

## Measurement of the Refractive Index of a Mixed Polymer by a Prism Spectrometer and its Application

Ji-Young Kim and Young-Gu Ju<sup>†</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics Education, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

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

We measured the refractive index of a mixed polymer (NOA61, NOA84) in the liquid and solid states. First we made a hollow prism and filled it with UV (ultraviolet) epoxy. Measurement of the apex angle and the minimum-deviation angle gave the refractive index of the liquid polymer. To measure the refractive index of the solid polymer, an additional structure was included in the hollow prism, and the UV epoxy filling in the hollow prism was hardened. In both cases of liquid and solid polymers, the refractive index of the mixed polymer turned out to be proportional to the mix ratio. These results provide a method to vary the focal length of a double stacked cylindrical microlens array using UV epoxy.

Keywords: Refractive index, Prism, Polymer, Spectrometer, Microlens

OCIS codes: (290.3030) Index measurements; (230.5480) Prisms; (160.5470) Polymers; (120.6200) Spectrometers and spectroscopic instrumentation; (080.3630) Lenses

## 프리즘 분광계를 이용한 혼합 폴리머의 굴절률 측정과 응용

김지영 · 주영구<sup>†</sup>

<sup>1</sup>경북대학교 물리교육과  
☎ 41566 대구광역시 북구 대학로 80

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

프리즘 분광계를 사용하여 액체 상태와 고체 상태의 혼합 폴리머(NOA61, NOA84) 굴절률을 측정하였다. 먼저 속이 빈 작은 프리즘을 제작하고 UV (ultra-violet) 에폭시를 채운 다음 프리즘의 꼭지각과 최소 편향각을 측정하여 굴절률을 측정하였다. 고체 상태의 폴리머는 속이 빈 프리즘에 추가 구조물을 넣고 UV 에폭시를 경화하여 고체 폴리머가 채워진 프리즘을 제작하고 굴절률을 측정하였다. 액체 상태나 고체 상태인 경우 모두, 두 종류의 에폭시를 섞어서 혼합 폴리머를 만들고 혼합비를 조절하면서 굴절률을 측정한 결과 혼합비에 비례하는 굴절률 측정값을 얻었다. 이러한 결과는 UV 에폭시를 사용한 원통형 이중 미세 렌즈 배열의 초점거리를 조절할 수 있는 방법을 제공한다.

Keywords: 굴절률, 프리즘, 폴리머, 분광계, 미세렌즈

OCIS codes: (290.3030) Index measurements; (230.5480) Prisms; (160.5470) Polymers; (120.6200) Spectrometers and spectroscopic instrumentation; (080.3630) Lenses

### I. 서 론

분광계를 이용한 스펙트럼의 관찰은 중고등학교 과학 교과서나 물리 교과서에 자주 등장하는 중요한 주제이지만 광학적인 관점이 아니라 주로 원자의 구조나 원소의 특성을 설명하는 그림에서 분광계나 프리즘이 보이는 정도이다<sup>1,2</sup>. 실제 분광계의 원리를 이해하기 위해서는 파장에 따라 굴절률이 다르다는 분산의 개념이나 회절 격자에서 파장에 따라 회절

각도가 달라지는 것을 이해해야 하는데 이러한 개념은 물리 II의 “파동과 빛” 부분에서 참고 자료로 나오거나 간단한 설명만 나와 있다<sup>3</sup>. 스펙트럼은 광학과 원자의 구조를 연결하는 중요한 개념이지만 현재 중고등학교 교과과정에서는 광학적인 면보다는 현대 물리의 관점이 강조되고 있다. 프리즘을 이용한 분광계나 이를 이용한 굴절률의 측정은 대학의 광학 전공 수업에 가서야 교과서에 나오게 된다<sup>4</sup>.

현재 대학 물리 실험에서는 프리즘 분광계를 이용하여 기

<sup>†</sup>E-mail: [ygnu@knu.ac.kr](mailto:ygnu@knu.ac.kr)

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

체 또는 원자의 선 스펙트럼을 관찰할 수 있다. 또한 프리즘의 꼭지각과 최소 편향각을 측정해서 선 스펙트럼의 각 파장에서 프리즘의 굴절률 값을 얻을 수 있다<sup>4,5</sup>. 하지만 프리즘 분광계를 이용하여 액체의 굴절률을 측정하기란 쉽지 않아 고체 굴절률 측정보다는 복잡한 실험 과정이 요구된다<sup>6,7</sup>. 빛의 분산을 이용해 액체의 굴절률을 측정하는 실험의 경우 최대·최소 편향법<sup>6</sup>을 이용하거나 프리즘 두 개를 유리로 된 상자에 직각이 되게 배열하고 그 사이 공간에 액체를 넣어 빛이 굴절되는 거리를 측정해 굴절률을 알아보는 방법이 있다<sup>7</sup>. 본 연구에서는 분광계와 자체 제작한 속이 빈 프리즘을 이용하여 혼합 폴리머의 액체 상태 굴절률과 고체 상태 굴절률을 측정해 보고자 한다<sup>8</sup>. 적은 양의 액체 자외선(ultra-violet, UV) 에폭시 굴절률을 측정하기 위해 프리즘은 아주 작게 제작하였고, 에폭시 경화 후 굴절률을 측정하기 위해 프리즘 내부에 추가 구조물을 사용하였다. 이 방법을 통해서 경화 전후의 자외선 에폭시 폴리머의 굴절률을 측정하였다.

실험에 사용된 UV 폴리머는 미세 렌즈나 조명 LED에 사용되는 원통형 이중 미세 렌즈배열을 제작할 때 광학 접착제로 쓰인다<sup>9</sup>. 원통형 렌즈 사이의 접합부의 굴절률 조적이 가능하다면 렌즈의 곡률 반경을 조절하지 않고도 초점 거리의 변화가 가능하다. 따라서 미세렌즈를 제작하는데 사용하는 UV 폴리머 NOA61과 NOA84를 질량비로 혼합했을 때 혼합비에 따른 굴절률 값을 안다면 원하는 초점 거리를 가지는 미세렌즈 배열의 제작이 가능해 진다.

보통 폴리머의 굴절률은 제작사 홈페이지에 측정값이 나와 있지만 파장에 따른 굴절률이나 혼합 폴리머의 굴절률은 잘 나와 있지 않다. 본 연구에서는 프리즘 분광계를 사용하여 폴리머의 굴절률을 효과적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하고, 액체 굴절률을 측정했던 속이 빈 프리즘을 이용하여 액체 UV 에폭시와 실제로 렌즈 제작에 사용할 고체 UV 폴리머의 굴절률을 측정하고 혼합 비율에 따른 굴절률의 변화를 측정하고자 한다.

## II. 실험 방법 및 과정

### 2.1. 프리즘 제작

먼저, 액체 폴리머의 굴절률을 측정하기 위해 속이 빈 프리즘을 제작 하였다. 처음 제작한 속이 빈 프리즘은 슬라이드

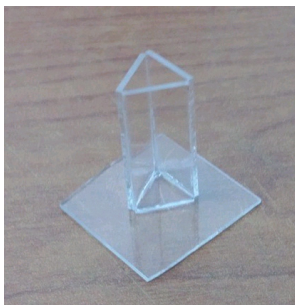


Fig. 1. A fabricated hollow prism.

드글라스를 가로 25 mm, 높이 26 mm로 3등분 하여 세 장의 유리를 세워서 각 면을 순간접착제로 고정하여 만들었다. 프리즘에서 유리의 단면이 불균일하여 액체가 새는 것을 막기 위해 진공그리스(vacuum grease)를 얇게 펴서 유리 틈새를 채웠다. 물과 같은 액체의 경우에는 진공그리스에 의해 액체가 새지 않았지만 실험에 사용할 UV 폴리머의 경우는 아주 미세한 틈으로도 새어 나가서 진공그리스에 의한 방수 효과는 얻을 수 없었다. 또한 폴리머는 많은 양을 사용할 수 없어서 더 작은 프리즘을 만들어야 했다. 그림 1은 2차로 제작한 소형의 속이 빈 프리즘 모습이다. 삼각기둥의 밑면은 변의 길이가 약 10 mm인 삼각형 모양으로 만들고 높이는 슬라이드글라스의 처음 높이인 26 mm 그대로를 사용하였다.

속이 빈 작은 프리즘은 슬라이드글라스를 3등분하여 1차 프리즘을 만들었을 때보다 틈이 더 많이 생겼고 유리의 크기가 매우 작아 각 변의 길이가 일정하지 못해서 제작된 프리즘 마다 다른 꼭지각을 가지고 있다. 틈이 많이 생긴 것을 해결하기 위해 순간접착제를 발라 오랜 시간 굳혀서 액체 폴리머가 새는 것을 막을 수 있었다. 속이 빈 프리즘에 액체 폴리머 NOA61을 넣어 자외선에 노출시켜 굳히는 작업을 하였다. 원래 NOA61나 NOA84는 렌즈나 프리즘을 연결시키는 용도로 사용되는 UV 에폭시로 보통 얇은 두께로 사용되나 본 실험에서는 26 mm 높이의 속이 빈 프리즘에 가득 채워 자외선으로 경화시켰다. 경화된 에폭시 또는 고체 폴리머는 그림 2에서처럼 윗부분에 기포가 생겼고 고르지 않게 굳어지거나, 경우에 따라 에폭시의 윗부분만 굳어지는 경우도 생겼다. 이러한 문제는 자외선이 아래쪽까지 고르게 비추지 못하기 때문에 생겼다고 판단하여 에폭시를 얇게 부은 뒤 경화 하는 방법을 시도했다. 시료를 적게 담아 얇게 만들 수 있지만 프리즘 분광계의 콜리메이터(collimator)를 통과하는 빛이 프리즘 바닥으로부터 어느 정도 일정한 높이를 통과해야하므로 새로운 방법을 고안해야 했다. 속이 빈 프리즘의 바닥으로부터 10 mm 높이에 고체 폴리머를 만들기 위해 그림 3에서처럼 프리즘에 들어갈 수 있는 작은 흰색 삼각 구조물을 만들어 집어넣고 실험을 진행 하였다. 그림 4는 폴리머를 삼각 구조물로부터 약 2 mm 높이까지 굳힌 모습이다. 이렇게 바닥으로부터 일정 높이가 떨어져 있고 얇게 만들어진 고체 폴리머 프리즘을 제작하고, 이를 이용해 고체 폴리머의 굴절률을 측정하였다.

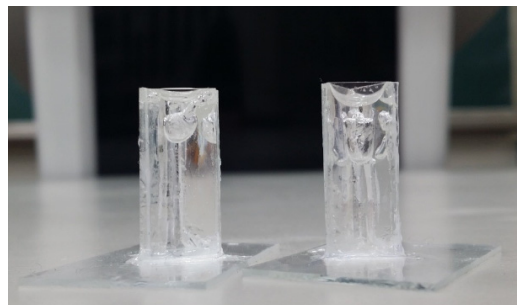


Fig. 2. Bubble has formed inside the prism after UV hardening.

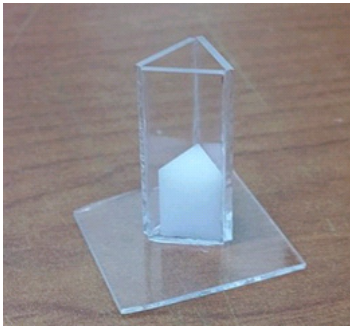


Fig. 3. The additional structure(white) inside a hollow prism.

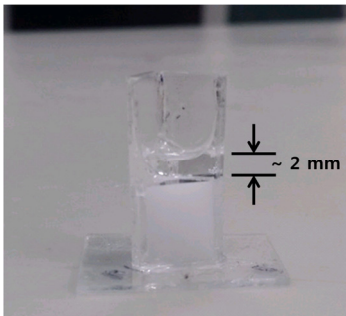


Fig. 4. The UV hardened NOA61 over the structure.

2.2. 굴절률 측정

프리즘 분광계는 그림 5에서와 같이 콜리메이터, 회전 플랫폼(rotating platform), 망원경(telescope), 각도 측정용 버니어(vernier)로 구성되었다. 본 실험에서는 광원으로 수은등을 사용하였다. 광원에서 나온 빛이 콜리메이터 렌즈의 초점 위치에 있는 좁은 슬릿을 통하여 콜리메이터로 들어가면 렌즈에 의해 평행광선이 되어 프리즘에 입사하게 된다. 프리즘에서 굴절된 광선은 망원경을 통과하여 각도가 증폭되고 눈으로 선명하게 관측할 수 있다. 분광계의 기저에는 원형으로 각도 눈금이 새겨져 있으며 회전할 수 있는 망원경에도 기저에 접한 쪽에 버니어가 붙어 있어서 망원경의 회전 각도를 1'까지 측정할 수 있다.

프리즘의 꼭지각을 측정하기 위해서 콜리메이터에서 나와 프리즘에서 반사되는 각도를 분(°) 단위로 측정하였다. 망원경을 오른쪽과 왼쪽으로 돌려가며 두 개의 각을 측정하는데

프리즘 표면에서 반사되는 슬릿 이미지의 중앙이 망원경에 그려진 십자선의 가운데에 위치하였을 때 값을 읽도록 하였다. 따라서 측정한 두 각의 차이 값  $2\alpha$  값에서부터 꼭지각  $\alpha$  값을 얻을 수 있었다. 최소 편향각(minimum deviation)  $\delta_{min}$  을 측정하기 위해 프리즘의 꼭지가 분광계 테이블의 중심에 위치하게 하고, 프리즘의 밑면과 콜리메이터의 광축이 약 30도가 되게 하였다. 망원경을 움직여 굴절한 슬릿의 상을 찾고 테이블을 회전시키면서 상의 변위를 관찰하는데 이때 상이 역행하는 전환점을 찾아내어 그 때의 각을 측정하였다. 최소 편향각은 프리즘이 오른쪽으로 빛을 굴절할 때의 각과 왼쪽으로 빛을 굴절할 때의 각 차이를 구한 다음 절반으로 나누어 구한다. 삼각프리즘의  $\alpha$ 와  $\delta_{min}$  을 측정한 후, 다음 식을 이용해 굴절률  $n$ 을 얻는다<sup>4)</sup>.

$$n = \frac{\sin\left[\frac{(\delta_{min} + \alpha)}{2}\right]}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \tag{1}$$

식 (1)은 원래 단일 매질로 이루어진 삼각 프리즘의 꼭지각과 최소 편향각을 측정하고 이것을 이용해 프리즘의 굴절률을 구하는 식이다. 본 실험의 경우에는 유리로 속이 빈 프리즘을 만들고 안에 액체 또는 고체 상태의 폴리머를 채운 복합 프리즘이라서 식 (1)을 그대로 적용할 수 있는지 생각해 볼 필요가 있다. 유리판의 양면이 평행이라면 식 (1)은 여전히 사용할 수 있다. 빛이 입사할 때와 출사할 때 평면 유리판을 지나는 데, 두 유리판은 편향각에 변화를 줄 수 없다. 예를 들어 유리판과 폴리머 계면 사이에 공기가 있다고 가정해 보자. 공기 중에서 유리판에 입사하는 빛은 유리판을 빠져 나올 때 다시 유리판과 폴리머 사이의 공기를 만나게 된다. 따라서 광선이 유리판을 나오는 출사각은 유리판을 들어올 때 입사각과 같다. 따라서 광선은 유리판을 지나면서 방향이 바뀌지 않는다. 그리고 광선이 유리판을 나오는 출사각은 광선이 폴리머를 들어가는 입사각이 된다. 프리즘 출사면에 있는 유리판도 같은 역할을 하게 된다. 공기 두께를 점점 줄여가며 0으로 극한을 취하면 우리가 실험하는 복합 프리즘이 된다. 결국 평행 유리판을 덧 붙인 폴리머 프리즘과 유리판이 없는 폴리머 프리즘의 최소 편향각은 같다.

III. 결과 및 논의

폴리머의 굴절률을 측정하기 위해서 수은 방전관에서 관측되는 주황색(578.2 nm), 녹색(546.1 nm), 보라색(435.8 nm) 세 가지 파장<sup>10,11)</sup>에서  $\delta_{min}$  을 각 5회씩 측정하여 식 (1)로부터 굴절률을 계산하였다. UV 폴리머 NOA61과 NOA84의 굴절률은 측정하는데 사용한 프리즘은 직접 제작된 것이기 때문에 프리즘마다  $\alpha$ 를 따로 측정하였다. 실험에서부터 얻은 액체 NOA61의 굴절률을 표 1(a)와 같다. 에폭시 제조사에서 제공한 굴절률 값<sup>12)</sup>은 1.527 인데, 측정 파장이 나와 있지

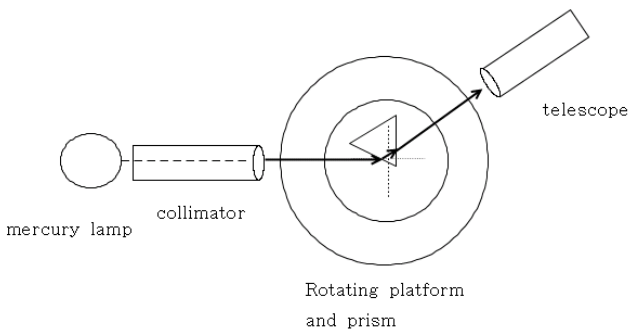


Fig. 5. Schematic diagram of a prism spectrometer.

**Table 1.** The refractive indices of liquid polymer: (a) NOA61; (b) NOA84

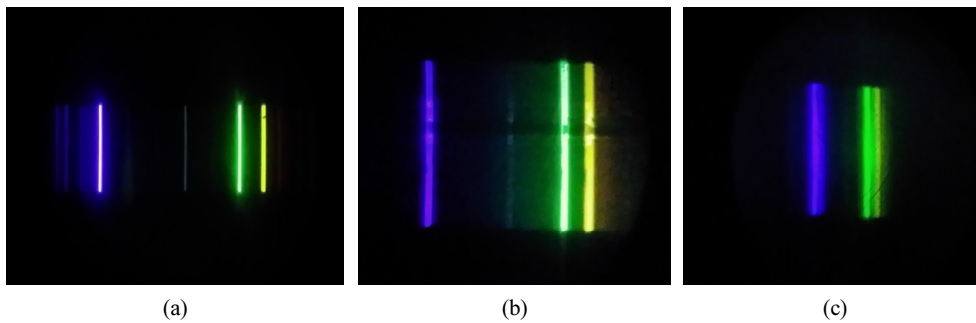
(a)			
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.531	0.00063
Green	546.1	1.533	0
blue	435.8	1.546	0
(b)			
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.440	0
Green	546.1	1.441	0.00063
Blue	435.8	1.453	0.00063

않아서 본 실험에서 측정한 값과 비교하기는 힘들다. 대신 본 실험에서 구한 측정값들의 표준편차가 0.0007 이하로서 측정 정밀도는 높다는 것을 알 수 있다. 측정한 액체 NOA84의 굴절률은 표 1(b)와 같이 주황색 1.440, 녹색 1.441, 보라색 1.453으로 측정되었다. 액체 NOA84 역시 굴절률의 표준편차 값이 0.00063으로 매우 작게 나와 실험의 오차는 거의 없었다. 그림 6은 유리 프리즘을 통과한 선 스펙트럼과 액체 폴리머를 담은 프리즘을 통과한 선 스펙트럼을 보이고 있다. 액체 폴리머의 스펙트럼선은 유리 프리즘과 같이 매우 선명하게 나타나  $\delta_{min}$ 을 측정하기 수월하였으며 측정의 표준편차도 적었다. 그래서 이 실험에서 얻은 굴절률 값을 사용해 혼합물의 굴절률을 계산한 결과와, 혼합물의 굴절률을 직접 측정한 실험 결과를 비교 하였다. 여기서 계산값이란 혼합하지 않은 액체 NOA61과 NOA84의 굴절률 측정값을 혼합한 비율의 가중치를 주고 평균한 굴절률 값을 말한다. 예를 들어

액체 NOA61과 NOA84의 질량을 2:1의 비율로 섞은 굴절률 계산값은 녹색(546.1 nm)에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{1.533 \times 2 + 1.441 \times 1}{3} = 1.502 \quad (2)$$

표 2는 액체 NOA61과 NOA84의 질량이 1:1이 되도록 섞은 혼합 폴리머의 파장별 굴절률의 측정값과 계산값 및 표준편차를 나타낸 것이다. 주황색은 측정값과 계산값의 차이가 0.001 밖에 나지 않았고 녹색과 보라색은 굴절률 값이 정확히 일치하였다. 측정의 표준편차도 0.00044 밖에 되지 않아 측정의 오차가 매우 작았다. 액체 NOA61과 NOA84의 질량을 2:1의 비율로 섞은 경우, 프리즘의 꼭지각  $\alpha$ 는 55.25° 이었다. 표 3(a)는 2:1 혼합 폴리머의 파장별 굴절률 측정값, 계산값, 표준편차를 나타낸다. 스펙트럼의 주황색과 녹색은 1:1 비율로 섞어서 측정했을 때와 같이 측정값과 계산값이 일치하였다. 특히, 녹색은 1:1 비율로 섞으나 2:1 비율로 섞으나 측정값과 계산값이 일치하는 결과를 보여주었다. 보라색도 계산값과 0.001의 차이밖에 보이지 않았다. 계산값과 측정값의 차이는 폴리머 혼합 비율의 실험적 오차에 어느 정도 기인하기 때문에 이 정도의 차이는 매우 작다고 할 수 있다. 액체 NOA61과 NOA84의 질량을 1:2의 비율로 섞은 경우, 프리즘의 꼭지각  $\alpha$ 는 62.22° 였다. 혼합 폴리머의 파장별 굴절률 측정값, 계산값, 표준편차는 표 3(b)에 나와 있다. 액체 UV 폴리머의 경우 계산값과 실험값이 거의 일치할 정도로 오차가 나타나지 않아서 혼합 액체 UV 폴리머의 굴절률 측정이 비교적 정확하게 이루어졌다고 생각된다. 그림 7은 액체 폴리머의 혼합 비율에 따른 굴절률을 나타낸 그래프이다. 이 실험을 통해 혼합 폴리머의 굴절률은 혼합 비율에 비례함을 알 수 있었다.



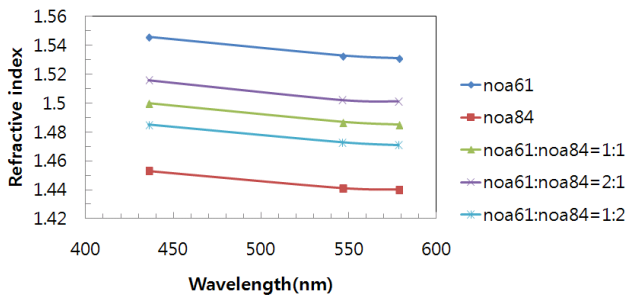
**Fig. 6.** Line spectrum images with various prism materials: (a) glass; (b) liquid NOA 61; (c) liquid NOA84 (The scales in the pictures are not same).

**Table 2.** The refractive index of the liquid mixed polymer. NOA61 and NOA84 are mixed with ratio of 1:1

Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.485	1.486	0.00044
Green	546.1	1.487	1.487	0.00044
Blue	435.8	1.500	1.500	0

**Table 3.** The refractive index of the liquid mixed polymer: (a) NOA61:NOA84 = 2:1; (b) NOA61:NOA84 = 1:2

(a)				
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.501	1.501	0.00148
Green	546.1	1.502	1.502	0.00245
Blue	435.8	1.516	1.515	0.00219
(b)				
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.471	1.470	0.00063
Green	546.1	1.473	1.472	0.0011
Blue	435.8	1.485	1.484	0.001

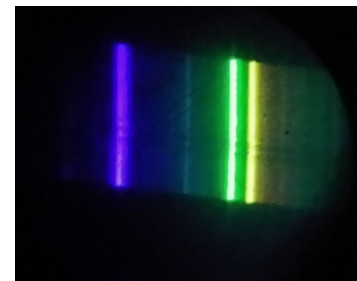


**Fig. 7.** The refractive index of the liquid mixed polymer with various mix ratios.

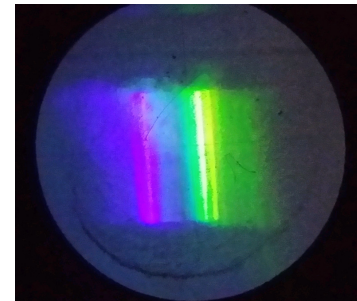
**Table 4.** The refractive index of the solid polymer: (a) NOA61; (b) NOA84

(a)			
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.557	0.00063
Green	546.1	1.563	0.0022
blue	435.8	1.576	0.0026
(b)			
Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.472	0.00063
Green	546.1	1.474	0.0011
Blue	435.8	1.484	0.00044

액체 UV 폴리머는 자외선에 노출시키면 고체로 경화한다. 광학 부품에 접착체로 사용되거나 미세 렌즈를 제작할 때는 경화된 상태를 사용하기 때문에 고체 상태의 굴절률을 측정하는 것은 중요하다. 고체 NOA61의 경우 비교적 사용이 빈번하기 때문에 문헌값을 얻을 수 있었다<sup>13)</sup>. 고체 NOA61로 채워진 프리즘의 꼭지각  $\alpha$ 는  $57^{\circ}36'$ 였다. 표 4는 경화된 UV 폴리머의 굴절률 측정값을 보이고 있다. 표 4(a)에서처럼 파장이 546.1 nm인 녹색의 경우 실험값은 1.563이고 문헌값은 1.5634로 0.0004만큼 오차가 낮으며 유효숫자를 소수



(a)



(b)

**Fig. 8.** Line spectrum images with various prism materials: (a) solid NOA61; (b) solid NOA84

셋째자리까지 본다면 일치한다고 볼 수 있었다. 파장이 435.8 nm인 보라색의 경우에도 실험값이 1.576이고 문헌값은 1.5754로 0.0006의 오차가 생겼고 유효숫자를 고려하면 0.001만큼 오차가 생겼다. 측정값의 평균을 구하면 1.565로 문헌값과 정확하게 일치하였다. 수은등의 스펙트럼을 고체 NOA61로 채워진 프리즘으로 관찰한 결과, 액체일 때와 다르지 않게 그림 8(a)처럼 스펙트럼선이 명확하게 나타났다. 고체 NOA84가 채워진 프리즘의  $\alpha$  값은  $52^{\circ}24'$ 이었으며, 측정된 고체 폴리머 NOA84의 파장별 굴절률 및 표준편차가 표 4(b)에 나와 있다. 그림 8(b)와 같이 수은등의 스펙트럼을 고체 NOA84로 채워진 프리즘을 통해 관찰한 결과 빛 퍼짐이 있었지만 선은 명확하게 구분할 수 있었다.

혼합된 폴리머의 굴절률을 측정하기 위해서 속이 빈 프리즘에 액체 상태 혼합 폴리머를 채우고 자외선에 노광시켜 경화 하였다. 먼저 액체 NOA61과 NOA84의 질량을 1:1의 비

로 섞어 속이 빈 프리즘 내에서 경화시킨 후 고체 혼합 폴리머의 굴절률을 측정하였다. 표 5는 파장별 굴절률 측정값, 계산값, 표준편차를 계산한 것이다. 제작된 프리즘의  $\alpha$ 는  $49.65^\circ$ 이고, 측정값과 계산값은 0.001~0.003 정도의 차이를 가지고 있었다. 표 5를 이용해 파장에 따른 굴절률의 측정값과 계산값의 상대오차를 구해보면 상대오차가 0.197% 이하이다. 고체 혼합 폴리머의 경우도 액체 혼합 폴리머처럼 굴절률이 혼합비에 비례함을 알 수 있다. 계산 값이 모두 측정값 보다 크게 나타났는데 실제 실험에서 1:1 혼합 비율에 오차가 생겼을 수도 있다. 따라서 계산값의 증분을 평균하면 굴절률이 0.0017 정도 이동이 일어났다고 봐야 한다. 표 5에서 계산값의 괄호 안에 보정한 값을 보이고 있다. 이 경우 측정값과 계산값은 모두 표준편차 이내에서 일치하고 있다. 액체 NOA61과 NOA84의 질량을 2:1의 비율로 혼합하고 경화한 프리즘의 꼭지각  $\alpha$ 는  $55.25^\circ$  이고, 파장별 굴절률 측정값, 계산값, 표준편차를 구해보면 표 6(a)와 같다. 굴절률의 측정값이 계산값과 비교하면 세 파장 일 때 모두 0.005 크게 나타났다. 앞서 1:1 경우와 마찬가지로 실험상 혼합 비율에 오차가 생겼다고 가정하고 이를 보정하면 표 6(a)에서 괄호 안에 나온 값과 같다. 보정된 계산값과 측정값은 세 파장에서 모두 일치한다. 액체 NOA61과 NOA84의 질량을 1:2의 비로 섞어 만든 고체 폴리머 프리즘의 꼭지각  $\alpha$ 는  $60.83^\circ$  이며, 파장별 굴절률, 계산값, 표준편차를 구해보면 표 6(b)와 같다. 굴절률의 계산값을 혼합비의 오차를 가정하고 보정한 것을 표 6(b)에 나타냈다. 측정값과의 차이는 모두 표준편차 정도이다. 그림 9은 고체 폴리머의 상대적 비율에 따른 굴절률 측정값을 나타낸 것이다. 혼합 고체 폴리머를 만드는 과정에서 고체의 굴절률 분포가 균일 하지 못하여 오차가 발생했을 가능성이 있다. 고체 폴리머의 불균일성은 그림 8(b)

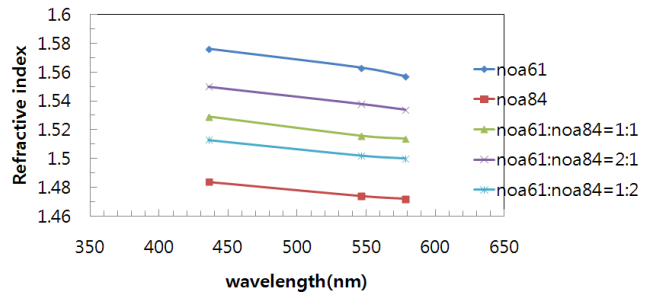


Fig. 9. The refractive index of the solid mixed polymer with various mix ratios.

에서와 같이 선스펙트럼이 변지는 현상을 일으키는 것으로 예상된다.

폴리머 혼합을 사용하면 혼합 비율에 따라 굴절률을 조절할 수 있는데 이를 미세 렌즈 배열에 적용하면 미세 렌즈 배열의 초점 거리를 제어할 수 있게 된다. 그림 10은 혼합 폴리머를 원통형 이중 미세 렌즈 배열에 사용하여 발광 다이오드 조명계를 만들고 배광 분포를 촬영한 사진이다. 원통형 미세 렌즈 배열을 사용한 조명계는 참고 문헌<sup>[9]</sup>에 자세히 나와 있다. 서로 직교하는 두 개의 원통형 미세 렌즈 배열 사이에 UV 에폭시를 바르고 접착하여 렌즈 배열 제작하는 데 렌즈 배열의 초점 거리가 짧으면 조명의 균일도는 좋아지지만 발산각이 커져서 조명의 조도가 약해진다. 반면에 렌즈 배열의 초점 거리가 길어지면 광선 다발의 혼합이 먼 거리에서 일어나고 조명 균일도는 나빠질 수 있지만 발산각이 작아져 조명의 조도는 크게 유지된다. 원통형 미세 렌즈 배열을 이루는 플라스틱의 굴절률이 1.55 정도라서 NOA61를 접착제로 사용할 경우 그림 10(b)에서처럼 가장 초점 거리가 길고 조도가 밝다. 초점 거리가 길어서 그림 10(a)에서 보이는

Table 5. The refractive index of the solid mixed polymer. NOA61 and NOA84 are mixed with ratio of 1:1

Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.514	1.515 (1.513)	0.0011
Green	546.1	1.516	1.519 (1.517)	0.00089
Blue	435.8	1.529	1.530 (1.528)	0.0012

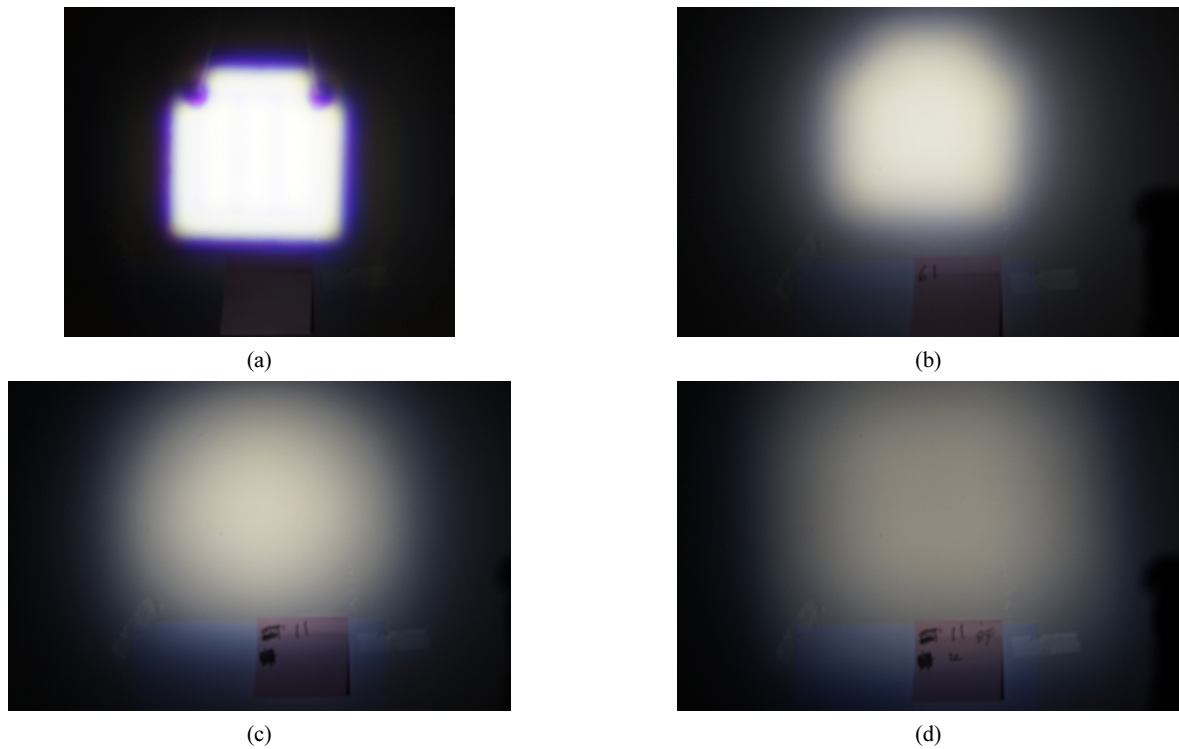
Table 6. The refractive index of the solid mixed polymer: (a) NOA61:NOA84 = 2:1; (b) NOA61:NOA84 = 1:2

(a)

Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.534	1.529 (1.534)	0.0019
Green	546.1	1.538	1.533 (1.538)	0.00044
Blue	435.8	1.550	1.545 (1.550)	0.00044

(b)

Color	Wavelength (nm)	Refractive index	Calculated value	Standard deviation
Yellow orange	578.2	1.500	1.500 (1.501)	0.001
Green	546.1	1.502	1.504 (1.503)	0.001
Blue	435.8	1.513	1.515 (1.514)	0.00077



**Fig. 10.** The illuminance distribution by a LED flash lamp (a) without a lens array is shown. The lens arrays with different polymer adhesives change the illuminance distribution depending on the mix ratio of NOA61 and NOA84: (b) NOA61 only (c) the ratio of 1:1 NOA84 only. The photos show a pink paper of the same size at the bottom.

LED 상이 약간 남아 있다. 그림 10(c)는 1:1 혼합 폴리머를 접착제로 사용한 경우 조도 분포를 보이고 있다. 조도가 더 균일해 졌고 스폿 크기는 커졌다. 스폿 크기가 커진 것은 초점 거리가 짧아져서 발산각이 증가하기 때문이다. NOA84만을 사용하면 그림 10(d) 경우와 같이 스폿이 더 커지고 조도는 약해진다. 이러한 경향성은 혼합 폴리머의 굴절률 측정 결과와 일치하고 있다. 따라서 측정된 혼합 폴리머 굴절률을 사용하면 미세 렌즈 배열의 초점 거리를 더욱 정밀하게 조절할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 예측성은 팽소자를 설계 및 제작할 때 시행착오를 줄여 개발 시간을 단축시킬 수 있다.

#### IV. 결 론

프리즘 분광계를 사용하여 혼합 폴리머의 굴절률을 측정하였다. 액체 상태의 폴리머 굴절률을 측정하기 위해서 속이 빈 프리즘을 먼저 제작하고 액체 상태의 폴리머를 채운 다음 최소 편향각을 측정함으로써 액체 폴리머의 굴절률을 알아 내었다. 두 종류의 UV 에폭시를 먼저 측정하고 다른 비율로 혼합한 폴리머의 굴절률 측정값과 각 폴리머의 혼합비로 가중치를 주어 평균값을 구한 굴절률 계산값을 비교하였다. 측정값과 계산값의 차이는 매우 작았으며 이것은 액체 상태의 혼합 폴리머의 굴절률이 성분 폴리머의 굴절률 평균값으로부터 예측할 수 있다는 사실과 액체 상태의 폴리머 굴절률은

혼합 비율을 다르게 함으로써 연속적으로 가변할 수 있다는 사실을 알려 준다. NOA61과 NOA84의 질량을 1:2, 1:1, 2:1로 섞었을 때 굴절률의 측정값은 주황색 스펙트럼의 경우 1.471, 1.485, 1.501이고, 녹색 스펙트럼의 경우 1.473, 1.487, 1.502이며, 보라색 스펙트럼의 경우 1.485, 1.500, 1.516가 되었다.

UV 에폭시를 경화하여 고체 상태로 된 경우 혼합 폴리머의 굴절률도 프리즘 분광계를 사용하여 측정하였다. 액체 상태의 혼합 폴리머 측정 때와 마찬가지로 속이 빈 프리즘에 UV 에폭시를 채우고, 자외선으로 경화하였다. 하지만 경화가 잘 되지 않거나 기포가 생기기 때문에 프리즘 안에 추가 구조물을 삽입하여 폴리머 경화 두께를 줄여서 고체 상태 폴리머 프리즘을 제작하였다. 고체 상태의 혼합 폴리머 굴절률 측정값도 성분 폴리머 굴절률의 평균값과 매우 비슷했으며 이것은 경화된 UV 에폭시의 굴절률을 연속적으로 가변할 수 있다는 사실을 말해준다. 고체 UV 폴리머의 경우는 NOA61과 NOA84의 비율을 1:2, 1:1, 2:1로 하였을 때 굴절률이 주황색 스펙트럼의 경우 1.500, 1.514, 1.534이고, 녹색 스펙트럼의 경우 1.502, 1.516, 1.538이며, 보라색 스펙트럼은 1.513, 1.529, 1.550으로 측정되었다.

혼합 폴리머의 굴절률 측정으로부터 혼합비를 이용해서 굴절률을 조절할 수 있다는 사실을 알아냈고 측정을 통해 혼합 폴리머의 굴절률을 확인하였다. 이러한 결과는 UV 에폭시를 사용하여 제작된 미세 렌즈 배열의 초점 거리가 폴리머 혼합

비에 따라 달라지는 결과를 잘 설명하였다. 혼합 폴리머의 측정된 굴절률 값은 여러 가지 광소자에서 굴절률을 정밀하게 조절할 수 있는 방법을 제공할 수 있다.

마지막으로 본 연구 결과는 지금 까지 대학 물리 실험이 유리로 이루어진 프리즘의 굴절률 측정 실험에 머무르던 것을, 같은 교육 장비를 가지고 액체나 고체 또는 혼합물의 굴절률 측정에 응용하는 심화 실험을 수행할 수 있는 방법을 제시하고 있다. 이러한 심화 광학 실험이 대학 물리 실험을 수행하는 예비 교사들에게 적용된다면 예비 교사들의 스펙트럼과 그 광학적 측정에 대한 관심과 이해를 높이고 관련된 중고등학교 과학 수업을 진행하는데 도움이 될 것으로 기대된다.

### References

1. Y. M. Kim, *Muli I: High school textbook* (Kyohaksa, Seoul, Korea, 2013), Chapter 2.
2. W. T. Kim, *Gwahak: High school textbook* (Kyohaksa, Seoul, Korea, 2011), Chapter 1.
3. Y. M. Kim, *Muli II: High school textbook* (Kyohaksa, Seoul, Korea, 2013), Chapter 3.
4. E. Hecht, *Optics 4th Ed* (Addison-Wesley, San Francisco, USA, 2002), Chapter 5.
5. S. Singh, "Refractive index measurements and its applications," *Phys. Scr.* **65**, 167 (2002).
6. J. R. Lee, S. W. Kim, and Y. S. Lee, "Measurement of refractive index of liquids by the maximum and minimum deviated laser beam," *Korean J. Opt. Photonics* **19**, 182-186 (2008).
7. Y. J. Song, Ed. M. *Thesis*, Kyungpook National University, Daegu (2006), p. 15.
8. D. D. Jenkins, "Refractive index of solutions," *Phys. Educ.* **17**, 82-83 (1982).
9. H. Y. Lee and Y. G. Ju, "Light-emitting-diode illumination system based on a double-stacked cylindrical micro-lens array," *New Phys.: Sae Mulli* **64**, 200-205 (2014).
10. "Persistent lines of neutral mercury," <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Handbook/Tables/mercurytable3.htm>.
11. "Atomic spectra," <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/atspect2.html>.
12. Norland Products, "Norland optical adhesive 61," <https://www.norlandprod.com/adhesives/noa61pg2.html>.
13. Norland Products, "Norland optical adhesive 61," <https://www.norlandprod.com/adhesives/noa%2061.html>.