



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](#)

2024년 2월  
석사학위 논문

탄소나노튜브가 포함된 폴리머를  
코팅한 광섬유격자를 이용한 광센서  
연구

조선대학교 대학원

광기술훈공학과

서정민

탄소나노튜브가 포함된 폴리머를  
코팅한 광섬유격자를 이용한  
광센서 연구

Light Sensor Based Fiber Bragg  
Grating Coated With Polymer  
Including Carbon Nanotubes

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

광 기술 공 학 과

서 정 민

# 탄소나노튜브가 포함된 폴리머를 코팅한 광섬유격자를 이용한 광센서 연구

지도교수      안 태 정

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

서 정 민

## 서정민의 석사학위논문을 인준함

위원장

권민기 (인)

위원

김진태 (인)

위원

안태정 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

## 목 차

### ABSTRACT

#### 제1장 서 론

제1절 광섬유 센서 .....	1
1. 광섬유 센서의 원리 .....	1
2. 광섬유 센서의 종류 .....	1
제2절 광센서 .....	5
1. 광섬유 기반 가시광 센서의 필요성 .....	5
2. 가시광 센서의 응용 분야 .....	8

#### 제2장 이 론

제1절 광섬유격자(Fiber Bragg Grating) .....	11
제2절 탄소나노튜브(Carbon Nanotube) .....	13
제3절 선행 연구 .....	18

#### 제3장 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서

제1절 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 광섬유격자 동작 원리 · .....	21
제2절 광센서 제작 방법 .....	22
제3절 광 감지 실험 .....	25
1. 광센서의 가시광 영역 감지 .....	25
2. 특정 파장에서의 빛 감지 .....	32

## 제4장 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 성능 개선 및 민감도 향상

제1절 탄소나노튜브 함유량에 따른 가시광 반응 실험 ..... 37

제2절 광섬유 직경에 따른 반응성 분석 ..... 50

제5장 결론 ..... 61

[참고문헌]

[감사의 글]

## 표 목 차

표 2.1 반도체 기반 가시광 센서의 종류 .....	7
표 2.2 가시광 센서 응용 산업과 산업별 적용 방법 .....	9
표 3.1 자외선 경화제 LS-2211 특성 .....	24
표 3.2 Carbon nanotube 900711 특성 .....	24
표 4.1 탄소 나노튜브 함유량별 FBG 센서의 광 반응성 평균과 표준오차 .....	47
표 4.2 탄소 나노튜브 함유량별 FBG 광센서의 광 반응성 이차 다항식 피팅 .....	48
표 4.3 용착기의 방전량과 방전 시간에 따른 광섬유의 삽입 손실 .....	56
표 4.4 탄소 나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 단위 광세기에서의 광 반응성 비교 .....	59
표 4.5 탄소 나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 반응시간 및 회복시간 .....	60



## 그림 목 차

그림 1.1 광섬유의 구조	3
그림 1.2 광섬유 간섭계 개략도	3
그림 1.3 FBG 센서 동작 원리	4
그림 2.1 가시광선 스펙트럼	6
그림 2.2 FBG 다중 지점 측정 개념도	7
그림 2.3 스마트팜에서의 조명 관리	9
그림 2.4 수산 양식 에서의 조명 관리	10
그림 2.5 폴리렌의 구조도	15
그림 2.6 Iijima가 개발한 다중벽 탄소 나노튜브 사진	15
그림 2.7 분산된 단일벽 탄소 나노튜브의 광 흡수 스펙트럼	16
그림 2.8 단일벽 탄소 나노튜브 필름의 UV, Vis, IR 대역에서의 광흡수 스펙트럼	16
그림 2.9 트랜지스터의 채널로 이용되는 탄소 나노튜브 모식도	17
그림 2.10 조명 On/Off에 따른 단일벽 탄소 나노튜브의 상태 변화	19
그림 2.11 SWCNT 캔틸레버와 조명 On/Off에 따른 Strain 변화	19
그림 2.12 이중 SWCNT 시트 구조와 광세기에 따른 Strain 변화	19
그림 2.13 탄소 나노튜브의 적외선 및 가시광선 노출 개략도	20
그림 2.14 탄소 나노튜브 폴리머 코팅된 FBG의 적외선 및 가시광선 광세기에 따른 중심 파장 이동 그래프	20
그림 3.1 탄소 나노튜브 폴리머가 코팅된 FBG 광센서의 광에 따른 기계적 동작	21
그림 3.2 탄소 나노튜브 포함된 폴리머가 코팅된 FBG 제작 과정	23
그림 3.3 가시광 영역 빛 감지 실험 개략도	27
그림 3.4 실험에 사용된 LED의 Wavelength Spectrum	27
그림 3.5 탄소 나노튜브 함유 폴리머로 코팅된 직경이 (a) 125 $\mu\text{m}$ 와 (b) 80 $\mu\text{m}$ 인 FBG의 광세기별 중심 파장 이동 (LED 출력 범위: 0 ~ 25 $\text{mW}/\text{cm}^2$ )	28
그림 3.6 직경 125 $\mu\text{m}$ 및 80 $\mu\text{m}$ 의 SWCNT 코팅 FBG의 가시광 유도 파장 이동 (그림 4.4 및 그림 4.5의 FBG 반사 스펙트럼의 피크 감지에서 얻음).	29
그림 3.7 탄소 나노튜브 함유 폴리머로 코팅된 직경이 (a) 125 과 (b) 80 $\mu\text{m}$ 인 FBG의 가시광에 대한 중심 파장 변화 측정 결과	30

그림 3.8 가시광선 출력에 반응하여 직경 80 $\mu\text{m}$ 및 125 $\mu\text{m}$ 의 탄소 나노튜브 코팅 FBG의 파장 이동.	31
그림 3.9 흡수스펙트럼 측정 (a) 탄소나노튜브와, (b) 아크릴레이트 폴리머, (C) 탄소 나노튜브 포함된 아크릴레이트 폴리머	34
그림 3.10 사용된 LED의 파장 스펙트럼 (a) UV LED (hl-es-3032s22v365-b2-s1), (b) Blue LED (GB QSSPA1.13), (c) Red LED(KS DMLS31.23)	35
그림 3.11 LED의 파장별 탄소 나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 단위 광세기당 광 반응	36
그림 4.1 질량비에 따라 제작된 탄소 나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서	41
그림 4.2 탄소 나노튜브 함유량 0.1 wt.%인 폴리머 코팅된 125 $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성	42
그림 4.3 탄소 나노튜브 함유량 0.2 wt.%인 폴리머 코팅된 125 $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성	43
그림 4.3 탄소 나노튜브 함유량 0.3 wt.%인 폴리머 코팅된 125 $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성	44
그림 4.4 탄소 나노튜브 함유량 0.4 wt.%인 폴리머 코팅된 125 $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성	45
그림 4.5 20mW/cm <sup>2</sup> 에서의 탄소 나노튜브 함유량별 광 반응성	46
그림 4.6 탄소 나노튜브 함유량별 FBG 센서의 광 반응성 평균과 표준오차	47
그림 4.8 탄소 나노튜브 함유량별 FBG 광센서의 광 반응성 이차 다항식 피팅	48
그림 4.9 탄소나노튜브 코팅된 FBG 광센서의 온도에 따른 기계적 동작 (a) 온도가 바뀌지 않을 때 (b) 낮은 광세기 일때의 온도 T <sub>1</sub> (c) 높은 광세기에서의 온도 T <sub>2</sub>	49
그림 4.10 80 $\mu\text{m}$ 와 125 $\mu\text{m}$ 두께의 광섬유 용착 모식도	54
그림 4.11 80, 125 $\mu\text{m}$ 광섬유 용착 과정 사진 (a)광섬유 용착 전 모터를 이용하여 코어를 가운데에 배치, (b) 플라즈마를 사용하여 80, 125 $\mu\text{m}$ 광섬유를 용착, (c) 용착 완료된 80, 125 $\mu\text{m}$ 광섬유	54
그림 4.12 용착기의 플라즈마 방전량과 방전 시간에 따른 광섬유 용착 이후 광섬유 사진	55
그림 4.13 광섬유 용착 삽입손실 (a) 방전 시간을 2 s로 고정한 후 방전량에 따른 삽입 손실 측정, (b) 방전량을 +60 bit로 고정한 후 방전 시간에 따른 삽입 손실 측	

정 ----- 56  
 그림 4.14 탄소 나노튜브 폴리머가 250  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응  
 성 ----- 57  
 그림 4.15 탄소 나노튜브 폴리머가 250  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 80  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응  
 성 ----- 57  
 그림 4.16 탄소 나노튜브 폴리머가 900  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응  
 성 ----- 58  
 그림 4.17 탄소 나노튜브 폴리머가 900  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 80  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응  
 성 ----- 58  
 그림 4.18 탄소 나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 광 반응성 평균 --59

## ABSTRACT

### Light Sensor Based Fiber Bragg Grating Coated With Polymer Including Carbon Nanotubes

Jeong Min Seo

Adviser : Prof. Tae-Jung Ahn, Ph.D.  
Department of Photonic Engineering,  
Graduate School of Chosun University

In this study, we propose a novel type of optical sensor that involves mixing carbon nanotubes with acrylate polymer and coating it on a Fiber Bragg Grating (FBG) to detect light. This method utilizes the property of carbon nanotubes to bend in the direction of light propagation when illuminated. The coated carbon nanotube polymer on the FBG affects the grating spacing of the FBG, resulting in a measurable shift in the central reflection wavelength. To verify the light detection capability of the fabricated FBG optical sensor coated with carbon nanotube polymer, experiments were conducted using LEDs in the visible light range. The sensor with a 900  $\mu\text{m}$  thick carbon nanotube polymer coating on a 125  $\mu\text{m}$  diameter FBG showed a central wavelength shift of approximately 0.32 nm, while the sensor with the same thickness of coating on an 80  $\mu\text{m}$  diameter FBG showed a shift of about 0.58 nm. The light absorption of carbon nanotubes at specific wavelengths was measured and confirmed, and the light detection responsiveness at wavelengths of 365, 465, and 620 nm was observed. To enhance the sensitivity of the carbon nanotube polymer-coated FBG sensor, the content of carbon nanotubes in the polymer was varied to determine the optimal concentration. In the sensor system, to reduce the insertion loss when fusing optical fibers of different diameters, the discharge

amount and time conditions of the fusion splicer were altered to find the optimal conditions and applied to the optical sensor. Theoretical strain values based on fiber diameter were calculated, and sensors with varying fiber diameters and coating thicknesses were fabricated and tested to compare the experimental results with theoretical values.

Through this research, the functionality of the carbon nanotube polymer-coated FBG optical sensor in detecting light was confirmed, and studies were conducted on improving sensitivity based on the carbon nanotube content in the polymer and the diameter and thickness of the fiber coating.

# 제1장 서 론

## 제1절 광섬유 센서

### 1. 광섬유 센서의 원리

광섬유(Optical Fiber)의 소재는 대부분 유리 또는 플라스틱을 사용하여 제작하고 광섬유의 구조는 [그림 1.1]을 통해 확인할 수 있다. 광섬유는 중심의 코어(Core)와 이를 둘러싸고 있는 클래딩(Cladding), 그리고 클래딩을 감싸는 버퍼(Buffer)로 이루어진다. 광섬유에서 진행되는 빛은 내부 전반사의 원리를 이용하여 광섬유의 내부를 통과하게 되는데 이때 빛의 대부분이 코어 영역에서 진행하게 된다. 코어의 굴절률이 클래딩의 굴절률보다 낮게 제작되면 내부 전반사가 일어나지 않기 때문에 빛이 전달되지 않는다. 그러므로 코어의 굴절률을 클래딩의 굴절률보다 약 0.2~1% 정도 높게 제작한다. 클래딩과 코어 부분은 유리로만 이루어져 있어서 광섬유에 수직적으로 가해지는 힘에 대해서 내구성이 매우 취약하므로 아크릴레이트 폴리머(Acrylate Polymer)를 사용하여 광섬유를 보호해준다. 이에 해당하는 부분을 버퍼(buffer)라고 한다.

광섬유 센서에서 특정 요인을 감지하는 방법은 빛이 광섬유를 따라 진행할 때 변화를 감지하는 부분에서 굴절률의 변화, 부피의 수축 또는 팽창으로 인한 길이 또는 부피의 변화가 일어날 때 빛이 진행하는 경로 길이의 변화로 인한 간섭무늬의 변화나 광 세기의 변화로 감지하게 된다. 광학 신호가 분석 장치로 전달될 때 전기적인 신호로 변환되고 변환된 신호의 변화를 관찰하여 특정 요인의 변화를 감지할 수 있다<sup>[1]</sup>.

### 2. 광섬유 센서의 종류

광섬유 센서의 종류는 매우 다양한데 그 분류법은 광신호를 감지하거나 선택하는 방법에 따라 다르다. 강도 변조 센서의 경우 광검출기(Photodetectors, PD)에 들어오는 광의 물리적 변화에 따라 환경이나 특정 물체의 상태를 판별하는 방식이다<sup>[2]</sup>. 강도 변조 센서의 경우 비용이 저렴하고 단순하다는 장

점이 있으나 광신호 전체의 손실이 생기거나 소스 전력 자체의 변화가 생긴다면 오류가 생길 수 있으므로 이를 보상하기 위한 시스템이 필요하다<sup>[3]</sup>. 위상 변조 센서는 빛의 간섭 현상을 이용하여 변화를 감지하는 센서이다. 예시로는 Mach-Zehnder, Michelson, Fabry-Perot 등의 센서가 존재한다<sup>[4, 5]</sup>. 파장 변조 센서는 광섬유에서 반사되거나 투과된 파장의 변화를 감지하여 작동하는 광센서이다. 대표적인 파장 변조 센서의 예시로는 Fiber Bragg Grating(FBG) 센서가 있는데 FBG의 경우 단일 지점뿐만이 아니라 다중 지점의 변화를 측정할 수 있어 다양한 산업에서 사용되는 센서이다<sup>[6]</sup>.

[그림 1.2]에 간섭계 광섬유 센서는 광섬유 내 빛의 간섭을 측정하는 위상 변조 센서 개략도를 나타내었다. 대표적 예시로 Mach-Zehnder 간섭계의 경우 [그림 1.2]에 있는 개략도처럼 신호가 두 부분으로 나뉘어 전파되는데 기준 팔과 감지 팔로 나뉘어 전파되게 되고 두 팔을 통해 전파된 두 신호는 검출기에서 다시 결합한다. 이러한 시스템의 간섭계 광섬유 센서는 굴절률 센서로 사용되거나 수중 감지 센서로 응용된다<sup>[7]</sup>.

광섬유 브래그 격자 센서의 경우 일반적인 광섬유 센서에 있는 장점을 모두 가지는 구조가 간단하고 용도가 다양한 감지 센서이다. FBG 센서는 마스크에 의해 패터화된 자외선 광에 의해 광섬유의 코어 일부분에 굴절률이 영구적으로 변화하여 [그림 1.3]의 개략도와 같은 형태가 된다. 일정 부분의 굴절률 변화는 특정 파장을 반사하는 거울의 역할을 하고 광섬유의 변형이나 온도 변화에 대해 높은 감도를 가지게 된다.

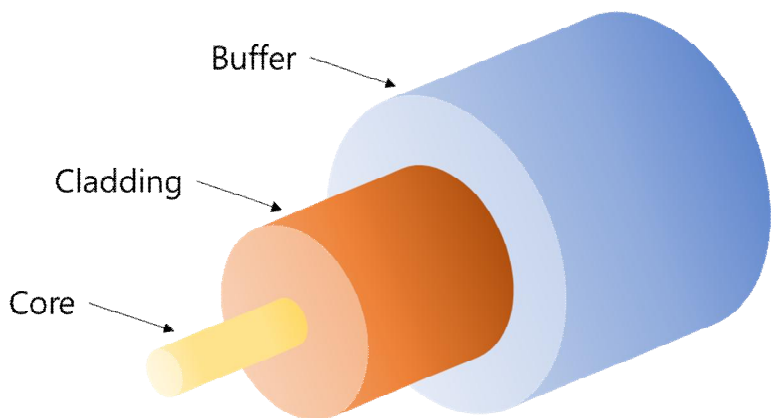


그림 1.1 광섬유의 구조

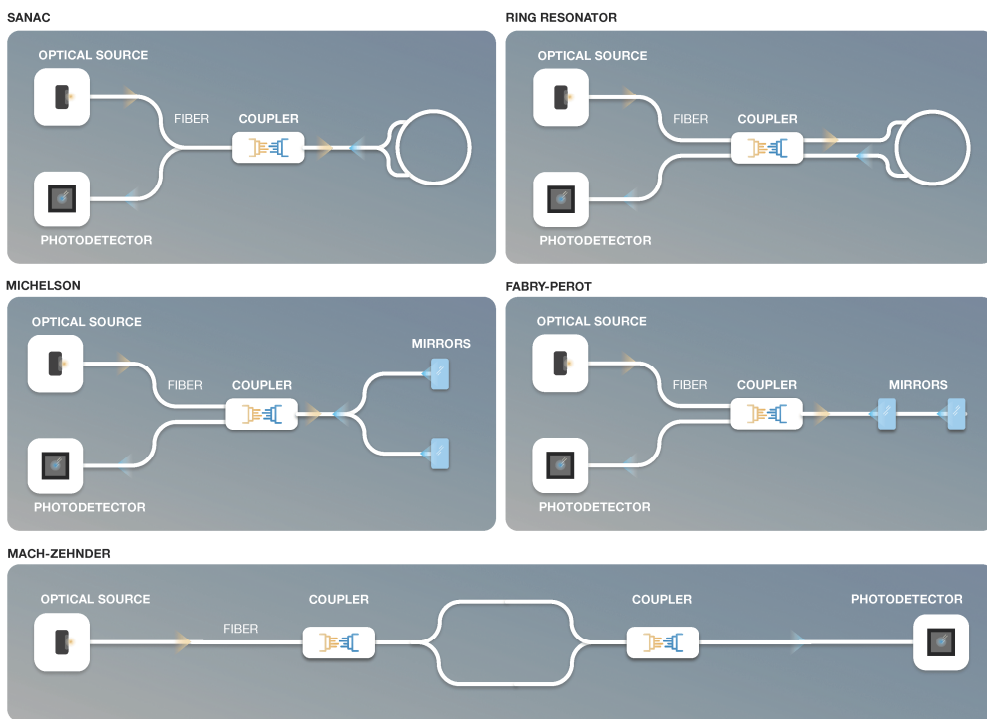


그림 1.2 광섬유 간섭계 개략도<sup>[1]</sup>



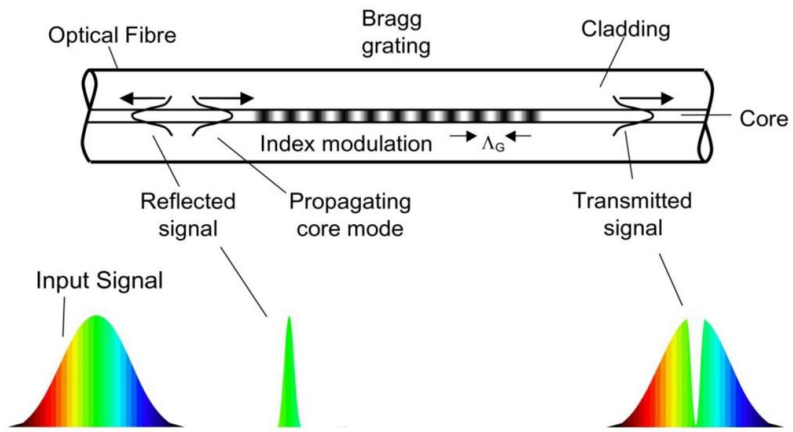


그림 1.3 FBG 센서 동작 원리<sup>[8]</sup>

## 제2절 광센서

### 1. 광섬유 기반 광센서의 필요성

가시광(Visible Light)은 사람에 눈에 보이는 약 380 nm에서 700 nm의 파장 대역을 가지는 전자기파이다<sup>[9]</sup>. [그림 2.1]을 보면 가시광선의 스펙트럼을 색에 따라 주파수, 파장의 길이. 에너지를 표시한 것을 확인할 수 있다. 스펙트럼상에 각 파장 별 색의 이름이 붙여져 있으나 가시광선의 분류에는 명확한 경계는 없다. 빛에 색상이 존재한다는 것은 17세기 아이작 뉴턴에 의해 프리즘으로 백색광을 분해하고 재조립할 수 있다는 사실이 발견되었고 그는 저서인 Optics에 이 현상을 설명하였다. 통상적으로 380~450 nm는 보라, 450~485 nm는 파랑, 485~500 nm는 청록, 500~565 nm는 초록, 565~590 nm는 노랑, 590~625 nm는 주황, 625~700 nm를 빨강으로 분류하고 있다.

이러한 가시광은 생물의 생장이나 광량의 측정 등을 위하여 빠른 응답 속도와 함께 실시간으로 모니터링할 필요성이 있어 현대 여러 산업 분야에서 다양한 방식으로 가시광 감지 센서를 사용하고 있다. 반도체로 제작된 센서가 가장 많이 사용되고 있는데 가시광 센서의 파장 범위, 분해능 등을 [표 2.1]에 정리하였다. 이들은 모두 실리콘으로 이루어진 반도체 기반 가시광 센서이다. 각 가시광 센서의 최대 파장 범위는 1100 nm까지로 동일하였으나 FDS010은 200 nm, FD11A는 320 nm, FDS1010은 350 nm FDS10X10는 340 nm부터 감지할 수 있다. 하지만 고온 고습한 환경에서 반도체 센서를 적용하기에는 부식에 굉장히 취약하다는 단점을 지니고 있다. 산업 현장은 고온, 고습의 환경을 지닌 곳이 상당히 많은데 이러한 환경에 반도체 센서를 배치하였을 때 부식되어 센서의 수명이 상당 부분 줄어들게 된다<sup>[10]</sup>. 그러나 광섬유 기반 가시광 센서는 고온, 고습의 환경에서도 내식성이 좋기에 부식을 걱정할 필요가 없으므로 이러한 산업 현장에 반도체 기반 가시광 센서보다 적합하다. 또한 광섬유 센서 중 Interrogation 시스템을 이용하면 서로 다른 반사 파장을 갖는 여러 개의 FBG를 직렬로 연결하여 다중 지점에 대한 물리량 측정이 가능하다. [그림2.2]는 FBG 센서의 다중 지점 측정에 대한 개념도를 보여준다. 중심 파장이 서로 다른 광섬유를 여러 개 연결하여 각 지점에 대한 물리량을 독립적으로 측정할 수 있는 장점이 있다.

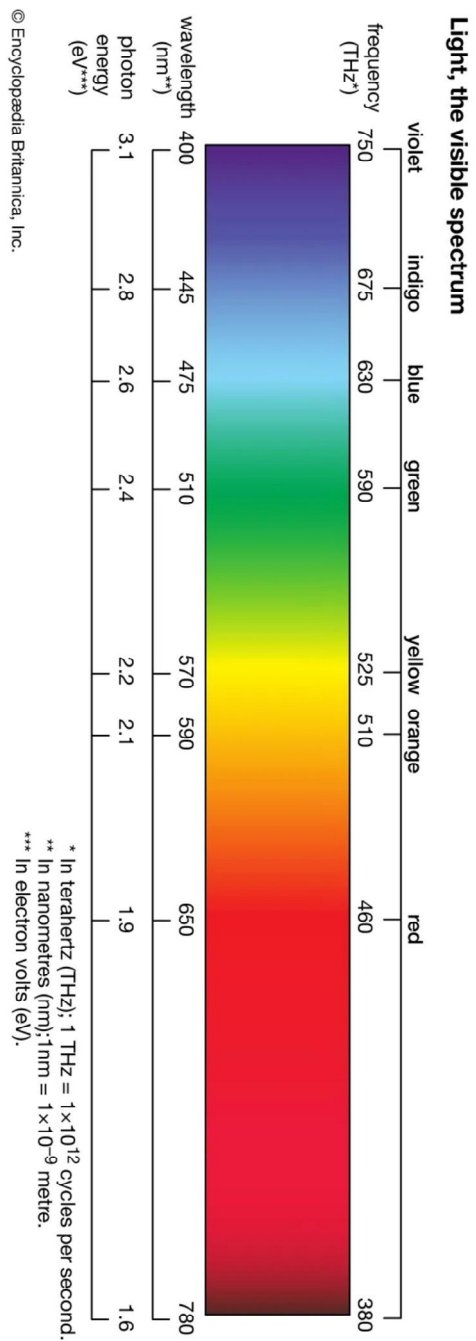


그림 2.1 가시광선 스펙트럼 [11]



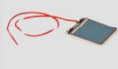

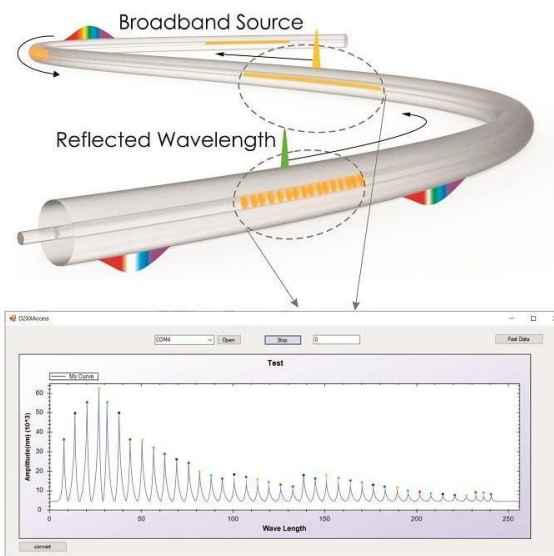
	FDS010	FD11A	FDS1010	FDS10X10
				
Wavelength (nm)	200 – 1100	320 – 1100	350 – 1100	340 – 1100
Rise Time (ns)	1	400	10	150
Responsivity (A/W)	0.44	0.60	0.65	0.62
Operating Temperature (°C)	-25 to 75	-10 to 100	-40 to 100	-40 to 75

표 2.1 반도체 기반 가시광 센서의 종류 [12]



20-Point FBG Sensor

그림 2.2 FBG 다중 지점 측정 개념도 [13]

## 2. 광센서의 응용 분야

가시광은 인간에 눈에 보이는 빛인 만큼 이를 구분하여 산업 현장에서 이용하려는 시도가 많이 이루어졌고 반도체 가시광 센서 개발 이후 많은 산업 현장에서 사용되고 있다. [표 2.2]에 대표적인 산업군과 해당 산업군에서의 적용 방법 등을 나타내었는데 자동차 산업에서는 자동차 내외부 조명을 제어하는 시스템, 스마트폰 및 전자기기 산업에서는 색온도 조절 및 자동 화면 밝기 조절 기능, 식품 및 음료 산업에서는 제품의 색과 외관을 통한 품질 관리, 환경 모니터링에서는 대기 오염 감지 시스템에서 사용하고 기타 가시광 센서를 사용하는 산업군에는 건축, 교통 시스템 제어, 로봇공학 등이 있다.

농업에서는 가시광 센서를 사용하여 여러 가지 방식으로 적용하게 되는데 식물의 색상과 질감을 통하여 식물 건강 모니터링을 하거나 수확된 농작물을 크기, 색, 모양에 따라 자동으로 분류하고 등급을 매기는 농작물 분류 및 등급 판정에 쓰이기도 하며 과일이나 채소의 색을 측정하여 수확 시기를 결정하는 데 사용되기도 한다. 또한 최근에 통신 기술이 발달하여 스마트팜에 적용하게 되었는데 [그림 2.2]와 같이 식물의 광합성에 필요한 빛의 양과 질을 조절하기 위한 조명의 밝기를 가시광 센서로 측정하여 인공조명의 밝기 제어에 사용되기도 한다. 식물이 생장 시에 녹색광과 청록색 광이 식물의 성장 속도와 생물량을 효과적으로 증가시킬 수 있다는 연구 결과가 존재한다<sup>[14]</sup>.

양식업에서도 다양한 방식으로 가시광 센서가 적용되었는데 물의 탁도와 색을 측정하여 수질 상태를 감시하는 수질 모니터링에 사용하거나 양식되는 생물의 살색에 품질 평가에 중요한 요소가 되어 색상 센서를 사용하여 적절한 색을 유지하는지 모니터링하기도 한다<sup>[15]</sup>. [그림 2.4]와 같이 어류 역시도 생장 시에 조명의 영향을 받기 때문에 양식장의 광 환경을 조성하는 데 신경을 써야 하기 때문에 이를 위하여 가시광 센서를 사용하여 적절한 광환경을 모니터링하여 제어하기도 한다. 각각 파장이 다른 단색광을 사용하여 금붕어의 생장을 연구하였는데 파란색의 파장을 지닌 LED를 사용하였을 때 붉은색의 파장을 지닌 LED를 사용하여 키웠을 때보다 최종 체중, 체중 증가, 특정 성장률, 전체 길이에 해당하는 항목에서 더 나은 결과로 관찰되었다는 연구 결과가 존재한다<sup>[16]</sup>.

산업	목적
자동차 산업	주행보조 시스템, 자동차 내외부 조명 제어
스마트폰 및 전자기기	자동 화면 밝기 조절, 색온도 조절
보안 및 감시	침입 감지 센서, 영상 감시 카메라
농업	식물의 건강 상태 감지, 수확 가능한 작물 인식
양식업	수질 모니터링, 성장 모니터링, 조명 관리
식품 및 음료 산업	제품의 색깔과 외관을 통한 품질 관리, 포장 검사
제조업	제품 조립 상태 확인, 표면 검사, 색상 일관성 확인
환경 모니터링	대기 오염 감지, 수질 측정
기타	건축, 교통 시스템, 로봇공학

표 2.2 가시광 센서 응용 산업과 산업별 적용 방법



그림 2.3 스마트팜에서의 조명 관리 [17]



그림 2.4 수산 양식에서의 조명 관리 [18]

## 제2장 이론

### 제1절 Fiber Bragg Grating (FBG)

최초의 Fiber Bragg Grating (FBG)는 1970년대에 Ken Hill에 의해 시연되었는데 이는 가시광 영역의 레이저를 사용하여 제작되었다<sup>[19]</sup>. 그러나 현재는 자외선 영역의 레이저의 간섭 패턴을 사용하여 광섬유격자 무늬를 새김으로써 제작한다. FBG의 기본적인 원리는 프레넬 반사에 의한 것이다<sup>[20]</sup>. 프레넬 반사는 프레넬 방정식에서 나온 것으로 굴절률이 다른 매질의 계면에서 반사 또는 굴절이 모두 발생할 수 있는데 입사파의 전기장에 의한 반사파의 전기장 비율과 입사파의 전기장에 대한 투과파의 전기장의 비율을 각 편광 구성요소에 대해 제공한다. 입사 진폭으로 나눈 값을 반사계수와 투과계수라 한다. 자외선 영역의 레이저 간섭 패턴은 광섬유 내부에서 레이저에 노출된 면의 굴절률을 바꾸는데 바뀐 광섬유의 굴절률로 인하여 기존 광섬유와 레이저에 노출된 부분의 굴절률 차이가 발생하고 이 계면에서 프레넬 반사가 일어나게 되는 것이다<sup>[21]</sup>.

FBG는 광섬유의 코어의 굴절률에 주기적 또는 비주기적 격자무늬를 새겨 제작하고 새겨진 격자무늬의 간격에 따라 반사되는 중심 파장이 달라진다. FBG는 Interference, Sequential writing, Photomask, Point-by-point 등의 제작 방법으로 제작하게 되는데 연구에 사용된 FBG는 Photomask를 사용하여 제작된 것을 사용하였다. 포토마스크를 자외선 영역의 레이저와 광감응성 광섬유 사이에 배치하고 자외선 레이저를 사용하여 광섬유의 코어에 Photomask의 슬릿을 지나온 빛이 특정 격자 무늬를 가지고 있는 상태로 기록되게 된다.

광섬유 코어의 유효 굴절률을  $n_e$ 라고 하고 격자무늬 간격을  $\Lambda$ 라고 하였을 때 FBG의 중심 반사 파장( $\lambda_B$ )은 다음과 같다<sup>[21]</sup>.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (2.1)$$

광섬유격자는 자체로도 스트레인 센서와 온도 센서가 될 수 있는데 이는 광섬유에 전달된 스트레인 변화로 인한 광섬유격자 간격의 변화가 중심 반사 파장이 장파장 방향으로 이동하게 되는 결과를 얻고 광섬유 온도가 상승함에 따라 광섬유의 팽창이 일어나 굴절률의 변화를 가져와 중심 반사 파장이 바뀌게 된다. 이때 적용된 스



트레인의 변화( $\epsilon$ )와 온도 변화( $\Delta T$ )로 인한 중심 반사 파장의 상대적 변화  $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ 는 다음과 같이 주어진다<sup>[21]</sup>.

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right] = (1 - p_e)\epsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T \quad (2.2)$$

위 수식에서  $p_e$ 는 변형률 광학 계수로 광섬유 내부의 굴절률이 변형률에 어떻게 반응하는지를 나타내며  $\epsilon$ 은 격자의 스트레인이다.  $(\alpha_A + \alpha_n)\Delta T$ 는 파장 이동에 대한 온도의 영향을 나타내며  $\alpha_A$ 는 열팽창 계수이고  $\alpha_n$ 는 열광학 계수이다. 본 연구는 FBG에 코팅된 탄소나노튜브 폴리머에 빛이 조사되었을 때 발생하는 탄소나노튜브의 기계적 동작이 생긴다. 기계적 동작으로 인해 폴리머의 길이 변화가 생기고 FBG에 가해지는 스트레인 변화가 격자 간격의 길이에 영향을 미쳐 중심 반사 파장의 변화를 관찰하는 것이다.

광섬유격자 센서는 높은 측정 정밀도와 강한 반응성, 넓은 측정 범위, 전자기 간섭에 대한 저항성 등의 장점을 보유하고 있어 빠른 속도와 높은 정밀도의 실시간 모니터링에 적합하다. 일반적으로 사용되는 Germanium 도핑된 광섬유로 만든 FBG를 기준으로 하였을 때 스트레인 센서로 사용하게 되면 단위  $\mu\epsilon$  당  $0.78 \text{ pm}$  이동<sup>[22]</sup>하고 온도 센서로 사용하게 되면 단위  $^\circ\text{C}$  당  $13 \text{ pm}$  (at  $1.55 \mu\text{m}$ ) 이동<sup>[23]</sup>한다. 위와 같은 정밀도를 가진 FBG는 넓은 장소에서 여러 포인트를 측정하게 될 때 더욱더 유용하게 사용할 수 있다.

## 제2절 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)

탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT)는 탄소가 이루고 있는 튜브의 직경이 나노미터 범위인 탄소 동소체 중 하나이다. 탄소나노튜브는 튜브가 이루어진 벽의 수로 구분하는데 단일벽 탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotube, SWCNT)와 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotube, MWCNT)이다. 단일벽 탄소나노튜브는 튜브의 직경이 0.5~2.0 nm인 하나의 층을 가진 원기둥 형태의 구조이다. 다중벽 탄소나노튜브는 단일벽 탄소나노튜브가 여러 층으로 구성되는 구조를 가진다. 이러한 탄소나노튜브는 1985년  $C_{60}$ , 즉 탄소 원자 60개로 이루어진 [그림 2.5]와 같은 구의 형태인 풀러렌이라는 구조를 발견하면서 새로운 재료의 구조가 등장하였다. 풀러렌 구조는 초음속 클러스터 빔 장치를 사용하여 레이저로 흑연 타켓을 증발시켜 합성되었다. 이후 흑연 전극을 통해 고전류 아크가 흐르는 방식으로 아크 공정으로 인하여 대량 생산이 가능해졌고 비로서 1991년에 이 아크 공정을 사용하여 다중벽 탄소나노튜브라고 할 수 있는 것을 Iijima가 발견하게 되었다. [그림 2.6]는 Iijima가 발견한 다중벽 탄소나노튜브를 전자 현미경으로 촬영한 사진인데 a는 다섯 개의 흑연 시트로 구성된 튜브이고 지름은 6.7 nm, b는 두 개의 시트로 이루어진 튜브이고 지름은 5.5 nm. c는 일곱 개의 시트로 된 튜브이고 지름 6.5 nm으로 가장 작은 구멍의 지름은 2.2 nm이다<sup>[24]</sup>. 단일벽 탄소나노튜브 또한 아크 공정으로 제작할 수 있지만 반응기 내에 철이나 코발트 촉매 입자가 존재하는 조건일 때만 생성되었다.

탄소나노튜브는 기계적, 전기적, 열적, 광학적 특성을 가지는데 기계적 특성으로는 지금까지 발견된 물질 중에서 인장강도와 탄성계수 측면으로 가장 견고하고 강력한 물질이다. 전기적 특성은 튜브형 축을 따라 금속성이나 반도체성을 띠게 되는데 이는 탄소나노튜브의 구조에 따라서 결정되게 된다. 열적 특성은 탄소 전도로 알려진 특성을 나타내며 튜브를 따라 우수한 열 전도체로서의 성질을 가지지만 축방향 측면에서는 우수한 절연체로서의 역할을 수행할 것으로 예상된다. 탄소 전도란 물질 내에서 상대적으로 먼 거리에 걸쳐 전자 등의 전하 운반체나 에너지를 운반하는 입자가 방해받지 않는 흐름을 의미한다. 탄소나노튜브의 광학적 특성은 흡수, 발광을 한다는 것이다. [그림 2.7]와 [그림 2.8]을 보면 탄소나노튜브의 광 흡수 스펙트럼을 관찰할 수 있는데 [그림 2.7]는 분산된 단일벽 탄소나노튜브의 광의

에너지별 흡수 스펙트럼이고 [그림 2.8]은 순수한 단일벽 탄소나노튜브의 필름 형태와 풀러렌 C70, 풀러렌 C69 + 질소 탄소나노튜브의 광 흡수 스펙트럼이다. 광 흡수 스펙트럼을 확인하였을 때 자외선 영역의 빛을 많이 흡수하고 가시광선으로 진행할수록 흡수하는 양이 적어지다가 약 1000~2000 nm 근적외선 대역에서는 일시적으로 흡수량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 탄소나노튜브의 광 발광 특성을 이용하여 LED와 같은 분야에 적용<sup>[28]</sup>하였고 레이저 조명에 대한 개별 탄소나노튜브의 광전도성을 측정하고 광전류의 과장 및 편광 의존성을 분석함으로써 나노튜브 FET 구조를 분석하여 단일 분자 광검출기로 작동할 수 있는 것을 확인하였다<sup>[29]</sup>.

이러한 특성을 가지는 탄소나노튜브를 이용하여 현재 또는 미래에 응용할 수 있는 다양한 산업이 존재한다. 현재 응용되고 있는 산업으로는 화학적으로 활성화된 에폭시에 탄소나노튜브를 결합하여 탄소 나노 에폭시 수지를 제조하여 풍력 터빈, 해양 페인트 등의 실제 산업이나 스키, 아이스하키 스틱, 서핑 보드와 같은 스포츠 산업에서 사용되기도 한다. 게코 테이프라는 이름의 양면 접착이 가능한 테이프로 제작되기도 하는데 합성 강모로 제작된 탄소나노튜브 어레이는 제거 후에도 잔여물이 남지 않고 극한의 온도에서도 끈적한 상태를 유지한다는 장점이 있다. 미래에 산업에 적용하기 위해 개발하고 있는 어플리케이션은 전기적 특성을 활용하여 그림 2.9과 같은 형태로 탄소나노튜브 트랜지스터의 채널 재료로 활용할 수 있는 것을 확인하였고<sup>[30]</sup> 활성 표면적과 가스 흡수 능력이 있어 환경 모니터링에도 사용 가능하며<sup>[31]</sup> 의료 분야에서는 탄소나노튜브를 활용하여 유방암 검사에 사용할 수 있음을 확인하였다<sup>[32]</sup>.

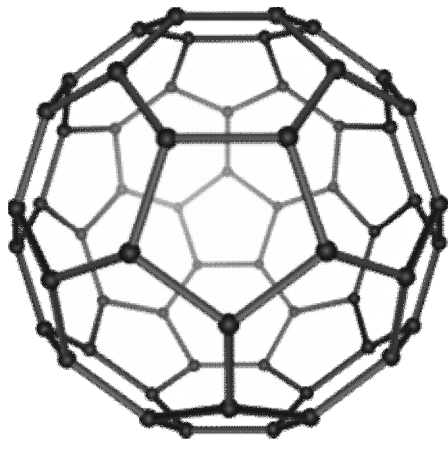


그림 2.5 풀러렌의 구조도<sup>[25]</sup>  
 ]

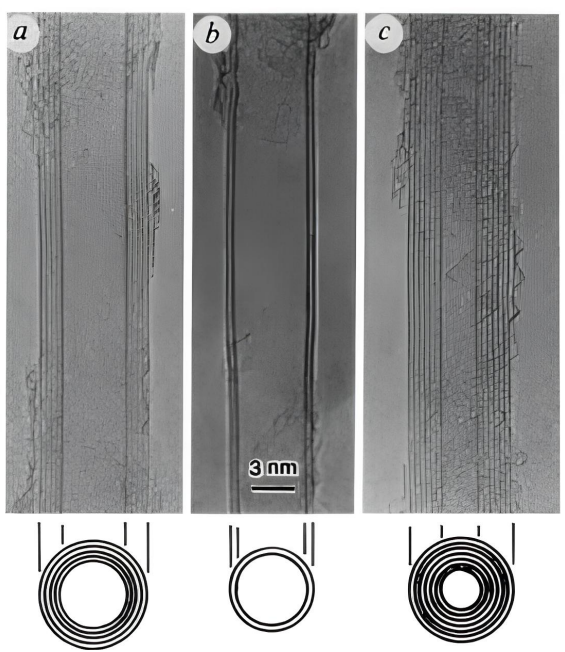


그림 2.6 Iijima가 개발한 다중벽 탄소나노튜브 사진<sup>[24]</sup>

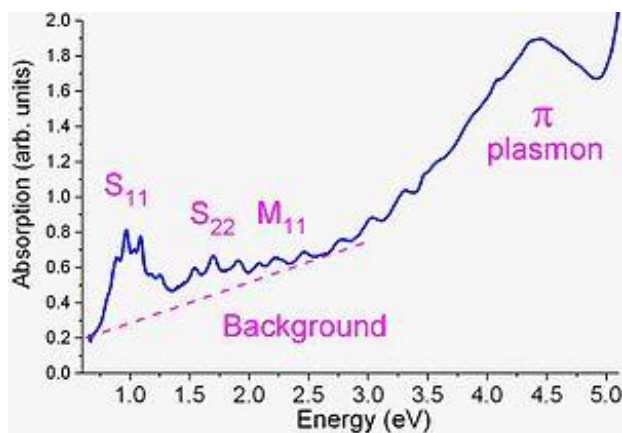


그림 2.7 분산된 단일벽 탄소나노튜브의 광 흡수 스펙트럼 [26]

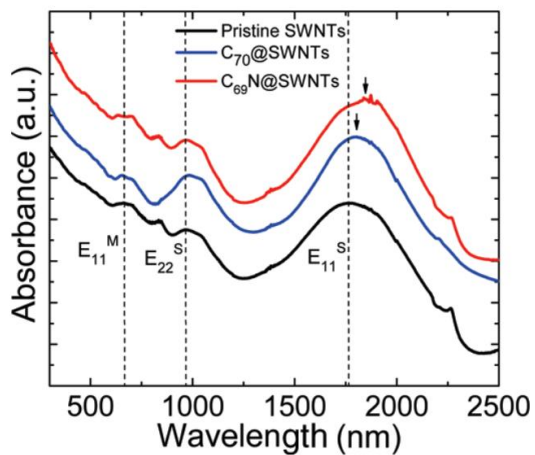


그림 2.8 단일벽 탄소나노튜브 필름의 UV, Vis, IR 대역에서의 광흡수 스펙트럼 [27]

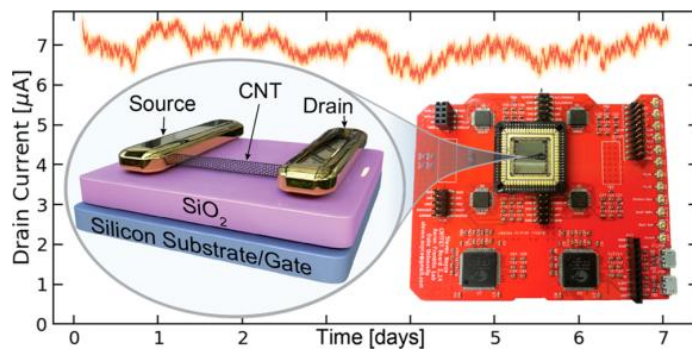


그림 2.9 트랜지스터의 채널로 이용되는 탄소나노튜브 모식도 [29]

### 제3절 선행 연구

빛이 탄소나노튜브에 주는 영향을 감지하려고 시도한 여러 가지 연구가 존재한다. 1999년 빛에 탄소나노튜브가 반응하여 휘는 성질을 발견한 연구가 있다. 합성된 단일벽 탄소나노튜브를 가시광에 노출한 후 탄소나노튜브의 움직임을 관찰하였을 때 [그림 2.4]와 같은 연신, 굽힘, 반발력과 같은 뚜렷한 움직임이 나타났고 조명을 제거하였을 때 탄소나노튜브는 다시 원래의 위치로 복원되어 탄성 또한 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 빛에 의한 탄성 효과는 가시광선 범위에 있는 광원의 경우 파장에 의한 영향보다 가시광의 세기에 매우 민감한 반응을 나타내는 것을 확인하였다.

탄소나노튜브의 광에 의한 탄성을 이용하여 단일벽 탄소나노튜브를 활용한 광학적으로 구동되는 나노튜브 액추에이터에 관한 연구가 이루어졌는데 나노튜브 액추에이터의 제작은 다음과 같다. 합성된 단일벽 탄소나노튜브를 시트 형태로 건조한 후에 아크릴 엘라스토머와 100  $\mu\text{m}$  두께의 PVC에 부착하여 [그림 2.5 a]와 같은 캔틸레버 구조를 제작하였다. 제작된 구조물에 가시광을 조사하였을 때 빛에 노출된 시간 동안 캔틸레버의 변위는 PVC 방향으로 액추에이터 길이가 증가하는 것을 확인할 수 있었고 광원이 꺼졌을 때 액추에이터는 원래 길이로, 캔틸레버는 초기 위치로 다시 수축하였다. [그림 2.5 b]는 이를 4회 반복한 실험 결과이다. [그림 2.6 a]와 같이 단일벽 탄소나노튜브 시트를 양쪽에 부착한 뒤 광세기의 변화를 주면서 실험을 진행하였을 때 [그림 2.6 b]와 같이 광세기가 증가함에 따라 PVC에 가해지는 Strain 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

탄소나노튜브를 CVD 공정 과정을 통하여 FBG에 증착하여 빛이 탄소나노튜브에 주는 영향을 발견한 연구가 존재한다. [그림 2.7]은 FBG에 증착된 탄소나노튜브 사진과 실험의 모식도를 나타낸다. 광원을 탄소나노튜브에 조사하였을 때 탄소나노튜브가 FBG에 미치는 영향은 2가지로 증착된 탄소나노튜브의 구조가 변형되면서 가하는 스트레인과 탄소나노튜브에 흡수되는 빛으로 인한 광열이다. 가시광(514 nm)과 적외선(1550 nm)의 광원을 조사하였을 때 FBG의 중심 파장 이동 변화는 [그림 2.8]과 같다.

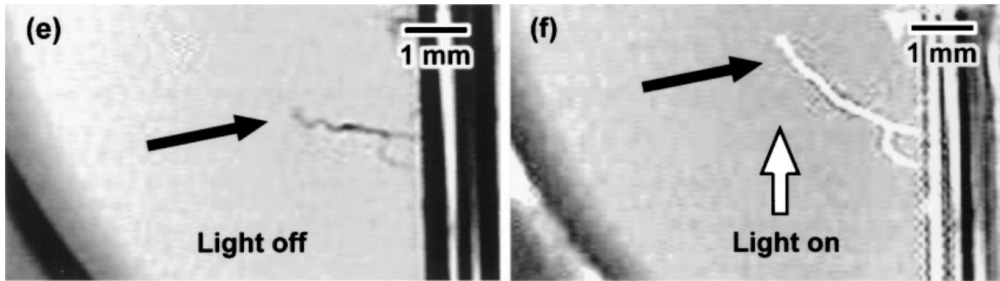


그림 2.10 조명 On/Off에 따른 단일벽 탄소나노튜브의 상태 변화<sup>[33]</sup>

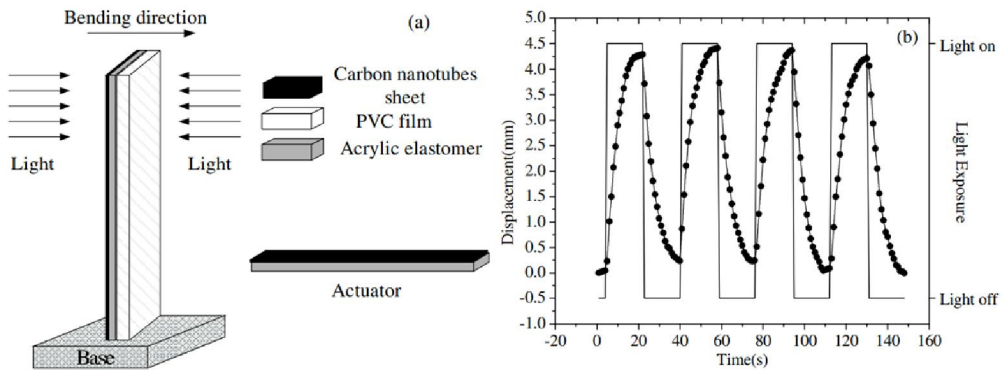


그림 2.11 SWCNT 캔틸레버와 조명 On/Off에 따른 Strain 변화<sup>[34]</sup>

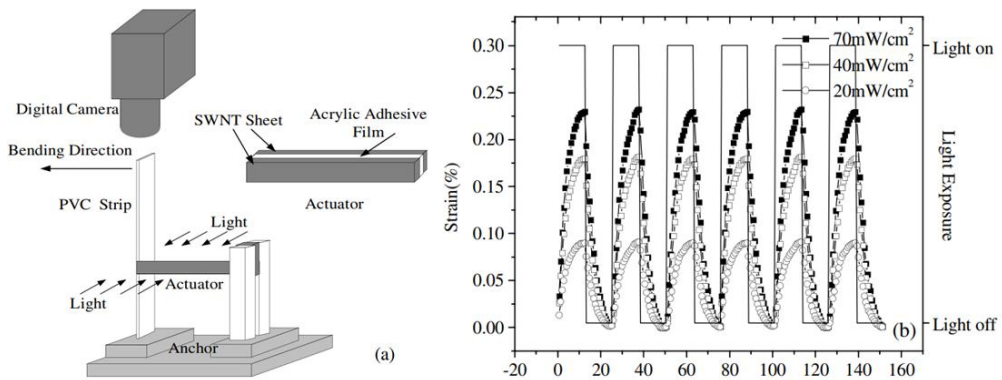


그림 2.12 이중 SWCNT 시트 구조와 광세기에 따른 Strain 변화<sup>[34]</sup>



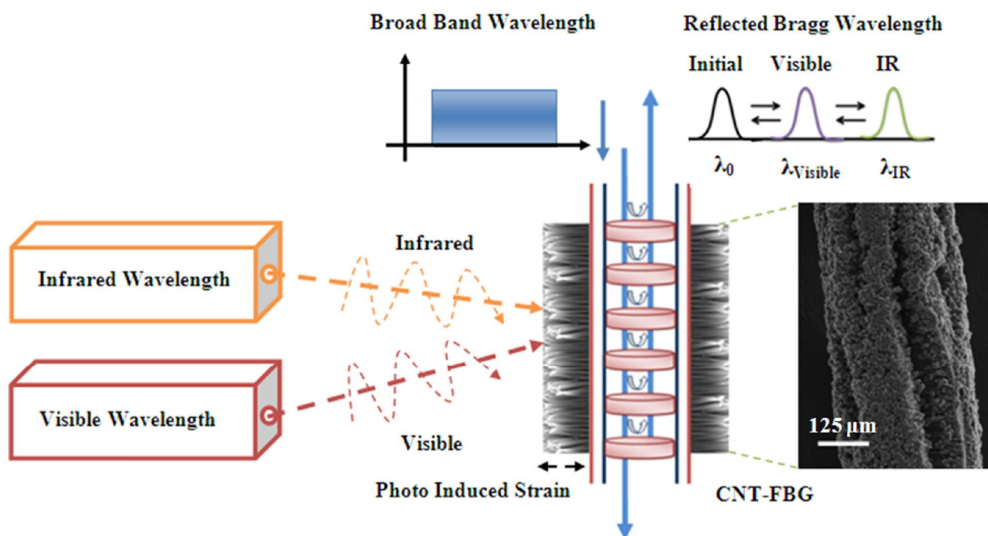


그림 2.13 탄소나노튜브의 적외선 및 가시광선 노출 개략도<sup>[35]</sup>

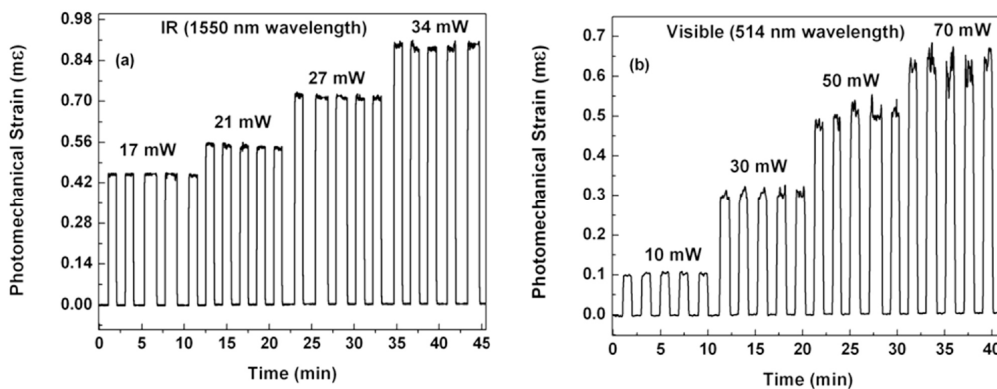


그림 2.14 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG의 적외선 및 가시광선 광세기에 따른 중심 파장 이동 그래프<sup>[35]</sup>

### 제3장 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 광섬유격자

#### 제1절 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 광섬유격자 동작 원리

기존 선행 연구에서는 CVD를 이용하여 FBG에 탄소나노튜브를 증착하는 방식으로 광센서를 제작하기 때문에 공정 과정이 복잡하고 비용이 많이 든다. 또한 탄소나노튜브의 FBG 증착 이후 탄소나노튜브를 보호할 방법이 존재하지 않기 때문에 FBG에서 탄소나노튜브가 탈락하게 되면 광센서의 성능이 저하된다는 단점이 존재한다.

위와 같은 문제가 발생하는 것을 방지하기 위해 아크릴레이트 폴리머를 이용하여 FBG에 코팅한다. 아크릴레이트 폴리머와 교반된 탄소나노튜브를 FBG에 코팅하여 제작한 광센서에 광을 조사하게 되면 탄소나노튜브의 기계적 동작이 발생하는데 탄소나노튜브가 빛의 진행 방향으로 휘며 탄소나노튜브의 움직임에 의해 폴리머가 늘어나게 된다. 폴리머가 늘어나면서 FBG에 스트레인을 주게 되는데 이에 따라 FBG의 격자 간격의 변화가 생긴다. 격자 간격에 변화가 생기면 FBG의 중심 반사 파장의 이동이 일어나며 측정된 중심 반사 파장을 관찰하여 광세기를 측정할 수 있다.

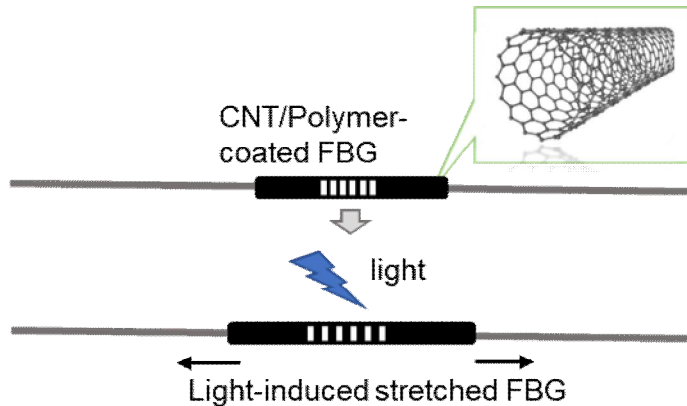


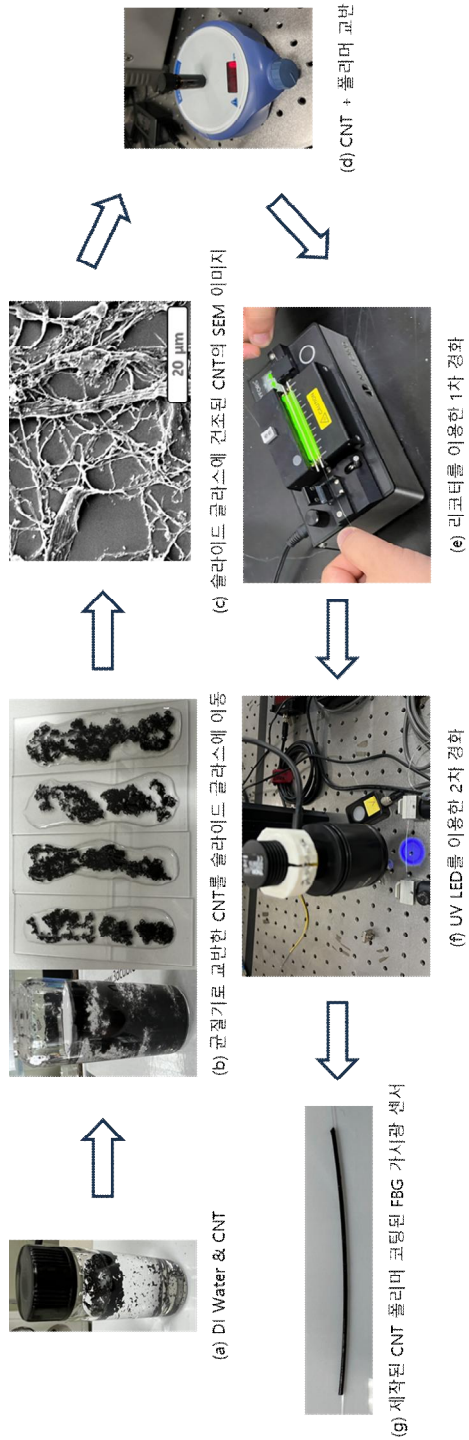
그림 3.1 탄소나노튜브 폴리머가 코팅된 FBG 광센서의 광에 따른 기계적 동작

## 제2절 제작 방법

광에 반응하여 물리적 상태가 변화하는 탄소나노튜브의 특성과 격자 간격이 변화하면 중심파장이 변화하는 FBG의 특성을 결합하기 위하여 FBG에 자외선 경화제와 탄소나노튜브를 교반한 혼합물을 코팅하였다. 탄소나노튜브 파우더는 Carbon nanotube, Single-walled로 평균 직경이 3~5 nm이고 길이는 300~500  $\mu\text{m}$ 이다. 900711(Sigma-Aldrich inc.)을 사용하였다. 900711의 특성은 [표 3.2]와 같다.

구매한 탄소나노튜브는 파우더나 플레이크의 형태였기 때문에 개별 튜브의 형태로 사용하기 위해서 꼬여있는 탄소나노튜브의 구조를 최대한 풀어주어야 할 필요성이 있는데, 바이알에 DI Water와 함께 넣었을 때 [그림 3.2(a)]과 같은 형태로 있게 된다. 바이알에 DI Water와 탄소나노튜브를 함께 넣은 후 균질기(HZ1, Labtron Inc.)를 사용하여 30 분간 교반하여 풀어주었다. [그림 3.2(b)]는 균질기를 사용한 직후 DI Water와 함께 있는 탄소나노튜브와 탄소나노튜브의 형태를 자세히 보기 위하여 바이알에서 꺼내 슬라이드 글라스 위에 도포한 모습이다. [그림 3.2(c)]는 슬라이드 글라스에 도포한 탄소나노튜브가 풀어졌는지를 확인하기 위하여 핫플레이트 및 스티어러(HSD150, 미성과학기기)의 온도를 80 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하여 건조한 후 건조된 탄소나노튜브를 SEM을 이용하여 촬영한 사진이다. SEM 이미지를 보면 탄소나노튜브 가닥이 뭉치지 않고 대체로 잘 분리된 것을 확인할 수 있다.

건조된 탄소나노튜브가 자외선 경화제와 잘 섞일 수 있도록 [그림 3.2(d)]에 있는 스티어러를 사용하여 100 rpm의 속도로 24 시간 이상 충분히 교반하였다. 자외선 경화제는 LS-2211 (Luvantix ADM Inc.)를 사용하였다. LS-2211의 특성은 [표 3.1]와 같다. 교반된 폴리머 혼합물을 FBG에 코팅하기 위하여 [그림 3.2(e)]의 리코터(Nyfors사, Minicoater 2)를 사용하였다. 리코터에 사용된 UV LED의 파장은 380~385 nm이며 직경이 250  $\mu\text{m}$ 과 900  $\mu\text{m}$ 인 몰드를 사용하여 FBG에 혼합물의 코팅을 진행하였다. 몰드의 중심에 FBG가 위치하도록 지그를 조절하여 FBG를 고정하였고 이후 혼합물을 몰드에 넣어 경화를 진행하였다. 몰드에 FBG와 혼합물을 넣은 후 리코터를 사용하여 약 30 초 동안 경화를 진행하였다. 리코터로만 경화를 완료하기에는 리코터의 LED의 온도 조절 부분에서 한계가 있어 광센서에 코팅한 혼합물이 완전히 경화될 때까지 UV LED(M365L3, Thorlabs Inc.)를 사용하여 12 시간 이상 추가 경화를 진행하였다[그림 3.2(f)]. [그림 3.2(g)]은 위와 같은 방식으로 제작한 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 사진이다.



[그림 3.2] 탄소나노튜브 포함된 폴리머가 코팅된 FBG 제작 과정

	<b>LS-2211</b>
Viscosity (cPs)	4500
Refractive Index Liquid (589 nm)	1.512
Surface Tension (dynes * cm <sup>-1</sup> )	23
Refractive Index Film (852nm)	1.525
Young's Modulus (MPa)	1070
Elongation at Break (%)	3%
Glass Transition Tg (°C)	58°C

표 3.1 자외선 경화제 LS-2211 특성

	<b>900711</b>
Assay	≥98% carbon basis, <1% (ash)
Form	powder or flakes
Length	300-500 μm , in forest
Average diameter	3-5 nm
Surface area	800-1000 m <sup>2</sup> /g , by BET
Impurities	500 ppm Fe (max)
density	1.7-1.9 g/cm <sup>3</sup> at 25 °C (lit.)

표 3.2 Carbon nanotube 900711 특성

## 제3절 가시광 감지 실험

### 1. 광센서의 가시광 영역 빛 감지

[그림 3.3]은 LED에서 방출되는 가시광선에 노출되었을 때 탄소나노튜브 코팅 FBG 광센서의 반응을 개략도로 보여준다. LED의 가시광선이 탄소나노튜브에 도달하면 탄소나노튜브는 빛이 진행하는 방향으로 휘어진다<sup>[11]</sup>. 탄소나노튜브의 이러한 가역적 구부러짐은 FBG의 코팅 재료인 아크릴레이트 폴리머의 변형을 유발하여 FBG의 격자 주기에 변화를 가져온다. 결과적으로 FBG 반사 스펙트럼의 중심 파장은 장파장 영역으로 이동하게 된다. [그림 3.4]은 실험에 사용된 LED(후면 Flash Light, iPhone 13 Pro, Apple Inc.)의 파장 스펙트럼을 CCD 분광기(Thorlabs, CCS200)를 사용하여 측정된 것이다. 측정된 파장 스펙트럼을 보았을 때 LED의 파장 스펙트럼은 450 ~ 700 nm 범위의 대역폭을 가짐을 알 수 있다.

[그림 3.4(a)]와 [그림 3.5(b)]는 LED의 다양한 광 출력에 반응하는 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG의 직경이 125  $\mu\text{m}$ 와 80  $\mu\text{m}$ 인 광센서의 중심 파장 이동을 보여준다. 두 FBG의 파장은 LED의 출력이 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하였다. LED가 꺼지게 되면 FBG의 파장은 다시 초기의 파장으로 되돌아가게 된다. 직경이 125  $\mu\text{m}$ 인 FBG에 비해 직경이 축소된 광센서의 가시광 감도가 향상되었다. 외부에서 들어온 가시광선으로 인하여 FBG의 반사 스펙트럼 중 중심 파장이 이동하는 것을 관찰함으로써 입사되는 가시광선의 강도를 측정할 수 있게 된다.

[그림 3.6]은 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 중심 파장의 변화량을 파장 분해능이 0.02 nm인 광스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer(OSA), MS9710C, Anritsu Inc.)를 사용하여 2초마다 측정된 데이터를 보여준다. [그림 3.6]와 같이 FBG 반사 스펙트럼의 피크 검출 데이터를 이용하여 가시광선 노출로 인해 시간에 따라 파장이 변화를 측정했다. 실험에 사용된 LED의 출력은 25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 이다. 처음에는 센서를 가시광선 영역의 LED에 60초 동안 노출하였다. 이후 LED가 비활성화되고 중심 파장의 변화가 관찰된다. LED의 전원을 켜고 있을 때 파장의 눈에 띄는 변화가 나타났다. 그러나 60초 지점 근처에서는 변화가 느껴져 포화 상태에 도달한다. 센서의 느린 응답성은 주로 탄소나노튜브의 고유한 응답 속도의 결과가 아니라 아크릴레이트 폴리머의 감쇠 효과가 작용한 것으로 보인다. 아크릴레이트 폴리머의 구성을 개선하기 위한 추가 연구를 통해 이 센서의 응답 시간

이 향상될 것으로 기대된다. 직경 80 $\mu\text{m}$ 인 FBG (이후 80 $\mu\text{m}$ -FBG)의 경우 60초 이후에 0.58 nm의 최대 파장 이동이 관찰된 반면, 직경 125 $\mu\text{m}$ 인 FBG(이후 125 $\mu\text{m}$ -FBG)의 경우 0.32 nm였다. 80  $\mu\text{m}$ -FBG를 사용하여 제작된 광센서는 125 $\mu\text{m}$ -FBG보다 1.8배 우수한 응답 속도를 나타냈다. 60초 후에 LED를 비활성화한 후, 우리는 LED 활성화 시 이동과 유사한 빠른 중심 파장 이동을 관찰했으며, 광학 센서의 중심 파장은 60초 기간이 끝나기 전에 원래 값으로 되돌아갔다. 탄소나노튜브의 역할을 비교 평가하기 위해 125 $\mu\text{m}$ -FBG에 탄소나노튜브 없이 아크릴레이트 폴리머만 적용하고 동일한 테스트를 수행했다. [그림 3.6]에서 볼 수 있듯이 센서는 가시광선에 반응하지 않았다.

제작된 탄소나노튜브 코팅 FBG 광센서를 이용한 실험의 재현성을 검증하기 위해 각 센서별로 반복 실험을 진행하였다. 실험은 60초 간격으로 LED 전원을 켜고 끄는 방식으로 5회 반복하였다. [그림 3.7(a)]은 탄소나노튜브로 코팅된 125 $\mu\text{m}$  FBG에 대한 5회 반복 테스트에 대한 그래프를 표시하고, [그림 3.7(b)]는 80 $\mu\text{m}$ -FBG에 탄소나노튜브로 코팅된 광 센서에 대한 5회 반복 테스트에 대한 그래프를 표시한다. 그래프에서 볼 수 있듯이 125  $\mu\text{m}$ -FBG 탄소나노튜브 광 센서는 0.24 - 0.26 nm의 중심 파장 이동을 나타냈고, 80  $\mu\text{m}$ -FBG 탄소나노튜브 광 센서는 0.48 - 0.5 nm의 중심 파장 이동을 나타냈다. 또한, 여러 번의 반복 후에 중심 파장이 초기 값으로 복귀하여 탄소나노튜브 코팅 FBG 광센서의 히스테리시스 가 낮음을 나타낸다. 테스트 전반에 걸쳐 중심 파장의 변화량의 일관성은 센서가 우수한 재현성을 나타냄을 나타낸다.

[그림 3.8]는 LED 전력에 따른 파장 이동 그래프를 보여준다. LED 광량은 0에서 25mW/cm<sup>2</sup>까지 5%씩 점진적으로 증가시켰으며, 파워미터(1936-R, Newport Inc.)를 이용하여 파워를 측정하였다. 탄소나노튜브가 코팅된 FBG 광센서를 파워미터와 동일한 높이에 위치시켜 LED 파워를 측정하고, LED 파워에 따른 파장 이동을 기록하였다. 최대 표준편차는 0.01 nm로 OSA에서 설정한 분해능 0.02 nm보다 작아 두 센서 모두 가시광선에 대한 반응성이 양호함을 알 수 있다. 이 그래프는 가시광선에 대한 탄소나노튜브의 반응 특성을 반영하는 것으로 보이는 2차 다항식 피팅과 잘 정렬되었다. 가시광선에 대한 광센서의 비선형 반응은 나노튜브 복합 액츄에이터의 정전기, 탄성 및 열 효과 사이의 물리적 상호 연결로 인해 발생했다[11]. 125  $\mu\text{m}$ -FBG 탄소나노튜브 센서의 측정 감도는 0.0128 nm/mW/cm<sup>2</sup>인 반면, 80  $\mu\text{m}$ -FBG 광센서의 측정 감도는 0.240 nm/mW/cm<sup>2</sup>였다.

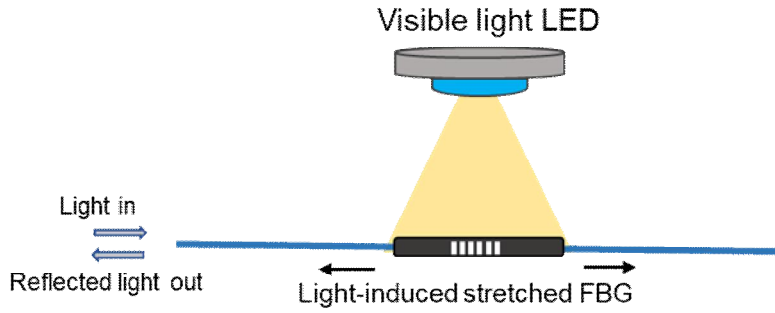


그림 3.3 가시광 영역 빛 감지 실험 개략도

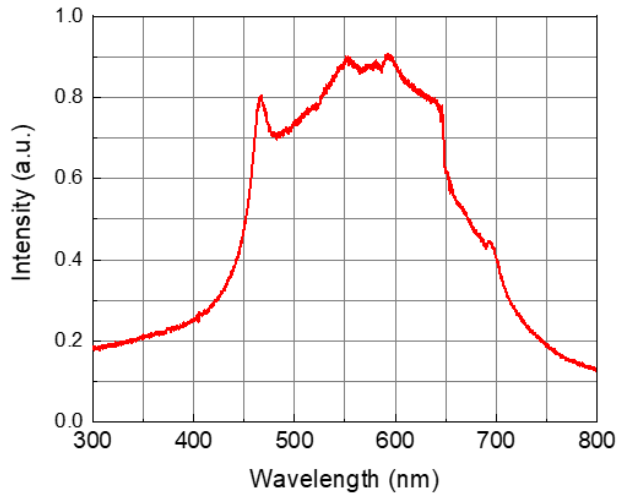


그림 3.4 실험에 사용된 LED의 Wavelength Spectrum



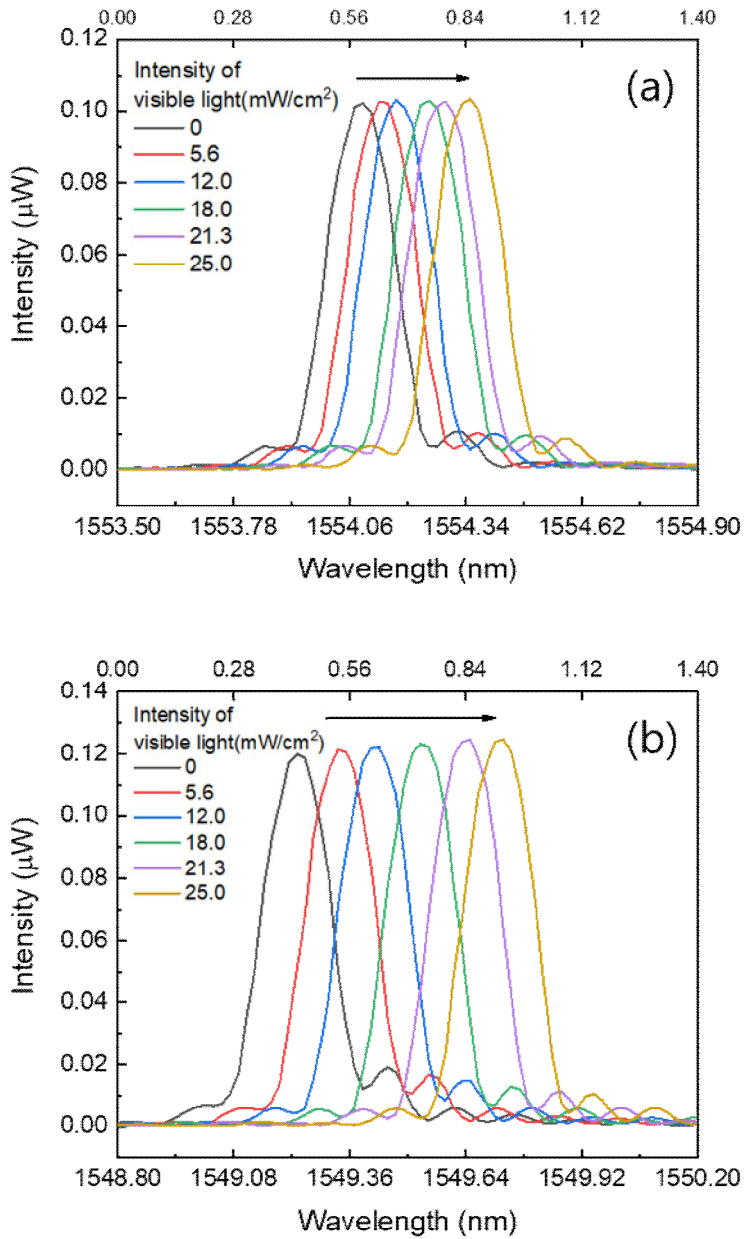


그림 3.5 탄소나노튜브 함유 폴리머로 코팅된 직경이 (a) 125  $\mu\text{m}$ 와 (b) 80  $\mu\text{m}$ 인 FBG의 광세기별 중심 파장 이동 (LED 출력 범위: 0 ~ 25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ )

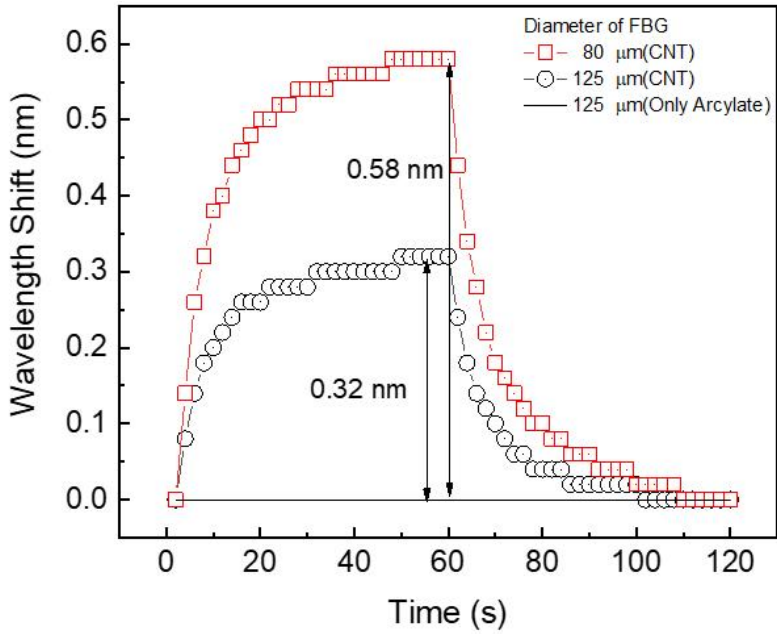


그림 3.6 직경 125 $\mu\text{m}$  및 80 $\mu\text{m}$ 의 SWCNT 코팅 FBG의 가시광 유도 파장 이동  
 (그림 4.4 및 그림 4.5의 FBG 반사 스펙트럼의 피크 감지에서 얻음).

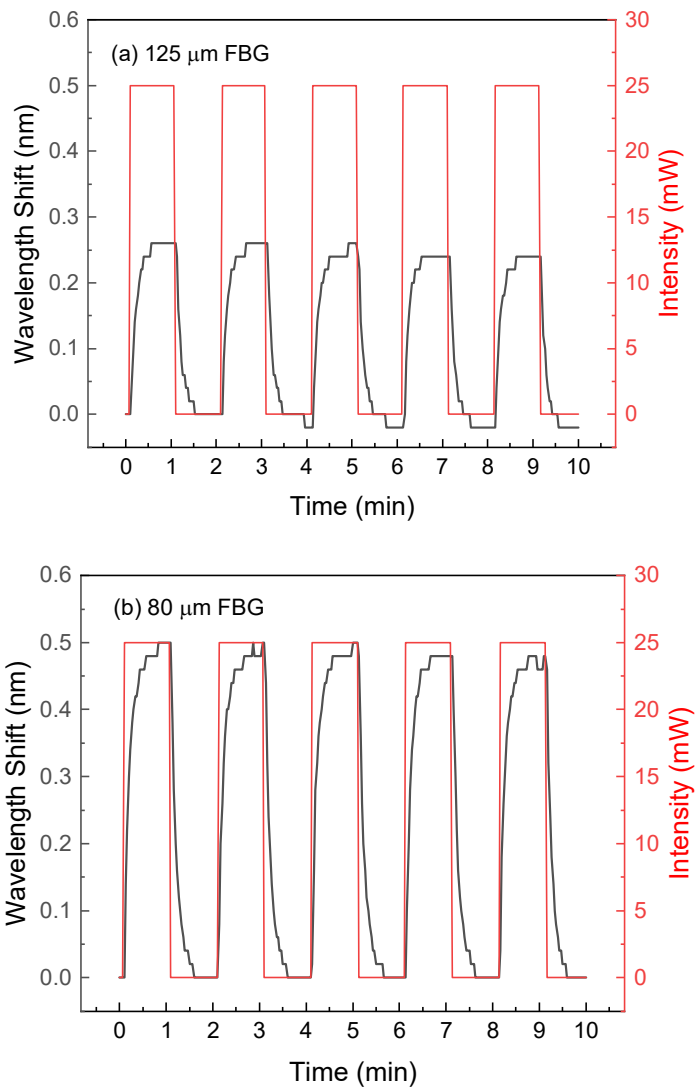


그림 3.7 탄소나노튜브 함유 폴리머로 코팅된 직경이 (a) 125 과 (b) 80  $\mu\text{m}$ 인 FBG의 가시광에 대한 중심 파장 변화 측정 결과

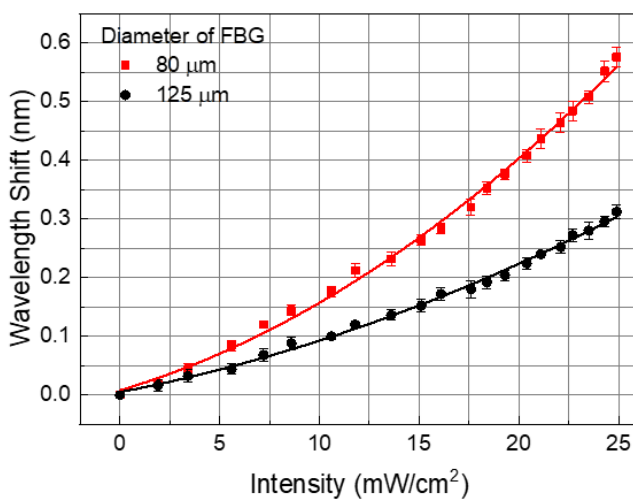


그림 3.8 가시광선 출력에 반응하여 직경 80  $\mu\text{m}$  및 125  $\mu\text{m}$ 의 탄소나노튜브 코팅 FBG의 파장 이동.

## 2. 특정 파장에서의 빛 감지

가시광 영역의 LED를 조사하였을 때 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서가 빛에 반응하여 광섬유 직경이 125  $\mu\text{m}$ 인 FBG 센서는 최대 0.32 nm, 80  $\mu\text{m}$ 인 FBG 센서는 최대 0.58 nm까지 FBG에서 반사된 중심 파장이 이동하는 것을 확인하였다. 그러나 사용된 LED의 방출광 스펙트럼이 [그림 3.4]을 보면 알 수 있듯이 가시광의 거의 모든 영역을 포함하기 때문에 특정 파장에서의 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 반응을 확인할 수 없다. 위와 같은 이유로 광센서가 어느 파장에서 반응하는지 확인하기 위해 2가지 실험을 진행하였다.

단일벽 탄소나노튜브와 아크릴레이트 폴리머, 그리고 단일벽 탄소나노튜브와 교반된 아크릴레이트 폴리머의 흡수 파장 스펙트럼을 측정하였다. 단일벽 탄소나노튜브는 균질기를 사용하여 DI Water와 교반한 후 슬라이드 글라스에 건조하여 [그림 3.9(a)]의 탄소나노튜브 사진의 빨간 원 부분을 측정하였고 그래프를 확인하였다. [그림 2.7]의 단일벽 탄소나노튜브 흡수 스펙트럼과 같이 자외선 영역의 흡수가 가장 많이 일어났고 가시광 영역에서는 장파장으로 이동할수록 흡수가 떨어지는 것을 확인하였다. 아크릴레이트 폴리머는 [그림 3.9(b)]과 같이 슬라이드 글라스 위에 약 0.1 mm의 두께로 필름과 같은 형태로 폴리머를 경화하여 제작한 후 중심 부분을 측정하였다. 아크릴레이트 폴리머 필름의 흡수 스펙트럼을 확인하였을 때 가시광 영역에서의 흡수는 거의 일어나지 않고 자외선 영역에서의 흡수가 일어나는 것을 확인하였다. [그림 3.9(c)]는 탄소나노튜브와 아크릴레이트 폴리머를 교반하여 슬라이드 글라스에 경화시켜 제작한 필름이다. 탄소나노튜브 필름도 0.1 mm의 두께로 제작하였고 필름 중심부의 흡수 스펙트럼을 측정하여 그래프를 얻었다. 그래프를 확인하였을 때 아크릴레이트 폴리머의 흡수 파장과 탄소나노튜브의 흡수 파장을 모두 포함하는 것을 확인할 수 있었고 폴리머와 교반된 탄소나노튜브 폴리머가 광을 흡수하는 것을 최종적으로 확인하였다.

탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 흡수 스펙트럼을 확인하였고 각 파장에서의 반응성이 어떻게 되는지를 확인하기 위하여 자외선 영역의 LED와 가시광 영역의 LED 2개를 사용하여 FBG 반사광 중심 파장 이동을 측정하였다. 사용된 LED는 자외선 영역인 365nm의 중심 파장을 가지는 LED (hl-es-3032s22v365-b2-s1, Honglitrionic Inc.)와 파란색 영역인 465nm의 중심 파장

을 가지는 LED(GB QSSPA1.13, OSRAM Inc.), 빨간색 영역인 620nm의 중심 파장을 가지는 LED(KS DMLS31.23, OSRAM Inc.)를 사용하여 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 반응 실험을 진행하였다. 각 LED의 방출 파장 스펙트럼은 [그림 3.10]과 같다. 실험 셋업은 가시광 영역 감지 실험을 했을 때와 동일하게 배치하여 실험을 진행하였으며 LED를 1분간 광센서에 조사하였을 때의 반사 중심 파장 이동량을 측정하였다. 조건을 같게 하여 파장별 중심파장 이동량 측정 실험을 4회 반복 실험하여 평균을 내었다. 사용된 LED의 세기가 동일하지 않았기 때문에 단위 세기인  $\text{pm/mW/cm}^2$ 로 환산하여 획득한 데이터가 [그림 3.11]이다. 365 nm 파장인 UV LED를 사용하여 조사하였을 때 약  $18 \text{ pm/mW/cm}^2$ , 465 nm 파장인 Blue LED에서는 약  $12.4 \text{ pm/mW/cm}^2$ , 620 nm 파장인 Red LED는 약  $9.5 \text{ pm/mW/cm}^2$ 의 중심 파장 이동량을 확인하였다. 중심 파장이 가장 많이 이동할 때는 UV LED를 사용하였을 때이다. 이것으로 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG는 가시광선 뿐만 아니라 자외선 센서로도 활용이 가능한 것을 확인했다.

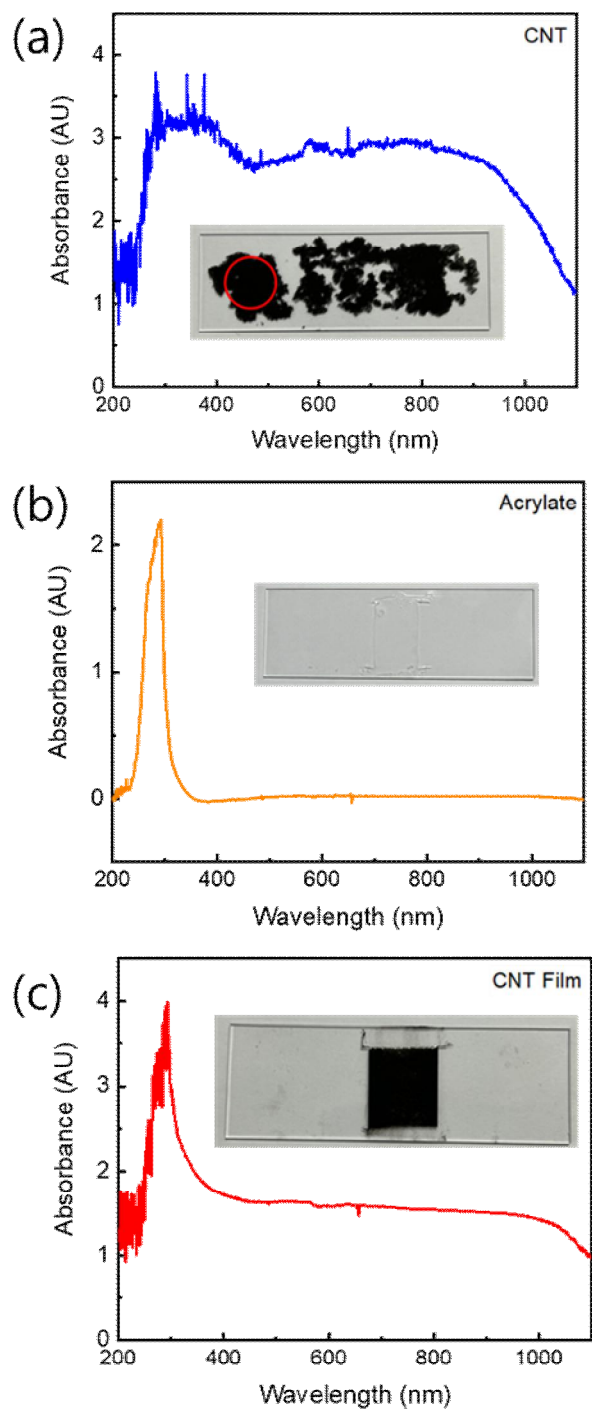
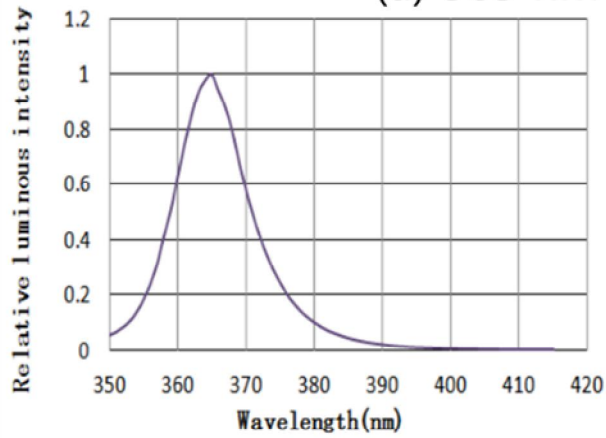
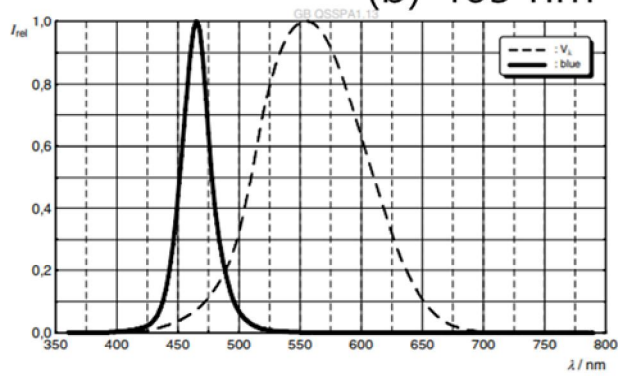


그림 3.9 흡수스펙트럼 측정 (a) 탄소나노튜브와, (b) 아크릴레이트 폴리머, (c) 탄소나노튜브 포함된 아크릴레이트 폴리머

(a) 365 nm



(b) 465 nm



(c) 620 nm

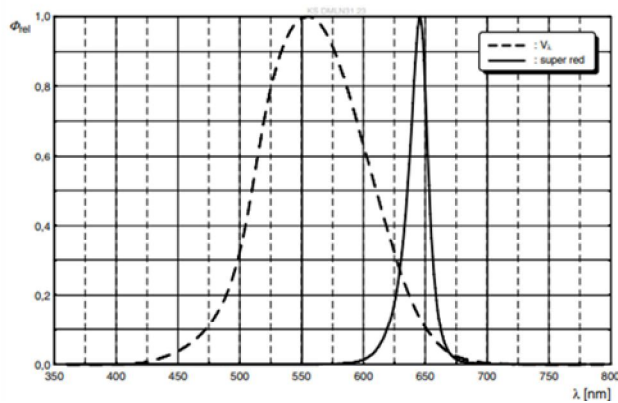


그림 3.10 사용된 LED의 파장 스펙트럼 (a) UV LED (hl-es-3032s22v365-b2-s1),  
 (b) Blue LED (GB QSSPA1.13), (c) Red LED(KS DMLS31.23)



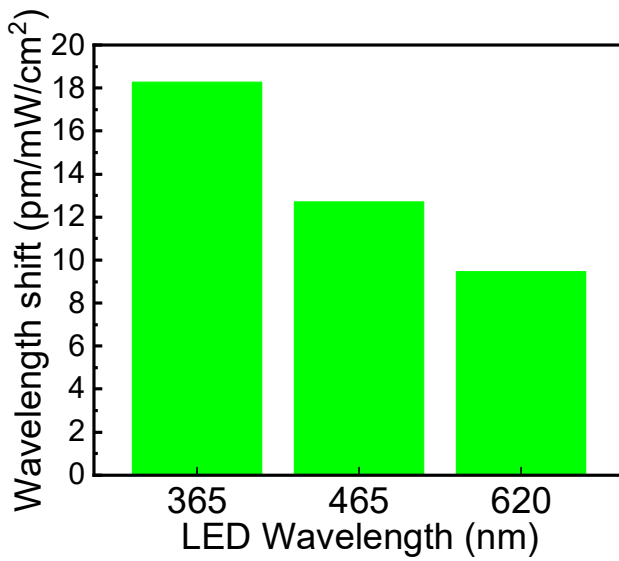


그림 3.11 LED의 파장별 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 단위 광세기당 광 반응

## 제4장 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 광섬유격자

### 제1절 탄소나노튜브 함유량에 따른 가시광 반응 실험

광센서의 가시광 감지 실험과 특정 파장에 대한 반응성 실험 진행 시에 탄소나노튜브와 아크릴레이트 폴리머가 가시광선에 반응하여 FBG의 격자 간격에 가역적인 변화를 확인하기 위한 실험이었으므로 아크릴레이트 폴리머와 탄소나노튜브의 최적 비율에 관한 연구가 이루어지지 않았다. 또한 기존에 이루어진 실험에서 탄소나노튜브가 코팅된 FBG 광센서가 최대의 민감도를 가지고 있는 것인지 확인할 수 없기에 최적 성분비의 탐색을 통하여 광센서의 반응도를 증가시키는 연구를 진행하였다.

탄소나노튜브를 DI Water와 균질기로 교반하면 엉켜있던 나노튜브가 풀리면서 체적이 증가하게 된다. 체적이 증가한 탄소나노튜브를 건조한 후 폴리머와 교반하였을 때 아크릴레이트 폴리머 대비 탄소나노튜브의 함유량을 일정 비율 이상으로 교반하면 리코터의 몰드에 넣고 경화하였을 때 탄소나노튜브 폴리머 코팅이 고르지 않게 제작되었다. 위와 같은 이유로 아크릴레이트 폴리머에 포함된 탄소 나노튜브가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 wt.%를 가진 경화 재료를 각각 FBG에 코팅하여 센서를 제작했다. 제작된 광센서는 [그림 4.1]과 같다. 0.1 wt.% 광센서의 경우 탄소나노튜브의 양이 폴리머에 비해 적기 때문에 투명한 아크릴레이트 폴리머가 잘 보이지만 0.2 wt.% 이상으로 설정하여 제작한 광센서는 0.1 wt.%에 비하여 색이 많이 어두워진 것을 확인하였고 0.3 wt.% 비율 이상의 광센서는 탄소나노튜브의 영향으로 투명한 폴리머의 형태를 확인할 수 없었다.

제작된 광센서의 반응성을 확인하기 위하여 [그림 3.9]의 가시광 영역 실험과 같이 실험 장치를 설치한 후 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 광원은 Green LED(M530L4-C1, Thorlabs Inc.)를 사용하였는데 해당 광원의 중심 파장은 530 nm이고 스펙트럼 폭은 35 nm이다. LED에 렌즈를 결합하여 LED에서 방출된 광이 최대한 고른 분포를 가지게 하였고 빔 직경은 약 5 cm이다. 광원의 세기는 LED의 전류를 조절하여 0~25 mW/cm<sup>2</sup>의 범위를 가지며 5 mW/cm<sup>2</sup>씩 광세기를 증가시키면서 실험하였다. 실험은 각 질량백분율이 다른 광센서에 광세기마다 1분간 LED를 조사하였다가 1분 동안 꺼서 중심 파장이 초기 위치로 돌아오는 것을 4번 반복하는 방식으로 진행되었다.

위와 같은 방식으로 실험을 진행하였을 때 광센서에 조사되는 LED의 광세기는 0, 5, 10, 15, 20, 25 mW/cm<sup>2</sup>이다. 해당 광세기를 질량백분율이 다른 광센서에 조사하였을 때 0.1 wt.%에서 [그림 4.2], 0.2 wt.%에서 [그림 4.3], 0.3 wt.%에서 [그림 4.4], 0.4 wt.%에서 [그림 4.5]의 그래프를 얻을 수 있었다. [그림 4.6]은 LED의 광세기가 20 mW/cm<sup>2</sup>일 때 각 wt.%의 중심 파장 이동량을 표시한 것이다. 0.1 wt.%에서 0.3 wt.%로 질량백분율이 증가할수록 중심 파장 이동량이 증가하는 것을 확인할 수 있고 0.4 wt.%에서는 0.3 wt.%에 비하여 약간 줄어든 것을 확인할 수 있다. [그림 4.7]은 광세기별 중심 파장 이동량의 평균을 낸 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. [표 4.1]은 광세기별 중심 파장 이동량의 평균을 낸 데이터를 표로 나타낸 것인데 이를 참고하면 탄소나노튜브의 비율이 0.1 wt.%인 광센서에 조사하였을 때 4회 평균 중심 파장 이동량은 0, 16, 51, 94, 160, 237 pm이다. 0.2 wt.%인 광센서의 4회 평균 중심 파장 이동량은 0, 61, 105, 167, 303, 464 pm이다. 0.3 wt.%인 광센서의 4회 평균 중심 파장 이동량은 0, 69, 156, 250, 435, 688 pm이다. 0.4 wt.%인 광센서의 4회 평균 중심 파장 이동량은 0, 72, 137, 269, 433, 662 pm이다. 0.1 wt.%에서 0.3 wt.%로 질량백분율이 증가할수록 중심 파장의 이동량이 증가하는 것을 확인하였으나 0.4 wt.%에서는 중심 파장의 이동량이 LED의 광세기가 5, 15 mW/cm<sup>2</sup>일 때는 약간 증가하였으나 10, 20, 25 mW/cm<sup>2</sup>일 때는 반대로 감소하는 것을 확인하였다. 반응성 차이를 확인하였을 때 0.3 wt.%의 질량백분율로 제작한 센서에 비해 0.4 wt.%의 질량백분율로 제작한 센서가 우수하다고 할 수 없으므로 최적의 성분비는 0.3 wt.%의 질량백분율로 제작한 센서라고 할 수 있다.

[그림 4.8]은 [그림 4.7]의 탄소나노튜브 함유량별 FBG 센서의 광반응성 평균과 표준오차 그래프를 이차 다항식 형태로 피팅한 그래프이다. FBG 센서는 스트레인과 온도의 측정이 독립적으로 이루어진다. 탄소나노튜브에 LED에서 방출된 광이 조사되었을 때 기계적으로 늘어난 폴리머가 FBG에 스트레인을 가하기 때문에 측정 그래프가 선형으로 나타나야 하지만 실제로 측정한 데이터는 이차 다항식 함수 그래프로 나타난다. 이는 탄소나노튜브에 빛을 조사할 때 빛으로 인한 기계적 작용도 일어나지만 빛으로 인한 미세 열이 발생하기 때문에 폴리머에 영향을 주는 것으로 추정된다. 광섬유에 온도의 영향 없이 스트레인에 의한 영향만 작용한다면 [그림 4.9 (a)]와 같이 동작하지만 탄소나노튜브에 미세열이 발생하면서 온도가 T1이 되면 폴리머의 가동성이 좋아지고 T2가 되어 온도가 증가할수록 폴리머의 가동성이 좋아져 스트레인이 증가하여 광세기에 대한 중심 반사 파장 이동량이 이차

다항식 그래프를 그리는 것으로 추정한다. 이를 확인하기 위하여 FBG의 기본 수식을 사용하여 유도했다.

$$\lambda_B = 2n_e\Lambda \quad (2.1)$$

식 (2.1)에서  $\lambda_B$ 는 중심 반사 파장,  $n_e$ 는 광섬유 코어의 유효 굴절률이고  $\Lambda$ 는 FBG의 격자 간격이다. 위 수식을 스트레인과 온도에 대하여 미분을 하게 되면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\sigma\Lambda}{\sigma\epsilon} + \frac{1}{n} \frac{\sigma n}{\sigma\epsilon}\right)\epsilon + \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\sigma\Lambda}{\sigma T} + \frac{1}{n} \frac{\sigma n}{\sigma T}\right)T \quad (2.2)$$

식 (2.2)에서  $\epsilon$ 는 광섬유에 작용하는 스트레인이고  $T$ 는 온도이다. 스트레인의 미분 계수를  $A$ , 온도의 미분 계수를  $B$ 로 바꾸고 온도에 영향을 받는 스트레인을  $\epsilon(T)$ 라 가정하면,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = A\epsilon(T) + BT \quad (2.3)$$

$\epsilon(T)$ 를 해석하기 위해 테일러 급수를 이차 항까지 사용하면 다음 식과 같다.

$$\epsilon(T) \approx \epsilon_0 + \left(\frac{\sigma\epsilon}{\sigma T}\right)T + \frac{1}{2}\left(\frac{\sigma^2\epsilon}{\sigma T^2}\right)T^2 \quad (2.4)$$

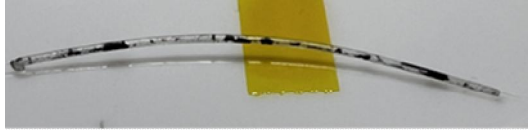
식 (2.4)를 식 (2.3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = A(\epsilon_0 + \epsilon' T + \frac{1}{2}\epsilon'' T^2) + BT \quad (2.5)$$

식 (2.5)를 온도에 대하여 정리하면 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = A\epsilon_0 + (A\epsilon' + B)T + \frac{1}{2}\epsilon''T^2 \quad (2.6)$$

식 (2.6)을 보면 중심 반사 파장의 파장 이동량이 온도에 대하여 이차 다항식으로 정리했고 표 4.2의 방정식이 유도식과 같은 이차 다항식인 것을 확인하였다.



$<0.1 \text{ wt.}\%>$



$<0.2 \text{ wt.}\%>$



$<0.3 \text{ wt.}\%>$



$<0.4 \text{ wt.}\%>$

그림 4.1 질량비에 따라 제작된 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서

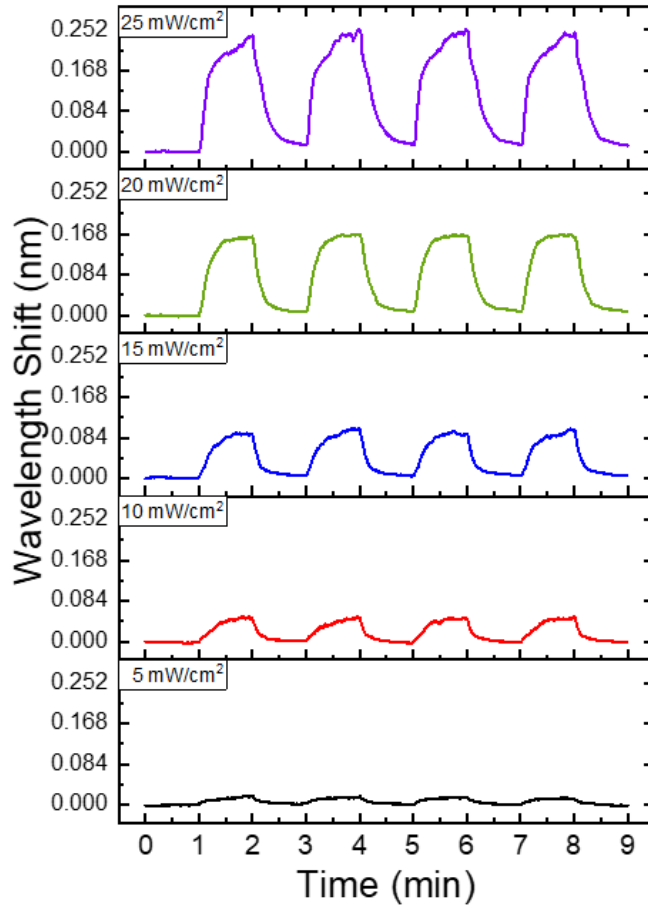


그림 4.2 탄소나노튜브 함유량 0.1 wt.%인 폴리머 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성

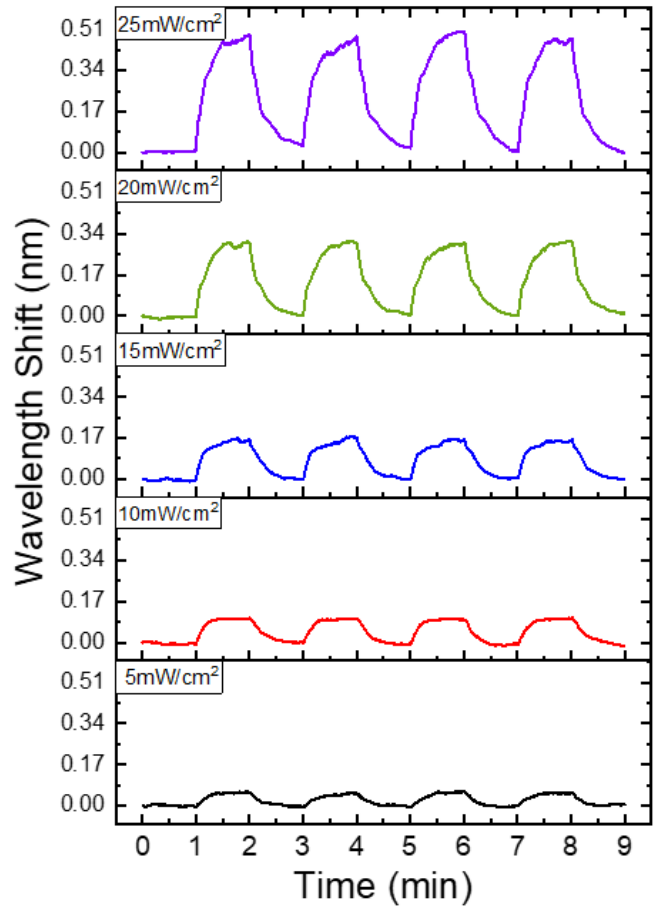


그림 4.3 탄소나노튜브 함유량 0.2 wt.%인 폴리머 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성



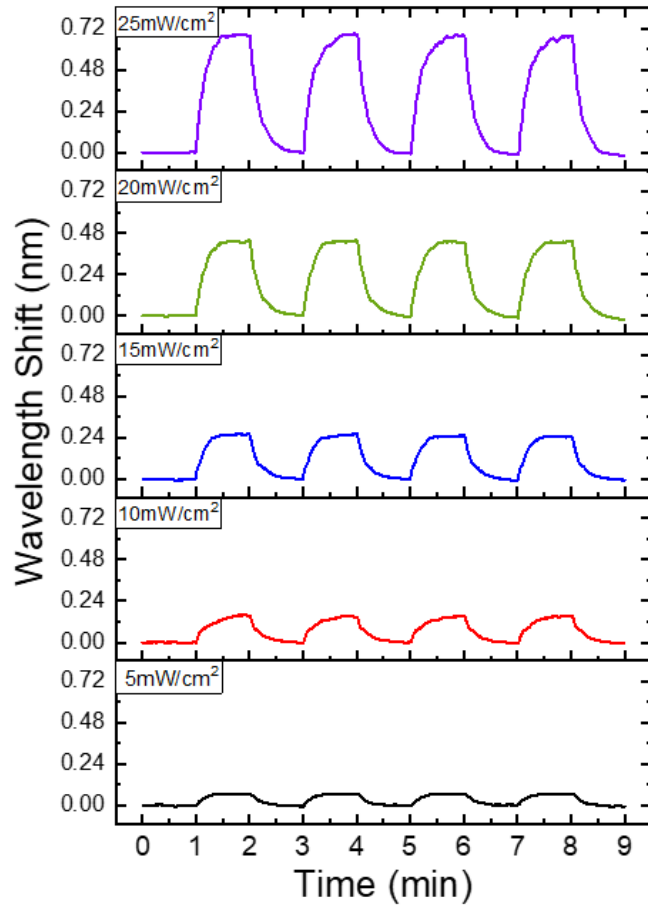


그림 4.3 탄소나노튜브 함유량 0.3 wt.%인 폴리머 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성

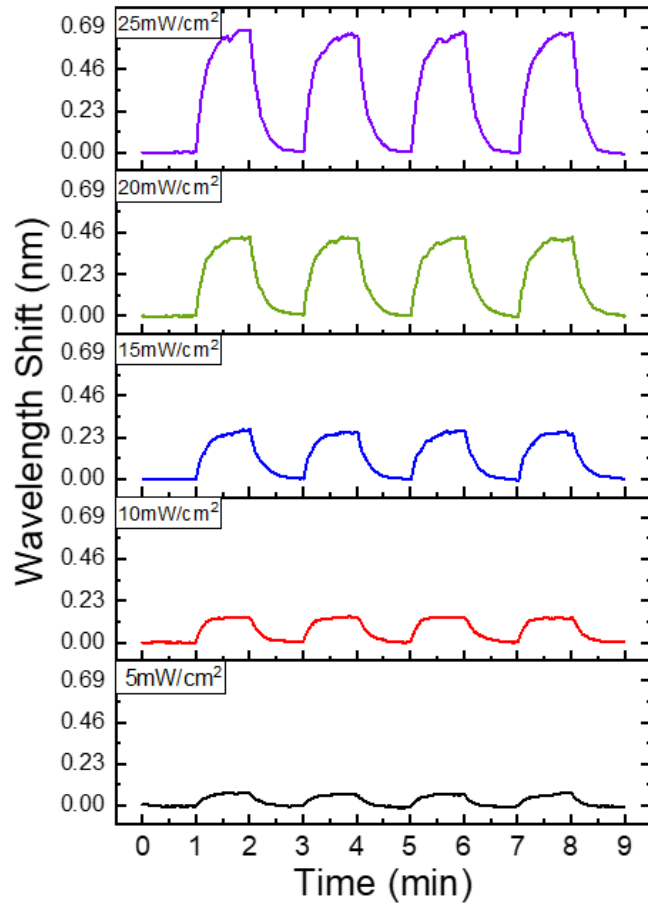


그림 4.4 탄소나노튜브 함유량 0.4 wt.%인 폴리머 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성

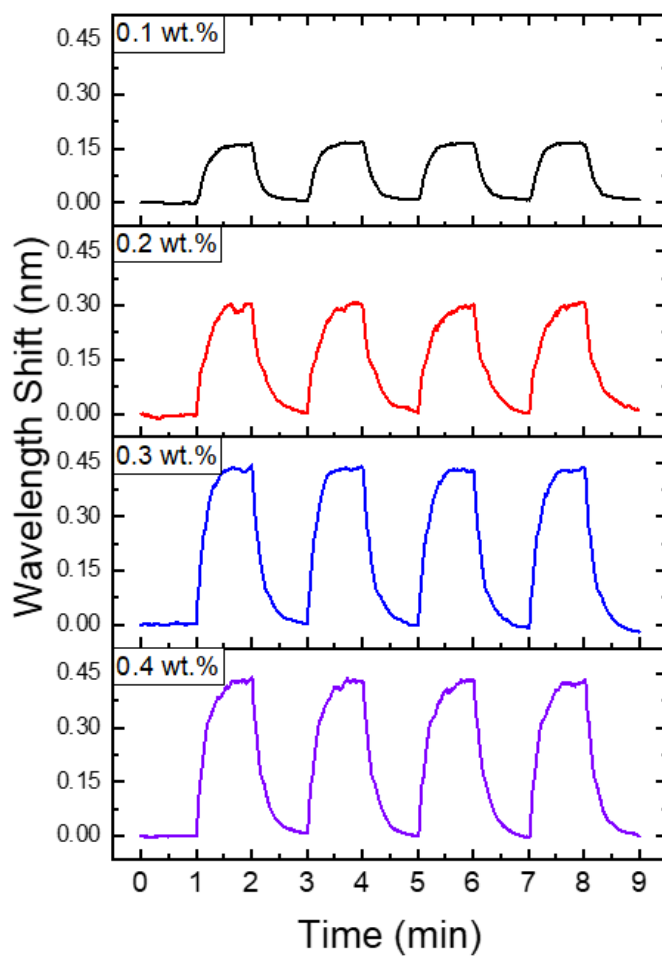


그림 4.5 20mW/cm<sup>2</sup>에서의 탄소나노튜브 함유량별 광 반응성

LED Intensity (mW/cm <sup>2</sup> )	Amount of CNT							
	0.1 wt.%		0.2 wt.%		0.3 wt.%		0.4 wt.%	
	$\Delta\lambda$ (pm)	STD	$\Delta\lambda$ (pm)	STD	$\Delta\lambda$ (pm)	STD	$\Delta\lambda$ (pm)	STD
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	16	0.7	61	1.6	69	1.7	72	2
10	51	0.6	105	2.1	156	1.7	137	2
15	94	1.3	167	4.2	250	3.5	269	3
20	160	1.2	303	1.9	435	4.0	433	1.8
25	237	1.2	464	7.0	688	2.2	662	4.6

표 4.1 탄소나노튜브 함유량별 FBG 센서의 광 반응성 평균과 표준오차 측정 결과

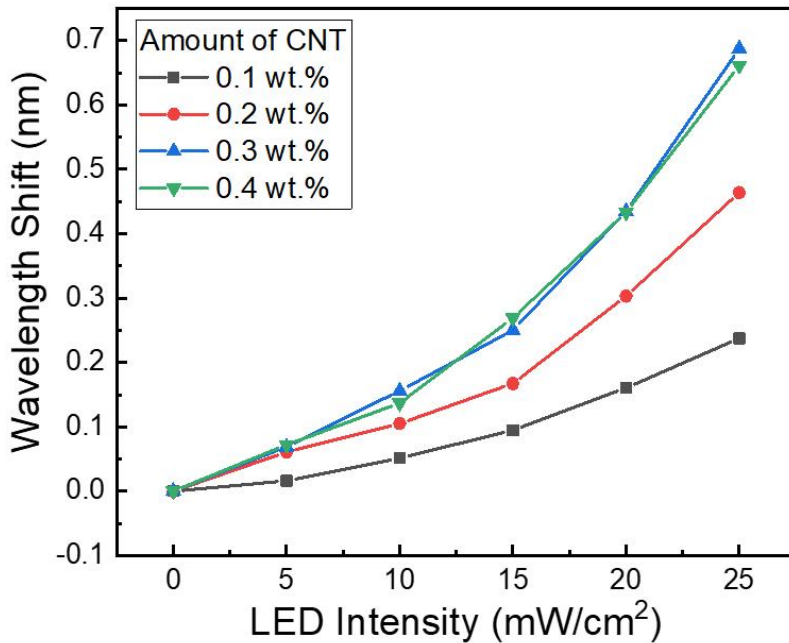


그림 4.6 탄소나노튜브 함유량별 FBG 센서의 광 반응성 평균과 표준오차

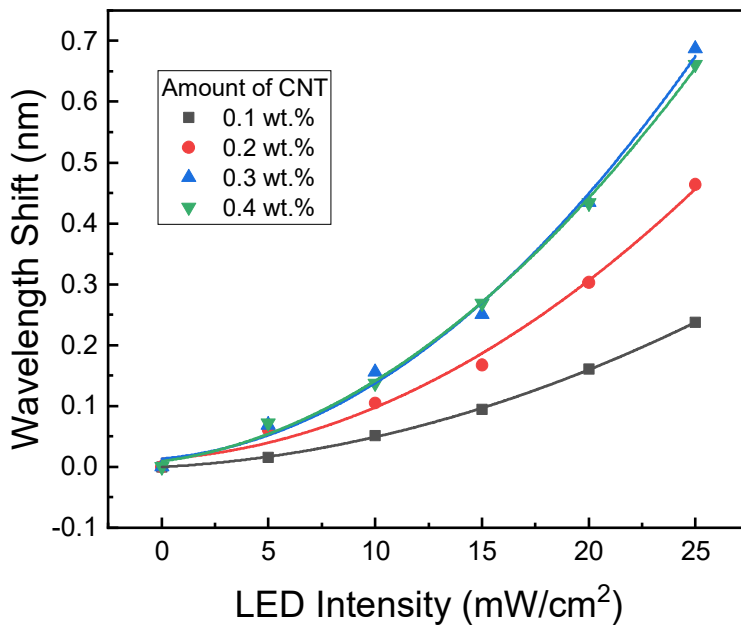


그림 4.8 탄소나노튜브 함유량별 FBG 광센서의 광 반응성 이차 다항식 피팅

Equation	$y = B0 + B1*x^1 + B2*x^2$			
Amount of CNT	0.1 wt.%	0.2 wt.%	0.3 wt.%	0.4 wt.%
B0 (x1E-4)	-1.7	128.8	135.0	91.1
B1 (x1E-4)	18.8	23.0	30.8	48.3
B2 (x1E-4)	3.1	6.2	9.3	8.4
Adj. R-Square	0.99959	0.98774	0.99214	0.99715

표 4.2 탄소나노튜브 함유량별 FBG 광센서의 광 반응성 이차 다항식 피팅

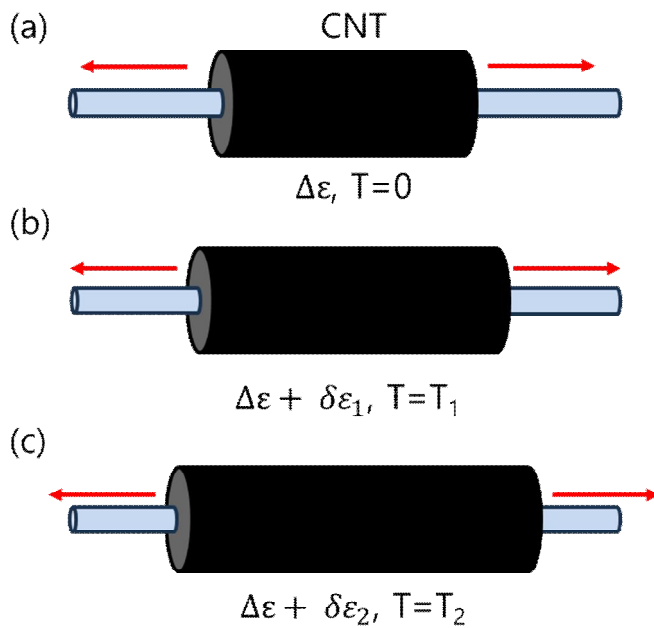


그림 4.9 탄소나노튜브 코팅된 FBG 광센서의 온도에 따른 기계적 동작 (a) 온도가 바뀌지 않을 때 (b) 낮은 광세기 일때의 온도  $T_1$  (c) 높은 광세기에서의 온도  $T_2$

## 제2절 광섬유 직경에 따른 반응성 분석

탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 성능 개선을 위해 사용된 FBG의 직경을 줄이거나 코팅의 두께를 증가시켜 제작하였다. 광섬유의 두께가 80, 125  $\mu\text{m}$ 인 FBG를 사용하여 통상적으로 사용하는 FBG와 광섬유의 두께가 통상적으로 사용하는 FBG보다 얇은 FBG를 사용하여 성능 비교를 진행하였다. 탄소나노튜브 폴리머 코팅 두께의 경우 250, 900  $\mu\text{m}$ 로 제작하여 코팅 두께에 따른 광센서의 민감도를 분석하였다.

[그림 4.10]과 같이 광섬유의 두께가 80  $\mu\text{m}$ 와 125  $\mu\text{m}$ 로 광섬유의 두께가 서로 다른 FBG를 사용하였기 때문에 기존에 사용하던 광섬유 용착 방법으로 광섬유를 용착하게 되면 삽입 손실이 크게 일어나 광센서 하나만을 측정할 때는 문제가 되지 않지만 넓은 지역에서 여러 지점의 광세기를 측정하기 위해 다중 지점에 광센서를 설치하게 되면 삽입 손실로 인하여 반사광이 제대로 측정되지 않을 수 있으므로 삽입 손실을 먼저 최소화하는 광섬유 용착 조건을 탐색하였다. 광섬유는 용착기(Fujikura 41S, Fujikura Inc.)를 사용하여 용착하였는데 [그림 4.11]은 서로 다른 광섬유를 용착하는 과정을 촬영한 사진이다. [그림 4.11 (a)]와 같이 두께가 서로 다른 광섬유의 코어의 Align을 모터를 이용하여 맞춘 후 [그림 4.11 (b)]와 같이 광섬유를 용착하기 위해 모터를 이용하여 순간적으로 광섬유를 가까이 위치시킨 후 플라즈마를 이용하여 광섬유 끝단을 녹여 붙인다. 이 과정이 끝나면 [그림 4.11 (c)]와 같은 형태로 광섬유가 용착된다.

삽입 손실을 최소화하기 위해 여러 가지 조건을 탐색하였는데 그 중 삽입 손실에 가장 큰 영향을 미치는 조건은 플라즈마의 방전량과 광섬유가 플라즈마에 노출되는 방전 시간이다. 방전량은 용착기의 표준에서 bit 단위로 조절하였고 방전 시간은 표준 모드가 2 s로 설정되어 있었고 1 s 단위로 조절하며 최소 삽입 손실을 탐색하였다. 용착기의 방전량을 바꾸어가며 조건을 탐색한 후 방전 시간을 조절하며 최소 삽입 손실 조건을 탐색하였다. 플라즈마 방전량이 너무 적으면 [그림 4.12 (a)]와 같이 광섬유가 충분히 결합하지 못하고 플라즈마의 방전 시간이 너무 길면 [그림 4.12 (b)]와 같이 광섬유 끝부분이 과하게 녹아 오히려 삽입 손실이 감소하였다. 방전량을 표준 +90 bit로 설정하여 광섬유를 용착하였을 때는 [그림 4.12 (c)]와 같은 형태로 용착되었고 삽입 손실을 1.44 dB까지 줄일 수 있었다. [그림 4.12 (d)]

는 표준 방전량 +60 bit의 방전량과 방전 시간을 2 s로 하였을 때의 용착 사진으로 80  $\mu\text{m}$  광섬유 양쪽을 모두 125  $\mu\text{m}$  광섬유와 해당 조건을 하였을 때의 삽입 손실은 1.34 dB으로 최소 삽입 손실 조건을 획득하였다. [표 4.3]은 최소 삽입 손실 조건을 탐색하기 위해 방전량과 방전 시간을 다르게 했을 때의 삽입 손실 측정 데이터이다. [그림 4.13]은 해당 데이터를 토대로 그린 그래프이다. 이후 제작된 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서는 위 조건으로 용착하였다.

광섬유에 적용된 FBG의 직경이 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 민감도에 어떤 영향을 줄 수 있는지 알아보기 위하여 수식적으로 계산해서 미리 알아보고자 한다. 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 동작 원리는 탄소나노튜브에 빛을 조사하면 기계적 동작이 발생하여 FBG에 스트레인이 가해지는데 이는 FBG에 압력의 반대 방향으로 동작하는 것과 같다. FBG의 기본 수식인 식 (2.1)을 압력에 대하여 미분하면<sup>[36]</sup>

$$\frac{\Delta \lambda_p}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n\Lambda)}{n\Lambda} = \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\sigma \Lambda}{\sigma P} + \frac{\sigma}{n} \frac{n}{\sigma P} \right) \Delta P \quad (4.1)$$

식 (4.1)에서 P는 압력,  $\Delta \lambda_p$ 는 압력에 의한 파장 변화를 의미한다. 단일 모드 광섬유에서 적용된 압력으로 인한 광섬유 지름의 변화율은 물리적 길이와 굴절률의 변화에 비해 무시할 수 있을 정도로 작으므로 고려하지 않는다. 또한 직경에 따른 스트레인 변화에 의한 변화만 고려하기 때문에 굴절률도 고려하지 않는다<sup>[36]</sup>.

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = - \frac{(1-2\nu)P}{E} \quad (4.2)$$

물체에 압력이 가해졌을 때 해당 물체의 길이 변화율은 식 (4.2)와 같다.  $\nu$ 는 포아송 비, E는 영률이다. 이를 식 (4.1)에 적용하고  $\lambda_B$ 를 이항하면 다음과 같다<sup>[36]</sup>.

$$\Delta \lambda_p = - \frac{(1-2\nu)\lambda_B}{E} \Delta P \quad (4.3)$$

식 (4.3)에서  $\Delta P$ 는 해당 면적에 가해진 힘이므로 다음과 같이 바꿀 수 있다.



$$\Delta\lambda_p = -\frac{(1-2\nu)\lambda_B}{E} \frac{\Delta F}{\pi R^2} \quad (4.4)$$

위 식에서  $R^2$ 을 제외한 나머지는 상수이므로 결국 광섬유의 직경에 의해 압력에 의한 파장 변화가 결정된다. 광섬유 직경에 따른 광센서의 성능을 확인하기 위함이다. 식 (2.2)에서 스트레인 변화에 의한 중심 반사 파장의 변화 부분을 변형하면 다음과 같다<sup>[36]</sup>.

$$S_\epsilon = \frac{\Delta\lambda_B}{\epsilon} = (1-p_e)\lambda_B \quad (4.5)$$

$S_\epsilon$ 는 센서의 Strain Sensitivity이다. 식 (4.5)를 식 (4.4)에 대입하면

$$S_F = \frac{\Delta\lambda_p}{\Delta F} = \frac{(1-2\nu)\lambda_B}{E(1-P_e)} \frac{S_\epsilon}{\pi R^2} \quad (4.6)$$

$S_F$ 는 센서의 Force Sensitivity이다. 스트레인은 압력과 반대 방향으로 동작하기 때문에 음수 부호가 상쇄되어 제거되었다. 식 (4.6)에 본 연구에서 사용한 광섬유의 직경인 80, 125  $\mu\text{m}$ 를 대입하여 계산하면 80  $\mu\text{m}$  광섬유가 125  $\mu\text{m}$  광섬유에 비해 약 2.44배 더 큰 Force Sensitivity를 가진다.

광섬유 직경과 코팅 두께에 따른 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 반응성을 확인하기 위하여 80  $\mu\text{m}$  FBG에 250  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅, 125  $\mu\text{m}$  FBG에 250  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅, 80  $\mu\text{m}$  FBG에 900  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅, 125  $\mu\text{m}$  FBG에 900  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅을 하여 5~25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 광세기로 5  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 씩 LED의 광세기를 증가시켜 1분간 광센서에 조사한 후 끄는 것을 4회 반복하여 실험을 진행하였다.

위 조건으로 실험을 진행하였을 때 광세기가 각각 5, 10, 15, 20, 25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 에서 125  $\mu\text{m}$ -FBG에 250  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서는 [그림 4.14]와 같고 중심 반사 파장 평균 이동량은 7, 16, 28, 46, 72 pm이고 80  $\mu\text{m}$ -FBG에 250  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서는 [그림 4.15]와 같고 중심 반사 파장이 21, 39, 59, 97, 151 pm 이동하였다. 125  $\mu\text{m}$ -FBG에 900  $\mu\text{m}$  두

껍데기의 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서는 [그림 4.16]와 같고 중심 반사 파장이 18, 39, 67, 120, 200 pm 이동하였고 80  $\mu\text{m}$ -FBG에 900  $\mu\text{m}$  두께의 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서는 [그림 4.17]와 같고 중심 반사 파장이 61, 134, 229, 388, 587 pm 이동하였다. 광섬유 두께와 코팅 두께가 다른 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 광세기에 따른 중심 반사 파장 이동량을 [그림 4.18]에 정리하였다. [그림 4.19]는 광섬유 두께와 코팅 두께에 따른 광센서의 반응을 단위 광세기에 대한 중심 파장 이동량( $\text{pm}/\text{mW}/\text{cm}^2$ )으로 정리한 것이다. 광섬유 직경에 따라서는 80  $\mu\text{m}$ -FBG가 125  $\mu\text{m}$ -FBG에 비하여 약 2.1 ~ 2.94배 민감도가 좋은 것을 확인할 수 있었고 코팅 두께에 따라서는 900  $\mu\text{m}$  두께로 코팅한 광센서가 250  $\mu\text{m}$ 보다 약 2.78 ~ 3.89배 민감도가 좋은 것을 확인할 수 있었다. 광섬유 직경에 따른 민감도의 차이가 이론적으로 계산하였을 때는 2.44배 민감도가 좋아야 하지만 실험 결과 값이 다른 이유는 코팅의 유무와 두께에 따른 영향이 존재하기 때문이다. [그림 4.20]은 광섬유 직경과 코팅 두께에 따른 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서의 반응시간을 측정한 데이터이다. 반응 속도가 3.7 초이고 회복 속도가 3.44초로 탄소나노튜브 폴리머 두께가 250  $\mu\text{m}$ 이고 FBG의 직경이 80  $\mu\text{m}$ 인 광센서가 가장 빨랐다. 광섬유의 직경과 폴리머의 두께가 광센서의 반응시간과 회복 시간에도 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

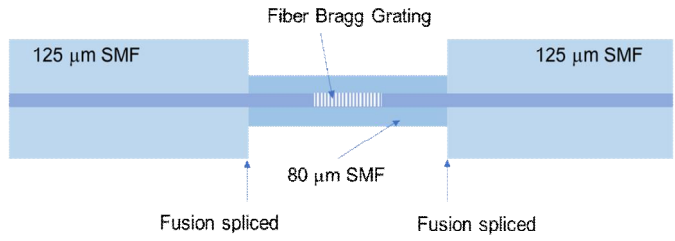


그림 4.10 80  $\mu\text{m}$ 와 125  $\mu\text{m}$  두께의 광섬유 융착 모식도

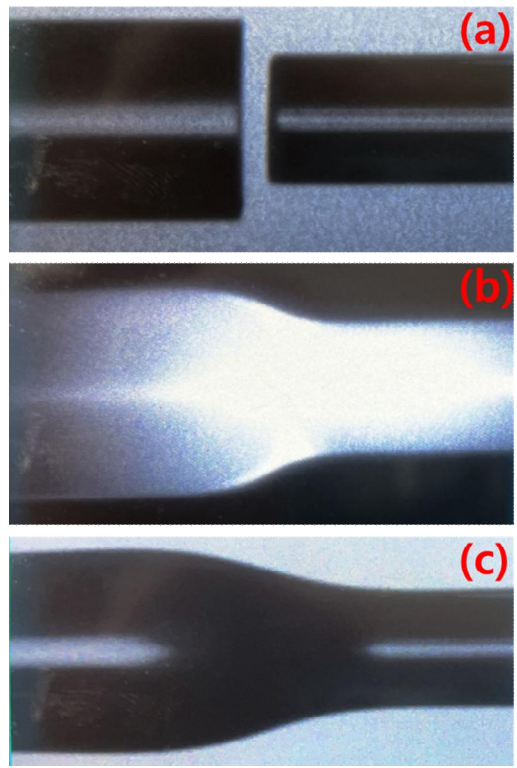
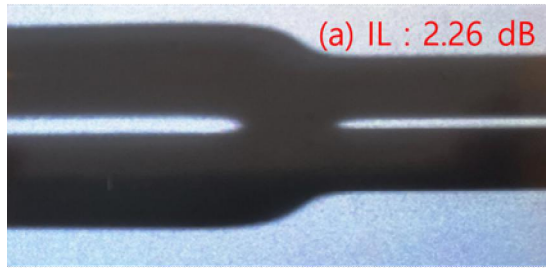
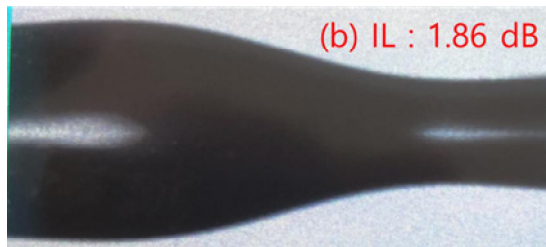


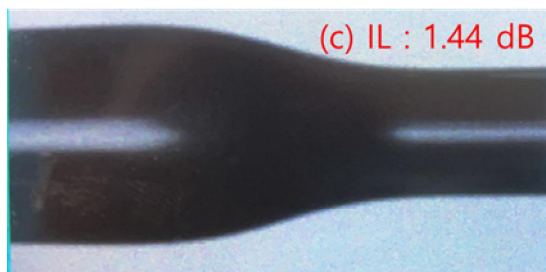
그림 4.11 80, 125  $\mu\text{m}$  광섬유 융착 과정 사진 (a)광섬유 융착 전 모터를 이용하여 코어를 가운데에 배치, (b) 플라즈마를 사용하여 80, 125  $\mu\text{m}$  광섬유를 융착, (c) 융착 완료된 80, 125  $\mu\text{m}$  광섬유



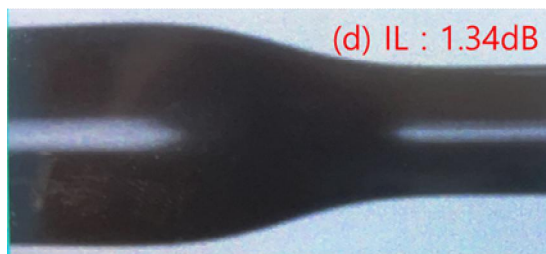
<광세기 : 표준 -60 bit, 방전시간: 2 s>



<광세기 : 표준 +60 bit, 방전시간: 4 s>



<광세기 : 표준 +90 bit, 방전시간: 2 s>



<광세기 : 표준 +60 bit, 방전시간: 2 s>

그림 4.12 용착기의 플라즈마 방전량과 방전 시간에 따른 광섬유 용착 이후 광섬유 사진

방전량 (표준 bit)	방전 시간 (s)	출력 광세기 (mW)	삽입 손실 (dB)
-60	2	0.594	2.26
-30	2	0.653	1.85
0	2	0.689	1.62
+30	2	0.716	1.45
+60	2	0.735	1.34
+90	2	0.717	1.44
+60	1	0.721	1.42
+60	2	0.735	1.34
+60	3	0.710	1.48
+60	4	0.652	1.86

표 4.3 용착기의 방전량과 방전 시간에 따른 광섬유의 삽입 손실

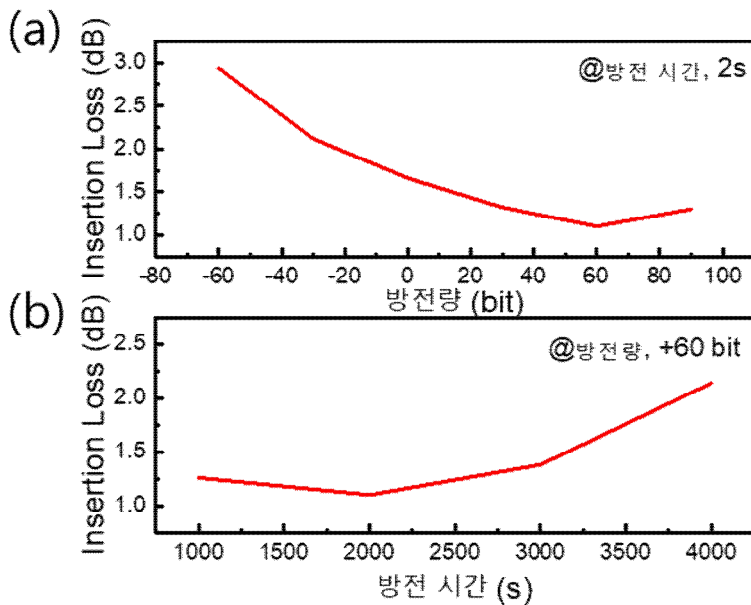


그림 4.13 광섬유 용착 삽입손실 (a) 방전 시간을 2 s로 고정한 후 방전량에 따른 삽입 손실 측정, (b) 방전량을 +60 bit로 고정한 후 방전 시간에 따른 삽입 손실 측정

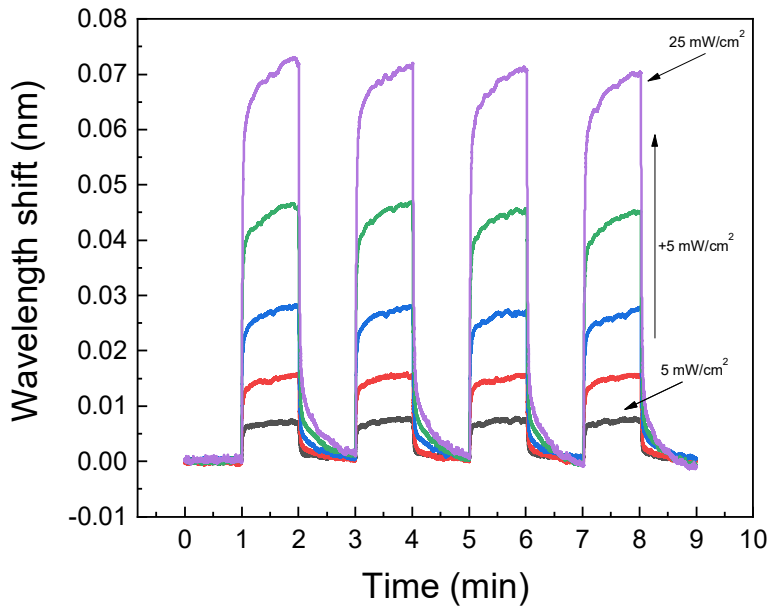


그림 4.14 탄소나노튜브 폴리머가 250 μm 두께로 코팅된 125 μm-FBG의 광 반응성

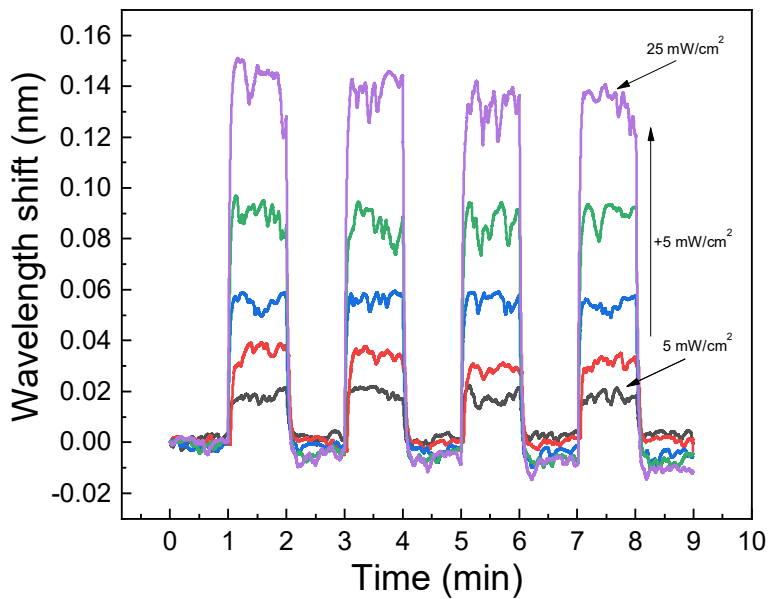


그림 4.15 탄소나노튜브 폴리머가 250 μm 두께로 코팅된 80 μm-FBG의 광 반응성

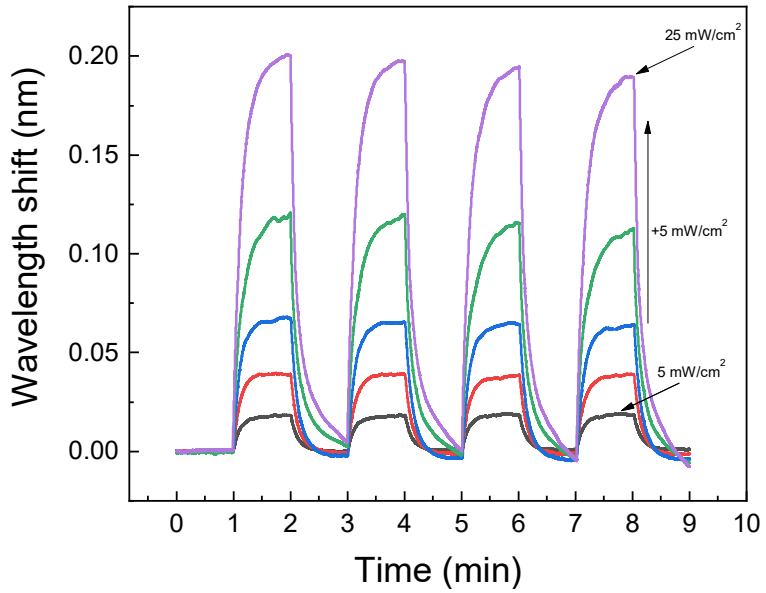


그림 4.16 탄소나노튜브 폴리머가 900  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 125  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성

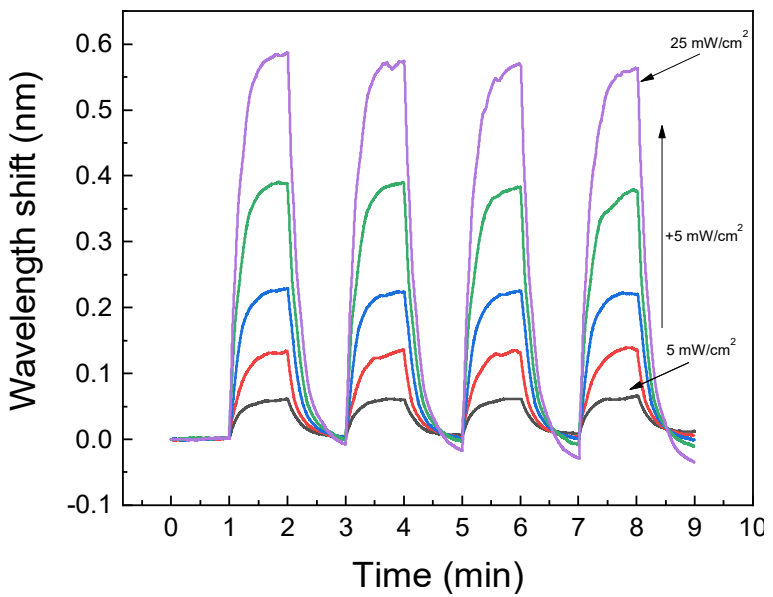


그림 4.17 탄소나노튜브 폴리머가 900  $\mu\text{m}$  두께로 코팅된 80  $\mu\text{m}$ -FBG의 광 반응성

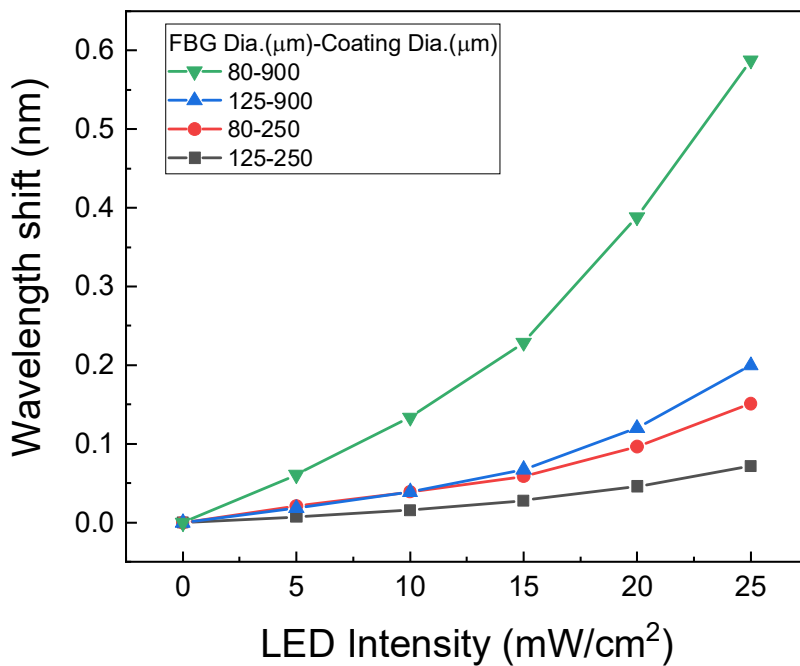


그림 4.18 탄소나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 광 반응성 평균

	Light Sensitivity (pm/mW/cm <sup>2</sup> )		Ratio D/C
	Coating Dia. C (250 μm)	Coating Dia. D (900 μm)	
FBG Dia. A (80 μm)	6.04	23.48	<b>3.89</b>
FBG Dia. B (125 μm)	2.87	7.98	<b>2.78</b>
Ratio A/B	<b>2.10</b>	<b>2.94</b>	

표4.4 탄소 나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 단위 광세기에서의 광 반응성 비교



Diameter of FBG (μm)	80		125	
Diameter of Coating Mold (μm)	250	900	250	900
Rising Time (s)	3.7	20.96	16.16	22.3
Falling Time (s)	3.44	23.58	13.8	30.6

표 4.5 탄소나노튜브 폴리머 두께와 FBG 직경별 광센서의 반응시간 및 회복시간

## 제4장 결론

기존의 선행 연구를 통해 탄소나노튜브를 이용한 광센서의 많은 연구가 이루어졌다. 광을 제외한 삶을 인간의 삶에서 생각할 수 없기에 광센서는 필수적인 센서이다. 최근에 CVD 공정을 통하여 FBG에 증착한 광센서가 선행연구를 통하여 개발되었으나 CVD 공정은 복잡한 공정 과정과 비용이 많이 든다는 단점이 존재한다. 이 때문에 광을 탄소나노튜브를 이용하여 감지하고 공정이 단순하며 비용이 적게 드는 연구가 필요했다.

본 연구는 탄소나노튜브를 아크릴레이트 폴리머와 교반하고 FBG에 코팅하여 광을 감지하는 새로운 방식의 광센서를 제작하였다. 제작한 탄소나노튜브 폴리머 코팅된 FBG 광센서가 광을 감지하여 동작하는 것을 확인하기 위하여 가시광 영역의 빛을 방출하는 LED를 사용하여 가시광 영역에서 실험을 진행하였다. 실험을 진행한 결과 광섬유 직경이 125  $\mu\text{m}$ 인 FBG에 900  $\mu\text{m}$ 두께로 탄소나노튜브 폴리머를 코팅한 광센서는 25  $\text{mW}/\text{cm}^2$ 의 광세기에서 FBG의 중심 파장이 최대 0.32 nm 장파장 방향으로 이동하였고 광섬유 직경이 80  $\mu\text{m}$ 인 FBG에 900  $\mu\text{m}$ 두께로 탄소나노튜브 폴리머를 코팅한 광센서는 최대 0.58 nm의 중심 파장 이동을 확인하였다. 특정 파장에서의 탄소나노튜브의 광 흡수를 측정하여 확인하였고 365, 465, 620 nm 파장의 빛에서 단위 광세기에 대한 중심 파장 이동량이 약 18, 12.4, 9.5 pm임을 확인하였다. 탄소나노튜브와 아크릴레이트 폴리머의 최적 질량백분율을 구하여 0.3 wt.% 일 때 센서의 반응성이 가장 좋은 것을 확인하고 제작된 광센서의 반응성이 탄소나노튜브의 광열 효과로 인한 비선형적 그래프를 나타내는 것을 확인하였다. 직경이 80  $\mu\text{m}$ 인 광섬유와 125  $\mu\text{m}$ 인 광섬유 용착 시의 삽입 손실을 최소화하여 센서의 성능을 개선하기 위해 실험을 진행하였고 사용된 용착기에서 최적 조건이 방전량 +60 bit, 방전 시간 2초일 때 가장 삽입 손실이 적은 것을 확인하여 센서 시스템에 적용하였다. 이론적으로 광섬유 직경에 따른 스트레인에 대한 민감도를 계산한 이론값과 비교하기 위해 광섬유의 직경이 80  $\mu\text{m}$ 인 광섬유와 125  $\mu\text{m}$ 인 광섬유를 사용하여 광센서를 제작하였을 때 각 센서의 광세기에 따른 반응성을 실험을 통해 중심 파장 이동량을 측정하여 실제 민감도의 차이를 확인하였다. 이론값과 실험값이 일치하지 않은 이유는 탄소나노튜브 코팅의 유무와 두께의 차이에 영향을 받아

차이가 나는 것으로 예상된다. 광섬유 직경과 코팅된 폴리머의 두께에 따라 광센서의 반응 시간과 회복 시간의 차이를 실험을 통해 확인하였다. 광섬유 직경이 커질수록 폴리머가 두꺼울수록 반응시간과 회복 시간이 길어졌다. 향후 편광 방향과 광섬유에 가해진 스트레인에 의해 광센서의 민감도를 향상시켜 더 높은 민감도를 지닌 센서를 연구할 계획이다.

## 참고문헌

- [1] Pendão, C. Silva, I. Optical Fiber Sensors and Sensing Networks: Overview of the Main Principles and Applications. *Sensors*, Vol.22, 7554 (2022).
- [2] D. S. Montero, C. Vazquez, I. Mollers, J. Arrue and D. Jager, A Self-Referencing Intensity Based Polymer Optical Fiber Sensor for Liquid Detection, *Sensors*, Vol.9, 6446-6455 (2009)
- [3] J. Wang, W. Zhao, H. Xiao, A. Wang, Self-Calibrated Interferometric/Intensity-Based Optical Fiber Sensors, *Sensors and Controls for Manufacturing*, Vol.3201, 20-26 (1998)
- [4] L. Li, L. Xie and D. Liu, All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications, *Optics Express*, Vol.20, 19, 11109-11120 (2012)
- [5] C. Chang, J. Sirkis, Multiplexed optical fiber sensors using a single Fabry-Perot resonator for phase modulation, *Journal of Light Technology*, Vol 14, 7, 1653-1663 (1996)
- [6] J. Kumar, et al., Distributed fiber Bragg grating sensor for multipoint temperature monitoring up to 500°C in high-electromagnetic interference environment, *Optical Engineering*, Vol 55(9), 090502-1-4 (2016)
- [7] X. Lei, X. Dong, C. Lu, T. Sun, K. T. V. Grattan, Underwater Pressure and Temperature Sensor Based on a Special Dual-Mode Optical Fiber, *IEEE Access*, Vol.8, 146463-146471 (2020)
- [8] S. J. Milhailob “Fiber Bragg Grating Sensors for Harsh Environments”, *Sensors*, 12(2), 1898-1918(2012)
- [9] [https://science.nasa.gov/ems/09\\_visiblelight/](https://science.nasa.gov/ems/09_visiblelight/)
- [10] Hang-Eun Joe, et al., A Review on Optical Fiber Sensors for Environmental Monitoring, *I.J.P.E.M.G.T.*, Vol.5, 1, 173-191 (2018)
- [11] <https://www.britannica.com/science/light>
- [12] [www.thorlabs.com](http://www.thorlabs.com)
- [13] <https://fsenz.com/fsenz-product/fiber-bragg-grating-based-sensing/>
- [14] Samuoliene, G., Brazaityte, A., Sirtautas, R., Novickovas, A., Duchovskis, P.,

The effect of supplementary led lighting on the antioxidant and nutritional properties of lettuce. *Acta Hort.* Vol. 952, 835 - 841.(2012)

[15] Y. Hsieh, Y. Ho, Y. Wang, “Illumination of different light wavelengths on growth performance and physiological response of juvenile sweetfish, *Plecoglossus altivelis*”, *Aquaculture Reports* Volume 30, 101569(2023)

[16] S. M. Noureldin, A. M. Diab, A. S. Salah, R. A. Mohamed, “Effect of different monochromatic LED light colors on growth performance, behavior, immune-physiological responses of gold fish, *Carassius auratus*”, *Aquaculture*, Vol 538, 736532(2021)

[17] S Javed, L Issaoui, S Cho, H Chun, “Utilization of led grow lights for optical wireless communication-based rf-free smart-farming system”, *Sensors* Vol. 21(20), 6833 (2021)

[18] Custódio, M., Cartaxana, P., Villasante, S., Calado, R., & Lillebø, A. I., “LED Lighting and High-Density Planting Enhance the Cost-Efficiency of *Halimione Portulacoides* Extraction Units for Integrated Aquaculture.”, *Applied Sciences*, 11(11), 4995. (2021).

[19] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki, “Photosensitivity in optical fiber waveguides Application to reflection filter fabrication”, *Appl. Phys. Lett.* 32, 647-649 (1978)

[20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations)

[21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber\\_Bragg\\_grating](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating)

[22] H. Liu, Z. Zhu, Y. Zheng, B. Liu, F. Xiao, “Experimental study on an FBG strain sensor”, *Optical Fiber Technology*, 40, 144 - 151 (2018)

[23] S. C. Tjin, J. Hao, Y. Lam, Y. C. Ho, B. K. Ng. “A Pressure Sensor Using Fiber Bragg Grating.” *Fiber and Integrated Optics*, 20(1), 59 - 69 (2001).

[24] S. Iijima, “Helical microtube of graphitic carbon”, *Nature* 354, 56-58(1991)

[25] <https://en.wikipedia.org/wiki/Fullerene>

[26] D. K. Sharma, G. Purohit, “Nature Inspired Solar PV Panel Tracking Using Sunflower Based Heliotropism”, *WCPEC-6*, Kyoto, Japan.

[27] Li, Y., Kaneko, T., Miyanaga, S., & Hatakeyama, R. “Synthesis and Property Characterization of C69N Azafullerene Encapsulated Single-Walled

Carbon Nanotubes.”, ACS Nano, 4(6), 3522 - 3526. (2010).

[28] Chen J, Perebeinos V, Freitag M, Tsang J, Fu Q, Liu J, Avouris P, . "Bright infrared emission from electrically induced excitons in carbon nanotubes". Science. 310 (5751): 1171 - 1174 (2005)

[29] Freitag, M., Martin, Y., Misewich, J. A., Martel, R., & Avouris, P. "Photoconductivity of Single Carbon Nanotubes.", Nano Letters, 3(8), 1067 - 1071. (2003).

[30] Noyce, S. G., Doherty, J. L., Cheng, Z., Han, H., Bowen, S., & Franklin, A. D. "Electronic Stability of Carbon Nanotube Transistors Under Long-term Bias Stress.", Nano Letters, Vol 19, 1460-1466 (2019).

[31] Tan, C. W., Tan, K. H., Ong, Y. T., Mohamed, A. R., Zein, S. H. S., & Tan, S. H. "Energy and environmental applications of carbon nanotubes.", Environmental Chemistry Letters, 10(3), 265 - 273. (2012).

[32] Shao, N., Wickstrom, E., & Panchapakesan, B. "Nanotube - antibody biosensor arrays for the detection of circulating breast cancer cells.", Nanotechnology, 19(46), 465101. (2008).

[33] Zhang, Y., & Iijima, S. "Elastic Response of Carbon Nanotube Bundles to Visible Light.", Physical Review Letters, 82(17), 3472 - 3475. (1999).

[34] Lu, S., & Panchapakesan, B. "Optically driven nanotube actuators.", Nanotechnology, 16(11), 2548 - 2554. (2005).

[35] Shivananju, B. N., Asokan, S., & Misra, A. "Study on effect of optical wavelength on photo induced strain sensitivity in carbon nanotubes using fiber Bragg grating.", Journal of Physics D: Applied Physics, 48(27), 275502. (2015).

[36] Rajan, G., Liu, B., Luo, Y., Ambikairajah, E., & Peng, G.-D. "High Sensitivity Force and Pressure Measurements Using Etched Singlemode Polymer Fiber Bragg Gratings.", IEEE Sensors Journal, 13(5), 1794 - 1800. (2013).

## [감사의 글]

학부 시절부터 4년이 약간 넘는 시간 동안 실험실 생활하며 너무나도 많은 도움을 받아 이 글을 빌어 감사 인사를 전하려 합니다.

무엇보다 먼저 지도 교수님이신 안태정 교수님께 감사 인사를 드립니다. 학부 시절 2학년 2학기라는 이른 시기에 실험실로 인도하여 연구가 무엇인지 어떻게 해야 하는지에 대하여 늘 항상 알려주시고 도와주셨습니다. 4년 동안 가르치시면서 참 많이 답답하셨을 텐데 끝까지 이끌어 주셔서 다시 한번 감사하다는 말씀을 드리고 싶습니다. 학과 교수님들께도 감사 인사드립니다. 늘 인사를 잘 받아주시는 김진태 교수님, 항상 걱정하고 염려해주시는 김현수 교수님, 더욱 열심히 하라고 말씀하시는 박종락 교수님, 늘 항상 웃으시며 도움이 필요하면 이것저것 알려주시고 도와주시던 권민기 교수님, 늘 열의를 가지고 가르쳐주신 주기남 교수님께 감사드립니다.

4년간 실험실 생활하는 동안 많은 걸 알려준 종주형, 영민이에게도 감사합니다. 덕분에 실험실 생활 즐겁게 잘 보낼 수 있었습니다. 늘 항상 밝고 많은 부분에서 저를 도와주려 애쓴 한مام에게도 감사 인사를 전합니다. 학부 때 1년 늦게 복학해 한 학년 늦게 대학원 생활을 시작하였지만 어려워하지 않고 친근하게 다가와준 학부 후배이자 대학원 동기인 승태, 해혁, 용원, 현식, 종규, 민관, 진희, 민석, 그리고 대학원 후배들에게도 감사합니다. 우연이 인연으로 될 수 있게 먼저 다가와 실험실 생활에 많은 응원해준 신소재 공학과 경빈형, 주희누나, 창민이에게도 감사 인사를 전합니다. 고민을 들어주고 도와준 물리과 혜준형, 승석형, 현성이에게도 감사 인사를 전합니다.

고등학교 때부터 오랫동안 어울려준 현호, 준철, 영준, 석준, 경엽, 승완, 현우에게도 감사를 전합니다. 대학교부터 어울렸지만 어릴적부터 친구인것 같은 상규형, 정환, 문규, 동혁, 승혁, 준석, 원이, 늘 고마운 재신이에게도 감사를 전합니다. 후배지만 친구같은 은아, 혜진에게도 감사합니다.

마지막으로 가장 소중하고 가장 많은 응원을 보내주신 가족에게 감사의 인사를 드립니다. 늘 항상 건강 걱정해주시는 할머니, 묵묵히 응원 보내주시고 따뜻한 말씀 해주신 아버지, 물심양면으로 도와주시는 어머니, 친구처럼 든든한 석민이, 귀여움을 담당하는 막내 창민이. 덕분에 졸업까지 달려왔습니다. 감사합니다.