무늬는 최종 단계에서 렌즈에 의해 확대되었다. 슬라이드 글라스의 굴절률은 간섭계 팔 중 하나에 삽입된 슬라이드 글라스가 회전하는 동안 이동하는 간섭무늬의 수를 계수함으로써 측정되었다. 굴절률을 구하는 식을 광경로차와 회전 각도의 함수로 찾았으며, 간섭계 실험에서 유리의 굴절률을 계산하는데 사용하였다. 간섭계의 한 팔에서 유리를 회전시키면 교실에서 움직이는 간섭무늬를 관찰하기 위해 고가이지만 사용되었던 정밀 스테이지가 필요 없게 된다. 따라서 이 논문에서 제안된 3차원 프린터로 제작한 마흐젠더 간섭계는 경제성과 성능 때문에 교육에 매우 유용할 것으로 기대된다. 학생들이 3차원 프린터로 제작한 간섭계를 사용하여 유리의 굴절률과 빛의 파장을 측정하는 등의 정성적 및 정량적 연구를 수행할 수 있을 것이다.

Keywords: 마흐젠더 간섭계, 3D 프린터, 굴절률

OCIS codes: (000.2060) Education; (120.3180) Interferometry; (260.3160) Interference

[†]E-mail: ygnu@knu.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. 서 론

광학은 오래된 물리학의 한 분야이며 현대에는 물리학에서 뿐만 아니라 다양한 학문 분야 및 광전자 산업 등 첨단 기술 산업 분야에 널리 이용되고 있다¹⁾. 특히 여러 가지 파장과 기능의 레이저 기술이 발전함에 따라 박막의 두께 또는 미세한 길이 변화 측정, 굴절률 측정, 속도측정기, 고분해능 분광계 제작 등 그 활용 분야도 매우 다양해지고 있으며, 따라서 광학 교육의 중요성이 대두되었다.

우리나라 고등학생의 광학 관련 학습 내용을 2009 개정교육과정을 토대로 살펴보면 물리교과의 교육 내용 구성 시 일반적인 역학 파동을 이용하여 파동의 일반적인 성질을 학습하도록 한 후 빛의 간섭과 회절을 학습하도록 구성하고 있다²⁾. 물리 II에서 파동의 회절과 간섭의 정성적인 개념과 경로 차에 의한 간섭을 학습하고, 심화과목인 고급물리와 물리실험에서 본격적으로 파동 함수 및 간섭계에 관해 다루고, 간섭과 회절에 관한 실험을 실시한다³⁾. 그러나 교과서에서 빛과 관련된 내용은 대부분 기하광학에 치중되어 있어 파동 광학에 대한 내용을 접할 기회가 매우 제한적이어서 파동 광학에서 가장 기본적인 개념인 간섭과 회절에 대한 정확한 이해가 이루어지지 않고 있다⁴⁾. 더욱이 빛의 간섭과 회절에 대한 실험을 통해서 학생들의 이해도를 높이려고 하여도 광학 실험 도구의 가격이 상당히 비싸므로 학생들이 정량적으로 측정 가능한 과학 실험 도구를 충분히 제공하지 못하고, 이론적인 설명에 그치고 있는 것이 현실이다.

간섭계를 다루는 수업에서 주로 실시하는 탐구활동은 마이켈슨 간섭계를 이용한 활동이다. 마이켈슨은 그간 고안한 간섭계로 지구와 에테르(ether)의 상대 운동에 의한 빛의 간섭 현상을 측정하고자 시도하였고 빛의 파장으로 길이를 세밀하게 측정할 수 있음을 보였다⁵⁾. 그러나 마이켈슨 간섭계를 이용한 탐구활동을 위해서는 미세 이동 스테이지가 필요하므로 실험 장비가 매우 고가이다. 이 때문에 고등학교에서는 마이켈슨 간섭계를 제대로 갖추지 못하는 경우가 있어 간섭 무늬의 변화, 간섭계의 활용에 대한 수업이 잘 이루어지기 어렵다. 반면 마흐젠더 간섭계는 비교적 구조가 간단하고, 마이켈슨 간섭계보다 빛의 진행과 간섭에 대한 예측이 직관적이어서 간섭무늬 형성 과정을 쉽게 설명할 수 있는 장점이

있다⁶⁾. 그러나 마흐젠더 간섭계를 구성하여 간섭무늬를 관찰하기 위해서는 각 부품을 정확하게 배열하여 간섭계를 정렬하는 것이 까다롭고 시간이 오래 걸리므로 학생들의 탐구 활동에 적용하기가 매우 어렵다.

이번 연구에서 3차원 프린터로 마흐젠더 간섭계를 제작하여 간섭계 정렬이 용이하고 저렴한 학습도구를 제공함으로써, 여러 학생들이 탐구활동에 참여하여 정성적으로는 간섭 무늬가 이동하는 장면을 관찰하고, 정량적으로 빛의 파장이나 굴절률을 계산할 수 있는 학습도구를 제공하고자 한다. 이를 통해 물리실험이나 심화, 고급 물리를 수강하는 학생들의 참여도 및 학습 내용에 대한 이해도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

II. 마흐젠더 간섭계 구성 및 굴절률 측정

3차원 프린터로 마흐젠더 간섭계를 만들기 전에 레이저 광원의 간섭 특성과 유리판을 이용한 굴절률 측정하는 방식을 시험하기 위해서 광학 테이블에 마흐젠더 간섭계를 구성하였다. 마흐젠더 간섭계는 그림 1에서 보이는 것과 같이 광원, 2개의 광분할기와 2개의 거울로 구성하였다. 그림 2는 실제 구성한 마흐젠더 간섭계 장치를 이용하여 유리판(슬라이드 글라스)의 굴절률을 측정하기 위하여 첫 번째 광분할기 뒤쪽에 회전스테이지에 끼운 유리판을 위치시켜 놓은 것을 보여 주고 있다⁷⁾. 실험에 간섭계의 광원으로 반도체 레이저를 사용하였으며 첫 번째 광분할기에서 나뉘었던 레이저광이 두 번째 광분할기를 지난 후 서로 중첩되어 간섭무늬가 만들어지며, 스크린 앞의 볼록 렌즈는 간섭 무늬를 확대한다. 볼록 렌즈는 지름 20 mm, 초점거리가 20 mm인 평볼록 렌즈를 사용하였다.

보통 교육용 간섭계에서는 파장이 633 nm여서 가시광선 영역이고 가간섭 거리가 길어서 간섭 무늬를 쉽게 관찰할 수 있는 He-Ne 레이저를 많이 사용한다. 그러나 He-Ne 레이저는 가격이 비싸고 부피가 커서 간섭계의 크기도 커져야 하는 단점이 있다. 이에 반해 반도체 레이저는 포인터 용도로 상용화 되어 매우 가격이 저렴하지만 모드가 단일 모드가 아니고 가간섭 길이가 짧을 수 있어서 간섭계 용도로는 잘 이용되지 않는다. 물론 단일 모드를 가지는 통신용 반도체 레이

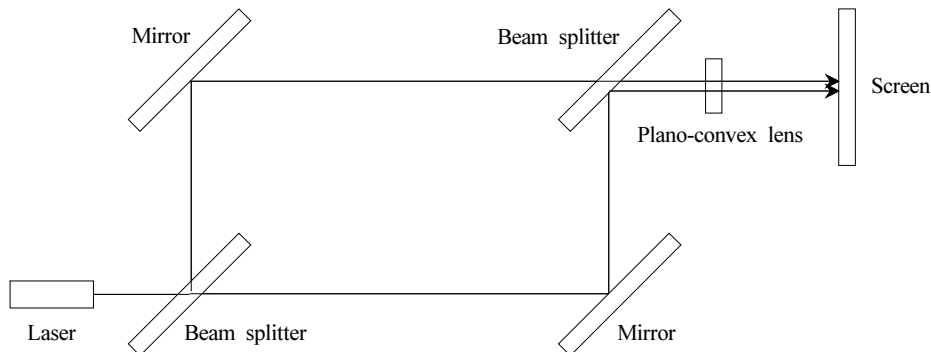


Fig. 1. Schematic diagram of a Mach-Zehnder interferometer⁶⁾.

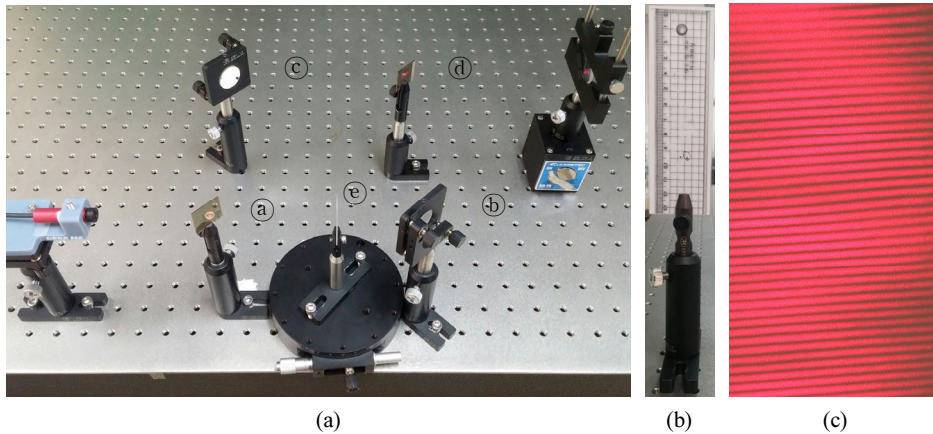


Fig. 2. A Mach-Zehnder interferometer set up on an optical table for measuring refractive index of a slide glass and the observed interference fringe: (a) experimental setup; (b) target plate; (c) interference fringe.

저가 있고 이를 이용해 마이켈슨 간섭계를 구성한 예가 있다^[8]. 하지만 이 선행 연구의 경우에 사용한 수직공진표면광 레이저의 경우 파장이 850 nm라서 눈에 보이지 않아 학생들이 간섭 무늬를 관찰할 수 있는 교육용으로는 사용하기 힘들다. 본 실험에서는 포인터용 저가 반도체 레이저는 아니지만 비교적 저렴하게 구할 수 있는 반도체 레이저를 사용하여 간섭계를 구성한 결과 그림 2(c)와 같이 간섭 무늬가 잘 생기는 것을 확인하였고 파장도 655 nm 적색이라서 간섭 무늬 관찰에 적합한 교육용 간섭계의 광원으로 사용할 수 있음을 확인하였다. 실험에 사용한 반도체 레이저의 모드 특성이나 가간섭 거리에 대한 정보는 제조사에서 제공하지 않아서 추가 연구를 통해 조사할 예정이다. 이러한 반도체 레이저의 사용은 교육용 간섭계를 만들 때 비용 뿐 아니라 간섭계의 부피도 줄이는 효과가 있어서 3차원 프린터를 사용한 간섭계 소형화에 여러 가지 장점을 제공해 준다. 실험에 사용된 반도체 레이저의 특성은 표 1에 정리되어 있다.

그림 2의 마흐젠더 간섭계를 정렬하기 위하여 레이저광 수평 조정, 광분할기 및 거울 설치, 빔폭 확대 렌즈 설치를 순차적으로 실시하였다. 먼저 레이저광 수평 조정을 위해 레이저의 진행 방향을 따라 표적판을 앞뒤로 움직여도 표적판에 맺힌 레이저 포인트의 위치가 일정하도록 레이저의 지향점을 조정한다. 다음으로 첫 번째 광분할기(a)를 레이저 진행 방향과 45°를 이루도록 맞추어 반사광의 진행 방향이 원래 진행 방향과 수직을 이루도록 한다. 표적판을 이용하여 반사광과 투과광이 수평이 유지되는지 확인하고, 투과광과 반사

광을 반사시킬 거울 (b)과 (c)을 설치한다. (a)으로부터의 거리가 같은 곳에 설치하였으며 표적판을 이용하여 레이저광의 진행 방향이 수직으로 꺾이고 반사 후의 레이저광이 수평을 이룰 수 있도록 거울의 각도를 조절한다. 거울 (b), (c)에 의해 반사된 광선이 교차되는 지점에 광분할기(d)를 설치한다. (b)에서 반사된 레이저 광이 반사하여 진행방향이 수직으로 꺾이도록 광분할기의 각도를 조절한다. 반사된 빛이 수평을 유지하도록 표적판을 이용하여 확인한다. 이 때 (a)에서 반사, 투과된 빛의 진행 조건이 같게 하기 위하여 (a)에서 투과된 빛이 (d)에서는 투과되지 않도록 (d)의 주반사면의 방향을 정하였다. (d)에서 투과, 반사된 두 빛의 진행 경로에 볼록 렌즈를 설치하면 빔이 퍼지면서 간섭무늬의 크기가 확대된다.

슬라이드 글라스를 광분할기에 의해 나누어진 두 광 경로 중 한 쪽 경로(그림 2의 (a)과 (b) 사이)에 수직하게 두었다. 간섭계의 한 쪽 경로에 슬라이드 글라스를 설치한 이유는 크게 두 가지이다. 첫째는 마흐젠더 간섭계에서 간섭 무늬의 이동을 관찰하기 위해서는 한쪽 광경로에 변화를 주어야 하는데 굴절률을 변화시키든지 경로의 길이를 변화시켜야 한다. 유리판을 회전시키면 수직으로 빛이 입사할 때 보다 유리를 통과하는 길이가 더 길어져 광 경로가 증가하고 간섭 무늬가 이동한다. 보통 마이켈슨 간섭계에서는 거울 한 쪽에 마이크로미터를 장치해서 거울을 미세하게 이동하면서 간섭 무늬를 이동시키는데 반 파장만 움직여도 간섭 무늬가 한 주기 이동하기 때문에 매우 정밀한 마이크로미터가 필요하다. 보통은 마이크로미터의 한 눈금이 10 μm 라서 손으로 마이크로미터를 움직일 경우 간섭무늬가 너무 빠르게 이동하기 때문에 간섭계를 이용한 정성적 실험 또는 정량적 실험이 매우 어렵다. 따라서 교육용 간섭계를 제작하기 위해서는 차동 마이크로미터 또는 추가적인 정밀 조정 장치가 필요하다. 반면에 회전하는 슬라이드 글라스 경우 손으로 움직여도 간섭 무늬가 이동하는 것을 관찰할 만큼 광 경로 변화가 급격하지 않아서 교육용으로 적합하다고 할 수 있다. 두 번째 이유는 유리판 회전의 각도를 정밀하게 측정할 수 있을 경우 유리판

Table 1. Specification of the semiconductor laser used in the experiment

Specification	Value	Specification	Value
Diameter (ϕ)	12 mm	Wavelength	655 nm
Length (l)	46 mm	Optical power	<10 mW
Input voltage	5 V	Presence of collimating lens	Yes

Table 2. The number of moving interference fringes as a function of rotation angle of a slide glass

Angle (°)	5	10	15	20
Number of shifted interference fringes				
1st measurement	2.0	7.8	18.3	34.0
2nd measurement	2.4	7.5	18.1	33.4
3rd measurement	2.2	8.0	18.3	33.4
Average	2.2	7.7	18.2	33.6

의 굴절률이나 레이저의 파장 측정과 같은 정량적 실험이 가능하다는 점이다.

그림 2의 실험 장치를 사용하여 정밀 회전 스테이지를 사용하여 측정대상(슬라이드 글라스)을 일정한 각도로 회전시킬 때 이동하는 간섭무늬의 개수를 측정한 결과는 표 2와 같다. 회전 스테이지를 사용하여 슬라이드 글라스를 회전시켰으며, 슬라이드 글라스는 독일의 Marienfeld사에서 제조한 제품으로 재질은 soda lime glass (hydroytic class: 3)이고 레이저 파장 655 nm에 대하여 굴절률은 1.521이다⁹⁾. 각도가 5도일 경우에는 간섭 무늬의 이동 개수가 2.2 개로 매우 천천히 움직이다가 각도가 10도에서 15도로 회전할 경우에는 간섭 무늬 이동 개수가 10.5개로 증가하고, 15도에서 20도로 증가할 경우에는 간섭 무늬 이동 개수가 15.4개로 더욱 증가한다. 다시 말해 회전 각도가 5도 이하일 때는 1도당 0.44개의 간섭 무늬가 이동하고, 5도에서 10도 구간에서는 1도당 1.1개, 10도에서 15도 구간에서는 1도당 2.1개, 15도에서 20도 구간에서는 1도당 3.08개의 간섭 무늬가 이동하는 것을 볼 수 있었다. 회전 각도가 커질수록 간섭 무늬가 빠르게 이동하므로 유리판을 손으로 회전시키면서 간섭 무늬의 이동을 관찰하고자 할 때에는 회전 각도가 작을 때가 적합함을 알 수 있다.

앞서 언급한 것과 같이 유리판 회전 각도(θ)와 이동한 간섭 무늬 개수로부터 유리판의 굴절률이나 레이저의 파장을

구할 수 있는데, 이를 위해서는 유리판 회전 각도와 광 경로 변화에 대한 관계식을 알아야 한다. 그림 3에 회전된 유리판에서 발생하는 광 경로 변화를 보이고 있다.

원래 광선의 광 경로(굴절되지 않은 광선의 경로, ㉑) 중 점 a와 점 b 사이의 경로 거리 s_1 은 다음과 같다. 여기서 t 는 유리판의 두께이고 n 은 유리판의 굴절률이다.

$$s_1 = \frac{t}{2} \times \frac{1}{\cos\theta} - \frac{t}{2} + nt$$

굴절된 광선의 광 경로(㉒) 중 점 a와 점 c사이의 경로 거리 s_2 는 다음과 같다.

$$s_2 = \frac{nt}{\cos\theta_r} + x$$

$$(\because) x = y \sin\theta = \left(\frac{t}{2} \tan\frac{\theta}{2} + \frac{t}{2} \tan\theta - t \tan\theta_r \right) \sin\theta$$

$$s_2 = nt \frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} + \sin\theta \left(\frac{t}{2} \tan\frac{\theta}{2} + \frac{t}{2} \tan\theta - t \frac{\sin\theta}{\sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right)$$

광 경로 차 $\Delta s = s_2 - s_1$ 를 레이저의 파장 λ 와 이동한 간섭 무늬 개수 N 으로 나타낸 후 굴절률 n 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\therefore n = \frac{-\beta^2 - \sin^2\theta}{2\beta}$$

$$\text{where } \beta = \frac{N\lambda}{t} - \frac{1}{2} \left(\sin\theta \tan\frac{\theta}{2} + \sin\theta \tan\theta - \frac{1}{\cos\theta} + 1 \right) \quad (1)$$

표 2에 나온 실험에서 측정한 유리판 회전각도와 이동한 간섭 무늬 수를 식 (1)에 대입하여 슬라이드 글라스의 굴절률을 계산하여 표 3에 나타내었다. 상대 오차 계산에서 참값

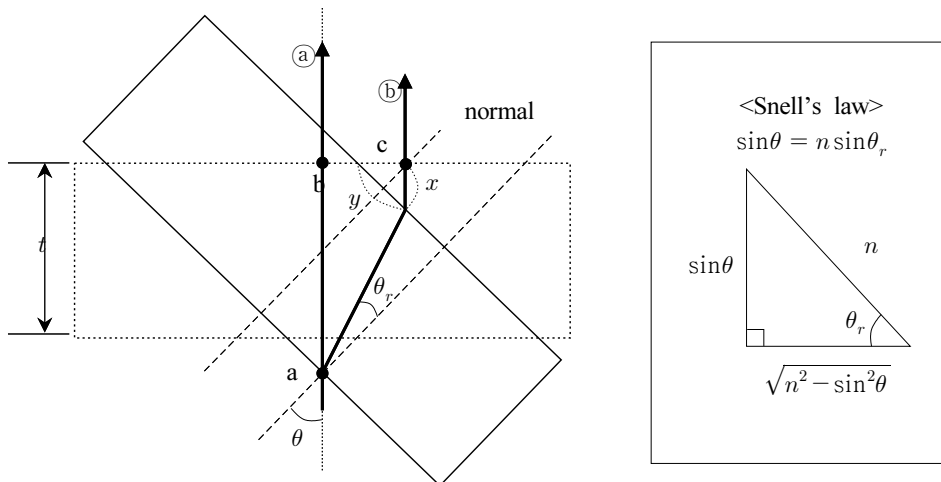


Fig. 3. Optical path difference caused by slide glass rotation.

Table 3. The refractive index obtained from the rotation angle of the glass plate and the number of shifted interference fringes

Angle (°)	5	10	15	20
Refractive index	1.61	1.48	1.50	1.51
Relative error (%)	5.9	2.6	1.3	0.7

을 1.52로 하였다. 실험 결과를 보면 회전한 각도가 커질수록 오차는 작아지며 soda-lime 유리 굴절률의 문헌값과 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 회전한 각도가 작을 때는 회전 각도 당 이동하는 간섭 무늬의 수가 적으므로 손으로 돌리면서 실험하기 유리하고 간섭 무늬가 이동하는 것을 쉽게 관찰할 수 있지만 이동한 간섭 무늬 개수가 작아서 N의 상대 오차도 클 뿐 아니라 각도의 상대오차도 크기 때문에 굴절률의 측정 오차가 상대적으로 큰 것을 볼 수 있다. 그러므로 교육용으로 간섭 무늬의 이동을 관찰하고자 한다면 회전 각도를 작게 하는 것이 유리하고, 물체의 굴절률을 정확하게 측정하고자 한다면 회전 각도를 크게 하는 것이 유리하다.

III. 3차원 프린터 기반 교육용 마흐젠더 간섭계 구성

앞 절에서 마흐젠더 간섭계를 광학대에 설치하여 정렬 상의 문제점을 파악하고 반도체 광원의 적용 가능성을 검증하였다. 그리고 유리판 회전 방식을 사용하여 간섭 무늬 관찰이나 굴절률 측정하는 방식이 가능하고 효율적임을 확인할 수 있었다. 이러한 간섭계를 교육용으로 구현하기 위해서 3차원 프린터로 제작을 시도하여 제작 비용의 감소나 소형화 그리고 광학 정렬의 용이성을 구현하려고 하였다. 광학대에 설치하는 방식은 각 부품과 광학대를 모두 구비하기 위해서는 많은 예산이 필요하며 각 부품을 정렬하기 힘들고 많은 시간이 필요하다. 3차원 프린터를 이러한 문제점들을 해결하는데 도움이 될 수 있다. 기존의 광학 부품 제작은 필요한 정밀도를 달성하기 위해서 금속 정밀 가공에 의존하는 것을 당연시 하고 있다. 금속 가공은 상당한 기술적 숙련도를 요구하며 학생들이 직접 배워서 수행하기에는 너무 많은 시간이 소모되지만, 3차원 프린터의 경우에는 3차원 CAD (Computer

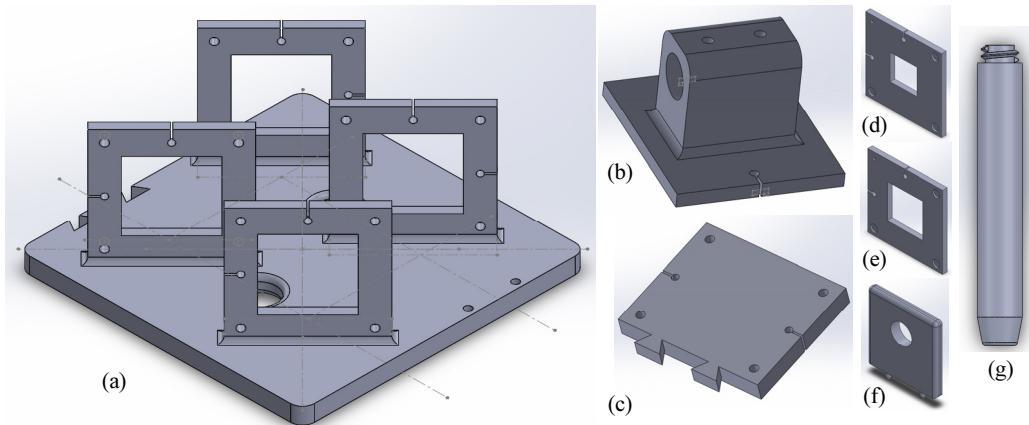


Fig. 4. 3D CAD image of the components used in 3D printed Mach-Zehnder interferometer: (a) a interferometer body (b) a laser holder (c) a base of laser holder (d) a mirror attachment plate (e) a beam splitter attachment plate (f) a lens holder and (g) a body post.

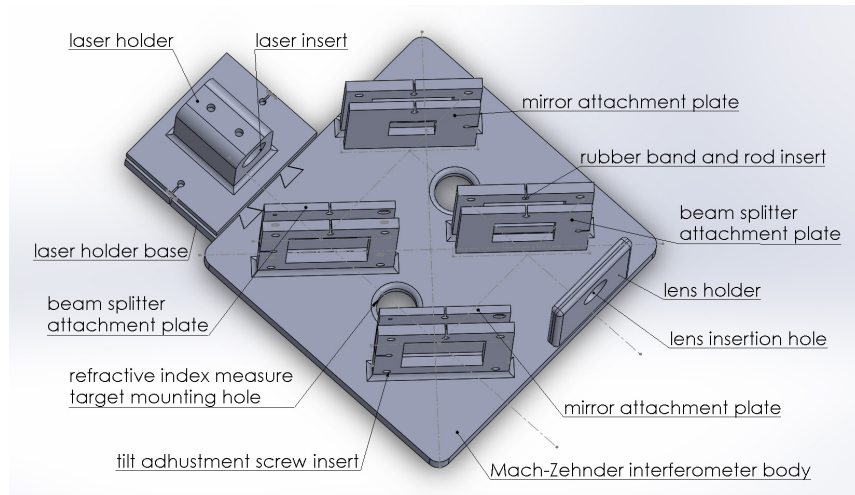


Fig. 5. 3D CAD image of the assembled Mach-Zehnder interferometer.

Aided Design) 소프트웨어만 익히면 프린터 정밀도에 따라 자동으로 제작되기 때문에 시제품 제작이나 교육용 기구 제작에 매우 적합하다고 할 수 있다. 대신에 3차원 프린터에 대한 맞는 광학 부품의 설계와 제작 방식을 찾기 위한 노력이 필요하다. 이 실험에서 간섭계를 구성하는 각 부품은 SOLIDWORKS라는 3차원 CAD 소프트웨어를 이용하여 설계하였다.

본 연구에서 3차원 프린터를 사용한 방식은 광학대와 광학 부품을 한 번에 찍어내는 방식을 사용하지 않고 별도로 제작해 조립하는 방식을 선택하였다. 모든 구조를 한 번에 찍어내면 정렬할 필요가 없어서 편할 수도 있지만 광학 정렬이 필요 없을 만큼 프린터 정밀도가 높아야 한다. 그리고 학생들이 부품 정렬하면서 배울 수 있는 교육적 효과가 사라지기 때문에 본 연구에서는 레이저나 거울, 광 분할기와 같은 부품에 기울기(tilt/tip) 조절이 가능한 구조 만들고 3차원 프린터로 만든 미니 광학대에 조립하는 방식을 취했다. 3차원 프린터로 간섭계 파트를 출력한 후 광분할기와 거울을 각 부착판에 붙이고, 렌즈 및 부품을 조립하여 간섭계를 설치하였다. 광분할기와 거울 부착판, 레이저 홀드는 본체와 별개로 제작하였으며, 작은 고무줄과 철사, 볼트, 쇠구슬을 이용하여 기울기를 조절하도록 하여 간섭계를 더 효과적으로 정렬할 수 있도록 제작하였다. 설계한 부품들과 조립된 간섭계의 3차원 CAD 모델이 그림 4와 그림 5에 나타나 있다. 실제로 3차원 프린터로 제작하여 조립한 광분할기와 거울 마운트는 그림 6에 보이고 있다. 제작에 사용한 3D프린터의 사양은 표 4와 같다.

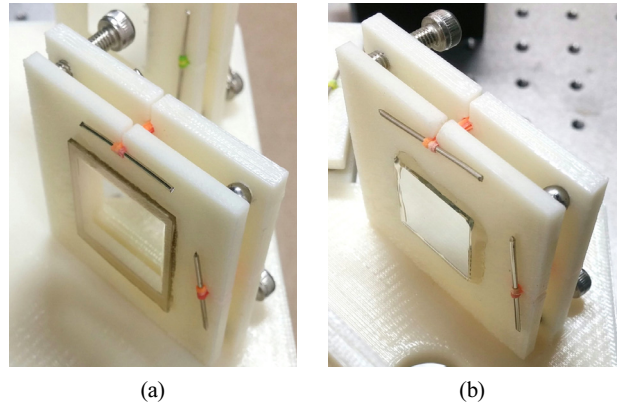


Fig. 6. Assembly of 3D printed optical components: (a) a beam splitter and (b) a mirror.

Table 4. 3D printer specifications used in production

Manufacturer	Stratasys	Model name	Mojo
Molding method	FDM	Molding material	ABSplus
Lamination thickness	0.178 mm		

3차원 프린터로 제작한 마흐젠더 간섭계의 정렬 순서는 그림 7에 나와 있다. 마흐젠더 간섭계를 정렬하기 위해서는 먼저 레이저를 레이저 홀더에 끼운 후 레이저 광선이 평행하게 나아가도록 레이저 홀더 아래에 장치한 기울임 조절 장치를

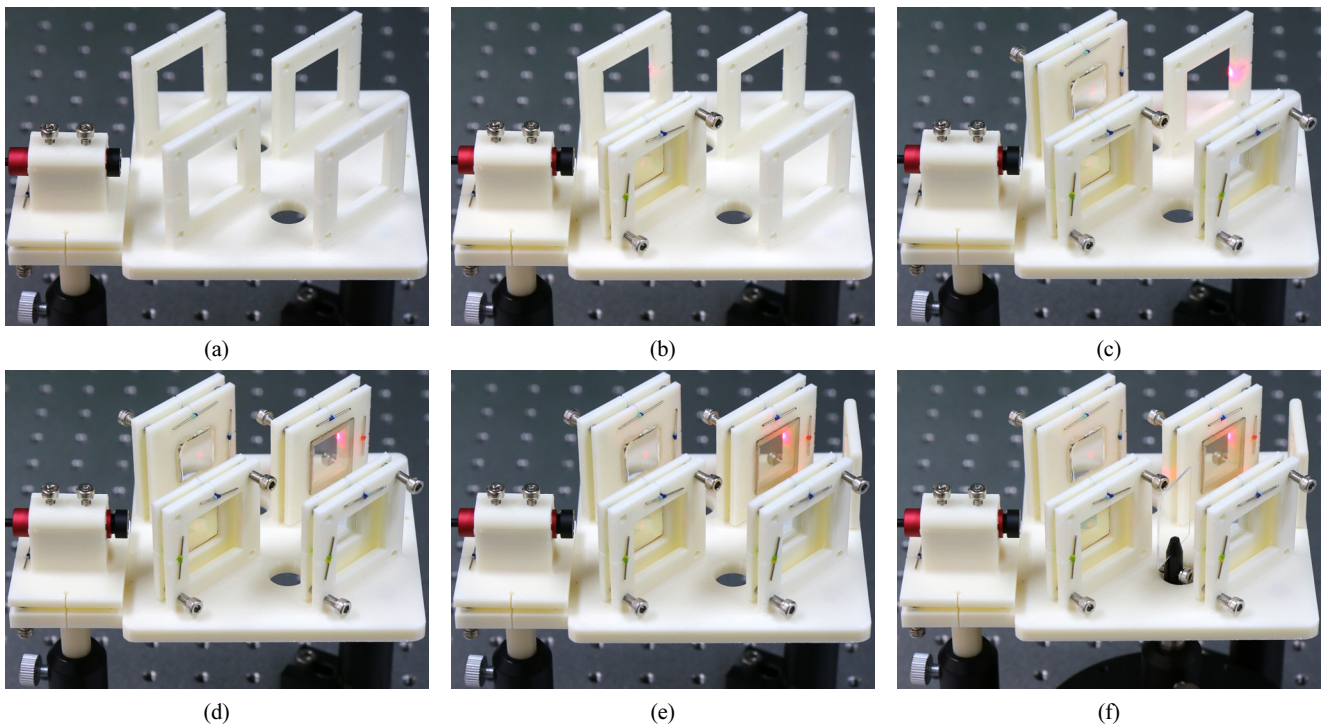
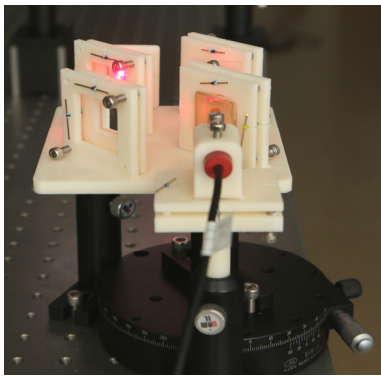
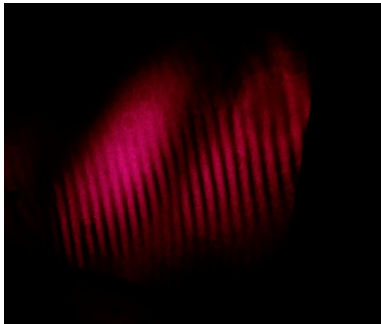


Fig. 7. Alignment sequence of 3D printed Mach-Zehnder interferometer: (a) a laser mount (b) the first beam splitter (c) two mirror mounts (d) the second beam splitter (e) the lens holder at the final stage and (f) the slide glass inserted in one arm.



(a)



(b)

Fig. 8. (a) The 3D printed Mach-Zehnder interferometer used in the experiment and (b) the obtained interference fringe.

이용하여 정렬한다(그림 7(a)). 그림 6과 같이 광분할기가 부착된 판을 고무줄과 철사를 이용하여 끼운 후 나사를 이용하여 레이저의 진행방향을 조절한다. 이 때 투과광은 원래 진행 방향에 나란하도록, 반사광은 원래 진행 방향과 직각을 이루도록 하며, 높이도 변하지 않도록 조정한다(그림 7(b)). 두 개의 거울 부착판을 고무 밴드와 작은 금속 막대를 이용하여 끼운 후 나사를 조절하여 반사광이 원래 진행 방향으로 진행하도록 조정한다(그림 7(c)). 광분할기 부착판을 고무줄과 철사를 이용하여 끼운 후 나사를 조절하여 투과광은 원래의 진행 방향과 나란하게, 반사광은 원래의 진행 방향에 수직인 방향으로 진행하도록 조정한다(그림 7(d)). 렌즈가 삽입되어 있는 렌즈 홀더를 끼워 레이저 빔이 발산되도록 해서 간섭무늬를 관찰할 수 있도록 한다(그림 7(e)). 렌즈는 초점거리 6 mm, 지름 12 mm인 평볼록 렌즈를 사용하였다. 3차원 프린터로 제작한 마흐젠더 간섭계의 조립 후 최종 모습과 관찰된 간섭 무늬는 그림 8에 나타나 있다.

3차원 프린터로 제작한 마흐젠더 간섭계를 사용하여 II절에서와 같이 슬라이드 글라스를 일정 각도로 회전시킬 때 이동하는 간섭무늬의 수를 세었으며, 결과는 표 5와 같다. 측정값으로부터 굴절률을 계산하는 식 (1)을 따라 굴절률이 1.521로 알려진 슬라이드 글라스의 굴절률을 측정하였으며, 계산 결과는 표 6과 같다. 측정 대상의 회전각이 작을 때에는 이동하는 간섭무늬의 개수가 적으므로 상대 오차가 크게 나타나며, 회전각이 커질수록 실제 굴절률과 더욱 비슷하고 오차

Table 5. The number of shifted interference fringes as a function of rotation angle of a slide glass

Angle (°)	5	10	15	20
Number of interference fringes moved				
1st result	2.3	7.0	18.5	32.0
2nd result	2.3	7.0	17.5	31.0
3rd result	2.3	7.0	19.0	33.0
Average	2.3	7.0	18.3	32.0

Table 6. The refractive index obtained from the experiment (The number inside parentheses indicates standard deviation.)

Rotation angle(°)	5	10	15	20
Refractive index	1.65	1.42	1.52 (±0.03)	1.50 (±0.02)

의 변동도 줄어들음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 앞서 2절에서 광학대에 설치한 마흐젠더 간섭계의 실험 결과와도 일치한다. 회전각 15도와 20도에서 측정된 값이 정밀도가 높다고 가정하면, 유리판의 굴절률의 측정 평균값은 soda lime 유리의 굴절률 문헌값과 표준 편차 이내에서 일치했다. 따라서 3차원 프린터로 제작한 간섭계의 성능이 우수하며 교육용 간섭계로 사용할 경우 간섭 무늬 관찰뿐만 아니라 정량적 실험에도 사용할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

3차원 프린터와 반도체 레이저를 이용하여 마흐젠더 간섭계를 구성하고 간섭무늬 및 간섭무늬의 이동을 관찰할 수 있었으며, 슬라이드 글라스를 한쪽 광경로 상에 위치하고 일정 각도로 회전시킬 때 이동하는 간섭무늬 수를 측정하여 슬라이드 글라스의 굴절률을 측정할 수 있었다.

3차원 프린터로 마흐젠더 간섭계를 제작하기 전에 기존 광학대에 기존의 광학 부품과 반도체 레이저를 사용하여 마흐젠더 간섭계를 구성하였다. 마흐젠더 간섭계를 소형화하기 위하여 헬륨-네온 레이저를 대신하여 적색 반도체 레이저를 사용하였으며, 실험을 통하여 반도체 레이저가 간섭계 광원으로 사용이 가능함을 확인하였다. 그리고 간섭계의 한 쪽 경로에는 슬라이드 글라스를 삽입하고 일정 각도로 회전시키면서 이동한 간섭무늬의 수를 세었다. 굴절률이 n 인 물체가 회전할 때 생기는 광경로차를 이론적으로 계산하였으며, 이동한 간섭무늬의 수와 이론적 광 경로차로부터 슬라이드 글라스의 굴절률을 측정하였다.

또한 슬라이드 글라스를 간섭무늬 팔에 삽입하고 회전함으로써 광 경로차를 서서히 변화시킬 수 있었고 간섭 무늬가 이동하는 것을 관찰할 수 있었다. 유리판의 회전한 각도가 작을 때는 회전 각도 당 이동하는 간섭 무늬의 수가 적으므로 손으로 돌리면서 실험하기 유리하고 간섭 무늬가 이동하

는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 이러한 유리판 회전 방식은 마이켈슨 간섭계에에서 사용하는 정밀 스테이지를 필요로 하지 않기 때문에 적은 비용으로 교육용 간섭계를 구성할 수 있는 장점을 제공한다. 보통 학생들이 마이켈슨 간섭계를 이용하여 간섭무늬가 움직이는 것을 관찰하기 위해서는 간섭계 한 쪽 팔에 위치한 거울에 정밀 스테이지를 설치하여 이를 움직이며 무늬가 움직이도록 하는데 정밀도가 파장 보다 작아야 하므로 높은 정밀도를 요구하고 장비가 비싸다. 정밀하지 않은 장치를 사용할 경우에는 주변 진동에 의해 간섭무늬가 흔들리거나 손으로 조금만 마이크로미터를 회전시켜도 간섭 무늬가 빨리 지나가기 때문에 간섭 무늬의 이동을 관찰하기 어렵다. 따라서 교육용 간섭계를 구성하기 위해 이러한 유리판 회전 방식을 사용하는 것은 더 효율적인 방식이라고 볼 수 있다.

마지막으로 비용이 덜 들면서 정렬이 간편한 마흐젠더 간섭계를 만들기 위해서, 3D 프린터를 이용하여 간섭계 본체 및 부품들을 제작하였다. 거울이나 광분할기를 부착하여 레이저 경로를 조정할 때 사용하는 마운트를 나사와 고무줄, 작은 철사로 구현하여 각도 조정이 가능하도록 제작하였으며, 제작한 간섭계의 크기는 165 mm × 120 mm × 57 mm 정도로 작고, 광학대가 없이도 간섭계 구성이 가능했다. 3차원 프린터로 제작된 마흐젠더 간섭계를 사용하여 유리판의 굴절률을 측정된 결과 참고 문헌의 값과 일치하는 결과를 얻었으며 제작된 간섭계의 성능이 교육용으로 사용하기에 충분한 수준임을 확인하였다.

본 연구에서는 3D프린터와 반도체 레이저를 사용하여 마흐젠더 간섭계를 제작하였고 유리판 회전을 통한 간섭 무늬의 관찰과 함께 유리판의 굴절률도 측정함으로써 간섭계의 성능을 확인하였다. 이러한 3차원 프린터 마흐젠더 간섭계는 간섭계 정렬이 용이하고 제작 비용이 저렴해서 교육용으로 적합하다고 생각된다. 그리고 이 장치를 이용해서 여러 학생들이 탐구활동에 참여하고, 간섭무늬가 이동하는 장면을 정

성적으로 관찰하거나 빛의 파장이나 굴절률을 정량적으로 계산하는 수업에 이용할 수 있을 것으로 생각한다. 또한 간섭계 실험을 통해 물리실험이나 심화, 고급 물리를 수강하는 학생들의 참여도 및 학습 내용에 대한 이해도를 높일 수 있으리라 기대한다.

References

1. I. G. Kim, S. S. Lee, and K. W. Jang, *Physical optics* (Bookshill, Seoul, Korea, 2011), pp. iii.
2. S. H. Yoon, *High school advanced physics* (Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity, Seoul, Korea, 2011), pp. 222.
3. Ministry of Education, Science and Technology, *Science Curriculum. Ministry of Education, Science and Technology Notice No. 2011-36 [Separate 9]* (Ministry of Education, Science and Technology, Seoul, Korea, 2011), pp. 71, pp. 79-80, pp. 142-143, pp. 153-154.
4. J. H. Yoon, Ed. M. *Thesis*, Seoul National University, Seoul (2010), p.1-2, p.62
5. D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamentals of physics 9th edition* (John Wiley&Sons Inc, NJ, USA, 2011), pp. 980.
6. E. Hecht, *Optics 3rd edition* (Addison-Wesley, MA, USA, 1998), pp. 403-408.
7. D. Malacara, *Optical shop testing* (John Wiley & Sons Inc, NJ, USA, 1978), pp. 126.
8. J. M. Jeon, S. C. Karm, and Y. G. Ju, "Michaelson interferometer using vertical-cavity surface-emitting lasers," *Sae Mulli*. **53**, 547-553 (2006).
9. Refractive index of soda lime glass, "Refractive index of soda lime glass," (Refractive index of GLASS-soda-lime-clear, 2017), <https://refractiveindex.info/?shelf=3d&book=glass&page=soda-lime-clear>.