

밀폐형 굴절률 측정 시스템을 이용한 렌즈용 광학 수지의 굴절률 온도 의존성 측정

이영복^{1,2}, 오태식^{1,4}, 윤태림⁴, 안성준³, 백동현^{2*}

¹선문대학교 나노과학과, ²선문대학교 차세대반도체기술연구소, ³선문대학교 스마트정보통신공학과,
⁴선문대학교 디스플레이반도체공학과

Measurement of temperature-dependent refractive index of optical resins using the thermally isolated Abbe's refractometer

Youngbok Lee^{1,2}, Tae-Sik Oh^{1,4}, Tae Rym Yoon⁴, Seong-Joon Ahn³, Dong-Hyun Baek^{2*}

¹Department of Physics and Nano-Science, Sun Moon University

²Center for Next-Generation Semiconductor Technology, Sun Moon University

³Department of Smart Information and Communication Engineering, Sun Moon University

⁴Department of Display and Semiconductor Engineering, Sun Moon University

요약 아베 굴절계를 이용하여 콤팩트 렌즈용 광학 수지 재료의 굴절률 온도 의존성을 정밀하게 측정하기 위해 굴절계 내부 장치들을 외부와 열적으로 차단한 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 제작하였다. 그리고 굴절률 1.657의 모노 브로모 나프탈렌과 굴절률 1.784의 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용하여 1.607의 굴절률을 갖는 광학 수지의 (OKP4) 굴절률을 측정하였다. 필름 형태와 블록 형태의 광학 수지에 대한 굴절률을 비교 측정된 결과로부터 필름 형태의 광학 수지가 접촉액에 용해되는 현상이 있음을 확인하였다. 그래서 블록 형태의 광학 수지에 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용하여 굴절률의 온도 의존성을 측정하였다. 우리는 밀폐형 굴절률 시스템을 이용하여 광학수지의 굴절률을 온도 증가에 따라서 $-0.00013/^\circ\text{C}$ 감소됨을 확인하였으며, 이는 제조회사에서 제공하는 데이터와도 완벽하게 일치하였다. 실험결과를 통해서 제작된 시스템은 정밀하게 온도별 굴절률을 측정할 수 있다.

Abstract In this study, we fabricated an isolated refractive index-measuring system that thermally shields the internal devices of the refractometer from the outside environment. This allows it to precisely measure the temperature dependence of the refractive index of optical resin material for compact lenses using an Abbe refractometer. Then, we measured the refractive index of OKP4 optical resin, which has a refractive index of 1.607. The resin was treated with monobromo naphthalene (which has a refractive index of 1.657) and sulfur-containing methylene iodide (which has a refractive index of 1.784) as a contact solution. The results confirmed that film-type OKP4 optical resins were dissolved by chemical reaction with the contact solution. Therefore, we measured the temperature dependence of the refractive index on block-type OKP4 optical resin using sulfur-containing methylene iodide as a contact solution. As a result, the refractive indexes of the resin at temperatures of 20, 30, and 40 °C were 1.6069, 1.6057, and 1.6044, respectively. From this, we found that the temperature dependence of the refractive index was $-0.00013/^\circ\text{C}$.

Keywords : Abbe's Refractometer, Iodo-Methylene, OKP4 Blocked Type, Optical Resin, Thermally Isolated System

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (20013223)

이 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과임. (2021RIS-004)

*Corresponding Author : Dong-Hyun Baek(Sun Moon Univ.)

email: dhbaek@sunmoon.ac.kr

Received November 3, 2022

Revised December 6, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

일반적인 광학기용 렌즈 부품들은 광학유리 소재로 제작되기 때문에 온도 변화에 따른 렌즈 자체의 굴절률 변화는 크게 문제가 되지 않는다. 그러나 최근 급속히 보급되고 있는 스마트 기기에는 다양한 기능의 초소형 카메라가 한 개 이상 탑재되고 있고, 이러한 스마트 기기의 크기와 형태에 적합한 렌즈를 대량으로 생산하기 쉬운 플라스틱 소재의 렌즈가 유리 렌즈를 대체하여 사용되고 있다. 플라스틱 렌즈는 보통 굴절률이 1.6 이상인 고 굴절률의 광학 수지로 제작되고 있다[1-3]. 이러한 광학 수지는 기존에 사용되는 유리 재질의 렌즈에 비해 온도 변화에 따라 굴절률 특성이 민감하게 변하기 때문에 발열이 심한 스마트 기기에서 사용되는 고 굴절률 렌즈용 광학 수지 재질을 개발할 때는 온도 변화에 대한 굴절률의 변화를 정확히 측정하여 온도 변화에 대한 굴절률 변화를 최소화해야만 한다[4-7].

본 연구에서는 액체 시료와 고체 시료의 온도 변화에 대한 굴절률을 ± 0.0002 정도의 높은 정밀도로 측정이 가능한 아베 굴절계(Atago DR-M4)를 사용하였다 [8-11]. 그렇지만 아베 굴절계는 고체 시료를 측정할 때는 시료가 외부 공기에 노출되기 때문에 설정하는 온도와 측정 부위의 온도가 같지 않아서 온도 변화에 대한 굴절률을 정확하게 측정할 수 없는 문제가 있다. 그래서 설정 온도와 측정 부위의 온도 차이를 최소화하기 위해서 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 제작하여 적용하였다. 제작한 밀폐형 굴절률 측정 시스템은 아베 굴절계를 밀폐 챔버 내부에 장착하여 외부 온도의 영향을 차폐시킨 상태에서 챔버 내부의 온도를 조절할 수 있어서 측정 샘플이 챔버 내부에서 노출되지라도 설정 온도와 측정 부위의 온도 차이를 최소화했다.

본 연구의 목적인 플라스틱 광학 수지에 대한 굴절률의 온도 의존성을 측정하기 위해서 측정 온도 20 ℃, 측정 파장 589 nm에서 굴절률이 1.607인 것으로 잘 알려진 Osaka Gas Chemicals의 OKP4 광학 수지를 측정 샘플로 이용하였다[12-14]. 게다가 향후 1.65 이상의 고 굴절률 렌즈용 광학 수지의 굴절률 측정에도 적용할 수 있도록 하기 위해 측정 시료인 OKP4 광학 수지에 접촉액으로 많이 사용되는 1.657의 굴절률을 갖는 모노 브로모 나프탈렌(mono-bromo-naphthalene)과 1.784의 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌(sulfur containing iodo-methylene)을 접촉액으로 사용하여 전반사 조건이 만족하도록 하였고, 설정 온도와 측정 시

료의 온도를 각각 20, 30, 40 ℃로 동일하게 유지하면서 굴절률의 온도 의존성을 측정하였다.

2. 실험 및 실험방법

일반적인 아베 굴절계는 Fig. 1의 측정 개념도에서 보는 바와 같이 액체 시료의 경우는 주 프리즘(main prism)과 보조 프리즘(sub prism) 사이에 측정하고자 하는 액체 시료를 주입해 광원을 비추면 보조 프리즘의 거칠게 연마된 표면에서 빛이 여러 각도로 산란되어 전반사에 의한 임계각 이하의 빛들만 주 프리즘을 통과한다. 아베 굴절계는 이 임계각 위치를 확인하여 액체 시료의 굴절률을 측정한다(A 영역-밝게 관찰된 부분).

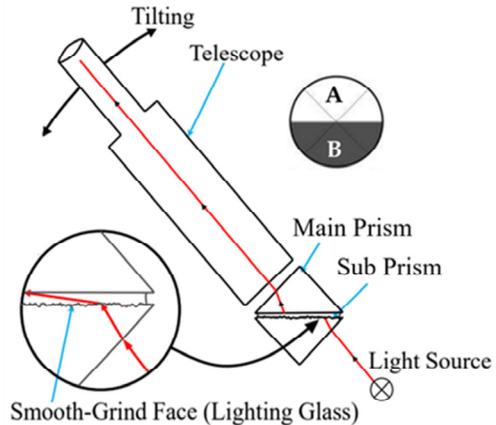


Fig. 1. Schematic diagram shows the refractive index measurement method with liquid specimen using Abbe's refractometer.

그런데 고체 시료의 측정 시에는 보조 프리즘이 사용되지 않기 때문에 두께 1 mm 이상의 블록 형태의 시료는 보조 프리즘처럼 표면을 거칠게 연마하여 측정해야만 하고, 두께 1 mm 이하의 필름 형태의 시료는 광 확산용 유리(lightning glass) 위에 시료를 올려놓고 측정해야만 한다. 그래서 본 연구에서는 광학 수지의 원료 칩인 OKP4를 가공하여 두께가 약 200 μm 인 필름 형태와 두께가 약 5 mm인 블록 형태로 측정 샘플을 제작하였기 때문에 규격에 맞게 길이를 30~40 mm, 폭을 8 mm의 크기로 절단하여 측정 시료를 제작하였다. 이때 블록 형태의 OKP4 측정 시료와 상부의 주 프리즘 사이 및 필름 형태의 OKP4 측정 시료와 광 확산용 유리 사이의 공기층을 최소화하기 위해서 측정 시료보다 굴절률이 높은

1.657의 굴절률을 갖는 모노 브로모 나프탈렌(mono-bromo-naphthalene)과 1.784의 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌(sulfur containing iodo-methylene)을 접촉액으로 주입하여 전반사 조건이 만족하도록 하였다.

본 연구에서 사용한 아베 굴절계에는 항온수조(thermostatic water bath)에 연결되어 온도 조절이 가능한 주 스테이지와 보조 스테이지에 주 프리즘과 보조 프리즘이 각각 장착되어 있어서 그 사이에 주입되는 액체 시료의 경우는 측정 시료의 온도가 거의 일정하게 유지된다. 그렇지만 본 연구에서 제작된 OKP4 광학 수치 측정 시료는 필름 형태나 블록 형태이기 때문에 온도 조절이 가능한 보조 스테이지가 사용되지 않는다. 따라서 측정 샘플이 외부 공기에 노출된 상태에서 주 스테이지로만 측정 시료의 온도 조절이 이루어지므로 설정 온도와 스테이지 온도 및 프리즘 온도 간에는 차이가 발생하기 때문에 측정 시료의 온도도 변하게 된다.

그래서 본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 내부 굴절계 장치들을 외부와 열적으로 차단하고 온도를 안정되게 조절할 수 있는 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 제작하였다. Fig. 2(a)는 밀폐형 굴절률 측정 시스템의 전체 구성을 나타낸 사진이다. 밀폐 챔버(isolated chamber)의 내부 온도는 라디에이터 히터로 조절하며, 밀폐 챔버 뒤에 설치된 항온수조에서 연결된 항온수조 배관(thermostatic water line)을 통해 주 스테이지와 보조 스테이지의 온도를 조절한다. Fig. 2(b)는 내부 아베 굴절률 장치를 나타낸 것이고, Fig. 2(c)는 아베 굴절계의 주 스테이지와 보조 스테이지 부분을 확대한 것이다. 블록 형태의 측정 시료는 주 프리즘 위에 위치하게

되고, 필름 형태의 시료는 광 확산용 유리를 추가로 사용하여 장착하게 된다. 항온수조 배관(thermostatic water line)을 통해 주 스테이지와 보조 스테이지의 온도를 조절한다. Fig. 2(b)는 내부 아베 굴절률 장치를 나타낸 것이고, Fig. 2(c)는 아베 굴절계의 주 스테이지와 보조 스테이지 부분을 확대한 것이다. 블록 형태의 측정 시료는 주 프리즘 위에 위치하게 되고, 필름 형태의 시료는 광 확산용 유리를 추가로 사용하여 장착하게 된다.

먼저 밀폐형 굴절률 측정 시스템의 외부 온도의 차폐 효과를 확인하기 위해서 밀폐 챔버의 내부 온도를 20, 30, 40 °C로 각각 설정한 상태에서 메인 프리즘이 장착된 메인 스테이지에 연결된 항온수조 온도를 20~60 °C 사이에서 5 °C씩 변화시켜 가면서 주 스테이지와 광 확산용 유리(lightning glass) 부분 등의 온도를 측정 및 분석하였다. 다음으로 필름 형태와 블록 형태로 제작한 OKP4 측정 시료에 모노 브로모 나프탈렌(mono-bromo-naphthalene)과 황 함유 요오드화 메틸렌(sulfur containing iodo-methylene)을 접촉액으로 사용할 결과, OKP4 광학 수치가 용해되는 현상을 확인하였다. 그래서 블록 형태의 OKP4 측정 시료를 이용하여 외부 온도와 측정 시료의 온도를 정확하게 제어하면서 온도별 굴절률을 측정하여 OKP4에 대한 굴절률의 온도 의존성을 확인하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 본 연구에서 제작한 밀폐형 굴절률 측정 시

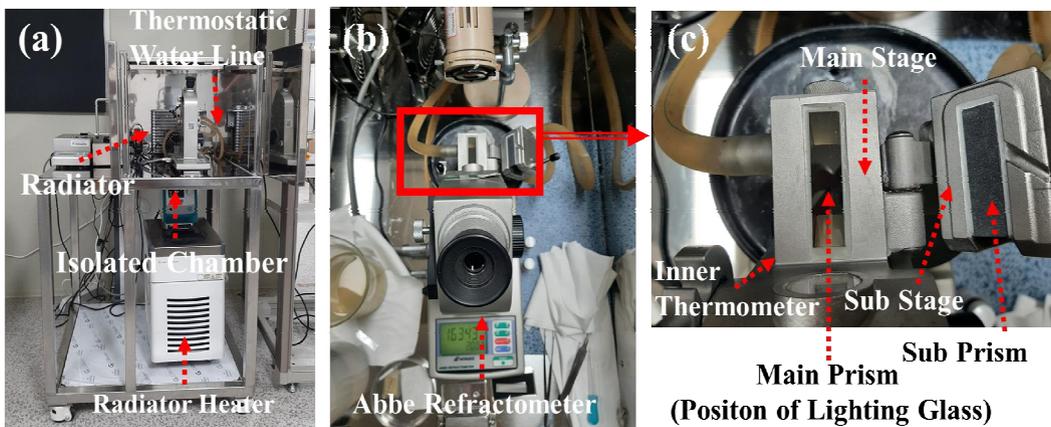


Fig. 2. Photographs of the isolated refractive index measurement system and the detailed each parts.

스텝의 외부 온도 차폐 특성을 평가하기 위해서 외부 온도에 해당하는 밀폐 챔버의 온도를 (a) 20 °C, (b) 30 °C, (c) 40 °C로 각각 설정한 상태에서 주 스테이지에 연결된 항온수조 온도를 20~60 °C로 변경시켜가면서 내부 온도계, 스테이지, 광 확산용 유리 부분의 온도 변화를 측정된 그래프이다.

Fig. 3(a)은 밀폐 챔버 내부의 온도를 20 °C로 설정한 상태에서 항온수조 온도를 20~60 °C로 변경시켜 가면서 측정된 결과를 나타낸 것으로 항온수조 온도와 각 부분에서의 온도 차이를 살펴보면, 내부 온도계에서는 0.3~2.8 °C, 주 스테이지에서는 0.8~13.8 °C, 광 확산용 유리 부분에서는 1.0~17.6 °C 정도의 온도 차이가 각각 발생하여 외부의 온도 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 밀폐 챔버 내부 온도를 30 °C로 설정한 상태에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 항온수조와 각 부분의 온도 차이는 내부 온도계 ~2.1 °C, 주 스테이지 ~8.1 °C 정도의 온도 차이가 각각 발생하였고, Fig. 3(c)에는 밀폐 챔버 내부 온도 40 °C로 설정한 상태에서 측정된 결과를 나타낸 것으로 항온수조와 각 부분의 온도 차이는 내부 온도계 ~1.3 °C, 주 스테이지 ~5.2 °C 정도의 온도 차이가 각각 발생하였다. 따라서 측정 샘플이 노출되는 공간의 온도가 낮은 경우는 고온 측정 시에 영향을 더 크게 미치게 되고, 공간의 온도가 높은 경우는 고온 측정 시에 영향이 줄어들지만 Fig. 3(b), (c) 그래프의 저온 영역에 나타난 바와 같이 저온 측정 시에는 영향이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

그렇지만 Table 1에서 보는 바와 같이 외부 온도에 해당하는 밀폐 챔버의 온도가 20 °C일 때 항온수조의 온도를 20, 30, 40 °C로 설정한 경우는 내부 온도계에서 0.6~1.5 °C, 주 스테이지에서 1.3~5.7 °C, 광 확산용 유리 부분에서 2.0~9.4 °C 정도의 온도 차이가 각각 발생하여 측정 샘플이 장착되는 부분의 최대 온도 차이는 9.4 °C 정도로 크게 나타나지만, 밀폐 챔버의 온도와 항온수조 온도를 20, 30, 40 °C로 동일하게 설정한 경우는 내부 온도계에서 0.2~0.6 °C, 상부 스테이지에서 0.7~1.6 °C, 광 확산용 유리 부분에서 1.0~2.2 °C 정도의 온도 차이가 각각 발생하여 측정 샘플이 장착되는 부분의 최대 온도 차이는 2.2 °C 정도로 적게 나타남을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제작한 밀폐형 굴절률 측정 시스템의 적용으로 외부 온도의 영향을 최소화시킬 수 있음을 확인하였다.

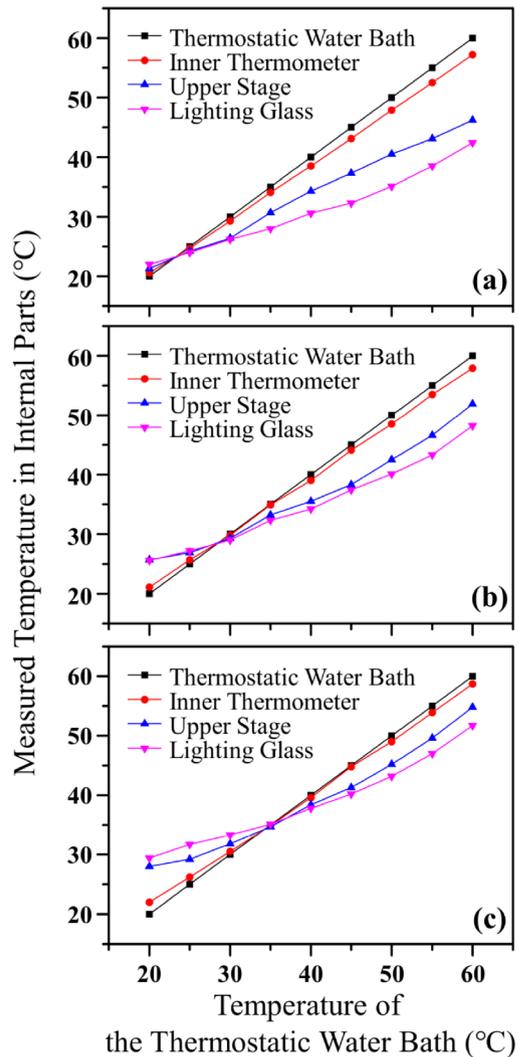


Fig. 3. Internal temperature change caused by the temperature variation of the thermostatic water bath, when the initial inner temperature of the system was (a) 20 °C, (b) 30 °C, and (c) 40 °C.

Table 1. Comparisons of temperature for each parts.

Isolated Chamber	Water Bath	Inner Thermometer	Main Stage	Lighting Glass
20	20	20.6	21.3	22.0
	30	29.3	26.4	26.2
	40	38.5	34.3	30.6
20	20	20.6	21.3	22.0
30	30	29.8	29.3	29.0
40	40	39.6	38.4	37.8

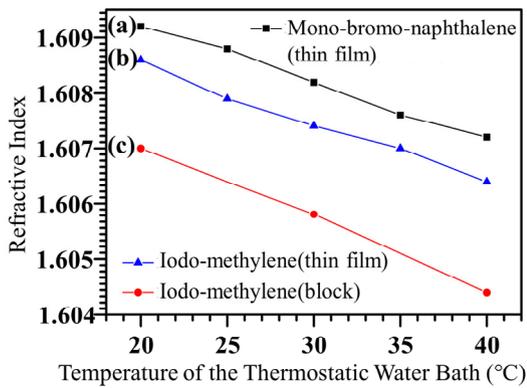


Fig. 4. Refractive index of the OKP4 optical resin samples as the temperature of the thermostatic water bath varies.

Fig. 4(a)와 (b)는 측정 샘플이 외부 온도에 개방된 상태에서 기존의 아베 굴절계를 사용하여 589 nm 파장의 광원으로 굴절률을 측정하는 것이다. (a)는 얇은 필름 형태의 OKP4 광학 수지에 모노 브로모 나프탈렌을 접촉액으로 사용한 결과이고, (b)는 얇은 필름 형태의 OKP4 광학 수지에 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용한 결과인데 두 측정 샘플의 굴절률이 0.0006 정도의 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 굴절률의 차이는 얇은 필름 형태의 OKP4 광학 수지가 접촉액으로 사용한 모노 브로모 나프탈렌 및 황 함유 요오드화 메틸렌에 의해 용해 반응이 일어나는 정도의 차이 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 그래서 접촉액과의 반응이 다소 일어나더라도 굴절률이 크게 변하지 않도록 블록 형태의 OKP4 광학 수지 시료를 제작하여 측정 샘플을 제작하였다.

Fig. 4(c)는 본 연구에서 제작한 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 이용하여 밀폐 공간의 온도와 항온수조의 온도를 동일하게 설정하고 5 mm 두께의 블록 형태로 제작한 OKP4 광학 수지에 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용한 측정 샘플들의 굴절률을 온도별로 측정하는 것이다. 밀폐 챔버 온도 20 °C에서 589 nm 파장의 광원으로 측정하는 굴절률이 약 1.607로 측정되어 OKP4 광학 수지 재질의 굴절률과 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 이를 Fig. 4(b)에서 측정하는 굴절률과 비교해 보면 약 0.0016의 굴절률 차이가 발생한다. 이러한 굴절률의 차이는 얇은 필름 형태의 OKP4 광학 수지가 접촉액으로 사용한 모노 브로모 나프탈렌 및 황 함유 요오드화 메틸렌과 화학반응을 일으켜 용해 반응이 일어나는 정도의 차이 때문에 발생하는 것으로 추정된다. 그래서 접촉액

과의 반응이 다소 일어나더라도 굴절률이 크게 변하지 않는 블록 형태의 OKP4 광학 수지 시료를 제작하여 측정 샘플을 제작하였다.

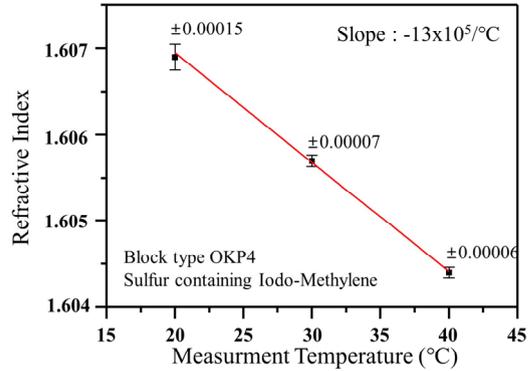


Fig. 5. Refractive index of OKP4 sample measured when the temperature of the thermostatic water bath was 20 °C, 30 °C, and 40 °C, respectively.

Fig. 5는 5 mm 두께의 블록 형태로 제작된 OKP4 측정 시료에 1.784의 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용한 측정 샘플에 대한 굴절률의 온도 의존성을 측정하는 것이다. 측정 산포를 최소화하기 위해 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 사용하여 외부 온도 영향을 최소화하였고, 각 측정 온도에서 8번씩 반복 측정하였다. 밀폐 챔버의 온도를 (a) 20 °C, (b) 30 °C, (c) 40 °C로 유지하면서 항온수조의 온도를 20, 30, 40 °C로 동일하게 각각 변경하면서 589 nm 파장의 광원으로 굴절률을 측정 한 결과, 각각 설정한 온도 영역에서의 평균 굴절률이 1.6069, 1.6057, 1.6044로 측정되었으며 표준편차는 각각 0.00015, 0.00007, 0.00006으로 분석되었다. 그리고 이 그래프의 기울기로부터 굴절률의 온도 의존성을 산출하여 $-0.00013/°C$ 임을 구하였다. 또한 1.784의 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌 (sulfur containing iodo-methylene)의 경우가 일반적으로 사용되는 모노 브로모 나프탈렌(mono-bromo-naphthalene)보다도 광학 수지와 반응성이 낮은 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 렌즈용 광학 수지의 굴절률 온도 의존성을 측정하기 위해 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 제작

하고, 필름 형태와 블록 형태의 OKP4 광학 수지의 온도 별 굴절률 측정의 정확성과 온도 의존성을 측정하였다.

(1) 필름 형태로 제작한 OKP4 광학 수지에 접촉액으로 사용한 모노 브로모 나프탈렌과 황 함유 요오드화 메틸렌이 화학 반응하여 OKP4 광학 수지가 용해되는 현상이 나타났다. 이 경우, 모노 브로모 나프탈렌의 경우가 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용했을 때보다도 용해 현상이 두드러지게 나타났다. 또한 상기 측정 샘플을 외부 온도 20 °C에 개방된 상태에서 기존의 아베 굴절률 측정 장치를 이용하여 589 nm 파장의 광원으로 측정해 본 결과, 각각의 측정 샘플에서 OKP4 광학 수지의 굴절률 1.607보다도 각각 0.0022, 0.0016 정도 크게 나타났다.

(2) 그렇지만 5 mm 두께의 블록 형태로 제작된 OKP4 광학 수지에 황 함유 요오드화 메틸렌을 접촉액으로 사용한 측정 샘플을 본 연구에서 제작한 밀폐형 굴절률 측정 시스템을 이용하여 밀폐 챔버의 온도와 항온수조의 온도를 20 °C로 동일하게 설정하여 측정한 결과, 1.6069의 굴절률이 나타남을 확인하였고, 이는 OKP4 광학 수지의 고유 굴절률 1.607과 거의 일치하였다. 또한 밀폐 챔버의 온도와 항온수조의 온도를 각각 30, 40 °C로 동일하게 설정한 상태로 측정하여 1.6057, 1.6044의 굴절률을 구하였고, 이로부터 OKP4 광학 수지에 대한 굴절률의 온도 의존성은 $-0.00013/^\circ\text{C}$ 임이 확인되었다.

(3) 밀폐형 굴절률 측정 시스템의 밀폐 챔버 온도가 20 °C이고, 항온수조의 온도가 30 °C, 40 °C 일 때 광학 산용 유리의 온도 차이가 3.8 °C, 9.4 °C이고, 밀폐 챔버 온도와 항온수조의 온도가 각각 30 °C, 40 °C 일 때 온도 차이는 1 °C, 2.2 °C로 외부의 온도 영향을 차폐하는 효과가 있음이 입증되었고, 블록 형태의 측정 시료에 1.784의 고 굴절률을 갖는 황 함유 요오드화 메틸렌의 적용은 향후 1.65 이상의 새로운 고 굴절률 렌즈용 광학 수지의 굴절률 측정 시에도 활용될 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] S. Lee, S. Y. Kim, and Y. J. Kim, "Characterization of PET films coated with organic-inorganic hybrid coating system containing surface modified zirconia", *Journal of Oil & Applied Science*, Vol.35, No.3, pp 595-605, Sep. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.12925/jkocs.2018.35.3.595>
- [2] S. Singh, "Refractive index measurement and its applications", *Physica Scripta*, Vol.65, No.2, pp.167-180, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1238/Physica.Regular.065a00167>
- [3] S. H. Park, T. K. Kim, and T. S. Kwak, "Retardation Analysis of Plastic Optic Lens according to Injection Speed Variation", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.14, No. 2 pp.93-98, Apr. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2015.14.2.093>
- [4] B. Dong, S. Xie, Z. He, and Y. Zhou, "Simultaneous measurement of temperature-dependent refractive index and depth-resolved thermal deformation fields inside polymers", *Polymer Testing*, Vol.65, pp.297-300, Feb. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.12.009>
- [5] N. Sultanova, S. Kasarova, and I. Nikolov, "Refractive index considerations of polymers for optics", *In AIP Conference Proceedings*, Vol.2075, No.1, pp.030008 1-5, Feb. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5091152>
- [6] S. N. Kasarova, N. G. Nina, and I. D. Ivan, "Temperature dependence of refractive characteristics of optical plastics", *In Journal of Physics: Conference Series*, Vol.253, No.1, pp.012028 1-6, Sep. 2010.
DOI: <http://doi.org/10.1088/1742-6596/253/1/012028>
- [7] I. D. Nikolov, and C. D. Ivanov, "Optical plastic refractive measurements in the visible and the near-infrared regions", *Applied Optics*, Vol.39, No.13, pp.2067-2070, May. 2000.
DOI: <https://doi.org/10.1364/ao.39.002067>
- [8] J. Rheims, J. Köser, and T. Wriedt, "Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer", *Measurement Science and Technology*, Vol.8, pp.601-605, Mar. 1997.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/8/6/003>
- [9] W. Pongruengkiat, T. Jungpanich, K. Ittipornnusun, S. Pechprasarn, and N. Albutt, "Development of low-cost Abbe refractometer", *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, Vol.879, pp.227-233, Mar. 2018.
DOI: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.879.227>
- [10] H. Liu, K. C. Yang, W. Guo, J. Dai, J. Ye, W. Li, and M. Xia, "An experimental calibration method for digital Abbe refractometer", *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Imaging Sensors and Applications*, SPIE, Vol.8908, pp.520-527, Aug. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2034682>
- [11] H. M. Heinemann, "Measurement of the Refractive Index and Dispersion of an Unpolished Sample on an Abbe Refractometer", *Applied Optics*, Vol.9, No.11, pp.2586-2587, Nov. 1970.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.9.002586>
- [12] C. Peixoto, P. T. Valentim, P. C. Sousa, D. Dias, C. Araújo, D. Pereira, C. F. Machado, A. J. Pontes, H. Santos, S. Cruz, "Injection molding of high-precision optical lenses: A review", *Precision Engineering*, Vol.

76, pp.29-51, Feb. 2022.

DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.02.002>

- [13] T. Kim, and H. J. Kang, "Effect of 2-Hydroxyethyl Acrylate on Physical Properties of Optically Clear Resin", *POLYMER KOREA*, Vol.41, No.3, pp.495-499, May. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7317/pk.2017.41.3.495>
- [14] K. Minami, Optical plastics, Handbook of Plastic Optics, p.180, WILEY-VCH, 2005, pp.109-147
DOI: <https://doi.org/10.1002/3527605126.ch5>

이 영 복(Young-Bok Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 선문대학교 정보디스플레이학과 (학사)
- 2014년 2월 : 선문대학교 나노과학과 (석사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 선문대학교 나노과학과 (박사)

<관심분야>

반도체, 전자빔 기술

오 태 식(Tae-Sik Oh)

[정회원]



- 1984년 12월 ~ 2003년 7월 : 삼성SDI 수석연구원
- 2003년 7월 ~ 2006년 2월 : 삼성종합기술원 전문연구원
- 2006년 3월 ~ 2009년 2월 : 선문대학교 전자공학부 부교수
- 2009년 3월 ~ 2013년 12월 : 선문대학교 정보디스플레이학과 교수
- 2014년 1월 ~ 2020년 2월 : 선문대학교 기계ICT융합공학부 교수
- 2020년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 디스플레이반도체공학과 교수

<관심분야>

전자렌즈 설계 및 전자빔 응용기술, 디스플레이 소자 구조 해석 및 설계 기술, 디스플레이 특성 평가 기술

윤 태 림(Tae Rym Yoon)

[정회원]



- 2011년 2월 : 호서대학교 생물공학과 (이학사)
- 2016년 8월 : 호서대학교 나노바이오트로닉스공학과 (이학석사)
- 2017년 4월 ~ 2018년 2월 : 한국전자통신연구원 ICT 소재 부품 연구소 위촉연구원
- 2022년 9월 : 선문대학교 나노과학과(박사)

<관심분야>

반도체 공정, 발광체 방열판, 탄소나노튜브 분산 및 소자기술, 탄소나노튜브 X-ray gun

안 성 준(Seong-Joon Ahn)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 물리학과 (이학사)
- 1989년 2월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
- 1992년 8월 : 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
- 1992년 9월 : 삼성전자 반도체연구소 선임연구원
- 1996년 5월 : 한전전력연구원 선임연구원
- 2002년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 공과대학 정보통신공학과 교수

<관심분야>

반도체 공정, 광섬유 통신 및 센서, 전자빔 기술, 레이저 미세가공

백 동 현(Dong-Hyun Baek)

[정회원]



- 2007년 8월 : 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 (이학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 일반대학원 전자전기공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 ~ 2018년 2월 : U of Wisconsin-Madison 박사후 연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 차세대반도체기술연구소 연구교수

<관심분야>

MEMS, 유연 디스플레이