



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2019년 2월

석사학위논문

기능성 폴리머가 코팅 된 광섬유 끝단을 사용하는 광섬유 센서 연구

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

조 희 택

기능성 폴리머가 코팅 된 광섬유 끝단을 사용하는 광섬유 센서 연구

Research On Optical Fiber Sensor Using Fiber End
Coated With Functional Polymer

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

조 희 택

기능성 폴리머가 코팅 된 광섬유 끝단을 사용하는 광섬유 센서 연구

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

조 희 택

조 회 택의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 조선대학교 교수 주 기 남 인

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 인

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제2장 이론	5
제1절 광섬유 센서	5
1. 광섬유 센서의 역사	5
2. 광섬유 센서의 활용	9
제2절 자외선 센서	15
1. 광섬유를 기반으로 하는 자외선 센서의 필요성	15
2. 응용 분야별 자외선 센서	18
제3절 온도 센서	22
1. 광섬유 기반의 온도 센서의 필요성	22
2. 다양한 온도 센서	22
제4절 광센서 재료	24
1. 아조벤젠	24
2. 광학 접착제로 사용되는 기능성 폴리머	26

제5절 간섭무늬의 수식적 이해	28
제3장 실험 구성 및 실험 결과	37
제1절 자외선 감지 실험	37
1. 폴리머에 의한 간섭무늬 생성과 자외선에 의한 변화	37
2. 감지 범위에서의 자외선 세기와 간섭무늬 변화 결과	54
3. 자외선과 가시광선 영역에서의 비교	58
4. 자외선 노출 시간에 따른 반응 실험 구성 및 결과	62
5. 온도에 따른 민감도 유지 실험 구성 및 결과	67
제2절 온도 측정 실험	73
1. 폴리머 종류에 따른 간섭무늬 생성과 온도에 따른 변화	73
2. FBG의 온도에 따른 중심 파장 이동	78
3. 각 폴리머와 FBG의 온도에 따른 민감도 비교	81
제4장 결 론	83

[참고문헌]

[감사의 글]

표 목 차

표 2.1 반도체 기반 자외선 센서의 종류	17
표 2.2 응용 분야별 자외선 감지 센서의 활용	19
표 3.1 광대역 광원 장비 사양	41
표 3.2 광 순환기 장비 사양	42
표 3.3 광 스펙트럼 분석기 장비 사양	43
표 3.4 자외선 광원 장비 사양	44
표 3.5 UV-Vis-Spectrophotometer의 사양	50
표 3.6 자외선 검출기의 사양	56
표 3.7 새로운 광대역 광원의 사양	60
표 3.8 레이저 다이오드 조절기와 레이저 다이오드 사양	63
표 3.9 셔터와 셔터 조절기 사양	64
표 3.10 새로운 자외선 광원의 사양	68
표 3.11 오븐의 사양	69
표 3.12 온도계의 사양	70

그 립 목 차

그림 1.1 본 연구의 간편한 광섬유 센서 구성의 실험적 증명 분야와 추후 활용 분야	4
그림 2.1 John Tyndall의 실험	7
그림 2.2 광통신의 원리	8
그림 2.3 다양한 광섬유 센서	11
그림 2.4 (좌) 건축물의 FBG 센서 매설 모습, (우) FBG 센서 실시간 감시 모습	12
그림 2.5 사물인터넷 시장 규모	13
그림 2.6 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 가상현실기술 적용	14
그림 2.7 광선과민증으로 인한 루푸스 질환의 모습	16
그림 2.8 266 nm의 파장을 갖는 조명 아래 체액의 흔적들	20
그림 2.9 (좌) 애자에서의 자외선 방출과 (우) 자외선 감시 카메라	21
그림 2.10 다양한 온도 센서	23
그림 2.11 아조벤젠의 자외선 광에 의한 화학적 변화	25
그림 2.12 경화 전 폴리머(위), 경화 후 폴리머(아래) (a-아조벤젠과 광섬유 코팅제 교반물질, b-광섬유 코팅제, c-광학접착제 NOA84, d-광학접착제 NOA88)	27
그림 2.13 박막코팅에서 빛의 다중 반사	32
그림 2.14 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단 내부	33
그림 2.15 이론의 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과와 실험 결과 중 아조벤젠 폴리머에 의한 간섭무늬	34
그림 2.16 두께에 따른 주기 변화 시뮬레이션 결과	35
그림 2.17 폴리머 내부에서의 빛의 거동	36
그림 3.1 자외선 감지 실험 구성	40
그림 3.2 광대역 광원(FLS-2300B EXPO Inc.)	41
그림 3.3 광 순환기(6015-3-FC Thorlabs Inc.)	42
그림 3.4 광 스펙트럼 분석기(AQ6319 ANDO Inc.)	43
그림 3.5 자외선 광원(LZ1-00UV00 LED ENGIN Inc.)과 스펙트럼	44
그림 3.6 아조벤젠 폴리머가 코팅되어진 광섬유 끝단	45

그림 3.7 광대역 광원의 스펙트럼과 Azobenzene 폴리머에 의한 간섭무늬	46
그림 3.8 센서 공정 과정 중의 빛의 손실 그래프	47
그림 3.9 자외선 on/off에 따른 간섭무늬의 이동	48
그림 3.10 다른 파장에서의 간섭무늬 변화량 비교	49
그림 3.11 UV-Vis-Spectrophotometer(8453 UV-visible Spectroscopy Agilent Inc.)	50
그림 3.12 아조벤젠과 광섬유 코팅제를 교반한 폴리머의 흡수율 측정 결과	51
그림 3.13 광섬유 코팅제의 흡수율 측정 결과	52
그림 3.14 아조벤젠과 광섬유 코팅제를 교반한 폴리머와 순 광섬유 코팅제의 자외선 검출 비교	53
그림 3.15 (a) 높이에 따른 자외선 세기, (b) 자외선 세기에 따른 파장 이동	55
그림 3.16 자외선 검출기	56
그림 3.17 새로이 제작된 센서의 자외선 세기에 따른 파장 변화	57
그림 3.18 가시광선에서 간섭무늬 변화량 측정을 위한 실험구성	59
그림 3.19 (좌)새로운 광대역 광원(SLS201L Thorlabs Inc.)과 (우)스펙트럼	60
그림 3.20 가시광선에서의 간섭무늬 파장 변화량 그래프	61
그림 3.21 레이저 다이오드(SFL1550S Thorlabs Inc.)와 레이저 다이오드 조절기(ITC4005 Thorlabs Inc.)	63
그림 3.22 셔터(SH1/M Thorlabs Inc.)와 셔터 조절기(KSC101 Thorlabs Inc.)	64
그림 3.23 셔터를 적용한 실험 구성	65
그림 3.24 (a) 충분한 자외선 노출, (b) 1초 간격의 자외선 노출, (c) 시간에 따른 센서의 세기	66
그림 3.25 새로운 자외선 광원(Acticure EFOS Inc.)	68
그림 3.26 오븐(ON-01E, Lab.Companion Inc.)	69
그림 3.27 온도계(305 Thermometer, CENTER Inc.)	70
그림 3.28 (a) 34 °C 온도에서의 자외선 유무에 따른 간섭무늬 변화, (b) 44 °C 온도에서의 자외선 유무에 따른 간섭무늬 변화	71
그림 3.29 다른 온도에서 자외선 유무에 따른 파장 변화량	72
그림 3.30 온도 측정 실험 구성	74
그림 3.31 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단(왼쪽부터 LS2211, NOA84, NOA88)	75

그림 3.32 25 °C와 30 °C에서의 간섭무늬 생성 (a) LS2211, (b) NOA84, (c) NOA88	76
그림 3.33 5 회 반복 측정에 따른 온도에 의한 파장 이동량 (a) LS2211, (b) NOA84, (c) NOA88	77
그림 3.34 FBG 온도 측정 실험 구성	79
그림 3.35 FBG의 온도에 따른 파장 변화(위)와 5 회 반복 측정 결과(아래)	80
그림 3.36 5 회 반복 측정에 따른 FBG와 각 폴리머들의 파장 변화량 비교	82

ABSTRACT

Research On Optical Fiber Sensor Using Fiber End Coated With Functional Polymer

Hee Taek Cho

Advisor : Prof. Tae-Jung Ahn, Ph.D.

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, we propose a simple optical fiber sensor having a functional polymer-coated fiber-end surface. The reflected light from the surface of an optical fiber end was interfered with by light from the surface of the coated material. This produces an interference pattern in the spectral domain. The main idea behind the optical fiber sensor is based on the multi-reflection interference phenomenon that occurs in the optical thin film layer. We propose two fiber sensors an ultraviolet (UV) light sensor and a temperature sensor that employ a multi-reflection interference scheme that works in conjunction with optical fibers. For the UV light sensor, an azobenzene polymer is used as a UV light responsive material coated on the end surface of a single mode fiber. The UV light changes the reflective index and volume of the polymer material. It also changes the optical path length of light propagating through the coated material. Because the phase of the interference pattern is linearly proportional to the optical path length, the UV-induced phase change of the pattern provides information about the UV light. For the temperature

sensor, an optical adhesive is used as a functional polymer to measure the phase change of the interference pattern with the changing temperature. The proposed fiber sensors can be applied to many industrial fields that detect UV rays and measure temperature. In addition, the sensing scheme of the multi-reflection interference can be used for various sensors such as those for pressure, radiative power, and humidity in combination with polymers responsive to physical quantities.

제1장 서 론

광섬유는 대개 유리를 기반으로 만들어지며, 전반사 원리를 이용하여 빛을 전달하는 경로 및 통로로써의 역할을 한다. 이를 이용하여 단순히 빛을 전기적인 신호로 변환하는 간단한 구성을 통해 센서의 역할을 하는 장치를 만들게 된다. 1853년도에 John Tyndall이 앞서 말한 광섬유의 원리를 공식 발표한 시점으로부터 현재까지 광섬유는 다양하고 많은 발전을 이루어오고 있다^[1]. 이러한 광섬유 센서는 가장 기본적인 빛 감지, 온도와 압력의 측정, 전기장과 자기장, 그리고 회전, 농도, 기계적 움직임 등 다양한 물리량을 측정하게 된다. 이러한 물리량 측정을 통해 환경 분야, 교량 등 기계적인 부분의 감지 분야, 항공 산업, 통신 산업, 그리고 유전 산업^[2] 등의 여러 부분에서 응용 및 개발되어져 사용되고 있다.

광섬유 센서는 특성 변화 측정에서 기존 센서들과 차별화 된 여러 가지 장점 및 강점이 존재한다. 첫 번째로 증폭기를 이용한 신호의 장거리 전송이 가능하다. 이로 인하여 해저케이블을 이용한 나라와 나라간의 통신 서비스가 가능하다. 두 번째로 넓은 대역폭을 가지며, 여러 신호를 안정적으로 송신할 수 있다. 세 번째로 외부 영향에 강하다는 장점이 있는데 이는 자외선 감지 센서 분야에서 중요한 사항이고, 절연성에 해당하는 사항인 전자기장의 간섭(Electro Magnetic Interference)을 상대적으로 받지 않아 절연성이 우수하고, 크기가 작고, 무게가 가볍고, 그리고 유연성을 띄는 등 여러 장점이 있다. 이러한 장점들로 인해 최근에는 광섬유 센서가 다양한 분야에서 많이 활용되고 있다.

본 논문에서는 자외선 감지 분야와 온도 측정 분야에서의 새로운 광섬유 센서를 제시한다. 자외선 감지의 경우 화재 발생의 초기 진압을 위한 자외선 감지 센서로 기존의 반도체 기반 센서를 주로 사용되어져왔다. 자외선 감지 센서는 높은 민감도와 낮은 잡음을 가지고 크기가 작고 구성이 간단한 구조로 개발되어져왔다^[3]. 앞선 반도체 기반 센서는 넓은 자외선 대역 감지가 힘들고, 높은 설비 구축비용이 들며, 외부 전자기파에 취약하다는 점 등에 이와 같은 단점을 보완하는 광섬유 기반 자외선 센서의 발전의 필요성이 높아지고 있다. 그리고 최근에는 다중 지점에서 자외선을 실시간 모니터링 하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 연구실에서는 광섬유 브래그 격자(FBG)

를 이용한 자외선 감지 센서 연구가 다양하게 진행되었다. 이 연구는 FBG에 아조벤젠이라는 기능성 폴리머를 코팅하여 민감도를 높이는 자외선 센서에 관한 것이다^[4-8]. 본 연구에서는 아조벤젠 기반 기능성 폴리머를 이용하여 원리가 간단하고 제작하기 쉬운 새로운 구성의 자외선 센서를 개발하였다.

또 다른 광섬유 센서인 온도 측정 센서의 경우 FBG를 이용한 광섬유 온도센서가 기존에 사용되어져 왔지만, 온도에 대한 민감도가 낮고, 다중지점의 사용대비 단가가 높다는 것이 현실이었다. 이러한 단점을 보완하는 연구를 진행하였고, 실험을 통해 FBG보다 민감도가 높고, 가격이 저렴하며, 구성이 간단한 온도 센서를 제안한다. 광섬유 센서와 그 센서를 활용한 자외선 감지 센서 및 온도 센서의 측정 원리를 제2장 이론에서 다시 자세히 언급하겠다.

본 논문에서 제안하는 광섬유 센서는 광학 이론 중 잘 알려진 간섭 현상을 기초로 개발된 센서이다. 이 센서의 구성요소는 광대역 광원(Broadband Source), 광 순환기(Circulator), 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer), 그리고 광섬유와 광섬유 끝단에 기능성 폴리머를 코팅한 부분이다. 개발된 자외선 감지 센서는 아조벤젠 폴리머를 광섬유 끝단에 코팅하여 코팅된 계면에서 반사된 광들의 간섭으로 스펙트럼 상에서 간섭무늬가 생성된다. 이 센서에 자외선이 입사하면 재료의 특성 변화로 인하여 간섭무늬의 중심파장이 변하게 되고 이것을 분석하여 자외선을 감지할 수 있다. 동일한 원리로 온도 센서는 광학 접착제로 사용되는 기능성 폴리머를 코팅하여 제작하였다. 이 센서 역시 온도 변화에 따라 간섭무늬가 바뀌고 이를 분석하여 온도를 감지하는 원리이다. [그림 1.1]에서는 위 제작된 자외선 센서와 온도 센서 뿐만 아니라 기능성 폴리머의 역할이 어떻게 되느냐에 따라 다른 센서로 제작이 될 수 있다. 이러한 쉬운 구성과 다양한 기능성 폴리머를 통해 제작된 광섬유 센서는 여러 분야에서 사용될 것으로 전망된다.

광섬유 센서는 짧은 역사에도 불구하고 기존에 온도센서, 장력(Strain)센서, 가속도센서, 자이로스코프 등 전통적인 계측센서 만큼 우수한 장점들을 가지고 발전해왔다. 최근에는 다양한 분야에서 기존 센서가 광섬유 센서로 대체되고 있다. 본 논문은 자외선과 온도를 측정/감지함에 있어 본 연구에서 개발된 센서는 제작비용이 저렴하고 제작이 쉬운 장점을 가진다.

제2장 이론에서는 광섬유 센서의 역사와 활용 범위, 자외선 센서의 필요성과 응용

분야별 자외선 센서, 온도 센서 부분에서 광섬유 기반 온도 센서의 필요성과 다양한 온도 측정 센서, 광센서 재료 중 아조벤젠과 광학 접착제로 사용되는 기능성 폴리머, 만들어지는 간섭무늬의 수식적 설명을 알아본다. 제3장 실험 구성 및 실험 결과에서는 쉬운 구성으로 제작한 광섬유 센서 중 자외선 센서와 온도 센서에서 센서로서의 여러 실험 측정 결과를 분석한다. 마지막으로 제4장 결론에서는 연구 내용의 논의 및 끝맺음말로 구성되어있다.

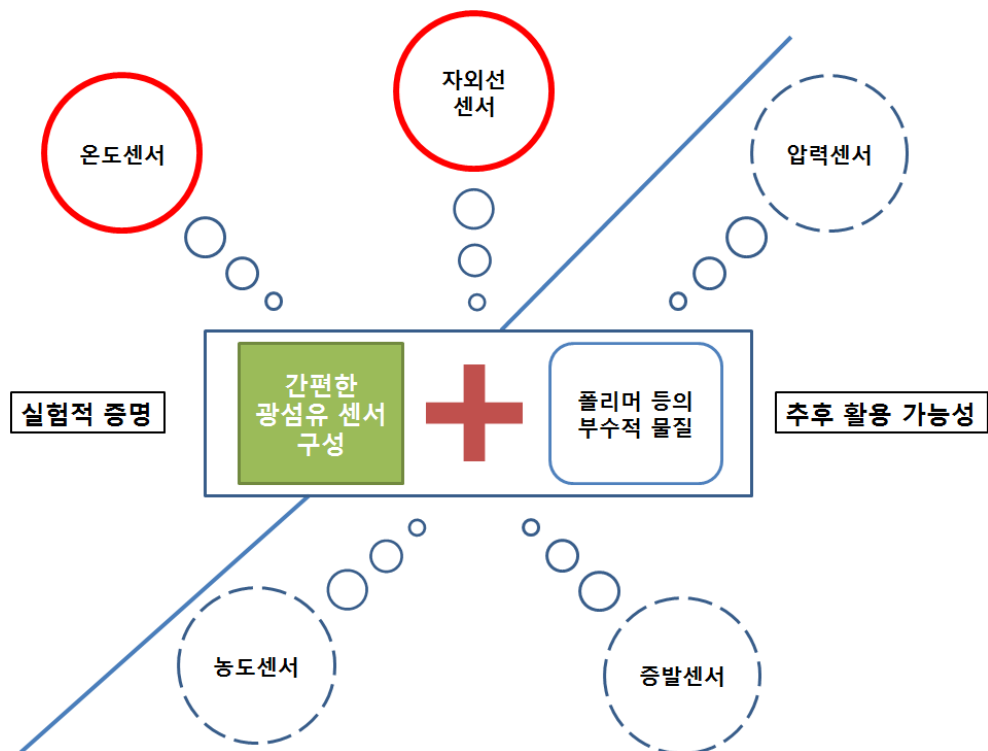


그림 1.1 본 연구의 간편한 광섬유 센서 구성의 실험적 증명 분야와 추후 활용 분야

제2장 이 론

제1절 광섬유 센서

1. 광섬유 센서의 역사

광섬유는 일반적으로 실리카(Silica, SiO) 재료를 가지고 제작된 유연한 성질을 나타내는 투명 섬유이다. 광섬유는 빛의 전반사 원리를 이용하여 빛을 전송하는 통로 역할을 하여 장거리 정보 전달이 가능한 광통신에 주로 응용되어져왔다. 프랑스 물리학자인 Daniel Colladon과 Jacques Babinet에 의해 광섬유 원리가 처음 제안되었다. 그리고 1853년 런던 왕립연구소의 John Tyndall에 의해 기본 원리가 구체적으로 문서로 작성이 되었다^[9]. 이 원리는 빛 신호가 구부러질 수 있다는 것을 보여주며 [그림 2.1]은 John Tyndall의 실험으로 구부러진 물줄기를 타고 빛이 진행하는 것으로 전반사 원리를 보여준다. 이 원리는 앞서 말한 광섬유의 기본적인 원리가 되었다. 더 나아가 1880년 William Wheeling은 John Tyndall의 실험을 확대하여 파이프 라이트라고 하는 빛 전달 방법의 특허를 획득하였다^[10].

19세기는 전기 분야의 비약적인 발전이 일어남과 동시에 광섬유 부분에서는 19세기 후반과 20세기 초반에 의학 분야에서 광섬유가 처음 응용되었고, 현재의 내시경으로 발전하게 되었다. 몇 년이 지난 다른 분야의 시점에서 광섬유를 통신에 적용시키고자 하는 노력이 있었고, 이는 1965년 독일의 물리학자인 Manfred Borner에 의해 최초의 광섬유 데이터 전송 시스템이 시연되었다. Kao와 Hockham은 광섬유 통신의 연구를 진행하였고, Kao는 1968년 4 dB/km의 감쇠를 갖는 광섬유를 생산하였다. 이탈리아에서 1977년 토리노 최초의 대도시 광섬유 케이블을 배치하게 되었으며 광섬유 접합을 위한 초기 기술 개발을 하였다^[11].

광섬유 센서의 개발이 본격적으로 시작된 시기는 1977년도이다. 1977년도에서 1979년도까지 이 시기에 광섬유 센서를 많은 연구실이 연구를 하였으며, 빠른 발전을 이루었다. 예를 들어 100 dB가 향상된 광섬유 음향 센서 민감도를 높이는 실험이 빠른 발

전의 대표적 예라고 볼 수 있다. 이후 광섬유 센서 유형으로 자기, 음향, 압력, 온도 가속도, 자이로, 변위, 유체 레벨, 토크, 광 음향, 전류 및 변형 센서 등 적용 분야가 비약적으로 넓어졌다^[12].

현대에 들어서 광섬유의 손실을 줄여 장거리 통신에 적용시키고, 높은 데이터 전송률을 달성하고자하는 연구의 노력이 현재진행중이다^[11]. 단편적인 예로 과거 [그림 2.2]에서 나타나있는 것처럼 송신기, 수신기를 포함하고 광섬유가 통로 역할을 하며 수십 km마다 중계기를 통해 비싼 가격을 지불하고 광중계기를 통해 신호를 지속적으로 전달하여야만 하는 구조였으나 위와 같은 노력들 덕분에 증폭기가 발명되고 가격은 자동적으로 내려갔다. 계속 된 연구를 바탕으로 하나의 광섬유를 통해서 100개의 광 신호를 40 Gb/s 속도로 보내는 기술은 상용화되어서 사용되어지고 있으며, 연구를 목적으로 하는 실험실에서는 수십 Tb/s급 기술이 구현되고 있는 실정이며^[13], 현재에는 5G 시대, 높은 신호 전송률 발전은 물론이고, 안정화단계에 들어섰다고 말할 수 있는 위치에 도달하였다.

최근에는 초미세 광섬유가 개발되었다. 이는 유리봉을 최대한 균일하고 가늘게 뽑아야 하는 것이 난제인데 이 어려움을 좋은 전도체인 사파이어 바늘을 이용하여 제작하였으며, 그 결과 코어의 두께를 최대한 얇게 제작해 공기가 클래드의 역할을 하게 함과 동시에 가시광선의 파장보다 굵기가 얇아 광신호의 누출이 줄어 안정적으로 전달할 수 있게 되었다. 이 광신호의 누출을 막아버리는 초미세 광섬유는 지금 현재 50 km마다 있는 증폭기를 제거할 수 있는 강력한 광섬유가 되었다^[14]. 비약적인 경제적 이득을 취할 수 있고, 현 기술의 발전을 보여주는 개발의 예이며, 앞으로 센서화 될 수 있는 가장 강력한 기술로 발전할 것이다.

과거 광섬유부터 현재까지의 광섬유의 발전을 한눈에 보았으며 빛을 다루는 기본 원리에 입각하여 발전해오고 있는 것을 알 수 있다. 가장 기초적인 원리에 입각한 광섬유 제작부터 복잡하고 다양한 제작 방식으로 만들어진 광섬유와 또 이러한 광섬유를 활용한 센서들의 제작이 지금 이 시간에도 한발 앞서 인류역사의 한 페이지를 써나가고 있다. 그리고 이러한 인류의 노력은 삶의 질을 높이는데 큰 역할을 하고 있다.

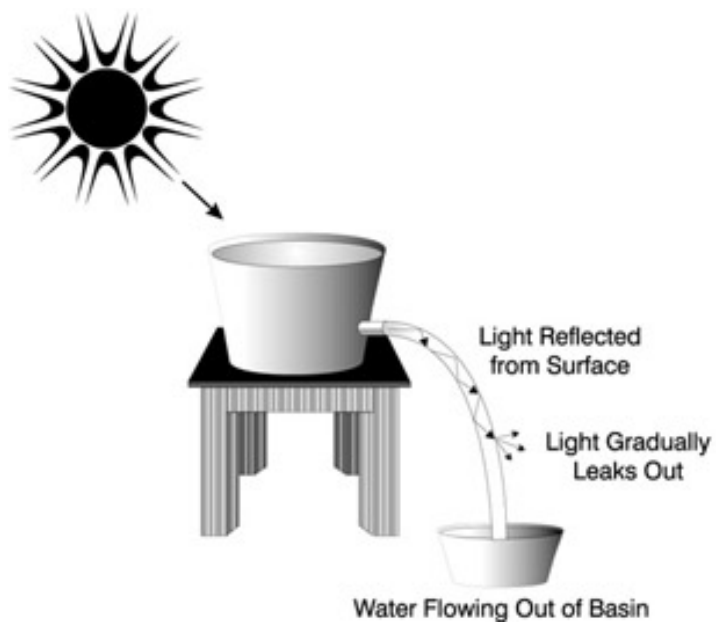


그림 2.1 John Tyndall의 실험^[10]

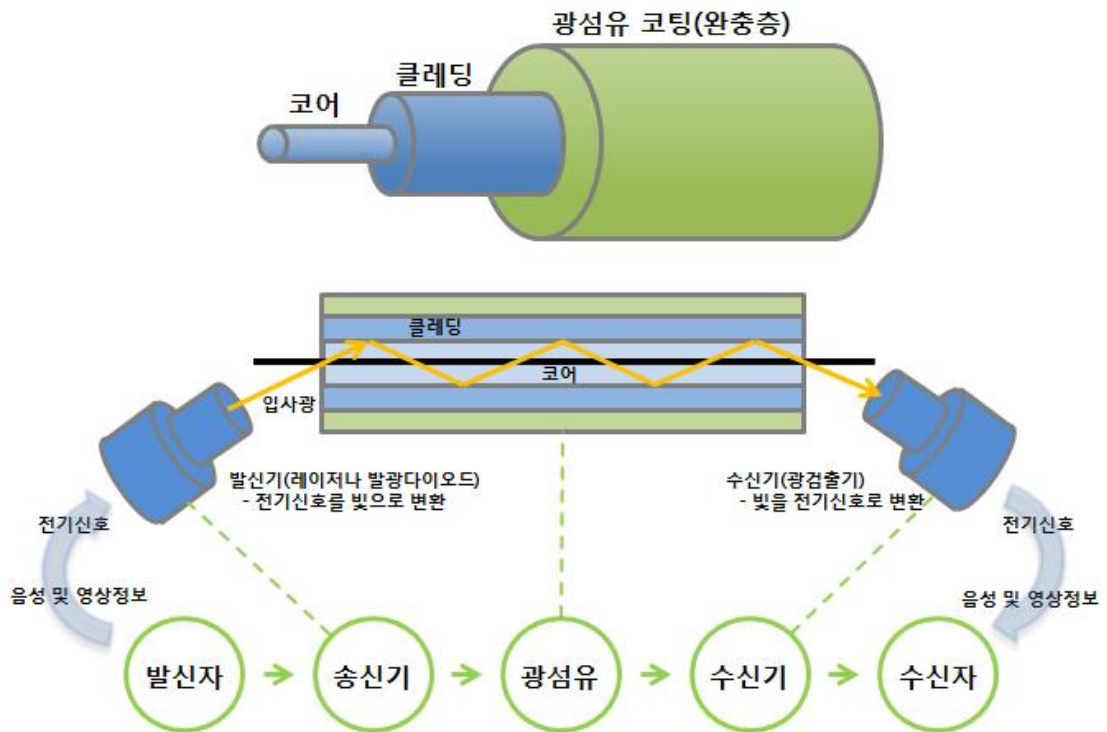


그림 2.2 광통신의 원리^[13]

2. 광섬유 센서의 활용

광통신 발전과 더불어 광섬유는 다양한 분야에서 새로운 센서로 발전되어왔다. 장력 측정 분야만 해도 [그림 2.3]과 같이 다양한 구조에 광섬유 센서가 개발되었다. 광섬유 센서는 온도, 장력, 압력 등 물리량 신호를 광신호로 변환된 데이터를 전송하는 역할을 한다. 빛이 광섬유를 통해 전달될 때 강도, 위상, 편광, 파장 등의 변화를 관찰함으로써 앞서 말한 장력, 온도, 압력 등의 물리량을 측정할 수 있다.

기존의 전기적 센서들이 물리량을 측정에 많이 활용되고 있지만, 전원 공급 장치 필요, 전자기파의 영향, 부식 환경에서의 취약점 등의 단점을 광섬유 센서로 보완할 수 있다. 최근 무게가 가볍고 외부 전자기파의 영향을 덜 받는 광섬유 센서가 교량과 항공기날개에서의 진동이나 흔들림, 그리고 파괴(Crack)를 측정하기 위해 이용되고 있다. 또한 항공기의 지구 위치 파악 시스템(Global Positioning System)의 자이로센서 역할을 한다. 다른 응용분야로 배관의 누수여부를 빛의 산란 원리를 통해 광섬유 센서를 활용하여 주위 압력을 측정함으로써 실시간으로 감지할 수 있다. 최근에는 광섬유 센서가 전력전기 분야에서 전류센서 및 전압센서로 연구되고 있다.

다양한 종류의 광섬유 센서 중에서 특별히 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg Grating)센서가 가장 활발히 연구되고 실제 현장에 적용되었다. FBG센서는 토목 부분의 매입 말뚝의 하중전이가 측정^[15], 교량의 내진 시스템^[16], 온도 측정 시스템^[17], 항공분야에 사용되는 구조물의 접착제 층의 모니터링 센서^[18], [그림 2.4]^[19]에서 보여지는 철콘크리트 등의 변형률을 광섬유 브래그 격자 센서를 활용하여 건축물에 매설하고 실시간으로 계측하는 시스템^[20], 모션 측정 시스템^[21], 터널 유지관리 계측용 센서 시스템^[22], 그리고 고 분해능 동작기계 구조물 변형 감지 시스템^[23] 등 여러 분야 다양한 계측 센서로서의 역할을 하고 있다.

다양한 분야에 사용되어지고 있는 광섬유 센서는 현대에 반드시 필요한 센서로 자리매김하였으며, 더 좋은 분해능, 민감도, 내구성 등을 향상하는 연구가 계속되어지고 있다. 그러한 연구는 상당부분 진행되어 현재 안정기를 보이고 있다. 본 연구에서 개발된 자외선 감지 센서는 기존 반도체 센서의 약점 중 하나인 전자기장의 간섭을 극복하고, 제작이 용이하여 저렴한 비용으로 자외선을 감지 할 수 있다. 온도 측정 센서에서는

기존 광섬유 브래그 격자 센서보다 높은 민감도를 보이며 간단한 구성으로 쉽게 제작이 가능하다. 이 부분에 대해서는 뒤에서 자세히 설명하겠다. 현재 사물인터넷(Internet of Things) 분야에서 많은 종류의 센서가 활용되고 있다. [그림 2.5]에서 자료산업연구원 통계자료를 보면 국내외적으로 사물인터넷 시장 규모가 지속적으로 상승하고 있는 것을 알 수 있다^[24]. 광섬유 센서는 사물인터넷 분야에서도 핵심소자로 적용되고 있으며, 향후 그 활용성이 더욱 높아질 것으로 예상된다.

광섬유 센서는 또 다른 응용분야인 가상현실 기술에까지 영향을 주고 있다. (주)모인이라는 회사와 한국과학기술원은 [그림 2.6]와 같이 광섬유 브래그 격자 센서를 기반으로 실시간적인 3차원 형상을 정밀 측정하는 광섬유 기반의 착용형 3D 모션 캡처링 센서 시스템 개발을 공동 발표했다. 이 센서는 여러 물리량 측정의 집약체라고 볼 수 있는데 형상, 각도, 비틀림, 그리고 고곡률의 구부러짐 등을 측정하게 된다. 이러한 연구를 통해 인체의 관절을 표현하고 정밀한 신체의 움직임을 데이터화하고 분석하여 화면으로 나타내어 줄 수 있다^[25].

이렇듯 광섬유 센서는 여러 분야에서 폭 넓게 사용되어지고 있으며, 현재까지도 많은 발전이 진행되고 있다.



그림 2.3 다양한 광섬유 센서^[26]

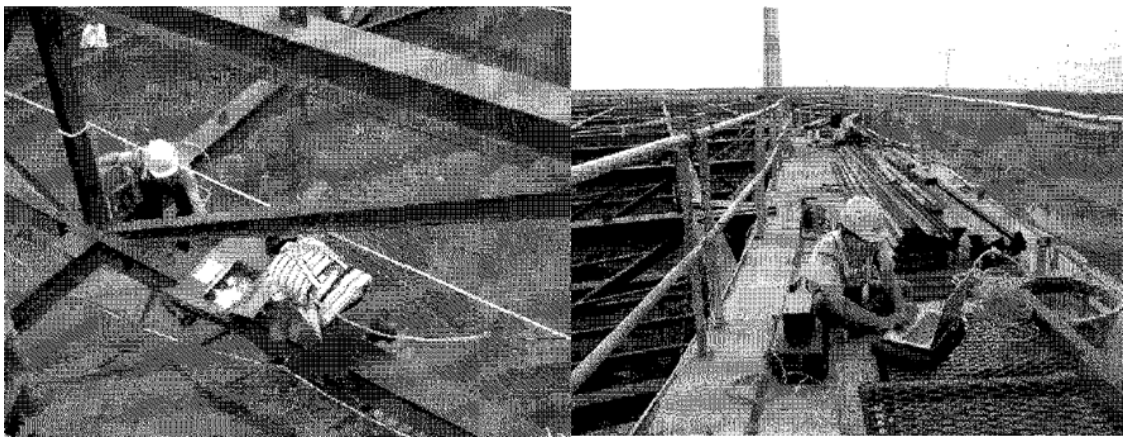


그림 2.4 (좌) 건축물의 FBG 센서 매설 모습, (우) FBG 센서 실시간 감시 모습^[19]

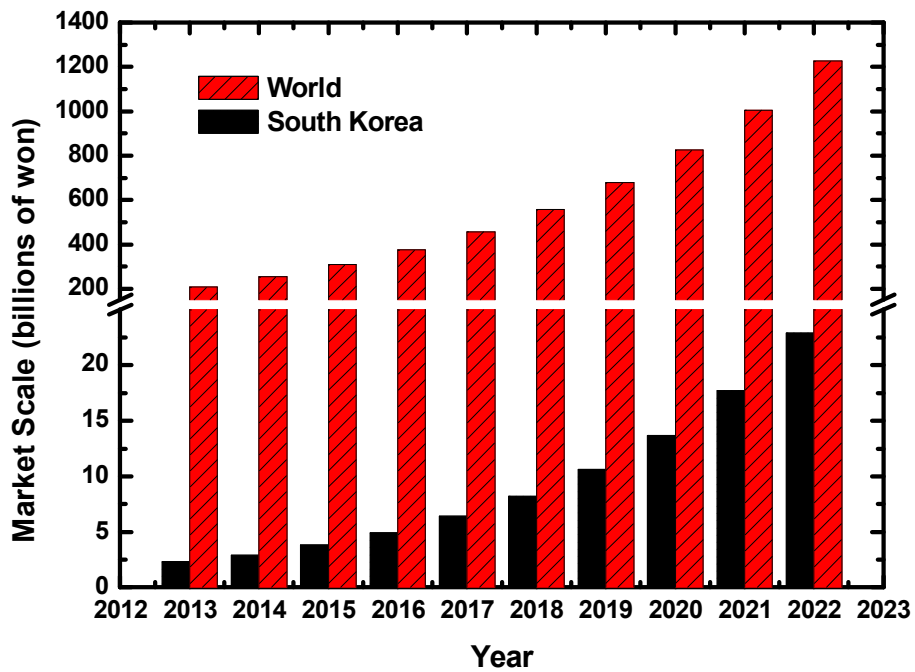


그림 2.5 사물인터넷 시장 규모^[24]



그림 2.6 광섬유 브래그 격자 센서를 이용한 가상현실기술 적용^[25]

제2절 자외선 센서

1. 광섬유를 기반으로 하는 자외선 센서의 필요성

자외선을 먼저 알아보면 약 10 nm에서 400 nm의 범위를 갖는 전자기파이다. 화학 작용이 일어나 화학선이라고도 불리는 이 자외선은 눈에 보이지 않아 산업현장에서 많은 불안 요소를 가지고 있는 빛의 영역이다. 자외선 감지기는 응용 분야에 따라 다르지만, 감지 속도가 빨라야 되고, 자외선 이외의 빛의 영역에서는 동작하지 않아야 한다. 구체적인 산업 현장으로는 먼저 반도체 광도파로 제작에 사용되어지고, 액체상태의 페인트나 접착제를 굳히는 경화작용을 하며, 유리 기관 등의 불순물 제거 및 살균작용에 쓰이는 것을 말한다. 실수로라도 자외선에 노출된다면 신체의 노출부위에 악영향을 끼치게 된다. 피부에 화상을 입히거나 염증 또는 암을 유발하기도 하며, 눈에 조사할 경우 실명의 위기까지 이르게 된다. 그리고 인체의 면역계 부분에 광범위하게 영향을 미친다. 이를 입증하듯 알레르기 반응과 요즘 현대인들이 많이 겪는 햇빛에 의한 두드러기, 햇빛에 의한 발진, [그림 2.7]에서 나타난 것처럼 광선과민증류 루푸스 등의 발생이 있다^[27]. 이러한 산업현장과 생활 곳곳의 위험 요소로부터 예측하지 못한 자외선의 노출은 필연적으로 빠르게 감지를 하여야하는 필요가 있고, 현재 산업분야에서 여러 방식으로 감지를 하고 있다. 현재 대표적으로 반도체를 기반으로 하는 자외선 센서가 사용되어지고, 자외선 센서의 파장범위, 분해능, 동작 가능한 온도 범위 등을 기준으로 삼아 [표 2.1]에서 다양한 반도체 기반으로 한 자외선 센서의 종류를 정리하였다. 종류로는 200 nm에서 365 nm 파장 범위를 검출할 수 있는 GaN Schottky와 SiC Photodiode, 400 nm에서 1200 nm의 검출 파장 범위를 갖는 Silicon Photodiode, 그리고 185 nm에서 265 nm의 파장 범위를 검출 할 수 있는 UV tron이 있다^[6]. 하지만 이러한 반도체 기반의 다양한 센서 종류들은 치명적인 단점으로 전자기파 영향에서 효율을 기대하기 힘든 부분이 있으며, 이 부분은 광섬유를 기반으로 한 자외선 센서를 사용함으로써 극복되어지게 된다.



그림 2.7 광선과민증으로 인한 루푸스 질환의 모습^[28]

	GaN Schottky	SiC Photodiode	Silicon Photodiode	UV tron
Spectral range	200~365 nm	200~365 nm	400~1200 nm	185~265 nm
peak responsivity	0.18 A/W	0.04 A/W	0.55A/W	–
response time	118 ns	–	0.1 μ s	0.1 μ s
maximum operation temp.	~ 300 °C	~ 275 °C	~ 125 °C	~ 125 °C

표 2.1 반도체 기반 자외선 센서의 종류^[6]

2. 자외선 센서의 응용분야

자외선은 위 문단에 명시된 내용으로부터 반도체의 노광작업, 액체의 경화작업 등 매우 폭넓게 산업 분야에서 활용되어지고 있다. [표 2.2]에서 나타낸 것처럼 조금 더 세분화하여 알아보면 상업, 의학, 공업, 산업, 군사, 그리고 기타 여러 분야로 사용되어진다. 상업분야에서는 태양광을 활용해 전기를 생산하는 사업, 의학에서는 살균을 목적으로 하는 시스템, 공업에서는 플라즈마 모니터링, 산업분야에서는 여러 기기에서 방출되어지는 자외선의 감지, 그리고 군사용으로 미사일 추적 장치와 통신 장치 등의 세분화되어진 목적에 맞는 곳에 응용하여 사용된다^[29].

인체에 인접한 분야에서의 살균을 목적으로 하는 시스템은 자외선 램프 또는 자외선 발광 다이오드를 사용하여 진행이 된다. 파장의 길이가 짧고 에너지가 강한 자외선을 발산하여 미생물을 죽이는 과정을 거쳐 소독을 하게 된다. 또한 이러한 램프를 사용하여 의료 도구를 소독하거나 또는 생활에서의 식기나 칫솔을 소독하는 용도로 사용하게 된다.

자외선은 법의학에서 많은 공헌을 한다. 자외선으로 만들어진 조명은 범죄 현장에서 조사 도구로 사용되어진다. 굳어진 체액은 266 nm의 파장을 갖는 조명 아래서 발광하고 이러한 흔적은 범죄의 중요한 단서가 된다^[30]. [그림 2.8]은 266 nm의 파장을 갖는 조명아래 검출된 체액의 흔적이다.

전력 설비의 전기 누출로 인한 화재를 초기 대응하기 위한 감지 기구로써 자외선 카메라가 사용된다^[31]. 특히나 전선부위의 나사를 절연하고 기계적인 부분을 유지해 주기 위한 애자부위의 자외선 누수를 감지하는 곳에 사용하게 된다. [그림 2.9]는 염수에 의한 열화 효과로 인한 환경에서도 애자의 자외선 방출이 잘 검출되는 카메라와 애자에서의 자외선 방출 사진이다.

자외선은 인간의 삶을 윤택하게 해주거나 파괴하는 양면의 날이며 사용 분야에 따라 효과를 달리한다. 이러한 인간의 삶 여러 분야에서 자외선은 많이 활용되고 있다.

사 용 분 야	목 적
상업	태양광의 자외선 감지 센서
의학	살균감지, 자외선 측정
공업	플라즈마 감지, 엔진 모니터링
산업	자외선 세기측정, 열 감지, 화염감지
군사	미사일 추적 장치, 미사일 안내센서, 인공위성간의 통신
기타	생화학물질 감지센서

표 2.2 응용 분야별 자외선 감지 센서의 활용^[29]

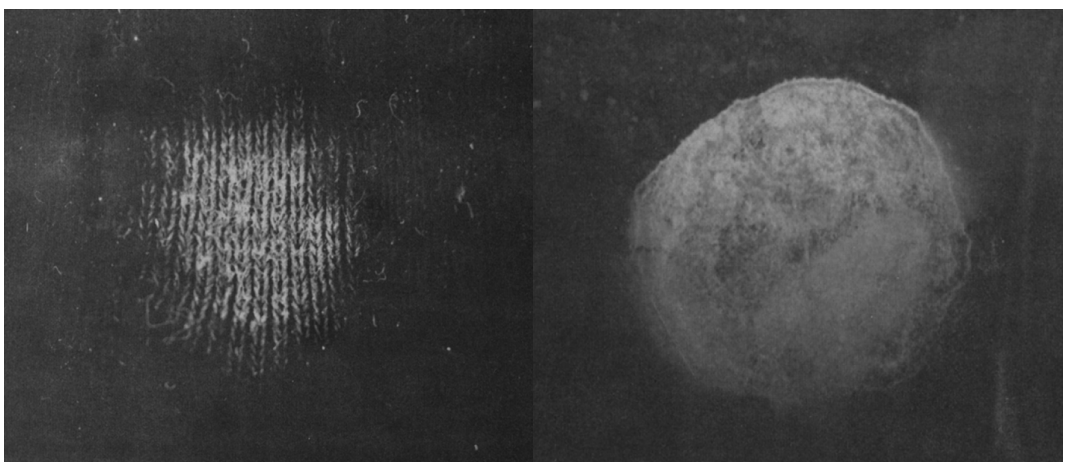


그림 2.8 266 nm의 파장을 갖는 조명 아래 체액의 흔적들^[30]



그림 2.9 (좌) 애자에서의 자외선 방출과 (우) 자외선 감시 카메라^[31]

제3절 온도 센서

1. 광섬유를 기반으로 하는 온도 센서의 필요성

온도는 일반적으로 정의하는 뜨겁고 찬 정도를 나타내는 물리량으로써 보통은 온도계를 통해 국제 표시 단위 켈빈(K) 또는 나라별로 섭씨온도(°C), 화씨온도(°F)로 측정을 한다. 사람은 주변 기후의 영향을 받는 생물이기에 온도는 사람과 별개로 볼 수 없는 물리량으로써 온도 측정을 다양한 방법과 연구를 통한 새로운 방법들로 진행해오고 있다. 일반적인 온도계에 해당되는 접촉식 온도 센서를 비롯하여 적외선 등을 사용하는 비접촉식 센서로 두 가지 큰 항목으로 분류된다. 일반적인 체온계와 반도체를 사용하는 온도계는 사용되어지는 상황에 따라 여러 단점을 야기하는데 이는 시료 표면의 손상, 핵발전소의 특수한 환경 등에서의 측정이 불가능하다는 많은 단점이 있다. 앞서 자외선 감지 센서에서 언급한 광섬유의 장점들은 여기에서도 적용이 되는데 비접촉식과 경량화, 전자기파의 영향에서 비교적 자유로운 경향이 이에 해당된다.

2. 다양한 온도 센서

온도를 측정하기 위한 다양한 환경이 있고, 그에 맞는 다양한 온도 측정 센서가 존재한다. [그림 2.10]에서 나타나있는 것처럼 기본적으로 체온을 측정하는 체온계, 반도체를 활용하여 열을 전기적 신호로 변환하여 측정하는 시스템인 반도체 온도 센서, 발전소 등에서 쓰이는 FBG를 이용한 온도계가 있다. 여기서 언급한 FBG 온도 센서는 휴대가 간편하고, 다중 지점 측정에 용이하며, 여타 반도체 온도 센서들과 달리 전자기파의 영향에 대해서도 배제되는 다양한 장점을 가지고 있는 온도 센서이다. 하지만 단 방향으로 진행되는 센서라는 점, 민감도가 낮다는 점은 단점으로 작용되어지고 있으며, 본 실험의 새로운 구성을 통해 단점을 극복하는 연구를 진행하였다.



그림 2.10 다양한 온도 센서^{[32],[33],[34]}

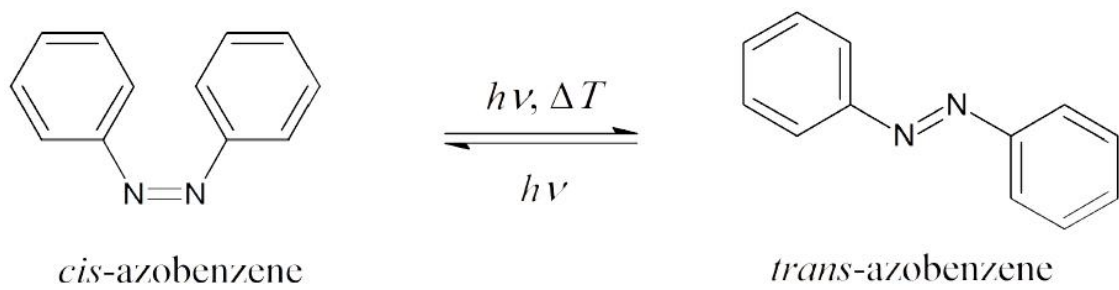


그림 2.11 아조벤젠의 자외선 광에 의한 화학적 변화^[36]

2. 광학 접착제로 사용되는 기능성 폴리머

본 연구에 온도 센서에 사용된 기능성 폴리머는 자외선 센서에 사용되어진 기능성 폴리머와 다른 자외선 경화성 접착제 물질을 사용했다.

자외선 센서와 온도 센서에 사용된 경화성 고분자 재료는 광섬유 제작시 사용되는 2차 코팅 물질로 활용되는 LS2211(Luvatix ADM Inc.)을 사용했다. 이 재료는 경화 전 상온인 25 °C에서 4,500 cPs 점도를 갖고, 1.51(582 nm)의 굴절률을 갖는다. 경화 후에는 1.524(852 nm)로 굴절률이 약간 증가한다.

이 경화성 코팅재료는 광섬유 제작시 2차 코팅 물질 중 하나이며 특히 광섬유 클래드보다 낮은 굴절률 코팅제로 클래드를 따라 빛을 전송해야 하는 특별한 응용 분야에 활용된다. [그림 2.12(b)]에서 이 광섬유 코팅제의 경화 전, 후의 폴리머 모습을 보여준다. 아조벤젠 폴리머와 마찬가지로 지름의 미세한 차이가 있으나 크게 고려할 부분은 아니다.

추가적으로 자외선 광에 의해 경화되는 접착제 물질로 NOA84와 NOA88을 Norland 사로부터 구입하여 온도 센서 개발에 사용하였다. NOA84의 경우 25 °C에서 40~75 cPs의 점도와 경화 후에 1.46의 굴절률을 갖는다. NOA88는 같은 온도에서 250 cPs 점도와 1.56 굴절률로 NOA84보다 점도와 굴절률 모두 높은 값을 가진다.

이 물질은 편광 필름, 나일론, 아크릴, 유리 등을 다양한 재료의 접착제로 광범위하게 활용되고 있으며, 특히 고품질 광학소자 및 기기 생산에서 접착제로 중요하게 이용되고 있다. [그림 2.12(c)]와 [그림 2.12(d)]는 광학 접착제 NOA84와 NOA88 재료의 경화 전후 모습을 보여준다. 마찬가지로 재료의 점성 차이 때문에 약간의 지름 차이를 보인다.

앞에서 소개한 세 종류, 의 경화성 고분자 물질을 활용하여 광섬유 기반 온도 센서 개발하고, 각 온도 센서의 재료 종류에 따른 온도 민감도 특성을 실험적으로 확인하였다.

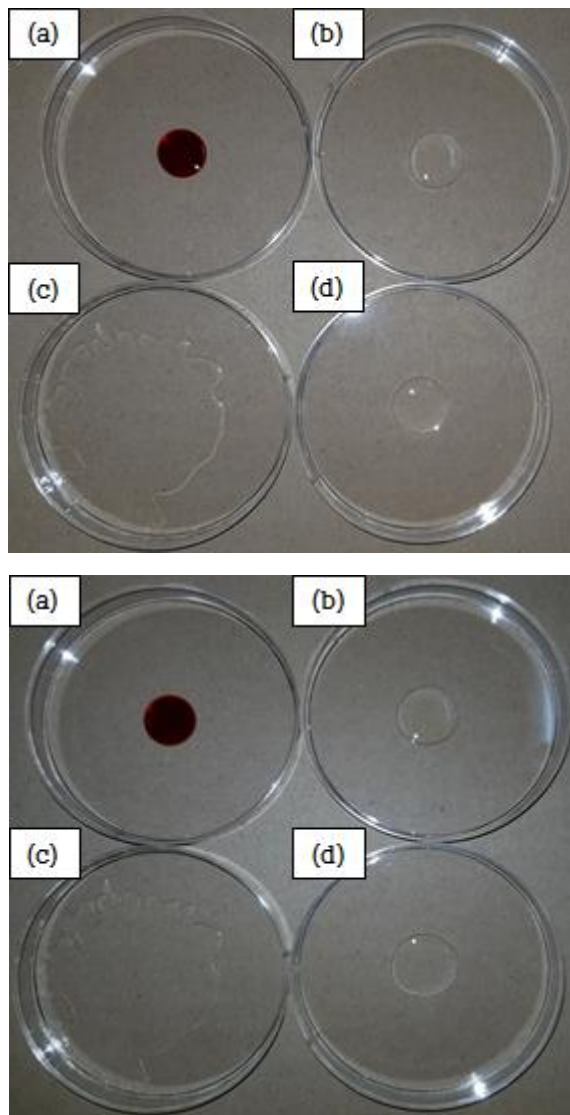


그림 2.12 경화 전 폴리머(위), 경화 후 폴리머(아래) (a-아조벤젠과 광섬유 코팅제 혼합물질, b-순수 광섬유 코팅제, c-광학접착제 NOA84, d-광학접착제 NOA88)

제4절 간섭무늬의 수식적 이해

여기에서 쓰이는 수식적 원리는 박막 광학의 박막 내에서의 다중 반사의 원리를 적용하였으며, [그림 2.13]은 박막코팅의 빛의 다중 반사 모습을 도식적으로 보여준다. 박막 코팅에 의해 다중 반사 및 간섭이 굴절률이 바뀌는 각 계면에서 나타난 작용으로 인해 생기게 되고 그로인해 간섭무늬가 생성된다. 이는 Fabry-Perot 공진기의 이론적 해석과 거의 동일하다. 코팅의 두께가 d , 빛의 박막 코팅으로의 입사를 식의 단순화를 위해 수직입사를 가정한다. 이렇게 가정되어진 조건에서 박막 코팅의 두께 d 를 두 번 가로지르는 광에서의 위상변화는 $\Phi = 2(2\pi/\lambda)n_2d$ 이고, 여기서 λ 는 자유공간에서 파장이다. 이 박막 코팅을 왕복하는 빛의 위상차를 고려해주기 위해서는 광의 파동에 $e^{-j\Phi}$ 를 곱해준다. 이 박막 코팅의 [그림 2.13]에서 $n_1 - n_2 - n_3$ 구성에 대한 반사계수 및 투과계수는 다음의 식 (1.a), (1.b), (1.c)로 주어지게 된다.

$$r_1 = r_{12} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = -r_{21}, r_2 = r_{23} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (1.a)$$

또,

$$t_1 = t_{12} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2}, t'_1 = t_{21} = \frac{2n_2}{n_1 + n_2}, t_2 = t_{23} = \frac{2n_2}{n_2 + n_3} \quad (1.b)$$

여기서,

$$1 - t_1 t'_1 = r_1^2 \quad (1.c)$$

첫 번째 반사면에서 반사되어진 A_1 빔의 수식은 $A_1 = A_0 \times r$ 이고, A_2 빔의 수식은 $A_2 = A_0 \times t_1 \times t'_1 \times r_2 \times e^{-j\Phi}$ 으로 표시가 되며, 같은 방법으로 A_3, A_4, \dots 등을 알 수 있다. 이렇게 반사된 빔의 크기는 아래와 같이 $A_{reflected}$ 로 표현할 수 있으며 식 (2)과

같다.

$$A_{reflected} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots$$

전개하면,

$$A_{reflected}/A_0 = r_1 + t_1 t_1' r_2 e^{-j\Phi} - t_1 t_1' r_1 r_2^2 e^{-j2\Phi} + t_1 t_1' r_1^2 r_2^3 e^{-j3\Phi} + \dots \quad (2)$$

이는 등비급수를 따른다. 식 (1.c)을 사용하여, 식 (2)을 비교적 쉽게 전개할 경우 식 (3)과 같은 총 반사계수 r 을 구할 수 있다.

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-j\Phi}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\Phi}} \quad (3)$$

이와 유사하게, 투과된 빔의 크기인 $C_{transmitted}$ 을 다음과 같이 합하여 식 (4)을 구할 수 있다.

$$C_{transmitted} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

전개하면,

$$C_{transmitted}/A_0 = t_1 t_2 e^{-j\Phi/2} - t_1 t_2 r_1 r_2 e^{-j3\Phi/2} + t_1 t_2 r_1^2 r_2^2 e^{-j5\Phi/2} + \dots \quad (4)$$

이는 또 등비급수이고, 정의에 따라 식 (5)을 구할 수 있다.

$$t = \frac{t_1 t_2 e^{-j\Phi/2}}{1 + r_1 r_2 e^{-j\Phi}} \quad (5)$$

이렇게 구해진 식 (3)과 (5)는 각각 반사파와 투과파를 표현한다. 이 경우 반사도(reflectance)와 투과도(transmittance)는 식 (6)과 같다.

$$R = |r|^2 \quad T = (n_3/n_1)|t|^2 \quad (6)$$

위와 같은 반사율 R 을 구하는 식^[24]을 바탕으로 본 연구에서 적용된 실제적인 센서 구성인 [그림 2.14]과 같이 적용할 수 있다. 광섬유 페룰(Ferrule)의 끝단면에 둥근 모양으로 경화된 폴리머는 둥근 모양으로 코팅된다. 광섬유 - 코어에서 코팅된 폴리머로 출력된 광이 [그림 2.14]와 같이 두 계면에서 되돌아간다. 기존 박막 코팅은 광손실을 고려할 필요없을 정도로 광학적으로 투명한 재료를 사용하였지만, 본 연구에서 사용된 코팅된 폴리머는 높은 광학 손실과 코팅면에서 되돌아온 빛이 다시 광섬유 코어로 들어갈 때 결합손실을 가진다. 이 두 가지 손실을 모두 포함한 총 손실 α 과 고려하여 반사계수 식을 다시 정의해야 한다. 광학 손실을 반영하여 $e^{-\alpha(2d)-j\Phi}$ 를 적용하면 다중 반사에 의한 반사 계수 r 은 다음과 같이 얻어진다.

$$r = \frac{r_1 + r_2 \exp(-2\alpha d - j\Phi)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2\alpha d - j\Phi)} \quad (7)$$

여기에서 $r_1 = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ 및 $r_2 = (n_2 - n_3)/(n_2 + n_3)$ 이며, 반사율 R 은 $R = |r|^2$ 에 의해 다음 식과 같다.

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 \exp(-4\alpha d_0) + 2r_1 r_2 \exp(-2\alpha d_0) \cos \Phi}{1 + r_1^2 r_2^2 \exp(-4\alpha d_0) + 2r_1 r_2 \exp(-2\alpha d_0) \cos \Phi} \quad (8)$$

$n_1 > n_2 > n_3$ 일 때, 반사율 R 은 $\Phi_m = 2(2\pi/\lambda)n_2 d = 2m\pi$ ($m = 1, 2, \dots$)에 대해 최대 값을 가진다. 따라서 입사된 자외선이나 주변 온도 변화에 의해 광섬유 끝단에 코팅된 폴리머의 굴절률 및 두께 변화는 간섭무늬의 파장 이동을 발생시키는데, 이것은 다음 식과 같은 관계를 가진다. 은 다음과 같이 파장, 굴절률 및 두께 위상 미분으로 식 (9)

과 같이 구해진다.

$$\Delta\lambda = 2(\Delta n_2 d + n_2 \Delta d) \quad (9)$$

여기서 $\Delta\lambda$ 는 간섭무늬에서 중심파장 이동 량이고, Δn_2 와 Δd 는 각각 굴절률 변화량과 두께 변화량을 나타낸다. 이 수식을 이용하여 간섭무늬를 계산하여 얻은 결과를 [그림 2.15]에 나타냈으며, 이것은 실험적으로 얻은 간섭무늬와 유사한 것을 알 수 있다. 또한 [그림 2.16]에서 두께에 따라 간섭무늬의 주기가 변하는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 여기서 임의의 두께 0.42 mm, 0.52 mm, 0.62 mm, 그리고 0.72 mm 까지 적용하여 간섭무늬의 주기 변화를 관찰하였다.

실제 실험에서는 [그림 2.17]과 같이 폴리머 물질의 흡수, 빛의 산란에 의해 광의 세기가 줄어든다. 또한 폴리머 표면과 공기층에서 적은 양의 반사광이 다시 광섬유 코어로 재입사될 때 광학적 접촉 손실이 크게 발생한다. 이것 때문에 본 실험에서 제안한 광센서는 삽입손실이 크게 발생하는 단점을 가지고 있다.

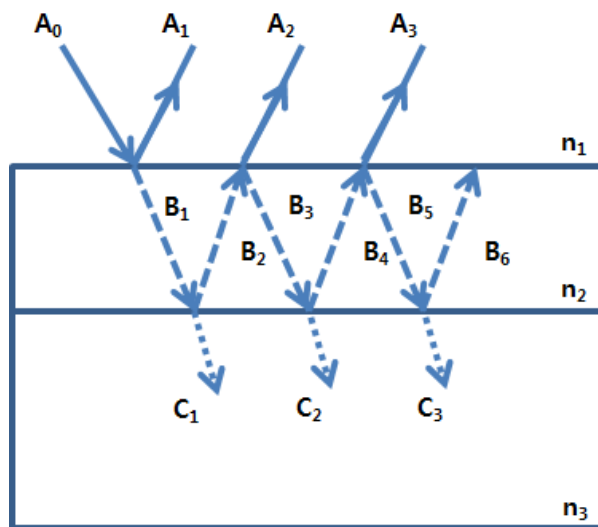


그림 2.13 박막코팅의 빛의 다중 반사^[37]

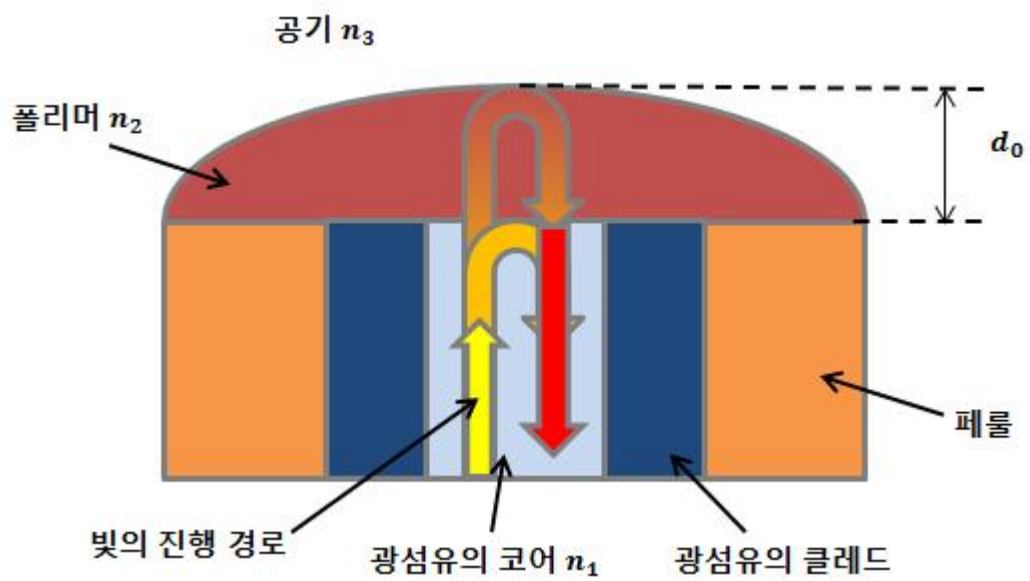


그림 2.14 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단 내부

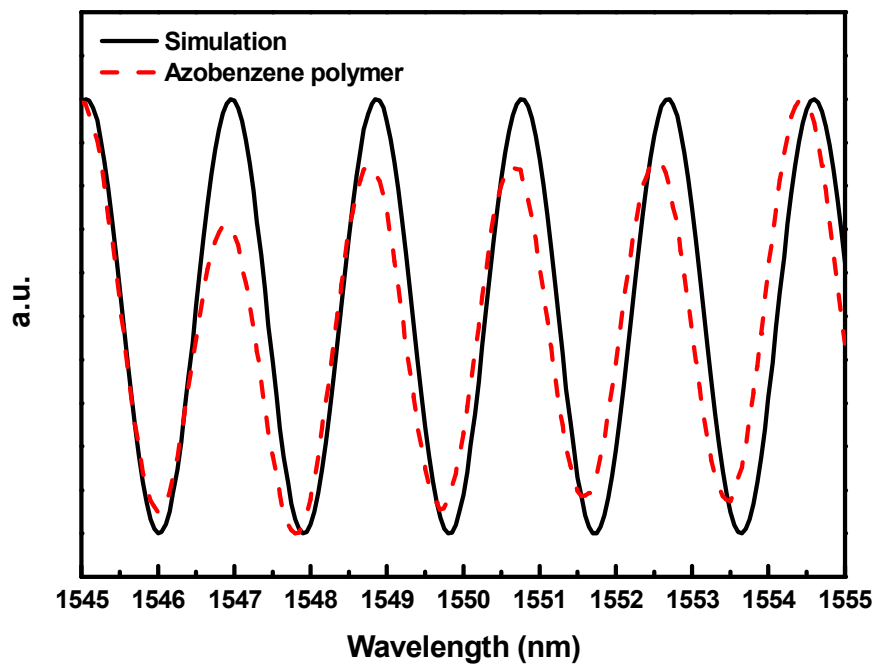


그림 2.15 이론의 프로그램을 이용한 시뮬레이션 결과와
 실험 결과 중 아조벤젠 폴리머에 의한 간섭무늬

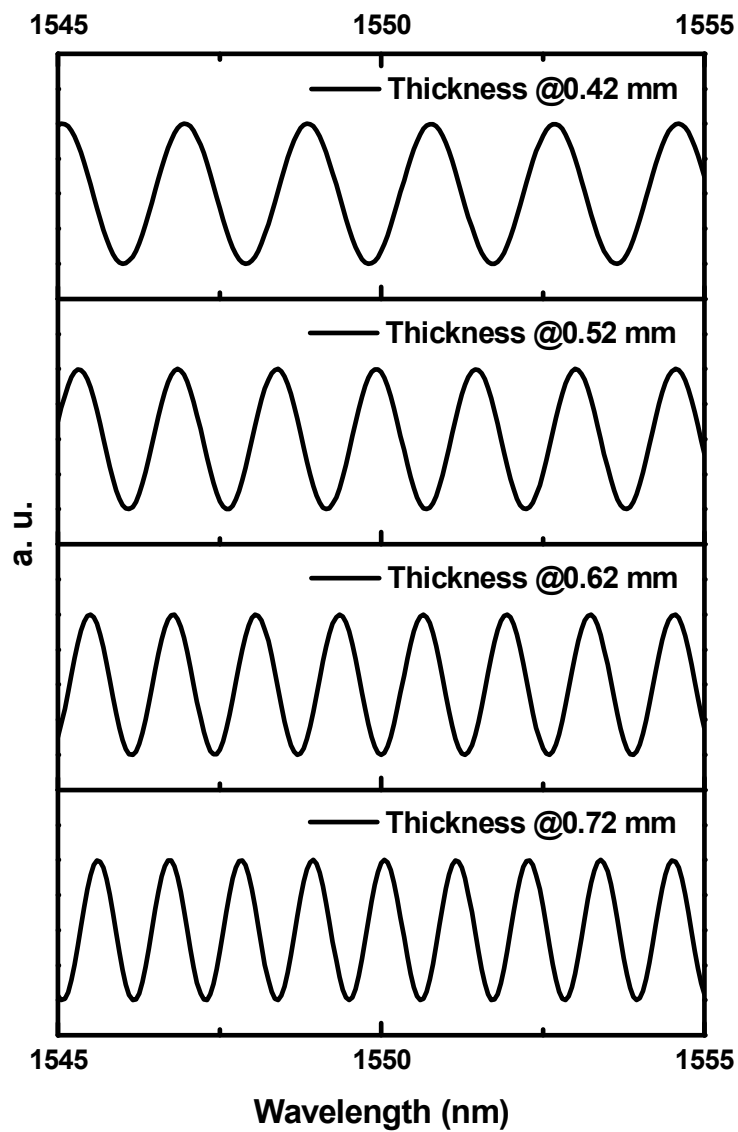


그림 2.16 두께에 따른 주기 변화 시뮬레이션 결과

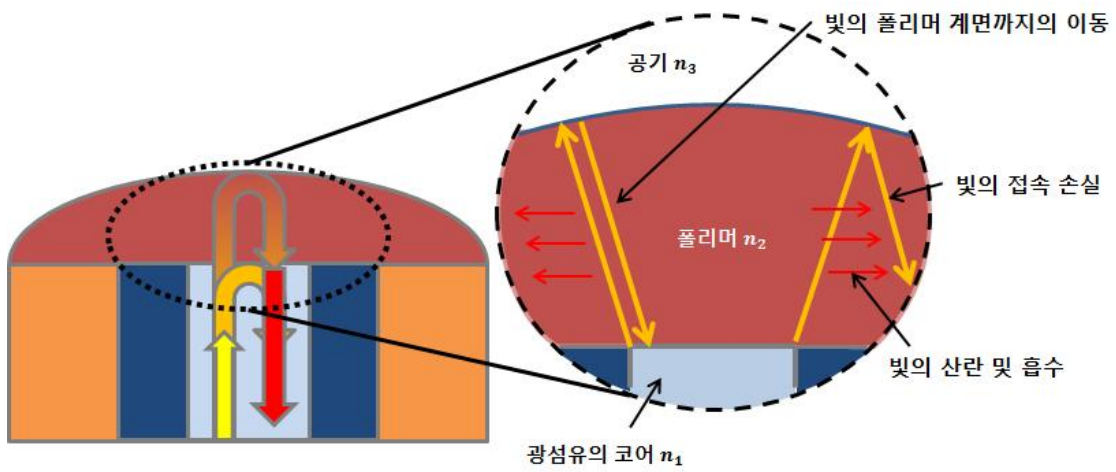


그림 2.17 폴리머 내부에서의 빛의 거동

제3장 실험 구성 및 결과

제1절 자외선 감지 실험

1. 폴리머에 의한 간섭무늬 생성과 자외선에 의한 변화

자외선 감지 실험의 구성도는 [그림 3.1]과 같다. 중심파장이 1550 nm이고 스펙트럼 폭이 70 nm 정도 갖는 광대역 광원(BBS)에서 나온 빛은 광 순환기(Optical circulator)를 지나 기능성 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단에서 반사된 광은 다시 광 순환기를 통과하여 광 스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer, OSA)에서 간섭무늬가 검출이 된다. 개발된 자외선 센서의 특성 시험을 위해 자외선 LED 광원(UV light-emitting diode)을 이용했다. 각 실험 기구의 사진과 사양은 [그림 3.2]-[그림 3.5]와 [표 3.1]-[표 3.4]에 나타내었다. 자외선 센서의 핵심 재료인 앞에서 언급했듯이 아조벤젠 화합물(4-(Dimethylamino)azobenzene-4'-sulfonyl chloride ($C_{14}H_{14}ClN_3O_2$ Sigma-Aldrich Inc.))과 광섬유 2차 코팅물질인 LS2211경화제를 각각 0.5 및 0.95 wt%만큼 혼합하고 1 시간 동안 교반하여 준비한다. 이렇게 준비된 액체 경화제를 광섬유가 깔끔하게 절단된 단면에 한방울 도포하고, 중심파장 365 nm, 출력 세기 1200 mW에 달하는 자외선 LED로 약 40 분간 노출시켜 충분히 경화한다. 아조벤젠이 포함된 액체 상태의 경화제를 얇은 주사 바늘 끝에 물방울처럼 맺히게 하여 수직으로 세워진 광섬유 끝단에 조금씩 떨어뜨려 액체의 표면장력을 이용해 페룰 끝단에 일정량 도포할 수 있었다. 그렇게 준비된 자외선에 반응하는 기능성 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단의 실제 사진은 [그림 3.6]에서 보여준다. 광섬유가 삽입되어져 있는 0.8 cm의 길이를 가지는 페룰(Ferrule)의 직경 2 mm 위에 코팅된 아조벤젠 폴리머의 두께를 현미경을 통해 관측한 결과 약 0.482 mm이다. 간섭무늬 사이 간격을 이용해 계산한 결과는 0.47 mm이었다. 이때, 계산된 굴절률은 1.36(1556.5 nm)이었다. 이 결과 두께의 오차가 많이 없다는 것을 확인하였다.

여기서 기능성 폴리머 코팅에 의해 발생하는 간섭무늬는 [그림 3.7]에서와 같이 만들

어진다. 코팅된 아조벤젠 폴리머는 자외선에 의해 *trans-cis*의 화학적인 변화를 일으켜 굴절률과 두께가 가역적으로 변하게 되고, 이런 변화를 관측하여 자외선을 감지하는 원리를 이용하였다. 따라서 제2장에서 서술한 다중 반사광의 간섭 이론을 이용해서 그 특성을 해석할 수 있다. 또한, 광대역 광원의 스펙트럼은 [그림 3.7]의 Source라는 범례로 나타내었고, 이것의 파장범위는 1520 nm에서 1580 nm이며 파워는 -10 dBm 정도이다. 아조벤젠에 의해 만들어진 간섭무늬의 세기 폭은 10 dB보다 작고, 한 주기의 파장 간격은 약 1.85 nm이다. 아조벤젠 폴리머가 코팅된 부분의 두께에 영향이 있으며, 두께가 두꺼워짐에 따라 주기가 감소한다. 광대역 광원의 출력에서 아조벤젠 폴리머에서 반사된 광세기는 약 30 dB 감소했는데 이는 아조벤젠 폴리머에서 빛의 흡수 및 산란, 각 계면의 반사율, 그리고 코어로 되돌아와서 재결합되는 광 결합 손실 (Coupling loss)로 인한 것이다. [그림 3.8]은 광섬유를 (1)절단한 면, (2)폐를만 있을 때, (3)아조벤젠 폴리머 코팅 전, (4)후에 대한 반사광의 세기 변화를 비교하였다. 코팅 전후는 반사광의 세기 변화는 없이 간섭무늬의 위상 변화만 발생했다.

우선 제작된 자외선 센서의 특성을 알아보기 위해 자외선 유무에 따른 간섭무늬 이동을 관찰하였다. 이 실험은 25 °C 상온에서 진행되었다. 자외선 광원에서부터 광섬유 끝단 코팅 된 폴리머까지 1 cm의 높이, 사용된 자외선 광원이 센서 영역에 닿는 세기 2.56 mW/cm^2 에 의한 간섭무늬의 변화를 관측하고 자외선 켜짐과 꺼짐 상태에 따라 [그림 3.9]에서 나타났다. 자외선이 존재할 때 평균적으로 약 0.82 nm만큼 장파장으로 이동하였다. 간섭무늬의 전체 관측 범위는 1545 nm에서 1555 nm로 약 4 주기 안에서 이루어졌다. 실험에서 간섭무늬 이동을 측정하는 지점은 1548 nm에서 1550 nm 사이의 범위이며, 간섭무늬의 높은 세기를 기준으로 측정하였다. 주 관측 지점뿐만 아니라 다른 간섭무늬 영역에서 이동량을 측정한 결과는 [그림 3.10]과 같고, 평균적인 약 $0.82 \text{ nm} \pm 0.2$ 의 변화량에서 크게 벗어나지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 실내 환경의 온도에 따라 초기 자외선 꺼짐 상태의 파장의 위치는 다르지만 상대적인 간섭무늬의 파장 변화량을 관측하여 온도와는 무관한 결과를 얻을 수 있다. 자외선 감지 센서의 온도에 관한 내용과 실험은 뒤에서 자세히 다루기로 한다.

아조벤젠 폴리머 코팅물질은 아조벤젠 화합물 파우더와 액체 상태의 광섬유 코팅제를 일정량 교반시켜 만든 경화제를 자외선 경화를 통해 광섬유 끝단에 코팅하게 된다. 여기서 아조벤젠 화합물이 포함되지 않은 광섬유 코팅제 자체적으로 자외선 광에 반응

하지 않을지 궁금해졌다. 이것을 확인하기 위해 광섬유 코팅제만을 코팅한 후 동일한 방법으로 자외선 민감도를 분석해봤다. 측정 파장범위가 200 nm에서 1100 nm인 분광기를 사용하여 아조벤젠 폴리머와 광섬유 코팅제의 흡수 스펙트럼을 측정하였고, 여기서 사용된 분광측정기의 사양과 사진을 [표 3.5]과 [그림 3.11]에 보여준다. 아조벤젠이 포함된 광섬유 코팅제의 흡수 스펙트럼은 [그림 3.12]에 보였고, 순수 광섬유 코팅제의 스펙트럼은 [그림 3.13]에 나타났다. 두 물질 모두에서 200 nm-300 nm의 자외선 영역에서의 흡수가 확인이 되었지만, 아조벤젠을 포함한 재료에서 조금 더 흡수가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 또한 아조벤젠 폴리머는 500 nm 파장을 중심으로 가우시안 형태의 흡수가 발생한다. 이는 오렌지 또는 빨간색으로 보이는데 영향을 주는 것으로 보인다. 결과적으로 본 실험에 사용된 자외선 센서에서 아조벤젠 물질이 포함된 기능성 폴리머를 사용하는데 그 이유는 [그림 3.14]에서 광섬유 코팅제만 사용한 경우 보다 약 1.6 nm 파장 변화가 높아지기 때문이다.

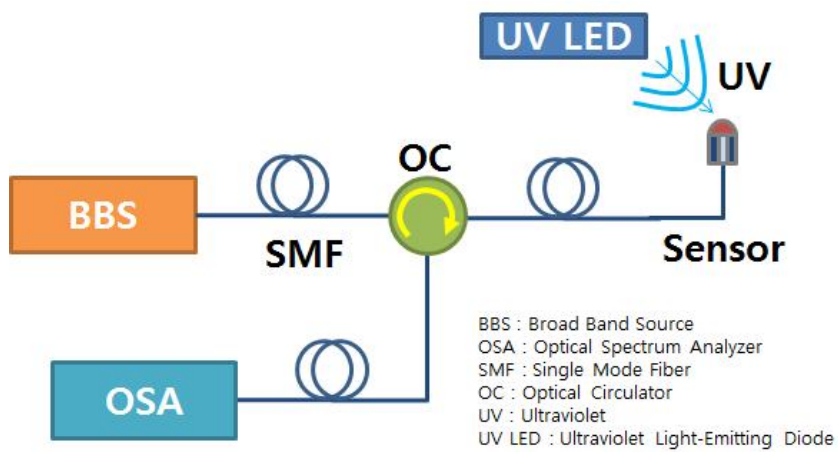


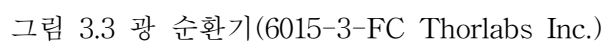
그림 3.1 자외선 감지 실험 구성



그림 3.2 광대역 광원(FLS-2300B EXPO Inc.)

Specifications	Value
Spectral density (dBm/nm)	≥ -8 from 1530 nm to 1600 nm ≥ -14 from 1525 nm to 1610 nm ≥ -25 from 1520 nm to 1615 nm
Total output power (dBm)	≥ 14
Spectral density stability (dB/nm)	± 0.03 (1520 nm to 1560 nm)
Total power stability (dB)	± 0.01 ($\Delta = 0.02$)

표 3.1 광대역 광원 장비 사양



Specifications	Value
Wavelength Range	1525 - 1610 nm
Insertion Loss	0.8 dB Typ, 1.0 dB Max
Isolation	>40 dB
Directivity (1→3)	>50 dB
Return Loss	≥50 dB
Max Optical Power	500 mW

표 3.2 광 순환기 장비 사양

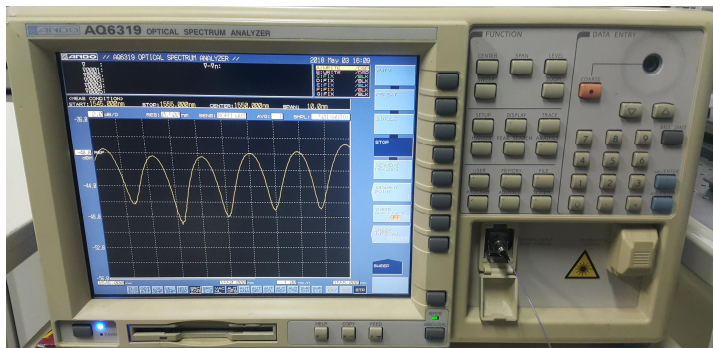


그림 3.4 광 스펙트럼 분석기(AQ6319 ANDO Inc.)

Specifications	Value
Measurement wavelength range	600 to 1750 nm
Wavelength accuracy	±0.02 nm (1520 to 1580 nm) ±0.04 nm (1580 to 1620 nm) ±0.05 nm (600 to 1750 nm)
Wavelength linearity	±0.01 nm (1520 to 1580 nm) ±0.02 nm (1580 to 1620 nm)
Wavelength reproducibility	±0.005 nm (for one minute)
Wavelength resolution	Maximum resolution : 0.015 nm
Resolution accuracy	±5% : (1300 to 1650 nm)
Measurement level range	-90 to +20 dBm (1200 to 1650 nm) -80 to +20 dBm (1000 to 1200 nm) -60 to +20 dBm (600 to 1000 nm)
Level accuracy	±0.3 dB (1310/1550 nm, input: -30 dBm)
Level linearity	±0.05 dB (input: +10 to -50 dBm)

표 3.3 광 스펙트럼 분석기 장비 사양

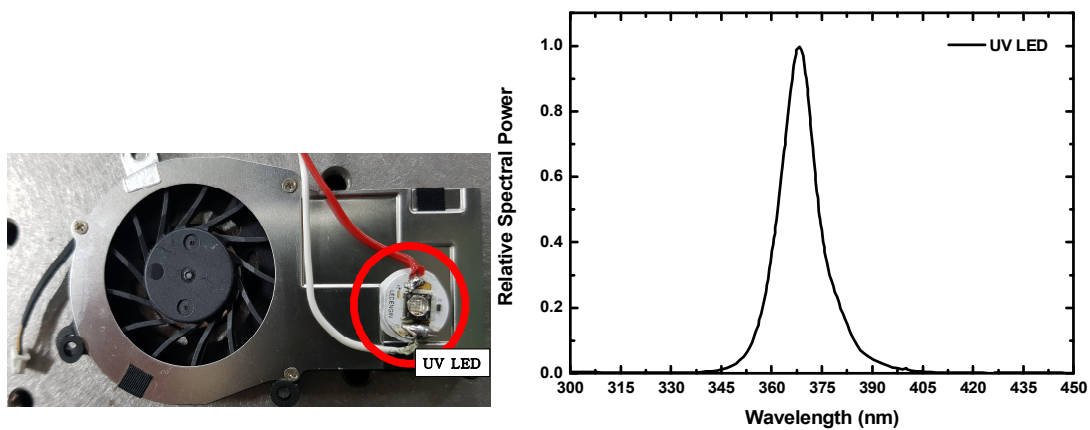


그림 3.5 자외선 광원(LZ1-00UV00 LED ENGIN Inc.)과 스펙트럼

Specifications	Value
Wavelength Range	350 - 400 nm
Center Wavelength	365 nm
DC Forward Current	1000 mA
Peak Pulsed Forward Current	1000 mA
Storage Temperature	-40 ~ ±150 °C

표 3.4 자외선 광원 장비 사양

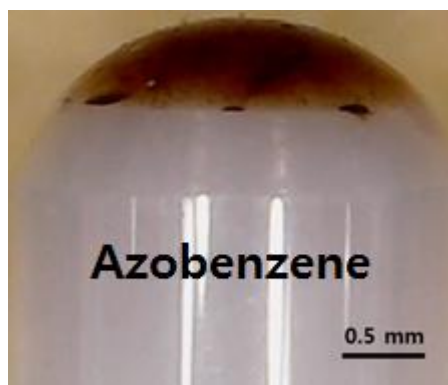


그림 3.6 아조벤젠 폴리머가 코팅되어진 광섬유 끝단

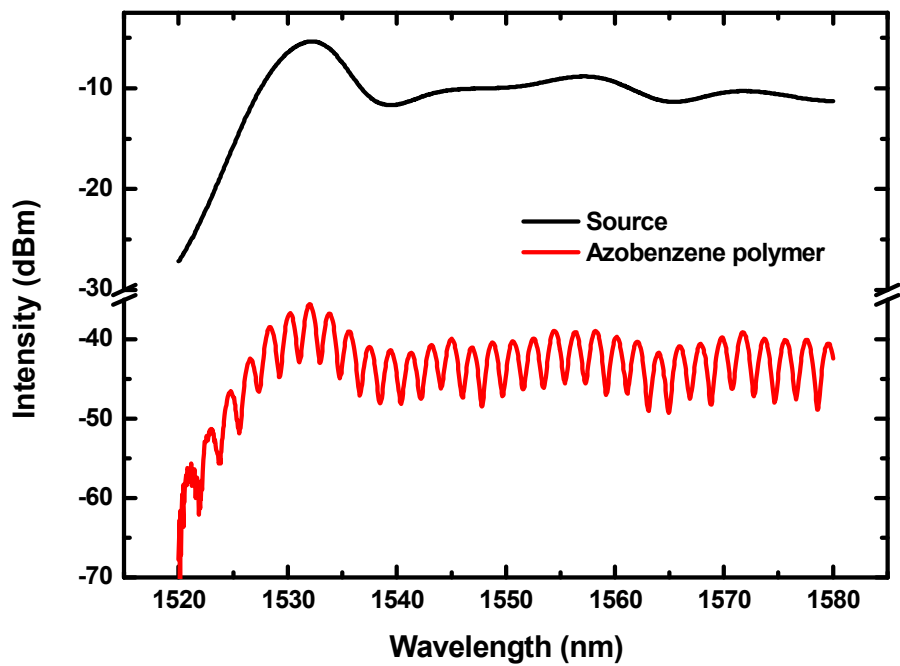


그림 3.7 광대역 광원의 스펙트럼과 Azobenzene 폴리머에 의한 간섭무늬

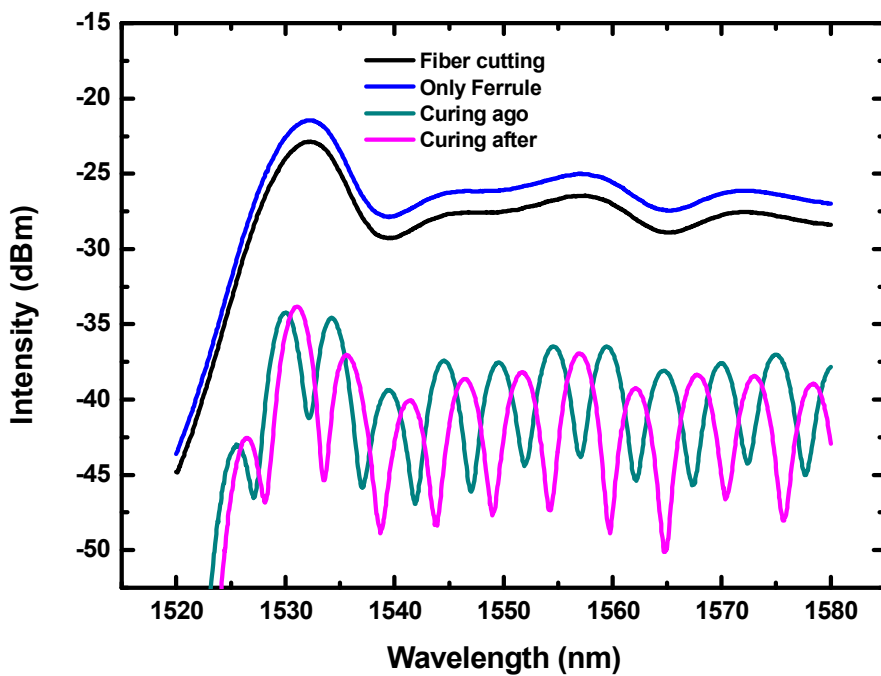


그림 3.8 센서 공정 과정 중의 빛의 손실 그래프

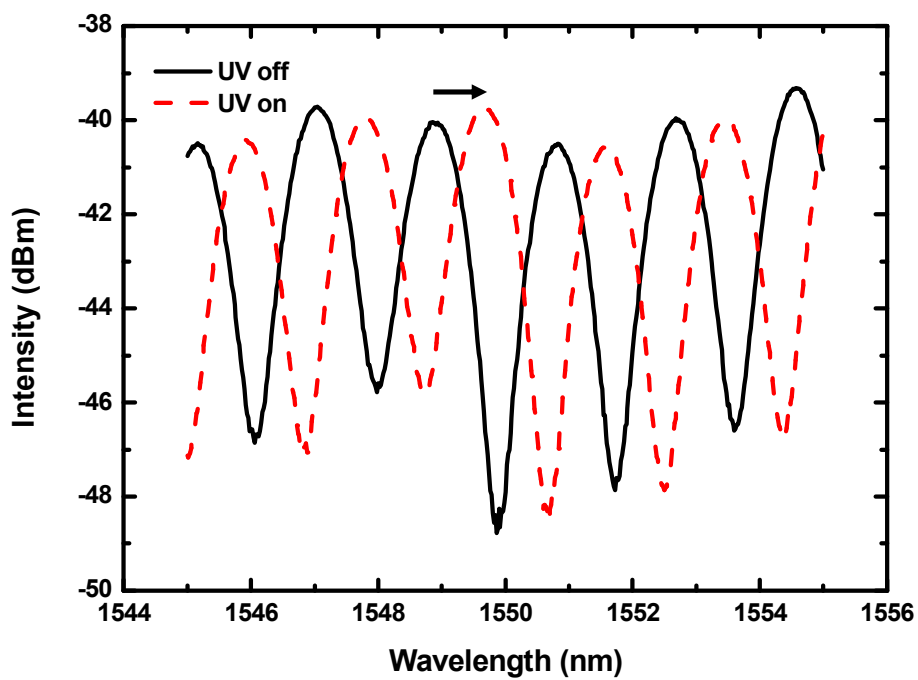


그림 3.9 자외선 on/off에 따른 간섭무늬의 이동

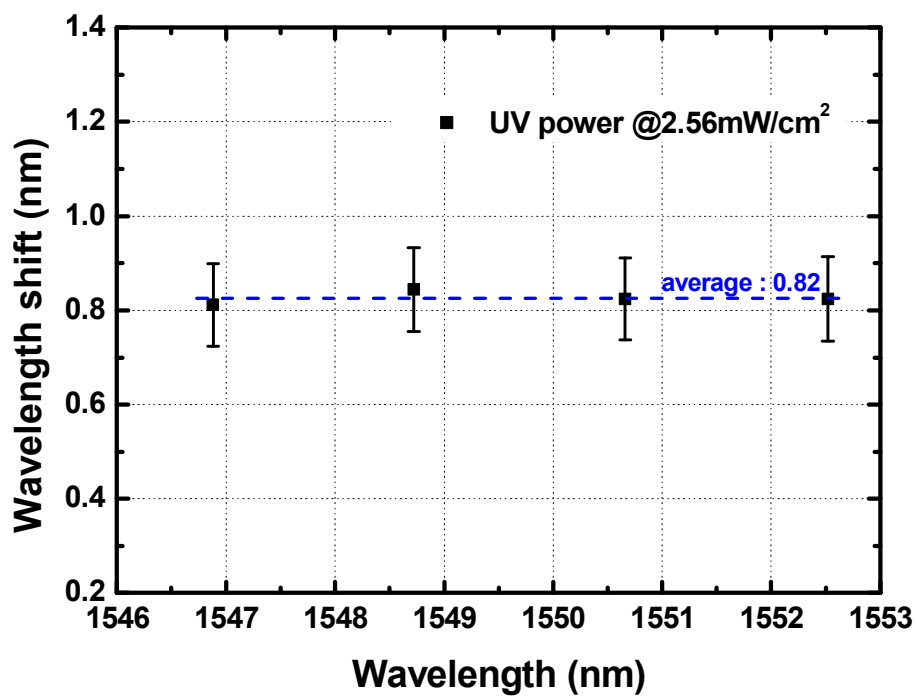


그림 3.10 다른 파장에서의 간섭무늬 변화량 비교

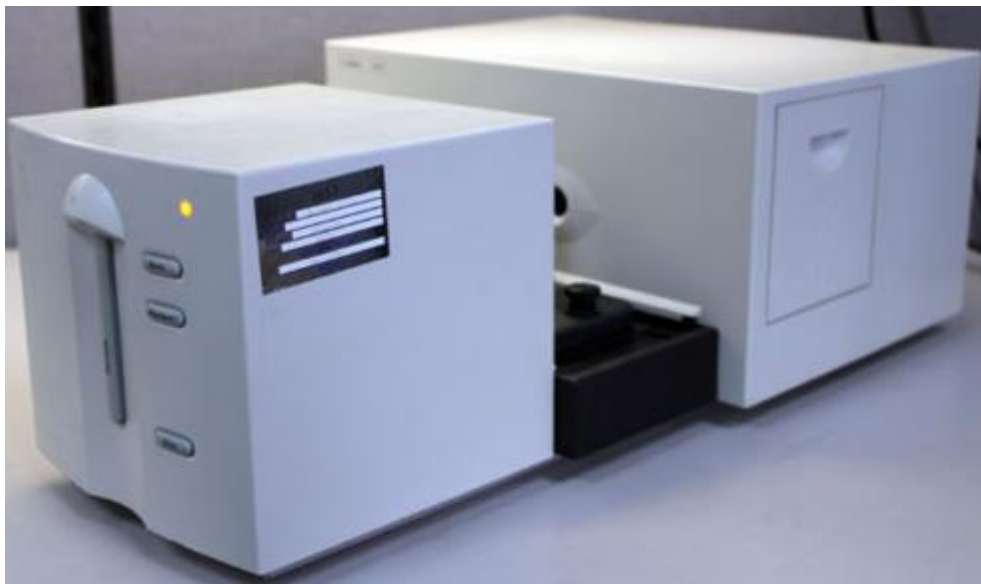


그림 3.11 UV-Vis-Spectrophotometer(8453 UV-visible Spectroscopy Agilent Inc.)^[38]

Specifications	Value
Measurement Range	200 nm to 1100 nm
Wavelength Accuracy	$< \pm 0.5 \text{ nm}$
Wavelength Reproducibility	$< \pm 0.02 \text{ nm}$
Photometric Accuracy	$\pm 0.005 \text{ AU}$

표 3.5 UV-Vis-Spectrophotometer의 사양

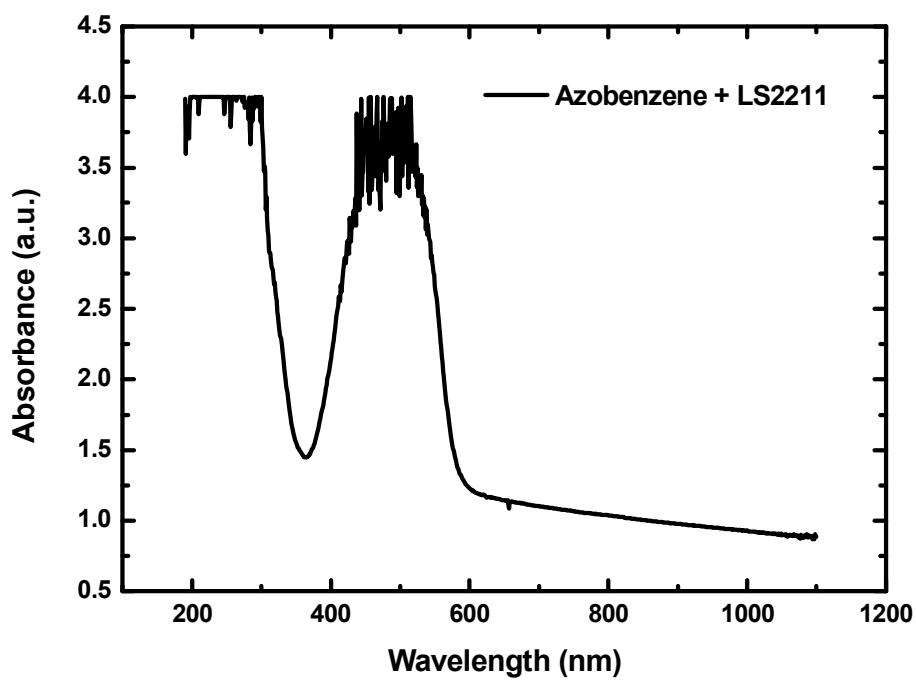


그림 3.12 아조벤젠과 광섬유 코팅제를 교반한 폴리머의 흡수율 측정 결과

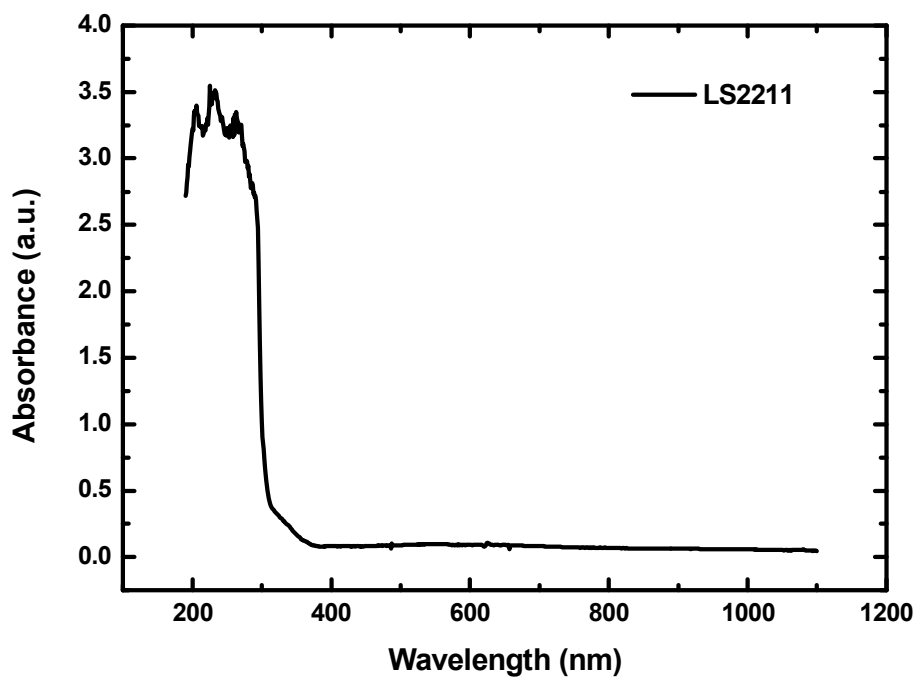


그림 3.13 광섬유 코팅제의 흡수율 측정 결과

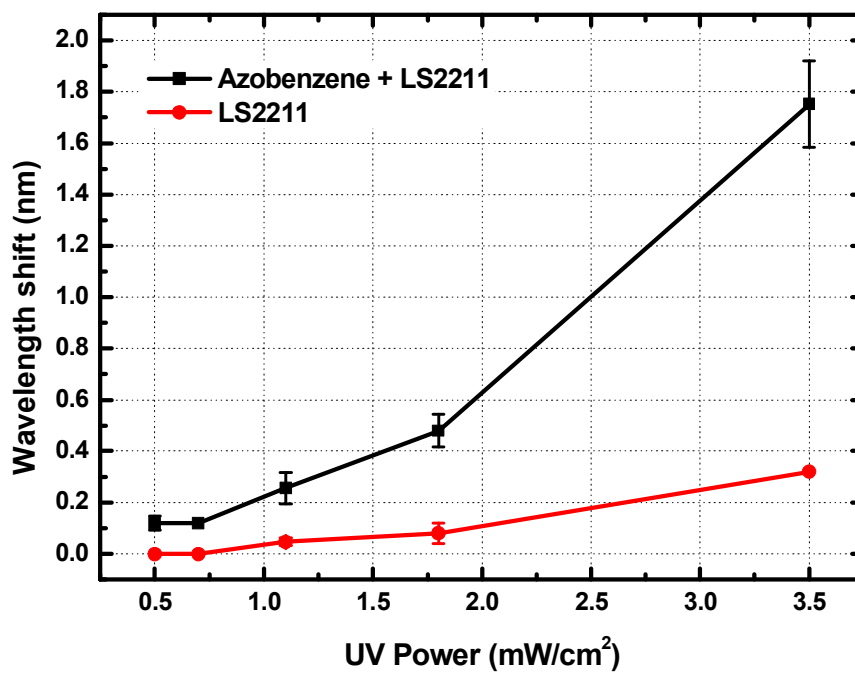


그림 3.14 아조벤젠과 광섬유 코팅제를 교반한 폴리머와 순 광섬유 코팅제의 자외선 검출 비교

2. 감지 범위에서의 자외선 세기와 간섭무늬 변화 결과

이번 실험은 25 °C 상온에서 자외선 광원에서부터 코팅된 아조벤젠 폴리머가 있는 광섬유 끝단까지 기존 설정된 감지 범위 높이인 1, 2, …, 5 cm에서 자외선 광세기와 자외선 세기에 따른 간섭무늬의 파장 변화를 확인하는 것이다.

[그림 3.15(a)]는 자외선 LED 광원의 높이를 1 cm에서 5 cm까지 변화시키면서 자외선 광세기를 [표 3.6]의 사양을 갖는 [그림 3.16]의 장비를 통해 검출한 결과를 보여준다. 검출 결과 1 cm의 높이에서 2.56 mW/cm^2 의 세기를 시작으로 5 cm의 높이의 세기 약 0.5 mW/cm^2 까지 높이가 높아짐에 따라 자외선 광세기는 감소하는 것을 확인하였다. [그림 3.15(b)]는 앞서 설정된 높이에 따른 자외선 세기로 자외선 센서에 입사시킬 때 간섭무늬의 파장 변화량을 측정하는 것이다. 가장 큰 광세기인 2.56 mW/cm^2 일 때 파장 변화는 약 0.8 nm였고, 세기가 감소함에 따라 간섭무늬 변화량도 점차 감소하는 것을 확인하였다. 가장 작은 세기인 0.5 mW/cm^2 에서 간섭무늬 변화량이 0.1 nm까지 감소하였다.

초기 감지 범위 내에서 간섭무늬의 변화 정도가 있는 것을 확인하였고, 신뢰성과 재현성을 확인하기 위해 다시 페룰 끝단에 아조벤젠 폴리머를 코팅한 뒤 자외선 광원의 세기에 따라 파장의 변화를 10 회 반복 측정하였다. 그 결과는 [그림 3.17]에서 확인하였다. 10회 반복 측정의 평균값을 기준으로 표준편차를 이용하여 측정 데이터를 그래프로 나타내었고, 3.5 mW/cm^2 , 1.8 mW/cm^2 , 1.1 mW/cm^2 , 0.7 mW/cm^2 , 0.5 mW/cm^2 에서 각각 평균 1.752 nm, 0.48 nm, 0.256 nm, 0.12 nm, 0.12 nm만큼 파장의 변화를 관측했다. 이런 $P-\Delta\lambda$ 특성 곡선을 이용하여 외부에서 조사(irradiation)되는 자외선을 감지할 뿐만 아니라, 파장 변화량으로부터 자외선 광세기를 측정할 수 있다. 그러나 0.7 mW/cm^2 보다 작은 자외선의 세기는 측정이 어려운 것을 [그림 3.17]에서 확인할 수 있다. 이는 조사되는 자외선을 렌즈를 이용하여 집광시키거나 민감도가 높은 아조벤젠 재료를 개발하는 등 자외선 민감도를 높이기 위한 추가적인 연구가 필요한 것을 알 수 있다.

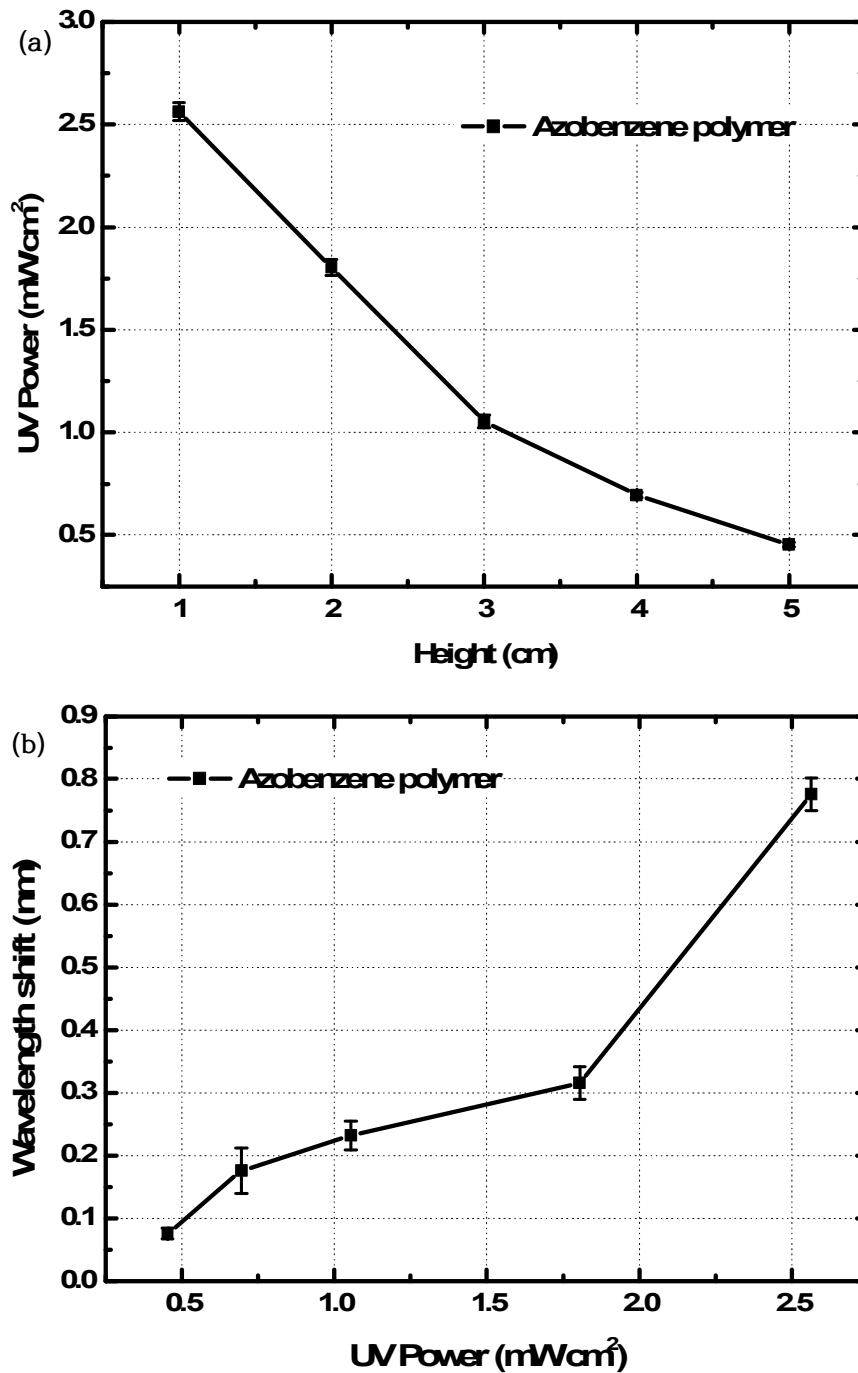


그림 3.15 (a) 높이에 따른 자외선 세기, (b) 자외선 세기에 따른 파장 이동



그림 3.16 자외선 검출기

Specifications	Value
Wavelength Range	320 nm to 390 nm
Peak Wavelength	350 nm
Intensity Measurement Range	0 mW/cm ² to 50 mW/cm ²

표 3.6 자외선 검출기 사양

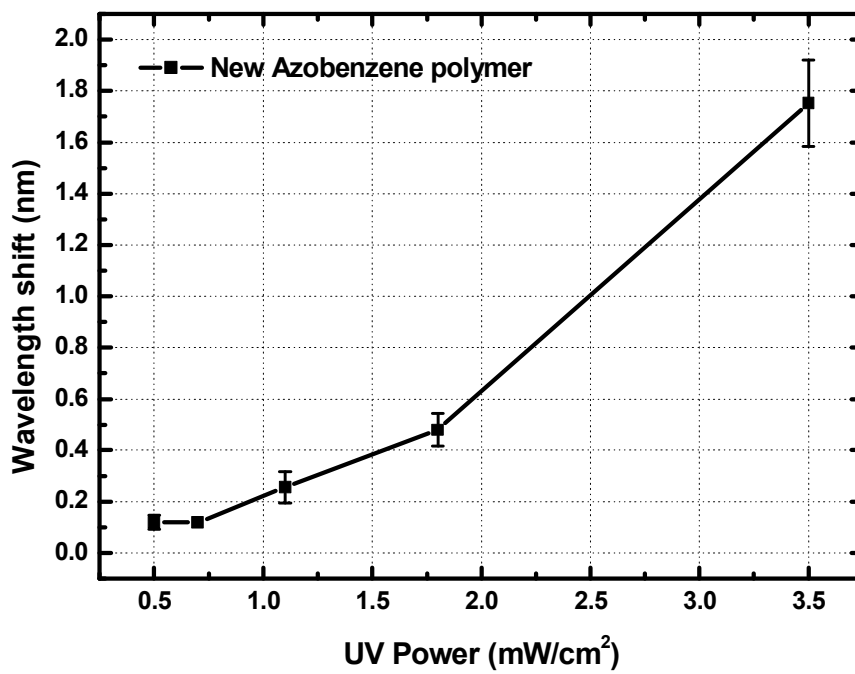


그림 3.17 새로이 제작된 센서의 자외선 세기에 따른 파장 변화

3. 자외선과 가시광선 영역에서의 비교

제작된 자외선 센서가 자외선에 의해서만 작동이 되는지 확인하는 것이 중요한데, 이것이 실제 산업현장에서 쓰이기 위해서는 작업현장에서 발생하는 일반적인 가시광선에 오작동이 발생하지 말아야 한다. 이를 알아보기 위해 앞에서 개발된 자외선 센서의 가시광에 대한 민감도를 확인하는 실험을 진행하였다. 실험 장치는 [그림 3.18]과 같이 구성되고, 앞에서 실험 장치를 그대로 이용하고 자외선 LED 대신에 가시광을 포함한 1000 nm 중심파장을 가진 빛을 방출하는 광대역 광원(SLS201L, Thorlabs Inc.)을 사용하여 이 자외선 센서의 가시광 민감도를 확인하였다. 이 광대역 광원의 사진과 사양은 [그림 3.19]와 [표 3.7]에 나타냈다. 고출력의 할로겐램프에서 약 9 W가 출력되지만, 광섬유를 통해서 출력되는 파워는 약 10 mW이다.

[그림 3.20] 결과에서 360 nm에서 2600 nm의 파장을 갖는 새로운 광대역 광원을 아조벤젠이 코팅되어진 폐를 끝단 쪽으로 조사한 결과 다중 반사광의 간섭무늬가 변화하지 않는 것을 확인하였다. OSA의 분해능을 높여서 다시 확인한 결과는 실선부분의 광대역광원의 꺼짐 상태와 점선 부분의 광대역광원의 켜짐 상태가 상당히 일치하는 것으로 보아 가시광선 파장 이상의 빛이 입사할 경우는 이 자외선 센서는 동작하지 않는 것을 확인했다. 이 결과는 일반적인 가시광영역대의 광원에서의 작동하지 않고 오직 자외선에 의해서만 이 자외선 센서가 작동한다는 것을 보여준다.

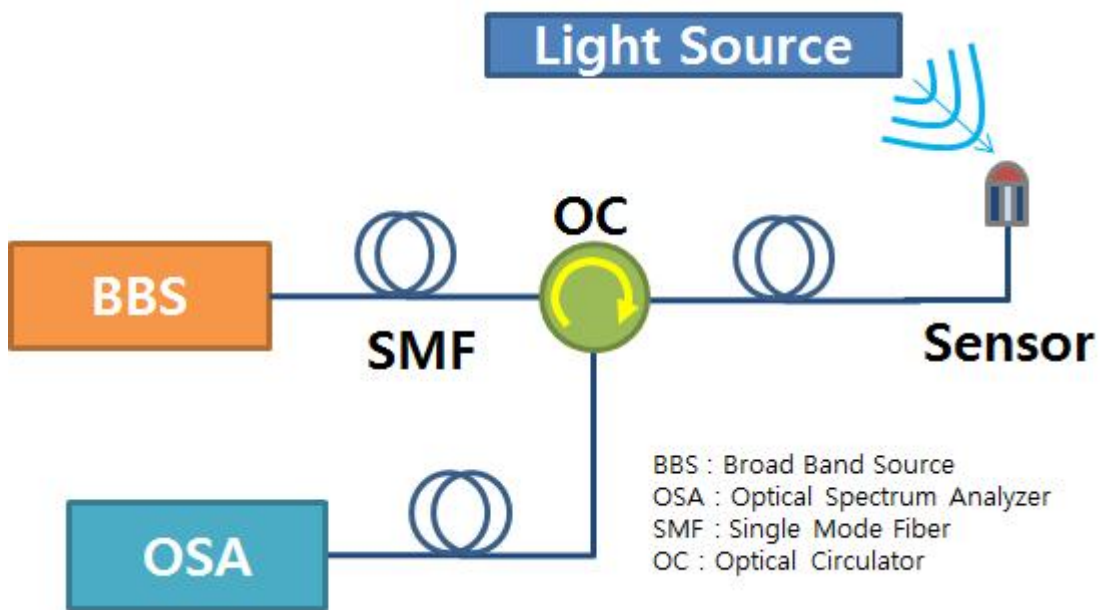


그림 3.18 가시광선에서 간섭무늬 변화량 측정을 위한 실험구성

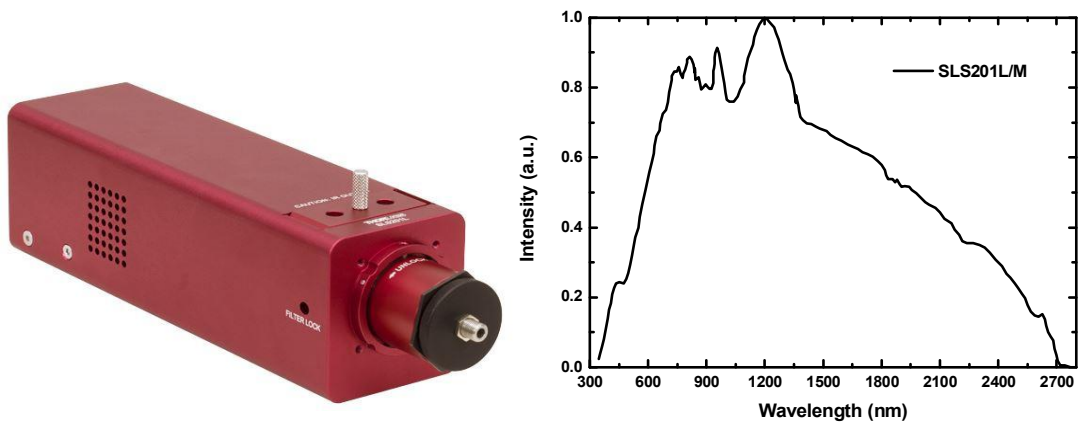


그림 3.19 (좌)새로운 광대역 광원(SLS201L Thorlabs Inc.)과 (우)스펙트럼

Specifications	Value
Wavelength Range	360 nm to 2600 nm
Peak Wavelength	1000 nm
Color Temperature	2796 K
Color Temperature Stability	± 15 K
Bulb Power	9 W
Fiber Coupled Output Power	10 mW
Beam Divergence with Fiber Coupler Removed	8.2 °

표 3.7 새로운 광대역 광원의 사양

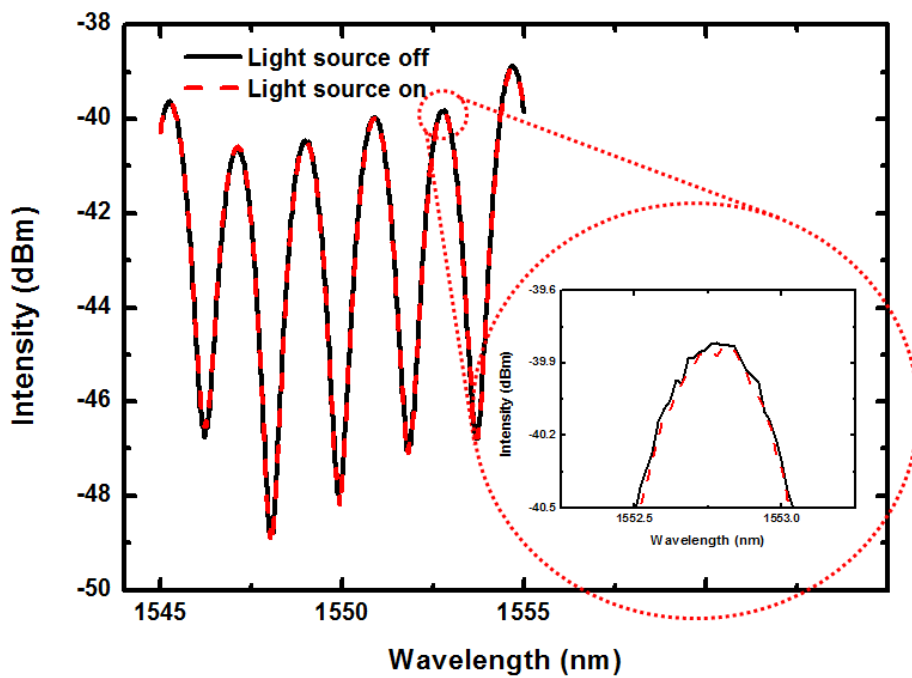


그림 3.20 가시광선에서의 간섭무늬 파장 변화량 그래프

4. 자외선 노출 시간에 따른 반응성 측정 실험

이번 실험은 순간적인 자외선의 방출에 얼마나 빠르게 반응 하는지 확인하기 위한 것이다. [그림 3.21]은 1540 nm 중심파장을 가진 레이저 다이오드(Laser diode, LD)와 이 LD에 안정적인 전류를 공급하는 LD 조절기(LD controller)를 보여준다. [그림 3.22]은 전자 개폐식 셔터(Shutter) 장치의 사진이다. LD와 셔터의 사양은 [표 3.8]와 [표 3.9]에 보였다. 준비된 실험 장치들로 구성된 실험의 모식도는 [그림 3.23]과 같다. 자외선 광원과 아조벤젠 폴리머 사이에 셔터를 삽입하여 프로그램 가능한 전기 신호를 설정하여 셔터를 제어하였다.

실험은 크게 3가지를 진행하였다. 첫 번째 실험은 충분한 시간 동안 셔터를 열고 자외선을 조사하여 광 검출기와 오실로스코프로 검출된 전기 신호의 상승시간(Rising time)을 측정하였다. 이어서 셔터를 닫고 이 신호의 하강시간(Falling time)을 측정하였다. 이 결과는 [그림 3.24(a)]에 보여준다. 상승시간은 10 초 정도까지 급격한 증가 후 천천히 증가를 하였으며, 하강시간의 경우도 10 초가량 빠르게 감소한 후 천천히 감소하여 안정기에 접어들었다. 이는 자외선에 의한 아조벤젠의 화학적 반응의 충분한 시간이 필요하다는 것의 증거이다. 두 번째 실험으로 1 초 동안 셔터를 개폐와 차폐를 10 회를 반복하였고, 그 결과는 [그림 3.24(b)]와 같다. 자외선을 반복 조사한 결과를 보면 연속적으로 짧은 시간 조사되어도 상승시간 동안 자외선에 반응하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 파장의 상대적인 변화를 감지하면 느린 자외선 반응속도에도 고속의 자외선 센서로 사용 가능함을 알 수 있다. 마지막으로 셔터의 개폐 시간을 다르게 하여 실험을 진행했는데, 여기서 설정된 개폐 시간은 0.02 초, 0.05 초, 0.1 초, 0.5 초, 1 초 등으로 나눠 실험했다. 그 결과는 [그림 3.24(c)]에서 볼 수 있다. 순간적인 자외선의 검출은 0.1 초까지 전기적 신호로 검출을 할 수 있으며, 그 이하에서는 신호 잡음으로 인하여 검출이 어렵다. 이것을 해결하기 민감도가 높은 검출기를 사용하거나 검출기 직전에 광증폭기를 사용해 민감도를 향상시키는 방법이 있다.



그림 3.21 실험에 사용되어진 레이저 다이오드(SFL1550S Thorlabs Inc.)와 레이저 다이오드 조절기(ITC4005 Thorlabs Inc.)

	Specifications	Value
Laser Diode controller	Input Level	TTL or CMOS, voltage-tolerant to max 24 V
	Output Level	TTL or 5 V CMOS, 2 mA max
Laser Diode	Center Wavelength	Min : 1549.5 nm, Typical : 1550 nm, Max : 1550.5 nm
	Operating Current	300 mA
	Optical Power	Min : 25 mW, Typical : 40 mW
	Linewidth	Typical : 50 kHz, Max : 100 kHz

표 3.8 레이저 다이오드 조절기와 레이저 다이오드 사양

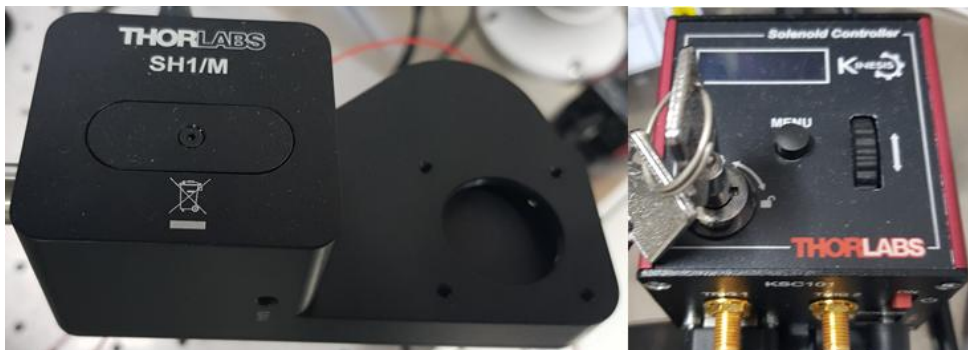


그림 3.22 셔터(SH1/M Thorlabs Inc.)와 셔터 조절기(KSC101 Thorlabs Inc.)

Specifications	Value
Maximum Exposure Rate	20 Hz
Minimum Exposure Time	15 ms
Typical Transfer Time	1.5 ms
Accuracy	0.3 ms (at 15 ms exposure)
On/Off Times	10 ms to 1000 s
Maximum steady state power	3.5 W
Voltage Output	TTL

표 3.9 셔터와 셔터 조절기 사양

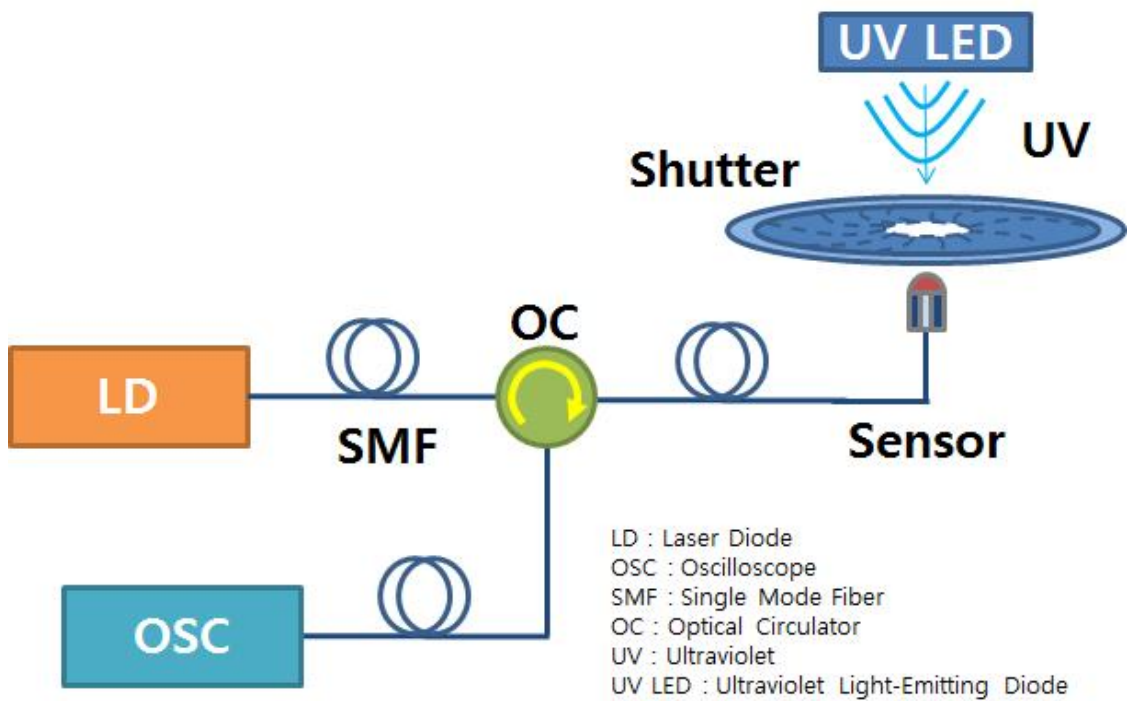


그림 3.23 셔터를 적용한 실험 구성

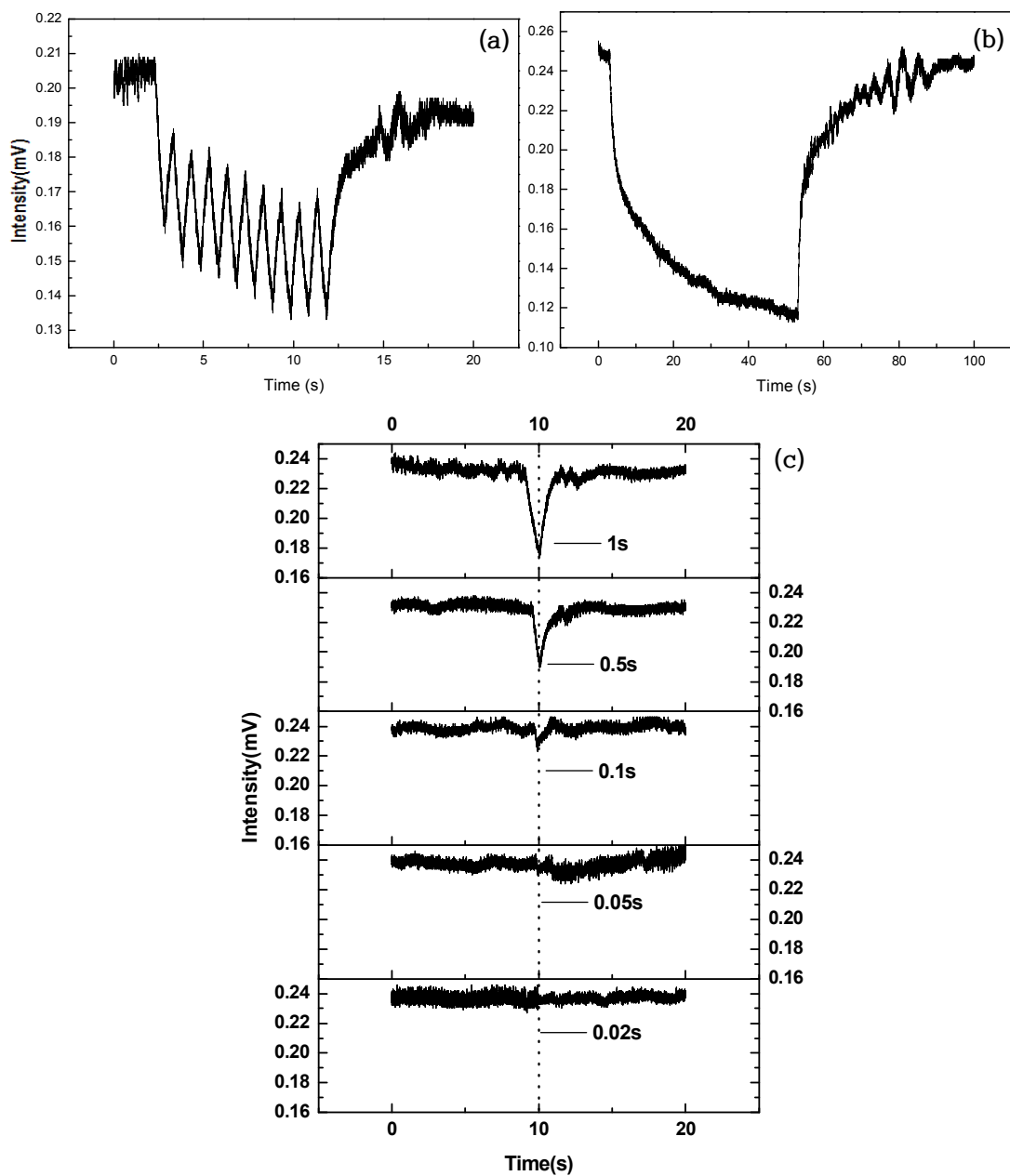


그림 3.24 (a) 충분한 자외선 노출, (b) 1초 간격의 자외선 노출, (c) 시간에 따른 센서의 세기

5. 온도에 따른 민감도 유지 실험 구성 및 결과

[그림 2.11]에서 나타내어져있는 바와 같이 아조벤젠의 화학적 변화 특성상 cis-아조벤젠 형상에서 trans-아조벤젠으로의 형태변화에서 온도에 의한 영향인 ΔT 를 무시할 수는 없다. 본 실험은 자외선 센서의 주변 온도에 따른 자외선에 의한 파장 변화량을 측정하여 개발된 센서의 온도 영향을 확인하는 것이다. 이 실험의 장치 구성은 [그림 3.1]에서 소개한 실험 구성과 동일하다. 다른 점은 기존에 자외선 광원으로 LED를 사용하는 대신 여기서는 광섬유 프로브가 연결되어 있어 자외선 광을 원하는 지점에 유연하게 조사할 수 있는 자외선 광원을 사용했으며, 그 사진과 사양은 [그림 3.25]와 [표 3.10]에 보였다. 개발된 자외선 센서를 [그림 3.26]와 같은 오븐 안에 설치하고 원하는 온도에서 그 특성을 측정할 수 있도록 하였다. [표 3.11]은 사용된 오븐의 사양이다. 오븐에 현재 온도가 표시되지만 자외선 센서 인접한 부분의 온도를 정확히 측정하기 위해 [그림 3.27]과 같은 온도계를 센서 위치에 설치하여 실시간 온도를 측정하였다. [표 3.12]는 사용된 온도계의 사양이다. 자외선 광원의 프로브를 오븐 안에 넣어 이 센서에 자외선을 노출시킬 수 있도록 하였다. 이 실험에서는 34 °C와 44 °C로 각각 온도를 유지하고 자외선을 조사하여 간섭무늬의 파장 변화량을 측정하였다. 자외선 유무에 따른 간섭무늬의 파장 변화량이 34 °C에서는 [그림 3.28(a)]에 나타났고, 44 °C에서는 [그림 3.28(b)]와 같이 나타냈다. 이를 비교하기 위해 [그림 3.29]에서 서로 다른 온도에서 파장 변화량을 정리하였다. 이 실험의 값은 신뢰성을 증명하기 위해 34 °C와 44 °C에서 3 회 반복실험을 실행한 결과이며 평균값을 기준으로 표준편차를 포함하고 있다. 이렇게 측정된 값은 약 34 °C에서 측정한 간섭무늬의 파장 변화량 상대 값보다 44 °C에서 측정한 간섭무늬의 파장 변화량 상대 값이 약 0.5 nm 정도 높은 것으로 확인하였다. 자외선 검출하는데 있어서 아조벤젠의 화학적인 변화에 비하여 온도에 의한 작용이 매우 작기 때문에 온도에 따라서 자외선을 검출할 때, 파장 변화량이 완전히 똑같지는 않더라도 거의 같다 보기 때문에 온도의 미미한 작용은 전체적인 결과 분석에서 제외하였다.



그림 3.25 새로운 자외선 광원(Acticure EFOS Inc.)

Specifications	Value
Wavelength Range	250 nm to 450 nm
Lamp Voltage	+ 22.0 V at 4.5 A typical
Output Power	100 W
Ripple Current to Lamp	< 1%

표 3.10 새로운 자외선 광원의 사양



그림 3.26 오븐(ON-01E, Lab.Companion Inc.)

Specifications	Value
Range	ambient temperature + 15 to 220 °C
Variation at 100 °C	6.5 °C
Heating time to 100 °C	12 min
Recovery time at 100 °C	4 min

표 3.11 오븐의 사양



그림 3.27 온도계(305 Thermometer, CENTER Inc.)

Specifications	Value
Range	- 200 to 1370 °C
Accuracy	± 0.3% + 1 °C
Resolution	0.1 °C

표 3.12 온도계 사양

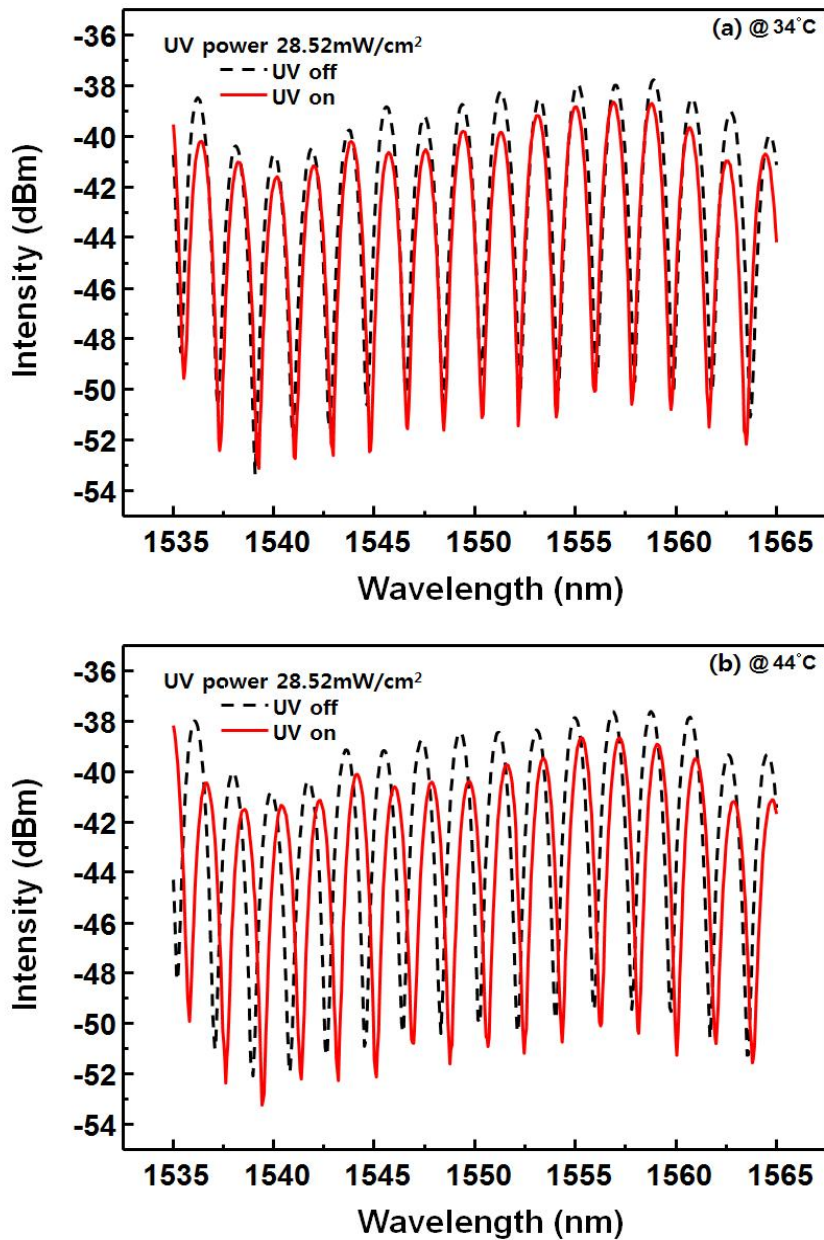


그림 3.28 (a) 34 °C 온도에서의 자외선 유무에 따른 간섭무늬 변화, (b) 44 °C 온도에서의 자외선 유무에 따른 간섭무늬 변화

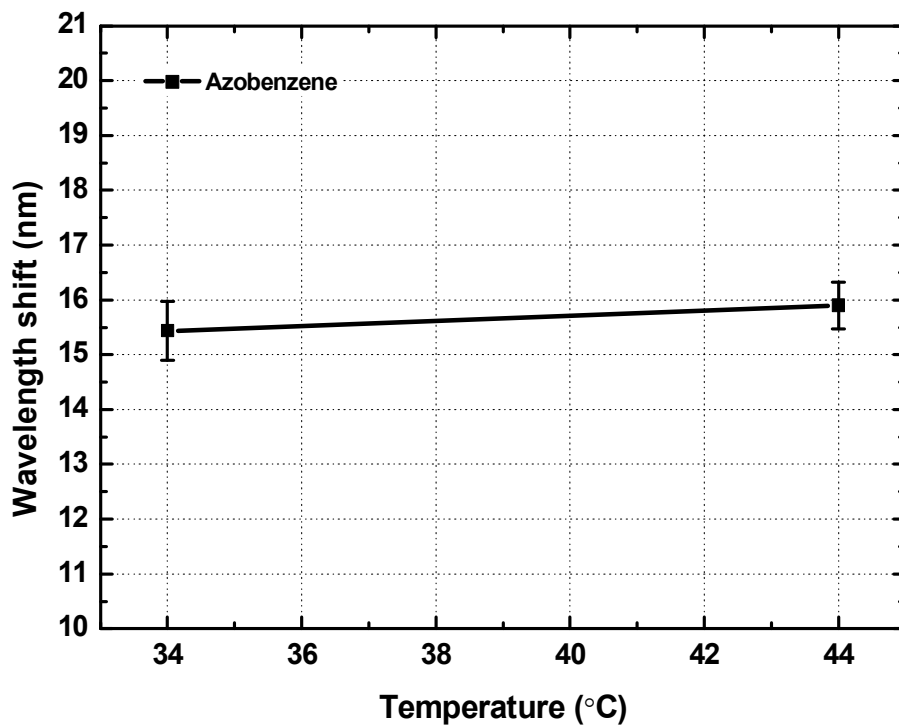


그림 3.29 다른 온도에서 자외선 유무에 따른 파장 변화량

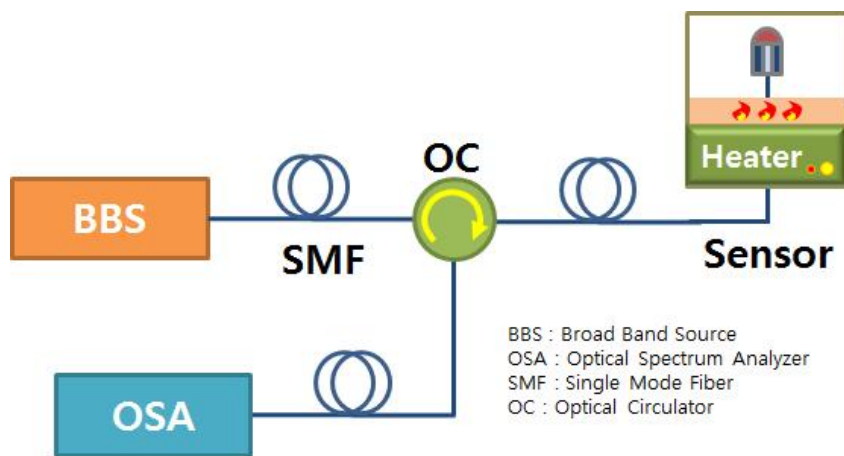


그림 3.30 온도 측정 실험 구성

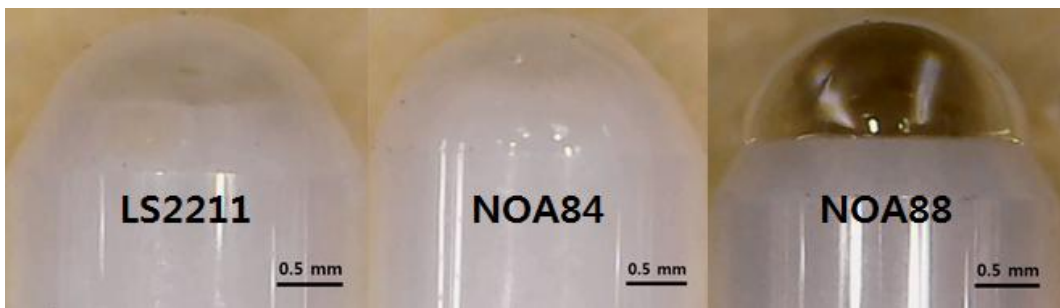


그림 3.31 폴리머가 코팅된 광섬유 끝단(왼쪽부터 LS2211, NOA84, NOA88)

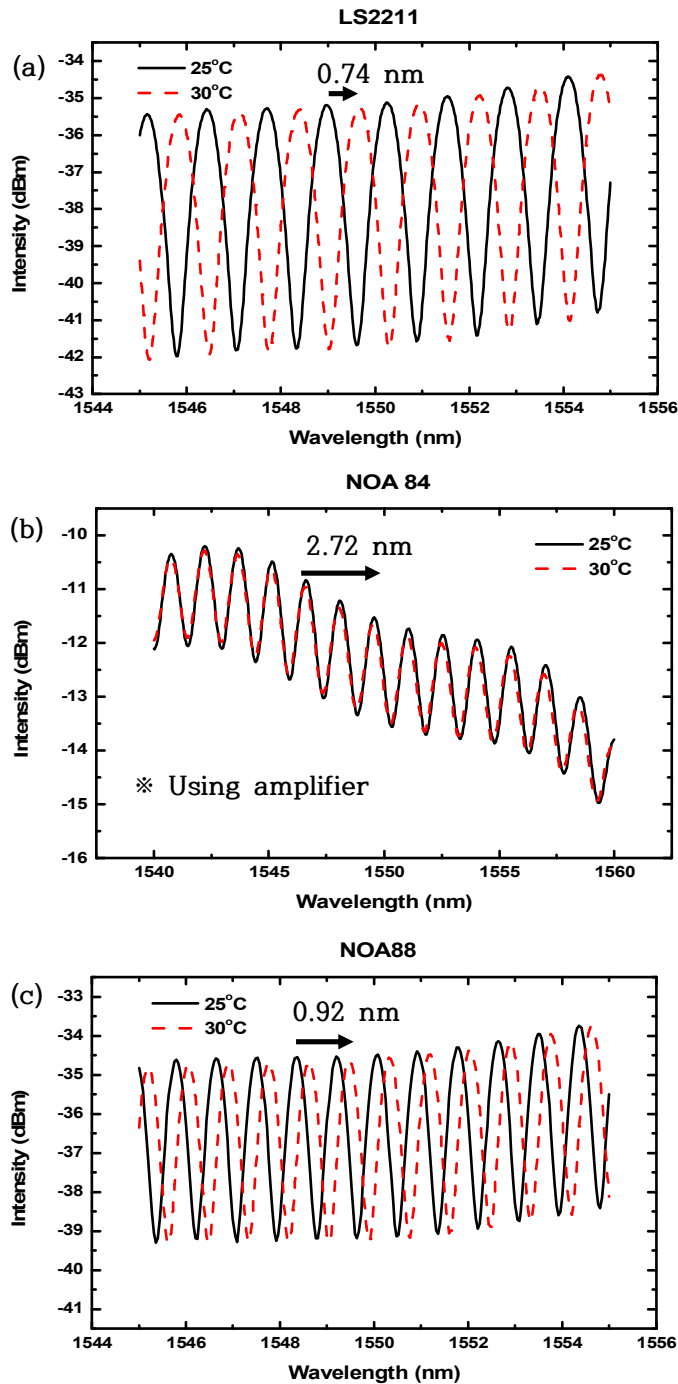


그림 3.32 25 °C와 30 °C에서의 간섭무늬 생성 (a) LS2211, (b) NOA84, (c) NOA88

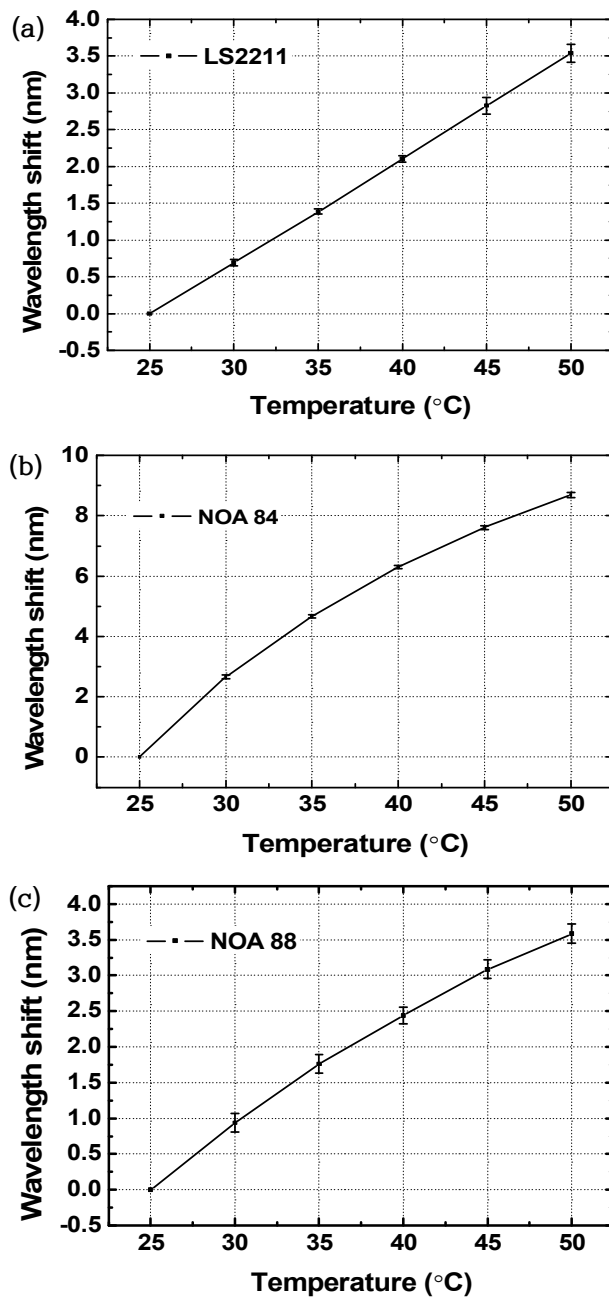


그림 3.33 5 회 반복 측정에 따른 온도에 의한 파장 이동량 (a) LS2211, (b) NOA84, (c) NOA88

2. FBG의 온도에 따른 중심 파장 이동

기존 광섬유 격자(Fiber Bragg grating, FBG) 기반 온도 센서의 경우 많은 연구가 진행되었고 실제 산업에 적용되어 다양한 분야에서 활용되고 있다. 개발된 폴리머 코팅된 광섬유 기반 온도 센서의 성능을 비교하기 위해 FBG의 온도에 따른 파장 변화량을 측정하였다. 이 실험구성은 [그림 3.34]과 같다. 여기서 사용되어진 오븐은 [그림 3.26]와 같고 정확한 온도 측정을 위해 앞에서 사용한 정밀 온도계를 사용하였다.

위 폴리머 실험과 동일한 조건인 상온에서 오븐의 내부 온도를 25 °C에서 5 °C씩 증가시켜 50 °C까지 측정하여 확인하였다. 기존의 많은 데이터와 비슷하게 나오는 것을 확인한 뒤 보유하고 있는 FBG의 반복성 실험을 하였다. 그 결과는 [그림 3.35]에서 확인할 수 있다. FBG의 온도 민감도가 크지 않아 FBG의 중심파장 변화 그래프에서 중심파장 부분만 확대하여 그 이동 정도를 확인하였다. 총 5회 반복 실험을 하여 온도에 따른 파장 변화량이 25 °C에서 0 nm, 30 °C에서 약 0.06 nm, 35 °C에서 약 0.12 nm, 40 °C에서 약 0.16 nm, 45 °C에서 약 0.21 nm, 그리고 50 °C에서 약 0.25 nm를 보였고, 표준편차 약 0.05 nm에서 0.08 nm 사이 값을 가진다. [그림 3.35]의 확대 되어진 그래프에서 온도 25 °C일 때, 중심파장 위치를 0으로 하고 50 °C까지 상대적인 파장 변화량을 측정하면, 약 0.25 nm의 파장 변화가 발생한다. 이것은 온도 민감도가 0.01 nm/°C로 계산할 수 있다.

어느 정도 안정적으로 온도에 따라 선형적인 파장의 변화량을 측정할 수 있지만 이 실험에서 제시하는 모든 폴리머에 비해 민감도가 많이 낮다는 것을 확인하였다.

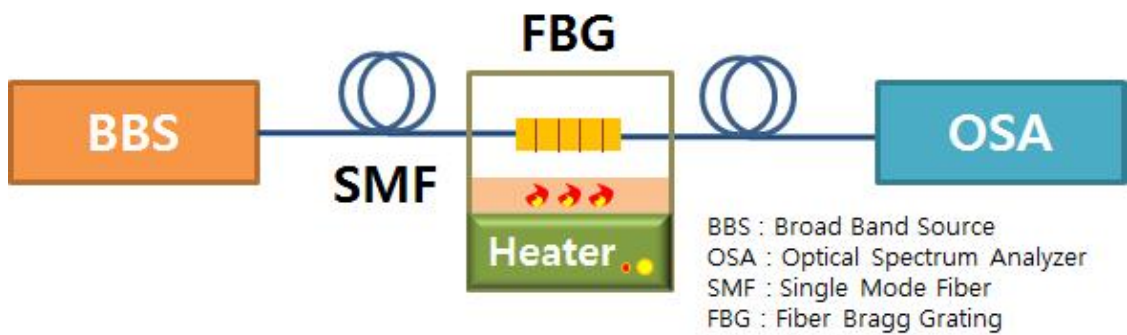


그림 3.34 FBG 온도 측정 실험 구성

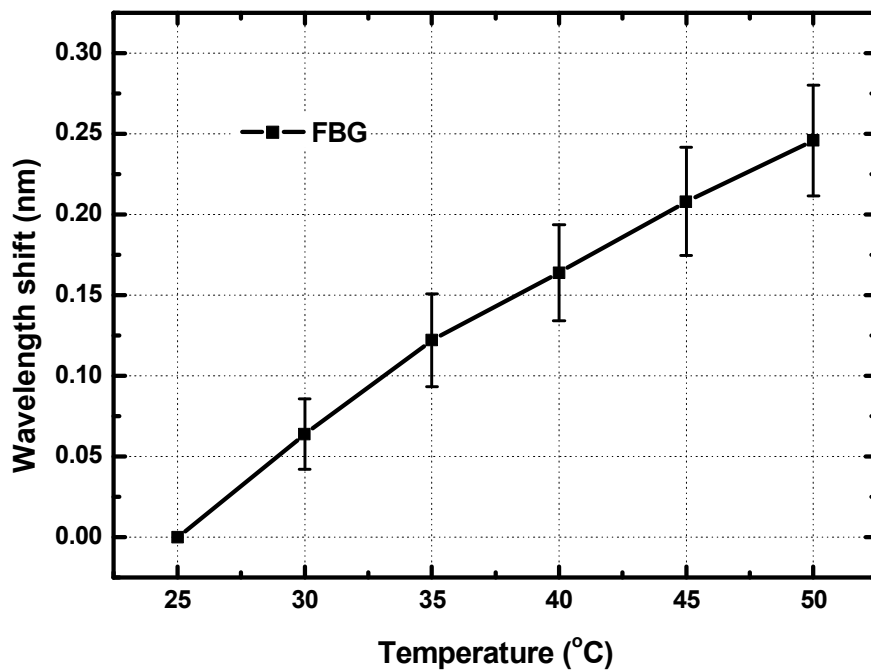
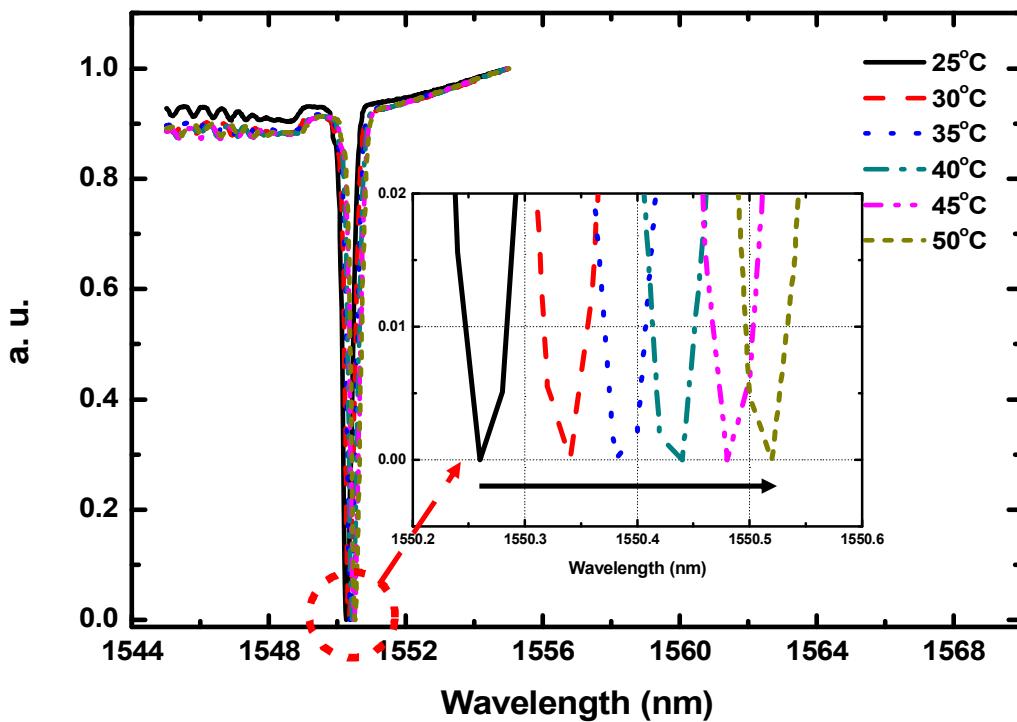


그림 3.35 FBG의 온도에 따른 파장 변화(위)와 5 회 반복 측정 결과(아래)

3. 각 폴리머와 FBG의 온도에 따른 민감도 비교

초기 온도 25 °C를 파장 변화량 0으로 두고 50 °C까지 5 °C씩 상승 시키며 FBG를 포함한 모든 폴리머들을 측정 후 비교 분석하였다. 그 결과는 [그림 3.36]에 보였다. 앞서 나온 실험 결과들을 종합하여 각 폴리머의 파장 변화량을 비교하였고, FBG의 경우 온도 증가에 따라 선형적이긴 하나 민감도가 아주 낮은 것을 보였다. 경화제인 LS2211의 경우 FBG와 같이 선형적이며, FBG보다 높은 민감도를 보이는 것을 확인하였다. 접착제의 NOA84는 다른 폴리머보다 월등한 민감도를 갖지만 다소 선형성이 떨어졌고, NOA88은 NOA84와 경향성은 같고, 민감도는 다소 떨어진다.

측정의 신뢰성을 높이기 위해 5회 반복 실험을 하여 결과를 분석하였다. 다시 요약하면 선형성 측면에서는 FBG와 광섬유 2차 코팅제인 LS2211 물질이 가장 좋았으며, 민감도 측면에서는 광학 접착제인 NOA84 물질이 가장 좋은 것으로 나타났다. FBG 및 폴리머들 각각의 민감도는 FBG 같은 경우 25 °C에서 50 °C까지 온도가 증가할 때, 약 0.25 nm 파장만큼의 변화량을 보였으며 제일 낮은 민감도를 갖고, 광섬유 2차 코팅 물질인 LS2211은 25 °C에서 50 °C까지 온도가 증가할 때, 약 3.54 nm 파장만큼의 변화량을 보였다. 그리고 광학 접착제인 NOA88은 25 °C에서 50 °C까지 온도가 증가할 때, 총 3.58 nm 파장만큼의 변화량을 보였으며, NOA84는 25 °C에서 50 °C까지 온도가 증가할 때, 총 8.55 nm 파장만큼의 변화량을 보였다.

민감도 측면에서 광학 접착제인 NOA84가 월등히 좋아서 고민감도 온도센서로 산업 현장에 적용할 수 있다. 온도에 따른 파장 변화의 선형성을 고려할 경우 광섬유 2차 코팅물질인 LS2211을 사용하는 것이 좋다. 이러한 점을 제외하고 간단한 구조, 쉬운 제작, 높은 민감도를 가지고 있기 때문에 FBG를 활용한 온도 센서를 대체 가능하리라 판단된다.

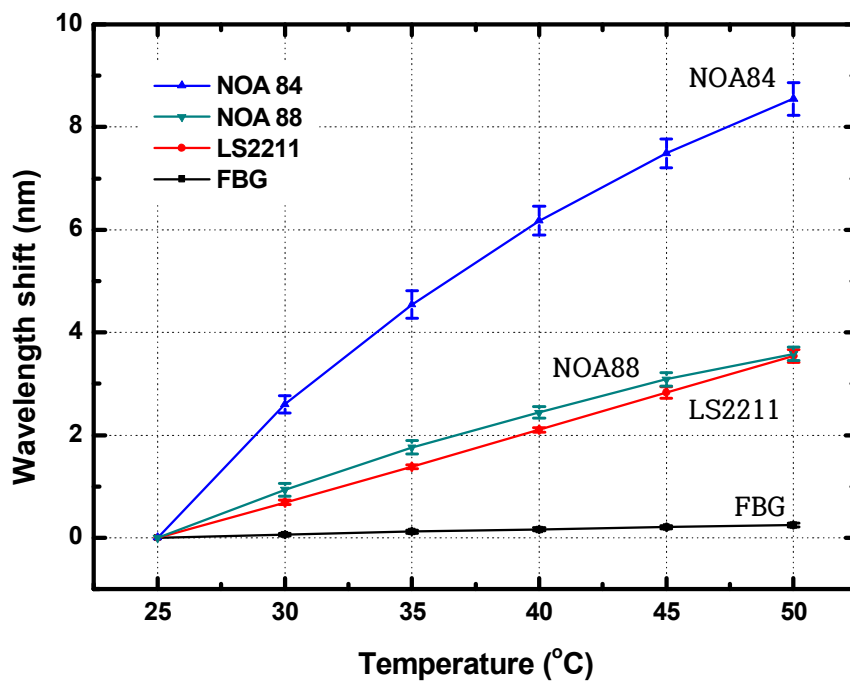


그림 3.36 5 회 반복 측정에 따른 FBG와 각 폴리머들의 파장 변화량 비교

제5장 결론

본 논문은 간단한 구조의 광섬유 센서를 설계하고 기능성 폴리머 재료 기술을 융합한 새로운 형태의 자외선 센서와 온도 센서를 제안하였다. 이것은 광섬유 끝단에 자외선 또는 온도에 민감하게 반응하여 부피 변화나 굴절을 변화를 일으키는 기능성 폴리머를 코팅하여 광섬유에서 입사된 근적외선 광의 다중 반사에 의한 간섭현상을 분석하여 자외선 및 온도 변화량을 측정하는 원리이다. 최근 개발된 FBG 기반 자외선 센서는 다중 지점에서 실시간 자외선을 감지하는 장점을 가지고 있다. 이 센서의 최소 측정 가능한 자외선 광의 세기는 1 mW/cm^2 이다. 이 센서는 간섭무늬의 파장 변화를 실시간 감지하여 자외선에 대한 반응을 관찰할 수 있다. 또한 이 센서가 가시광선에서는 작동하지 않고 자외선에만 반응하는 것을 확인하였다. 스파크와 같은 순간적인 자외선 방출에도 이 센서가 작동이 되는 것을 고속 셔터를 이용해서 확인하였다. 이는 코로나 방전과 같은 불연속적인 자외선 광의 노출에도 활용될 수 있다. 이 센서는 0.1초 짧은 자외선 노출에도 안정된 반응을 보였다. 추가적으로 개발된 자외선 센서의 온도 영향 특성을 측정한 결과 온도가 높아지면 자외선에 따른 파장 이동이 작게 나타났다. 하지만 자외선에 따른 간섭무늬의 상대적인 변화량을 측정하기 때문에 주변 온도의 변화가 느리다고 가정하면 자외선을 감지하는 데는 문제가 없었다. 본 연구를 통해 개발된 자외선 센서는 크기가 작고 가벼우며, 제작이 간편하고, 소량의 폴리머를 사용하기 때문에 제작비용이 저렴한 장점을 가지고 있다. 자외선에 대한 보다 빠른 반응속도와 높은 민감도 등 자외선 센서의 성능을 향상시키기 위한 추가 연구가 필요하다. 또한 온도와 진동 등 주위 환경 변화에 영향을 덜 받는 자외선 센서를 위한 연구가 요구된다.

온도 센서도 마찬가지로 기능성 폴리머와 다중 반사광 간섭을 이용하였다. 50°C 온도에서 파장 변화량이 FBG와 비교하여 LS2211은 약 3배, NOA84는 약 9배, NOA88은 약 3배 향상된 것을 확인하였다. 민감도는 NOA84가 가장 높았지만, 온도에 대한 파장 변화의 선형성을 고려할 때 LS2211를 적용한 센서가 우수한 성능을 보였다. 본 연구에서는 3가지 경화성 물질을 선택하여 온도 센서에 사용했지만, 온도에 민감한 다양한 재료를 활용하여 높은 민감도와 선형적인 반응도를 갖는 온도 센서 연구를 이뤄질 수 있다. 또한 외부의 물리적인 영향으로부터 이 센서를 보호할 수 있는 패키지 기술 개발이 필요하다. FBG 기반 센서와 같은 다중지점에서 온도를 감지할 수 있는 센서 시스템 설계가 필요하다.

본 연구에서는 자외선과 온도에 각각 민감하게 반응하는 폴리머 재료를 센서에 응용했지만 동일한 광학적 구성을 가지고 습도, 전기장, 자기장, 방사능 등 다양한 물리량에 대해 반응하는 물질을 적용하면 더욱 다양한 센서로 활용할 수 있다.

[참고문헌]

- [1] Jeff Hecht “City of Light: The Story of Fiber Optics,” Oxford University Press, 2004
- [2] Robert J. Schroeder, “The Present and Future of Fiber Optic Sensors for the Oilfield Service Industry: Where is there a role?,” 2002 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest. OFS 2002(Cat. No.02EX533).
- [3] 안재희, 김지현, “Strain-free AlGaIn/GaN 자외선 센서용 나노선 소자 연구,” Korean Chem. Eng. Res., Vol. 50, No. I, pp. 72-75
- [4] H. K. Kim, W. Shin, and T.-J. Ahn, “UV Sensor based on photomechanically functional polymer-coated FBG,” IEEE Photon. Technol. Lett. 22, 1404-1406 (2010).
- [5] D. S. Choi, H.K. Kim and T.-J Ahn, “The study of thermal effect suppression and wavelength dependence of azobenzene- coated FBG for UV sensing application,” Optical Society of Korea, 22(2), 67-71, (2011).
- [6] 송일신, “광반응 재료가 코팅된 단주기격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구.” 석사학위청구논문, 조선대학교 (2014).
- [7] 김우영, “광반응 재료가 코팅된 단주기 격자 기반 자외선센서의 휴대성 및 민감도 향상 연구.” 석사학위청구논문, 조선대학교 (2015).
- [8] Gyeong-Seo Seo, Hee-Taek Cho, Ok-Rak Lim, Tae-Jung Ahn, “Highly sensitive and fast UV sensor based on fiber grating with easily producible photoreactive material,” Sensors and Actuators A 283 (2018) 169 - 173
- [9] Jeff Hecht, “City of Light The Story of Fiber Optics,” p.23 (1999)
- [10] David R. Goff, “Fiber Optic Reference Guide: A Practical Guide to Communications Technology, Third Edition,” (2002)
- [11] Wikipedia, Optical fiber,
[“https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber#cite_note-regis-10”](https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber#cite_note-regis-10)
- [12] THOMAS G. GIALLORENZI, JOSEPH A. BUCARO, ANTHONY DANDRIDGE, G. H. SIGEL, JR., JAMES H. COLE, SCOTT c. RkSHLEIGH,

- RICHARD G. PRIEST, "Optical Fiber Sensor Technology," IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-18, NO. 4
- [13] 사이언스 올, "<https://www.scienceall.com/>" 사이언스 러닝 / 과학 교육 / 2010.7.2. "이제는 빛으로 통한다. 광섬유의 등장"
- [14] The Sciencetimes, "<https://www.sciencetimes.co.kr>" 분야별뉴스 / 과학기술 / 응용과학 / 2003.12.29. "전송 손실 줄인 초미세 광섬유 개발"
- [15] Lee Won-Je, Kim Dae-Kyu, Lee Woo-Jin, "Measurement of Bored-Precast Pile Load Transfer Using Fiber Bragg Grating Sensor." JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS C 21(3C), 2001.5, 311-319 (9pages)
- [16] Chang, Sung-Jin, Kim, Nam-Sik, Baek, Joon-Ho, "Development of Smart Seismic Device Using FBG Sensor for Measuring Vertical Load." Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering 22(11), 2012.11, 1089-1098 (10 pages)
- [17] Kwang Sik Nam, Jin Gyu Choi, Shang Zhao, Jea Ki Kim, Ho Min Choi, Seok Soon Lee, "Development of Temperature Measurement System Using Fiber Optics Linear Transmittance Filter with Fiber Bragg Grating Sensor." Journal of the Korean Society for Precision Engineering 33(4), 2016.4, 303-307 (5 pages)
- [18] 김상우, 유승재, 이인, 권일범, 윤동진, "매설 형 FBG 센서를 이용한 복합재 구조물의 접착제 층 모니터링." 한국항공우주학회 학술발표회 논문집 , 2011.4, 294-299 (6 pages)
- [19] Kun Woo Lee, Hong Chul Rhim, Tae Seok Seo, "Strain Measurement of Steel Roof Truss Using FBG Sensor during Construction of Reverse Shell Shaped Reinforced Concrete Structure," JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING 31(4), 2011.8, 335-342
- [20] Kun Woo Lee, Hong Chul Rhim, Tae Seok Seo, "Strain Measurement of Steel Roof Truss Using FBG Sensor during Construction of Reverse Shell Shaped Reinforced Concrete Structure." JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR

- NONDESTRUCTIVE TESTING 31(4), 2011.8, 335-342 (8pages)
- [21] 장민수, 김옥철, 김진석, 양성욱, “FBG 센서를 이용한 실시간 손가락 모션 트래킹 시스템.” 대한기계학회 춘추학술대회 , 2016.12, 1221-1224 (4 pages)
- [22] Jong-Tae Woo, Young-Bae Kim, Young-Bok Park, “Durability Verification of FRP-type FBG Sensors used for Tunnel Maintenance Measurements.” JOURAN OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS 63(9), 2015.9, 52-56 (5 pages)
- [23] 이선규, “고분해능 광섬유 브래그 격자(FBG) 센서를 이용한 고속 고정도 공작기계 구조물 변형 감시 시스템 개발.” 기초연구사업
- [24] 사물인터넷(IoT)에 대한 개념 정리,
“http://blog.daum.net/_blog/BlogTypeView.do?blogid=0CIZH&articleno=13314&_bloghome_menu=recenttext”
- [25] 가상현실기술 - 3D 모션 캡처링 센서 시스템,
“<https://news.naver.com/main/read.nhn?mode=LSD&mid=sec&sid1=101&oid=277&aid=0004328370>”
- [26] automotive “<http://www.autoelectronics.co.kr/article/articleView.asp?idx=2352>”
- [27] “The strength of surface UV radiation over Korean peninsula and the consequent minimum erythema dose (MED) and its exposure time for Korean skin type and reaction”, Ministry of health and welfare (2001)
- [28] Mihaela Paula Toader, Irina Mihaela Esanu, Tatiana Taranu, Stefan Vasile Toader, “Utility of Polarized Dermoscopy in the Diagnosis of Cutaneous Lupus Erythematosus and Morphea,” The 6th IEEE International Conference on E-Health and Bioengineering - EHB 2017
- [29] 이원배, “자외선 센서 사업화 개발.” 2002년 자외선 센서 사업화 개발에 관한 중소기업 부품 소재 공동기술개발사업
- [30] E. Springer, J. Almog, A. Frank, Z. Ziv, P. Bergman, W. Gui Qiang, “Detection of dry body fluids by inherent short wavelength UV luminescence: preliminary results,” Forensic Science International 66 (1994) 89-94
- [31] Young-Seok Kim, Kil-Mok Shong, Sun-Bae Bang, Chong-Min Kim,

- Myeong-II Choi, “Analysis of Image and Development of UV Corona Camera for High-Voltage Discharge Detection,” Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2011) 25(9) : 69~74
- [32] doctorW, “<http://www.doctorw.co.kr/news/articleView.html?idxno=22200>”
- [33] ArtRobot 스파크편 정품 반도체 온도센서
“<http://artrobot.co.kr/product/tss10988-스파크편-정품-반도체-온도센서tmp36-temperature-sensor/529/>”
- [34] (주)에프비지코리아, FBG 온도 센서
“http://www.fbg.co.kr/kor/bbs/board.php?bo_table=0301&wr_id=11”
- [35] Shahinpoor, M., “Intelligent Materials,” p. 426
- [36] Ľubica Vetráková, Vít Ladányi, Jamaludin Al Anshori, Pavel Dvořák, Jakob Wirz, and Dominik Heger, “The absorption spectrum of cis-azobenzene.” Photochemical & Photobiological Sciences Issue 12, 2017
- [37] S.O. Kasap, “Optoelectronics & Photonics Principles and Practices”
- [38] agilent 8453 uv-vis spectrophotometer,
“<https://www.ebay.com/itm/Agilent-Technologies-8453-UV-Vis-Spectrophotometer-G1103A-/180986281025>”

저작물 이용 허락서					
학 과	광기술공학과	학 번	20177082	과 정	석 사
성 명	한글: 조 희 택 한문: 趙 希 擇 영문: Hee Taek Cho				
주 소	광주광역시 북구 신용동 임방울대로 1042번길 14-1				
연락처	E-MAIL : whgm1xor1212@naver.com				
논문제목	한글 : 기능성 폴리머가 코팅 된 광섬유 끝단을 사용하는 광섬유 센서 연구 영어 : Research On Optical Fiber Sensor Using Fiber End Coated With Functional Polymer				
<p>본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.</p> <p style="text-align: center;">- 다 음 -</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함 2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함. 3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함. 4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함. 5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함. 6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음 7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함. <p style="text-align: center; margin-top: 20px;"> 동의여부 : 동의(<input checked="" type="checkbox"/>) 반대(<input type="checkbox"/>) </p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;">2019년 2월</p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;"> 저작자: 조 희 택 (서명 또는 인) </p> <p style="text-align: center; margin-top: 20px; font-size: 1.2em;">조선대학교 총장 귀하</p>					

[감사의 글]

많은 것을 배우고, 느끼고, 깨달았던 학사, 석사 과정에서 준비를 마치고 이제는 새로운 환경에 도전을 하려고 합니다. 지금까지 준비하는 과정에서 도움을 주신 고마운 분들에게 이 졸업논문을 통하여 감사인사를 부족하지만 정성을 다해 전하려합니다.

먼저 저의 가족과 같았던 지도교수님인 안태정 교수님께 감사인사를 전합니다. 작은 것 하나하나 신경써주시고, 연구원과 인간으로써 마주하는 중요한 갈림길에서 길을 밝혀주는 등불과 같은 역할을 해주셨습니다. 또한 항상 저의 한계의 벽을 허물 수 있게 도와주시고 폭넓은 경험을 통해 성장시켜주셨습니다. 정말 감사합니다. 항상 연구원으로써 사명감을 가지고 연구에 몰두하는 모습을 보여주시던 김진태 교수님, 인간적인 모습과 친근함이 묻어나던 밝은 웃음으로 고민과 질문을 들어주시던 김현수 교수님, 연구와 일에 있어서 딱딱함만이 전부가 아닌 것을 알게 해주셨던 박종락 교수님, 학문적인 가르침과 연구 현장을 직접 체험시켜 안목을 넓혀주신 권민기 교수님 그리고 이론적인 부분에서 많은 것을 가르쳐주시고 인생 선배로써 조언을 아끼지 않고 해주셨던 주기남 교수님께 감사합니다. 이러한 좋은 학과 교수님들이 있어 길다하면 길고, 짧다면 짧았던 학부생활과 대학원생활이 행복했습니다.

2년 동안 에너지인력양성 사업을 통해 여러 다른 분야로의 연구 기회를 주신 조흥현 교수님, 김지훈 교수님, 박철현 교수님, 광근창 교수님, 장희진 교수님, 정성용 교수님, 권민기 교수님, 그리고 백세종 교수님과 저의 지도 교수님께 감사합니다. 새로운 분야인 에너지 분야에 대한 이론을 배웠고, 그에 따른 견학과 체험활동을 통해 연구에 많은 도움이 되었고 세상을 보는 안목이 넓어졌습니다.

또한 2년 동안 한국연구재단의 광을 이용한 부식검출 사업을 진행하면서 많은 조언을 해주셨던 장희진 교수님께 감사합니다. 제가 알지 못하던 부식을 열정적인 강의와 세미나를 통해 부식의 일부분이라도 알 수 있게 해주셨습니다. 또한 사업을 진행하면서 알게 된 재료공학과 실험실의 실험에 있어 많은 도움을 준 규혁이형, 같이 연구를 진행하며 많은 고민을 같이 한 친구 태준이, 항상 긍정적인 기운을 전해주던 친척동생 수연이, 뒤늦게 많은 연구를 같이 한 주희, 내 동생 같은 태웅이, 짧은 시간 많은 추억을 만든 친척동생 혜리, 친구 같았던 동생 현규에게 감사합니다. 연구과정에서 좋은 동반자 그리고 친구로 허물없이 지낼 수 있었습니다.

저의 인생의 한 부분인 실험실 생활을 함께 보냈던 마음 따뜻한 내 연구 동반자 옥

락이, 많은 실험을 같이 하고 때로는 친구 같았던 경서, 1년 동안 같이 고생한 민지, 나의 부사수이자 연구에 있어 많은 고민을 같이 한 종주, 짧은 시간 동안 실험실 일을 함께한 종안이와 세희에게 감사합니다. 부족한 저를 항상 보듬어 주고, 같이 많은 시간을 보내 좋은 추억을 쌓아 행복했습니다. 또한 대학원 생활을 함께한 기동이형, 윤혁이형, 영준이형, 즈산, 현우, 한범이형, 영훈이형, 동원이형, 은주, 지수, 수민이, 영인이, 준혁이형, 승진이형, 민우형, 유현이형, 현선이, 원희, 영재, 광근이, 희원이형, 영호형, 효미, 진섭이, 준우, 수빈이에게 감사하고, 저의 대학원 동기인 옥락이, 경서, 친구같이 의지할 수 있었던 준영이형, 좋은 말동무가 되어주던 진이와 대희, 친구처럼 편안하게 허물없이 지내준 승은이에게 감사합니다. 이 외의 언급하지 않은 학과 선후배님들을 포함해 좋은 사람들과 기쁨을 두 배로 만들 수 있어 행복했습니다.

다음으로 저의 사랑하는 가족인 아버지, 어머니, 동생 조호정에게 감사합니다. 항상 저에게 따뜻한 말과 응원을 아끼지 않으며 언제나 돌아갈 수 있는 마음의 안식처였습니다. 사랑합니다. 다음으로 지금은 계시지 않지만 누구보다 저를 아껴주시던 외할머니와 그보다 일찍 돌아가신 외할아버지에게 감사합니다. 그리고 항상 저를 사랑해주시고 챙겨주시는 친할아버지와 친할머니, 작은아버지들과 작은어머니들, 항상 저를 위해주시는 이모와 이모부, 친구 같이 편안한 은주누나, 늘 걱정부터 해주던 희경이누나, 동생이지만 배울 점이 많은 보원이 그 밖의 언급하지 못한 많은 가족 친지들에게 감사합니다. 사랑합니다.

지금까지 저의 인생을 함께 함에 있어 곁에서 묵묵히 고민을 들어주고, 지금까지도 기쁨과 슬픔을 나누며 성장하고 있는 친구들을 언급하고자 합니다. 초등학교부터 알아온 오래된 친구이자 배려심 깊은 윤홍이, 고등학교 때 좋은 인연으로 친구가 된 여러 방면으로 늘 노력하는 건우, 항상 씩씩하고 허물없이 지내주는 충희, 깊은 생각으로 형과 같은 모습을 보여주는 승하, 진실 된 노력으로 현재 원하는 바를 향해가고 있는 덕현이, 대학교에서부터 좋은 인연으로 친구가 된 많은 시간 즐거움을 같이 나눈 종배, 옥락이, 진이, 대희, 원희, 준호에게 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

앞에 성함이 언급되지 못한 저와 인연의 끈이 닿은 많은 분들에게는 죄송하다는 말을 전하며, 저의 마음속 모든 분들이 하시는 일 막힘없고, 행복하시길 바랍니다. 감사합니다. 사랑합니다.