



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 폴리머 재료가 코팅된  
광섬유 격자 기반 자외선 센서의  
민감도 향상 연구

조선대학교 대학원

광기술훈학과

서경서

기능성 폴리머 재료가 코팅된  
광섬유 격자 기반 자외선 센서의  
민감도 향상 연구

Sensitivity Improvements Of Ultraviolet Light Sensor  
Based On Fiber Bragg Grating  
With Functional Polymer Materials

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

서 경 서

# 기능성 폴리머 재료가 코팅된 광섬유 격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

서 경 서

# 서 경 서의 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 서 론 .....	1
제1절 자외선 센서 .....	1
1. 자외선 센서의 필요성 .....	1
2. 자외선 센서의 종류 및 특징 .....	1
제2절 광섬유 격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구	11
제2장 이 론 .....	14
제1절 광섬유 격자 .....	14
제2절 아조벤젠 .....	19
제3장 자외선 민감도 향상 및 센서의 패키징 실험 .....	25
제1절 자외선 민감도 향상 .....	25
1. 새로운 아조벤젠의 코팅을 이용한 민감도 향상 .....	25
2. 자외선에 대한 경화제 반응 및 가시광선 반응 비교 .....	45
3. 장력을 이용한 민감도 향상 .....	50
제2절 센서 패키징 및 응용 .....	55
1. Glass tube를 사용한 패키징 .....	55
2. Fabry-Perot 간섭현상을 이용한 광섬유 길이변화 .....	63
제4장 실생활 자외선 센서의 적합성 판별 .....	73
제1절 고속 셔터를 이용한 자외선 센서 반응속도 측정 .....	73

제2절 자외선 감지 유무 시스템	81
1. 시스템 설명	81
2. 작동방법	81
제5장 결론	85

[참고문헌]

[감사의 말씀]

## 표 목 차

표 3.1 자외선 광센서 시스템의 사양	26
표 3.2 5가지 새로운 아조벤젠 폴리머 특성	29
표 3.3 5가지 경화제 특성	30
표 3.4 자외선램프의 사양	31
표 3.5 아조벤젠 파우더와 경화제 혼합물 25가지 경화 유무	35
표 3.6 아조벤젠 파우더와 경화제 혼합물 10가지 정보	38
표 3.7 자외선 검출기의 사양	42
표 3.8 광 스펙트럼 분석기의 사양	47
표 3.9 가시광선으로 사용한 광대역 광원 사양	48
표 3.10 광대역광원의 사양	67
표 3.11 광섬유용 광증폭기의 사양	68
표 4.1 KSC101 제어기의 사양	76
표 4.2 고속 셔터의 사양	77



## 그림 목 차

그림 1.1	코로나 방전 및 자외선 발생 이미지	3
그림 1.2	코로나 방전 자외선 스펙트럼	4
그림 1.3	낙뢰 및 낙뢰로 인한 화재	5
그림 1.4	낙뢰로 인한 인명피해 및 피해 유형	6
그림 1.5	낙뢰 형성 및 진행 과정	7
그림 1.6	코로나 방전 측정 방법	9
그림 1.7	낙뢰 측정기	10
그림 1.8	직경에 따른 중심 파장 이동량	12
그림 1.9	자외선 센서의 보조 장치에 따른 최소 측정 가능 자외선 광세기	13
그림 2.1	광섬유 구조	16
그림 2.2	광섬유 브래그 격자에 대한 설명	17
그림 2.3	위상 마스크를 이용한 광섬유 브래그 격자 생성 과정	18
그림 2.4	최적화된 아조벤젠 흡수 스펙트럼	21
그림 2.5	아조벤젠 분자의 광학적 이성질체 형성 반응	22
그림 2.6	액체 크리스털 탄성 중합체(LCE) 필름이 장착된 광 구동 플라스틱 모터	23
그림 2.7	아조벤젠을 이용한 소프트 로봇	24
그림 3.1	자외선 광센서 시스템 패키지 구성	26
그림 3.2	아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자의 자외선에 따른 부피 변화	27
그림 3.3	자외선램프 구성	31
그림 3.4	자외선램프의 스펙트럼	32
그림 3.5	경화작업에 필요한 LabVIEW 프로그램	33
그림 3.6	25가지 아조벤젠 혼합물의 경화 유무 실험 구성	34
그림 3.7	아조벤젠을 이용한 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 측정 실험 구성	39
그림 3.8	10가지 아조벤젠 혼합물의 파장 이동 그래프	40
그림 3.9	Powder 2와 Agent 5 흡수 스펙트럼	41
그림 3.10	자외선 검출기의 구성	42

그림 3.11 자외선 광세기에 따른 최대 파장 이동량 그래프	43
그림 3.12 선행연구와 기존 연구의 자외선 응답 비교	44
그림 3.13 Agent 5와 새로운 아조벤젠 혼합물 파장 변화 비교	46
그림 3.14 광 스펙트럼 분석기의 구성	47
그림 3.15 가시광선으로 사용한 광대역 광원 구성	48
그림 3.16 자외선과 가시광선에서의 광섬유 브래그 격자 파장 변화 비교	49
그림 3.17 자외선 센서의 감도에 대한 장력 효과 실험 구성	52
그림 3.18 장력에 의한 광섬유 브래그 격자 센서의 파장 이동결과	53
그림 3.19 장력 유무에 따른 실험 결과	54
그림 3.20 유리관 설명	58
그림 3.21 유리관이 삽입된 패키징 실험 구성도	59
그림 3.22 유리관 집광렌즈 유무 실험 구성도	60
그림 3.23 유리관 패키징 실험 결과	61
그림 3.24 유리관의 자외선 광에 대한 반사 분석을 위한 개략도	62
그림 3.25 Fabry-Perot 간섭계 기본 원리	66
그림 3.26 광대역광원 장비	67
그림 3.27 광섬유용 광증폭기 장비	68
그림 3.28 Fabry-Perot attach 실험 구성도	69
그림 3.29 Fabry-Perot attach의 자외선 유무에 따른 실험 결과	70
그림 3.30 Fabry-Perot attach의 자외선 광세기에 따른 실험 결과	71
그림 3.31 Fabry-Perot attach의 자외선 광세기에 따른 간섭무늬 이동결과	72
그림 4.1 KSC101 제어기	75
그림 4.2 고속 셔터 외형	77
그림 4.3 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자를 사용한 고속 셔터 실험 구성	78
그림 4.4 고속 셔터 개폐시간에 따른 실험 결과	79
그림 4.5 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자를 사용한 고속 셔터 자외선 응답	80
그림 4.6 자외선 광의 유무를 구별하는 알고리즘	83
그림 4.7 알고리즘의 프로그래밍 방식 구현	84

## ABSTRACT

### Sensitivity Improvements Of Ultraviolet Light Sensor Based On Fiber Bragg Grating With Functional Polymer Materials

Gyeong Seo Seo

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, a newly synthesized material is proposed to improve the ultraviolet (UV) sensitivity of a non-etched fiber bragg grating (FBG) for UV sensors, which is comparable to the high sensitivity of the previously reported UV sensor based on a diameter-downsized FBG. The photomechanical material was prepared simply by mixing an azobenzene compound and curing agent. The FBG was subsequently coated with a functional polymer using a UV curing process. We determined the best combination of the azobenzene compound, based on its UV-induced mechanical stretching, and the curing agent as a commercially available coating polymer to achieve the highest sensitivity in many combinations. The maximum wavelength shift of the non-etched FBG was 2.5 nm. The specific UV sensor coated with this mixture showed a considerable change in wavelength with respect to UV rays but no significant change in visible light. It was thus confirmed that this improved UV sensor does not react to external visible light but is sensitive to only UV light. To improve the sensitivity of the UV sensor, 0.6% tensile force was applied to the

FBG, and the azobenzene compound was coated. The sensitivity was then measured. When the UV light is incident on the sensor having this tension, it was confirmed that the light sensitivity was improved by approximately twice that when the tension was not applied. In addition, the functional polymer coating needed to be physically protected because deformations can easily occur even when the optical element is bent or weakly impacted. We fabricated a simple fiber optic Fabry-Perot interferometer and analyzed the interference fringe movement in the frequency domain by UV light, and confirmed that the optical fiber actually stretched as a result of the UV-absorbed azobenzene. In addition, we proposed a simple algorithm to determine the presence and absence of UV radiation using the change in the slope of the wavelength shift over time obtained through the first derivative of the measured data. The proposed method is very easy to use, providing information at a glance, and our fast UV sensor is sufficiently powerful for applications such as corona discharge detection and lightning strike monitoring. Finally, we assessed whether the ultraviolet sensor developed can detect UV light generated at high speeds. It was confirmed that the minimum exposure time that this UV sensor can detect is 17 ms. Considering the lightning duration time of 20 ms, the UV sensor developed in this study detects momentary UV light generated from a corona discharge or from lightning. It will be applied in the future for remotely monitoring in real time defects in power lines such as corona discharge in insulators.

# 제1장 서 론

## 제1절 자외선 센서

### 1. 자외선 센서의 필요성

자외선(Ultraviolet, UV)은 사람의 눈에는 보이지 않는 10 nm에서 400 nm의 파장영역을 가지는 전자기파이다. 자외선은 파장에 따라 A, B, C로 나뉘는데 각각 315nm~400 nm, 280 nm~315 nm, 100 nm~280 nm의 파장을 가진다. 이러한 자외선이 인체에 과하게 노출되면 주근깨, 일광화상, 피부암 등을 유발할 수 있다. 주로 의료 치료<sup>[1]</sup>, 결함 검출<sup>[2]</sup>, 수질 정화<sup>[3]</sup>, 자외선 경화<sup>[4]</sup>의 응용분야에 널리 사용되고 있다. 또한 광반도체 소자 제작 등 다양한 산업현장에서도 자외선을 이용한 작업을 많이 하고 있기 때문에, 작업자는 항상 자외선 노출에 의한 안전사고 위험에 노출되어 있다.<sup>[5,6]</sup> 따라서 이와 관련된 안전사고를 방지하기 위해서 실시간 자외선 노출을 감지하는 자외선 센서가 많이 연구되어져 왔다. 최근에는 자외선 센서를 낙뢰 및 고출력 발전, 누전 등의 상황과 화재시 불꽃에서 방출되는 자외선을 감지하여 사고를 예방하는데 이용하기 위해 연구가 진행되고 있다.<sup>[7]</sup> 하지만 아직까지 자외선 센서의 다양한 응용분야에 비해 그 연구가 부족하다. 특히 광기술을 이용한 센서를 활용한 자외선 센서 연구는 아직까지 활발히 이뤄지지 않고 있어, 광기술 기반 센서의 장점을 살려 자외선 센서 연구를 다양하게 진행할 필요가 있다.

### 2. 자외선 센서의 종류 및 특징

#### 가. 코로나 방전 및 불꽃 감지기

코로나 방전(Corona discharge)는 중성유체 속의 높은 전위의 전극으로 발생하는 유체가 전극 주위에 플라즈마를 형성하도록 이온화되는 반응이다. 이때 생성된 이온은 낮은 전위인 주변 지역에 전하를 넘겨주거나, 재결합하여 중성 기체 분자를 형성한다. 쉽게 말하면 코로나 방전은 도체 주위의 유체 이온화로 인해 발생하는 전기적 방전이다. 이러한 코로나 방전은 송전선로에 사용되는 애자(Insulator)에서 발생하는 절연과피로 인해 주로 발생한다. 코로나 방전이

일어나면 전력 손실이 발생하고 대기 입자와 반응하여 오존과 화합물을 생성하며, 소음, 전자 기적 장애 등의 문제가 나타나게 된다. 이는 매우 빠르고 미약하며 불규칙한 신호의 특성을 가지고 있어서 검출이 매우 어렵다. 코로나 방전이 일어날 때 자외선이 발생하게 되는 것을 발생 이미지인 [그림 1.1]과 스펙트럼인 [그림 1.2]를 통해 확인 할 수 있다.<sup>[8,9]</sup>

화재란 불에 의해 발생하는 재해를 뜻하며, 주로 인간의 의도에 의해 발생 혹은 확대되거나 방화에 의해 발생한다. 이러한 화재를 감지하기 위해서 화재 감지기 혹은 불꽃 감지기를 사용한다. 이는 탄소를 함유한 가연성 물질이 산소와 산화 반응을 일으켜 유발하는 열, 연기, 불꽃, 연소가스 등을 감지하는 장치이다. 최근에는 불꽃에서 방사되는 복사 에너지(Radiation energy) 중 적외선(Infrared)과 자외선(Ultraviolet)영역을 검출하는 자외선-적외선 불꽃 감지기(UV-IR flame detector)가 개발되었다. 이 불꽃감지기는 탄화수소, 금속, 유황, 수소, 암모니아 등을 포함한 화재에서 매우 빠르고 민감하게 작동하여 고급차량의 화재감지에 사용된다.<sup>[10]</sup>

## 나. 낙뢰

여러 가지 번개의 현상 중에서 뇌방전(Lightning discharge)의 일종으로 뇌운내 전하가 지상으로 떨어져 방전하는 현상을 낙뢰(Lightning strike)라고 한다[그림 1.3]. 최근 5년간 낙뢰로 인한 평균 71건의 재해가 발생하였고 이로 인해 8명의 인명 피해와 27억원의 재산 피해를 유발하였다.<sup>[11]</sup> 특히 낙뢰는 발전소나 전력전기시설 등에 자주 발생하여 큰 피해를 유발하고 이로부터 발생하는 단선으로 인한 사용자 불편 등 문제를 발생시키고 있다. 이에 관련된 국민안정처 통계자료를 [그림 1.4]에서 볼 수 있다. 낙뢰는 매우 습한 공기가 상승 기류를 따라 급격히 올라가 구름으로 변하고, 이것이 수 km이상의 두께를 갖는 적란운이 되어 구름의 각 부분에 분리되어 축적되기 시작한다. 이때 음전하가 구름 하부에 집중되고 구름 내부에 강한 전계가 걸리게 되는데 그 주변 공기의 절연 파괴가 발생하고 이것은 필라멘트 방전을 유발한다. 이 방전은 공기가 큰 전위차에 노출될 때 형성될 수 있다. 이러한 필라멘트 방전으로 인해 계단형태로 지상으로 내려가는 선구 낙뢰(Stepped leader stroke)가 생긴다. 그 후 지상에 있는 날카로운 끝을 가진 금속체에서 전계강도가 증가하여 공기를 절연파괴하고, 선구 낙뢰 쪽으로 양전하를 올려 보내는 필라멘트 방전이 생긴다. 이 필라멘트 방전은 귀환 낙뢰(Return stroke)라고 한다. [그림 1.5]는 이런 낙뢰의 형성과정을 개략적으로 보여준다. 일반적으로 낙뢰 수명은 약 20 ms 정도이다. 낙뢰에 의해 발생하는 재해는 주로 귀환 낙뢰로 인해 생긴다.<sup>[12,13]</sup>

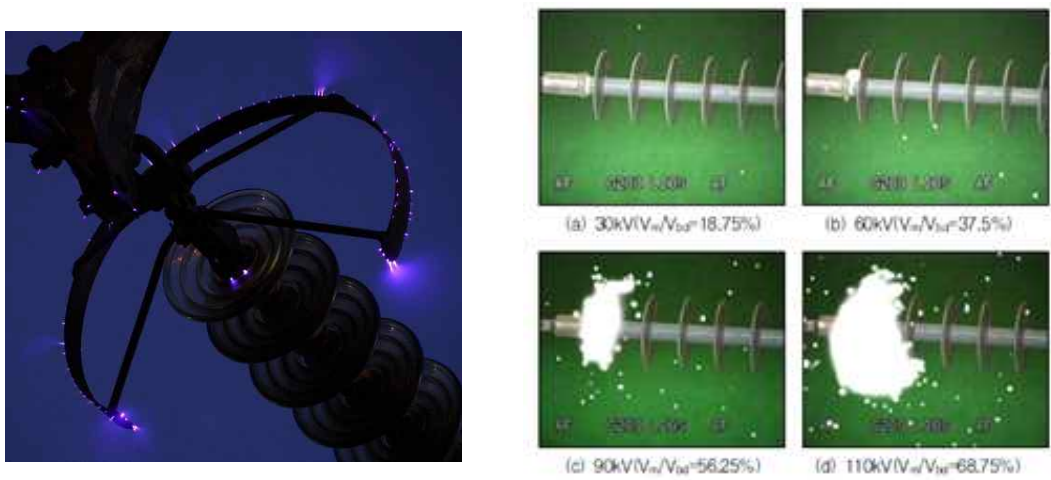


그림 1.1 코로나 방전 및 자외선 발생 이미지

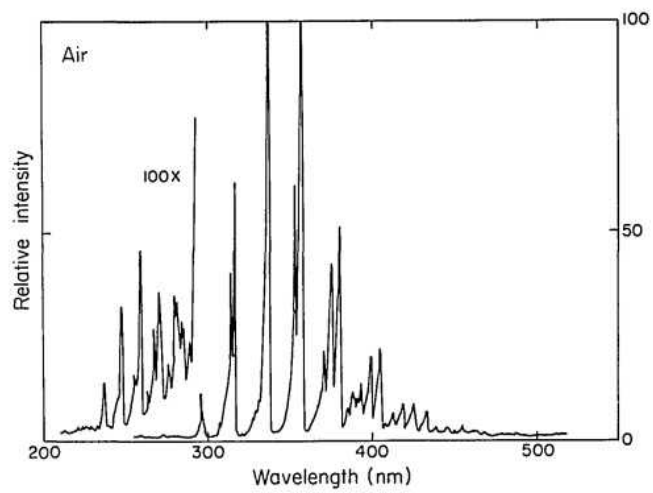


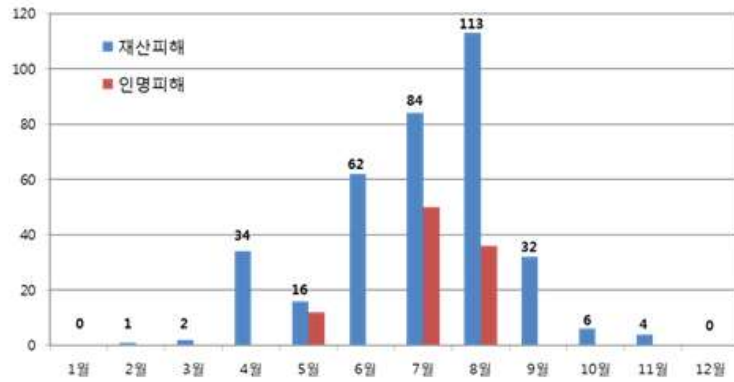
그림 1.2 코로나 방전 자외선 스펙트럼<sup>[14]</sup>





그림 1.3 낙뢰 및 낙뢰로 인한 화재

월별 재산 및 인명피해(5년간)



낙뢰 피해 유형(5년간)



그림 1.4 낙뢰로 인한 인명피해 및 피해유형<sup>[11]</sup>

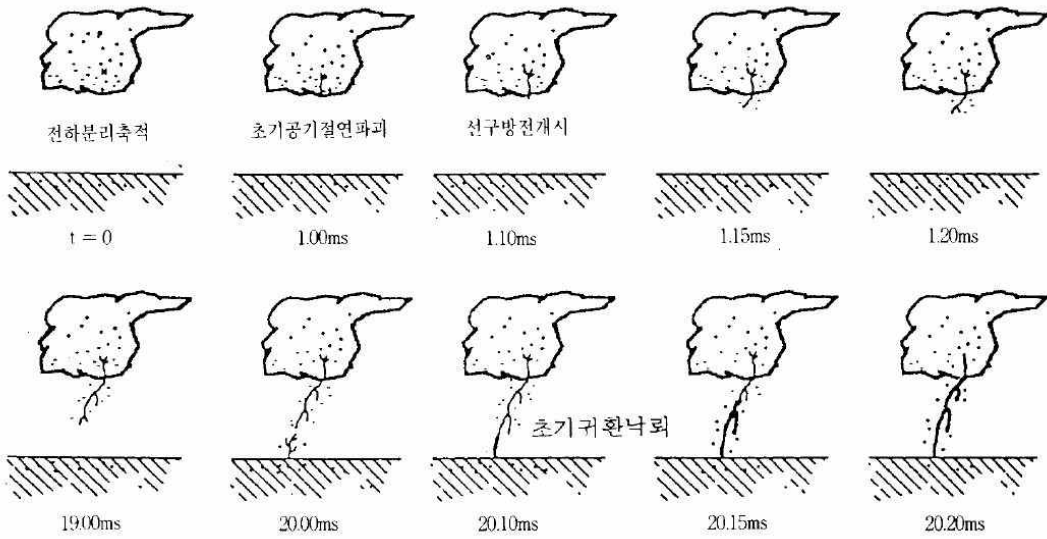


그림 1.5 낙뢰 형성 및 진행과정<sup>[12,13]</sup>

낙뢰로 인한 재해는 감전사고, 화재발생 그리고 전력설비, 송전선로 및 통신설비 장애 발생 등이 있다.

## 다. 광섬유 기반 자외선 센서

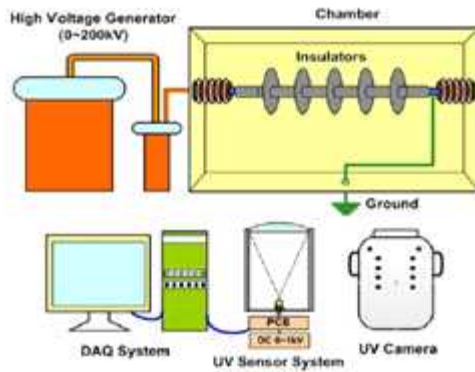
코로나 방전 및 낙뢰를 측정하는데 사용한 방법으로는 자외선 카메라와 낙뢰 측정기가 있다. 코로나 방전을 측정하는 대표적인 방법으로 알려져 있는 자외선 카메라는 [그림 1.6(a)]와 같다. 자외선 카메라는 시각적으로 방전이 발생하는 위치를 찾을 수 있다는 장점이 있지만, 실시간 측정 및 다중 지점 동시 측정, 근접 측정이 어렵다는 단점이 있다.<sup>[15]</sup> [그림 1.6(b)]는 고전압 발생장치에서 발생한 자외선을 검출하는 광학시스템을 보여주고 있다. 이 자외선 센서는 전력장치에서 발생하는 방전을 감지할 뿐 아니라 시간당 방전 횟수를 측정하여 전력장치의 고장 유무를 결정하는 역할을 한다.

[그림 1.7(a)]의 낙뢰 측정방법인 낙뢰 측정기는 낙뢰로 인해 유도된 전자파를 측정하여 발생 위치를 추측하는 원리이다. 전자파를 이용한 시스템이기 때문에 장거리 측정이 가능하다는 장점이 있지만 근거리 측정이 어렵다. 그래서 낙뢰 지역 근접 측정을 위해 낙뢰의 전류를 직접 측정하여 발생 유무를 감지하는 낙뢰 측정기를 개발하여, 낙뢰가 잦은 지역이나 낙뢰 발생 시 피해규모가 큰 시설물에 설치한다[그림 1.7(b)]. 하지만 감지기에 직접 낙뢰가 닿아야 전류를 측정 가능하며 이 경우 측정 시스템의 파손 위험이 높다는 단점을 가지고 있다.<sup>[16]</sup>

최근에 이러한 문제점을 해결하고자 광섬유 브래그 격자(Fiber bragg grating, FBG)를 이용한 자외선 센서가 개발되었다. 이는 광대역 광원 중에서 특정 파장만 반사시키고 나머지 파장은 투과시키는 원리를 가지고 있다. 광섬유 브래그 격자는 작은 크기, 고민감도, 다중 지점 측정 및 원격 측정 등과 같은 장점들이 있어 건설 분야, 원자력시설, 군사시설, 송유관 시설 등 다양한 산업분야에 많이 활용되고 있다.<sup>[17-19]</sup> 이런 장점에 더하여 광섬유 브래그 격자를 적용한 자외선 센서는 실시간 모니터링이 가능하며, 전자기파 영향을 받지 않고, 수동 광소자이기 때문에 내부전원 공급이 필요 없다는 장점이 있다. 기존 개발된 광섬유기반 자외선 센서는 광섬유 격자를 식각(Etching), 자외선 집광렌즈 및 반사판(Reflector) 사용 등을 통한 자외선 민감도를 향상시키는 방법을 중심으로 연구가 진행되었다. 이것을 다음 절에서 자세히 살펴보겠다.

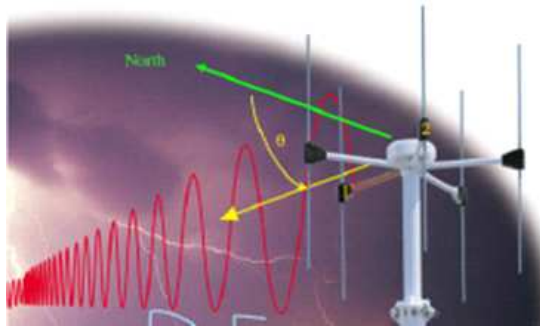


(a)



(b)

그림 1.6 코로나 방전 측정방법<sup>[15]</sup> (a) 자외선 카메라, (b) 고전압 발생장치 구조



(a)



(b)

그림 1.7 낙뢰측정기<sup>[16]</sup> (a) 전자파 감지 기반, (b) 낙뢰 전류 감지 기반

## 제2절 광섬유 격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구

앞에서 소개한 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서는 자외선을 흡수하는 기능성 고분자 코팅재료의 자외선 감지감도가 낮고, 이 재료의 자외선에 의해 유도하는 장력이 광섬유 브래그 격자에 효율적으로 전달되지 않는다. 이 자외선 센서의 민감도 향상을 위해 광섬유 브래그 격자의 구조 개선과 추가적인 외부장치를 이용하는 2가지 방법을 제안하였다.

첫 번째는 아조벤젠 폴리머의 길이변화로 유도되는 격자주기를 효과적으로 변화시킬 수 있도록 농도 25 %의 불화수소(HF, hydrogen fluoride)를 사용하여 광섬유 브래그 격자의 직경을 줄이는 방법이다. 101  $\mu\text{m}$ , 83  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$  그리고 60  $\mu\text{m}$  중에서 광섬유 브래그 격자가 80  $\mu\text{m}$  직경을 가지는 것을 선택했다. [그림 1.8]을 통해 직경이 감소함에 따라 민감도와 반응속도가 향상됨을 확인할 수 있다.<sup>[20]</sup>

두 번째는 식각된 광섬유 브래그 격자에 외부장치인 집광 렌즈(THORLABS LJ4107-UV)와 곡률을 가진 알루미늄 반사판을 사용하여 자외선을 집광시키는 방법이다. [그림 1.9]와 같이 집광렌즈와 곡률을 가진 반사판 모두를 사용했을 때 효율이 최대 15배 증가한 것으로 나타났다.<sup>[20,21]</sup>

선행연구의 식각 과정을 통해 광섬유 파손의 위험성이 높다는 것과 제작과정에서 인체에 유해한 물질을 사용함을 고려하였다. 본 연구는 식각된 광섬유 브래그 격자를 사용하지 않고 새로 합성된 아조벤젠 폴리머를 사용하여 센서의 민감도를 유지 및 향상시키는 연구를 수행하였다. 또한, 패키징 시키는 연구를 수행하였고, 시간경과에 의해 측정된 자외선 반응 계수에 대한 간단한 수치적 유도를 사용하여 자외선 광의 존재 여부를 신속하게 결정하는 새로운 기술을 제안하였다. 마지막으로 실생활에서 낙뢰 또는 빠르게 발생하는 자외선 감지에 사용 가능한지 실험도 수행하였다.

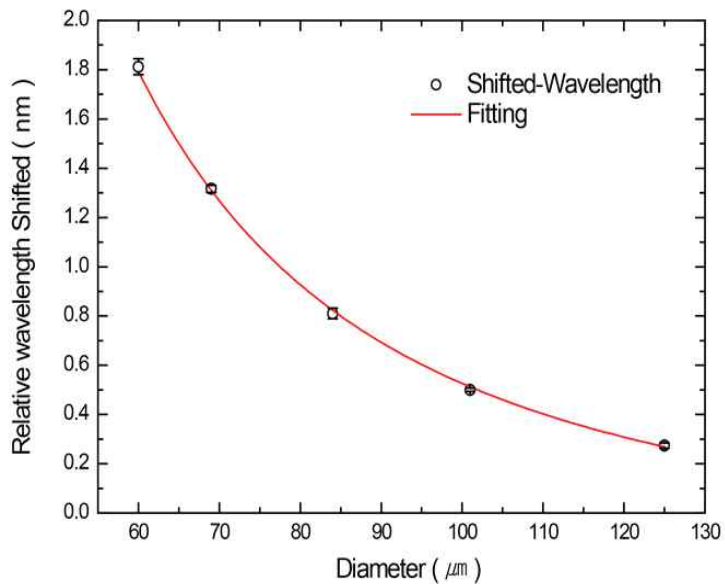


그림 1.8 직경에 따른 중심파장 이동량<sup>[20]</sup>



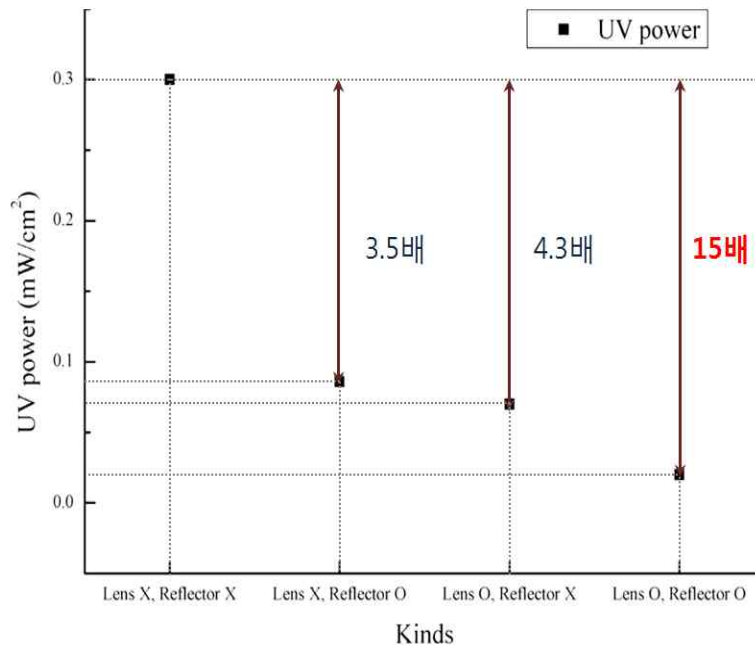


그림 1.9 자외선 센서의 보조 장치에 따른 최소 측정가능 자외선 광세기<sup>[20,21]</sup>

## 제2장 이 론

### 제1절 광섬유 격자

광섬유(Optical fiber)는 주로 광통신에서 광신호를 전달하는 매체로 활용된다. 광섬유는 [그림 2.1]처럼 코어(Core), 클래딩(Cladding), 코팅(Coating)으로 구성되어 있는데 이는 각각  $8\ \mu\text{m} \sim 50\ \mu\text{m}$ 의 두께의 빛 통과층,  $125\ \mu\text{m} \sim 140\ \mu\text{m}$ 의 두께의 차단층,  $250\ \mu\text{m}$ 과  $500\ \mu\text{m} \sim 900\ \mu\text{m}$  두께를 가진 피복층에 해당한다.<sup>[22,23]</sup> 신호 전송하는 과정에서 전반사(Total reflection) 조건을 만족시키기 위해 중심부분인 코어의 굴절률이 바깥부분인 클래딩의 굴절률보다 1 %정도 높은 유리로 제작해야 한다. 여기서 전반사란 빛이 굴절률이 큰 매질에서 작은 매질로 진행할 때, 경계면에서 100 % 반사가 일어나는 현상이다.<sup>[24]</sup> 입사된 빛이 클래딩에 부딪히면 코어방향으로 전반사되고, 다시 반대쪽 클래딩에 부딪히면 코어방향으로 전반사되는 과정을 반복하면서 광섬유를 통해 빛을 전송하게 된다.<sup>[23]</sup>

광섬유 브래그 격자(Fiber bragg grating, FBG)는 길이에 따라 코어의 굴절률에 주기적 또는 비주기적인 변화를 준 광섬유이다. [그림 2.2]와 같이 L만큼의 길이와  $\Lambda$ 만큼의 간격을 가진 광섬유 브래그 격자는 왼쪽 그래프의 여러 파장  $\Delta\lambda$ 이 통과할 때 특정 파장  $\lambda_B$ 만 투과하고 나머지 파장은 반사시켜 오른쪽 그래프가 되는 원리이다.<sup>[25]</sup>  $\Delta\lambda$ 와  $\lambda_B$  둘 다 브래그 격자의 특성에 따라 달라진다. 광섬유 브래그 격자는 홀로그램 방해 또는 위상마스크 방법을 이용하여 제작된다.<sup>[25]</sup> 격자 간격이  $\Lambda$ 인 위상마스크는 [그림 2.3]에서 보이듯이 회절 광학소자로 자외선 광을 통과시키면서 공간에 따른 위상차를 유도한다. 유도된 간섭무늬가 광섬유 코어 안에 형성되며 격자를 생성하는 소자이다.<sup>[25]</sup> 이는 비싼 제조가격, 고정되는 격자 주기의 단점이 있지만, 성능 안정과 높은 생산성 때문에 국내외적으로 널리 이용되고 있다.

$$\lambda_B = 2n_{ef}\Lambda \quad (1.1)$$

여기서  $\lambda_B$ 는 Bragg 파장이고  $n_{ef}$ 는 유효 굴절률,  $\Lambda$ 는 격자의 주기이다. 가장 널리 사용되고 있는 광섬유 센서로, 특정 파장의 빛을 90 %이상 차단하는 특징을 가지고 있다. 또한 입력에서 파장을 변화시킬 수 있는 파장 가변 레이저(Tunable laser)를 사용할 수 있다. 이러한 광섬유 브래그 격자는 온도와 스트레인 센서로 이용할 수 있다.<sup>[25]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = (1 - P_e) \times \epsilon + (\alpha_A + \alpha_n) \times \Delta T \quad (1.2)$$

여기서  $\Delta\lambda$ 는 파장 이동이고  $\lambda_0$ 는 초기 파장을 나타낸다. 위 수식은 스트레인과 온도로 인한 광섬유 브래그 격자의 파형 변화를 대략적으로 기술한 것이다.  $(1 - P_e) \times \epsilon$ 은 파장 이동에 대한 스트레인의 충격을 나타내며  $P_e$ 는 스트레인-광학계수이고  $\epsilon$ 는 Grating의 스트레인이다.  $(\alpha_A + \alpha_n) \times \Delta T$ 는 파장 이동에 대한 온도의 영향을 나타내며  $\alpha_A$ 는 열 팽창 계수이고  $\alpha_n$ 는 열 광학 계수를 나타낸다. 우리는 위 수식에서 파장 이동에 대한 스트레인 충격부분을 이용한다. 코팅 재료인 기능성 폴리머의 길이변화 특성으로 인해 광섬유 브래그 격자에 스트레인이 가해지고 그에 따른 파장 이동을 관찰하는 것이다.<sup>[25]</sup>

광섬유 브래그 격자 센서는 광섬유 기반이기 때문에 작은 삽입 손실, 소형, 높은 파장 선택도, 주위 환경 변화의 감지 가능 그리고 편광에 덜 민감하다는 장점을 가지고 있다. 부식에 의한 열화가 적기 때문에 매립형 계측에 적합하고, 광 신호를 이용하므로 수분에 의한 이상 값 발생이 없다. 그리고 표준 광학 섬유를 이용하므로 계측 장소의 전기장 영향이 없으므로 고압 전력 환경에 용이하게 쓰인다. 또한, EMI 유발 노이즈에 면역성이 있으며, 전송 손실이 적어서 수 km 범위의 계측이 가능하므로 터널 및 대규모 구조물에 사용하기 편리하고, 고온다습 및 극저온이나 극 고온에서도 사용이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 결정적으로 장거리 측정, 측정 시스템의 크기, 무게 및 복잡도를 크게 줄여준다. 이러한 특성을 적용하여 광통신용 필터, 광섬유 레이저, 광 분산 보상기 등에 이용할 수 있고, 외부의 온도변화나 인장력에 따른 광 선택성 변화를 이용하여 광섬유 센서로 활용이 가능하다.<sup>[25]</sup>

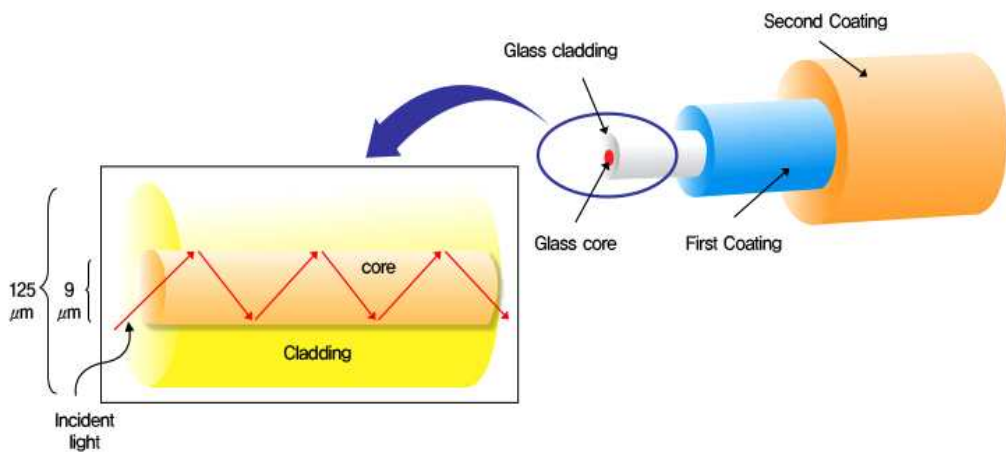


그림 2.1 광섬유의 구조<sup>[23]</sup>

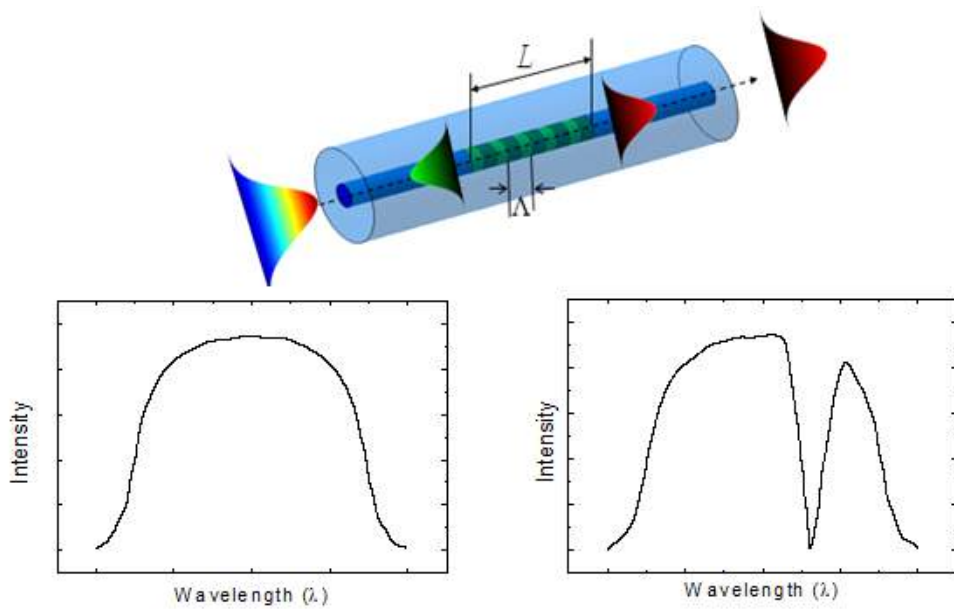


그림 2.2 광섬유 브래그 격자에 대한 설명

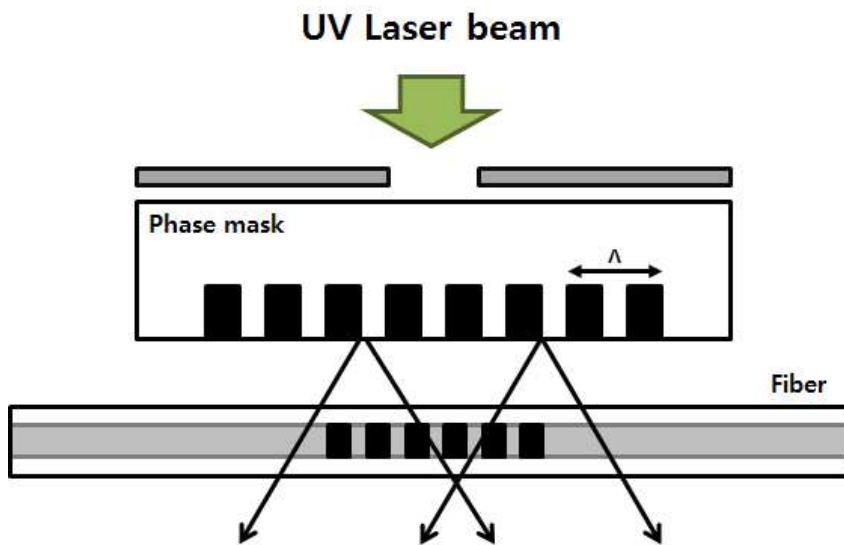


그림 2.3 위상마스크를 이용한 광섬유 브래그 격자 생성 과정<sup>[26]</sup>

## 제2절 아조벤젠

최근 연구를 통해 자외선을 흡수하면 길이변화 특성이 생기는 아조벤젠 (Azobenzene) 폴리머를 코팅한 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서가 개발되었다. [그림 2.4]와 같이 아조벤젠 폴리머는 자외선 영역의 흡수도가 좋은 화학물질이다. 아조벤젠이 자외선에 노출되면 화학 구조에 변화가 일어나는데 이는 [그림 2.5(a)]와 같다. [그림 2.5(b)]는 아조벤젠의 화학 구조가 자외선에 따라 늘어나는 것을 사진을 통해 나타낸다. 이러한 폴리머는 자외선 광을 흡수하면 내부 구조가 가역적(Trans → Cis)인 길이변화 특성을 가지고 있다.<sup>[27]</sup> Trans는 Cis에 비해 더 안정적이고 Cis는 열적으로 Trans로 이성화 될 수 있기 때문에 초기 상태 고분자는 대부분 안정적인 Trans로 존재한다.<sup>[28]</sup> 아조벤젠의 광 이성화 현상(Photoisomerization)은 구조에서 큰 변화를 일으켜 분자 내 원소사이의 거리가 Trans일 때는 0.9 nm, Cis일 때는 0.55 nm로 감소한다. 아조벤젠의 열적 이성질화 반응은 두 가지 메커니즘으로 연구가 진행되어 왔다. 첫 번째는 회전 메커니즘(Rotational mechanism)이다. 이는 이중 결합인 N=N 구조가 전이 상태에서 단일 결합인 N-N이 되면서 회전이 자유로워져 Cis가 Trans로 이성질화 되는 메커니즘. 두 번째는 반전 메커니즘(Inversional mechanism)이다.<sup>[29]</sup> 이중 결합인 N=N중에 한 개의 질소가 전이 상태에서 sp 혼성 궤도함수를 가지게 되면서 치환기 위치가 Cis에서 Trans로 반전되는 이성질화 메커니즘. 회전 메커니즘은 용매효과가 이성질화 반응 속도에 영향을 미치는 반면에, 반전 메커니즘은 용매효과가 크지 않아 이성질화 반응 속도에 영향을 미치지 않는다.<sup>[29]</sup> 이와 같은 분자간의 거리 감소와 함께 아조벤젠은 쌍극자 모멘트, 굴절률 및 유전상수 등과 같은 물리, 화학적 성질 또한 변하게 된다.<sup>[30]</sup> 또한, Cis와 Trans는 각각 다른 흡광 특징을 가지고 있으므로 다른 색상을 나타내게 된다. 때문에 보통 아조벤젠은 광 이성화 현상을 통한 감광색성(Photochromism)을 나타내는 감광염료라고 한다. 이런 아조벤젠은 합성하기 쉽고 열적, 화학적으로 안정적인 특징을 가지고 있다.<sup>[28]</sup>

아조벤젠은 소거형 고밀도 기록재료로 사용된다. 초기 고분자 형태를 기억하여 자극에 의해 변형된 형태로부터 초기 모습으로 돌아오는 고분자인 형상기억 고분자(Shape memory polymer, SMP)로 아조벤젠이 사용된다.<sup>[31]</sup> 또한, 고밀도 마이크로 필름 재료

로도 사용되므로 소형 작동기(Micro-actuator)에 응용된다. 광-작동식인 액체 크리스털 탄성 중합체(Liquid crystalline elastomers, LCE)는 외부 자극에 의해 유발된 경우 높은 스트로크 기계적 작동이 나타난다.<sup>[32]</sup> 빛은 원격 에너지원이라고 한다. 편하고 정밀하게 조작이 가능한 액체 크리스털 탄성 중합체를 사용하여 빛에 의해 유도되는 작동기를 개발하였다. 액체 크리스털 탄성 중합체는 배터리, 전선 그리고 기어의 도움이 필요하지 않다는 장점이 있다. 광 굴곡 표면에 아조벤젠을 도포하여 사용한다. 광 굴곡 표면을 통해 유도되는 아조벤젠 부피 수축으로 굴곡의 방향 제어로 사용한다. [그림 2.6]은 액체 크리스털 탄성 중합체 필름이 장착된 광 구동 플라스틱 모터이다. [그림 2.6(a)]는 광 조사 위치와 회전 방향의 관계를 보여주는 모터 시스템의 개략도이다. 이 시스템의 동작 원리는 [그림 2.6(b)]에 나타난다. 자외선영역인 366 nm와 가시광영역인 >500 nm를 동시에 조사하면 필름의 부피가 변화하면서 모터의 회전에 따른 시간을 통해 측정하는 방법이다.<sup>[32]</sup> 최근에 과학기술정보통신부에서 빛에 의해 변형되는 물질의 멀티스케일 해석 기술을 개발하였다. 이때 사용된 재료는 아조벤젠이다. 광반응 물질인 아조벤젠의 특성을 이용하여 사람의 접근이 어려운 재해 지역에 원거리 소프트 로봇을 만든 연구이다. [그림 2.7]은 소프트 로봇의 외형이다. 소프트 로봇은 금속기반의 로봇이 아닌 유연한 성질을 가진 로봇을 의미한다. 소프트 로봇 안에 아조벤젠을 넣어 자외선과 가시광선을 번갈아 노출시켜 움직이게 하는 원리이다. 배터리나 전기 회로 없이 움직이는 것이 가능하여 산업 현장에서 사용된다.<sup>[33]</sup>

위와 같이 아조벤젠은 염료뿐 아니라 기록재료인 형상기억 고분자, 마이크로 필름을 이용한 소형 작동기, 원격 조절이 가능한 소프트 로봇 등에 많이 사용된다. 본 논문에서는 아조벤젠의 특성을 이용하여 광섬유 브래그 격자기반 자외선 센서를 개발하였다.



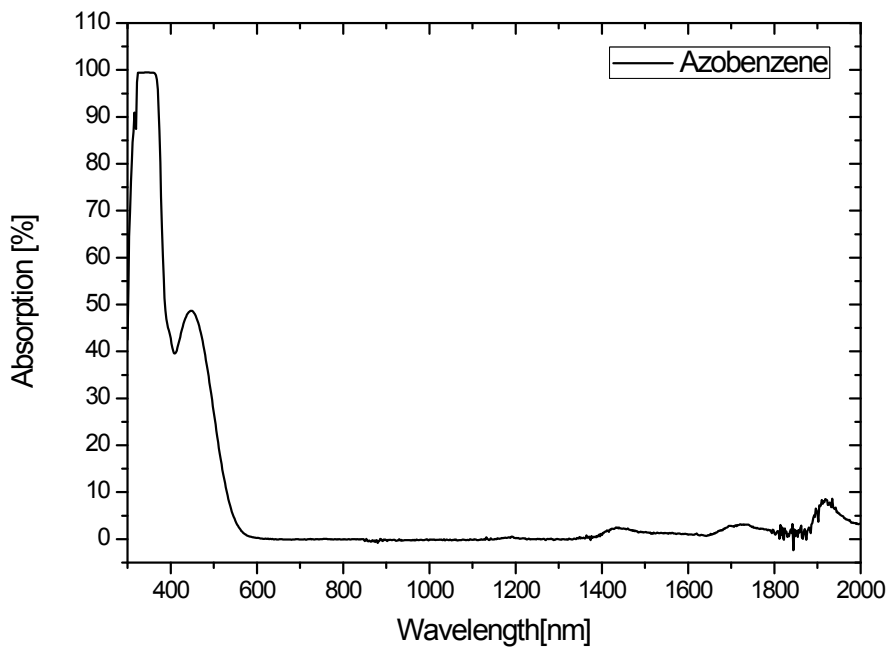
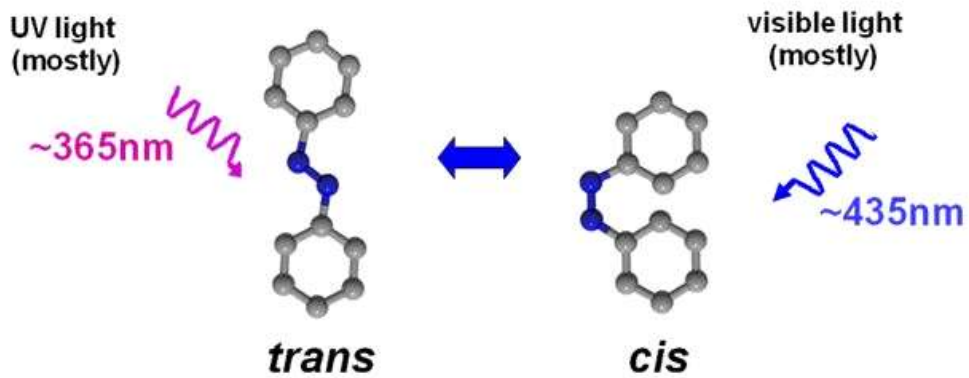
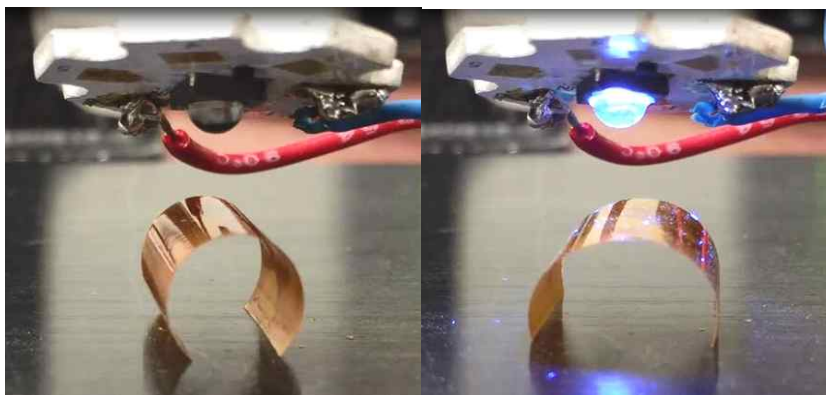


그림 2.4 최적화된 아조벤젠 흡수 스펙트럼



(a)



(b)

그림 2.5 아조벤젠 분자의 광학적 이성질체 형성 반응

(a) 화학 구조, (b) 화학 구조 변화 사진

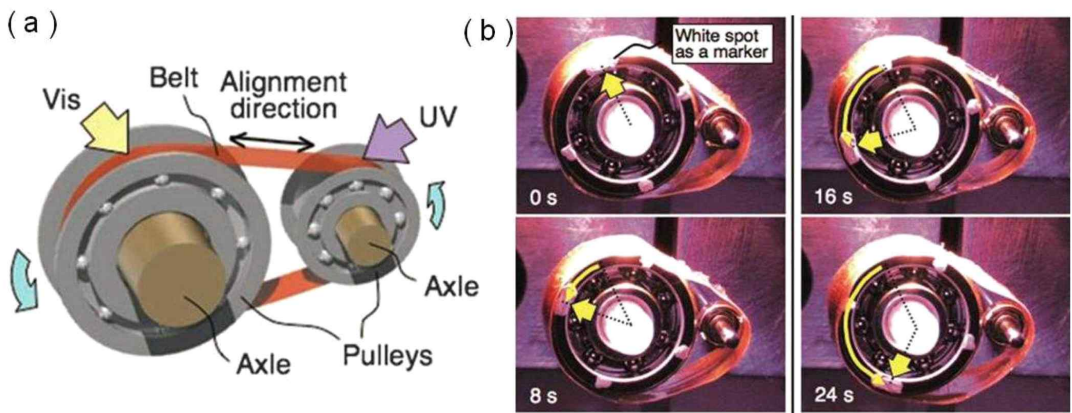


그림 2.6 액체 크리스털 탄성 중합체(LCE) 필름이 장착된 광 구동 플라스틱 모터<sup>[32]</sup> (a) 모터 개략도, (b) 모터 동작 원리



그림 2.7 아조벤젠을 이용한 소프트 로봇<sup>[33]</sup>

## 제3장 자외선 민감도 향상 및 센서의 패키징 실험

### 제1절 자외선 민감도 향상

#### 1. 새로운 아조벤젠의 코팅을 이용한 민감도 향상

기존의 자외선 센서는 식각된 광섬유 브래그 격자를 사용하기 때문에 제작과정에서 손상, 부러짐의 현상을 겪는 어려움이 존재했다. 또한 불화수소라는 위험성이 높은 물질을 사용함으로써 센서 제작시 인체에 유해성이 높아 식각 과정 없이 제작 가능한 자외선 센서에 대한 연구가 필요하다. 이때 기존의 민감도를 그대로 유지하거나 향상시키는 것이 중요하다.

실험에서는 선행연구에서 개발한 파장 분포가 1530 nm에서 1560 nm까지인 자외선 광센서 시스템 (Interrogation system)을 사용한다. 그 사진과 구체적인 사양을 [그림 3.1]과 [표 3.1]에 나타냈다. 자외선 광 센서 시스템인 Interrogation system에서 나오는 광을 광섬유 브래그 격자에 입사시킨 후 반사되는 광을 광순환기(Optical circulator)를 지나 회절필터(Diffraction filter)를 통과한 후 반사광의 중심파장을 측정한다. 아조벤젠 폴리머가 자외선 광을 흡수하게 되면 길이변화가 일어나 광섬유 브래그 격자에 장력을 유도하게 되고, 그에 따른 중심파장의 변화를 관찰하여 민감도를 측정한다.<sup>[21]</sup>

본 실험에서는 아조벤젠 구조를 가진 재료를 사용했다. 기존 실험에서 아조벤젠 폴리머는 아조벤젠 재료와 화합물을 가지고 안정된 화학구조를 가진 경화성 고분자 물질을 합성하는 복잡한 과정을 통해 얻었다. 하지만 본 연구에서는 시중에서 구입 가능한 아조벤젠 파우더 형태의 재료와 자외선 경화제를 단순히 혼합하여 아조벤젠 폴리머를 제조하였다. 실험은 아조벤젠 폴리머의 가역적인 길이변화 특성을 이용하여 광섬유 브래그 격자에 장력을 유도하는 원리로 진행된다. 장력으로 인해 이동된 파장 변화로 자외선을 검출하는 방법이다. 자외선에 따라 변하는 아조벤젠 특성을 이용한 광섬유 브래그 격자는 [그림 3.2]이다. 실험에서 사용된 아조벤젠 파우더 (Sigma-Aldrich Inc.)는 Azobenzene(98%), 4-Amino-1,1'-azobenzene-3,4'-disulfonic acid monosodium salt, 4-(Dimethylamino)azobenzene-4'-sulfonyl chloride, Azobenzene-4,4'-dicarbonyl dichloride, Azobenzene(36689) 등 5가지 종류를 사용하였다. 5가지 아조벤젠 폴리머 파우더의 이름은 위의 아조벤젠 폴리머 파우더의 화학식은 각각  $C_{12}H_{10}N_2$ ,



(a)



(b)

그림 3.1 자외선 광센서 시스템의 패키지 구성 (a) Front panel, (b) Rear panel

Parameter	Value
Number of channels	Ch. 4
Wavelength range	1530 ~ 1560 nm
Wavelength measurement resolution	1 pm
Wavelength measurement accuracy	10 pm
Frequency	Max. 2.5 K Hz
Power supply	100 to 240 at 50/60 Hz V AC

표 3.1 자외선 광센서 시스템의 사양

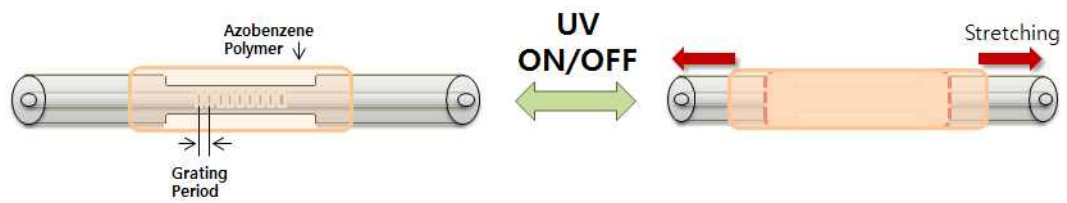


그림 3.2 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자의 자외선에 따른 부피 변화

$C_{12}H_{10}N_3NaO_6S_2$ ,  $C_{14}H_{14}ClN_3O_2S$ ,  $C_{14}H_8Cl_2N_2O_2$ ,  $C_{12}H_{10}N_2$ 이며 분자량은 182,22 g/mol, 379,34 g/mol, 323,8 g/mol, 307,13 g/mol, 182,22 g/mol이다. 각 파우더의 특성을 정리한 내용은 [표 3.2]와 같다.<sup>[34]</sup> 이후 실험부분에서 쉽게 설명하기 위해 아조벤젠 파우더의 이름을 순서대로 Powder 1, Powder 2, Powder 3, Powder 4, Powder 5로 명칭하였다. 파우더와 혼합시키는 자외선 경화제(Luvatix ADM Inc.)는 모델 PC-375, PC-400, PC-410, LP1611 그리고 LS2211 등 5가지 종류를 사용하였다. PC-375, PC-400, PC-410, LP1611는 1차 코팅 경화제이고 LS2211은 2차 코팅 경화제로 사용된다. 각 경화제의 점성은 각각 7,500 cPs, 1,500 cPs, 6,300 cPs, 5,300 cPs, 4,500 cPs이고, 자외선 경화 후 굴절률은 1.382, 1.395, 1.414, 1.495, 1.524이다. 경화제의 특성을 정리한 내용은 [표 3.3]와 같다. 이후 실험부분에서 쉽게 설명하기 위해 경화제의 이름을 순서대로 Agent 1, Agent 2, Agent 3, Agent 4, Agent 5로 명칭하였다.

본 실험에서는 자외선 광을 흡수하면 가역적인 길이변화 특성을 나타내는 아조벤젠 폴리머 파우더 5가지 종류와 그러한 폴리머를 경화시켜주는 경화제 5가지 종류를 혼합하여 총 25가지 아조벤젠 폴리머 혼합물을 제작하였다. 이 혼합물의 비율은 선행연구에서 사용한 아조벤젠 재료 혼합비율인 5 wt.%를 참고하여 아조벤젠 재료 0.07 g과 경화제 1.33 g을 혼합하여 제조했다. 이 경우 아조벤젠의 종류에 따라 경화제의 경화 특성을 약화시키는 것을 관찰했다. 25가지 아조벤젠 폴리머 혼합물의 경화 유무와 자외선 민감도 특성을 확인하는 실험을 진행했다. 경화를 위해 사용한 자외선램프는 EFOS Acticure사의 A4000 UltraCure모델이며 그 세기와 파장 폭은 각각 100 W와 250 nm~450 nm을 가진다. 자외선램프[그림 3.3]의 스위치 부분을 LabVIEW 프로그램과 연동하여 실행시키고 이를 광센서 시스템을 통해 데이터를 저장하게 된다. 사용한 LabVIEW 프로그램은 [그림 3.5]에서 볼 수 있다. 이는 자외선램프를 50분 동안 켜지게 해주는 프로그램이다. 실험은 [그림 3.6]과 같이 구성하고, 혼합물은 Microscope slides ( $76 \times 26 \times 1\text{mm}$ )의 크기를 넘어가지 않는 원형크기로 설정하고 자외선램프 높이 8 cm에서 자외선을 노출시켜 50분간 경화를 시켰다. 입사된 자외선 광세기는 파장 범위가 340 nm~470 nm인 자외선검출기(UV Radiometer UV-M03A의 UV-42, ORC Inc.)로 측정하였으며, 결과는  $0.916\text{ mW/cm}^2$ 이다. 실험을 통해 25가지 혼합물 중에 10가지 혼합물이 자외선에 경화가 일어나고 나머지는 경화되지 않는 것을 확인하였다. 경화제 종류에 관계없이 Powder 2와 Powder 3이 포함된 혼합물만 경화되었다.[표 3.5]



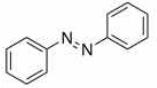
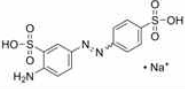
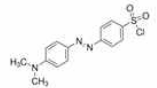
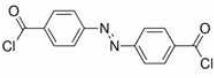
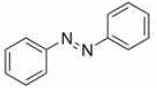
	Chemical formula	Molecular weight	Form	Color	Chemical structure
1	$C_{12}H_{10}N_2$	182,22 g/mol	Crystalline	Red	
2	$C_{12}H_{10}N_3NaO_6S_2$	379,34 g/mol	Solid	-	
3	$C_{14}H_{14}ClN_3O_2S$	323,8 g/mol	Crystalline	Dark red	
4	$C_{14}H_8Cl_2N_2O_2$	307,13 g/mol	Solid	-	
5	$C_{12}H_{10}N_2$	182,22 g/mol	Crystalline	Red	

표 3.2 5가지 새로운 아조벤젠 폴리머 특성<sup>[34]</sup>

	<b>PC-375</b>	<b>PC-400</b>	<b>PC-410</b>	<b>LP-1611</b>	<b>LS-2211</b>
Viscosity	7,500 cPs	1,500 cPs±200	6,300 cPs±500	5,300 cPs±500	4,500 cPs±500
Refractive index, liquid	1.379	1.384±0.005	1.405±0.005	1.484±0.005	1.51±0.005
Refractive index, cured	1.382	1.395±0.005	1.414±0.005	1.495±0.005	1.524±0.005
Secant modulus at 2.5% strain	107 MPa	-	20~30 kgf/mm <sup>2</sup>	0.1~0.15 kgf/mm <sup>2</sup>	700~900 MPa
Tensile strength at break	10 MPa	-	1~2 kgf/mm <sup>2</sup>	0.06~0.08 kgf/mm <sup>2</sup>	20~30 MPa
Elongation	73 %	-	15~25 %	100~130 %	10~20 %
Glass transition temp	63 °C	78±5 °C	90 °C	-21 °C	58 °C

표 3.3 5가지 경화제 특성



(a)



(b)

그림 3.3 자외선램프 구성 (a) Front panel, (b) Rear panel

UV lamp specifications	
Output power	100 W
Module life	1000 hours
Input voltage	100-120 VAC/200-224 VAC 50-60 Hz
Lamp voltage	+22.0 V at 4.5 A
Current	3A Max
Ripple current to lamp	< 1 %

표 3.4 자외선램프의 사양

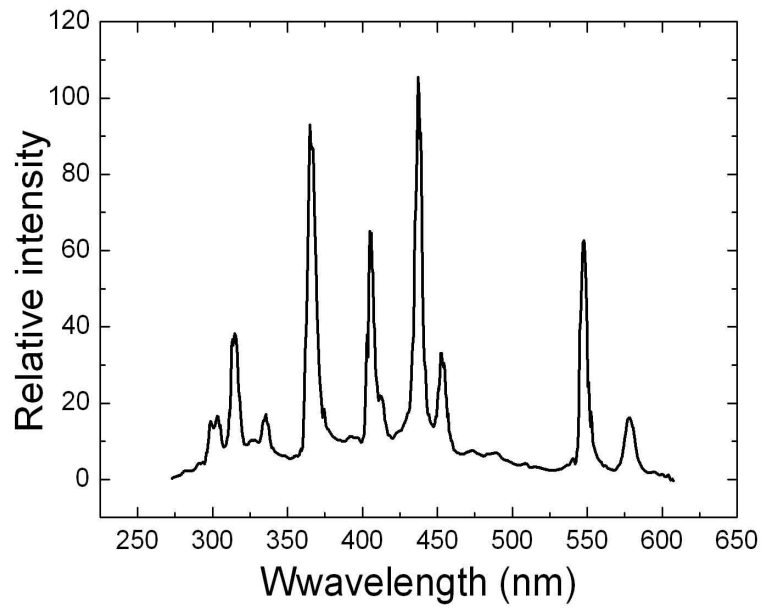


그림 3.4 자외선램프의 스펙트럼<sup>[20,21]</sup>

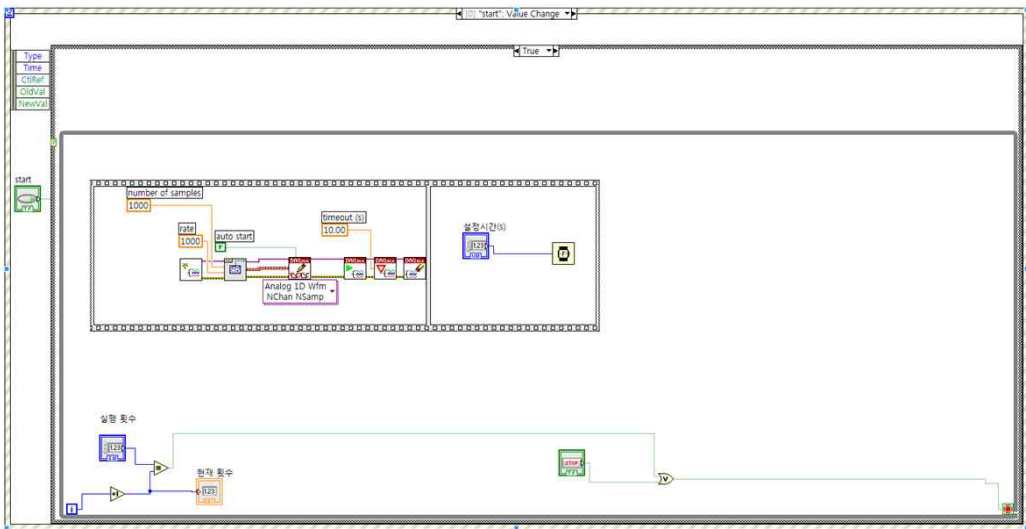


그림 3.5 경화작업에 필요한 LabVIEW 프로그램

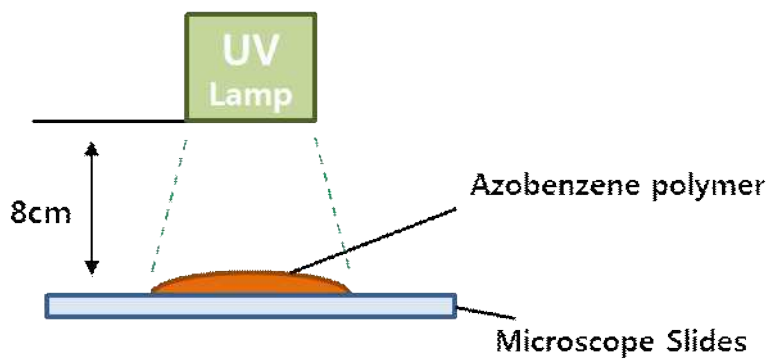


그림 3.6 25가지 아조벤젠 혼합물의 경화 유무 실험 구성

	Powder 1	Powder 2	Powder 3	Powder 4	Powder 5
Agent 1	X	O	O	X	X
Agent 2	X	O	O	X	X
Agent 3	X	O	O	X	X
Agent 4	X	O	O	X	X
Agent 5	X	O	O	X	X

표 3.5 아조벤젠 파우더와 경화제 혼합물 25가지 경화 유무

이후 [표 3.6]에서 알 수 있는 경화가 가능한 10가지 혼합물만을 가지고 실험을 수행하였다. 앞에서 제작된 경화성 혼합물을 광섬유 브래그 격자에 코팅하여 자외선 센서를 제작한다. 광섬유 격자에 코팅된 아조벤젠 지름은 0.5 mm이고, 코팅된 길이는 3 cm이다. 여기서 사용된 광섬유 브래그 격자는 중심파장과 대역폭은 각각 1547 nm과 0.23 nm이고, 반사율은 10 dB이상으로 제작하였다. 이 광섬유 브래그 격자는 SJPhotonics사에서 구입했다. 제작된 자외선 광섬유 격자 센서를 광세기가 0.916 mW/cm<sup>2</sup>인 자외선 광으로 50분간 경화하여 제작하였다. 제작된 자외선 센서를 Interrogation 시스템에 설치하여 [그림 3.7]와 같이 실험 구성을 하였다. 이 구성은 측정 시스템에서 멀리 떨어져 있는 감지 지점의 원격 모니터링의 왕복 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 여기서 집광렌즈( LJ4107-UV, Thorlabs Inc.)를 사용하여 누수되는 자외선을 센서로 집광시켜 측정 효율을 향상시켰다. 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자를 집광렌즈의 초점거리인 24.4 mm에 위치시키고 자외선을 60초 간격으로 3번 반복해서 노출시켰다. 이때 입사된 자외선 광세기는 2.5 mW/cm<sup>2</sup>였다. 그 결과 [그림 3.8]에서와 같이 Powder 2와 Agent 5의 혼합물이 코팅된 광섬유 브래그 격자의 중심파장이 2.5 nm로 가장 많이 움직였으며 이것으로 이 재료의 자외선 민감도가 제일 높다는 것을 알 수 있다. 또한 Powder 2와 Powder 3의 실험결과를 비교하면 Agent 5 경화제와 혼합된 재료에서 모두 민감도가 높은 것을 확인하였다. 이것으로 본 연구에서 사용한 다섯 가지 경화제 중에 Agent 5가 자외선 센서의 감도를 향상시키는 데 효과적인 경화제라는 것을 확인하였다. [그림 3.9]은 Powder 2와 Agent 5의 혼합물의 흡수 스펙트럼을 보여주는데, 파장이 약 400 nm 이하에서 대부분 흡수되는 것을 확인할 수 있다.

위 실험결과를 통해 Powder 2와 Agent 5 혼합물이 민감도가 가장 높다는 것을 확인하였다. 이 혼합물을 사용하여 자외선 광세기에 따른 파장 변화를 측정하였다. 이는 자외선 광세기가 일정 간격으로 높아지면 파장 변화도 일정하게 변하는지를 알아보는 실험이다. 모든 실험의 자외선 광세기는 측정 파장 범위가 240 nm에서 470 nm인 자외선 검출기를 사용하였다. 자외선 검출기에 대한 사진과 사양은 [그림 3.10]과 [표 3.7]에서 확인할 수 있다. 또한 실험에 자외선 광을 효율적으로 사용하기 위해 자외선 집광렌즈를 사용하였다. 자외선 센서로 부터 자외선램프의 높이를 조정하여 일정 자외선 광세기를 맞춘 후, 자외선 광센서 시스템(Interrogation system)을 이용하여 광센서



영역에서 되돌아오는 빛의 중심파장 변화를 측정하여 자외선을 감지하였다. 일정 간격의 자외선 광세기는 340 nm에서 470 nm 파장 범위를 가진 자외선검출기(UV-42)를 통해 각각 1 mW/cm<sup>2</sup>, 1.5 mW/cm<sup>2</sup>, 2 mW/cm<sup>2</sup> 그리고 2.5 mW/cm<sup>2</sup>으로 설정하였다. [그림 3.11]을 보면 일정 간격의 자외선 광세기에 따라 선형적으로 파장이 변화하는 것을 알 수 있다. 자외선에 따른 중심파장 반응이 선형성을 가진 우수한 자외선 센서인 것을 확인하였다.

Powder 2와 Agent 5 혼합물인 아조벤젠 폴리머가 코팅된 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자 자외선 센서와 선행연구에서 제조된 아조벤젠 폴리머가 코팅된 외부 식각 광섬유 브래그 격자 자외선 센서의 자외선에 대한 반응을 비교해 보았다. [그림 3.12] 이 두 종류의 광섬유 브래그 격자의 최대 파장 이동량은 거의 동일하지만, 식각된 광섬유 브래그 격자는 식각되지 않은 격자 보다 빠른 자외선 광 응답 특성을 보였다. 여기서 광감도(Sensitivity)는 자외선에 의한 최대 파장변화를 자외선 광세기로 나눈 값으로 정의한다. 서로 다른 재료가 코팅된 광섬유 브래그 격자의 식각 유무에 따른 이 자외선 센서의 민감도는 각각 0.92 nm/mW/cm<sup>2</sup>와 0.96 nm/mW/cm<sup>2</sup>이다. 외부 식각될 경우 민감도가 급격히 증가하는 사실을 감안하면 본 연구에서 새롭게 개발한 아조벤젠 폴리머의 자외선 민감도가 우수한 것을 알 수 있다. 식각을 하지 않은 광섬유 브래그 격자에 기존 아조벤젠 물질을 코팅한 경우 민감도가 0.1 nm/mW/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 이것과 비교하면 Powder 2와 Agent 5 혼합물을 코팅할 경우 외부 식각이 없음에도 민감도가 9배 이상 향상되었다. 따라서 자외선에 의해 구조변화의 민감도가 높은 재료 개발을 통해 광섬유 격자의 HF 식각과정을 줄일 수 있어 작업자의 안전성 확보하고, 제작 과정의 간편화가 가능하고, 외부 식각된 광섬유격자의 내구성 문제 해결 하였다.



Powder	Product name
Azobenzene powder 2	4-Amino-1,1'-azobenzene-3,4'-disulfonic acid monosodium salt
 <p data-bbox="445 948 973 981">Agent 1, Agent 2, Agent 3, Agent 4, Agent 5</p>	
Azobenzene powder 3	4-(Dimethylamino)azobenzene-4'-sulfonyl chloride
 <p data-bbox="445 1186 973 1219">Agent 1, Agent 2, Agent 3, Agent 4, Agent 5</p>	

표 3.6 아조벤젠 파우더와 경화제 혼합물 10가지 정보

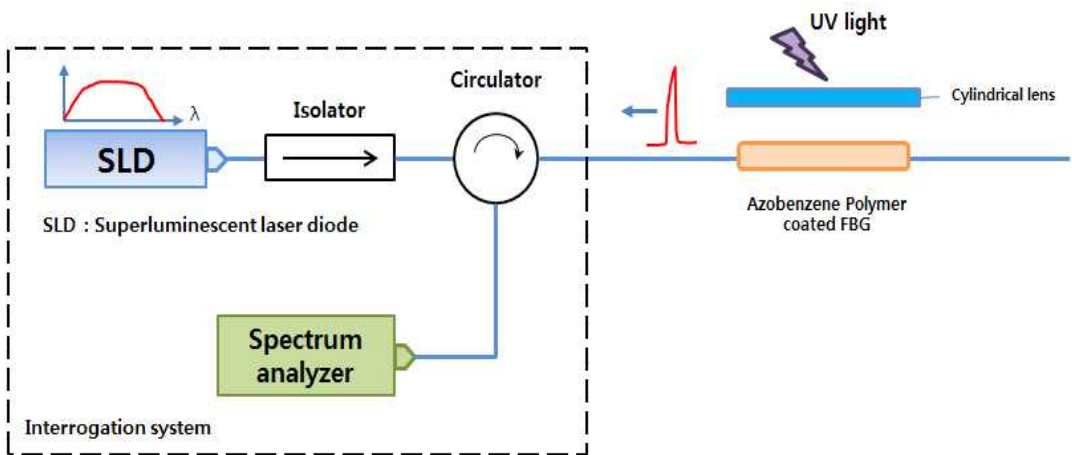


그림 3.7 아조벤젠을 이용한 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 측정 실험 구성

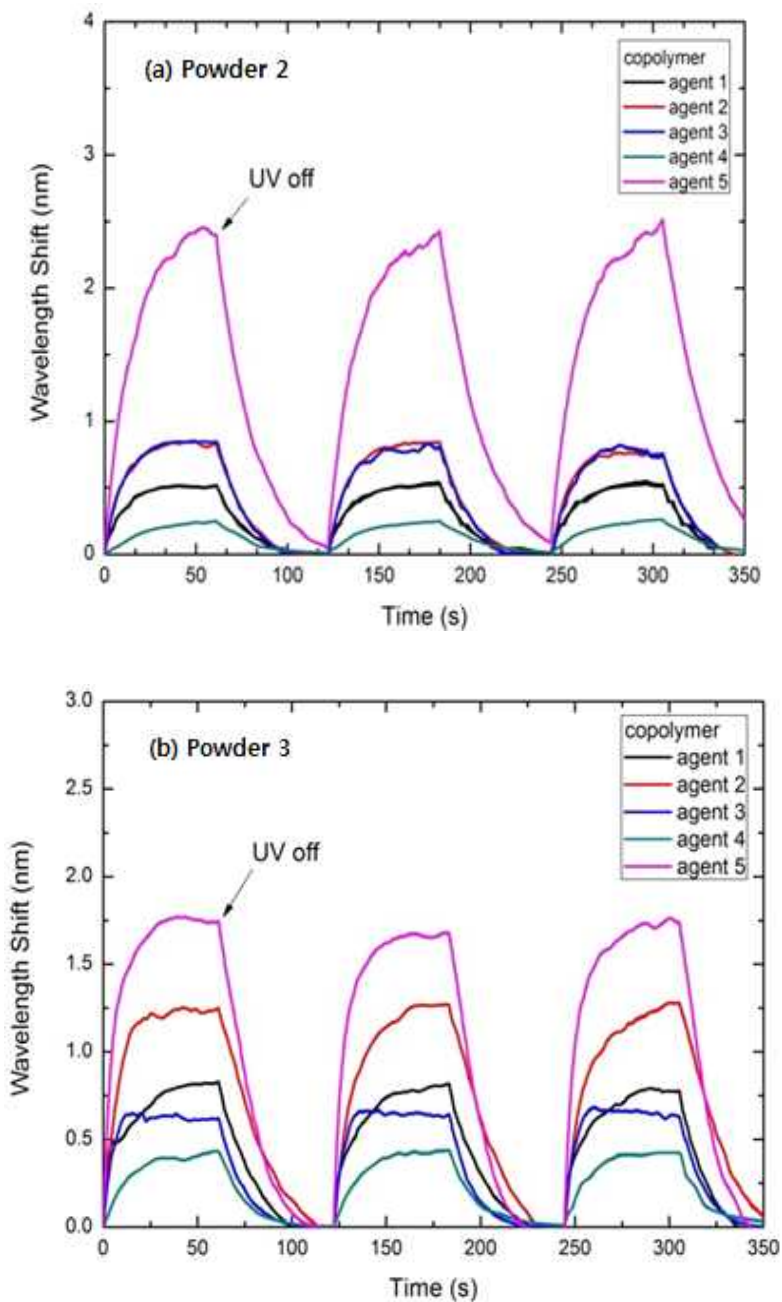


그림 3.8 10가지 아조벤젠 혼합물의 파장 이동 그래프  
 (a) Powder 2, (b) Powder 3

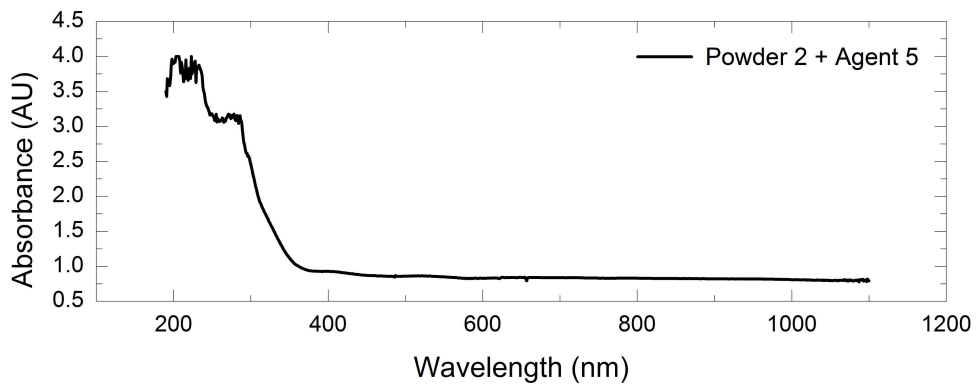


그림 3.9 Powder 2와 Agent 5 흡수 스펙트럼



그림 3.10 자외선 검출기의 구성

Parameter	Value
Measurement wavelength range	UV-25 : 240 ~ 270 nm UV-35 : 310 ~ 385 nm UV-42 : 340 ~ 470 nm
Intensity measurement range	0.001 ~ 50.00 mW/cm <sup>2</sup> (without filter) X50 : 0.1 ~ 50.0 mW/cm <sup>2</sup> X10 : 0.01 ~ 10.00 mW/cm <sup>2</sup> X1 : 0.001 ~ 1.000 mW/cm <sup>2</sup> X0.1 : 0.0001 ~ 1.0000 mW/cm <sup>2</sup>
UV Energy measurement range	0.001 ~ 19999 mJ/cm <sup>2</sup> X50 : 0.1 ~ 19999 mJ/cm <sup>2</sup> X10 : 0.01 ~ 19999 mJ/cm <sup>2</sup> X1 : 0.001 ~ 19999 mJ/cm <sup>2</sup>
Power supply	AC input 100 ~ 240 V DC output 5 V 1000 mA
Dimming filter	1/10, 1/20, 1/50
Operating temperature range	Main unit : 0 ~ 40 °C Photodetector : 0 ~ 60 °C Sensor cord : 0 ~ 80 °C

표 3.7 자외선 검출기의 사양

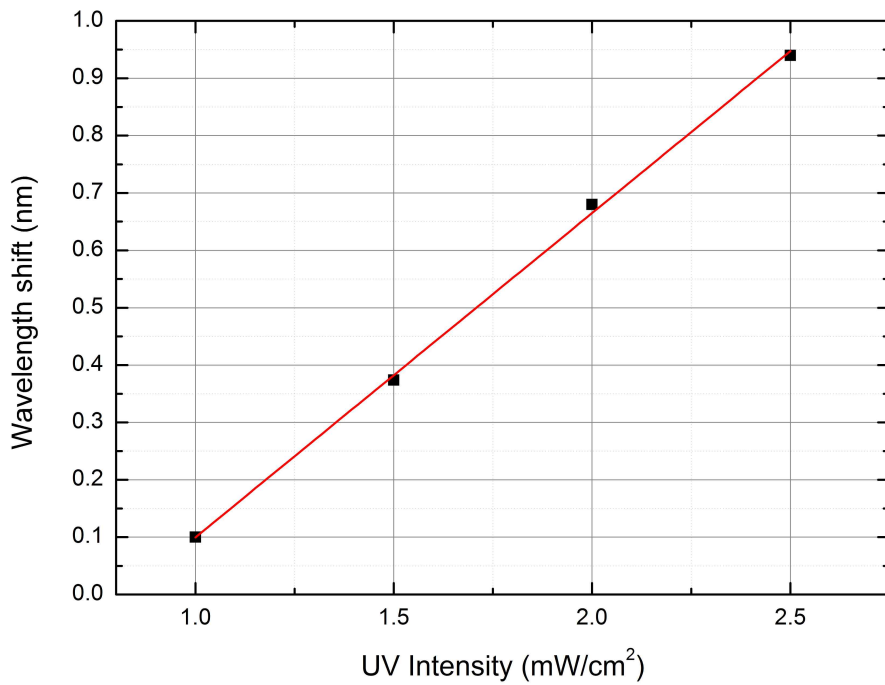


그림 3.11 자외선 광세기에 따른 최대 파장 이동량 그래프

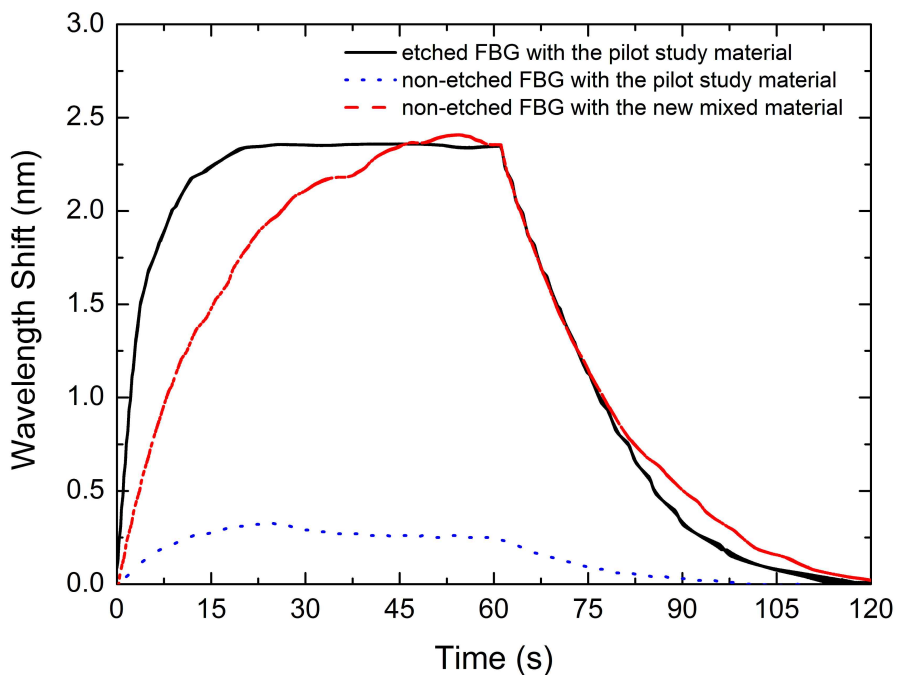


그림 3.12 선행연구와 기존 연구의 차외선 응답 비교



## 2. 자외선에 대한 경화제 반응 및 가시광선 반응 비교

아조벤젠이 혼합되지 않은 경화제 자체만 가지고 자외선 민감도를 조사하는 실험을 수행하였다. 이것을 위해 아조벤젠을 혼합하지 않은 순수한 경화제 Agent 5 (LS2211)을 광세기  $0.916 \text{ mW/cm}^2$ 인 자외선 LED로 동일한 광섬유 브래그 격자에 코팅하였다. 이것을 [그림 3.7]과 동일한 실험구성으로 자외선 민감도를 관찰하였다. [그림 3.13]은 경화제만 코팅한 광섬유 격자를 자외선에  $2.5 \text{ mW/cm}^2$ 의 광세기로 30초 노출시켜 측정한 결과를 아조벤젠 Powder 2와 동일한 경화제(Agent 5)를 혼합하여 코팅한 광섬유 격자의 자외선 민감도 결과를 비교하여 보여준다. 경화제만 사용했을 경우 자외선에 의한 파장 변화는 약  $0.45 \text{ nm}$ 였고, 아조벤젠 혼합물의 경우는 약  $2.1 \text{ nm}$ 였다. 이것으로 이 혼합물에서 아조벤젠 재료만의 파장 변화 효과는 약  $1.7 \text{ nm}$ 인 것을 확인하였다. 이 실험을 통해 아조벤젠 혼합물에서 아조벤젠뿐만 아니라 사용된 (자외선)경화제도 자외선을 흡수해서 일부의 부피변화를 보이는 것을 확인하였다. 하지만 이 부피변화의 원인이 자외선 흡수에 의한 경화제 내부의 발열반응으로 인한 열팽창 계수의 변화로 인한 것이 아닌지 추후 연구가 필요하다.

또한, 산업현장에서 실제로 사용하였을 때 자연광에서 들어오는 가시광선에 의한 반응하는지를 확인하기 위해 아조벤젠 혼합물이 코팅된 광섬유 브래그 격자에 자외선을 노출하였을 때와 가시광선을 노출하였을 때 반응을 실험적으로 비교해 보았다 여기서 입사 광선에 대한 파장 이동은 파장 측정범위가  $600 \text{ nm}$ 에서  $1750 \text{ nm}$ 인 광 스펙트럼 분석기(Optical spectrum analyzer, OSA (AQ6319 ANDO Inc.))를 사용하였다. OSA의 사진과 사양은 [그림 3.14]과 [표 3.8]에 나타났다. 자외선 광은 앞에서 실험한 자외선 램프를 사용하였으며, 가시광선은 파장 범위가  $360 \text{ nm}$ 에서  $2600 \text{ nm}$ 인 빛을 방출하는 광대역 광원(SLS201L Thorlabs Inc.)을 얻었다. 이 광대역 광원의 사진과 사양은 [그림 3.15]과 [표 3.9]를 통해 알 수 있다. [그림 3.16]은 자외선에 의한 브래그 격자 광섬유의 파장이  $1.16 \text{ nm}$  변화하지만, 가시광선에 노출이 되면 이것의 파장 변화가 거의 없었다. 이것으로 보아 아조벤젠이 가시광선에는 반응하지 않고, 높은 에너지를 갖는 자외선 광에만 반응함을 확인하였다. 결론적으로, 아조벤젠 혼합물을 사용한 자외선 센서가 현장에서 사용되어도 외부에서 들어오는 가시광선에는 영향이 없어서 자외선 센서를 사용하는데 전혀 문제가 되지 않는 것을 확인하였다.

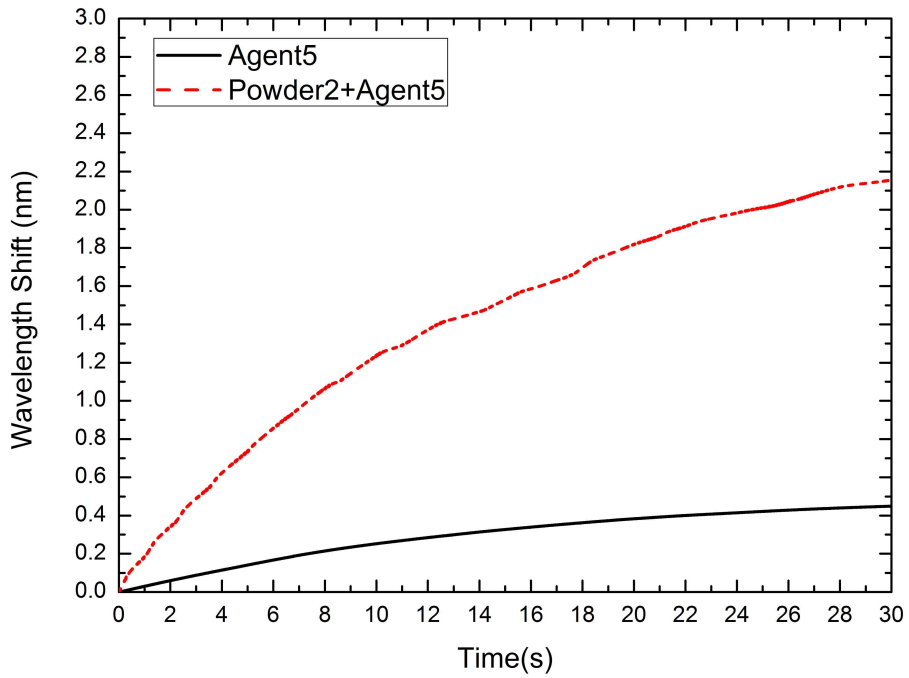


그림 3.13 Agent 5와 새로운 아조벤젠 혼합물 파장 변화 비교



(a)



(b)

그림 3.14 광 스펙트럼 분석기의 구성 (a) Front panel, (b) Rear panel

Parameter	Value
Measurement wavelength range	600 ~ 1750 nm
Wavelength accuracy	$\pm 0.02$ nm (1520 ~ 1580 nm) $\pm 0.04$ nm (1580 ~ 1620 nm) $\pm 0.05$ nm (600 ~ 1750 nm)
Wavelength linearity	$\pm 0.01$ nm (1520 ~ 1580 nm) $\pm 0.02$ nm (1580 ~ 1620 nm)
Resolution accuracy	$\pm 5$ % (1300 ~ 1650 nm)

표 3.8 광 스펙트럼 분석기의 사양

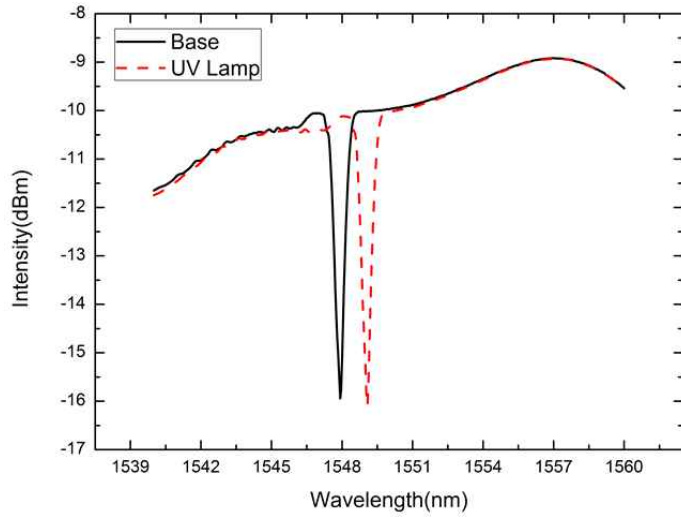


SLS201L

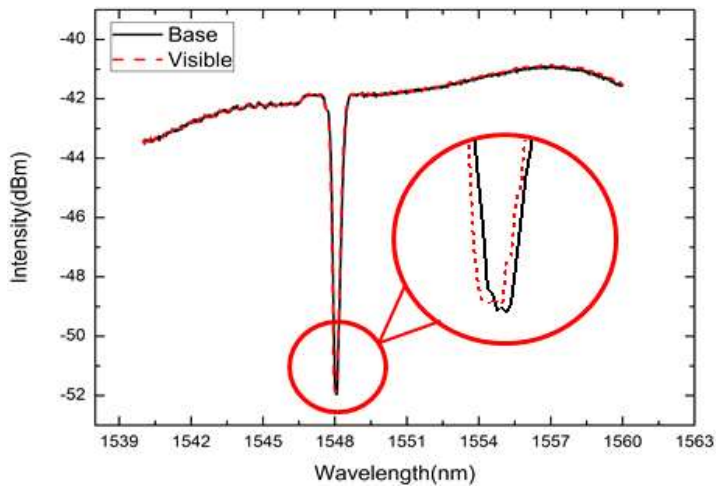
그림 3.15 가시광선으로 사용한 광대역 광원 구성

Parameter	Value
Wavelength range	360 ~ 2600 nm
Peak wavelength	1000 nm
Color temperature	2796 K
Bulb power	9 W
Free space output power	500 mW
Collimated output power	60 mW
Output power stability	<0.05 %
Power supply	90 ~ 264 VAC, 47 ~ 63 Hz
Operating temperature	0 ~ 45 °C

표 3.9 가시광선으로 사용한 광대역 광원 사양



(a)



(b)

그림 3.16 자외선과 가시광선에서의 광섬유 브래그 격자 파장변화 비교  
 (a) 자외선, (b) 가시광선

### 3. 장력을 이용한 민감도 향상

장력(Tension)은 끈이나 줄의 각 부분에 걸리는 힘의 크기, 단면에 수직 응력에 관계된 힘 또는 물체를 양쪽에서 당겨지는 단위면적당의 힘을 뜻한다.<sup>[35]</sup> 이번 실험에서는 아조벤젠 혼합물이 코팅될 때 광섬유 브래그 격자에 인가된 장력은 이 자외선 센서의 민감도에 영향을 주는지 여부를 확인하였다. 광섬유 브래그 격자의 양 끝단을 고정하고 양쪽으로 잡아당겨 광섬유 브래그 격자에 장력을 인가하였다.

광섬유 브래그 격자에 장력을 인가하는 실험 구성은 [그림 3.17]과 같다. 실험은 Fiber holder를 사용하여 광섬유 브래그 격자의 양 쪽 끝단을 고정하고 한 쪽 끝단만 움직임으로써 일정한 장력을 가하게 만든 뒤, 변형률이 0.6 %일 때 고정한다. 테프론 몰드에 Powder 2와 Agent 5 혼합물인 아조벤젠 혼합된 경화제를 일정량 부어 자외선 광 ( $0.916 \text{ mW/cm}^2$ )을 이용해 50분간 경화시켰다. 비교를 위해 장력이 인가되지 않고 동일한 기능성 폴리머를 코팅한 광섬유 브래그 격자를 같은 방법으로 제작하였다. 자외선 민감도 실험은 파장 측정 범위가 1530 nm에서 1560 nm인 실험실에서 개발한 Interrogation system 기반인 자외선 광센서 시스템을 이용해서 진행하였다. [그림 3.18]에서 실험 결과를 확인할 수 있듯이 장력을 인가되지 않은 광섬유 브래그 격자보다 장력을 인가한 광섬유 격자에서 약 0.2 nm으로 자외선 광에 의한 파장변화가 두 배 이상 발생하는 것을 확인하였다. 이것으로 장력을 인가할 경우 자외선에 대한 민감도가 증가하는 것을 확인하였다. 그 원인을 분석하기 위해 아래 실험을 수행하였다.

[그림 3.19]는 장력 인가를 포함한 광섬유 브래그 격자의 코팅 과정에서 발생하는 이 광섬유 격자의 중심 파장 변화를 보여준다. 범례의 (1) 'FBG'는 아조벤젠 혼합물을 코팅하지 않았을 때이고, (2) 'Tension'은 광섬유 브래그 격자에 장력을 가해준 뒤 측정값이다., 그리고 (3) 'FBG on module'은 테프론 몰드에 광섬유 브래그 격자를 고정하고 아조벤젠 혼합물을 코팅한 후 측정값이고, (4) 'Free'는 코팅된 광섬유 격자를 테프론 몰드에서 분리한 후 측정값을 나타낸다. 장력을 인가하지 않고 아조벤젠 혼합물 코팅을 진행한 광섬유 브래그 격자에서 (1), (3), (4)에서 중심 파장 변위 값은 (1)일 때를 기준으로 각각 0 nm, 0.12 nm, -0.24 nm이다. (다시 말해 광섬유 브래그 격자 자체의 중심 파장을 기준 값으로 하여 각 파장 변위를 계산한 값이다.) 0.12 nm까지 장파장으로 이동했던 것이, 몰드에서 분리할 경우 -0.24 nm까지 파장이 단파장으로 이동

한 것을 확인할 수 있다. 그 차이 값은 0.36 nm이다. 이것은 경화에 의해 코팅 재료의 수축에 의해 격자의 간격이 다소 줄어드는 효과를 가진 것으로 보인다. 반면에 장력을 인가한 후 코팅한 광섬유 브래그 격자에 대해서는 (1), (2), (3), (4)의 경우에 대해 각각 0 nm, 1.32 nm, 0.48 nm, -0.12 nm이다. 장력을 인가할 경우 약 1.32 nm까지 격자 간격의 증가에 따른 장파장으로 이동했다가 자외선 경화 후 0.48 nm까지 줄어들고 다시 몰드와 분리하면 -0.12 nm까지 단파장으로 이동한다. 그 차이는 1.44 nm로 장력이 존재하지 않을 때에 비해 약 4배 증가한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 자외선 경화된 코팅 재료는 광섬유 브래그 격자의 간격을 일부 수축시키는 역할을 하는데, 경화 전에 장력을 인가하면 잔류응력을 더 많이 유도해서 자외선에 들어올 때 광섬유 브래그 격자의 간격이 쉽게 변하게 하는 역할을 해주는 것으로 보인다.

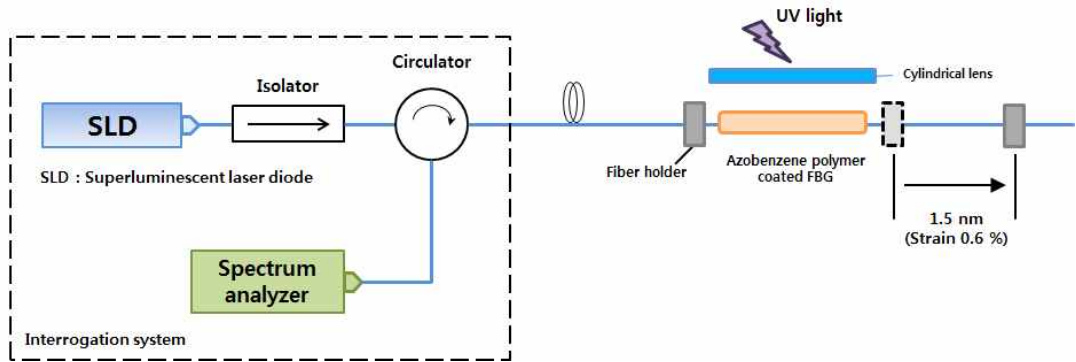


그림 3.17 자외선 센서의 감도에 대한 장력 효과 실험 구성



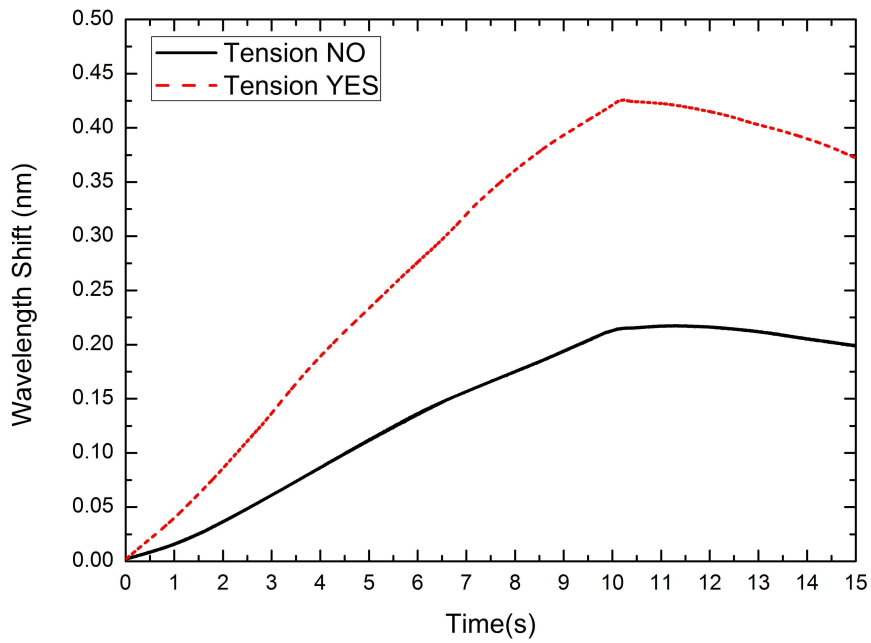
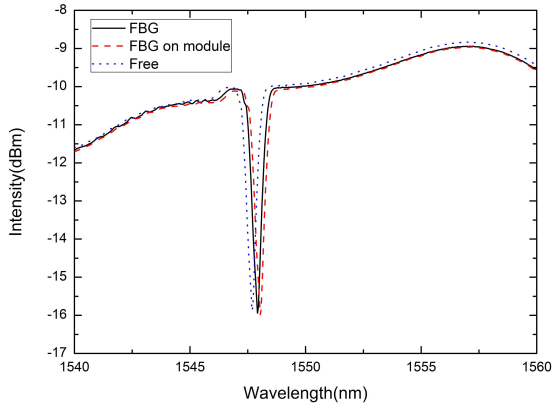
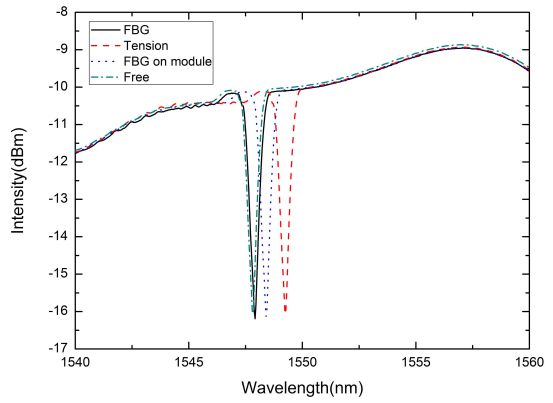


그림 3.18 장력에 의한 광섬유 브래그 격자 센서의 파장 이동결과



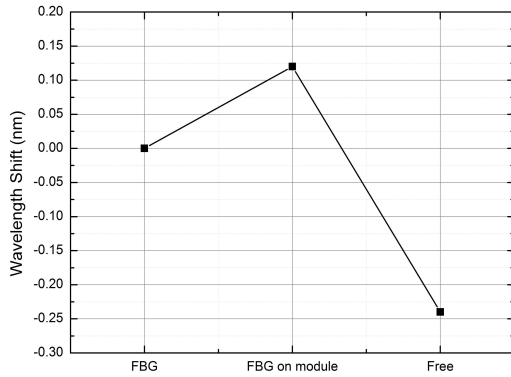
(a) 장력이 없는

광섬유 브래그 격자에 대한 OSA 측정



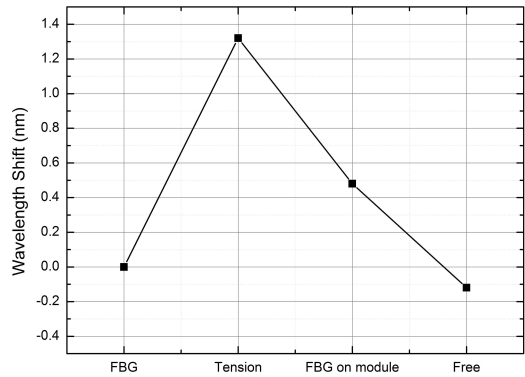
(b) 장력이 있는

광섬유 브래그 격자에 대한 OSA 측정



(c) 장력이 없는

광섬유 브래그 격자에 대한 파장 변화



(d) 장력이 있는

광섬유 브래그 격자에 대한 파장 변화

그림 3.19 장력 유무에 따른 실험 결과

## 제2절 센서 패키징 및 응용

### 1. Glass tube를 사용한 패키징

일반적으로 패키징(Packaging)은 집적회로를 밖에서부터 보호하기 위해 적합한 매개물로 싸는 것을 뜻한다.<sup>[36]</sup> 아조벤젠 폴리머 코팅 부분이 공기 중에 노출되어 있어서 안정성과 성능 지속의 문제점이 있기 때문에 외부로부터 이것을 보호해야 한다. 또한, 광소자가 휘거나 약한 충격에도 변형이 쉽게 발생하기 때문에 기능성 폴리머 코팅을 물리적으로 보호해야 한다. 이것을 위해 여기서는 자외선이 투과되는 튜브 형태의 유리관을 사용하여 폴리머 코팅된 광섬유 브래그 격자의 안정성을 향상시키는 연구를 수행하였다.

개발된 기능성 폴리머 재료인 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서의 보호를 위한 자외선 투과 마이크로 유리관으로 패키징을 진행했다.

자외선 투과 특성이 Borosilicate, Clear-fused quartz, Synthetic fused silica의 서로 다른 세 종류의 재료로 제작된 유리관 (VITROCOM Inc.)을 사용하였다. 이 유리관들은 외경과 내경은 각각 2.4 mm와 2.0 mm로 동일하다. Borosilicate와 Clear-fused quartz 유리관의 밀도는 각각  $2.23 \text{ gcm}^{-3}$ 와  $2.2 \text{ gcm}^{-3}$ 이며, 이들의 Poisson's ratio는 각각 0.2 와 0.17이다. 이 세 종류의 유리관에 대한 자외선 투과도와 자세한 정보는 [그림 3.20]에 정리했다. 이 세 종류의 유리관을 쉽게 구분하기 위해 Borosilicate 유리관은 'B-glass', Clear-fused quartz 유리관은 'Q-glass', 그리고 Synthetic fused silica 유리관은 'S-glass'라고 표시한다. [그림 3.20(C)]의 투과 스펙트럼을 보면 250 nm이하 단파장 영역 투과도가 S-glass가 가장 좋고, 이어서 Q-glass, B-glass 순으로 높다. 자외선 투과도가 높은 S-glass 유리관을 사용할 경우 이 광섬유 브래그 격자의 자외선 반응도가 다른 두 유리관에 비해 높을 것이라고 예상하였다. 실험은 [그림 3.21]과 같이 세 종류의 유리관 안에 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자를 넣고 자외선 민감도를 관찰하였다. 유리관이 곡면을 가지고 있기 때문에 [그림 3.22]처럼 자외선 광이 집광되거나 단순히 분산되어 입사될 때가 그 민감도가 다른 게 작용하였다. [그림 3.22(a)]는 집광렌즈를 사용해서 측정한 자외선 민감도 결과로 렌즈 초점거리에 가까운 24.4 mm에 유리관이 삽입된 자외선 센서를 위치시켰다. [그림 3.22(b)]는 집광렌즈를 사용하지 않고 자외선 광이 원형으로 공간적으로 분산될 때 그 직경에 해당하는 82 mm 원안에 아조벤젠 코팅 전체를 위치시켜 실험을 진행하였다. 아조벤젠이 코팅된 광섬유

브래그 격자를 각 유리관에 넣고 자외선 광을 60초씩 총 3회 연속 반복 노출시켜 측정하였다. 자외선이 쬐지는 순간부터 이 광섬유 브래그 격자의 중심파장이 장파장으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. 실험 전 자외선 투과가 가장 높은 유리관이 민감도가 가장 높을 것이라는 예상과 달리 이 유리관들은 [그림 3.23]와 같이 집광렌즈 유무와 상관없이 거의 동일한 자외선 반응을 보였다. 이는 유리관의 두께가 0.2 mm로 매우 얇아 유리관 자체의 자외선의 흡수 효과가 크지 않기 때문이라고 생각된다. 따라서 Q-glass보단 약 2배, S-glass보단 5배 경제적인 B-glass를 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다.

[그림 3.23]에서 보면 집광렌즈를 사용하였을 때 최대 파장 변화율이 약 5 %정도 감소하고, 집광렌즈를 사용하지 않을 경우 16 % 감소하는 것을 확인했다. 이러한 유리관 유무에 따른 민감도 감소를 이론적으로 분석하기 위해 [그림 3.24]과 같이 자외선 광이 유리관 옆면으로 입사된다고 가정하였다. 집광렌즈를 사용하지 않은 경우  $h$ 는 자외선램프의 시작점과 유리관 중심까지 높이이고,  $r$ 은 유리관의 반지름이며,  $\theta$ 는 임의의  $xy$ 축을 포함하는 각도이다. [그림 3.24(a)]에서와 같이 집광렌즈를 사용하고 초점에 위치 시키면,  $\theta = 0$ 으로 유리관 옆면의 반사율  $R$ 은 다음과 같다.

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (3.1)$$

여기서  $n = n_2/n_1$ 이다.  $n_1$  및  $n_2$ 는 각각 공기와 유리관의 굴절률이다. 유리관의 굴절률은 실리카의 굴절률과 같은 1.4585을 사용했다. 이 유리관의 반사율은 수직 입사되는 빛의 반사율인 4 %로 간단히 계산되는데, 이것은 앞에서 실험적으로 민감도 감소율인 약 5 %에 거의 동일하다. 나타나는 1 % 정도 오차는 유리관 내부의 흡수와 다중반사에 의한 것으로 생각된다.

[그림 3.24(b)]는 집광렌즈를 사용하지 않았을 경우 자외선 광이 유리관에 입사되는 것을 가정한 것이다., 반사율  $R_{total}$ 은 아래와 같이 스넬의 법칙과 프레넬 방정식으로 계산한다.<sup>[37]</sup>

$$\tan A = \frac{x}{h-y}, \tan B = \frac{x}{y} \quad (3.2)$$

$$\theta = A + B = \tan^{-1}\left(\frac{x}{h-y}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) \quad (3.3)$$

$$\theta' = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_2}\sin\theta\right) \quad (3.4)$$

$$\beta = \theta' + \tan^{-1}\left(\frac{d}{r}\tan\theta'\right) \quad (3.5)$$

$$r_e = \frac{\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}, r_m = \frac{n^2\cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}}{n^2\cos\theta + \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \quad (3.6)$$

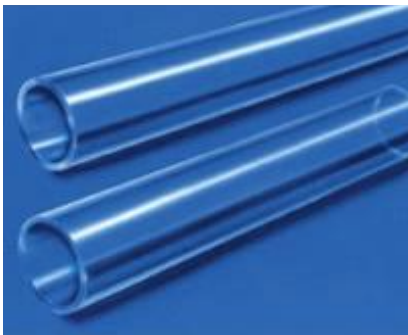
$$R_{total} = \frac{1}{2}(r_e^2 + r_m^2) \quad (3.7)$$

위 식을 이용하여 유리관 표면 각 지점에서의 반사율  $R_{total}$ 을 계산해 보면 약 13 %이다. 실험에서 유리관으로 인한 민감도 감소율이 16 %인 것과 비교하면 약 4 % 차이가 발생하는데, 이것은 계산할 때 자외선램프에서 실제로 방출된 비편광된 빛과 달리 TM (Transverse magnetic)과 TE (Transverse electric)편광을 같은 양인 50대 50이라고 가정하였기 때문으로 보인다.

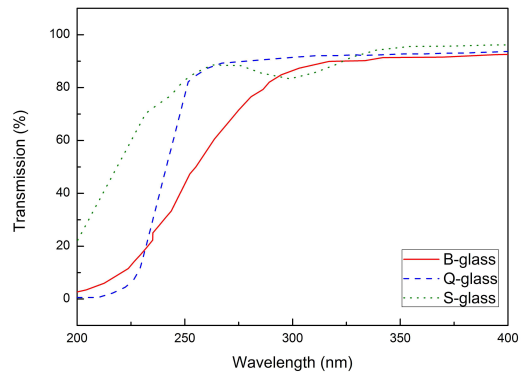
결론적으로 자외선 투과가 가능한 유리관을 통해 광섬유 브래그 격자의 소자를 보호할 수 있고, 집광렌즈를 사용하는 경우가 사용하지 않을 경우와 비교해서 더 효율적임을 확인했다. 또한 자외선 투과율이 서로 다른 마이크로 세 종류의 유리관을 비교한 결과 다른 투과율에도 불구하고 민감도가 거의 동일함을 확인하였다. 이것으로 같은 성능을 가진 Borosilicate 유리관을 사용하는 것이 다른 두 종류 유리관보다 경제인 것을 알 수 있다.

Glass tube (VITROCOM Inc.)	Round-miniature hollow glass tubing
Product	CV2024
ID/OD	2.00/2.40 mm
Length	100 mm
Materials	Borosilicate Clear fused quartz Synthetic fused silica

(a)



(b)



(c)

그림 3.20 유리관 설명 (a) 사양 (b) 사진 (c) 투과 스펙트럼 그래프

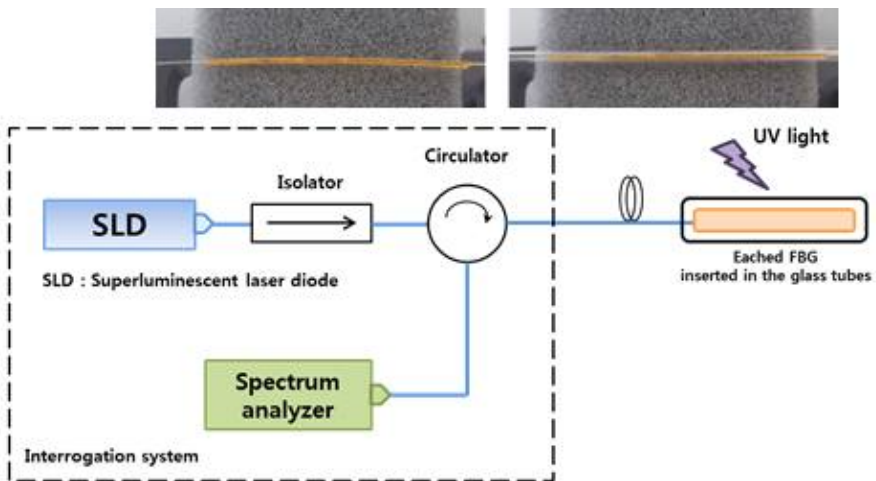


그림 3.21 유리관이 삽입된 패키징 실험 구성도

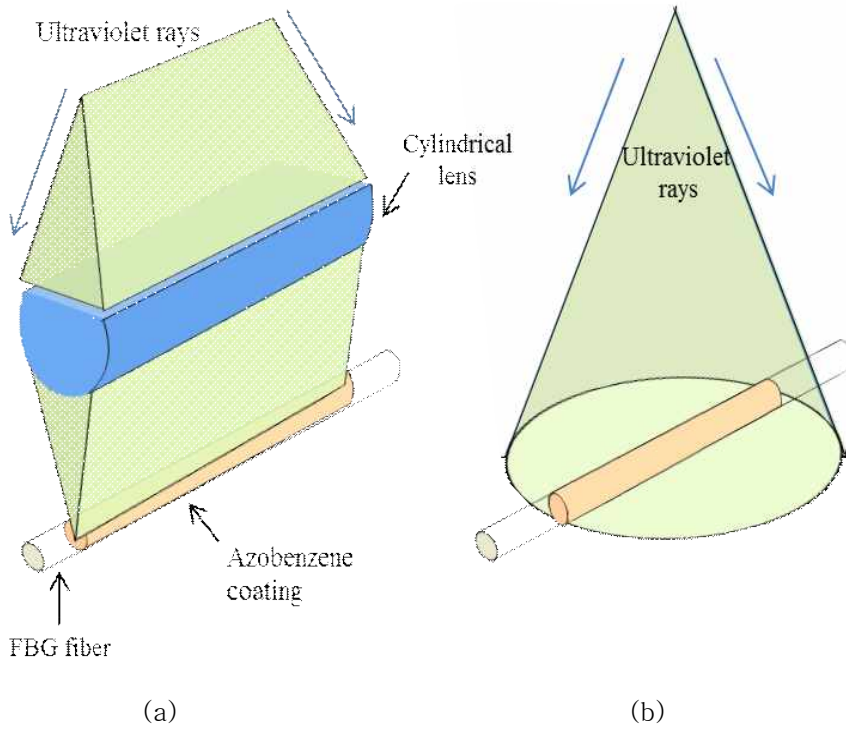
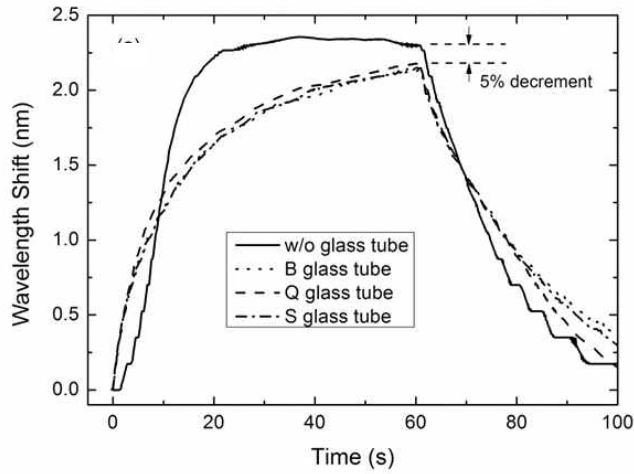
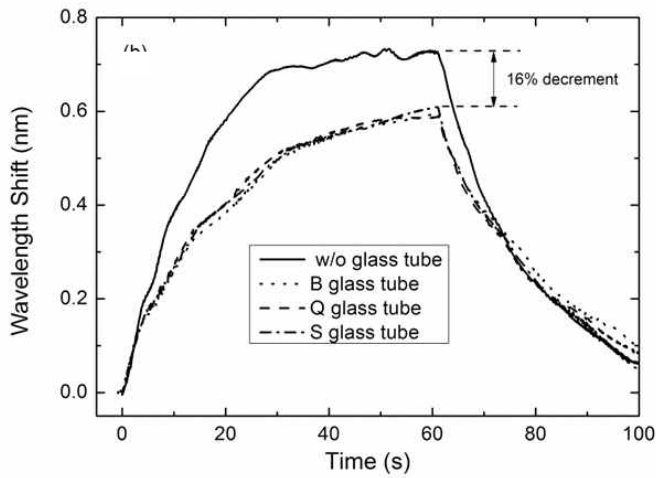


그림 3.22 유리관 집광렌즈 유무 실험 구성도  
 (a) 집광렌즈 사용 (b) 집광렌즈 미사용





(a)



(b)

그림 3.23 유리관 패키징 실험 결과  
 (a) 집광렌즈 사용 (b) 집광렌즈 미사용

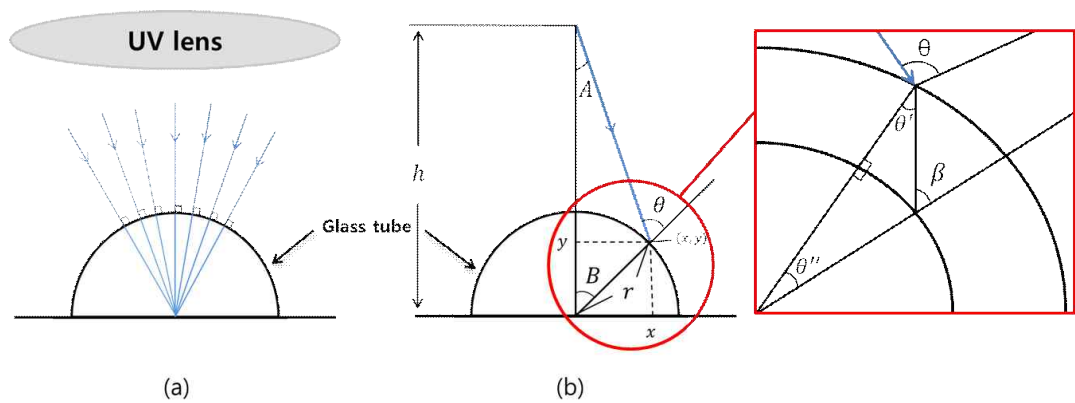


그림 3.24 유리관의 자외선 광에 대한 반사 분석을 위한 개략도  
 (a) 집광렌즈 사용 (b) 집광렌즈 미사용

## 2. Fabry-Perot(FP) 간섭계 이용한 광섬유 길이변화 관찰

앞서 실험을 통해 아조벤젠 혼합물이 코팅된 광섬유 브래그 격자에 자외선이 입사할 경우 코팅재료인 기능성 폴리머에 장력이 유도되고 이것이 브래그 격자 간격을 늘려서 중심 파장 이동을 발생시킨다는 것을 확인하였다. 격자 간격 변화는 단순히 중심파장 이동으로만 확인했기 때문에, 아조벤젠 혼합물 코팅이 실제로 광섬유를 물리적으로 늘리는지 확인할 필요가 있다. 여기서는 간단한 간섭계 구조를 가지고 이러한 물리적 길이 변화를 확인했다.

간섭계(Interferometer)는 전자파의 간섭현상을 이용하는 장치이다. 하나의 광원에서 나오는 빛은 진행하면서 경로 차이가 생긴다. 간섭계는 이를 이용하여 빛의 간섭을 관찰하는 기구를 뜻한다. 간섭계 종류에는 Fabry-Perot (FP) 간섭계(Fabry-Perot interferometer), 마하-젠더 간섭계(Mach-Zehnder interferometer), 마이컬슨 간섭계(Michelson interferometer) 등이 있다.<sup>[38]</sup>

본 실험에서는 FP 간섭계를 사용하여 진행한다. FP 간섭계는 20세기 초 패브리(Charles Fabry)와 페로(Alfred Perot)에 의해 만들어졌으며 FP spectrometer, etalon, FP etalon 등으로 불린다. FP 간섭계는 [그림 3.25]에 볼 수 있듯 넓은 폭의 단색 광원이 입사될 때 간섭 고리를 만드는 FP 공동(Cavity) 기반 간섭계이다.<sup>[39,40]</sup> 일반적인 구조는 고반사율을 가지는 거울 두 개를 마주보게 놓고 사이에 하나의 공진층을 삽입하는 것으로 구성되어 있다. 거울 사이 간격은 조절이 가능하게 분리되어 있다. 광대역으로 들어오는 광은 내부에서 다중 반사를 겪는다. 투과된 A, B 그리고 C는 스크린 위의 한 점에 초점을 맺게 되고 동위상이라면 밝은 점이 된다. 기본 원리는 광섬유를 통해 전달되는 광대역의 광원의 파장이 필터에 입사되면 공진층에서 다중간섭현상을 일으켜 특정한 파장만 투과시키며 원하는 데이터를 선별하는 것이다. 이때 선별된 데이터들의 빛이 경로 차이만큼 서로 간섭현상이 보인다.<sup>[40]</sup>

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m}; m = 0, \pm 1, \dots \quad (3.8)$$

위 식에서 FP 간섭계에서 투과한 빛의 파장과 FP 간섭계 길이의 관계를 나타낸다. [그림 3.25]에서 FP 간섭계 구조를 확인할 수 있다. n은 공진층의 굴절률, L은 두 거울의 간격,

$k = 2\pi n/\lambda$ 은 전파상수이다. 그리고  $m$ 은 정수를 뜻한다. 식(3.8)을 만족하면 이 간섭계를 투과하는 빛은 보강간섭을 만든다. 식(3.8)은  $f_m \lambda_m = c$ 을 이용하여 주파수로 표현하면 다음과 같다.

$$f_m = \frac{mc}{2nL} \quad (3.9)$$

식(3.9) 와 같이 특정 주파수를 가진 빛만 FP 간섭계를 투과하게 된다. 하나의 공진 주파수  $f_1$ 은 다음 같다.

$$f_1 = \frac{c}{2nL} \quad (3.10)$$

여기서  $f_1$ 을 길이에 대해 미분하면,

$$df_1 = \frac{c}{2n} \left(-\frac{1}{L^2}\right) \times \Delta L \quad (3.11)$$

라고 할 수 있다. 변화된 주파수의 값은,

$$\Delta f = \frac{-c}{2nL^2} \Delta L \quad (3.12)$$

식(3.12)로 구할 수 있다. 처음 주파수 값인  $f_1$ 을 식(3.10)에 넣으면  $L$ 을 구할 수 있으며, 구해진  $L$ 을 식(3.12)에 넣으면  $\Delta L$ 을 구할 수 있다.

본 실험은 지금까지 진행해 온 실험과 다르게 광섬유 브래그 격자를 사용하지 않고 일반 광섬유를 사용한다. 자외선에 노출되면 가역적인 길이변화 특성을 보이는 아조벤젠 화합물을 사용하여 광섬유 FP 간섭계의 간섭무늬 변화를 관측하여 자외선 광에 의한 물리적인 길이의 변화를 측정한다. 평평한 유리판 위에 광섬유를 위치시키고 앞에서 사용한 아조벤젠 Powder 2와 경화제 Agent 5의 혼합물을 광섬유 브래그 격자 코팅 길이인 3 cm와 동일하게 코팅한다. 코팅되지 않은 한쪽 광섬유를 마이크로 유리관에 삽입하고 반대쪽에도 단면이 깨끗이 절단된 광섬유를 삽입하고 움직이지 않도록 잘 고정한다. 출력 세기가 14 dBm 이고 1530 nm~1600 nm 대역폭을 가진 광대역 광원(Broadband source, BBS)을 한 쪽 광

섬유에 입사시켜준다. 여기서 사용한 광대역 광원의 사진과 사양은 [그림 3.26]과 [표 3.10]에 보여준다. 두 광섬유의 끝단을 조금 거리(L)를 두고 위치시킨다. FP 간섭계를 통과한 빛의 삽입손실이 커서 광섬유용 광증폭기(Optical fiber amplifier)를 사용하여 광 신호를 10 dB정도 증폭시킨 후 관찰하였다. OSA를 이용해서 광섬유 끝단 사이에서 일어나는 간섭무늬를 측정하였다. 광섬유용 광증폭기의 사진과 자세한 사양은 [그림 3.27]과 [표 3.11]에 보였다. 앞에서 설명한 실험 구성은 [그림 3.28]과 같다. 이 실험을 위해 두 광섬유를 정확한 위치로 정렬해 주는 것이 중요하기 때문에, 우리는 내경이 0.2 mm이고 길이가 3 cm인 마이크로 유리관에 광섬유를 삽입하여 쉽게 정렬할 수 있었다.

이렇게 구성된 광섬유 FP 간섭계에 광대역 광원을 입사시키면 [그림 3.29]과 같은 간섭무늬가 발생한다. 아조벤젠 혼합물 코팅 부분에 자외선램프를 통해  $0.916 \text{ mW/cm}^2$  세기의 자외선을 노출시키면, 투과광의 간섭무늬의 최대치에서의 주파수가 자외선에 입사에 따라 변화한다. 자외선이 없을 때와  $0.916 \text{ mW/cm}^2$ 과  $1.138 \text{ mW/cm}^2$  세기의 자외선에 노출될 때 이 간섭무늬의 주파수 변화는 증가하는 방향으로 파장 변화는 감소하는 방향으로 이동하는 것을 [그림 3.30]에서 확인할 수 있다. [그림 3.30]을 한 주기만 선택하고 각 간섭무늬를 위치를 동일하게 맞춰서 주파수 이동을 쉽게 관찰하도록 [그림 3.31]과 같이 조정하였다. 이 결과에서 자외선 광세기 가 커질수록 주파수가 커지는 것을 확인하였다. 실험에서 확인하고 싶었던 아조벤젠 혼합물 코팅된 광섬유가 자외선에 의해 늘어난 길이를 식(3.10)과 식(3.12)를 사용하여 구할 수 있다. 먼저 [그림 3.31(a)]을 통해 늘어난 길이를 계산해보았다. 변수인  $f_1$ 은 192.8 THz이며, n은 공기의 굴절률인 1이고, c는 광속이다. 식(3.10)에 각 변수를 넣고 L값을 구해보니  $0.78 \mu\text{m}$ 이다. 이를 식(3.12)에 넣어서  $\Delta L$ 을 구하였다. 자외선 광세기  $0.916 \text{ mW/cm}^2$ 와  $1.138 \text{ mW/cm}^2$ 에 의해 길이 변화  $\Delta L$ 은 각각  $-0.6652 \text{ nm}$ 과  $-1 \text{ nm}$ 이다. [그림 3.31(b)]를 통해 파장에 따라 계산해보면  $\Delta L$ 이 각각  $-0.62 \text{ nm}$ 과  $-1.02 \text{ nm}$ 로 계산되고 주파수 영역에서 측정한 값과 동일한 것을 알 수 있다. 이 값이 음수 값은 두 광섬유 끝단 사이 간격이 자외선에 의해 좁아지는 것이고, 이것을 아조벤젠 혼합물이 코팅된 광섬유가 늘어나는 것이다. 따라서 본 실험을 통해 아조벤젠 혼합물이 코팅된 광섬유 브래그 격자의 간격이 자외선에 의해 물리적인 길이 변화에 의해 중심파장을 변화시키는 것을 확인하였다.

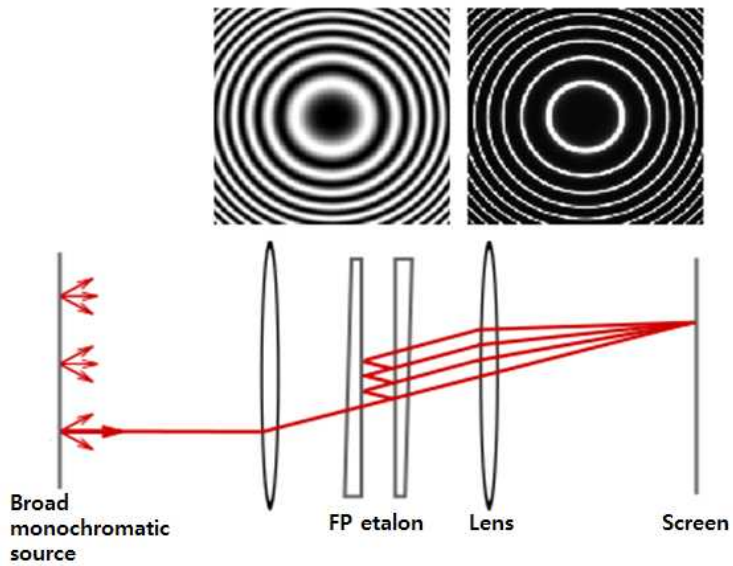
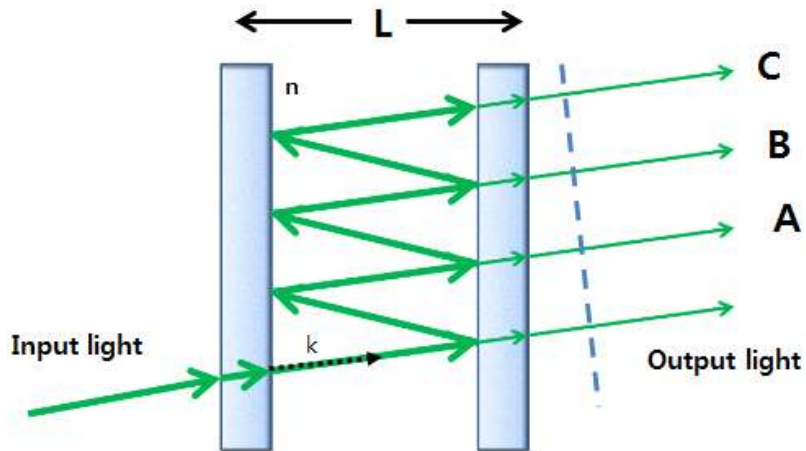


그림 3.25 Fabry-Perot 간섭계 기본 원리<sup>[39,40]</sup>



(a)

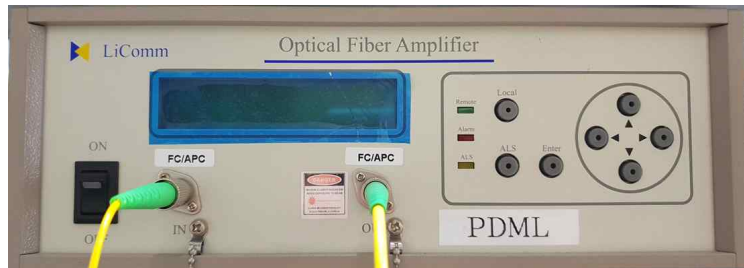


(b)

그림 3.26 광대역광원 장비 (a) Front panel (b) Rear panel

Broadband source specifications	Without gain-flattening option	With gain-flattening option
Total output power [dBm]	$\geq 14$	$\geq 12$
Spectral density [dBm/nm]	$\geq -8$ from 1530 nm to 1600 nm $\geq -14$ from 1525 nm to 1610 nm $\geq -25$ from 1520 nm to 1615 nm	$\geq -10$ from 1530 nm to 1600 nm $\geq -15$ from 1525 nm to 1610 nm $\geq -26$ from 1520 nm to 1615 nm
Spectral density stability [dB/nm] 15min	$\pm 0.03$ (1520 nm to 1560 nm)	$\pm 0.03$ (1520 nm to 1560 nm)
Spectral flatness [dB]	$\Delta \leq 3.5$ typical (1537 nm to 1600 nm)	$\Delta \leq 3.5$ typical (1530 nm to 1600 nm)
DOP	$< 2\%$ typical (1530 nm to 1600 nm) over 0.15 nm band	

표 3.10 광대역광원의 사양



(a)



(b)

그림 3.27 광섬유용 광증폭기 장비 (a) Front panel (b) Rear panel

Optical fiber amplifier specifications	
Wavelength range	1530 ~ 1560 nm
Total output power	23 dBm 이상
Noise figure	4.5 dB 이하
Gain flatness	1.0 dB 이하

표 3.11 광섬유용 광증폭기의 사양



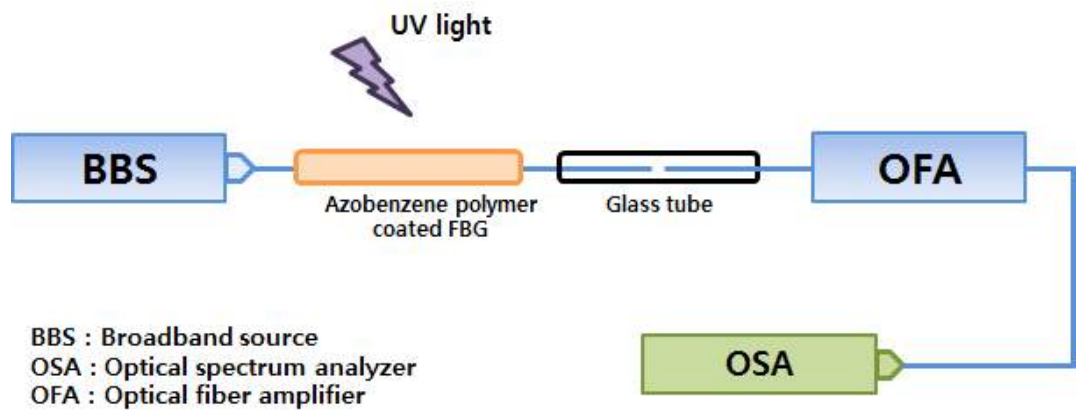


그림 3.28 Fabry-Perot attach 실험 구성도

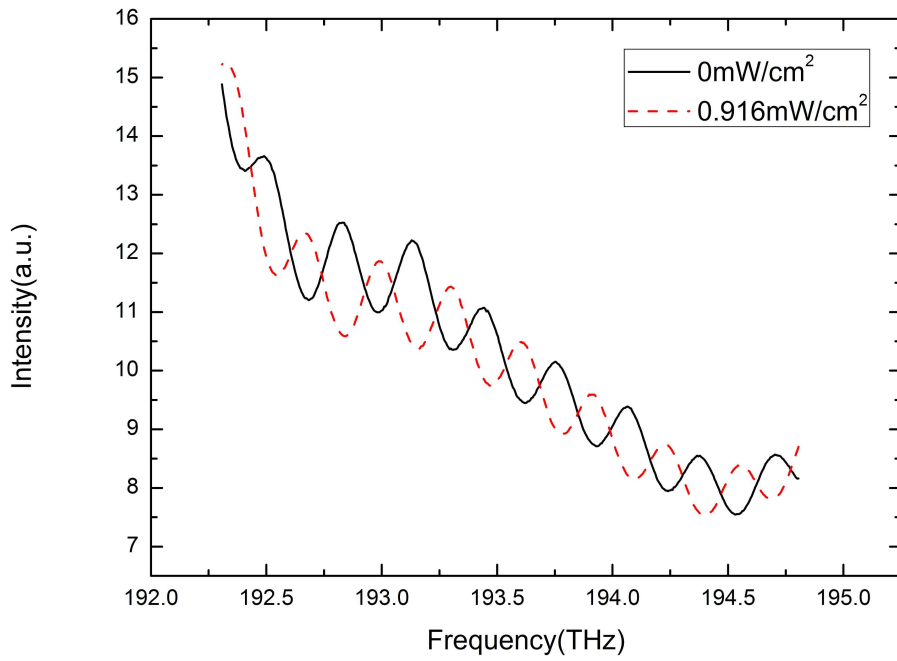
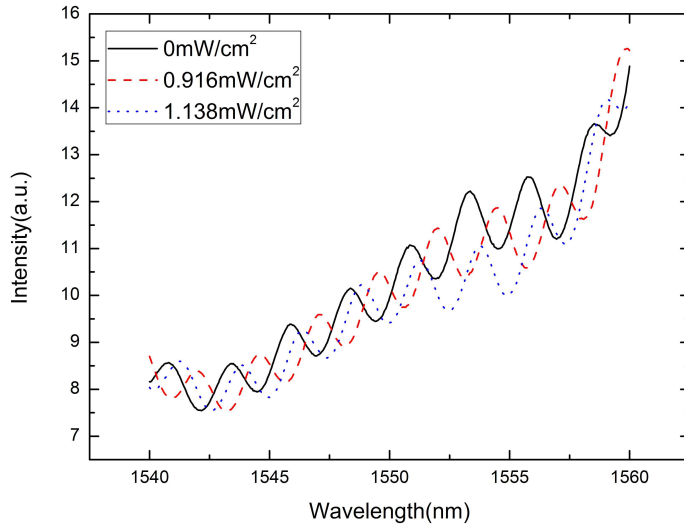
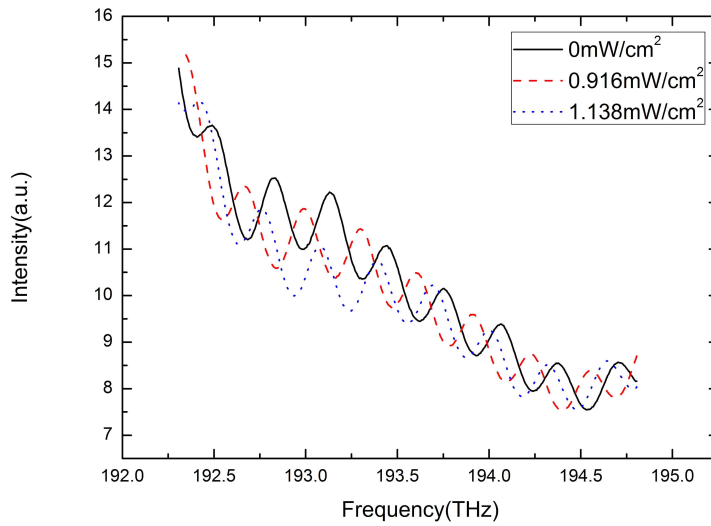


그림 3.29 Fabry-Perot attach의 자외선 유무에 따른 실험결과



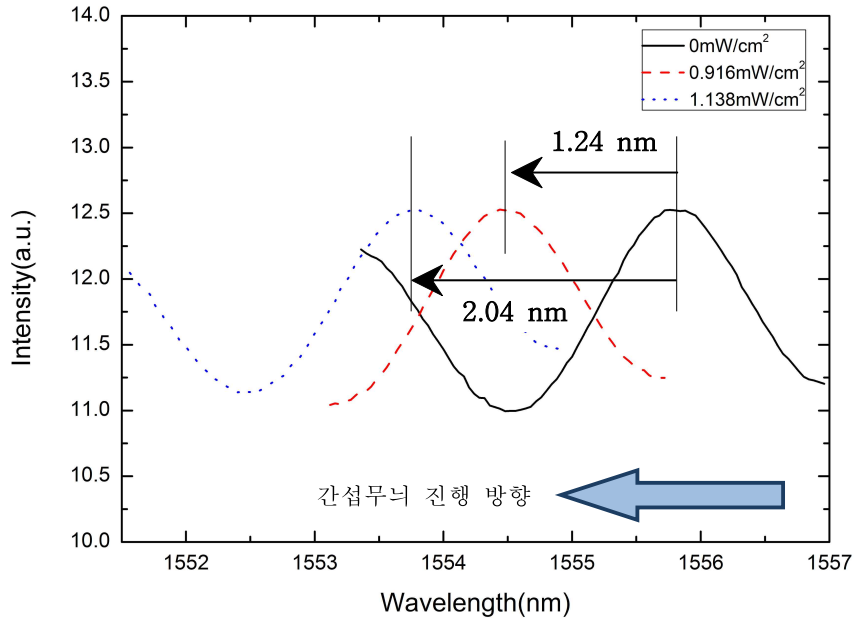
(a)



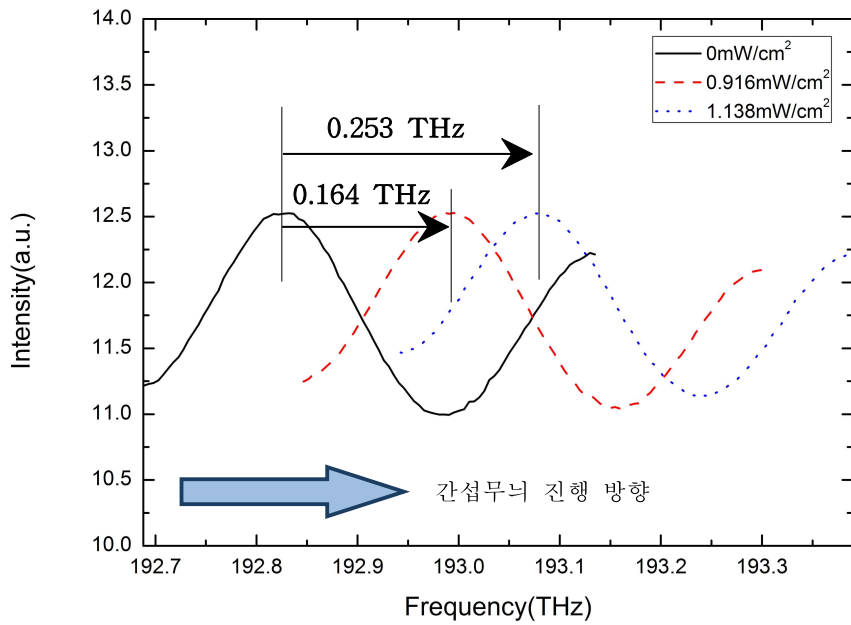
(b)

그림 3.30 Fabry-Perot attach의 자외선 광세기에 따른 실험결과

(a) 파장 변화, (b) 주파수 변화



(a)



(b)

그림 3.31 Fabry-Perot attach의 자외선 광세기에 따른 간섭무늬 이동결과  
(a) 파장 변화, (b) 주파수 변화

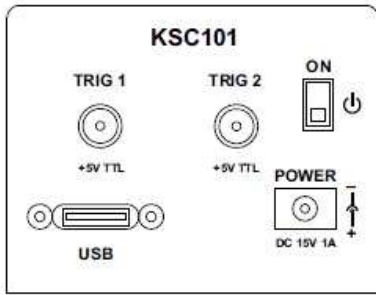
## 제4장 실생활 자외선 센서의 적합성 판별

### 제1절 고속 셔터를 이용한 자외선 센서 반응속도 측정

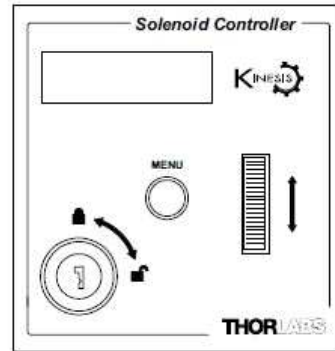
고전력 기반시설에서 자연적인 낙뢰 또는 애자의 절연 파괴로 인한 코로나 방전 등으로 인해 화재로 이어지는 경우가 자주 발생한다. 본 연구에서 자외선 센서는 자외선에 민감하게 반응하는 기능성 재료를 기반으로 개발되었다. 개발된 자외선 센서가 낙뢰나 코로나 방전과 같은 빠른 자외선 순간적 노출에도 자외선을 감지할 수 있어야 한다. 본 실험은 자외선 센서의 순간적 자외선 노출에 의한 반응 속도를 확인하기 위한 것이다. 순간적인 자외선을 생성하기 위해 제어기(KSC101-K-Cube solenoid controller, Thorlabs Inc.)를 통해 전기적으로 제어되는 직경이 25.4 mm인 고속 셔터(SH1, Thorlabs Inc.)를 이용했다. 그리고 셔터 속도를 변화시키면서 셔터를 지나 자외선 센서에 들어오는 자외선 광을 검출해서 이 센서의 최소 반응 속도를 확인하였다. 제어기의 사진과 사양은 [그림 4.1]과 [표 4.1]에 보였고, 고속 셔터는 [그림 4.2]와 [표 4.2]에 보였다.

[그림 4.3]는 앞에서 설명한 자외선 센서의 반응 속도 측정을 위한 개략적인 실험 구성도를 보여준다. 앞에서 살펴봤던 민감도가 우수한 아조벤젠과 경화제를 혼합한 재료가 코팅한 광섬유 브래그 격자를 사용하였다. 자외선램프와 광섬유 브래그 격자 사이 높이는 집광렌즈의 24.4 mm이다. 순간적인 자외선 광을 발생시키기 위해서 고속 셔터는 자외선램프와 집광렌즈 사이에 위치하였다. 먼저 고속 셔터의 작동에 의한 자외선 센서의 응답 특성을 확인하기 위해서 고속 셔터의 개폐시간 60초로 설정 후 단일 개폐하여 실험하고, 1초로 설정하고 10회 반복적으로 개폐한 실험을 각각 진행하였다. 이때의 자외선 광세기는  $2.5 \text{ mW/cm}^2$ 이다. [그림 4.4]은 실험 결과를 보여준다. 이것을 통해 자외선이 60초 정도 길게 노출되면 확실히 자외선을 감지할 수 있고, 또한 비록 1초 정도 빠르게 자외선이 노출되어도 자외선 유무를 감지가 가능한 것을 확인하였다. 이 실험을 기초로 개발된 자외선 센서의 최소 노출 가능 시간을 측정하는 실험을 수행하였다. 셔터 개폐시간을 1 s, 500 ms, 100 ms, 50 ms, 20 ms로 줄여가며 측정한 결과, [그림 4.5]과 같이 최소 17 ms 까지 자외선이 감지됨을 확인하였다. 낙뢰의 순간 지속시간이 20 ms임을 감안하고 낙뢰에 의한  $2.5 \text{ mW/cm}^2$ 과 동일한 자외선 세기로 들어온다고 가정하면 개발된 자외선 센서로 빠르게 방전되는 낙뢰를 감지할 수 있다. 본 연구를 통해 자외선에 대한 빠른 반응 속도는 높은 광민감도가 필요하다

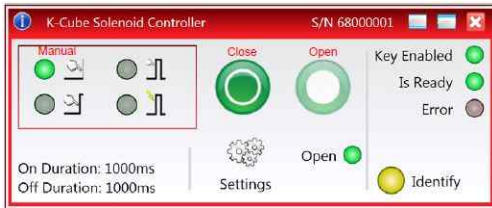
는 결론을 얻을 수 있다. 향후 광민감도를 더욱 향상 시키면 작은 자외선 세기에도 빠르게 측정할 수 있는 우수한 성능의 자외선 센서 개발이 가능하리라 예상된다.



(a) Controller front panel



(b) Controller control panel



(c) Controller manual mode



(d) Controller auto mode



(e) Controller 외형

그림 4.1 KSC101 제어기

Parameter	Value
Supply voltage	15 VDC
Maximum exposure rate	20 Hz
Minimum exposure time	15 ms
Typical transfer time	1.5 ms
Accuracy	0.3 ms (at 15ms exposure)
on/off time	10 ms to 1000 s
Maximum steady state power	3.5 W

표 4.1 KSC101 제어기의 사양





그림 4.2 고속 셔터 외형

Parameter	Value
Aperture	Ø 1.0" (25.4 mm)
Actuation pulse	10 V to 75 V
Blade thickness	0.06" (1.6 mm)
Solenoid coil resistance	31.84 Ω
Initial state	Closed
Maximum recommended applied solenoid voltage	15 VDC (Holding) 75 VDC (Pulse)
Maximum pulse rate	12.5 Hz steady, 16.6 Hz burst
Duty cycle	Optimum @ 8 Hz = 50 %
Lifetime	1,000,000 cycles
Steady state	9 W @ Continuous

표 4.2 고속 셔터의 사양

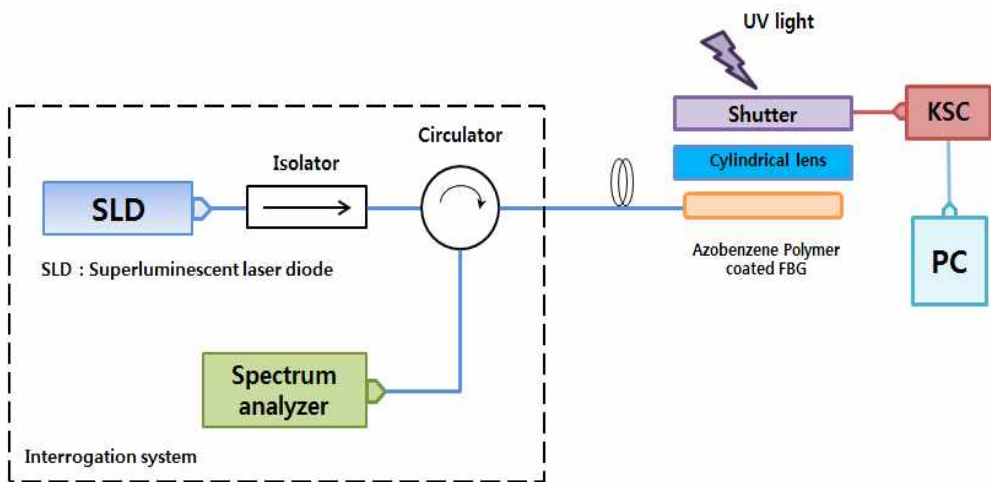
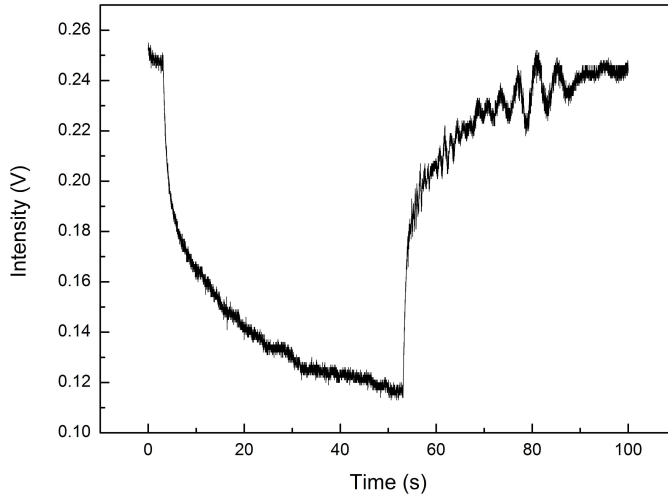
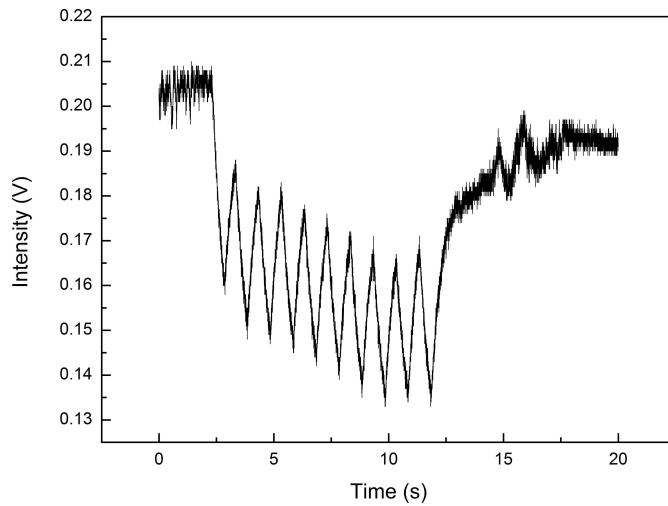


그림 4.3 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자를 사용한 고속 셔터 실험 구성



(a)



(b)

그림 4.4 고속 셔터 개폐시간에 따른 실험 결과 (a) 60초 1번 (b) 1초 10번

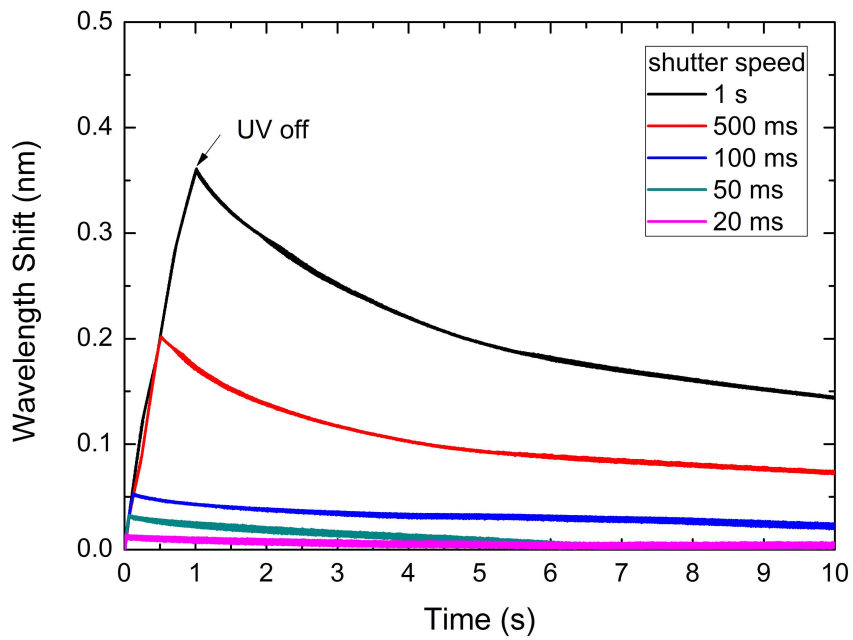


그림 4.5 식각되지 않은 광섬유 브래그 격자를 사용한 고속 셔터 자외선 응답

## 제2절 자외선 감지 유무 시스템

### 1. 시스템 설명

본 연구에서 제안된 자외선 센서는 광민감도가 높은 반면 자외선에 대한 응답 속도는 식각된 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서에 비해 느리다. 따라서 느린 자외선 응답 속도에 자외선 유무를 감지할 때 자외선 광의 존재를 직관적으로 결정하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 이것은 측정된 데이터의 시간에 대한 1차 미분인 단위 시간당 파장 변화 값을 얻으면 자외선 발생 또는 소멸 시간에 급격한 기울기 변화를 가진다. 이런 기울기 변화를 측정하여 자외선의 유무를 감지하는 간단한 알고리즘이다. [그림 4.6]와 같이 먼저 자외선에 의한 광섬유 브래그 격자의 시간에 따른 중심파장 변화 곡선을 Interrogation 시스템으로 측정한 후, 고주파수 잡음 요소를 저대역 필터(Low pass filter, LPF)를 사용하여 제거해준다. 그 다음으로 필터링 된 데이터를 시간에 대한 1차 미분해서 자외선에 대한 기울기 변화 정보를 얻는다. 최종적으로 [그림 4.6]의 마지막 단계에서 디지털 신호와 흡사한 기울기 변화 데이터에서 양의 값(+ region)은 자외선이 감지되는 영역이고 음의 값(- region)은 자외선에 소멸되는 영역이다. 급격한 기울기 변화가 일어나는 것을 통해 느린 반응 속도를 가진 센서의 단점을 보완해주는 우수한 성능을 획득한 것으로 판단된다.

### 2. 작동방법

앞에서 제안한 알고리즘을 실험을 통하여 확인해 보았다. [그림 4.7(a)]는 광섬유 브래그 격자를 12초 동안 3회 반복하여 자외선 광에 노출시켰다. 자외선에 의해 장파장으로 이동한 후에 자외선이 소멸되면 이 값이 다시 원점에 도달하는데 약 30 초 이상의 시간이 필요하다. 이 때문에 파장의 절대 값만 사용해서 자외선의 존재 유무를 판단하는 것은 쉽지 않다. [그림 4.7(b)]는 [그림 4.7(a)]의 앞에서 제안한 알고리즘을 통해 곡선의 1차 미분의 결과를 보여준다. 결과에서 보듯이 자외선이 존재할 때는 양의 값으로 급격히 증가한 후 자외선이 존재하는 동안 일정한 값을 유지하다가, 자외선이 소멸되면 역시 급격하게 음의 값을 가지고 일정한 시간 동안 그 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 이것은 디지털 신호와 유사하며 이를 통해 자외선 광의 유무가 한눈에 인식될 수 있다. 이 알고리즘은 데이터를 획득한 이

후에 프로그래밍하여 구현이 가능하다. 이것을 이용하면 20 ms 이내의 빠른 자외선 방전이 발생하는 코로나 방전 감지 및 낙뢰 탐지 등과 같이 다양한 분야에 자외선을 민감하고 신속하게 탐지할 수 있을 것으로 예상된다.

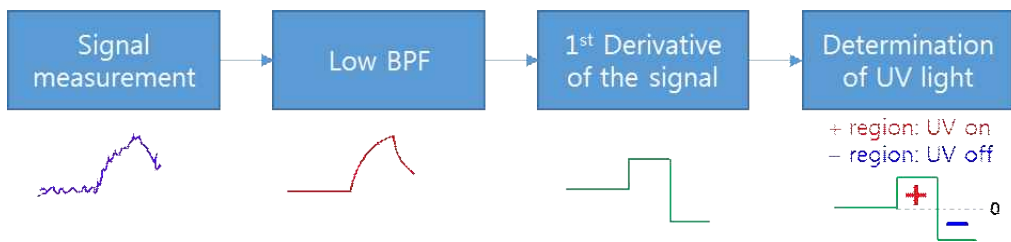


그림 4.6 자외선 광의 유무를 구별하는 알고리즘

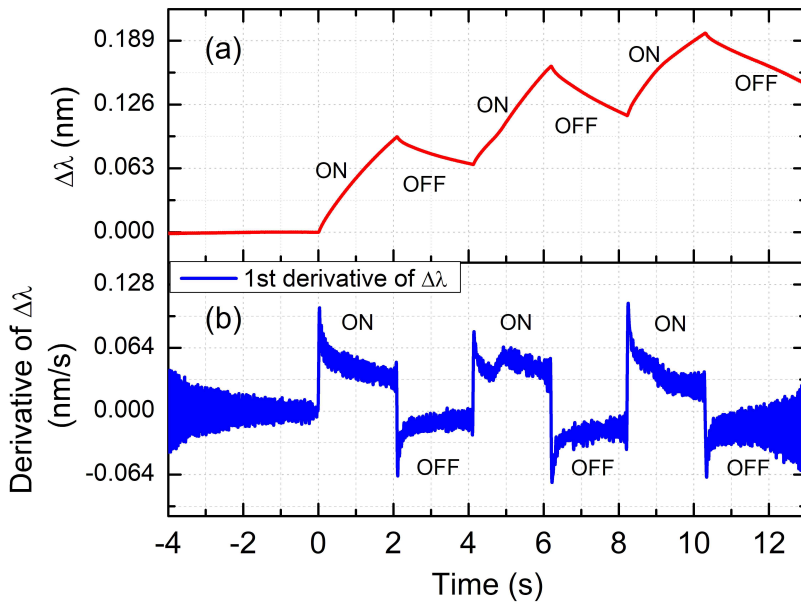


그림 4.7 알고리즘의 프로그래밍 방식 구현  
 (a) 3번의 자외선 노출에 대한 유발된 파장 변화,  
 (b) (a)에서 측정된 곡선의 1차 미분



## 제5장 결론

자외선에 관한 안전사고를 방지하고자 자외선 노출을 감지하는 자외선 센서가 많이 연구되어 왔다. 자외선 센서는 또한 코로나 방전과 낙뢰에서 발생하는 자외선을 미연에 감지하여 2차 사고를 예방하는 역할을 한다. 최근에 작은 크기, 고민감도, 다중지점 측정 및 원격 측정이 가능한 광섬유 브래그 격자를 적용한 자외선 센서가 개발되었다. 이것은 자외선에 노출되면 가역적인 길이변화 특성을 가지는 아조벤젠 폴리머를 자외선 센서에 적용한 것이다. 기존에 개발된 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서는 광섬유 격자를 식각하고, 집광렌즈 및 반사판 사용해서 자외선 민감도를 향상 시켰다. 높은 광민감도에 도 불구하고 이 자외선 센서는 광섬유 브래그 격자는 불산 식각 과정에서 파손되거나 인체의 유해성이 높인다. 이 때문에 높은 민감도는 유지하면서 식각 과정을 줄이기 위한 연구가 필요했다.

본 논문은 새로운 기능성 폴리머인 아조벤젠 파우더와 경화제를 섞은 25가지 혼합물을 만들어 기존 자외선 센서의 광민감도와 비교하는 실험을 진행하였다. 또한, 새로운 자외선 센서의 민감도를 향상시키기 위한 다양한 방법을 제시하고 성능을 확인하였다. 새로운 기능성 폴리머인 아조벤젠 파우더 5가지 종류와 경화제 5가지 종류를 혼합하여 25가지 아조벤젠 폴리머 혼합물의 경화 유무와 자외선 민감도 특성을 확인하는 실험을 진행했다. 경화가 진행된 10가지 혼합물의 아조벤젠이 코팅된 광섬유 브래그 격자 기반 자외선 센서를 집광렌즈를 초점거리보다 1 mm 앞인 24.4 mm로 놓고 자외선 광에 노출시켰다. 실험은 자외선 광센서 시스템을 통해 측정하였다. 10가지 혼합물 중에서 Powder 2 (4-Amino-1,1'-azobenzene-3,4'-disulfonic acid monosodium salt)와 Agent 5 (LS2211) 혼합물이 가장 민감도가 높음을 확인하였다. 이 혼합물이 코팅된 자외선 센서와 기존 개발된 자외선 센서의 자외선에 의한 최고 중심파장 이동이 2.5 nm로 비슷한 결과를 얻었다. 이를 통해 광민감도를 높이기 위한 광섬유 브래그 격자의 불산 식각과 같은 복잡하고 위험한 제작 과정을 줄이고, 단순히 코팅재료만을 경화시키는 과정만 있기 때문에 추후 대량 생산 적용이 가능하리라 생각된다.

이 혼합물이 코팅된 특정한 자외선 센서는 자외선에 대해 파장 변화가 크게 일어났지만, 가시광선에는 큰 변화가 없었다. 이것으로 외부 가시광선에 반응하지 않고 오직

자외선에서 민감하게 반응하는 자외선 센서임을 확인하였다. 또한 아조벤젠이 혼합되지 않은 경화제 자체적으로 자외선에 의해 파장 변화가 아조벤젠 혼합된 경화제를 사용했을 때와 비교해서 약 1/5 정도 발생하는 것을 확인했다. 이런 경화제의 자외선에 대한 변화는 경화제에 자외선이 흡수되고 발열이 발생하여 열 팽창되기 때문으로 예상된다.

자외선 센서의 민감도 향상을 위해 광섬유 브래그 격자에 0.6 %의 장력을 가한 뒤, 아조벤젠을 코팅하고 민감도를 측정하였다. 코팅 전에 일정한 장력을 광섬유 브래그 격자장력을 인가했을 때 코팅 후 이 격자에 높은 잔류 응력이 남게 된다. 이 장력이 인가된 센서에 자외선이 입사될 때 광민감도를 장력을 인가하지 않을 때와 비교하면 약 2배 정도 향상되는 것을 확인했다. 또한 아조벤젠 폴리머 코팅 부분이 공기 중에 노출되어 있어서 안정성과 성능 지속의 문제점이 생길 수 있다. 그리고 광소자가 휘거나 약한 충격에도 변형이 쉽게 발생하기 때문에 기능성 폴리머 코팅을 물리적으로 보호해야 한다. 자외선이 투과되는 마이크로 유리관을 사용하여 이를 보호하였다. 이 경우 집광렌즈를 동시에 사용하는 것이 반사광을 최소화해서 효율적인 것을 확인하였다. 또한 아조벤젠 코팅된 광섬유 브래그 격자의 자외선에 의한 물리적 길이 변화를 실제적으로 확인하기 위해 Fabry-Perot 간섭계를 이용했다. 간단한 광섬유 FP 간섭계를 구성하고 자외선에 의한 주파수 영역에서 간섭무늬 이동을 분석하여 자외선 흡수된 아조벤젠에 의해 광섬유가 실제적으로 늘어나는 것을 확인했다.

본 연구에서 개발된 자외선 센서가 실생활에 적용되었을 때 측정된 데이터에서 자외선 광의 존재를 직관적으로 결정하는데 어려움이 있기 때문에 자외선 감지 유무 알고리즘을 제안하고 실험적으로 유용성을 확인하였다. 자외선에 대해 느린 반응성을 가지는 파장 변화 데이터를 미분하여 시간당 파장 변화 값을 얻어 자외선 발생과 소멸을 즉각적으로 인지할 수 있는 원리이다. 마지막으로 개발된 자외선 센서가 빠른 속도로 발생한 자외선 광을 감지할 수 있는지 확인해봤다. 이 자외선 센서가 감지할 수 있는 최소 노출 시간이 17 ms 임을 확인하였고, 낙뢰 순간 지속 시간인 20 ms을 감안하면 본 연구를 통해 개발된 자외선 센서는 코로나 방전이나 낙뢰에서 발생된 순간적인 자외선을 감지할 수 있음을 확인하였다.

향후 개발된 자외선 센서를 실제 산업현장에서 코로나 방전과 같은 현상을 감지하기 위한 응용연구를 진행할 계획이다.

## [참고문헌]

- [1] R.T. Kashiwabuchi, F.R.S. Carvalho, Y.A. Khan, D. de Freitas, A.S. Foronda, F.E. Hirai, M.S. Campos, P.J. McDonnell, Assessing efficacy of combined riboflavin and UV-A light (365 nm) treatment of Acanthamoeba Trophozoites, IOVS 52, 9333 - 9338 (2011).
- [2] R. Simpson, Lighting Control: Technology and Applications, Taylor & Francis, US, p.125 (2003).
- [3] B. Srikanth, Recent advancements in UV technology yield enhanced TOC reduction performance, Ultrapure Water, pp. 40 - 46 (1998).
- [4] S.P. Pappas, UV Curing: Science and Technology, Vol. 2, Technology Marketing Corp., (1985).
- [5] J. Kim, "The strength of surface UV radiation over Korea peninsula and the consequent Minimum Erythema Dose(MED) and its exposure time for Korean skin type and reaction" Institute of Earth & Enviornment, Yonsei University, Health Care Technology Research and Development Project Report, p. 3 (2001).
- [6] A. F. Nichols, T. Itoh, J. A. Graham, W. Liu, M. Yamaizumi, and S. Linn, "Human damage-specific DNA-binding protein p48: Characterization of XPE mutations and regulation following UV irradiation," J. Biol. Chem. 275, 21422-21428 (2000).
- [7] Y. Hu and K. Liu, Inspection and Monitoring Technologies of Transmission Lines with Remote Sensing, Chapter 4 (2017).
- [8] K.M. Shong, Y.S. Kim, S.G. Kim "Images detection and diagnosis of corona discharge on porcelain insulators at 22.9 kV D/L" in proceedings of SDEMPED , Cracow, Poland, pp. 462-466 (2007).
- [9] 송길목, 방선배, 김종민, 김영석 "코로나 방전에 의한 자기 및 폴리머 애자의 자외선 발생 특성" 조명전기설비학회 논문지 제 22권 제 4호, pp. 147-152 (2008).
- [10] 고낙용, 임병현, 서동진 "화재감지용 자외선 적외선 불꽃 감지기 개발" 대한 기계학회 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 68-73 (2006).

- [11] 국민안전처- 5년간 낙뢰 피해  
 “<http://www.safekorea.go.kr/idsiSFK/neo/sfk/cs/contents/prevent/prevent03.html?me nuSeq=126>”
- [12] M. A. Uman, The Lightning Discharge, Academic Press: Orland, FL, (1987)
- [13] M. A. Uman, Lightning, McGraw - Hill : New York, (1969)
- [14] F.Grumb, L.F.Costa “Spectral emission of corona discharges” OSA, Vol.15, pp. 76-79 (1976).
- [15] 유병열, 김찬오 “자외선 검출 카메라를 이용한 전력시스템의 안전진단에 관한 연구” Journal of the KOSOS, Vol. 27, No. 1 pp.7-13 (2012).
- [16] 낙뢰 측정기, 기상레이더 센터  
 “<http://radar.kma.go.kr/lecture/lightning/network.do>”
- [17] A. Othonos and K. Kalli, Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing (Artech House Optoelectronics Library, Chapter 7. (1999).
- [18] S. R. Oh, D. Kang, J. Choi, J. H. Kim, H. Lee, K-S. Kim, and S. Kim, “Supercontinuum notch shaping via fiber Bragg grating for the excitation source in coherent anti-stokes Raman spectroscopy,” in Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2015, paper 26C3\_7 (2015).
- [19] 어성욱, 김유성, 김중열, 이운영, 장덕순 “광섬유 센서를 이용한 상수도관의 누수 탐지 기술 개발” 대한상하수도학회·한국물환경학회, 추계 학술발표회 논문집, pp. B-32, B-33 (2007).
- [20] 송일신, “광반응 재료가 코팅된 브래그격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구.” 석사학위청구논문, 조선대학교 (2014).
- [21] 김우영, “광반응 재료가 코팅된 단주기격자 기반 자외선 센서의 휴대성 및 민감도 향상 연구” 석사학위청구논문, 조선대학교 (2015).
- [22] 광섬유  
 “<https://ko.wikipedia.org/wiki/%EA%B4%91%EC%84%AC%EC%9C%A0>”
- [23] 광섬유 구조  
 “[http://www.fbg.co.kr/kor/sub\\_02/0201.php](http://www.fbg.co.kr/kor/sub_02/0201.php)”

- [24] 광섬유 원리와 기술  
 “<https://m.blog.naver.com/PostList.nhn?blogId=subsky21>”
- [25] NATIONAL INSTRUMENTS  
 “<http://www.ni.com/white-paper/11821/ko/>”
- [26] 김유미, 이남권, 이승환, 배동명, 유윤식 “선체 응력 모니터링을 위한 FBG 센서에 대한 연구” Sensor Science and Technology, Vol.21, No.4, pp. 276-282 (2012).
- [27] 김현수, “아조벤젠이 포함된 광반응 자가변형 구조체의 포토-소프트닝 효과에 대한 연구” 석사학위 청구논문, 서울대학교 (2018).
- [28] 최동석, 정희석, 김찬영, 송일신, 김현경, 안대정 “코팅 형태에 따른 아조벤젠 코팅 FBG 자외선 센서의 특성 연구” Advanced Engineering and Technology Vol.5, No.2, pp. 167-171 (2012).
- [29] 최영상 “아조벤젠 유도체의 이성질화 반응속도에 관한 분광학적 연구”, 한국과학재단, 고려대학교 (1995).
- [30] J.S Yu, S.Y Lee, H.Y Na, T.J Ahn, H.K Kim “Photo-responsive Smart Polymer Materials” Elastomers and Composites Vol. 47, No.4, pp. 282-291 (2012).
- [31] 진제경, 강태준 “고분자 나노복합재료 구동기” Polymer Science and Technology, Vol.29, No.1, pp.16-17 (2018).
- [32] Hongrui Jiang, Chensha Li and Xuezhem Huang “Actuators Based on Liquid Crystalline Elastomer Materials” NIH Public Access, pp.27 (2014).
- [33] 소프트 로봇, 11월 과학기술자상  
 “[https://www.youtube.com/watch?v=-D8JSWYJ\\_Ms&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=-D8JSWYJ_Ms&feature=youtu.be)”
- [34] SIGMA-ALDRICH, Azobenzene  
 “<https://www.sigmaaldrich.com/korea.html>”
- [35] 장력, 두산백과  
 “<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1138374&cid=40942&categoryId=32227>”
- [36] 패키지, 컴퓨터 인터넷 IT 용어 대사전  
 “<https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=831900&cid=50376&categoryId=50376>”
- [37] 프레넬 방정식, 저자 윤재서 “기초 광학” 기초학문분야 우수학술 도서

pp.116-120 (2003).

[38] 간섭계, 정보통신기술용어해설

“[http://www.ktword.co.kr/abbr\\_view.php?m\\_temp1=3836](http://www.ktword.co.kr/abbr_view.php?m_temp1=3836)”

[39] Fabry Perot Interferometer(패브리 페로 간섭계), StarkEffects.com

“<http://www.starkeffects.com/Fabry-Perot-Interferometer.shtml>”

[40] Hernandez, G. “Fabry - Pérot Interferometers”, Cambridge studies in modern optics (1986).

## 저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20177077	과 정	석 사
성 명	한글: 서 경 서      한문: 徐 京 緒      영문: Gyeong Seo Seo				
주 소	광주광역시 광산구 도산로 9번길 35				
연락처	E-MAIL : rudtj7517@naver.com				
논문제목	한글 : 기능성 폴리머 재료가 코팅된 광섬유 격자 기반 자외선 센서의 민감도 향상 연구				
	영어 : Sensitivity Improvements Of Ultraviolet Light Sensor Based On Fiber Bragg Grating With Functional Polymer Materials				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

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.

동의여부 : 동의(  )    반대(  )

2019년    2월

저작자: 서 경 서    (서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**

## [감사의 말씀]

학·석사 연계과정부터 시작해서 총 3년이라는 긴 시간동안 많은 도움을 주신 모든 분들에게 졸업논문을 통하여 감사인사를 전하려고 합니다.

학부와 대학원 생활을 지도해주신 안태정 교수님께 진심으로 감사드립니다. 늘 부족한 저에게 창의적으로 생각하고 스스로 해결할 수 있게 격려해주신 교수님께 감사드리며 교수님께서 알려주신 인생의 지혜를 명심하겠습니다. 새로운 관점으로 다양한 연구를 보여주시는 김진태 교수님, 학생들의 고민과 상담을 반겨주신 김현수 교수님, 어려운 수업을 쉽게 설명해주시는 능력을 가지고 계신 박종락 교수님, 항상 웃으면서 질문을 받아주셨던 권민기 교수님, 모든 일에 열정을 가지고 많은 것을 알려주신 주기남 교수님께 감사드립니다.

그리고 3년 동안 다사다난했던 시간을 같이 보내준 동기 희택이 오빠, 옥락이 오빠에게도 감사합니다. 덕분에 힘든 시간 잘 이겨내며 많은 것을 배웠습니다. 그리고 학부 생활과 대학원 생활에 든든한 버팀목이 되어준 승은이에게 진심으로 고맙고, 멀리서 응원해준 수영이, 마지막 2학기에 여러 방면으로 도움을 준 종주에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다. 대학원 생활에 도움을 주신 모든 선배님들과 17학번 동기인 준영이 오빠, 진이 오빠, 대희 오빠 그리고 남은 기간이 있는 후배님들에게도 감사합니다. 또한, 에너지인력양성 사업과 광기술 융합 부식 모니터링 사업으로 많은 도움을 주신 조홍현 교수님, 장희진 교수님, 백세종 교수님께 감사드립니다. 사업으로 만났지만 2년 동안 즐거웠던 재료공학과와 규혁이 오빠, 태준이 오빠, 수연이, 태웅이, 주희, 혜리 모두에게 감사합니다.

초등학교부터 지금까지 나에게 힘이 되어준 주희, 가인이, 연화에게 감사하며, 고등학교 친구들 지연이, 은주, 유라, 수민이, 세희, 현화에게도 감사합니다. 그리고 늘 잊지 않고 응원해주는 숙진이까지 모두 감사합니다. 지금까지 늦게 끝나면 새벽이라도 데리러 와주시고 물심양면 도와주신 부모님께 감사하다는 말 전하고 싶습니다. 사랑합니다.

이 외에 고마운 분들이 많이 있지만, 이름이 언급되지 않은 분들에게 죄송하며 모든 분들의 앞날이 행복하길 바랍니다.