

2012년 2월
석사학위논문

광반응 재료를 이용한
광섬유 자외선 센서

조선대학교 대학원

광기술훈학과

최동석

광반응 재료를 이용한
광섬유 자외선 센서

UV Fiber sensors based on
Photo-responsive materials

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

최 동 석

광반응 재료를 이용한 광섬유 자외선 센서

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

최 동 석

최 동 석의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 조선대학교 교수 김 진 태 인

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 인

2011년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서론	1
제2장 이론	3
제1절 자외선	3
1. 자외선 개요	3
2. 자외선 활용	3
3. 자외선 발생기 종류	5
제2절 자외선 센서	8
1. 자외선 감지기(UV 센서)의 필요성	8
2. 국내외 관련 기술(기관) 현황 및 비교 분석	8
3. 자외선 포토다이오드	9
4. 자외선 불꽃 감지기	9
5. 기타 자외선 센서	10
6. 광섬유 기반 자외선 센서의 기술 수준 및 장단점	11
제3절 광섬유 격자	19
1. 광섬유 격자 개요	19
2. 단주기 격자	19
3. 장주기 격자	22
제4절 광기능성 소재	28

제3장 아조벤젠 코팅된 FBG	32
제1절 제작방법 및 특성	32
1. 제작 방법	32
2. 특성	32
제4장 실험 방법 및 결과	41
제1절 경화법에 따른 특성 분석	41
제2절 제작 방법에 따른 특성 분석	44
제3절 파장 의존성 분석	51
제4절 신뢰성 확인	56
제5절 자외선의 세기에 따른 반응도	59
제5장 결론	62

[참고문헌]

[감사의 말씀]

그림 목 차

그림 2.1 전자기파 스펙트럼	6
그림 2.2 자외선 포토다이오드의 구조 및 외형	13
그림 2.3 하마마츠와 하니웨의 자외선 불꽃 감지기	13
그림 2.4 광도파로 자외선 광센서의 개념도, 도파로의 형태에 따른 반응성	14
그림 2.5 아조벤젠 염료가 도핑된 폴리카보네이트가 코팅된 광섬유 자외선 센서	15
그림 2.6 FBG의 굴절률 분포와 FBG의 구조	24
그림 2.7 입력광의 스펙트럼, 투과광의 스펙트럼	25
그림 2.8 파장에 따른 공진 파장의 세기	26
그림 2.9 장주기 광섬유 격자의 구조	26
그림 2.10 장주기 격자의 투과 스펙트럼	27
그림 2.11 아조벤젠 고분자의 분자 구조 변화	30
그림 2.12 아조벤젠의 에너지 다이어그램	30
그림 2.13 아조벤젠 필름의 부피 및 길이의 변화	31
그림 3.1 두 종류의 아조벤젠 코팅된 FBG	34
그림 3.2 자외선에 의한 아조벤젠 코팅된 FBG의 변화	35
그림 3.3 실험 구성도	36
그림 3.4 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 변화	37
그림 3.5 자외선의 세기에 따른 아조벤젠 코팅된 FBG의 스펙트럼 변화	38
그림 3.6 자외선의 세기에 따른 중심파장의 변화	39
그림 4.1 열 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심 파장의 이동	42
그림 4.2 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동	43
그림 4.3 슬라이드 글라스를 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동	47

그림 4.4 S-HA50 열 흡수 필터의 투과 스펙트럼 -----	48
그림 4.5 테프론 주물의 모형도 -----	49
그림 4.6 테프론 주물을 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심 파장의 이동 -----	50
그림 4.7 아조벤젠의 흡수 스펙트럼과 중심파장의 이동량 -----	53
그림 4.8 자외선 램프의 스펙트럼 -----	54
그림 4.9 아조벤젠 코팅된 FBG의 재현성 -----	57
그림 4.10 자외선의 유무에 따른 아조벤젠 코팅된 FBG의 재현성 -----	58
그림 4.11 자외선의 세기에 따른 중심파장의 세기 변화 -----	60
그림 4.12 자외선의 세기에 따른 스펙트럼 변화 -----	61

표 목 차

표 2.1 자외선 파장에 따른 용도	7
표 2.2 산업용 광계측기 및 센서기기 시장 동향 및 전망	16
표 2.3 자외선 센서 재료의 종류 및 특징	17
표 2.4 기타 자외선 센서의 종류 및 응용 분야	18
표 3.1 아조벤젠 폴리머의 경화 방법	40
표 4.1 필터별 중심파장의 변화량	55

ABSTRACT

UV Fiber sensors based on Photo-responsive materials

Dong Seok Choi

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this thesis, we have demonstrated the azobenzene-coated fiber Bragg grating (FBG) to monitor ultraviolet light (UV) intensity in remote measurement. The elasticity of the coated azobenzene polymer is changed by the UV light, which induces the center wavelength change corresponding to the change of the FBG's grating period.

There are two methods of coating the azobenzene polymer on the FBG. These are the thermal casting method and the UV curing method. Center wavelength shift considered, UV curing method is more suitable for the UV sensors. Also, we have confirmed the center wavelength shift and shift aspect, and found that azo-coated FBG fabricated by using the Teflon casting is more suitable for the UV sensors and easy to supplementation.

To confirm the spectral response characteristics of the azo-coated FBG, we measured the magnitude of the center wavelength variation using bandpass filters. Consequently, the amount of the center wavelength variation of the azo-coated FBG is determined by the absorption spectrum of the azobenzene polymer, and the

azo-coated FBGs show a superior reaction in shorter wavelength regions. Through this characteristic of the azo-coated FBG, we found the possibility as a UV sensor that can use in the various UV regions.

We experiment repeatedly to confirm the reproducibility and reliability, and therefore, the azo-coated FBG shows the superb reproducibility and reliability. Furthermore, we find the new research design through the intensity variation of the resonant wavelength.

제1장 서 론

최근 들어 포토 리소그래피, 워터마크 제작, 광택, 코팅 등 다양한 분야에서 UV light emitting diode (LED), 자외선 램프, 고출력 자외선 레이저 등의 자외선 광이 많이 사용되고 있다. 하지만 자외선은 눈에 보이지 않는다. 이것이 고출력 자외선 장치를 사용하는 산업현장에서 자외선 노출에 의한 안전사고가 잦은 이유이다. 산업현장에서 주로 사용되는 자외선 장치는 자외선 경화기, 노광기, 살균 램프 장치 등이 있다. 대부분의 자외선 경화기는 0.5~30 KW 급의 대용량으로, 램프가 켜져 있을 경우 눈으로 보기 어려울 정도로 자외선이 강하므로 눈으로 직접 보는 일은 무조건 피해야한다. 사람의 피부에 자외선이 닿으면 300 nm 이하의 단파장 자외선은 표피 내로 투과되지 않고, 긴 파장의 자외선일수록 투과력이 강해진다. 그 결과, 피부병변이나 색소 침착, 백내장 등의 안과 질환과 인체 면역계통에의 악영향 등의 인체 유해성이 문제로 대두되고 있으며, 자외선 경화기와 같이 자외선과 관련된 산업 기기는 작동시 방출되는 자외선량을 실시간 모니터링하면서 작업자에게 알려주는 광센서 시스템이 필요하다^[6].

일반적으로, 포토다이오드(photo-diode) 기반의 자외선 측정용 광 검출기는 비교적 고가이고, 원격 측정 시스템에 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다. 기존에 제안된, 측면 연마된 광섬유 센서와 미소광학 간섭계 센서는 가격과 제작에 있어서 포토다이오드 기반 자외선 센서보다 우수한 특성을 보이지만, 제작이 어렵고 단일 측정 시스템에서 여러 파장의 자외선을 측정하지 못하는 단점이 있다^[2, 3]. 최근 이러한 단점들을 극복한, 자외선에 민감한 아조벤젠(azobenzene) 폴리머가 코팅된 광섬유 격자 센서가 제안되었다^[4]. 자외선에 노출된 아조벤젠 폴리머는 아조벤젠 특유의 이성화 반응에 의하여 부피 및 탄성이 변화한다. 이는 다시 광섬유에 장력을 유도하여 광섬유격자 간격을 변화시켜 최종적으로 중심파장 특성을 변화시킴으로써 광의 세기를 측정하는 원리이다. 아조벤젠 폴리머는 경화 방법(열 경화법과 자외선 경화법)에 따라 상이한 특성을 가지며, 코팅의 형태에 따라서 특성이 다르게 나타난다.

본 논문에서는 경화법을 달리하여 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 특성을 비교하여 우수한 경화법을 구별하였고, 코팅 방법과 형태를 달리하여(슬라이트 글라스 부착, 테프론 주물 이용 제작) 적합한 코팅 방법을 모색하였다. 제안된 자외선 측정용 아조벤젠 코팅된 FBG 센서는 자외선뿐만 아니라 느린 이성화와 외부 열 (광원의 복사열, 주

변 온도)에 의해서도 중심파장이 이동하게 되어 실제 자외선 자체의 세기 측정의 정확도가 낮아지게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 복사열을 흡수하고, 특정 파장대역의 빛만을 투과시키는 열 흡수 필터를 사용함으로써, 외부 열을 차단하여 외부 온도에 의한 중심파장의 변화를 제거하여 측정의 정확도를 높였다. 또한 개발된 자외선 센서의 파장에 따른 응답 특성을 확인하기 위해 투과 파장 대역이 서로 다른 광 투과 필터 (band pass filter)들을 사용 하여 파장에 따른 응답 특성 및 민감도를 확인하였다. 자외선의 세기를 120분 동안 반복적으로 측정함으로써, 자외선 센서로서의 재현성과 신뢰성을 확인 하였으며, 중심파장의 변화뿐만 아니라 세기의 변화를 통한 자외선 센서의 가능성에 대해서 논하였다.

제2장 이 론

제1절 자외선

1. 자외선 개요

자외선은 약 10~400 nm에 이르는 파장으로 된 넓은 범위의 전자기파의 총칭으로서, 극단적으로 파장이 짧은 자외선은 X선과 거의 구별되지 않는다. 적외선을 그 특성 때문에 열선이라 하는 것 같이 자외선은 화학작용이 강하므로 화학선이라 한다. 또한 파장에 따라 근자외선(파장 290 nm 이상), 수정범위의 자외선(수정을 투과하는 190~290 nm), 슈만선(120~190 nm), 라만선(60~120 nm), 밀리컨선(60 nm 이하) 등으로 나누며, 190 nm 이하의 파장을 가지는 자외선을 통칭하여 원자외선이라고 부르기도 한다^[1,4]. 그림 2.1 참조.

태양광선에는 자외선, 가시광선, 적외선 등이 동시에 존재한다. 자외선은 에너지가 강하고 침투력이 좋아 다양한 분야에 활용 발전되어 왔다. 자외선은 태양광선 중에 약 9%가 포함되어 있으며, 인공적으로는 방전 램프에 의해서 만들 수 있다. 그 원리는 방전 시 수은원자의 최외각 전자가 여기상태에서 기저상태로 복귀하면서 방사하는 전자기파 각각의 에너지 준위에 따라 서로 다른 자외선 파장을 방사한다. 이 때 방사되는 각 파장의 에너지 준위에 따라 그 역할이 다른데 파장에 따른 명칭 및 용도는 표 2.1과 같다.

2. 자외선 활용

가. 자외선 경화

자외선 경화란 자외선을 이용하여 액체 상태의 페인트나 잉크를 딱딱하게 굳히는 작업을 뜻한다. 자외선 경화는 자외선 램프로 부터 나오는 자외선의 강한 에너지가 광개시제에 화학 반응을 개시할 수 있는 에너지를 줌으로써, 자외선 경화 도료의 주성분이 되기 전 상태인 단량체(모노머:Monomer)나, 주성분이 되기 직전 상태인 중간체(올리고머:Oligomer)를 순간적으로 고체화된 중합체(폴리머:Polymer)로 만드는 것을 말한

다. 액체가 폴리머(Polymer)로 바뀌었다는 의미는 페인트나 잉크처럼 액체 상태가 딱딱한 고체와 같이 굳게 된다고 하여 경화, 혹은 하드닝(Hardening)이라고 한다.

나. 자외선 노광기

미세 회로를 형성하기 위하여 기판에 dry film(film type photo resist)을 laminating 하거나 액상 포토레지스트(photo resist)를 코팅한 후, 이 기판 위에 미리 패턴이 형성된 포토마스크(photo mask)를 진공으로 밀착시키거나(contact printing), 가볍게 접합(soft contact printing)하거나, 일정 간격(proximity printing)을 띄우거나, 렌즈를 이용하여(projection printing) 투영한 마스크 영상을 정렬한 다음, 포토레지스트가 광화학 반응(photo chemical reaction)을 일으킬 수 있는 자외선 파장 영역(310 ~ 400 nm)의 빛을 일정량(일정한 시간) 노출시켜 감광 작용을 유도하는 과정을 노광이라고 한다. 이것은 반도체 칩 제작 및 광도파로 제작에 많이 활용되고 있다.

다. 기타 자외선 응용

LCD, OLED, 유리 기판에 붙어 있는 유기 오염물은 그 크기가 분자 단위의 크기로 너무 미세하므로 수세(wet cleaning)로는 제거하는데 한계가 있다. 따라서 이러한 수 nm 크기의 미세한 불순물은 물리적인 방법이 아니라 화학-물리적인 방법으로 제거해야 한다. 자외선 세정은 자외선 자체의 에너지가 469.8 KJ/mole, 644.3 KJ/mole로 C-C, C-O, Si-D, SiC, C-H, C-N, O-O, O-H 결합보다 높으므로 화학결합원자 간에 직접 작용하여 결합을 끊거나, 자외선과 산소가 반응하여 발생한 오존이 -OH 라디칼을 형성하여 이 라디칼이 유기 오염물질과 직접 반응하여 오염된 유기물을 휘발성 물질(H₂O, CO, CO₂, N₂)로 변화시켜 제거한다.

또한 자외선은 살균에 많이 이용되고 있다. 자외선의 살균효과는 자외선의 파장에 따라 전혀 달라지며, 250~260 nm 파장의 자외선이 가장 효과적이다.

3. 자외선 발생기 종류

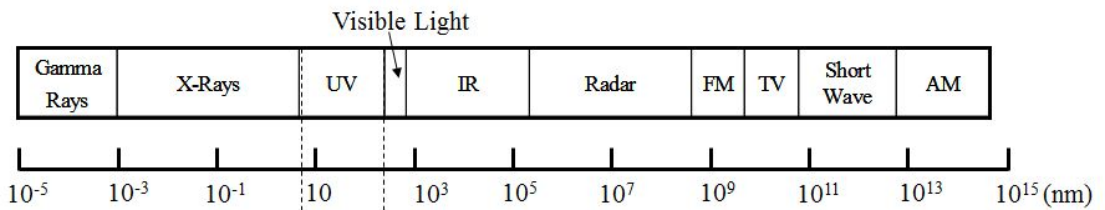
가. 자외선 램프

자외선 램프란 투명한 석영관 좌우에 전극이 있고, 내부에 수은, 금속 할라이드 첨가물과 불활성기체(Ar, Xe, He등)를 넣고, 양단을 실링한 구조이다. 전극은 열전자가 잘 방출되고 유점이 높은 텅스텐 소재를 사용하거나, 램프 종류에 따라 산화바륨, 산화 이트륨, 산화 스트론튬, 산화칼슘 등 열전자 방사 계수가 낮은 물질을 도핑(dopping)하여 열전자 방출을 원활히 하는 구조로 설계한다. 램프에서 방사되는 자외선의 파장은 램프 내부에서 발광하는 물질에 따라 다른데 수은이 발광할 경우는 주로 185 nm, 254 nm, 297 nm, 365 nm 403 nm, 436 nm, 546 nm 등의 전자기파 가 방사된다.

나. UV LED

자외선 경화 기술은 산업체에 도입된지 40년 밖에 지나지 않았지만 품질 향상과 생산성 향상이라는 측면에서 열 경화법에 비해 수익성이 높으므로 정밀 전자 산업은 물론 반도체, 인쇄, 휴대폰, LCD 등 현대 산업에 매우 중요하게 사용되고 있다.

LED 산업이 발달하면서 UV LED가 개발되어 점차적으로 산업에 활용할 수 있는 수준의 자외선의 세기를 얻게 되리라 기대된다. 하지만 자외선 방사 효율은 아직 입력 전력 대비 3~8%로 매우 낮으므로 일반 UV LED 설계자가 자외선 경화기로 사용하기에는 매우 낮고, 칩에서 방사되는 열이 칩의 성능에 결정적인 영향을 미쳐 방열 설계가 부실할 경우 칩이 순식간에 망가지는 문제가 생길 수 있다. 차후 열 제거 기술과 효율향상 기술을 활용하면 충분히 산업용 자외선 경화기를 만들 수 있겠지만 당분간은 가격이 저렴한 자외선 램프 경화기가 대세를 이룰 것으로 본다.



밀리컨선	라만선	슈만선	수정범위 자외선	근자외선
~60 nm	60~120 nm	120~190 nm	190~290 nm	290 nm ~

그림 2.1 전자기파 스펙트럼^[4]

표 2.1 자외선 파장에 따른 용도

주 작용	파장(nm)	적용 램프	용도 및 분야
오존생성	150~200	UV/O ₃ 램프	표면개질, 세정
세정	184.9	UV/O ₃ 램프	표면개질, 세정
살균작용	240~300	살균램프	공기살균, 물살균
UV경화	340~460	고압수은램프, 메탈할라이드램프, 제논 램프	인쇄제판, 도료, 잉크경화
광분해	250~450	광 분해용 램프	기판, LCD, Wafer, 프라스틱, 유리위의 유기물 제거
노광	300~450	노광용 램프	감광제 노광 필름 노광 새도우 마스크
광합성	340~700	저압UV램프, 고압수은램프	화학물질의 합성

제2절 자외선 센서

1. 자외선 감지기(UV 센서)의 필요성

자외선은 자외선 램프를 켜도 눈에 보이지 않는다. 이것이 고출력 자외선 장치를 사용하는 산업현장에서 자외선 노출에 의한 안전사고가 잦은 이유이다. 자외선은 에너지가 강하므로 자외선 램프 사용자는 눈과 피부에 직접 자외선이 과다 노출되지 않도록 주의해야 한다. 산업현장에서 주로 사용되는 자외선 장치는 자외선 경화기, 노광기, 자외선 살균 램프 장치 등이 있다. 대부분 자외선 경화기는 0.5~30 KW급의 대용량으로, 램프가 켜져 있을 경우 눈으로 보기 어려울 정도로 자외선이 강하므로 눈으로 직접 보는 일은 무조건 피해야한다. 사람의 피부에 자외선이 닿으면 300 nm 이하의 단파장 자외선은 표피 내로 투과되지 않고, 긴 파장의 자외선일수록 투과력이 강해진다. 390 nm보다 긴 파장은 진피(眞皮)까지 도달한다. 자외선에 탄 피부는 일종의 화상을 입은 상태가 되며, 염증이 계속되면 세포의 유전자가 손상되어 암을 유발할 가능성이 높다^[5]. 따라서 자외선 경화기와 같이 자외선과 관련된 산업 기기는 작동시 방출되는 자외선의 세기를 실시간 모니터링하면서 작업자에게 알려줄 수 있는 광센서 시스템이 반드시 필요하다. 또한 자외선 경화기 및 노광기 같은 정밀부품소자 제작 장비 등에서 자외선 세기를 정밀하게 감지할 필요가 있다. 자외선의 세기에 따라 부품특성과 밀접하게 연관이 있기 때문에 자외선 조사 시 자외선 세기의 실시간 측정이 필요하다.

2. 국내외 관련 기술(기관) 현황 및 비교 분석

계측기산업은 국가의 산업 경쟁력을 평가하는 주요 지표이자 첨단 산업의 기초가 되는 핵심 기반 산업으로서 최근 들어 그 중요성이 더해가고 있다. 그러나 산업용 광 계측기 및 센서 기기는 미국, 유럽, 일본 등 선진국에 의해 독점되고 있는 산업으로, 우리나라의 경우 대부분 높은 수입 의존도로 무역 역조 현상이 심화되고 있다. 표 2.2에서 보는 바와 같이 산업용 센서기기를 중심으로 했을 경우 세계 시장 규모는 약 54조 원 규모로 매년 7%내외의 높은 성장률을 보인다. 국내의 시장 규모는 대략 4600억원 규모로 매년 5% 정도의 성장률을 보이고 있지만 대부분 수입에 의존하고 있다. 국내

의 계측기기 산업체 수는 대략 450개로 멀티미터에서 스펙트럼 분석기에 이르기 까지 다양한 종류의 계측기기를 제작, 수출하고 있으나 전자저울, 전력량계 등의 생활계량기 수준에 머물고 있다^[21].

3. 자외선 포토다이오드

자외선 포토다이오드는 반도체 공정을 통해 제작되며, 센서의 재료로는 SiC, TiO₂, AlGaN 등이 이용된다. 자외선 센서 패키징은 기존 TO-CAN 형태로 주로 제작되나 측정의 용이성을 위해 프로브 형태로 제작되어 먼거리에서 자외선의 세기를 측정할 수 있도록 제공하고 있다. 각 센서 재료에 따른 특징을 살펴보면 다음 표 2.3과 같다.

4. 자외선 불꽃 감지기

오일과 가스로 인해 화재나 불꽃이 발생할 경우 자외선이 방출되는데 이 자외선을 측정하여 불꽃 점화 및 화재 발생 유무를 감지할 수 있다. 많은 산업분야에서 자외선 불꽃 감지기(UV flame 센서)가 사용되고 있으며 그중에 가장 대표적인 예가 자동차의 화재 경보 장치로 이용되는 것이다.

자동차의 화재발생 원인은 크게 엔진과열, 전기장치 불량, 정비 및 세차 불량, 차내 담배불 관리 소홀, 그리고 교통사고에 의한 연료 누출과 엔진 과열 등으로 나눌 수 있다. 자동차 화재의 특징 중 하나는 사고의 원인을 정확히 밝혀내기 어려운 경우가 많고 각종 계기 장치류의 자동화, 전자화로 인해 복잡해진 전기배선이 자동차 화재의 주 원인이 되고 있다. 자외선 불꽃 감지기를 이용한 자동소화시스템은 자동차 화재발생시 조기진화가 가능한 것이 특징이다. 외국의 경우 자동차의 화재 감시 및 자동소화시스템에 관한 연구가 활발히 추진되어 왔다. 미 육군에서는 장갑차의 화재 진압 목적으로 자동 소화시스템을 개발해 실용화했고, 독일의 벤츠사에서도 자체적으로 자동 소화시스템을 개발해 옵션으로 장착시키고 있다. 열감지기(heat detector)는 주행 및 정차시 또는 계절에 따라 엔진룸 내부의 온도변화가 심하고, 엔진 자체의 온도가 높고 응답속

도가 느리기 때문에 엔진룸 장착은 부적당하다. 따라서 화재감지 속도가 빠르고 신뢰성 면에서 적절한 불꽃 감지기를 개발하게 되었고, 센서의 종류에 따른 응답시간(respons time)과 감지범위(detecting angle & distance), 소화시간(extinguishing time)을 측정한 결과 가장 우수한 자외선 센서를 사용하여 개발한 자외선 불꽃 감지기가 사용된다. 이 감지기는 자외선 화재 감시장치로 화염에서 방사되는 미약한 자외선을 감지하는 연소감지장치에 이용되며, 밝은 장소나 어두운 장소에서도 아주 미세한 자외선을 감지하고 경보를 내는 성능을 갖고 있다. 특히 화염에서 발생하는 185-260 nm의 자외선 영역 파장을 감지하며, 작동원리는 자외선을 투과하는 용기(석영 또는 자외선 투과유리) 속에 기체를 봉입하고 설치된 2개의 전극에서 음극에 자외선이 투과되면 음극 표면에 광전효과에 의해 광전자가 방출되어 봉입된 기체와 충돌에 의한 방전으로 자외선을 감지한다. 그림 2.3는 하마마츠와 하니웰의 UV TRON R2868과 Honeywell UV flame sensors를 각각 보여준다.

5. 기타 자외선 센서

기타 다양한 형태의 자외선 센서가 제품화되어 사용자 안전을 위한 자외선 감지장치, 자외선 경화 및 노광기의 광 감지 센서, 자외선 정화시설의 자외선 감지 센서 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 표 2.4 참조. 이들은 위에서 살펴본 자외선 포토다이오드 또는 광전효과를 이용한 자외선 센서 모듈을 이용하여 제품화된 것이다. 하지만 기존의 자외선 센서 모듈을 개발하여 제품화하기에는 여러 문제점이 발생한다.

첫째, 기존의 자외선 센서 모듈을 개발하기 위해서는 제작 기반 구축비용이 높아 쉽게 사업화하기 어렵고, 현재 제작 기술 수준을 볼 때 선진국이 상당히 앞서 있어 높은 투자비용과 장기간 연구개발 기간이 필요하다. 이것을 해결하기 위해 제작비용이 적고 중소기업에서 원천기술을 확보할 수 있는 자외선 센서 모듈 및 시스템 기술 개발이 필요하다.

둘째, 기존의 자외선 센서의 경우 광전효과 또는 광반도체를 사용하기 때문에 전자기파 등에 의해 외부 잡음이 발생하여 측정 오차가 발생한다. 예를 들어 전신주 애자의 성능평가에 자외선 센서 어레이가 사용된다. 애자에서 코로나 방전이 일어날 때 자

외선이 발생한다. 이 경우 애자에서 발생하는 강력한 전자기파가 자외선 광센서 측정에 영향을 일으킬 수 있다. 또한 어레이를 만들기 위해서 많은 수의 자외선 센서가 장착되어 가격이 증가하게 된다. 따라서 외부 전자기파에 대한 영향이 적으면서 센서 모듈의 단가가 낮은 자외선 센서 개발이 중요하게 부각되고 있다.

6. 광섬유 기반 자외선 센서의 기술 수준 및 장단점

위의 문제점을 해결하기 위해 국내·외적으로 광섬유 기반 자외선 센서에 많은 관심을 보이고 있다. 광섬유가 개발된 이후 센서로의 응용이 지속적으로 이뤄져 왔으며 현재 온도, 장력, 화학반응 등 다양한 물리량의 측정을 위한 광섬유 기반 센서가 제품화되어 사용되고 있다. 광섬유의 장점인 외부 전자기파의 무응답성, 높은 온도안정성, 장거리 모니터링 기술, 높은 민감도, 빠른 반응성 등 때문에 광섬유 센서에 대한 산업화는 지속되어질 것으로 판단된다. 이러한 장점을 활용하여 자외선의 세기에 민감한 광섬유 센서 모듈 개발이 되었다. 다음은 현재 개발된 광섬유 기반 자외선 센서의 예를 보여준다.

가. 광도파로 자외선 센서 시스템

광섬유가 아닌 평판형 광도파로에 자외선에 반응하는 폴리머(sprirooxazine derivative 와 PMMA, polymethylmethacrylate) 필름을 코팅하여 도파되는 빛의 흡수 특성을 변화시켜 자외선의 세기를 측정하는 원리이다. 그림 2.4 참조.

나. SU-8 폴리머 광도파로와 photochromic dye를 이용한 자외선 광센서

그림 2.4(위쪽)에서 보이는 것처럼, 광도파로 표면에 광변색성 염료(photochromic dye)를 코팅하고, 광섬유를 통해 입사되는 빛이 감광재를 만나면 자외선의 세기에 따라 광손실이 발생한다. 이러한 광손실을 측정하여 자외선의 세기를 모니터링하는 광센서이다. 그림 2.4의 아래에서 보는 바와 같이, 광섬유 형태의 자외선 센서가 자외선에 대한 반응성이 다른 형태의 센서에 비해 높은 것을 알 수 있다.

다. 아조벤젠 염료가 도핑된 폴리카보네이트 코팅된 광섬유 기반 자외선 센서

아조벤젠 염료가 도핑된 폴리카보네이트가 코팅된 광섬유 자외선센서는 광섬유의 한 면을 식각한 후에 아조벤젠 염료를 코팅함으로써 광경로에 따른 공진 스펙트럼을 얻게 된다. 이것은 특정한 파장에만 외부로 광손실이 발생하게 되는데 그림2.5에서 보면 1350 nm와 1470 nm에서 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 코팅된 염료에 자외선을 조사하면 폴리머의 굴절률이 변하게 되고, 이것은 공진 파장 위치 변화를 유도하게 된다. 이로써 자외선의 세기를 측정할 수 있는 원리이다. 하지만 이 광섬유 기반 센서의 경우 자외선의 조사에 따른 굴절률 변화 속도가 20초 이상으로 상당히 늦은 반응속도를 가짐을 알 수 있다. 자외선 센서로 활용하기 위해서는 광민감도뿐만 아니라 반응속도가 중요하기 때문에 반응속도가 향상된 자외선 센서 개발이 필요하다.

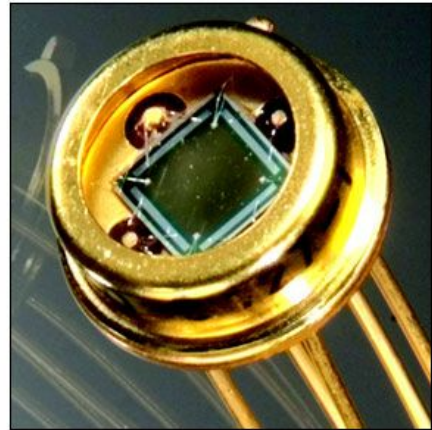
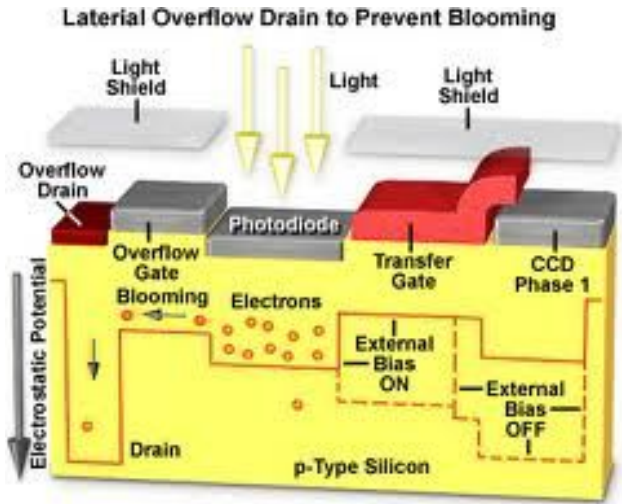


그림 2.2 자외선 포토다이오드의 구조 및 외형

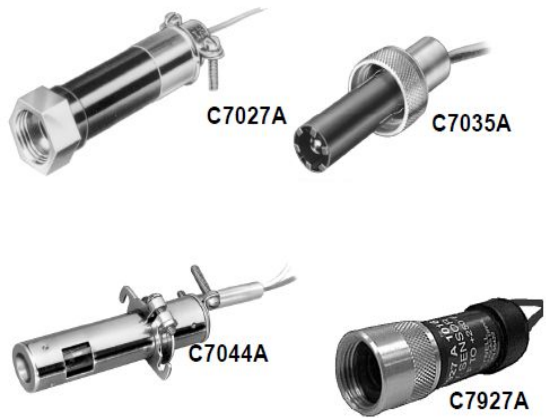


그림 2.3 하마마츠와 하니웰의 자외선 불꽃 감지기

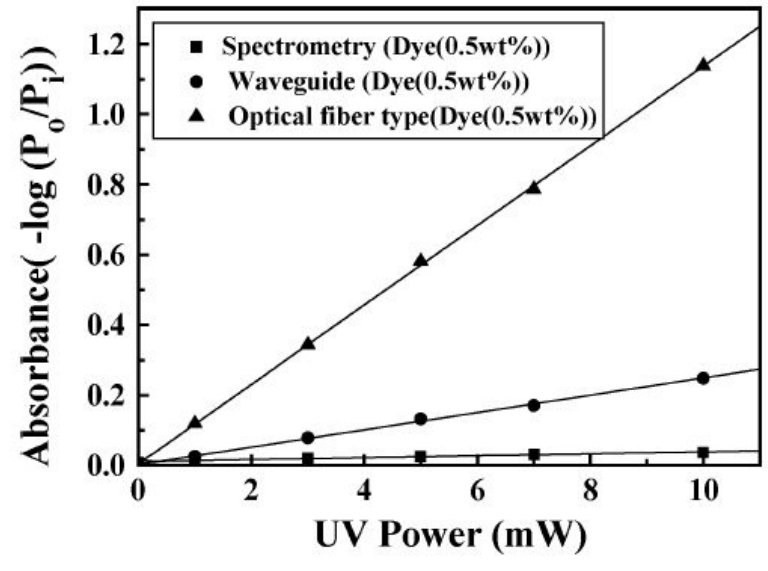
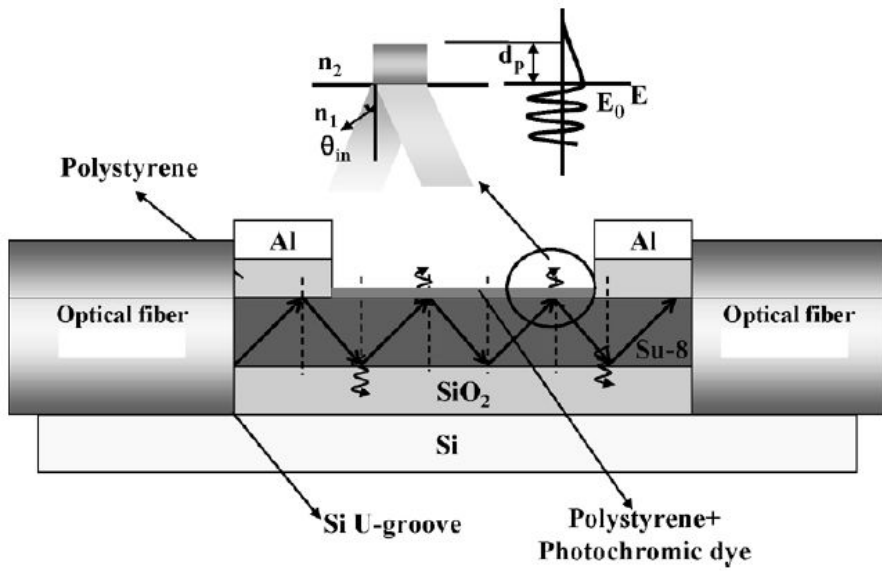


그림 2.4 광도파로 자외선 광센서의 개념도(위), 도파로의 형태에 따른 반응성(아래)

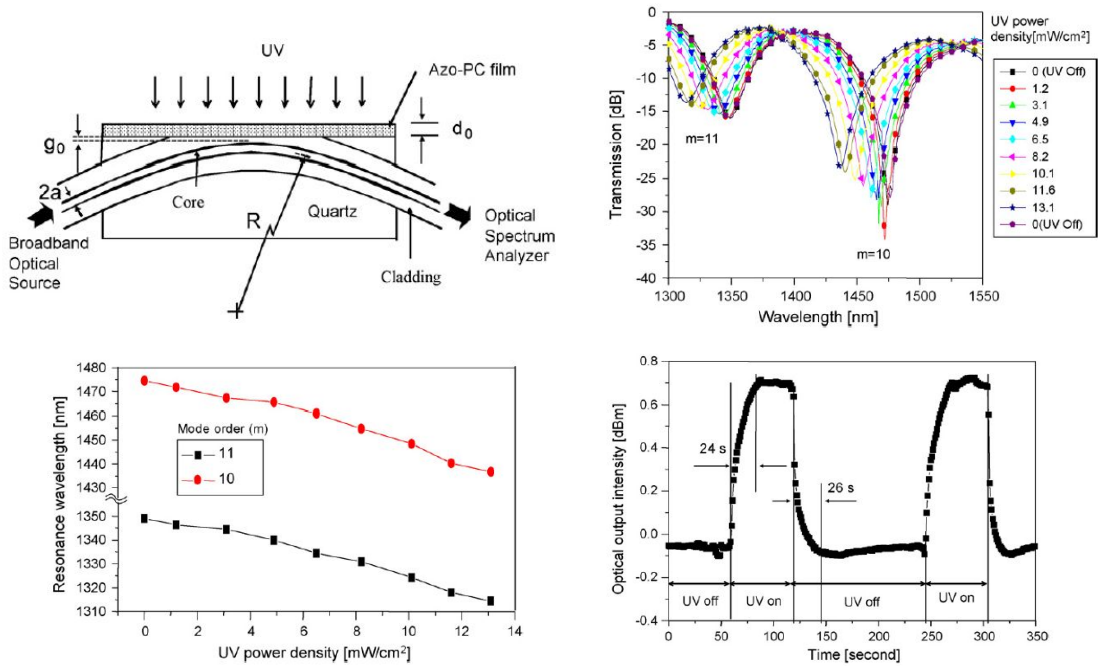


그림 2.5 아조벤젠 염료가 도핑된 폴리카보네이트가 코팅된 광섬유 자외선 센서

표 2.2 산업용 광계측기 및 센서기기 시장 동향 및 전망

구 분	현재의 시장규모 (2010년)	예상 시장규모 (2012년)
세 계 시 장 규 모	54,2619억원	535,920억원
한 국 시 장 규 모	4,628억원	5,559억원
해당기업의 시장규모	24,214억원	25,909억원

표 2.3 자외선센서 재료의 종류 및 특징

<p>SiC</p>	<p>특징 : 빠른반응속도, 낮은 암전류 면적 : 0.054 mm², 1 mm², 3.84 mm² 파장 : UVC~UVA , 주로 UV 투과 필터를 이용해서 파장 선택 동작온도 : -25 ℃ ~70 ℃ 암전류(1 V 역바이어스) : 1 fA~2 fA (1fA=10⁻¹⁵A) 민감도: 0.11-0.13 A/W</p>	
<p>TiO₂</p>	<p>특징 : 넓은 Active area, 비교적 저가 홍반을 일으키는 자외선 검출 TiO₂제품군의 면적 : 4.18 mm², 15.66 mm² 암전류(10 mV 역바이어스) : 30 pA (1pA=10⁻¹²A) 민감도 : ~ 20 mA/W</p>	
<p>AlGaN</p>	<p>면적 : 보통 0.076 mm² 암전류(0.1 V 역바이어스) : 100 fA 민감도 : 보통 0.1~0.13 A/W</p>	

표 2.4 기타 자외선 센서의 종류 및 응용 분야

	제품	설명	응용 분야
라디오미터		자외선, 햇빛의 복사에너지나 조명도 측정	자외선 노광 시스템, 램프 제조, 방사선 안전
PLC		PLC 시스템 컨트롤러를 이용한 자외선 및 햇빛의 복사 에너지 측정	자외선 노광 시스템, 태양의 복사량 측정
방수 센서		방수성 UC-C 센서	물 소독
DVGE/ ÖNORM 센서		기술규정 DVGW 294-3과 오스트리아 기술 표준 ÖNORM 5873 에 따른 UV-C측정용 센서	물 소독
자외선 탐침기		노광 시스템 모니터링을 위한 자외선 탐침기	자외선 노광 시스템, 자외선 광원

제3절 광섬유 격자

1. 광섬유 격자 개요

광섬유 격자는 광통신 시스템의 핵심 소자 기술로써 파장 분할 다중화 통신에 있어 채널 분기/결합, 분산보상, 광섬유 레이저용 공진기 구성 미러 등의 분야에 필수적인 소자로 인식되고 있다. 미국, 영국, 호주, 일본 등 세계 선진국에서는 이미 광섬유 격자 소자 기술 개발을 시작하여 풍부한 경험과 기술을 축적하고 있으며 광섬유 격자 소자 응용 분야를 넓혀가고 있다. 따라서 초정밀 및 고성능의 광섬유 격자의 개발과 그 응용 기술은 경제적으로 중요한 가치를 가지며, 기타의 산업에 대하여 큰 파급효과를 가져오게 될 것이다. 이러한 사회적 요구로 시작한 본 연구는 간단한 통신용 필터 개발을 시작으로 다파장 라만 레이저, 초정밀 센서, 포토닉 A/D 변환 기술등 많은 고부가가치 산업 분야에의 응용이 가능하며, 향후 고부가가치를 이끌어 낼 수 있는 첨단 기술이다.

광섬유 격자는 광섬유 코어에 굴절률의 주기적인 변화를 주어 특정 파장의 빛을 반사시키거나, 제거하는 소자이다. 광섬유 격자는 광섬유 코어에 존재하는 광섬유 소자이므로 부피가 작고 연결성이 좋으며 삽입 손실이 작고 파장 선택도가 높은 장점을 가지고 있다^[7]. 광섬유 격자는 그 주기에 따라 코어모드로 진행되는 빛을 클래딩모드와 결합하여 진행되는 빛의 손실을 이용하는 장주기 격자와 코어모드의 빛을 반대방향의 코어모드와 결합하여 반사시키는 단주기 격자로 구분할 수 있다.

2. 단주기 격자

광섬유 단주기 격자(fiber Bragg grating)은 가장 널리 사용되고 있는 광섬유 센서로서 특정 파장의 빛을 반사하는 특성을 가진다. FBG는 주로 간섭무늬 패턴과 위상마스크를 이용하여, 감광성 광섬유의 코어에 빛을 주기적으로 분배하는 방법을 이용하여 제작한다. 그림 2.6(위)에서 보는바와 같이 광섬유 코어의 굴절률은 자외선 조사에 의해 영구적으로 변한다. 결과적으로 광섬유 코어 굴절률의 주기적인 분포변화를 브래그 격자(Bragg grating)라 한다^[8]. 격자의 굴절률과 간격, 주기의 길이는 목표로하는 공진

파장과 폭, 반사율등에 의해 달라진다.

그림 2.6(아래)은 FBG의 구조를 개략적으로 보여준다. n_0 와 n_1, n_2, n_3 는 각각 공기의 굴절률과, 광섬유 클래딩, 광섬유 코어, 격자의 굴절률을 나타낸다. 일반적인 광통신 파장대역(1550nm)에서의 격자의 주기는 대략 530 nm정도이고, 격자 주기의 길이는 20 mm정도 이다. FBG를 가능케 하는 기본 원리는 프레넬 반사이다. 넓은 파장의 빛이 FBG에 전송되면 광섬유 코어의 굴절률과 격자의 굴절률 차에 의해서 특정파장(Bragg 파장 또는 공진파장)에 대해서만 반사가 발생한다. 격자 주기를 진행하는 빛은 격자의 굴절률을 차례로 겪으면서 점진적으로 반사가 진행되며, 격자 주기의 길이를 조정함으로써, 반사율을 조정할 수 있다.

굴절률과 격자의 주기, 공진파장의 관계는 다음과 같다^[9].

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (1)$$

여기에서 n_e 는 광섬유 격자의 유효굴절률이고, λ_B 와 Λ 는 각각 공진파장과 격자의 주기이다. 유효굴절률은, 진공중의 광속과 물질내에서의 광속으로 나눈 값이다. 유효굴절률은 파장뿐만 아니라 도파로내를 진행하는 빛의 전파 모드에 따라 달라진다. 때문에 유효굴절률을 모달(modal) 굴절률이라고도 한다. 식 (1)에서 보는 바와 같이 FBG의 공진 파장은 격자의 주기와 굴절률의 크기에 의해 결정된다. 때문에, FBG는 특정 파장에 대해서만 필터역할을 수행할 수 있다. 그림 2.7은 넓은 파장의 광원을 FBG에 진행시켰을 때의 투과, 반사 스펙트럼이다. 수 nm이상의 스펙트럼 폭을 지닌 빛(그림 2.7 위)이 브래그 격자가 새겨진 광섬유를 진행하면, 격자의 특성에 의해서 특정 파장에 대해서만 반사가 일어난다. 브래그 격자를 투과한 빛의 스펙트럼은, 그림 2.7(아래)과 같이 격자 주기에 의해 차단된 빛을 제외한 형태로 나타난다. 반사된 빛의 반사율과 스펙트럼 폭은 브래그 격자의 특성에 따라 달라지지만, 일반적으로 파장 폭은 0.2 nm 정도로 매우 좁은 파장 대역을 가지며, 반사도는 90%이상이다.

공진파장(λ_B)은 격자의 굴절률과 주기에 의해서 파장과, 스펙트럼 폭이 결정된다. 그림 2.8은 FBG의 공진파장의 세기를 좀 더 명확하게 보여준다. 공진파장의 스펙트럼 폭($\Delta\lambda$)은 식(2)를 통해 얻을 수 있다.

$$\Delta\lambda = \left[\frac{2\delta n_0 \eta}{\pi} \right] \lambda_B \quad (2)$$

여기에서, δn_0 은 격자의 굴절률과 코어의 굴절률차($n_3 - n_2$)이다. η 는 광섬유 코어상의 필드 분포를 나타내는 함수이다^[9]. 공진파장의 최대 세기($P_B(\lambda_B)$)는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_B(\lambda_B) = \frac{\sinh^2 \left[\eta(V) \delta n_0 \sqrt{1 - \Gamma^2} NA / \lambda \right]}{\cosh^2 \left[\eta(V) \delta n_0 \sqrt{1 - \Gamma^2} NA / \lambda \right] - \Gamma^2} \quad (3)$$

$$\Gamma(\lambda) = \frac{1}{\eta(V) \delta n_0} \left[\frac{\lambda}{\lambda_B} - 1 \right] \quad (4)$$

V 는 규격화된 주파수(normalized frequency)이고 N 은 굴절률 주기변화의 수이다^[7, 8, 9, 10].

FBG는 스트레인과 온도에 민감성을 가지기 때문에 광섬유 센서로 사용할 수 있다. 스트레인은 격자의 주기를 변화시켜 공진파장의 파장 및 세기를 변화시키며, 열은 광섬유의 재료인 유리의 부피를 팽창시켜 공진파장의 특성을 변화시킨다. 공진 파장(λ_B)과 공진파장의 변화량($\Delta\lambda_B$), 스트레인(ϵ)과 온도(ΔT)의 관계는 다음과 같다^[9].

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = C_s \epsilon + C_T \Delta T \quad (5)$$

또는,

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \right] = (1 - p_e) \epsilon + (\alpha_A + \alpha_n) \Delta T \quad (6)$$

식(5)에서, C_s 는 스트레인 계수이고, C_t 는 열 계수를 의미한다. 또한 ϵ 은 광섬유 격자에 적용되는 스트레인을 나타내며, ΔT 는 광섬유 격자의 온도변화를 나타낸다. 식(6)은 식(5)를 광섬유에 적용시킬 수 있도록 변형하였다. 여기에서, p_e 와 α_Λ , α_n 는 각각 광섬유 격자에 적용된 스트레인-광학 계수와 열 팽창 계수, 굴절률 변화를 나타낸다. FBG는 스트레인과 온도에 따라, 공진 파장과 파장 폭이 결정되기 때문에 두 효력을 구분하여야 한다. 유리의 팽창 계수(α_Λ)는 실질적으로 무시해도 될 정도로 작기 때문에 온도에 의한 공진 파장의 변화는 굴절률의 변화로 기술할 수 있다.^[13]

3. 장주기 격자

장주기 격자(long Period grating)는 굴절률이 다른 격자를 광섬유의 코어에 주기적으로 분포시켜, 그림 2.9에서 보는 바와 같이, 광섬유 코어를 진행하는 빛과 클래딩을 진행하는 빛을 커플링 시킴으로써, 특정 파장을 필터링 시키는 광학소자이다. 장주기 격자의 원리는 광섬유 코어 내부를 진행하는 빛이 격자 주기의 굴절률 변화에 의해, 코어 내부를 진행하는 빛과 클래딩으로 진행하는 빛으로 나누어진다. 여기에서, 코어로 진행하는 빛을 코어모드, 클래딩으로 진행하는 빛을 클래딩 모드라 한다. 클래딩으로 진행하는 빛은 광섬유 클래딩 외부의 굴절률(n_o)에 의해 다시 반사되어, 코어를 통해 진행하는 빛과 결합 하게 된다. 이때, 결합하는 두 모드는 진행 거리가 서로 다르기 때문에 위상차를 갖는다. 위상차는 광섬유 외부의 온도나 압력, 굴절률 등의 물리적 요인에 의해서 변한다. 두 모드의 결합에 의해서 공진 조건을 만족하는 파장대역이 투과 또는 반사되지 않고 투과 스펙트럼 상에 손실로 나타난다. FBG와는 다르게, 격자 주기가 수백 μm 정도로 길기 때문에 많은 수의 커플링이 발생 하므로 그림 2.10과 같이 다수의 공진 파장이 유도 되며, 파장폭 또한 30 nm정도로 넓다.

코어모드와 클래딩 모드간의 위상 결합 파장(λ)은 식(7)을 통해 얻을 수 있다.

$$\lambda = [n_{eff}(\lambda) - n_{clad}^i(\lambda)] \Lambda \quad (7)$$

여기에서 n_{eff} , 와 $n_{clad}^i(\lambda)$, Λ 는 각각, 코어의 유효굴절률과 i 번째 클래딩 모드의 굴절

를, 격자의 주기를 의미한다.^[14] 최소 투과도, 즉 차단 파장에 대한 관계식은 식(8)과 같다.

$$T_i = 1 - \sin^2(K_i L) \quad (8)$$

L은 격자주기의 길이를 나타내며, K_i 는 i 번째 클래딩 모드의 커플링 계수를 의미한다.

아조벤젠 폴리머의 이성화로 인한 스트레인의 변화는 매우 작은 양으로, 실제 중심 파장의 이동은 수백 pm에서 수 nm로 상당히 작다. 장주기 격자는 파장폭이 수십 nm로 단주기 격자에 비해 매우 넓어서, 정밀한 중심파장의 이동량을 측정하는데 어려움이 있다. 즉, 장주기 격자는 스트레인 유도에 의한 분해능이 단주기 격자에 비해 매우 좋지 않다. 또한, 클래딩을 둘러싼 물질의 굴절률에 따라 커플링이 달라지기 때문에 차단되는 파장 또한 달라지며, 커플링된 파장이 제작할 때마다 일정하지 않아서 정확한 차단파장을 구현하는데 어려움이 있다. 이러한 이유 때문에 아조벤젠 코팅된 광섬유 센서로 단주기 격자를 선정하였다.

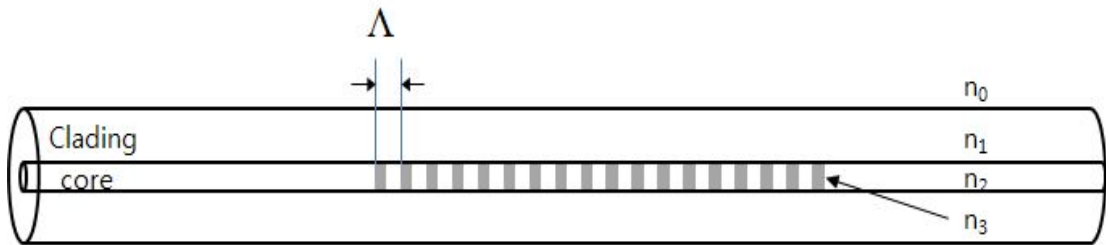
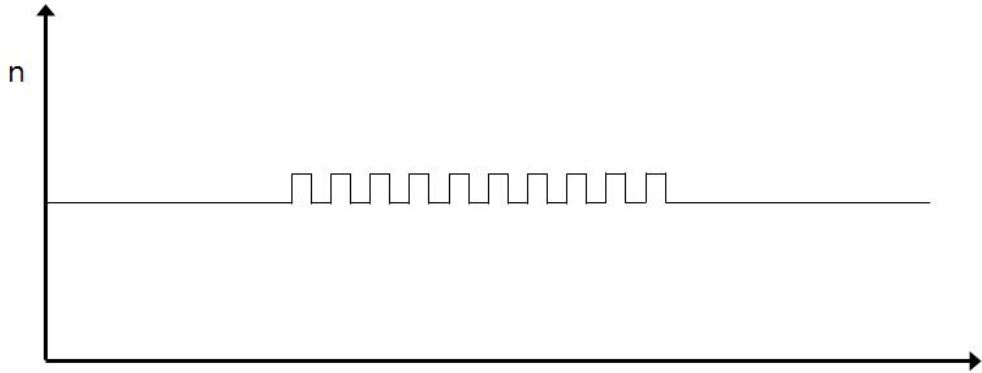


그림 2.6 FBG의 굴절률 분포(위)와 FBG의 구조(아래)

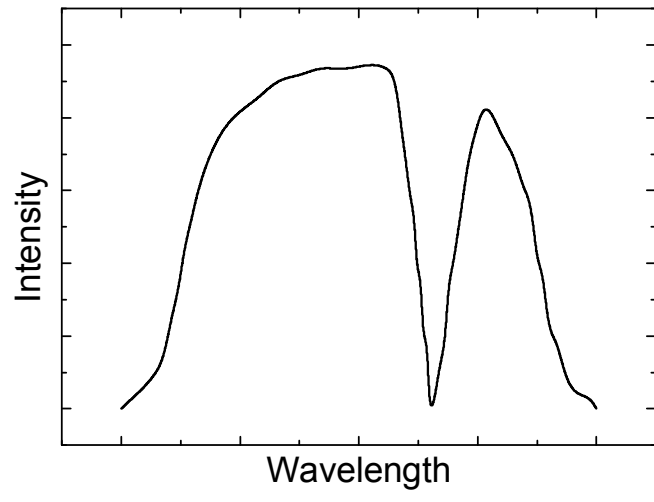
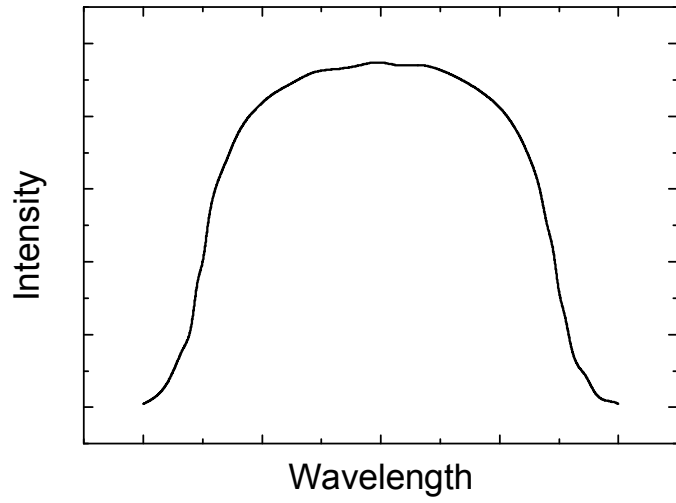


그림 2.7 입력 광의 스펙트럼(위), 투과광의 스펙트럼(아래)

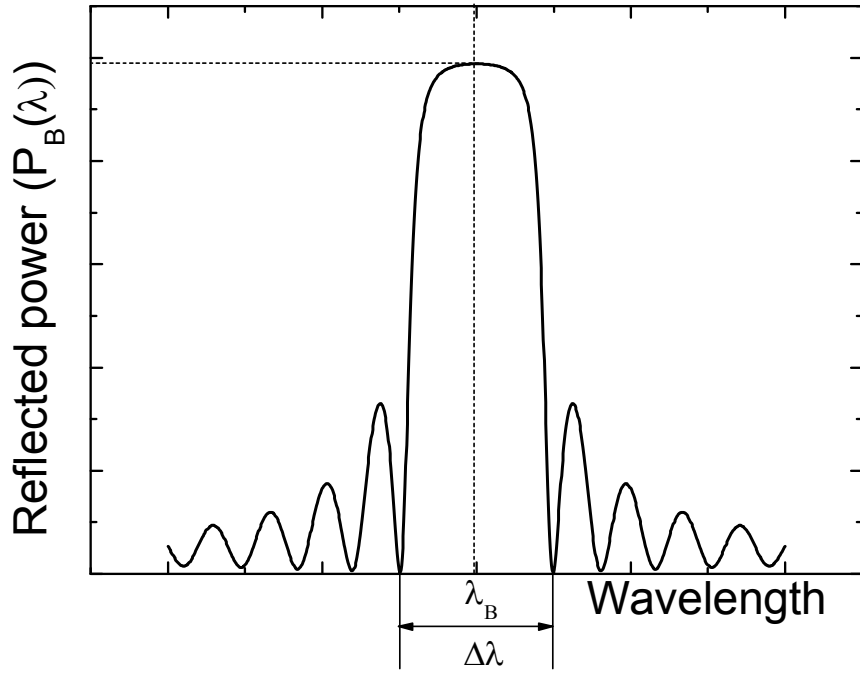


그림 2.8 파장에 따른 공진 파장의 세기

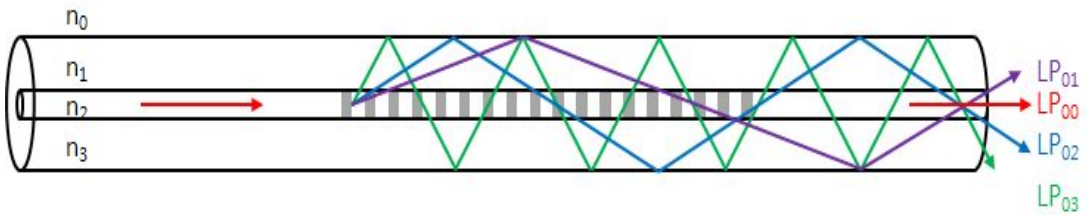


그림 2.9 장주기 광섬유 격자의 구조

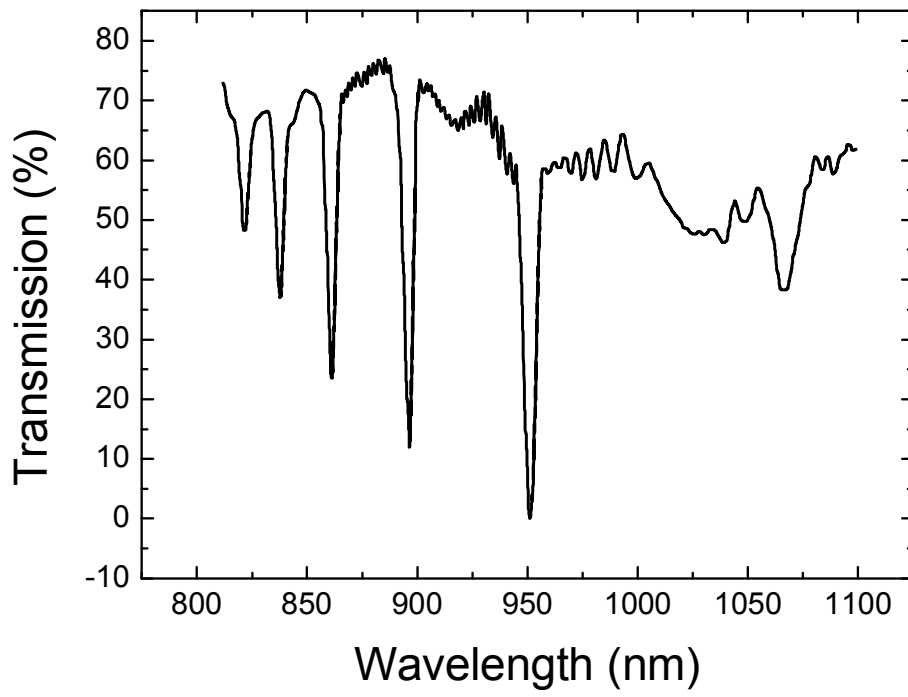


그림 2.10 장주기 격자의 투과 스펙트럼

제4절 광기능성 소재

광변색이란 광조사에 의해 화학 물질의 결합상태가 변하여, 흡수 스펙트럼이 다른 이성체가 생성되면서 물질의 색이 변화하는 현상을 말한다. 광변색은 최초에 1950년대에 주목받았으나 내구성과 열장정성의 문제로 인해 실용 재료의 개발에는 이르지 못했다. 이후 광전자 과학의 비약적인 발전과 광변색성 분자를 이용한 광응답성 고분자가 연구되면서 1980년대 후반부터 광변색에 대한 관심은 다시 높아 졌다^[15].

광변색 재료 중 아조벤젠은, 현재 가장 많이 사용되고 있는 염료인 아조 염료의 일종으로, 막대모양의 대칭형 분자구조를 가지고 있다. 광학적으로는 자연광이나 자외선 및 열에 의해 이성화한다는 특징을 지닌다. 그림 2.11에서 보는바와 같이 아조벤젠은 trans-cis 두 이성질체를 갖는다. Trans는 cis에 비해 더 안정적이고 cis는 열적으로 trans로 이성화 될 수 있기 때문에 초기 상태에서 고분자는 대부분 안정적인 trans로 존재한다^[17]. 그림 2.12와 같은 간단한 에너지 준위 구조는 일반적으로 아조벤젠 분자들에 적용된다^[22-25]. 그림 2.12에서 보는 바와 같이 trans와 cis 이성체는 각각 S_0 와 S_0' 의 기저상태를 가진다. S_0 상태는 S_0' 보다 낮은 상태의 에너지 준위를 갖는데, 이것은 cis 상태에 비해 trans 상태가 더 안정적이라는 것을 의미한다. 고분자에 광을 조사함으로써 적당한 에너지를 주고 있는 상태에서 trans 이성체는 빛을 흡수하여 첫 번째 여기 상태인 S_1 으로 여기된다. 그리고 이것은 T_1 으로 붕괴된다. T_1 상태의 분자는 두 가지 방향성을 가지는데, 첫 번째는 S_0 로 완화하는 것이고 다른 하나는 T_1' 으로 전이 되는 것이다. T_1' 에서 바닥 상태인 S_0' 으로 전이 되는 것은 빛이나 열에 의해 쉽게 일어나고, 또 다른 방법인 T_1 으로의 전이 또한 가능하다. 아조벤젠에 조사되는 빛의 파장이 cis 이성체의 흡수 밴드와 같다면, 앞에서 설명한 trans상태와 비슷한 이성화 과정이 일어난다^[26-27]. 게다가 S_0' 상태에서 그보다 더 안정적인 S_0 상태로의 직접적인 천이가 열적으로 가능하다. 이 모든 전이율은 trans와 cis 이성체의 흡수 계수와 상태들 간의 양자 계수에 따라 다르다. 아조벤젠은 소거형 고밀도 기록재료, 고밀도 마이크로 필름 재료, 가변 광 셔터 등에서 주로 연구가 진행되어 왔으며, 이밖에도 굴절률제어나^[18] 광표시장치, 비선형 광학재료 및 홀로그램 기록에의 응용이 가능하다고 알려져 있다^[19]. 아조벤젠 폴리머의 trans-cis 분자구조의 변화는 또다른 중요한 특징을 보인다. 아조벤젠 폴리머의 이성화는 폴리머의 탄성의 변화를 유도하여 부피를 변화시킨다. 결과적으로 그림 2.13에

서 보는 바와 같이 부피의 감소는 폴리머의 길이를 증가시킨다. 본 연구에서는 아조벤젠 폴리머의 이성화에 의한 부피 변화를 광섬유 단주기 격자에 적용하여 자외선 센서로써의 가능성을 논하였다. 본 연구에서는 비닐이서 타입의 아조벤젠 모노머[R]와 trimethylolpropane triacrylate (TMPTA), hydroxyethyl acrylate (HEA) 그리고 2, 4, 6-trimethylbenzoyl-diphenyl phosphine oxide (TPO)등의 광개시제로 배합물을 구성하였다.

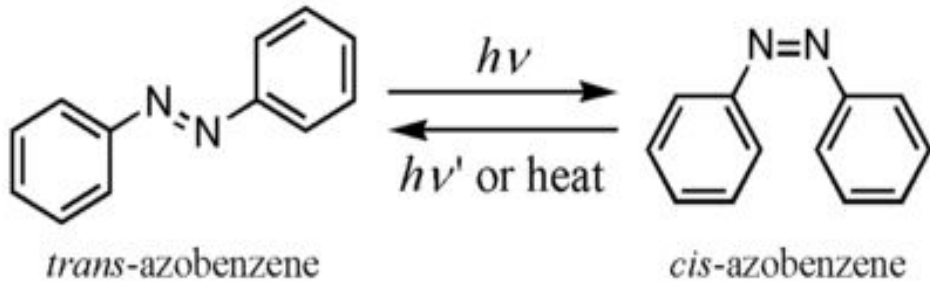


그림 2.11 아조벤젠 고분자의 분자 구조 변화

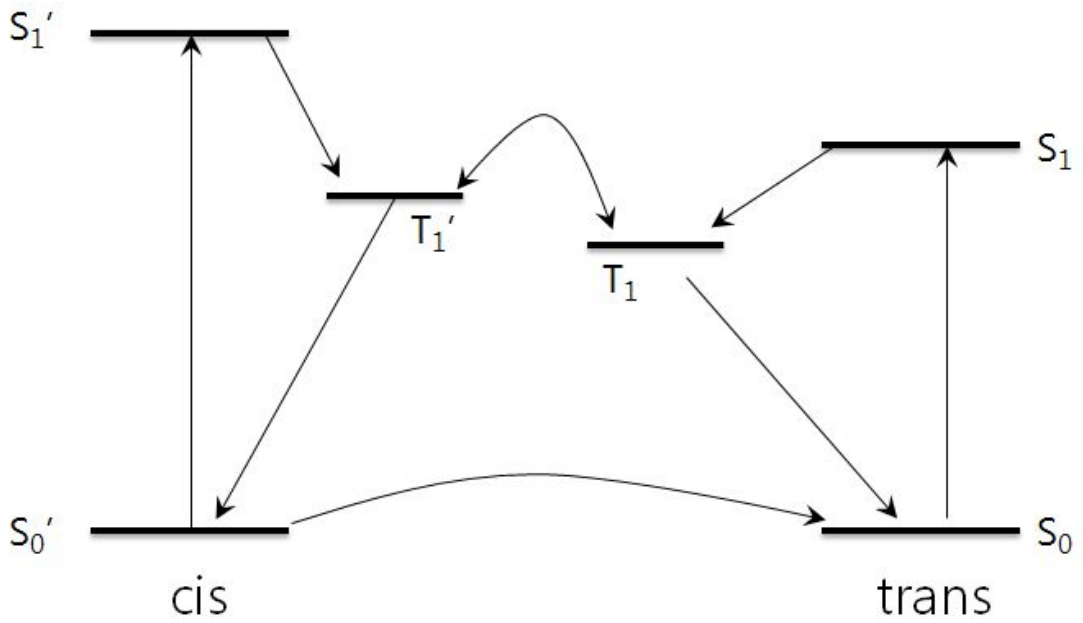


그림 2.12 아조벤젠의 에너지 다이어그램

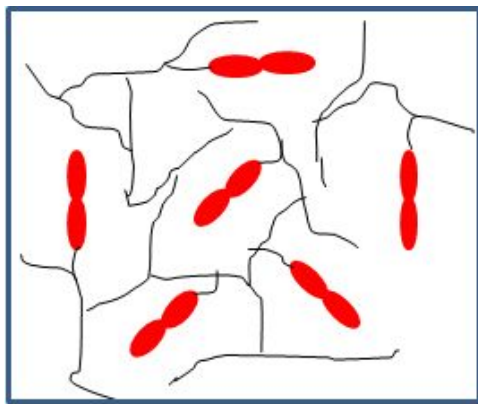
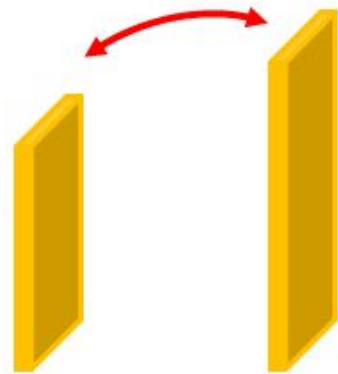


Photo cured gel film



UV on and off

그림 2.13 아조벤젠 필름의 부피 및 길이의 변화

제3장 아조벤젠 코팅된 FBG

제1절 제작 방법 및 특성

1. 제작 방법

광기능성 소자인 아조벤젠의 길이변화 특성과 FBG의 특성을 결합하기 위해 열과 자외선을 이용하여 각각 경화시키는 방법을 이용 했다. 표 3.1에서 보는 바와 같이, 경화 전에 아조벤젠 배합물을 초음파 처리 하여 배합물 내의 각 성분들의 응집을 제거하였다. 열 경화법은 FBG를 초음파 처리된 액체상태의 아조벤젠 속에 위치시킨 후 130°C의 온도로 1시간동안 경화하여 아조벤젠을 코팅 시키는 방법이다. 자외선 경화법은 열대신 320 nm ~ 480 nm의 파장폭을 지닌 자외선을 이용하여 45분간 경화시키는 방법이다.

제작된 아조벤젠 코팅된 FBG는 그림 3.1에서 보이는 것처럼, FBG 주위에 아조벤젠 배합물이 열과 자외선에 의해 경화되어 코팅된 형태이다. 그림 3.1의 위쪽 그림은 아조벤젠 코팅된 FBG는 슬라이드 글라스 표면에 FBG를 위치시킨 후, 적당량의 아조벤젠을 FBG에 위치시킨 후 열과 자외선을 이용하여 경화 하였다. 아래의 아조벤젠 코팅된 FBG는 테프론 재질의 주물을 이용하여 제작하였다. 지름 1 mm, 길이 85 mm의 홈에 FBG를 위치시킨 후, 적당량의 아조벤젠을 홈에 부은 후 자외선을 이용하여 코팅하였다.

2. 특성

격자 주위에 코팅된 아조벤젠 폴리머는 조사된 자외선에 의해서 길이가 증가한다. 이 길이의 증가는 광섬유 주기 격자에 장력으로 작용하여 격자의 주기를 증가시키고, 결과적으로 FBG의 공진 파장을 장파장 영역으로 이동시키게 된다. 그림 3.2는 아조벤젠이 코팅된 FBG의 자외선에 의한 가역적인 길이변화특성을 도식화한 것이다. 아조벤젠 코팅된 FBG는 일반 FBG와 마찬가지로 특정파장을 차단하는 특성을 여전히 갖는다. 또한 자외선에 의해서 아조벤젠 폴리머의 길이 및 FBG의 격자 주기가 증가하기 때문에 식(1)에 따라서 FBG의 공진파장 역시 장파장 영역으로 이동한다.

아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동에는 크게 3가지 요인이 존재 한다. 자외선에 의한 아조벤젠 폴리머의 길이의 변화와 이로 인한 격자의 주기변화, 광원에서 발생한 열에 의한 격자의 주기 변화, 그리고 자외선에 의한 격자의 굴절률 변화이다. 또한, 2장 4절에서 언급한 것처럼, 아조벤젠은 자외선과 열에 의해서 이성화 반응이 나타난다. 이때, 자외선에 의한 이성화 반응 시간은 수 초 내에 일어나며, 열에 의한 이성화는 수초~수십초 내에서 상대적으로 느리게 나타난다. 중심파장의 급격한 변화는 자외선에 의해 trans상태가 cis상태로 빠르게 이성화 되면서 FBG의 격자의 주기를 증가시킴으로써 나타난 변화이다. 또한 중심파장의 느린 변화는 슬라이드 글라스 표면과 아조벤젠 사이의 마찰력, 자외선에서 발생하는 열에 의해서 이성화가 진행됨으로써 나타난 중심파장의 변화이다.

그림 3.3은 실험을 위한 구성도이다. SLED에서 나온 1500 nm ~ 1600 nm대역의 빛의 스펙트럼이 아조벤젠이 코팅된 FBG를 통과하여 광 스펙트럼 분석기(OSA)를 통해서 측정된다. 이때 자외선이 조사되면 중심파장의 이동이 광스펙트럼 분석기를 통해 연속적으로 측정된다. 그림 3.4는 350 mW/cm²의 세기의 자외선에서 슬라이드 글라스 표면에 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 변화를 보여준다. 약 25초 정도에서 자외선이 조사되면 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장은 급격하게 증가한 후(A 부분), 증가율이 감소하는 경향을 보인다(B 부분). 100초 경과 후, 자외선이 꺼지면 이동된 중심파장이 다시 초기 위치로 빠르게 회복한 후(C 부분), 수십초에 걸쳐서 천천히 원 위치로 회복한다(D 부분). 그림 3.4의 점선은 아조벤젠 코팅이 안된 FBG의 자외선에 따른 중심파장의 이동형태를 보여준다. 이 역시 자외선에 의해서 중심파장이 이동하지만, 아조벤젠 코팅된 FBG와는 다르게 급격히 이동하는 구간이 없고 이동량 역시 0.2 nm로 작다.

또한, 그림 3.5에서 보이는 바와 같이 아조벤젠 코팅된 FBG에 조사되는 자외선에 의해서 공진파장이 장파장영역으로 이동하는 특성을 보이며, 자외선의 세기에 따라서 이동량 역시 증가한다. 그림 3.6은 자외선의 세기를 50 mW/cm² ~ 100 mW/cm² 까지 10 mW/cm²단위로 증가시켰을 때의 자외선의 세기에 따른 중심파장의 이동량을 보여준다. 이를 통해서 아조벤젠 코팅된 FBG에 조사되는 자외선의 세기가 클수록 중심파장의 이동량 역시 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 아조벤젠 코팅된 FBG의 이러한 성질은 자외선 센서로서 활용되는 것에 필수적인 특성이다.

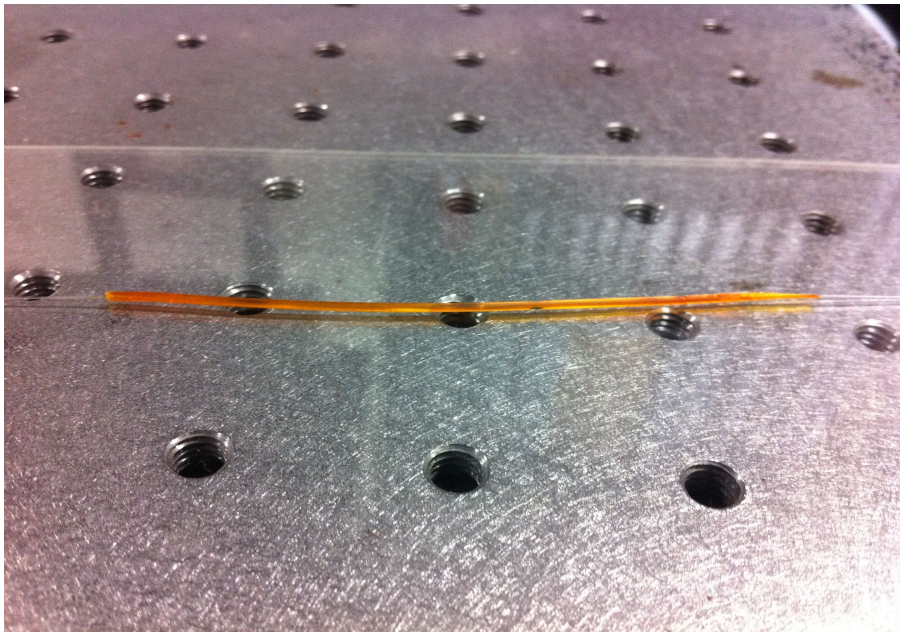
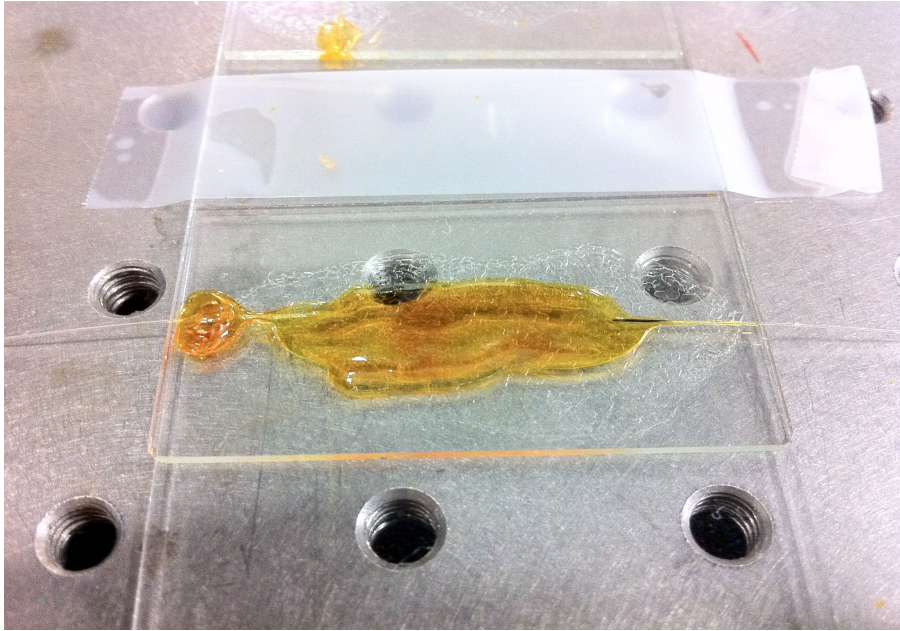


그림 3.1 두 종류의 아조벤젠 코팅된 FBG, 슬라이드 글라스 표면 경화(위), 테프론을 이용한 경화(아래)

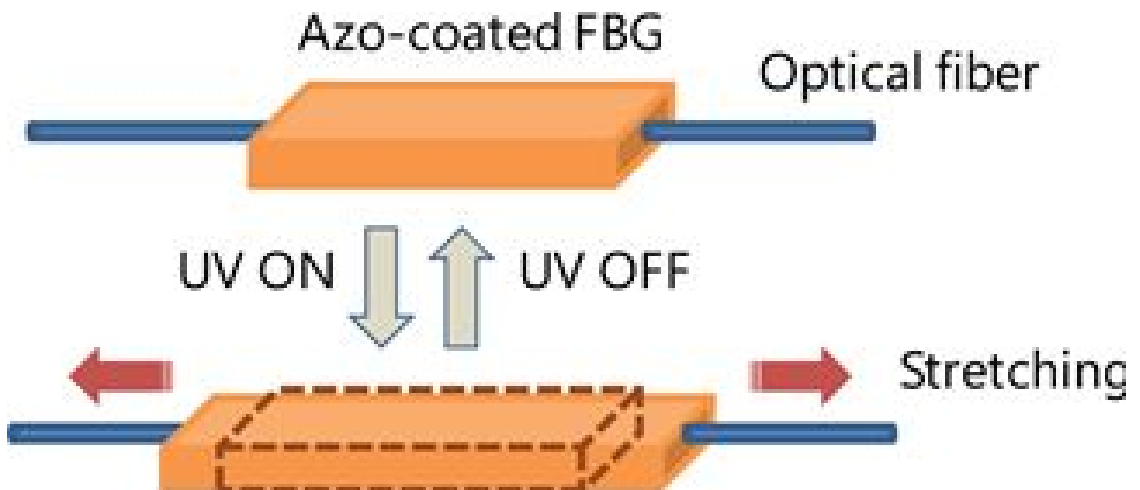


그림 3.2 자외선에 의한 아조벤젠 코팅된 FBG의 변화

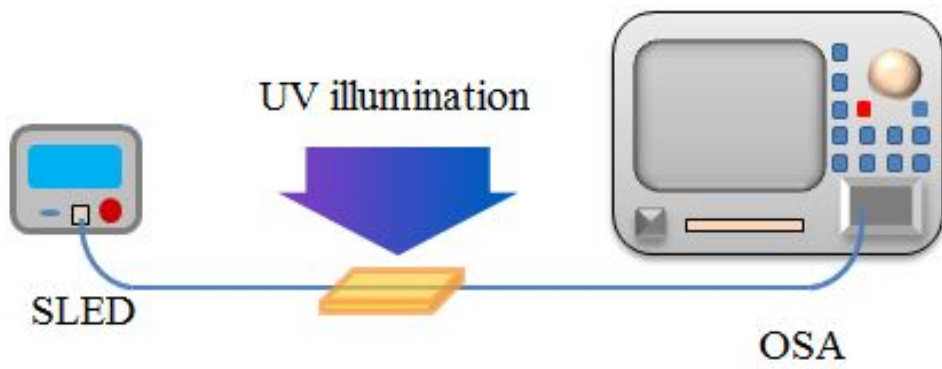


그림 3.3 실험 구성도

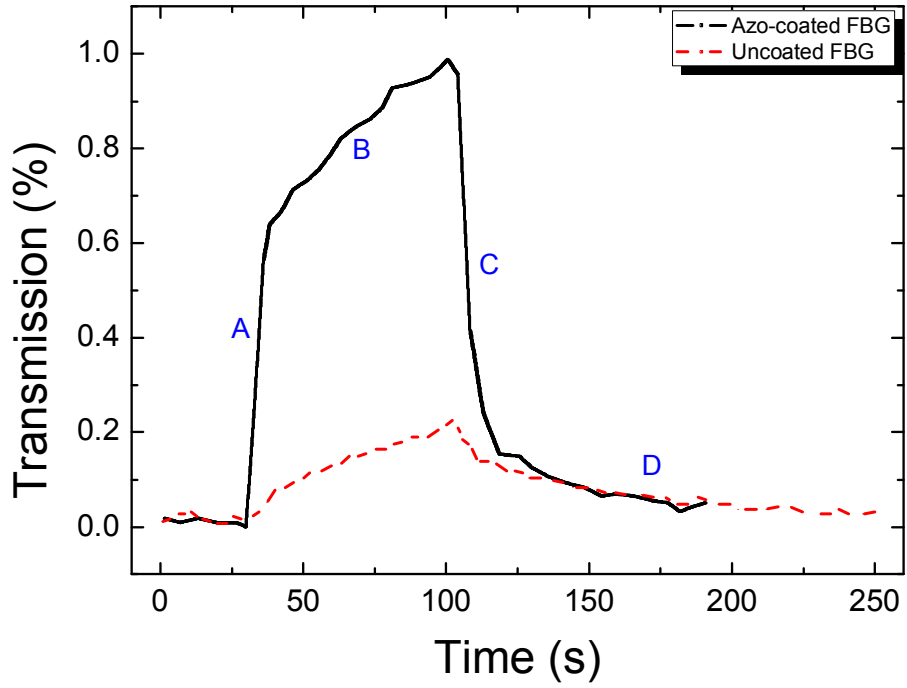


그림 3.4 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 변화

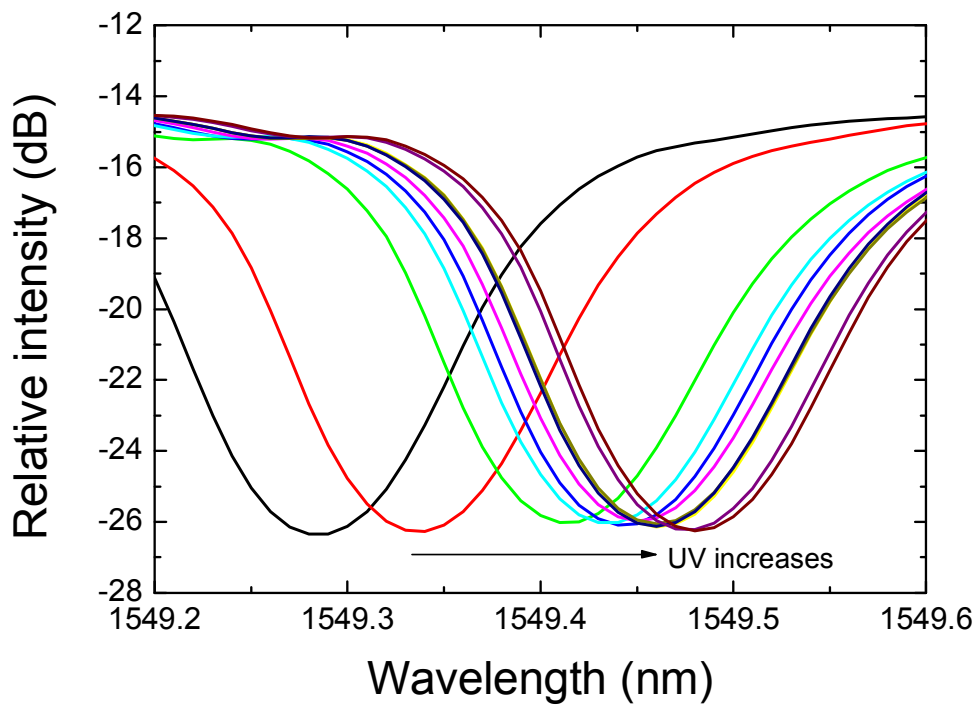


그림 3.5 자외선의 세기에 따른 아조벤젠 코팅된 FBG의 스펙트럼 변화

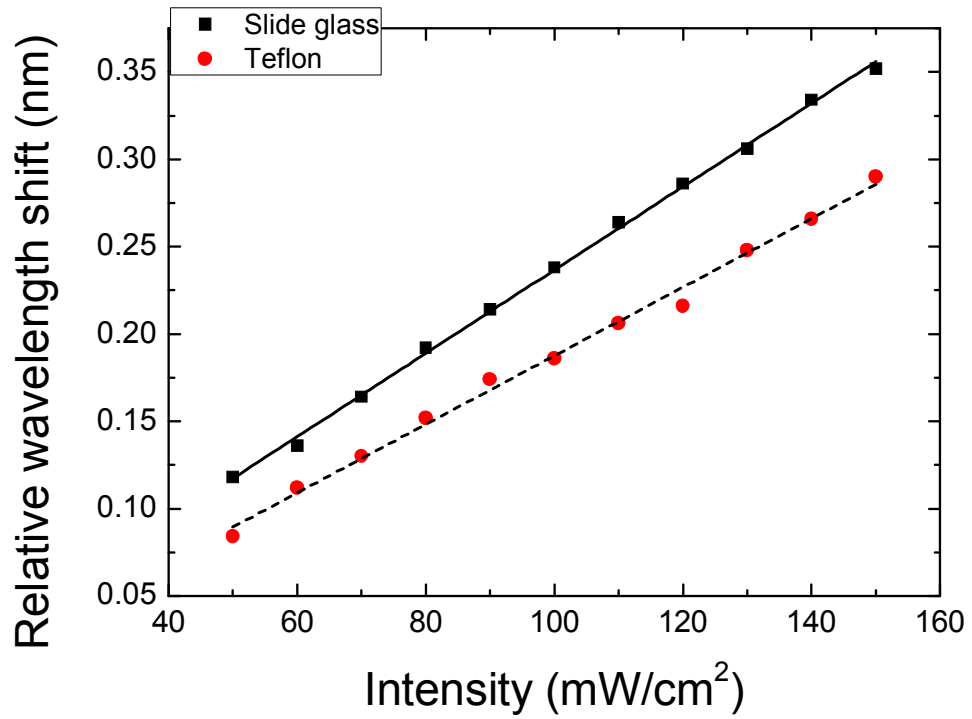


그림 3.6 자외선의 세기에 따른 중심파장의 변화

표 3.1 아조벤젠 폴리머의 경화 방법

단계	열 경화	자외선 경화
1	초음파 처리 : 1시간	
2	130℃, 1시간	320 nm ~ 480 nm, 45분

제4장 실험 방법 및 결과

제1절 경화법에 따른 특성 분석

그림 4.1과 4.2는 각각 열 경화법과 자외선 경화법으로 각각 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동량을 나타낸다. 이때 아조벤젠 코팅된 FBG는 슬라이드 글라스의 표면에 위치한 상태이다. 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장은 시간의 경과에 따라 장파장쪽으로 이동한다. 열 경화 법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량은 0.1 nm로써, 0초에서 7초 사이에서 자외선 조사에 의해서 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장이 0.08 nm정도로 급격하게 이동한 후 7초에서 13초 사이에서는 0.02 nm정도로, 이동비율이 감소하는 경향을 보인다. 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량은 0.2 nm로, 0초에서 10초 사이의 급격한 이동과 10초에서 30초 사이의 느린 이동으로 좀 더 명확하게 구분할 수 있다. 이는 자외선에 의한 아조벤젠 폴리머의 trans-cis 변화가 수초내에 발생 하며, 이후 열 의한 이성화 및 마찰력에 의한 변화가 발생하기 때문이다^[17]. 자외선 램프가 꺼진 후, 중심파장은 다시 초기 위치로 급격하게 되돌아간다. 각각의 실험에서의 자외선 세기는 16 mW/cm^2 로 동일하다.

열 경화법과 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 총 이동량은 각각 0.1 nm와 0.2 nm이다. 자외선에 대한 중심파장의 이동량 및 자외선에 대한 민감도를 비교해 보았을 때, 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG가 더 우수하고, 자외선 센서로더 더 적합하다는 것을 확인 하였다. 때문에 이후의 연구에서는 자외선 경화법을 이용하였다.

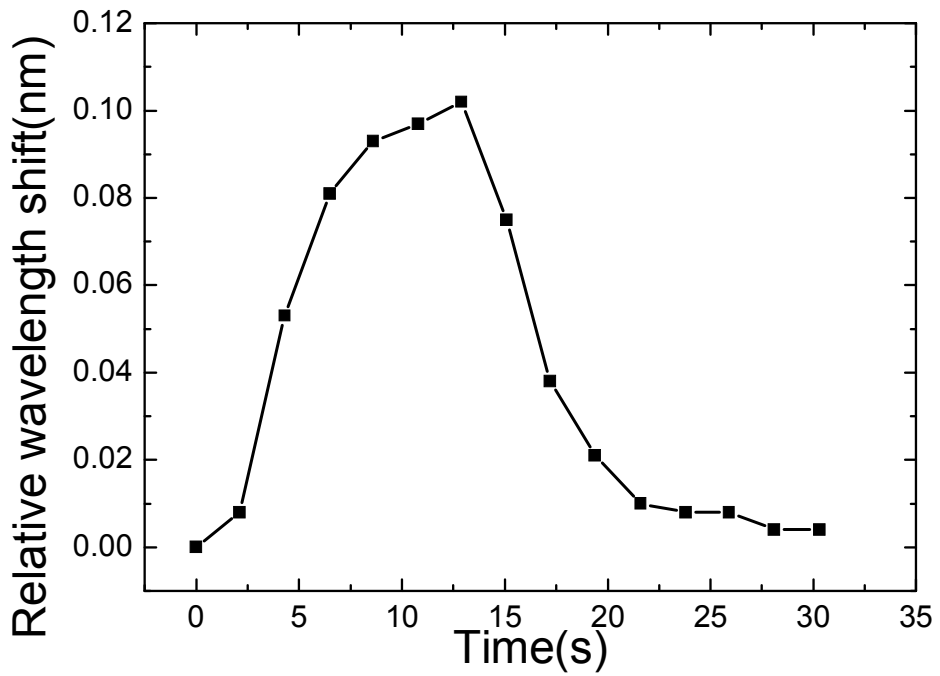


그림 4.1 열 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동

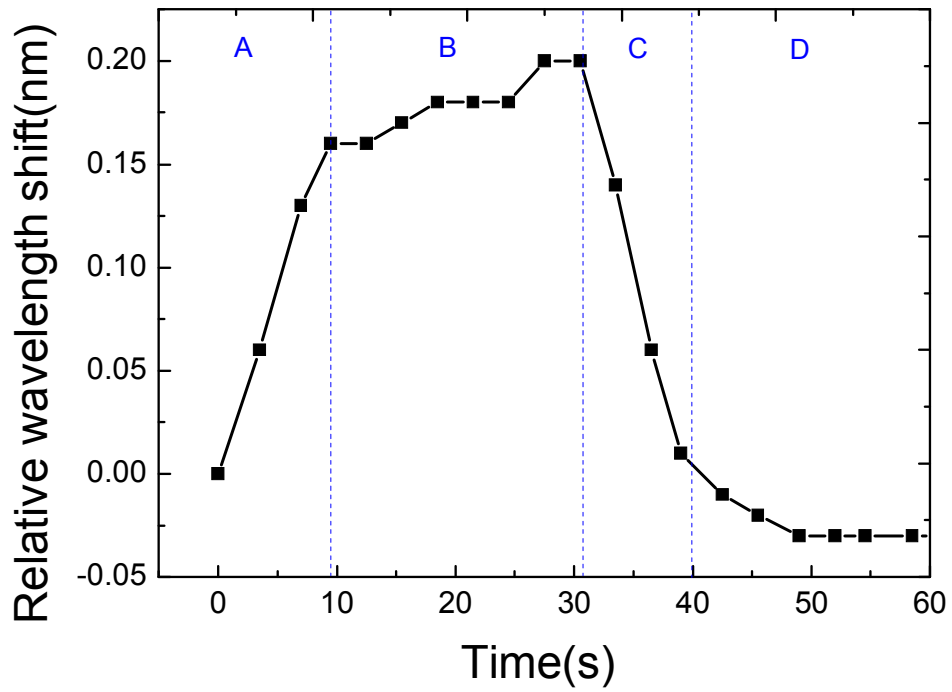


그림 4.2 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동

제2절 제작 방법에 따른 특성 분석

1. 슬라이드 글라스 부착

그림 4.3은 슬라이드 글라스의 표면에서 아조벤젠을 FBG에 코팅 했을 때의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동량을 보여준다. 아조벤젠 코팅된 FBG를 자외선에 노출시켰을 때(0~60초)의 중심파장의 이동량은 시간의 경과에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보며, 자외선 조사를 중지시킬 경우(60~120초)에는 천천히 초기 위치로 회복한다. 회복에 소요되는 시간은 대략 120초 정도로 자외선에 의한 중심파장의 이동 소요시간 보다 2배 이상의 시간이 필요하다.

자외선의 유무에 따른 아조벤젠의 이성화는 프리스탠딩(Free standing)상태를 기본으로 한다. 본 제작방법은 아조벤젠 폴리머를 슬라이드 글라스 표면에 부착 시켰기 때문에 아조벤젠 폴리머의 부피변화가 방해받게 된다. 이로인하여 이성화 속도 및 중심파장의 변화 속도 역시 저하된다. 또한 자외선 램프에서 발생하는 열(Heat) 역시 반응속도를 저하시키는 원인이다. 자외선에 의한 이성화는 수초내에 일어나지만 열에 의한 이성화는 수십초내에서 천천히 발생한다.^[15] 자외선 광원에서 발생하는 열을 차단하기 위해 열 흡수 필터(S-HA50, 유니 Think inc.)를 사용하여 자외선에서 발생하는 열을 차단하였다. 그림 4.4 는 열 흡수 필터의 투과 스펙트럼을 보여준다. 그림 4.3은 열 흡수 필터의 유무에 따른 중심파장의 이동량을 보여주고 있다. 열 흡수 필터를 사용하지 않을 경우, 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량은 최대 0.372 nm로, 로그함수 형태로 증가한다. 열 흡수 필터를 사용한 경우에는 중심파장의 이동량은 최대 0.292 nm로 열 흡수 필터를 사용한 경우보다 22% 감소하였다. 이는 열 흡수 필터를 사용함으로써, 자외선 램프에서 발생하는 열을 차단하여 열에 의한 이성화를 제거하고, 필터를 투과한 자외선의 세기가 약간 감소하였기 때문에 나타난 결과이다.

그림 3.3, 그림 4.2와 그래프의 형태 및 이동량이 다르게 나타나는 이유는 아조벤젠의 함량비와 조사되는 자외선의 세기가 다르기 때문이다. 3장에서 사용된 아조벤젠의 함량 비는 5 wt%인 반면 본 장에서는 아조벤젠의 함량비가 3 wt%인 아조벤젠 배합물을 사용하였다.

또한 자외선의 세기 역시 350 mW/cm^2 에서 150 mW/cm^2 으로 낮추었다.

2. 테프론 주물

테프론(폴리 테트라 플루오르에치렌)은 불소수지의 수요 중 60%를 차지하는 가장 대표적인 불소수지로, 내열성, 내한성, 내약품성, 저마찰 특성, 비점착성, 전기적 성질 등이 뛰어나며 그 특성이 매우 독특하다. 여러 가지의 특성을 동시에 필요로 하는 분야에서 주로 사용되며, 화학공업이나 반도체 산업의 내약품, 내용제성을 필요로 하는 용도로 사용된다^[18]. 특히 모든 고체 중에서 가장 작은 마찰계수를 가지고 있으며, 비흡수성과 내약품성, 가공의 용이성 때문에 아조벤젠 코팅을 위한 주물의 재료로 채택하였다.

그림 4.5는 제작된 테프론 주물의 모형을 나타낸다. 아조벤젠 코팅을 위한 홈의 길이는 85 mm이고, 홈의 직경은 각각 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm이다. 테프론 주물을 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG는 그림 3.1(아래)과 같다.

테프론 주물을 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동은 그림 4.6과 같다. 중심파장의 최대 이동량은 0.24 nm이고 자외선의 세기는 전과 동일하게 150 mW/cm^2 이다. 중심파장의 이동형태는 슬라이드 글라스에 부착한 아조벤젠 코팅된 FBG의 이동형태와는 약간 다르게 나타난다. 0~30초 사이의 중심파장의 이동량은 약 0.2 nm로 전체 이동량의 83%를 차지한다. 30~60초 사이의 중심파장의 이동량은 약 0.04 nm로 중심파장의 이동율이 급격히 떨어진다. 반면에 슬라이드 글라스의 표면에 부착된 아조벤젠 코팅된 FBG의 이동량은 동시간 간격에 각각 70%와 30%로 이동비율의 격차가 상대적으로 작다. 초기위치 회복을 위한 중심파장의 이동형태는 슬라이드 글라스에 부착된 것과는 차이가 많이 발생한다. 자외선 램프가 꺼진 후 아조벤젠 코팅된 FBG는 20초 내에 빠르게 이동한 후, 천천히 이동하여 최초의 중심파장의 위치로 돌아간다. 슬라이드 글라스 표면에 부착된 아조벤젠 코팅된 FBG는 초기 위치 회복을 위해 2분이 소요된 반면 테프론 주물을 이용하여 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG는 1분 내에 초기위치를 회복한다. 열 흡수 필터의 유무에 따른 중심파장의 이동량은 각각 0.242 nm, 0.2 nm로 열 흡수 필터를 사용한 경우보다

18% 감소하였다.

테프론 주물을 이용하여 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG의 경우, FBG 주위에 코팅된 모든 아조벤젠 폴리머는 프리스탠딩 상태이기 때문에 자외선의 유무에 따른 이성화가 상대적으로 빠르게 나타난다. 반면에 슬라이드 글라스의 표면에 부착된, 아조벤젠 코팅된 FBG는 슬라이드글라스와 아조벤젠 폴리머의 접착력으로 인해 이성화 및 부피변화가 방해를 받는 것으로 예상된다. 이를 통해서 테프론 주물을 이용하여 제작한 아조벤젠 코팅된 FBG가 자외선 센서로써 좀더 적합하다는 것을 확인하였다.

중심파장의 이동량은 0.372 nm와 0.24 nm로, 테프론 주물을 이용했을 경우에 이동량이 더 작게 측정된다. 그 이유는 코팅을 위해 사용된 아조벤젠 배합물의 양이 다르기 때문에 나타나는데, 테프론 주물에 들어가는 아조벤젠 배합물의 양은 약 40 uL이고, 슬라이드 글라스에 부은 아조벤젠 배합물의 양은 약 80 uL이다. 차후 아조벤젠의 함량을 증가시켜 이동량을 늘리고, 코팅 방법과 두께 및 길이를 조절하여 적합한 코팅 조건을 찾는다면 자외선 센서로써 좀더 완벽한 성능을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

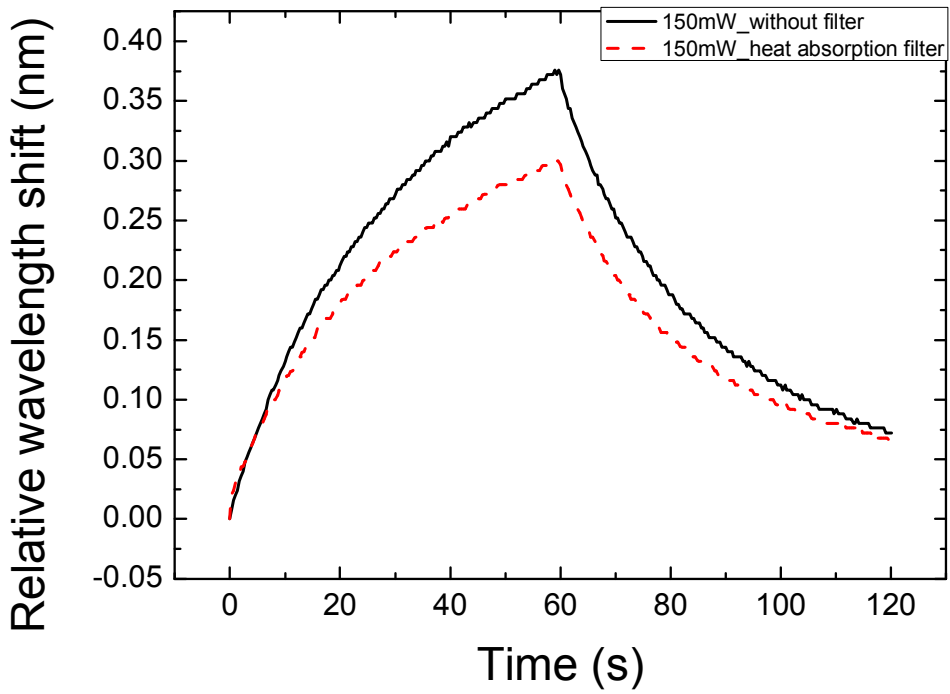


그림 4.3 슬라이드 글라스를 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동

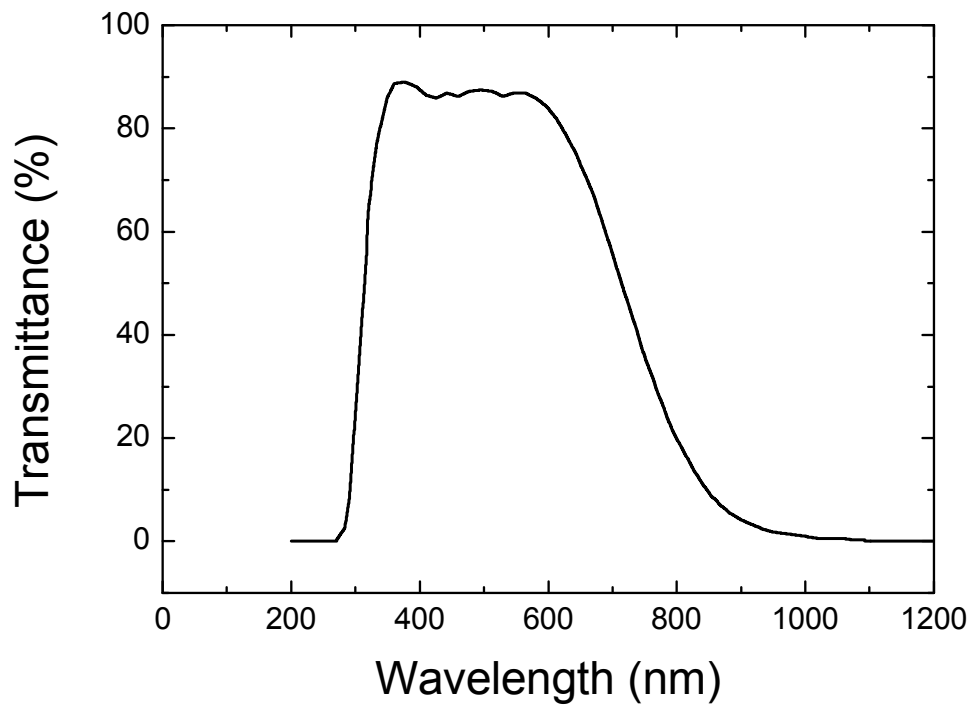


그림 4.4 S-HA50 열 흡수 필터의 투과 스펙트럼

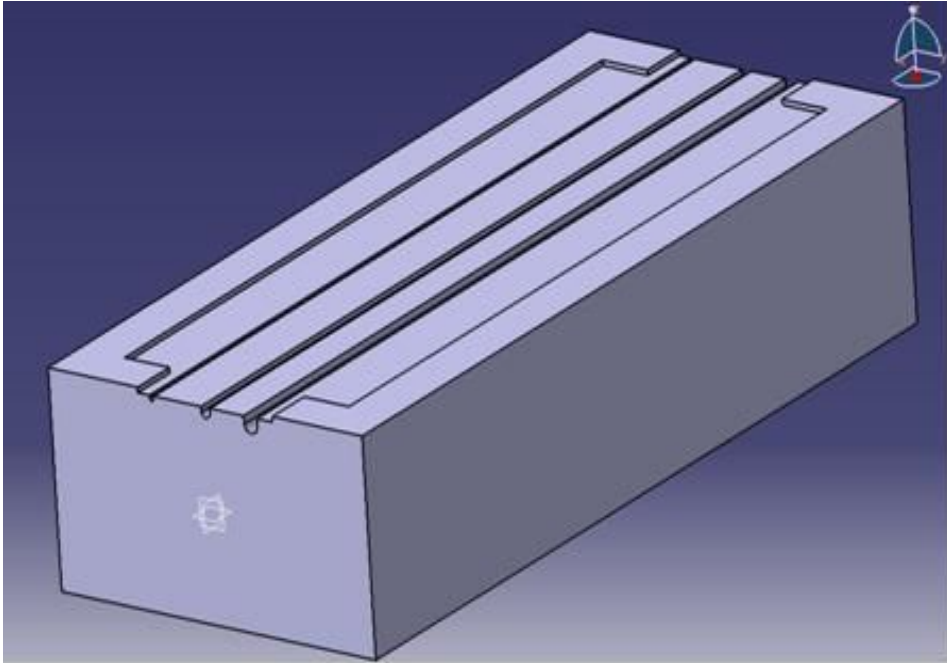


그림 4.5 테프론 주물의 모형도

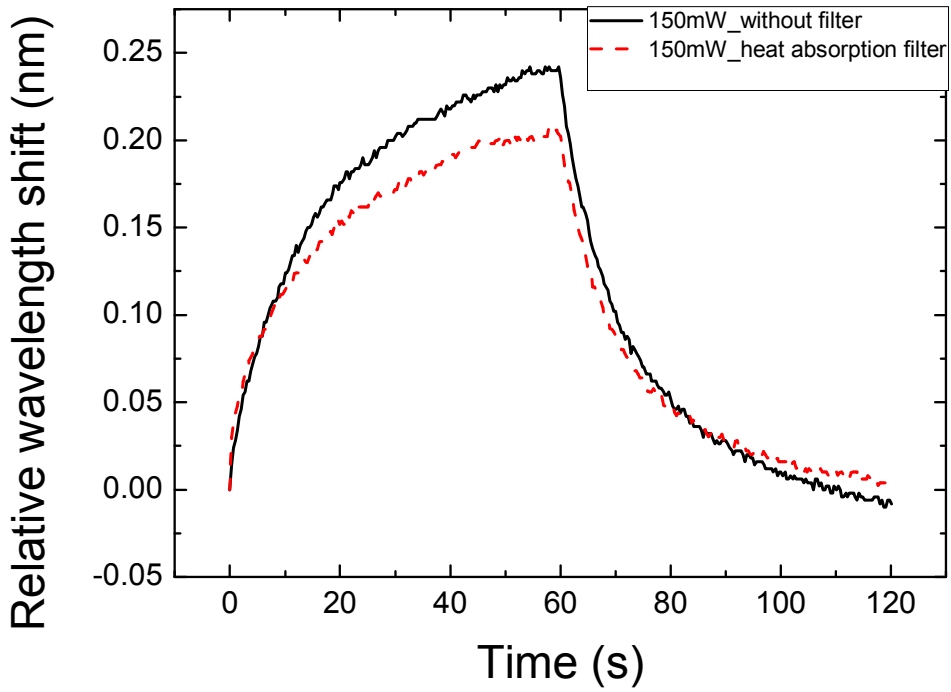


그림 4.6 테프론 주물을 이용한 아조벤젠 코팅된 FBG의 시간의 경과에 따른 중심파장의 이동

제3절 파장 의존성 분석

아조벤젠 폴리머는 그림 4.7에서 보는바와 같이 빛의 파장에 따라 다른 흡수도를 갖는다. 320 nm 영역에서의 흡수도는 약 0.6정도로 가장 큰 반면 380 nm 이후의 파장에 대해서는 0.05 정도로 매우 낮은 흡수도를 갖는다. 파장에 따른 아조벤젠 폴리머의 흡수도의 변화에 따라 아조벤젠 폴리머의 탄성 및 부피 변화 역시 달라진다. 또한 FBG에 가해지는 장력 및 이에 의한 격자의 주기 역시 변화 한다. 따라서, 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량은 아조벤젠 폴리머에 조사되는 자외선의 파장에 따라 달라질 것으로 예상할 수 있다.

자외선의 파장에 따른 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량을 측정하여 파장에 따른 민감도를 확인하였다. 또한 이를 통해서 여러 파장에서 측정 가능한 자외선 센서로서의 가능성을 확인하였다. 열적 안정성 및 변화 형태가 테프론 주물을 이용하여 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG가 더 뛰어나므로 이후의 실험에서는 테프론 주물을 이용하여 자외선 경화법으로 제작한 아조벤젠 코팅된 FBG를 사용하였다. 그림 4.8은 자외선 램프의 스펙트럼을 보여준다. 사용된 자외선 램프는 고압 수은 램프로써, 300 nm~580 nm의 파장대역을 가진다. 또한 320 nm, 365.08 nm, 404.73 nm, 437.11 nm, 557.66 nm 영역에서 첨두치를 가지며 파장폭은 약 ± 5 nm 이다. 파장에 대한 아조벤젠 코팅된 FBG의 민감도를 확인하기 위해, 370 nm, 410 nm, 440 nm, 550 nm 영역의 빛만을 투과 시킬 수 있는 광 투과 필터(FB 370, FB 410, FB 440, FB 550, Thorlabs inc.)를 각각 이용하여, 각각의 필터를 사용했을 경우의 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량을 확인하였다.

표 4.1은 각각의 필터를 사용 했을 경우의 중심파장의 이동량을 보여준다. 광원의 세기 면적비(A)는 필터의 중심파장과 대역폭을 고려하여 면적을 구한 다음 440 nm 파장에서의 세기를 정규화 하여 구하였으며, 필터의 삽입 손실은 모두 동일하다고 가정하였다. 중심파장의 이동량($\Delta\lambda$)은 각각의 필터를 사용 했을 경우의 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량을 나타낸다. 또한 파장별 세기가 다르기 때문에 중심파장의 이동량을 광원의 면적비로 나누어 단위 세기당 이동량을 구하였다.

광원의 면적비 즉, 파장별 광원의 세기는 440 nm에서 1로 가장 크고, 410 nm에서 0.5582로 가장 작다. 필터를 사용 하였을 경우, 중심파장의 이동량은 370 nm에서 0.017

nm로 가장 크고, 550 nm에서 0.005 nm로 가장 작게 관찰되었다.

과장의 세기와 이에 따른 중심과장의 이동량은 정비례 관계가 성립하지 않는다. 중심과장의 이동량을 광원의 세기의 면적비로 나누면 광원의 단위 세기당 중심과장의 이동량($\Delta\lambda/A$)을 얻을 수 있다. 단위 세기당 중심과장의 이동량은 370 nm필터를 사용했을 경우 0.017로서 다른 과장 영역에 비교하여 가장 큰 값을 가진다. 또한 필터의 투과과장이 커질수록, 단위 세기당 중심과장의 이동량 역시 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 아조벤젠 폴리머의 흡수스펙트럼과 각 필터별 중심과장의 이동량을 비교하여 확인할 수 있다. 그림 4.7는 아조벤젠의 흡수스펙트럼과 단위 세기당 중심과장의 이동량을 비교한 것이다. 이를 통해서, 아조벤젠 폴리머의 흡수도가 증가함에 따라 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심과장의 이동량 역시 증가하는 것을 확인할 수 있다.

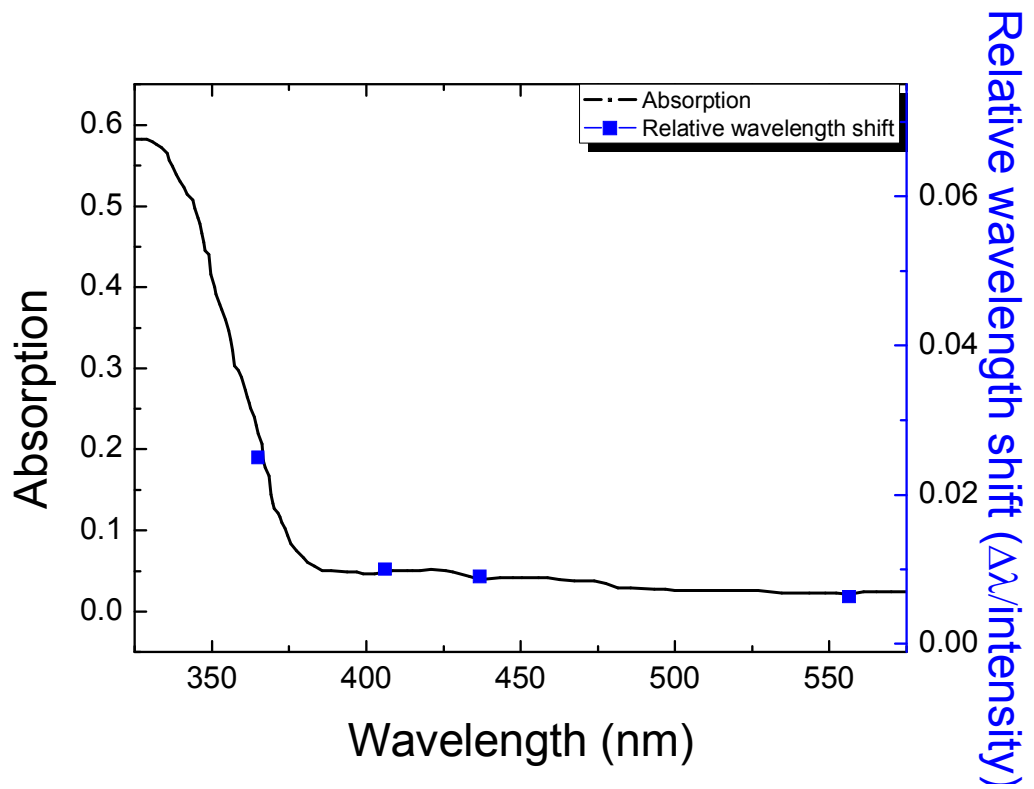


그림 4.7 아조벤젠의 흡수 스펙트럼과 중심파장의 이동량

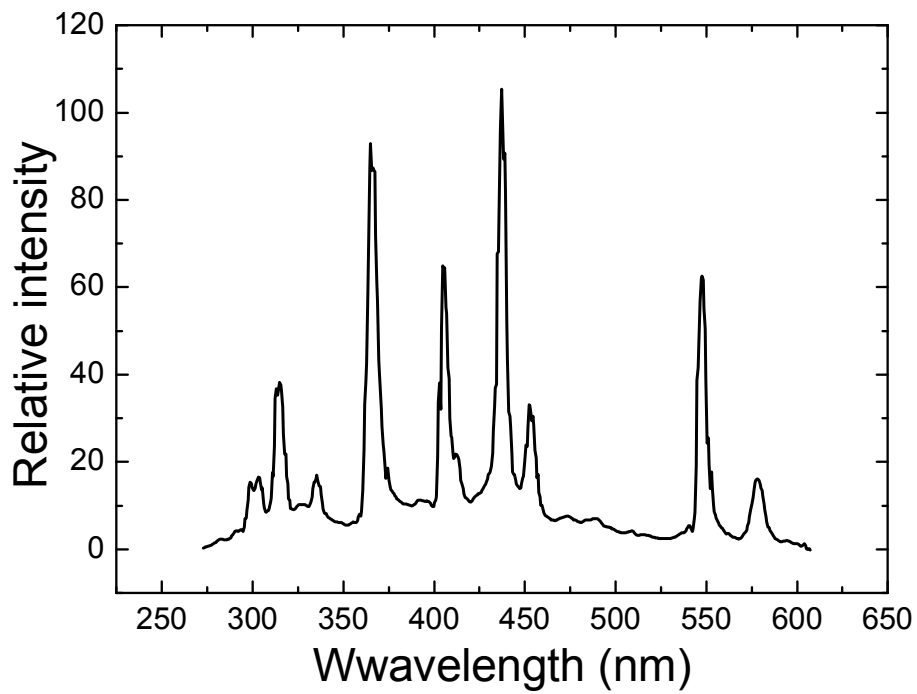


그림 4.8 자외선 램프의 스펙트럼

표 4.1 필터별 중심파장의 변화량

광 투과 필터*	(A) 광원의 면적비	($\Delta\lambda$) 중심파장의 이동량[nm]	($\Delta\lambda/A$) 단위 세기당 이동량
370	0.6675	0.017	0.025
410	0.5582	0.006	0.01
440	1	0.009	0.009
550	0.7842	0.005	0.0063

* 투과 필터의 파장 폭은 ± 5 nm 이다.

제4절 신뢰성 확인

아조벤젠 폴리머는 가역성 광소재로써, 자외선 및 열에 의해서 부피가 증가하고, 다시 원래 부피로 복구되는 성질을 가진다. 또한, 아조벤젠의 가역성에 의해서 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장 역시 자외선에 의해서 장파장 영역으로 이동한 후 다시 원래의 중심파장으로 회복하는 성질을 가진다. 자외선 센서로써 아조벤젠 코팅된 FBG가 사용되기 위해서는 정확성뿐만 아니라 반복적인 측정을 통한 재현성 및 신뢰성이 필수적이다. 본 연구에서는 자외선 센서로서의 아조벤젠 코팅된 FBG의 신뢰성을 확인하기 위해 150 mW/cm^2 세기를 가진 자외선의 on/off를 한 주기(2분)로 하여 중심파장의 이동을 총 120분동안 60회 반복하였다. 그림 4.10에서 보는 바와 같이 자외선에 의한 azo-coated FBG의 중심파장의 이동과 회복은 시간의 경과에 따라서 반복적으로 나타난다. 자외선에 의한 중심파장의 이동량은 약 0.25 nm이며, 시간의 경과에 따른 변화량 또한 일정하다. 이는 자외선에 의한 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량이 항상 일정하다는 것을 의미하고, 이를 통해서 자외선 센서로써의 적합성을 확인할 수 있다. 그림 4.11은 그림 4.10을 좀더 확대한 것이다. 자외선의 유무에 따른 중심파장의 이동 형태는 그림 4.6과 같게 나타난다. 이는 아조벤젠의 함량비 증가와, 적합한 코팅 두께 및 길이의 변화를 통해서 해결해야할 과제이다.

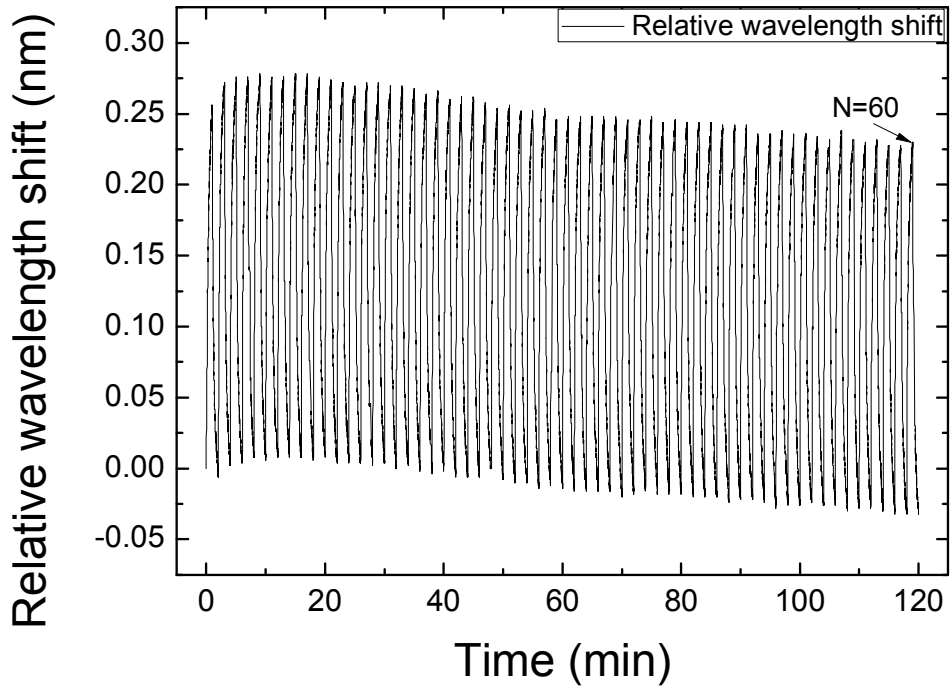


그림 4.9 아조벤젠 코팅된 FBG의 재현성

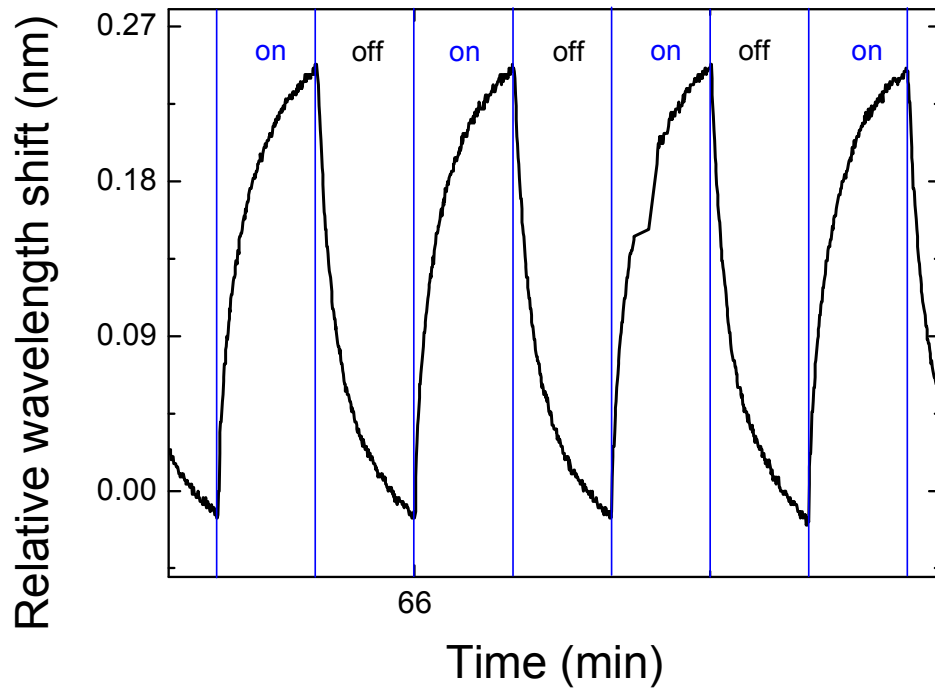


그림 4.10 자외선의 유무에 따른 아조벤젠 코팅된 FBG의 재현성

제5절 자외선의 세기에 따른 반응도

아조벤젠 코팅된 FBG에 조사되는 자외선의 세기에 따라 중심파장이 장파장 영역으로 이동하는 현상은 위에서 논하였다. 뿐만 아니라 조사되는 자외선의 세기가 증가할수록 중심파장의 세기 역시 변화하는 것을 확인 하였다.

그림 4.12는 180 mW/cm^2 세기의 자외선 조사 시, 시간의 경과에 따른 공진 파장의 세기의 변화를 보여준다. 측정 시작 5초 후에 자외선을 아조벤젠 코팅된 FBG에 조사하였고, 65초에 자외선 조사를 멈췄다. 자외선 조사에 의해서 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장이 장파장 영역으로 이동함에 따라 중심파장의 세기 역시 증가한다. 즉, 중심파장이 완전히 차단 되지 않고 3.5 dBm 정도의 세기를 가진 빛이 투과된다는 것을 의미한다. 이를 통해서, 중심파장의 변화뿐만 아니라 특정 파장에서의 빛의 세기의 변화를 통해서도 자외선의 세기를 측정할 수 있다는 것을 확인 하였다.

그림 4.13은 동일한 자외선 세기에서, 아조벤젠 코팅된 FBG의 공진 스펙트럼의 변화를 보여준다. 0초에서 아조벤젠 코팅된 FBG의 반사 크기는 1549.8 nm에서 약 11 dBm로 입사된 세기의 90%이상이 반사되어 차단된다. 시간이 경과함에 따라 중심파장은 장파장 영역으로 이동하고 60초 후의 중심파장은 1550.35 nm로 0.55 nm 이동하였다. 또한 중심파장의 세기 또한 -37 dBm에서 -31 dBm으로 6 dBm이 증가하였다. 즉, 시간이 경과함에 따라 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장이 이동하고, 해당 중심파장에서의 투과광의 세기 또한 증가한다는 것을 의미한다. 파장을 고정시켜 놓고 보면, 자외선 조사에 의한 공진파장의 세기를 더 명확히 이해할 수 있다.

1550 nm에서 투과광의 세기는 -26 dBm으로 아조벤젠 코팅된 FBG를 100%투과하는 파장이다. 자외선 조사 10 초 후에, 1550 nm에서 투과광의 세기는 -25 dBm으로 90%가 투과되지 못한다. 이를 통해서, 아조벤젠 코팅된 FBG는 중심파장의 이동 뿐만 아니라 공진파장의 세기를 통해서도 자외선의 세기를 측정할수 있는 것을 확인 하였다.

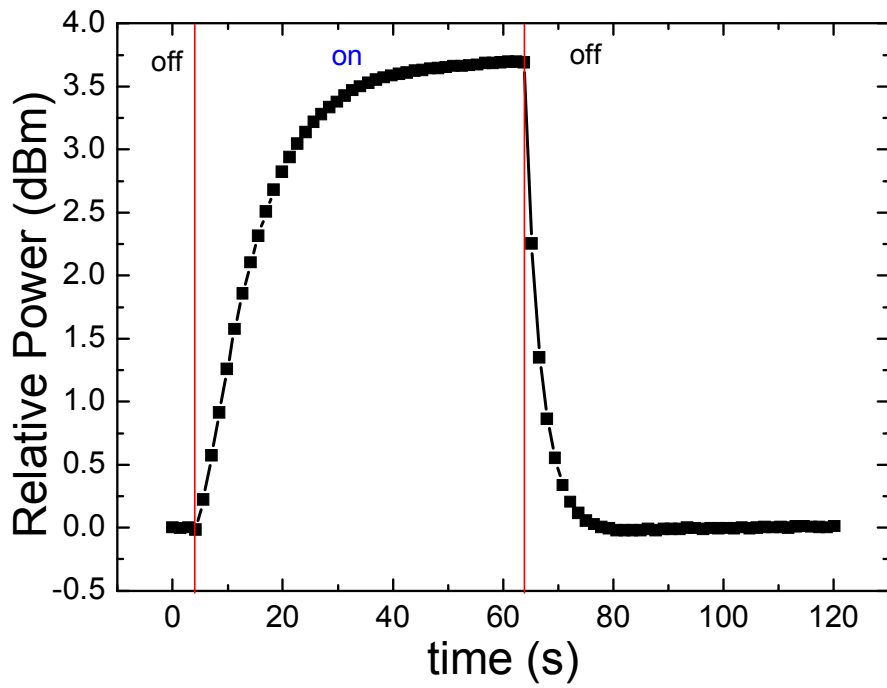


그림 4.11 자외선의 세기에 따른 중심파장의 세기 변화

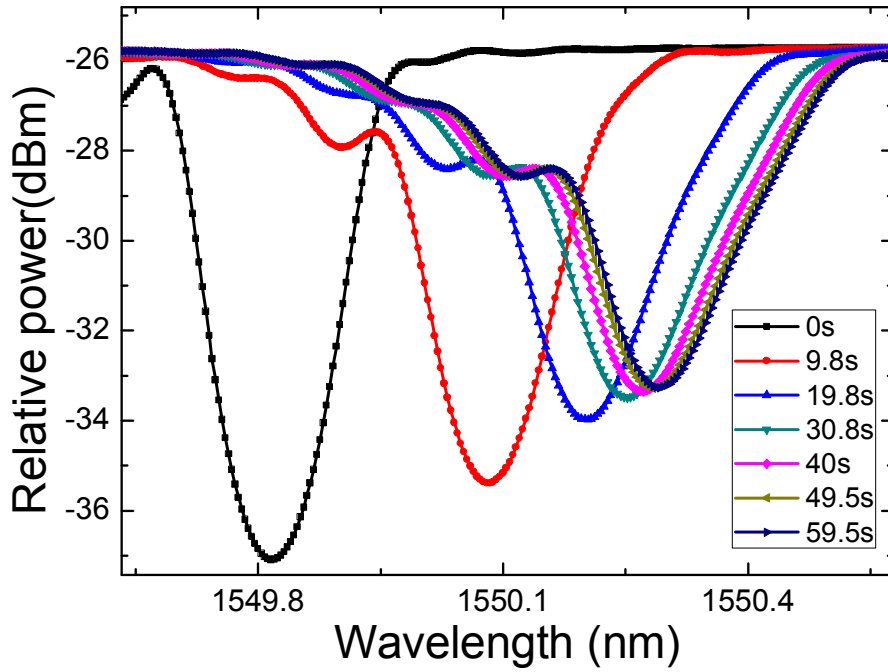


그림 4.12 자외선의 세기에 따른 스펙트럼 변화

제5장 결론

본 논문에서는 기존의 자외선 센서를 대체할 수 있는 새로운 형태의 자외선 센서인 아조벤젠 코팅된 FBG를 제안하였다. 아조벤젠 폴리머는 새로운 형태의 광반응성 물질로써, 자외선 및 열에 의해 이성화함으로써 탄성이 변화하여, 부피 및 길이가 증가하는 특성을 가진다. 이러한 아조벤젠 폴리머의 특성을 광섬유 소자에 결합하기 위해, 광섬유 단주기 격자에 코팅하였다.

아조벤젠을 FBG에 코팅하는 방법에는 열 경화법과 자외선 경화법이 있는데, 각각의 중심파장의 이동량은 각각 0.1 nm와 0.2 nm이다. 자외선에 대한 중심파장의 이동량 고려했을 때, 자외선 경화법으로 제작된 아조벤젠 코팅된 FBG가 더 우수하고, 자외선 센서로더 더 적합하다는 것을 확인 하였다. 또한 중심파장의 이동량 및 이동 경향을 확인한 결과 테프론 주물을 이용하여 제작한 아조벤젠 코팅된 FBG의 이동 경향이 자외선 센서로써 더 적합하고, 향후 보완이 용이한 것을 확인 하였다.

아조벤젠 코팅된 자외선 센서의 파장에 따른 응답 특성을 확인하기 위해 투과 파장 대역이 서로 다른 광 투과 필터 (band pass filter)들을 사용하여 파장에 따른 응답 특성 및 민감도를 확인하였다. 단위 세기당 중심파장의 이동량은 370 nm필터를 사용했을 경우 0.017로, 다른 파장 영역에 비교하여 가장 큰 값을 가진다. 또한 필터의 투과 파장이 커질수록, 단위 세기당 중심파장의 이동량 역시 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 아조벤젠 폴리머의 흡수스펙트럼과 각 필터별 중심파장의 이동량을 비교한 결과, 아조벤젠 폴리머의 흡수도가 증가함에 따라 아조벤젠 코팅된 FBG의 중심파장의 이동량 역시 증가하고, 단파장 영역에서 반응성이 뛰어난 것을 확인하였다. 이러한 아조벤젠 코팅된 FBG의 특성을 통해 다양한 파장에서 사용가능한 자외선 센서의 가능성을 확인 하였다.

자외선 측정의 신뢰성과 재현성 확인을 위해 120분 동안 60회 반복 실험한 결과, 자외선 조사에 의한 중심파장의 이동량은 평균 0.25 nm로 우수한 재현성 및 신뢰성을 보였다. 나아가서, 자외선의 세기가 441 mW/cm^2 일 경우에는, 중심파장의 이동 뿐만 아니라 공진 파장의 세기 또한 3.5 dBm 증가하는 것을 확인 하였다. 이를 통해서, 중심파장의 변화뿐만 아니라 특정 파장에서의 빛의 세기의 변화를 통해서도 자외선의 세

기를 측정할 수 있는, 새로운 연구 방안을 인지하였다. 하지만 자외선에 의한 이성화가 지속적으로 발생하여 측정의 정확성을 하향시키는 점은 개선해야할 부분으로 남아있다. 이는 아조벤젠의 함량비를 높여 이동량을 높이고, 적합한 코팅 두께 및 길이 통해 충분히 제어가능한 부분이다.

[참고문헌]

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ultraviolet>
- [2] K. T. Kim, N. I Moon, and H. K. Kim, "A fiber-optic UV sensor based on a side-polished single mode fiber covered with azobenzene dye-doped polycarbonate," *Sensors and Actuators A*, 160, 19-21 (2010)
- [3] H. K. Kim, X. S. Wang, Y. Fujita, A. Sudo, H. Nishida, M. Fujii, and T. Endo, "A rapid photomechanical switching polymer blend system composed of azobenzene-carrying poly(vinylether) and poly(carbonate)," *Polymer*, 46, 5879 - 5883 (2005).
- [4] Grant R. Fowles, 'Introduction to Modern optics', Dover (1975)
- [5] "한반도 유해 지표자외선 세기와 이에 따른 한국인의 피부 반응 및 피부 색깔에 따른 최소홍반량과 그 발생시간", 보건복지부 (2001)
- [6] 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).
- [7] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication" *Appl. Phys. Lett.* 32. 647 (1978).
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating
- [9] Othonos, Andreas, Kalli, Kyriacos, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*, Artech House, (1999)
- [10] P. Ferraro, G. De Natale, "On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring", *Optics and Lasers in Engineering* 37 (2-3), 115 - 130. (2002).
- [11] US patent 5493390, "Integrated optical instrumentation for the diagnostics of parts by embedded or surface attached optical sensors", issued Feb. 20, (1996)
- [12] US patent 5399854, J.R. Dunphy & et al., "Embedded optical sensor capable of strain and temperature measurement using a single diffraction grating", issued

March 21, (1995)

- [13] National Instrument, "FBG(Fiber Bragg Grating)광학 감지의 기본사항"
- [14] Bhatia V, Campbell D K, Sherr D, D'Alberto T G, Zabaronick N A, Ten Eyck G A, Murphy K A and Claus R O, "Temperature-insensitive and strain insensitive long-period grating sensors for smart structures" *Opt. Eng.* 36, pp. (1872-1876 1997)
- [15] Xiangdan Li, Eunkyong Kim, and Myong-Hoon Lee "Photochromic Properties of Cellulose Dervatives Having Spirobenzopyran Group", *Polymer*, 29, 25-31 (2005)
- [16] Y. Tian, Y. Ren, R. Sun, Y. Zhao, X. Tang, X. Huang, and S. Xi, *Liquid Crystals*, 22, 177-183. (1997)
- [17] 최영상, "Spectrosopic Study fot the Isomerization Reaction Rates of Substituted Azobenzenes", , Korea University, (1995)
- [18] E. Kim, D. S. Han, and T. J. Kang, J. "Photochromic Properties of Cellulose Derivatives Having Spirobanzopyran Group", *Kor. Soc. Imaging Sci. & Tech.*, 20 (1999)
- [19] S. Dvornikov and P. M. Rentzepis, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 246, 379 (1994)
- [20] <http://en.wikipedia.org>
- [21] "전자 부품연구원 전자정보 센서", '센서 시장의 발전과 전망', (주)오토닉스, Vishay Intertechnology, Inc.
- [22] H. J. Rau, *Photochem.* 26, 221(1984)
- [23] M. Schonhoff, M. Mertesdorf, and M. Losche, *J. Phys. Chem.* 100, 7558 (1996)
- [24] Z. Sekkat and M. Dumont, *Synth. Metals* 54, 373 (1993)
- [25] M. Dumont, G. Froc, and S. Hosotte, *Nonlinear Opt.* 9, 327 (1995)
- [26] H. Stegemeyer, *J. Phys. Chem.* 66, 2430 (1962)
- [27] J. S. Hwang, G. J. Lee, and T. K. Kim, *J. Korean Phys. Soc.* 27, 392 (1994)

[감사의글]

지금껏 살아온 학생의 신분을 벗고 조금은 두려운 새로운 세상을 향해 나아가려 합니다. 지금까지 저를 지켜봐주고 도움을 주신 분들께 이렇게 감사의 말씀을 드리하고자 합니다.

먼저 지도교수님인 안태정 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 단순한 지식전달과 성과달성을 위한 가르침이 아니라, 제가 보지 못하는 미래를 위해 다양한 경험과 학습을 통해 안목을 넓혀주신 것은 저의 인생관과 삶의 자세를 바꾼, 정말 소중한 계기가 되었습니다. 특히, 긍정과 칭찬을 통한 교육이 자신감과 열정을 갖게 해준 것 같습니다. 가끔씩 이것저것 많이 물어봐주시던 김현수 교수님, 저에게 관심을 가지고 해주시던 소금과 같은 말씀이 정말 고마웠습니다. 항상 웃으면서 편하게 다가와 주시던 김진태 교수님, 웃으면서 나눴던 소소한 이야기 덕분에 대학원 생활이 더 부드러워졌던 것 같습니다. 가장 일찍 오셔서 가장 늦게까지 연구하시던 박종락 교수님, 교수님의 열정과 자세를 꼭 본받겠습니다. 그리고 좋은 강의로 많은 가르침을 주신 권민기 교수님, 감사합니다.

아무것도 없었던 빈방을 번듯한 실험실로 만들기까지, 3년 6개월 동안 서로 의지하고 함께 땀 흘렸던 회석이, 함께 비웠던 술잔만큼 고마움을 채워 감사를 드립니다. 언제나 유쾌한 훈국이, 항상 먼저 찾아주는 호형, 많이 의지했던 동준이형, 끝까지 책임져주는 명진이, 요즘들어 공부 열심히 하는 철용이, 논문과 연구에 많은 도움을 주었던, 모르는게 없는 찬영이, 잘 노는 일신이에게 정말 고마운 마음을 전합니다. 덕분에 대학원 생활이 더 즐거웠고, 평생 기억에 남을 것 같습니다. 저의 오랜 친구 성민이, 승욱이, 재희, 민성이형, 영준이, 이들이 없었다면 딱딱한 이 세상, 무슨 즐거움이 있을까 싶습니다. 앞으로도 항상 함께 했으면 합니다.

마지막으로 지금의 저를 있게 해주신, 저의 부모님, 최선림, 신성남님에게 사랑과 감사의 말을 드립니다. 그동안 미처 깨닫지 못했던 부모님의 희생과 헌신, 사랑은 제가 평생을 두고 배우고 갚아야 할 마음가짐입니다. 제게 주신 사랑만큼, 이 세상을 감사하고 사랑하는 마음으로 살아가겠습니다.

미처 언급하지 못한 고마운 분들이 너무 많습니다. 대신 이 말로 저의 마음을 전합니다.
“여러분, 정말로 고맙습니다. 감사합니다. 그리고 모두 사랑합니다 ~ !”

2011년 12월
최동석 드림

본 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임