

플라스틱 광섬유 기반 굴절률 측정 시스템 설계

정현태*, 홍석준, 임재민, 최홍석, 전태현
서울과학기술대학교 *기계자동차공학과, 전기정보공학과

{*19100374, podori01, dlawoals0324, bjk75p1, thjeon}@seoultech.ac.kr

Design of Refractive Index Measurement System based on Plastic Optical Fiber

*Hyeontae Jung, Seokjun Hong, Jaemin Lim, Hongsuk Choi, Taehyun Jeon

*Dept. Mechanical and Automotive Engineering, Dept. of Electrical Engineering,
Seoul National University of Science and Technology

요약

본 논문은 플라스틱 광섬유와 U 형 아크릴을 이용하여 외부 유체의 굴절률을 측정하는 시스템을 제안한다. 발광부 LED에서 U 형 아크릴로 빛을 조사하고, 계면의 임계각 조건에 따라 전반사한 빛을 수광부 포토 트랜지스터에서 감지한다. 굴절률 표준 용액을 제작하고 굴절률 별 광량을 측정하여 최소자승법을 통해 광량-굴절률 관계식을 도출하고 이를 기반으로 굴절률 측정 시스템을 설계하였다. 또한, 외부 광원의 영향을 최소화하기 위해 광학필터를 적용하였으며 이를 통한 측정 정확도 향상을 실험적으로 확인하였다.

I. 서론

굴절률 측정은 식품산업, 의료, 환경 모니터링을 포함하는 다양한 분야에서 화학 물질 식별에 사용된다. 광섬유 기반의 굴절률 측정은 소형화, 전자기 간섭 면역, 내식성, 원격 측정 등의 장점을 가지기 때문에 최근 많은 연구가 이루어지고 있다. 다양한 굴절률 측정방식 중 유리 광섬유 (GOF) 방식은 대부분 제작 및 측정에 정교한 광학장치를 필요로 한다 [1].

플라스틱 광섬유 (POF) 기반의 센서는 GOF에 비해 비용이 저렴하고 구현이 용이한 장점을 가지며, 감도를 높이기 위하여 테이퍼형, D 형, U 형 등의 방식이 연구되었다 [2]. U 형 POF 센서는 구현이 쉬운 장점을 가지나, 외부 힘에 의해 곡률이 변하기 쉬운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하고 외력에 강건한 프로브를 만들기 위해, U 형의 유리관에 POF를 광접합하는 방식이 연구되었다 [3].

본 논문에서는 U 형의 아크릴블록을 절삭 가공하여 굴절률 측정 시스템을 제작함으로써, 제작 용이성과 외부 힘에 대한 강건성을 확보한다. 측정 시스템의 정확도 확인을 위해 설탕 중량 퍼센트에 따른 굴절률 값을 이용한다 [4]. 이를 기반으로 광량과 굴절률 간의 관계식을 도출하고 측정된 굴절률 값과 실제 값의 오차를 계산한다.

II. 본론

1) 굴절률 측정 시스템 설계

굴절률 측정 시스템은 그림 1과 같이 발광부에서 나온 빛이 발광측 광섬유, U 자형 아크릴 프로브, 수광측 광섬유를 차례로 거쳐 수광부로 들어오는 구조이다. 아크릴 프로브의 곡면에서 임계각보다 큰 입사각을 갖는

빛은 전반사하고 나머지 광은 액체 매질로 굴절되어 수광부로 진행하지 못한다. 이때, 임계각은 아크릴과 외부 유체의 굴절률에 따라 결정되는데 적용된 아크릴의 굴절률은 일정하기 때문에 외부유체에 의해서만 전반사 임계각이 결정된다. 본 시스템에서는 이를 통해, 전반사된 광량의 변화로 외부 유체의 굴절률을 측정할 수 있다.

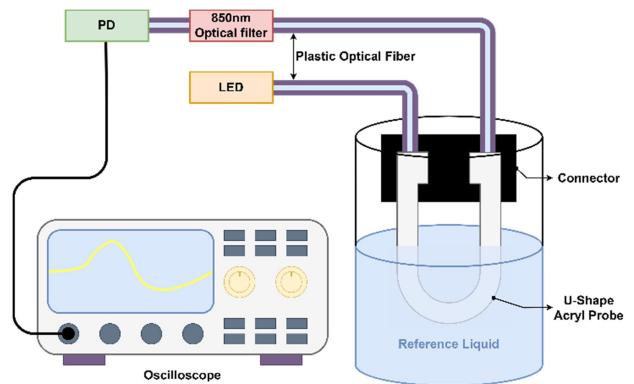


그림 1 굴절률 측정 시스템

본 논문에서 제안하는 시스템의 수광부는 25°C에서 845nm~895nm의 Full Width and Half Maximum (FWHM)을 가지는 LED 광원을 사용하고 수광부는 25°C에서 850nm의 Maximum Photosensitive (MP)를 가지는 포토 트랜지스터와 광학 필터로 구성된다.

광학필터는 송신부의 FWHM에 포함된 동시에 수신부의 MP를 만족하는 850nm를 사용하여 외부광의 영향을 감소시키고 감지하는 빛은 통과하도록 설계한다. 굴절률 측정에 영향을 주는 U형의 아크릴 프로브는 두께 3mm의 아크릴 블록을 레이저 절삭하여 제작하고 프로브 양단에 POF를 커넥터로 연결한다.

2) 광량-굴절률 관계식

수광부에서 측정된 광량을 굴절률로 변환하기 위해 본 논문에서는 서로 다른 굴절률을 가지는 M 개의 용액에 대해 각 용액별 광량을 N 번 반복 측정하여 이를 기반으로 선형회귀식을 구한다. 측정된 광량 x 와 굴절률 y 사이의 선형회귀식 $y = ax + b$ 의 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{NM} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

여기서, \bar{x} 는 측정된 광량들의 표본평균을 \bar{y} 는 사용된 용액들의 굴절률 평균을 의미한다.

3) 굴절률 측정 시스템 성능 평가

성능 평가를 위한 사전 단계로서 서로 다른 굴절률을 가지는 시료를 제작하여야 한다. 본 논문에서는 설탕의 중량퍼센트 (C)와 굴절률 (n) 간의 다음 관계식을 이용하여 설탕 수용액 시료를 제조한다 [4].

$$n(C) = 1.33 + 1.41 \times 10^{-3}C + 0.51 \times 10^{-3}C^2 \quad (2)$$

(2)를 활용하여 제조된 8개의 설탕물 시료를 기반으로 각 시료당 광량을 100회 측정한다. 그림 2의 점(·)으로 표시된 데이터는 각 시료에서 광량을 측정하여 얻은 전압데이터와 해당 굴절률을 보여준다. 또한, 직선은 측정 데이터를 (1)에 적용하여 얻은 선형회귀식 $y = -0.0416x + 1.4604$ 을 보여준다.

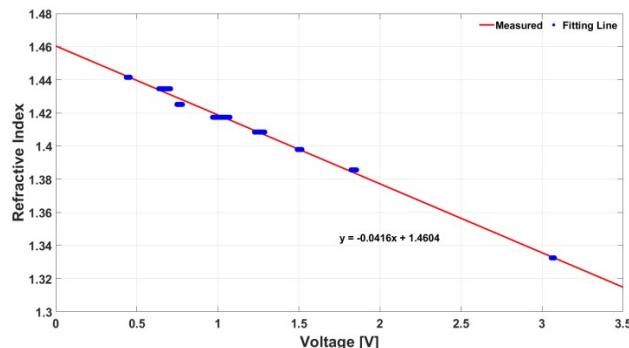


그림 2 굴절률 별 광량 측정값

성능평가를 수행하기 위해 앞서 구한 선형회귀식을 기반으로 농도가 알려진 설탕 수용액 시료의 굴절률을 측정하여 측정오차를 계산한다.

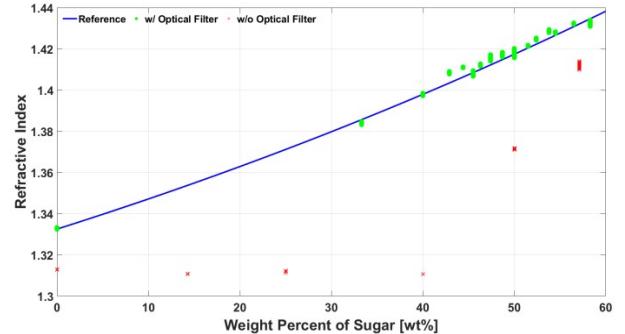


그림 3 농도에 따른 굴절률 측정 데이터

그림 3은 농도에 따른 굴절률 측정데이터로 각 농도별로 100회 이상 측정한 굴절률 값을 보여준다. 실선은 (2)를 나타내며 점(·)으로 표시된 데이터는 수신부에 850nm 필터가 있는 경우의 측정값이고 엑스(x)로 표시된 데이터는 필터가 없는 경우의 측정값이다. 필터가 없는 경우 0~40wt%의 저농도 시료에서 외부광에 의해 왜곡된 굴절률이 측정되어 최대 오차율이 6.255%로 높게 나타났다. 반면, 측정광의 괴장만을 수용하는 필터가 있는 경우에는 외부광의 개입을 감소시켜 최대 오차율 0.397%로 5.858%pt 개선된 오차성능을 보였다.

III. 결론

본 논문에서는 POF 기반의 U형 아크릴 굴절률 측정시스템을 제안하였다. 광을 이용한 굴절률 측정을 위해 광량과 굴절률 간의 관계식을 도출하고 수신부에 광학필터를 추가하여 외부광을 효과적으로 차단함으로써 필터가 없는 경우 대비 최대오차율이 크게 향상되었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Wang, D. Zhang, Y. Xu, S. Sun, and X. Sun, "Refractive Index Sensor Based on Double Side-Polished U-Shaped Plastic Optical Fiber," Sensors, vol. 20, no. 18, pp. 5253, Sep. 2020.
- [2] C. Teng, R. Min, J. Zheng, S. Deng, M. Li, L. Hou, and L. Yuan, "Intensity-Modulated Polymer Optical Fiber-Based Refractive Index Sensor: A Review," Sensors, vol. 22, no. 1, p. 81, Dec. 2021.
- [3] D. Chetia, J. M. Gogoi, H. K. Singh and T. Bezboruah, "Low-Cost Refractive Index Sensor With Optical Fibers Attached to a U-Shaped Glass Tube," IEEE Sensors Letters, vol. 2, no. 3, pp. 1-4, Sept. 2018.
- [4] C. F. Snyder, A. T. Hattenburg, Refractive Indices and Densities of Aqueous Solutions of Invert Sugar, United States. Government Printing Office, Jun. 1963.