

## 3D 프린팅을 이용한 광섬유 모드 굴절률 측정 장치

함영은<sup>1</sup>, 이은주<sup>1</sup>, 이동화<sup>1</sup>, 김용<sup>1</sup>, 이광조<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 응용물리학과, <sup>2</sup>경희대학교 자연과학종합연구원

### Development of the apparatus for measuring modal indices of an optical fiber based on 3D printing technique

Youngeun Ham<sup>1</sup>, Eunjoo Lee<sup>1</sup>, Donghwa Lee<sup>1</sup>, Yung Kim<sup>1</sup>  
and Kwang Jo Lee<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Kyung Hee University, Yongin 17104

<sup>2</sup>Institute of Natural Sciences, Kyung Hee University, Yongin 17104

**요 약** - 본 연구에서는 3D 프린팅을 이용한 광섬유 모드 굴절률 측정 장치를 설계하고 제작하였다. 먼저, 3D 프린팅에 대한 기초적인 이해와, 이를 이용한 광학 실험 장치의 제작 과정에서 고려할 사항들을 소개한다. 그리고 실제로 실험 장치를 설계 및 제작함으로써, 사용자의 편의에 맞춰 제작할 수 있는 3D 프린팅의 장점을 보일 것이며, 제작한 부품이 광학 실험에 있어 필요한 조건(구조적 안정성, 높은 정밀도 등)들을 충족함을 확인할 것이다. 제작된 부품들을 조립하여, 최종적으로 프리즘 커플링 셋업을 제작하였다.

**ABSTRACT** - Novel apparatus for the measurement of modal indices of optical fibers was designed and built up with 3D printing technique. First, we describe design parameters of the measurement setup based on prism coupling. Each part comprising the setup were designed by 3D modelling, and then fabricated and assembled considering various types of fibers under test.

**주 제 어** - 광섬유 모드, 프리즘 커플링, 3D 프린팅

**Keywords** - Optical fiber modes, Prism coupling, 3D printing

### 1. 서론

광섬유는 정보 통신 및 센서 분야에 널리 이용되는 도파로이다.<sup>1</sup> 광통신, 화상전송 시스템, 광섬유 센서, 광자이로 등 사용하는 분야가 다양하다. 광섬유를 통해 정보를 주고받으려면 광섬유 내에 존재하는 모드에 대한 정보를 아는 것이 중요하다. 광섬유의 모드를 분석하기 위해서는 각 모드가 가지는 유효굴절률을 측정해야 한다. 본 논문에서는 프리즘 커플링 방법을 통해 모드의 유효굴절률 측

정하는데, 이 방법은 몇 가지 부품만으로도 굴절률 값을  $< 10^{-4}$ 의 정확도로 측정할 수 있다는 장점이 있다. 안정적인 프리즘 커플링 장치를 구성하기 위해서는 우선 구성부품의 구조적 안정성 및 정밀도가 중요하며, 또한 다양한 종류의 광섬유 특성을 분석할 수 있으려면 장치를 구성하는 부품들의 크기에 대한 자유도가 있어야 한다.

3D 프린팅 기술은, 사용자가 원하는 형태를 자유롭게 설계하고, 이를 실제로 제작할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 특히, 사용하는 프린팅 재료,

## 3D 프린팅을 이용한 광섬유 모드 굴절률 측정 장치

즉 필라멘트의 종류에 따라, 정밀도, 후처리 가공, 반영구적인 특성을 조절할 수 있기에, 목적에 맞는 설계와 구조물을 제작할 수 있다.

본 논문에서는 3D 프린팅 기법을 이용한 프리즘 커플링 장치의 설계와 제작을 다룬다. 우선 프리즘 커플링의 원리와 632.8 nm 파장에서 광섬유에 나타나는 각각의 모드를 살펴보고, 모드 측정에 적합하도록 3D 프린팅 기법으로 설계한 프리즘 커플링 장치를 다룰 것이다. 또한, 제작 과정에 있어 각 목적에 따라 구조를 설계하는 방법과, 어떠한 필라멘트를 사용해야 원하는 구조물을 얻을 수 있는지에 대해 소개할 것이다.

## 2. 관련 이론

### 2.1 3D 프린팅

3D 프린팅이란 3차원 CAD 프로그램을 이용하여 생산하고자 하는 형상을 입체로 설계하고, 이에 따라 물질을 한 층씩 차례로 쌓아 올려 설계한 물체를 제작하는 방식을 의미한다.

3D 프린팅에 사용되는 재료는 FILAFLEX, ABS, PLA 등이 있으나, 일반적인 상황에서는 주로 ABS와 PLA를 사용한다. 각 물질의 특징은 다음과 같다.

#### A. Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

ABS는 합성수지로 생산하기 쉽고 빛깔이 다양하다. 또한, 출력 후 재가공 및 도색이 편리하다. 하지만, 재료가 식으면서 균을 때 온도에 따라 수축하는 정도가 달라 균열이 발생하기 쉽다.

#### B. Poly Lactic Acid (PLA)

PLA는 옥수수 또는 사탕수수로 만들어진 친환경 수지이므로 유해요소가 적다. 또한 ABS와 비교하여 수축이 적다는 장점이 있으나, 후가공이 어렵다는 단점이 있다.

3D 프린팅의 장점은 구조적 안정성을 위한 디자인을 실험자가 원하는 대로 설계할 수 있다는 것이다. 또한, 프린팅하기 전에 미리 설계한 구조물들을 입체 화면으로 구성해봄으로써, 설계한 셋업의 정밀도를 가늠해 볼 수 있다. 특히 프리즘 커플링

장치의 경우, 여러 파장 영역에서 동작하는 다양한 종류의 광섬유의 모드를 분석하려면 몇 가지 크기의 프리즘이 필요한데, 3D 프린팅 기법을 이용하면 실험자의 설계에 따라 프리즘의 다양한 크기에 맞게 조절 가능한 부품을 만들 수도 있다.

3D 프린팅은 크게 모델링, 출력, 후가공의 순서로 이루어진다. 3D 프린터를 이용하여 물체를 만들기 위해서는 입체형상으로 구성된 모델링을 먼저 해야 한다. 그다음에는 모델링 파일을 STL 파일, 즉 실제 3D 프린터가 인식하는 파일 형태로 바꿔준다. 해당 파일에는 사용할 재료와 출력 속도 등의 설정값을 입력하며, 마지막으로 프린터와 연결하여 출력한다. 출력한 물체는 후처리 가공을 통해 지지구조 제거, 염색, 연마 등을 하여 완성한다.<sup>2</sup>

### 2.2 광섬유 모드

일반적인 계단형 굴절률 분포를 가지는 광섬유는 코어와 클래딩으로 구성된 원통 형태의 도파로 소자이다. 코어는 클래딩보다 높은 굴절률의 물질로 구성되어 있으며, 빛의 대부분은 광섬유 내의 코어를 따라 도파한다. 이때 빛은 광섬유의 구조와 굴절률 조건에 따라 도파 가능한 빛의 조건이 결정되는데, 이를 모드라 한다.

광섬유의 중심축, 즉 광축을 통과하는 빛을 자오광선(meridional ray)이라고 한다. 전자기파가 중심축을 지나면서 위-아래 방향으로 반사할 때에는 전기장 또는 자기장 성분이 진행 방향에 수직이 된다. 빛이  $z$  방향으로 진행한다고 하면, 어떤 장이 진행 방향과 수직이냐에 따라  $E_z$  또는  $B_z$ 가 0이 된다. 이때 전기장 성분이 0이 되는 빛을 TE, 자기장 성분이 0이 되는 빛을 TM 모드라 한다. 이와 달리 광축을 지나지 않는 빛도 존재하며, 이 빛은 사행광선(skew ray)이라고 한다. 이 빛은 광축을 지나지 않기 때문에 특정 장이 0이 되지 않는다. 따라서  $E_z$ 와  $B_z$ 성분이 둘 다 존재하게 되며, 이로 인해 나타나는 모드를 HE, EH 모드라고 한다. 이러한 모드 형태로 전파하는 빛은 파장 및 세기 등의 특성들이 유지되는 특성이 있다.

코어와 클래딩의 굴절률 차이가 작은 광섬유의 경우, 유지되는 모드의 형태가 TE, TM, HE, EH 모드들의 선형 결합으로 나타나는데, 이러한 모드를

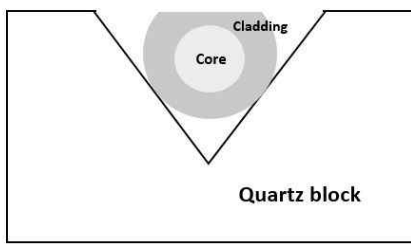
선형 편광(Linear Polarized, LP) 모드라고 한다. 광섬유에 존재 가능한 모드는 다음 식(1)을 통해 그 개수가 정해진다.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} (n_{co}^2 - n_{cl}^2)^{1/2} \quad (1)$$

이 값을 광섬유의 V-값이라 정의하며, 광섬유를 따라 통과하는 빛의 파장( $\lambda$ ), 코어의 반지름( $a$ ), 그리고 코어와 클래딩을 이루는 물질의 굴절률( $n_{co}$ ,  $n_{cl}$ )에 따라 결정된다. 보통 단일 모드 광섬유는 위의 조건들을 조정하여,  $V < 2.405$ 의 값을 가지도록 제작한다.

### 2.3 프리즘 커플링(Prism coupling)

광섬유를 도파하는 모드를 실험을 통해 구분하는 방법에는 우선 광섬유 모드 프로파일러를 이용하는 방법이 있다. 그러나 모드가 작은 영역에 분포되어 있고, 비슷한 유효 굴절률 값을 가진 모드끼리 선형 결합이 되어있는 경우를 구분하기는 까다롭다. 또한, 광섬유가 다른 광학 소자에 연결된 상태에서, 그 안을 도파하는 모드에 대한 정보를 얻기란 쉽지 않다. 이번 실험에서 사용하는 프리즘 커플링 방법은, 위와 같이 광섬유의 끝단을 확인할 수 없는 상황에서, 소산장(Evanescent Field) 결합을 통해 모드에 대한 정보를 알 수 있는 방법이다.<sup>3</sup>



Top view of side-polished fiber

그림 1. 측면 연마 광섬유의 윗면.

### 2.4 측면 연마 광섬유 (Side Polished Fiber)

측면 연마 광섬유란 소산장 상호작용을 기반으로 한 광학 플랫폼의 일종으로, 그림 1과 같이 광섬유의 클래딩 부분이 일부 제거된 광섬유이다. 클래딩이 제거된 부분(i.e., 연마된 부분)에서 도파로 구조

의 변화에 따라 광섬유를 진행하는 빛의 소산장이 발생하게 된다. 이때 발생된 소산파를 기반으로 방향성 결합기, 감쇄기 그리고 센서 등 많은 분야에서 응용되고 있다.

### 3. 3D 프린팅 기법을 이용한 프리즘 커플링 장치 제작

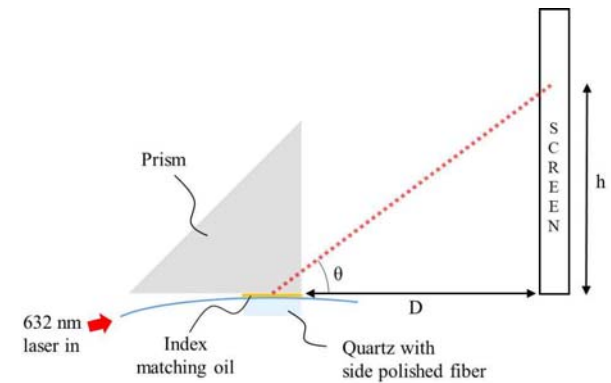


그림 2. 프리즘 커플러 셋업의 모식도.

그림 2는 모드의 굴절률에 따른 분산 각도를 측정할 수 있는 프리즘 커플링 셋업의 모식도를 나타낸다. 이 때, 유효 굴절률에 따른 프리즘의 분산 각도는 식 (2)로 표현된다.

$$n_e = \sqrt{n_p^2 - \sin^2\theta} \quad (2)$$

특정 분산 각도로 빠져나온 빛은, 프리즘 커플러 실험 장치에서 다음 그림 3과 같은 기하학적 관계를 가진다. 프리즘에서 나오는 각도를  $\theta$ , 프리즘에서 퍼져나가는 높이부터 관찰하는 곳까지의 높이 차이를  $h$ 라고 하면 스넬의 법칙을 통해 다음과 같은 식 (3)를 얻을 수 있다.

$$D \tan\theta = h \quad (3)$$

프리즘 커플러 장치를 설계하는 데 있어, 우리는 형태에 따른, 수직 방향 또는 수평 방향, 두 가지 종류의 설계를 고려하였다. 각 형태의 특징 및 장단점은 다음과 같다.

#### A. 수직 방향 장치 (Vertical Type)

수직방향의 프리즘 커플링 장치는 검출기가 수직 방향으로 움직일 수 있도록 지지대가 필요하다. 이 때 검출기의 속도는 일정해야하므로, 매끄럽게 움직일 수 있는 지지대를 만들어야 할 것이다. 실험

### 3D 프린팅을 이용한 광섬유 모드 굴절률 측정 장치

에 사용할 삼각프리즘의 크기, 가로 × 세로 × 높이가 5 cm × 5 cm × 5 cm이므로 아래쪽의 놓이는 쿼츠보다 매우 크다. 이 경우 중력을 통해 프리즘이 쿼츠를 눌러주는 힘이 충분하여 프리즘과 쿼츠의 접착이 쉽다. 하지만 크기차이로 인해 안정적이지 않기 때문에 이를 안정적으로 만들어줄 케이스가 필요할 것이다.

#### B. 수평 방향 장치 (Horizontal Type)

수평 방향으로 부품을 설계할 경우 검출기는 레일을 통해 움직이면 되므로 검출기를 연결할 지지대는 필요하지 않다. 또한, 쿼츠와 프리즘의 크기 차이로 인한 안정성도 고려할 필요가 없다. 하지만, 쿼츠와 프리즘을 눌러 접착시켜주는 힘이 없으므로 이 힘을 만들어주는 케이스를 만들어야 한다.

수평 방향 장치는 수직 방식보다 제작하는 부품의 수가 적으며, 측정 부분에서의 오차를 낮추고, 측정의 편리성을 증대시킬 수 있을 것이라 예상된다. 따라서 이번 연구에서는 수평 방향 측정 방식의 프리즘 커플링 장치를 선택하였다. 구상한 수평 방향의 프리즘 커플링 실험의 모식도는 다음 그림 4와 같다.

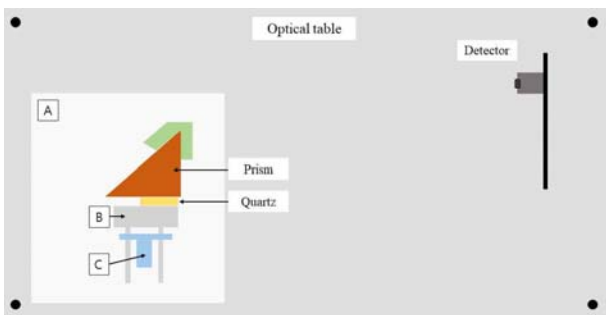


그림 3. 수평 방향 프리즘 커플링 장치 모식도.

그림 3. A, B, C는 그림 4. a), b), c)와 동일하며, 순서대로 받침판, 쿼츠 받침대, 쿼츠 위치 조절대이다. 이를 통해, 측면 연마된 광섬유와 프리즘을 커플링 시켜, 광섬유 내부의 빛을 빠져나오게 한다. 이 빛을 오른편의 검출기를 통해 측정하며, 같이 위치한 레일로 검출기를 수평 방향으로 움직임으로써 빛의 위치를 알 수 있다.

#### ● 설계

3D 프린팅을 이용하여 프리즘 커플러를 설계할 때 크게 세 가지를 고려하였다. 먼저 제작한 케이스가 광섬유가 지나가는 부분을 막지 않아야 한다. 두 번째는 프리즘에서 측정할 빛이 나오는 부분을 막지 않아야 한다. 마지막으로 안정적으로 쿼츠와 프리즘을 접착하는 것이다. 따라서 실험을 위해 총 3 가지 부품: 받침판, 쿼츠 받침대, 쿼츠 위치 조절대를 설계하였다. 그림 5는 각 부품의 설계 파일 사진 및 수평 방향 프리즘 커플러 장치이다.

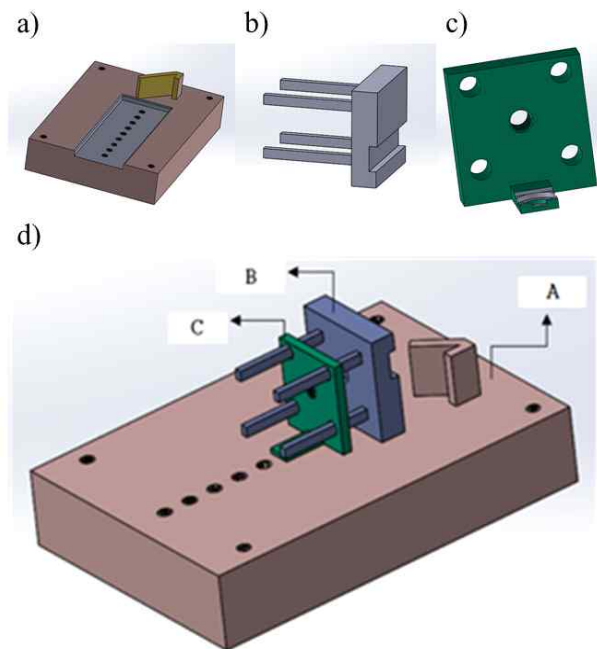


그림 4. 프리즘 커플링 장치 구성 부품의 설계 파일 및 장치 모식도, (a) 받침판, (b) 쿼츠 받침대, (c) 쿼츠 위치 조절대, (d) 수평 방향으로 제작된 프리즘 커플러 장치.

그림 4(a)는 받침판으로, 그림 3.에서 볼 수 있듯이, 프리즘을 고정해주는 역할을 한다. 또한, 광학 실험대에도 고정할 수 있도록 설계하여 실험의 안정성을 높였다. 또한 프리즘 고정 역할을 하는 부분(노란색)이 프리즘의 모서리부분과 맞물리게 설계하여 프리즘이 움직이지 않도록 하였다. 또한, 실험마다 쿼츠 또는 프리즘의 크기가 달라질 수 있으므로, 나사 구멍을 뚫어, 쿼츠 받침대와 쿼트 위

치 조절대의 위치 이동 및 고정이 가능하게 만들었다.

그림 4(b)는 퀴츠 받침대로, 그림 3(B) 그림 4(d) B에 해당한다. 퀴츠를 지지해주는 역할을 하는 부분으로, 퀴츠가 들어가는 부분을 C자 모양으로 만들어 광섬유가 지나가는 경로는 막지 않고 계단형으로 퀴츠 받침대를 설계했을 경우보다 더욱 안정적으로 퀴츠를 지지할 수 있다. C모양의 퀴츠를 넣는 곳 뒤로 있는 네다리는 퀴츠 위치조절대의 이동을 도와주는 역할을 한다. 퀴츠 위치조절대와 퀴츠 받침대가 결합할 경우 다리가 네모서리에 있는 원형모양의 구멍을 통과하여 안정적으로 결합할 수 있게 도와준다.

그림 4(c)는 퀴츠 위치조절대로 퀴츠 받침대를 밀어줌으로써, 퀴츠의 세밀한 위치 조절을 할 수 있도록 하는 지지대이다. 가운데 구멍에 위치한 나사 구멍에 나사를 넣으면, 나사의 끝이 퀴츠 받침대의 가운데를 밀어줌으로써, 프리즘과 퀴츠가 접촉되게 한다. 이때, 퀴츠 받침대의 가운데에 나사 크기의 홈을 살짝 만들어 나사가 평행하게 퀴츠 받침대를 밀어줄 수 있게 하였다. 또한 아래 부분에 있는 나사구멍을 그림 4. a)의 받침판 나사구멍과 일치시킨 후, 나사를 넣어 고정하면 받침판과 퀴츠 위치조절대가 고정된다. 이때 고정되는 위치에 따라 받침판의 나사구멍의 위치를 선택할 수 있다. 이는 프리즘의 크기변화에 따라 자유롭게 고정위치를 변화시켜 사용할 수 있어 유용하다. 즉, 프리즘 사이즈에 따른 대략적인 위치 조절을 받침판에 새긴 구멍으로, 그리고 퀴츠와 프리즘의 접촉 기능을 퀴츠 받침대와 퀴츠 위치조절대로 구현하였다.

### ● 제작

실제 제작을 위해서는 각 부품들을 어떤 재료로 제작할 것인지에 대한 결정이 필요하였다. 따라서 앞서 소개한 PLA와 ABS의 특성을 고려하여 선택하였다. 먼저 다른 두 부품이 올라가는 받침판의 경우, 프리즘과 부품들이 모두 같은 수평 상에 올라가야한다. 따라서 사포로 각 면을 약간씩 갈아줘 면을 평평하게 만들기 쉬운, 즉, 후가공이 쉬운 ABS로 제작하였다. 실제 제작에서는 ABS 물질의 특성인 수축현상으로 인해 바닥부분의 모서리가 살

짝 들려서 출력되는 현상이 발생하였다. 하지만 전체 셋업의 안정성에는 문제가 없었다.

퀴츠 받침대를 ABS로 제작할 경우, 수축현상으로 인해 4개의 다리부분이 제대로 출력되어 나오지 않는다.(그림 5. d) 따라서 상대적으로 수축현상이 적은 PLA를 사용하였다.

퀴츠 위치조절대의 경우, 모서리 구멍에 퀴츠 받침대의 네다리가 정확히 맞물리게 통과해야한다. 따라서 출력과정의 오차를 고려하여, 후가공이 편리한 ABS를 사용하였다.

그림 6은 제작하여 조립한 프리즘 커플링 장치의 모습이다.

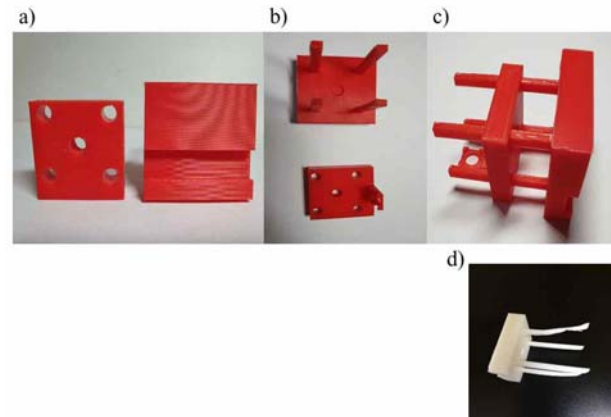


그림 5. 실제 3D 프린팅으로 제작한 수평 방향 프리즘 커플링 장치 부품 사진. a) 정면, b) 후면, c) 결합 모습, d) 퀴츠 받침대를 ABS로 출력했을 때, 일어난 수축 현상.

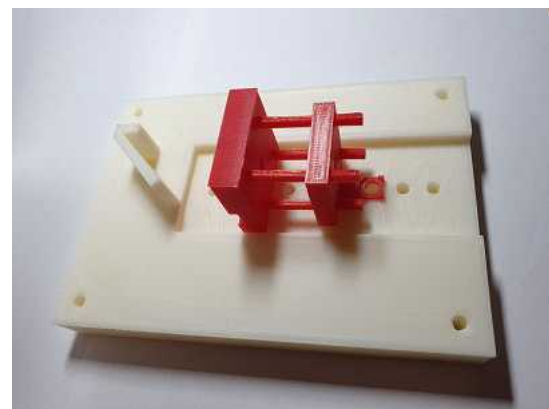


그림 6. 조립한 프리즘 커플링 장치의 모습

이와 같이 3D 프린팅 기법으로 셋업을 구성할 경

### 3D 프린팅을 이용한 광섬유 모드 굴절률 측정 장치

우, 고려사항을 모두 만족하는 케이스를 정밀하고 쉽고 빠르게 어디서든 제작할 수 있다. 재료를 다듬기 위한 특별한 추가 공정 없이 간단하게 다듬을 수 있기 때문에 약간의 변경과 가공도 쉽게 할 수 있다. 또한 꺾쇠와 프리즘의 접착정도를 조절할 수 있으므로, 다양한 종류의 프리즘 및 꺾쇠를 문제없이 사용할 수 있다는 장점이 있다. 이는 3D 프린팅을 통해 제작한 부품을 이용하여 구성부품이 다른 실험에서도 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 심지어는 3D 프린팅으로 제작한 부품들을 오랫동안 보관할 수 있으며, 재사용 또한 가능하다. 재료에 따라 특성이 다양하게 달라질 수 있다. 따라서 같은 물체를 제작하더라도 특성에 따라 다른 역할을 할 수 있다.

한번 제작한 부품은 오랫동안 사용가능하기 때문에 다방면에 활용이 가능하다. 조립식이기 때문에 각 부품이 필요한 곳에 적절하게 사용할 수도 있다는 점에서, 효율적인 제작 방식이라 할 수 있다.

앞으로는, 실제 제작한 장치를 이용하여 632.8 nm 파장에서 광섬유의 다중 모드를 분석할 계획이다. 또한, 1550 nm 파장에서도 동일하게 실험을 진행하여, 잘 알려져 있는 단일 모드 유효굴절률 값과 비교해봄으로써, 측정 장치의 정확도를 확인해 볼 것이다.

### 4. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅을 이용하여 수평 방향의 프리즘 커플러 장치를 제작하였다. 이때, 필요한 부품을 안전성과 광섬유의 위치 등을 고려하여 설계 및 제작하였다. 3D 프린팅으로 제작한 이유는 먼저 구조적으로 안정성과 정밀성이 존재하는 케이스를 원하는 대로 설계하여 만들 수 있기 때문이다. 또한, 구조의 특성에 따라 후가공의 편의성과 수축 정도를 고려하여 적합한 재료를 선택해 제작할 수 있다는 장점이 존재하기 때문이다. 3D 프린팅을 이용하여 제작한 결과, 장치를 쉽고 빠르고 정밀하게 제작할 수 있으며 한번 제작한 장치는 오랫동안 사용할 수 있고 활용이 쉬운 장점이 있다. 또한, 기존의 생산방식을 통해 제작한 부품보다 후가공이 쉽다. 제작한 장치는 조립식의 형태를 가지

고 있으므로, 실험하며 필요한 부품을 따로따로 제작하여 추가할 수 있으며, 프리즘의 크기에 상관없이 실험할 수 있다는 장점이 있다.

### 참고문헌

1. 강희전, "광통신용 광섬유의 기술동향과 응용", The Korean Institute of Electrical Engineers, 51(7), 21-26. (2002).
2. Lipson, H.. & Kurman, M.. *Fabricated [electronic resource] : The new world of 3D Printing* (Ind.: John Wiley and Sons, 2013)
3. Onodera, H.; Awai, I.; Ikenoue, J., "Refractive-index measurement of bulk materials: prism coupling method," Appl. Opt. 22, 1194-1197 (1983).