

2014년 2월  
석사학위 논문

평판형 광도파로 마하젠더 간섭계에  
폴리비닐피롤리돈이 코팅된  
습도센서에 관한 연구

조선대학교 대학원

물리학과

김주하

평판형 광도파로 마하젠더 간섭계에  
폴리비닐피롤리돈이 코팅된  
습도센서에 관한 연구

A study on humidity sensor coated by polyvinylpyrrolidone on  
Mach-Zehnder interferometer in planar lightwave circuit

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

물리학과

김주하

평판형 광도파로 마하젠더 간섭계에  
폴리비닐피롤리돈이 코팅된  
습도센서에 관한 연구

지도교수 최 은 서

이 논문을 이학 석사학위신청 논문으로 제출함

2013년 10월

조선대학교 대학원

물 리 학 과

김 주 하

# 김주하의 이학 석사학위논문을 인준함

위원장                      조선대학교 교수                      신용진(인)

위 원                      한국광기술원 연구원                      김명진(인)

위 원                      조선대학교 교수                      최은서(인)

2013년 11월

조선대학교 대학원

# 목 차

## ABSTRACT

제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 이론적 배경 .....	3
제 1 절 습도센서 .....	3
1. 습도 정의 .....	3
2. 습도센서 종류 .....	5
제 2 절 마하젠더 간섭계 .....	10
제 3 절 폴리비닐피롤리돈 구조 및 특성 .....	14
제 4 절 평판형 광도파로 이론 .....	18
제 3 장 실험 .....	25
제 1 절 MZI PLC 센서 모듈 제작 .....	25
제 2 절 경화 조건에 따른 스펙트럼 측정 .....	29
제 3 절 온·습도 변화에 따른 스펙트럼 측정 .....	34
1. 온도변화에 따른 스펙트럼 측정 .....	34
2. 습도변화에 따른 스펙트럼 측정 .....	45
제 4 장 결과 및 고찰 .....	55
제 1 절 경화 조건에 따른 스펙트럼 측정 결과 분석 .....	55
제 2 절 온·습도 변화에 따른 스펙트럼 측정 결과 분석 .....	56
제 5 장 결 론 .....	59
참고문헌 .....	61

# List of Figures

그림 2-1. 마이켈슨 간섭계 구조도 .....	10
그림 2-2. 패브리-페롯 간섭계 구조도 .....	11
그림 2-3. 사그낙 간섭계 구조도 .....	11
그림 2-4. 마하젠더 간섭계 구조도 .....	12
그림 2-5. 폴리비닐피롤리돈의 화학적 구조와 응용제품들 .....	14
그림 2-6. 폴리비닐피롤리돈의 라디칼 중합 도식도 .....	16
그림 2-7. 광도파로 개념도 .....	18
그림 2-8. 평면도파로의 구조 .....	19
그림 3-1. MZI PLC 제조 공정도 .....	26
그림 3-2. PLC에 만들어진 MZI 개요도 .....	27
그림 3-3. 제작된 MZI PLC 센서 단면도 .....	28
그림 3-4. 제작된 MZI PLC 센서 모듈 사진 .....	28
그림 3-5. 제작된 MZI PLC 센서 모듈 실험 개략도 .....	29

그림 3-6. (a) 자연경화 조건(온도 25℃, 상대습도60%)에서 상대습도에 따른  
투과 스펙트럼(상대습도 20 ~ 70%, 온도 25℃ 고정)

(b) 항온항습 경화 조건(온도 30℃, 상대습도20%)에서 상대습도에 따른  
투과 스펙트럼(상대습도 20 ~ 80%, 온도 25℃ 고정)

(c) 항온항습 경화 조건(온도 30℃, 상대습도20%)에서 상대습도에 따른  
투과 스펙트럼(상대습도 80 ~ 90%, 온도 25℃ 고정)

.....32

그림 3-7. 상대습도에 따른 광세기 측정 값(항온항습경화조건에서 제작된  
습도센서 이용, 온도 25℃ 고정) .....33

그림 3-8. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 20% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 20% 고정) .....36

그림 3-9. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 30% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 30% 고정) .....37

그림 3-10. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 40% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 40% 고정) .....38

그림 3-11. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 50% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 50% 고정) .....39

그림 3-12. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 60% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 60% 고정) .....40

그림 3-13. (a) 온도변화(30~80℃)에 따른 투과 스펙트럼 (상대습도 70% 고정)

(b) 온도변화(30~80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 70% 고정) .....41

그림 3-14. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 30℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 30℃ 고정) .....46

그림 3-15. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 40℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 40℃ 고정) .....47

그림 3-16. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 50℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 50℃ 고정) .....48

그림 3-17. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 60℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 60℃ 고정) .....49

그림 3-18. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 70℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 70℃ 고정) .....50

그림 3-19. (a) 상대습도변화(20~70%)에 따른 투과 스펙트럼 (온도 80℃ 고정)  
 (b) 상대습도변화(20~70%)에 따른 파장 변화 (온도 80℃ 고정) .....51

그림 3-19. (a) 온도 변화에 대한 파장 변이(상대습도 20% 고정)  
 (b) 온도 변화에 대한 파장 변이(상대습도 70% 고정) .....57

그림 3-20. (a) 상대습도 변화에 대한 파장 변이(온도 40℃ 고정)  
 (b) 상대습도 변화에 대한 파장 변이(온도 60℃ 고정) .....58

## List of Tables

표 2-1. 전자식 습도센서의 종류 .....	7
표 2-2. 광섬유 센서의 종류 .....	8
표 3-1. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 20% 고정) .....	42
표 3-2. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 30% 고정) .....	42
표 3-3. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 40% 고정) .....	43
표 3-4. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 50% 고정) .....	43
표 3-5. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 60% 고정) .....	44
표 3-6. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 70% 고정) .....	44
표 3-7. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 30℃ 고정) .....	52
표 3-8. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 40℃ 고정) .....	52
표 3-9. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 50℃ 고정) .....	53
표 3-10. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 60℃ 고정) .....	53
표 3-11. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 70℃ 고정) .....	54
표 3-12. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 80℃ 고정) .....	54

## ABSTRACT

### A study on humidity sensor coated by polyvinylpyrrolidone on Mach-Zehnder interferometer in planar lightwave circuit

Ju Ha Kim

Advisor : Prof. Eun Seo Choi, Ph.D.

Department of Physics

Graduate School of Chosun University

In this paper, a humidity sensor implemented by Mach-Zehnder interferometer(MZI) in a planar lightwave circuit(PLC) have been demonstrated. Firstly, waveguide channels for MZI was made in a PLC by using photo resist patterning process. One of arms of MZI, which is called by sensing arm, was etched. The length of the etched region is 5 mm, where polyvinylpyrrolidone(PVP) was coated by dip-coating. The PVP interacts to surrounding humidity and results change of refractive index value depending on the degree of relative humidity(RH). As a consequence, variation on effective refractive index of sensing arm in the PVP-coated MZI presented modification of the interferogram in intensity and peak wavelengths depending on the RH around the PLC. The measured results have showed that the proposed humidity sensor works successfully at RH environment ranging 40% to 80%.

# 제1장 서론

습도센서는 공기 중의 수분에 관련된 물리·화학적 현상을 이용하여 습도를 검출하기 위해 사용되는 센서를 말한다. 습도의 변화를 관측하고 이를 피드백 하여 활용하는 응용 분야는 매우 다양화되고 있다. 음식물의 가공처리 조건 최적화 과정, 화학 공정에서 혼합물의 온도 변화의 감지계측, 건축물의 기초 공사 시 내구성의 변화요인을 분석, 농작물 재배과정에서 작물의 성장 차이에 관한 연구등과 같은 전문분야에서 정확한 습도 계측의 중요성은 날로 증가되고 있다. 동시에 응용 분야별로 상대습도의 재현성 있는 안정적인 모니터링이 요구되고 있다. 습도의 계측에 있어서는 습도 변화에 대한 응답성, 반응 감도, 선형성 등이 가장 중요한 특성으로 언급되고 있으며, 이러한 특성을 향상시키기 위한 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

전자식 습도센서는 크게 고분자 습도센서와, 세라믹 습도센서로 크게 나눌 수 있다. 고분자 습도센서는 유기고분자를 습도감지물질로 사용하고, 세라믹 습도센서는 전기적 특성이 변화하는 습도감지물질에 다공질 세라믹스를 사용한다. 이러한 전자식 습도센서는 소자의 가격이 싸고, 소형화가 가능하며, 응답속도가 빠르다는 장점을 가지지만, 고온·고습에서 안정한 특성을 얻기 어렵고, 알코올 같은 유기용제에 약하며, 전자기적 간섭에 취약하다는 단점을 가지고 있다.

전기적 신호를 이용한 전자식 습도센서와는 달리 광섬유 습도센서는 전자기적 간섭에 강하고, 소형이며 높은 감도와 원거리 측정이 가능한 장점을 가지며, 다채널화를 손쉽게 구현할 수 있는 등의 장점을 가진다. 또한 낮은 삽입 손실 그리고 높은 기계적인 신뢰성 등의 장점을 가지고 있어 다양한 계측 분야에서 전자식 습도센서의 대안으로 광섬유 습도센서가 현재까지 연구되고 있다. 하지만 광섬유 센서는 사용 종류에 따른 민감성의 저하 내지는 응용범위의 제한성 그리고 온도의 의존성 문제와 2차 코팅으로 인한 추가 공정의 필요성과 같은 문제들을 가지고 있다. 그래서 이러한 광섬유 습

도센서의 연구는 주로 광섬유의 형태나 센싱 구조 등을 변화시켜 습도센서의 특징을 향상시키는데 집중되어 있었다.[1-10]

이에 비해서, 평판형 광도파로(planar lightwave circuit, PLC) 기반 광센서는 잘 정립된 반도체 공정으로 제조되므로 대량생산이 가능하고 취급하기 쉬운 장점을 가진다.[11-13] 또한, PLC 센서 헤드 부분(광도파로 코어)이 외부에 직접 노출되기 때문에 높은 측정 감도를 가질 수 있다.

본 논문에서는 민감성이 우수하고, PLC상에 패터닝 하기 쉬운 마하젠더 간섭계를 이용한 습도센서로 센서 헤드 주위의 상대습도를 측정하는 방법을 제시하고자 한다. 이 간섭계의 한쪽 팔에 에칭 공정을 통해 식각을 수행하였고, 습도에 민감한 PVP를 식각된 부분에 코팅하였다. 제작된 센서를 향온 향습기 내부에 고정한 후, 온도와 상대 습도를 변화시키면서 투과 스펙트럼을 측정 및 분석하여 제안한 습도센서의 성능을 확인하고자 하였다.

## 제2장 이론적 배경

### 제1절 습도센서

#### 1. 습도 정의

습도는 기체 중에 함유되어 있는 수증기의 질량 또는 비율을 말한다. 일반적으로 일상생활에서 대기 중의 수증기의 비율을 습도라 하며 여러 가지 표시방법이 있다.

##### (1) 절대습도(Absolute humidity)

단위체적( $1\text{m}^3$ )의 기체 중에 함유되어 있는 수증기의 질량(g)을 절대습도( $\text{g}/\text{m}^3$ )라고 한다. 절대습도 D는 보일-샤르의 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다. 물의 분자량(18.016) 및  $0^\circ\text{C}$ , 1기압에서의 공기의 밀도( $1293 \text{ g}/\text{m}^3$ )를 보일-샤르의 법칙에 대입하면 기체의 팽창계수는 0.00366이기 때문에 절대습도는

$$D(t) = \frac{0.00794e}{1 + 0.00366t} \quad (2-1)$$

으로 표현된다. 여기에서, t는 온도( $^\circ\text{C}$ )이고, e는 수증기압(Pa)이다.

##### (2) 상대습도(Relative humidity, RH)

기체 중의 수증기압(e)과 동일한 온도( $^\circ\text{C}$ ), 압력에서의 포화수증기압( $e_s$ )과의 비, 또는 기체의 절대습도(D)와 동일한 온도, 압력에서 수증기로 포화되어 있는 기체의 절대습도( $D_s$ )와의 비가 상대습도(% 또는 %RH)이다. 즉, 상대습도는

$$H(t) = \frac{e}{e_s} \times 100 = \frac{D}{D_s} \times 100 \quad (2-2)$$

으로 나타낸다. 1기압, t℃의 공기 중에서의 상대습도(H)를 절대습도(D)로의 환산은 다음 식에 의해 표현된다.

$$D(t) = \frac{H(t)}{100} \times D_s(t) = \frac{H(t)}{100} \times \frac{0.00794e_s}{1+0.00366t} \quad (2-3)$$

### (3) 이슬점

기체에 포함된 수증기량은 한계가 있어, 일반적으로 온도가 낮을수록 포화수증기압은 낮다. 따라서 기체를 냉각하면 기체에 포함되어 있는 수증기량의 변화는 없더라도 상대습도는 차츰 증가해서 어느 일정 온도에 도달하면 100%로 포화하게 된다. 이 온도보다 조금이라도 온도가 내려가면 수증기의 일부는 액화되어 기체 부근의 고체 표면에 응결해서 이슬이 발생한다. 액화되기 전, 온도 t(℃)에서의 기체의 상대습도(H)는 다음 식으로 된다.

$$H(t) = \frac{e_s t_d}{e_s t} \times 100 \quad (2-4)$$

여기서, t<sub>d</sub>는 이슬점(℃)이고, e<sub>s</sub>는 포화수증기압(Pa)이다.

### (4) 포화수증기압

물 또는 얼음과 수증기가 공존하고 평형 상태로 있을 때의 수증기압을 포화수증기압

이라고 한다. 포화수증기압과 온도와의 관계는 일반적으로 Goff-Gratch 방정식을 사용하며,

$$\begin{aligned} \log(P/P_0) = & 10.79586(1 - T_0/T) - 5.02808\log(T/T_0) & (2-5) \\ & + 1.50474 \times 10^{-4}(1 - 10^{-8.29692(T/T_0 - 1)}) \\ & + 0.42873 \times 10^{-3}(10^{4.76955(1 - T_0/T)} - 1) - 2.2195983 \end{aligned}$$

으로 표현된다. 여기서, P는 포화수증기압(Pa)이고, P<sub>0</sub>는 표준대기압(101,325 Pa)이며, T는 당해온도(K), T<sub>0</sub>는 물의 3중점의 온도(273.16 K)이다.

## 2. 습도센서 종류

### (1) 전자식 습도센서

습도를 측정하는 방법은 물분자나 수증기가 가지고 있는 고유한 물리적인 성질을 측정하는 방법과 흡습성 물질에 물분자가 흡착되어 습도를 감지하는 물질의 물리적, 화학적, 전기적 성질변화를 측정 방법이 있다. 습도센서는 형태상으로는 박막, 후막, 세라믹, 소결체로 구분되고, 이용하는 전기적 성질에 따라 저항 변화형, 용량 변화형으로 구분된다. 또한, 습도센서 일부분에 가열기 설치 여부에 따라 가열형, 비가열형으로 구분된다. 재료별로는 염화리튬으로 대표되는 전해질계, 셀룰로즈나 폴리아미드 등의 유기고분자 재료의 친수성 및 팽윤을 이용한 고분자계, 수분의 흡탈착에 의한 표면저항의 변화를 이용한 Se, Ge, Si의 반도체 증착막 세라믹스계 등으로 분류한다.

고분자 습도센서는 정전 용량형과 전기 저항형 습도센서로 분류 할 수 있으며 이 센서들은 현재 많이 사용되고 있다. 정전 용량형 습도센서는 기판 상에 하부 전극을 증착하는 방법으로 만든 후 그 위에 수분 흡수에 의하여 유전율이 크게 변하는 재료로

된 층을 붙인다. 이렇게 제작된 센서는 습도의 변화와 함께 센서 단자 간의 정전 용량이 변화하는 습도 센서이다. 용량형 고분자 센서는 상온 부근에서 사용할 경우에는 온도 의존성이 작은 특징이 있다. 그러나 산, 알칼리, 유기용제가 함유되어 있는 환경이나 고온 중에서의 사용에는 취약하다. 전기저항형 습도센서는 스틸렌 또는 아크릴계 화합물에 도전성이 있는 암모니움염과 황산기를 결합한 특수한 중합체를 빗살모양의 전극에 도포하여 제작하며 전해질의 이온전도 특성에 따라 습도를 감지한다. 이와 같이 이온 전도를 이용한 고분자 습도센서는 감습막 위에서 가역적인 수분의 흡탈착을 한다. 고분자 습도센서에 전압을 인가하면 가동 이온의 움직임을 임피던스의 변화로 측정할 수 있다.

세라믹 센서에 사용되는 세라믹은 인위적인 열처리에 의해 제조한 비금속 무기질 고체이며, 이온결합 또는 공유결합이기 때문에 산화되지 않고 내연성의 특징을 가진다. 따라서 견고성, 내환경성, 장수성 등의 특성을 가지고 있다. 세라믹 센서의 측정 원리는 복합 산화물을 중심으로 금속의 표면에 산화물 층을 형성시키고 그 위에 금 증착 전극을 고정시킨 것이다. 수분의 흡탈착에 의하여 저항 및 정전 용량이 변하며, 두께가 얇기 때문에 응답 특성이 빠르다. 하지만 일부 세라믹 센서는 한 번 측정 후 흡착된 수분을 가열하여 제거해야 하는 관계로 연속 측정을 할 수 없는 단점이 있다.

반도체계 습도센서는 화학 흡착된 물이 환원 가스와 같이 반도체의 표면에 작용한다. 즉, 물의 흡착에 의하여, n형 반도체는 도전율이 증가하고 p형 반도체는 감소한다. 고분자 전해질은 수분의 흡착 또는 탈착함에 따라 민감하게 변화하는 전기적 특성이 변화한다. 이 변화를 측정하여 습도를 알 수 있는 것이다.

다음의 표 2-1은 전자식 센서를 습도 감지 물질에 따라서 구분한 것으로 각각의 분류에 따른 동작원리를 정리하였다.

표 2-1. 전자식 습도센서의 종류

분류	습도감지물질	동작원리
세라믹, 무기질	$Al_2O_3$	저항 또는 정전용량 변화
	$MgCr_2O_4, Fe_3O_4$	저항 변화
	$Ta_2O_5+MnO_2$	정전용량 변화
	LD-Ta	정전용량 변화
	$BaF_2$	이온전도도 변화
전해질	염화리튬	수용액의 평행온도 변화
	메타인산카리	이온전도도 변화
	황산폴리스틸렌	이온전도도 변화
수정진동자	폴리이미드+수정진동자	흡착량 변화에 의한 공진 주파수 변화
반도체	Se, Ge, Si	표면 저항 변화
고분자	수지+카본	급격한 저항 변화
	폴리이미드	정전용량 변화
	초산부틸셀룰로오즈	정전용량 변화
	셀룰로오즈+카본	흡습팽윤에 의한 저항 변화

(2) 광섬유 습도센서

일반적인 광섬유는 굴절률이 다른 클래드와 코어로 구성되어 있다. 빛을 전달하는 매개체인 코어로 입사된 빛은 코어와 클래드의 굴절률 차로 인하여 빛이 전반사를 겪게되며, 클래드를 통해 빛이 새어 나가지 않고, 코어를 통해서만 빛이 전달되게 된다. 이러한 광섬유를 이용한 센서의 기본원리는 광섬유 내에서 진행되는 빛의 세기, 위상,

편광, 파장 등에서의 변화를 측정하여 외부 물리량을 측정하는데 있으며, 광섬유 센서 종류로는 표 2-2에서 보는 것과 같다.[14-16]

표 2-2. 광섬유 센서의 종류

분류		종류
측정 범위	일점형	광섬유 센서
	분포형	OTDR
	다중형	FBG
측정 방식	광세기 측정형	OTDR
		Micro-bend
	간섭계형	마하젠더
		마이켈슨
		패브리-페롯
광섬유 브래그 격자형	FBG	

먼저, 광섬유 센서는 측정범위에 따라 일점형, 분포형, 다중형으로 분류할 수 있는데, 일점형 센서는 단지 특정 센서 부위의 변형량만을 측정할 수 있다. 그러므로 여러 부위의 변형을, 온도 및 압력 등의 변화량을 측정하기 위해서는 다수의 광섬유와 연결 부가 필요하다. 분포형 센서의 대표적인 것으로는 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry)로, 단일 광섬유를 이용하여 구조물의 전체적인 거동을 측정하는데 유용하다.[17-18] 또한, 다중형 센서는 일점형 센서가 2개 이상 설치된 것으로, 광섬유 브래그 격자 센서가 대표적이다.[5-7]

측정방식에 따른 분류로는 광세기 센서와 간섭형 센서, 그리고 광섬유 브래그 격자 센서로 구분할 수 있다. 광세기 센서는 단순히 광섬유를 통해 검출되는 빛의 세기에

기초를 두고 측정하므로, 제작이 쉽고, 신호처리가 단순하다는 장점이 있지만, 간섭형 센서에 비하여 측정 감도가 낮다는 단점이 있다. 대표적으로는 ODR과 마이크로-벤드 형태의 광섬유 센서등이 있다. 광세기 센서에 비해 높은 민감도를 갖는 간섭형 센서는 기준단(Reference arm)을 기준으로 측정단(Sensing arm)에서 측정된 물리량의 변화만을 의존한 결과가 계측되므로 정확도는 뛰어나지만 복잡한 신호처리가 요구되며, 편광을 고려해야 하는 어려움이 있다. 대표적으로는 마하젠더, 마이켈슨, 패브리-페롯 간섭형 센서 등이 있다.

광섬유를 이용한 습도센서는 표 2-2에서 설명한 광섬유 센서를 바탕으로 습도에 민감한 폴리머를 클래드 층에 코팅하여 습도를 계측하는 것이 대표적인 방법이며, 폴리머와 함께 사용된 광섬유의 종류로는 측면연마 광섬유, 플라스틱 광섬유, 광섬유 탐침(tapered), 단일모드-헤테로 코어 광섬유, 마하젠더 간섭계 기반의 광결정 광섬유, 광섬유 브래그 격자등을 주로 사용한다.[1-10]

## 제2절 마하젠더 간섭계

광섬유 간섭계는 광섬유를 이용하여 광경로차에 의한 간섭무늬의 변화를 측정하는 것이다. 간섭계의 종류로는 앞에서 언급한 것과 같이, 마하젠더 간섭계, 마이켈슨 간섭계, 사그낙 간섭계, 패브리-페롯 간섭계가 대표적이다.

광섬유 마이켈슨 간섭계는 그림 2-1에서 보는 것과 같이, 1개의 3-dB 커플러와 2개의 거울들로 구성되어 있다. 광원에서 방출된 입사된 빛은 3-dB 커플러를 거쳐 두 개로 나뉘어져 하나는 reference arm, 다른 하나는 sensing arm으로 진행한다. 각각의 거울에서 반사되어 돌아와 다시 3-dB 커플러에서 만나 간섭을 일으킨다.

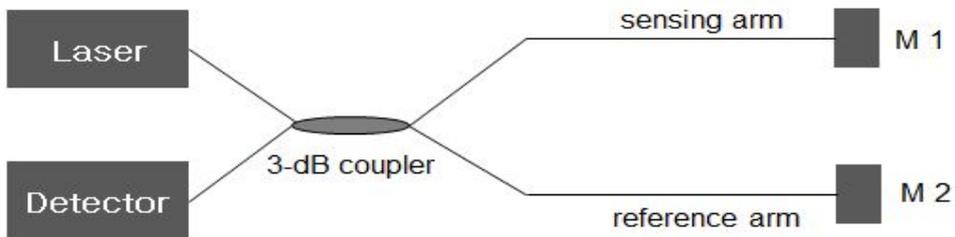


그림 2-1. 마이켈슨 간섭계 구조도

광섬유 패브리-페롯 간섭계(그림 2-2)는 일정한 거리를 두고 있는 두 개의 거울과 같은 반사체들로 구성된다. 광섬유를 통해 진행하던 빛은 첫 번째 거울에서 일부의 빛은 반사하고 일부의 빛은 통과하게 된다. 통과한 일부의 빛은 다시 두 번째 거울에서 반사하고 일부는 투과된다. 이 때, 두 번째 거울에서 반사되어 되돌아온 빛 중 일부는 첫 번째 거울을 통과하여 첫 번째 거울에서 반사된 빛과 만나 간섭을 일으킨다. 패브리-페롯 간섭계의 출력 간섭광은 두 거울사이의 광경로차에 의존한다.

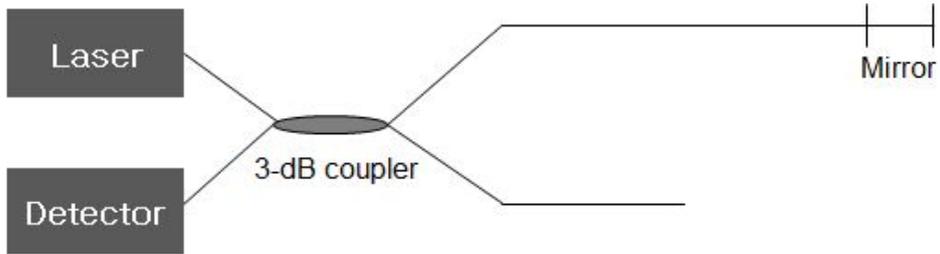


그림 2-2. 패브리-페롯 간섭계 구조도

자이로스코프에 많이 사용되는 사그낙 간섭계의 기본 구조도는 그림 2-4와 같다. 레이저(광원)에서 나온 빛이 3-dB 커플러에서 두 개의 빛으로 분리되어 하나의 빛은 시계방향으로 다른 하나의 빛은 반시계 방향으로 전파된 후에 다시 3-dB 커플러에서 만나 간섭을 일으킨다. 광섬유 사그낙 간섭계의 출력 간섭광은 시계방향과 반시계 방향의 광경로차의 함수인데 두 서로 다른 방향의 회전 방향이 지구 및 물체의 회전운동 특성에 따라서 광경로차가 달라지는 원리를 이용한 것이다.

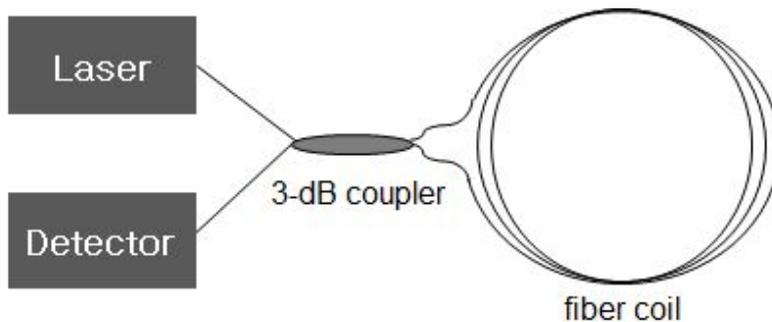


그림 2-3. 사그낙 간섭계 구조도

이 중에서 마하젠더 간섭계는 벌크 형태로 구성할 수도 있고, 기판 위에 도파로를 생성하여 직접광학 형태로 제작하거나 광섬유 커플러 등을 이용하여 제작할 수 있다. 그리고, 반사형태가 아니어서 구현하기 상대적으로 용이하고, 평판형 광도파로에서 디

자인하여 활용하기 편리하다는 장점을 가지고 있다.

그림 2-4는 평판형 도파로에 생성되는 마하젠더 간섭계의 개략도이다. 마하젠더 간섭계는 3-dB 커플러 2개를 광원 부분과 광검출기 부분에 각각 사용하여 빛이 서로 다른 경로로 진행하도록 제작되어있다. 레이저(광원) 빛은 첫 번째 3-dB 커플러를 지나면서 두 경로로 나누어진다. 나누어진 두 빛 중 하나는 sensing arm으로 진행되고 다른 한 빛은 reference arm으로 진행하다가 두 번째 3-dB 커플러에서 만나 광경로차에 따라서 간섭을 일으킨다. 마하젠더 출력 간섭광은 reference arm과 sensing arm 간의 광경로차의 코사인 함수이다.

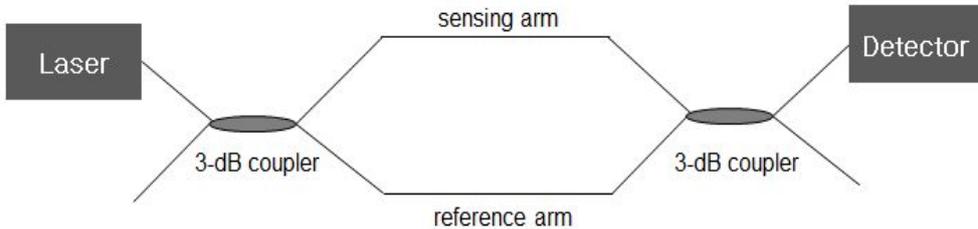


그림 2-4. 마하젠더 간섭계 구조도

레이저(광원)에서 출력되는 빛을  $E_i$ , 3-dB 커플러를 통해 각각 다른 경로로 진행하는 빛을  $E_1, E_2$  라고 하고, 광 검출기에서 측정되는 빛을  $E_o$  라고 하면,

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} E_i \quad (2-6)$$

$$I \propto |E_o|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} E_1 e^{i\phi_1} + \frac{1}{\sqrt{2}} E_2 e^{i\phi_2} \right|^2 \quad (2-7)$$

여기서,  $\phi_1$ 는  $n_1kL_1$ ,  $\phi_2$ 는  $n_2kL_2$ ,  $k$ 는  $\frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $I$ 는 광세기 이다.

식 (2-7)을 정리해 보면,

$$I = \frac{1}{2}|E_i|^2(1 + \cos\Phi) \quad (2-8)$$

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}n\Delta l \quad (2-9)$$

여기서,  $n$ 은 굴절률,  $\Delta l$ 은 경로차 이다.

즉, 마하젠더 간섭계의 출력은 입력광의 파장 변화에 대해서 코사인 함수 형태가 되며, 이때, 위상( $\Phi$ )은 광경로차(optical path distance, OPD)와 굴절률( $n$ )에 의해서 결정되므로 간섭계의 팔 길이 간의 차이나 굴절률을 변화시켜 간섭무늬의 변화가 가능하다.[11-12]

### 제3절 폴리비닐피롤리돈 구조 및 특성

폴리비닐피롤리돈(Polyvinylpyrrolidone, PVP)은 백색-연황백색의 분말이고, 냄새가 거의 없으며, N-vinylpyrrolidone의 단량체(monomer) 구조가 반복되어진 고분자(polymer)이다. 본 논문에서는 물분자 흡착을 이용하기 위해서 흡습성 물질인 PVP를 이용하였다. PVP는 상온에서 굴절률이 1.42 정도이며, 비이온 수용성 고분자로 물 뿐만 아니라 알코올, 클로로폼, 아세톤 등과 같은 다양한 극성 유기 용매에 잘 녹고, 흡습성이 높으며 접착력 역시 좋다. PVP는 피막형성능이 있으나, 그 필름은 흡습성이며 수분함량의 평형치는 상대습도에 비례하여 약 1/3이다. 열에 대해서는 100 ~ 130℃까지는 안정하지만, 150℃ 이상으로 가열하면 변색되고 용해도가 저하된다. 또한, 산에는 강하지만 알칼리에는 약하며, 독성과 자극성이 없고 안전성은 매우 높다. 이러한 특성으로 PVP는 우리 일상생활과 관련된 화장품, 의약품, 헤어스프레이, 자극완화제, 그리고 합성된 나노 입자들의 응집을 방지하는 계면 활성제로도 사용되어진다.



그림 2-5. 폴리비닐피롤리돈의 화학적 구조와 응용제품들

그림 2-5는 폴리비닐피롤리돈의 화학적 구조와 응용제품들을 보여준다. 이러한 PVP를 만드는 중합방법으로 라디칼 중합 방법을 가장 많이 사용한다.

라디칼 중합이란 부가 중합(addition polymerization)의 한 종류이며, 탄소-탄소 이중결합을 가진 알켄(alkene)이 라디칼 중합에 의해 탄소-탄소 단일결합 형태로 중합되는 방법이다. 중합을 일으키는 개시제는 라디칼이며 라디칼 개시제(radical initiator)는 단량체 존재에서 라디칼을 생성하는 화학물을 말한다. 일반적으로 빛이나 열, 화학반응 또는 방사선에 의해 화학결합이 약한 부분의 결합이 끊어져서 라디칼이 형성된다. 라디칼 중합을 하는 단량체는 일반적으로 비닐기(vinyl group)를 가진 여러 종류의 불포화 유기화합물들로 일반식은  $CH_2 = CHR$ 로 표시 할 수 있다.

라디칼의 중합 매커니즘은 4단계로 나뉘어서 설명할 수 있다.[19]

첫 번째 단계는 개시반응(initiation reaction)이다. 개시반응은 개시제에 의해 라디칼을 형성하게 되고 이 라디칼에 의해 첫 단량체와 반응하는 단계까지를 말한다. 이렇게 생긴 라디칼-단량체 라디칼은 다음 단계부터 단량체와 계속 반응하게 된다. 여기서,  $R\cdot$ 는 개시 라디칼(initiator radical),  $M$ 은 단량체(monomer),  $M\cdot$ 는 단량체 라디칼(monomer radical)이다.



두 번째 단계는 성장반응(propagation reaction)으로 라디칼-단량체 라디칼은 많은 단량체와 계속 결합하여서 사슬의 길이가 증가하여 고분자가 형성되는 반응이다.



세 번째 단계는 종결반응(termination reaction)이다. 이 반응은 두 라디칼이 반응하여서 라디칼이 없어지는 반응이다.

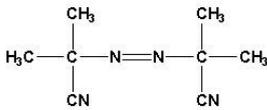


네 번째 단계는 연쇄이동(chain transfer) 반응으로 성장하는 고분자 라디칼(P·)이 어느 X라는 분자와 반응하여서 고분자(P)가 형성되고 X는 라디칼 X·가 생기는 반응이다.

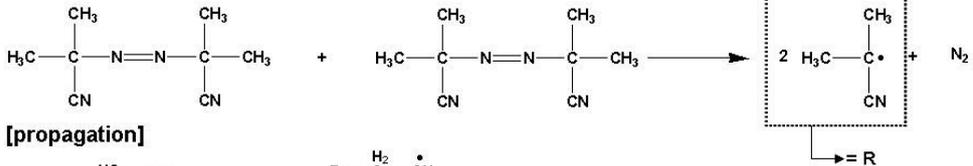


실제 중합 과정으로 살펴보면 그림 2-6과 같다.

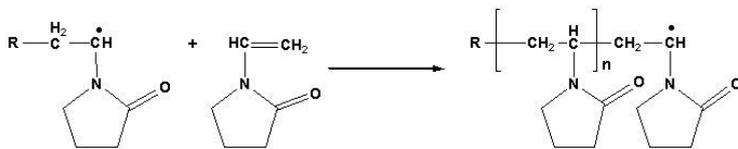
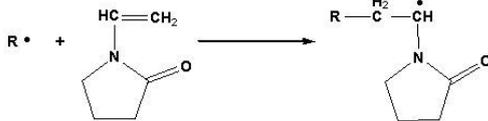
**[AIBN]**



**[initiation]**



**[propagation]**



**[termination]**

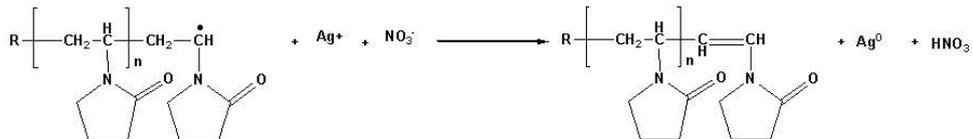


그림 2-6. 폴리비닐피롤리돈의 라디칼 중합 도식도

폴리비닐피롤리돈은 Azo류 화합물인 AIBN 개시제에 의해 라디칼을 형성하게 된다.

이 개시제는 단량체 비닐피롤리돈과 반응하여 단량체에는 라디칼을 형성하게 되고 계속해서 단량체와 반응하여 고분자를 형성하게 된다. 마지막 종결 반응에서  $Ag^+$ 와  $NO_3^-$ 의 형태인  $AgNO_3$ 와 만나게 되는데  $Ag^+$ 는 폴리비닐피롤리돈 말단에 있는 라디칼과 반응하여  $Ag^0$ 로 환원하게 되고  $NO_3^-$ 는 말단의  $CH_2$ 에서의  $H$ 를 가져가  $HNO_3$ 가 된다. 이때 폴리비닐피롤리돈 말단에서는 연쇄이동 반응이 일어나면서 C=C 이중결합이 형성된다.

## 제4절 평판형 광도파로 이론

### (1) 광도파로 전파특성 이론

광도파로(optical waveguide)는 굴절률이 상대적으로 높은 매질을 가운데에 놓고, 굴절률이 낮은 매질로 둘러싸인 길게 뻗은 구조로써, 굴절률이 높은 매질에서 전반사 현상으로 인해 빛을 멀리까지 전파시키고, 동시에 중간에서 이를 변조 또는 합성하는 부품이다.[20-21] 광도파로에 대한 개념도는 그림 2-7에 나타나 있다.

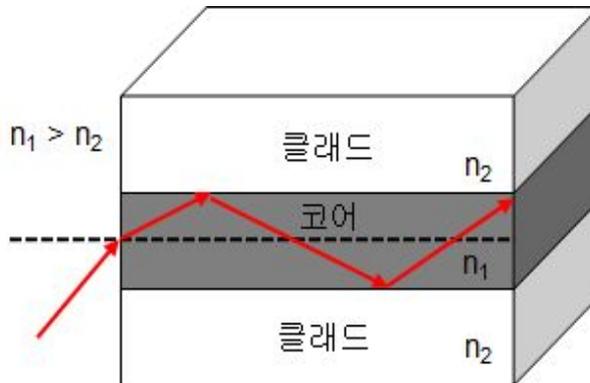


그림 2-7. 광도파로 개념도

여러 종류의 광도파로 중 평면 도파로는 아래와 같이 1차원의 굴절률 분포를 가지는 박막 형태의 가장 기초적인 광도파로이다. 이러한 평면 도파로의 도파 현상은 여러 종류의 광학 소자에서 기초 이해에 있어 중요하며 실용적인 측면에서 중요한 부분이다. 평면 도파로의 구성은 그림 2-8과 같이, 상부 클래드층, 코어층, 하부 클래드층으로 구성 되어있다.[20-21]

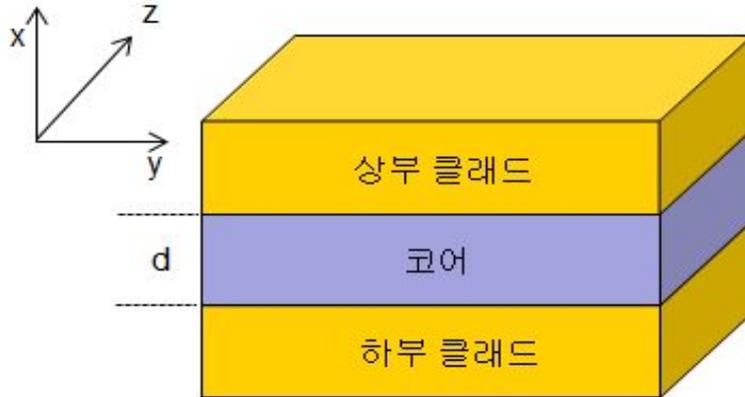


그림 2-8. 평면도파로의 구조

현재 설계 이론에서 평판형 광도파로의 기본 소자를 제작하기 위해서는 평판 도파로의 해석이 필요하다. 특히, 채널 도파로의 특성을 결정짓는 코어층에서의 광도파로 특성 해석을 위해서 반드시 상부클래드층, 코어층, 하부클래드층으로 이루어지는 평판 도파로의 해석을 통하여 여기되는 모드 수를 결정하거나 도파과정에서의 굴절을 및 손실 측정과 같은 다양한 광학적 특성의 해석이 필요하다.

모드(mode)란 전자파 혹은 광파가 도파로내와 그 주위를 따라 전파하여 나아가는 형태를 말한다. 모드의 분류는 파가 도파로의 종축(z 축)을 따라 나아갈 때 전기장, 자기장의 성분 중 z축 성분이 있는가 없는가에 따라 일반적으로 TE, TM모드로 분류한다.[21] TE(Transverse Electric Field) 모드는 파가 z축을 따라 진행할 때 전기장  $E$ 는 오직 xy평면에만 존재하는 즉,  $E_z$ 는 0인 파이다. 반면에 TM(Transverse Magnetic Field) 모드는 자기장  $H$ 가 오직 xy평면에만 존재하는  $H_z$ 는 0인 경우에 해당한다.

평판 도파로의 모드 해석은 Maxwell 방정식 및 경계 조건으로부터 유도되는 아래의 Helmholtz 파동방정식의 해로부터 구할 수 있다.[21]

여기서,  $\beta$ 는 위상정수(전파상수),  $n$ 은 도파로 내의 굴절을, 그리고  $k$ 는 파수를 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (n^2 k^2 - \beta^2) E_y = 0 \quad \text{for TE 모드} \quad (2-10)$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (n^2 k^2 - \beta^2) H_y = 0 \quad \text{for TM 모드} \quad (2-11)$$

위의 식 (2-10)과, 식 (2-11)에서  $E_y$  그리고  $H_y$ 는 각각 전기장 및 자기장의 분포를 나타낸다.

상기 방정식을 풀기 위해서는 각 전·자기장 성분에 대한 경계조건을 적절히 적용시켜야 한다. 먼저 전기장의 방향이 도파로의 경계면과 평행한 TE 모드의 경우,  $E_y$ 는 0 ( $x$ 는  $\pm\infty$ )인 경계조건을 만족시켜야 하고, 자기장의 방향이 평행한 TM 모드의 경우,  $E_y$ 는 0 ( $x$ 는  $\pm\infty$ )인 경계조건을 만족시켜야 한다.

전기장과 자기장에 대한 관계식을 보자면,

$$H_x = \frac{-\beta}{\omega\mu} E_y, \quad H_z = \frac{j}{\omega\mu} \frac{dE_y}{dx} \quad \text{for TE 모드} \quad (2-12)$$

$$E_x = \frac{\beta}{\omega\epsilon} H_y, \quad E_z = \frac{-\beta}{\omega\epsilon} \frac{dH_y}{dx} \quad \text{for TM 모드} \quad (2-13)$$

여기서,  $\epsilon$ 는 도파로의 유전율,  $\beta$ 는 위상정수(전파상수),  $\mu$ 는 투자율,  $\omega$ 는 주파수이다.

식 (2-10)을 이용하여 각 영역에서의 자기장 성분을 계산하면 아래식과 같다.

$$H_z(x) = -\frac{C_{TE}}{j\omega\mu_0} \cdot p \cdot \exp(-px): \text{상부클래드 영역} \quad (2-14)$$

$$H_z(x) = -\frac{C_{TE}}{j\omega\mu_0} \cdot [-h\sin(hx) - p\cos(hx)]: \text{코어영역} \quad (2-15)$$

$$H_z(x) = \frac{C_{TE}}{j\omega\mu_0} \cdot [\cos(hd) + \frac{p}{h}\sin(hd)] \cdot q \cdot \exp[q(x+d)]: \text{하부클래드영역} \quad (2-16)$$

여기서,  $C_{TE}$ 는 TE 모드의 계수,  $p$ ,  $q$ ,  $h$ 는 감쇄상수,  $d$ 는 코어의 크기이다.

$$h = (n_2^2 k^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-17)$$

$$p = (\beta^2 - n_1^2 k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-18)$$

$$q = (\beta^2 - n_3^2 k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2-19)$$

경계조건을 만족시키기 위해서는 식 (2-20) 고유치 방정식을 만족 시켜야만 한다.

$$\tan(hd) = \frac{h(p+q)}{h^2 - pq} \quad (2-20)$$

다음으로 식 (2-11)을 이용하여 TE 모드와 마찬가지로 경계조건을 고려하여 풀면,

$$H_y(x) = -\frac{h}{p} \cdot C_{TM} \cdot \exp(-px): \text{상부클래드영역} \quad (2-21)$$

$$H_y(x) = C_{TM} \cdot [-\frac{h}{p}\cos(hx) + \sin(hx)]: \text{코어영역} \quad (2-22)$$

$$H_y(x) = -C_{TM} \cdot \left[ \frac{h}{p} \cos(hd) + \sin(hd) \right] \cdot \exp[q(x+d)]: \text{하부클래드영역} \quad (2-23)$$

여기서,  $C_{TM}$ 는 TM 모드의 계수,  $p$ ,  $q$ ,  $h$ ,  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$ 는 감쇄상수,  $d$ 는 코어의 크기이다.

마찬가지로 경계조건을 만족시키기 위해서는 아래의 고유치 방정식을 만족해야 한다.

$$\tan(hd) = \frac{h(\bar{p} + \bar{q})}{h^2 - \bar{p}\bar{q}} \quad (2-24)$$

따라서, TE 모드수 및 TM 모드수, 전기장 필드 분포, 전송상수 등 각종 기본 데이터를 아래의 고유치 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$E_y(x) = C_{TE} \cdot \exp(-px): \text{상부클래드영역} \quad (2-25)$$

$$E_y(x) = C_{TE} \cdot \left[ \cos(hx) - \frac{p}{h} \sin(hx) \right]: \text{코어영역} \quad (2-26)$$

$$E_y(x) = C_{TE} \cdot \left[ \cos(hd) - \frac{p}{h} \sin(hd) \right] \cdot \exp[q(x+d)]: \text{하부클래드영역} \quad (2-27)$$

## (2) 유효굴절률법 이론

광도파로에서 완전한 전자기장의 해를 구할 수 있는 경우는 도파로 매질간 경계면이 특정 좌표계의 좌표축과 일치하는 극히 제한된 경우들이다. 따라서, 이러한 채널 도파로의 모드해석을 위하여 근사적인 풀이법, 유효굴절률법, 유한요소법등과 같은 수치해석학적인 방법 등 다양한 해석 방법이 제시되어 있다. 이들 방법 중 도파로와 같이

코어와 클래드층 간의 굴절률차가 비교적 적고, 모양이 단순한 도파로의 경우 간편하게 적용할 수 있으면서 오차가 적은 유효굴절률법이 널리 사용되고 있다. 특히, 평면 도파로는 유효굴절률법을 적용할 경우, 슬랩 도파로의 해석 방법을 그대로 적용할 수 있어, 간편하게 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다.[21]

유효굴절률이란, 광도파로를 진행하는 빛의 모드는 하나의 전파상수( $\beta$ )를 가지는 것으로 근사하여 나타낼 수 있으며,  $\beta = k \cdot n_{eff}$ 로 표현된다. 이때,  $n_{eff}$  를 코어와 클래딩으로 구성된 광도파로를 진행하면서 모드가 느끼는 유효굴절률이라고 정의한다. 도파 모드의 유효굴절률은 항상 클래딩 굴절률 보다 커야 하고, 코어 재료의 굴절률 보다 작아야한다. 또한, 전파상수( $\beta$ ) 값과  $kn_{clad} \leq \beta \leq kn_{core}$ 의 관계식을 가지고 있다.  $n_{eff} \leq n_{clad}$  일 때는 광도파로 코어 부분에 국한된 도파모드를 생성할 수 없게 되며, 입사된 광은 클래드 부위로 퍼져나가 사라지게 된다.

먼저, 2차원 굴절률 분포를 갖는 광도파로는 다음과 같은 파동 방정식 (2-28)을 만족하여야 한다.[21]

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + (n^2 k^2 - \beta^2) \Phi = 0 \quad (2-28)$$

여기서,  $\beta$ 는 위상정수(전파상수),  $n$ 은 도파로 내의 굴절률, 그리고  $k$ 는 파수를 나타낸다.

식 (2-28)을 변수 분리법을 적용하여 풀면, 식 (2-30)과 같다.

$$\Phi_y \frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial x^2} + \Phi_x \frac{\partial^2 \Phi_y}{\partial y^2} + (n^2 k^2 - \beta^2) \Phi_x \Phi_y = 0 \quad (2-29)$$

여기서, 유효굴절률  $n_{eff}$ 가 다음의 방정식을 만족한다고 가정하고,

$$\frac{\partial^2 \Phi_y}{\partial y^2} + (n^2 k^2 - n_{eff}^2 k^2) = 0 \quad (2-30)$$

식 (2-30)을 식 (2-29)에 대입하여 정리하면,

$$\Phi_y \left\{ \frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial x^2} + (n_{eff}^2 k^2 - \beta^2) \Phi_x \right\} = 0 \quad (2-31)$$

따라서, 식 (2-32)과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 \Phi_x}{\partial x^2} + (n_{eff}^2 k^2 - \beta^2) \Phi_x = 0 \quad (2-32)$$

이러한 유효굴절률법은 실제로는 전송상수가 정확한 해보다 약간 높은 값으로 계산되는 오차를 가진다. 그러나, 평판형 광도파로의 경우 코어와 클래드 간의 굴절률 차이가 매우 작으므로 단일 모드 도파로 동작 영역에서는 거의 무시할 수 있다.

본 논문에서는 습도감지물질인 PVP가 대기 중 물분자 흡수에 의해 클래드층의 굴절률값의 변화를 유도하고, 그로 인해서 유효굴절률의 변화를 가져오게 될 것이다. 이 변화로 인해서 코어에서 진행하는 모드의 굴절률 변화로 작용하여 마하젠더 간섭계 통과 후 위상의 변화와 광세기의 변화로 나타나게 된다.

## 제3장 실험

### 제1절 MZI PLC 센서 모듈 제작

MZI PLC 센서 모듈 제작에 앞서, 도파로의 구조 설계요소로는 모드수, 모드굴절률, 사용파장범위, 손실 등이 있다. 여러 설계 요소 중에 코어와 클래드층 간의 굴절률차와 코어의 크기는 설계에 있어서 가장 먼저 결정되어야 하는 요소이며, 제작공정에 매우 큰 영향을 미치는 변수이다. 최종적으로 광섬유와 결합되는 평면도파로의 구조는 광섬유와 접속 손실의 최소화를 위하여 가능한 광섬유와 동일한 구조인 것이 좋으나, 광소자의 종류와 용도에 따라서 도파로 조건을 변화시키는 것이 일반화 되어 있다.

본 논문에서 사용한 평판형 광도파로는 굴절률 차가 0.75%, 코어 사이즈는  $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ , 손실은 0.04 dB/cm 이고, 실리카( $\text{SiO}_2$ ) 기판의 크리닝, PECVD(Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)에 의한 코어층 증착, 스퍼터링(Sputtering) 공정에 의한 크롬 마스크 증착, 사진현상, 도파로 식각, FHD(Flame Hydrolysis Deposition)에 의한 오버클래드 증착 공정으로 구성되어 있다.[22-25]

그림 3-1에서 보이는 공정도와 같이, 실리카 기판 위에 PECVD를 이용하여 코어를 증착 하였고, 증착된 코어로 도파로를 만들기 위해 먼저 스퍼터링 장치를 이용하여 크롬 마스크(Cr mask)를 증착한 후, 스톱코터(Spin coater)를 이용하여 PR(Photo Resist) 용액을 도포하고, 현상(Development)하여 PR 패턴을 완성하였다. 제작된 패턴에 ICP(Inductively Coupled Plasma)장비를 이용하여 PECVD에 의해 증착된 실리카 코어층을 식각 한 후, FHD를 사용하여 오버클래드를 증착하였다. 위와 같은 공정으로 제작한 PLC의 MZI 패턴 중에서 한쪽 팔은 코어가 드러나게 오버클래드에 식각 공정을 수행하였다.

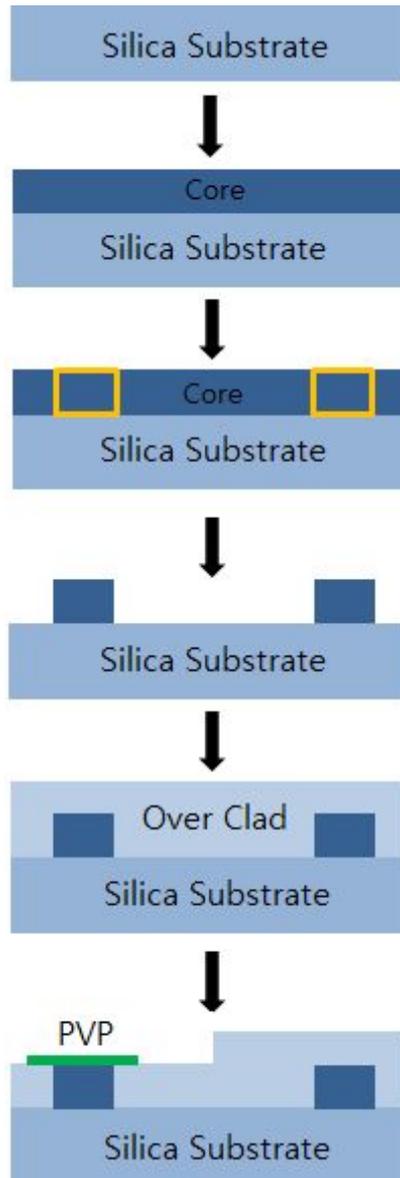


그림 3-1. MZI PLC 제조 공정도

반도체 공정을 통해 PLC에 제작된 MZI 패턴 개요도는 그림 3-2와 같다.

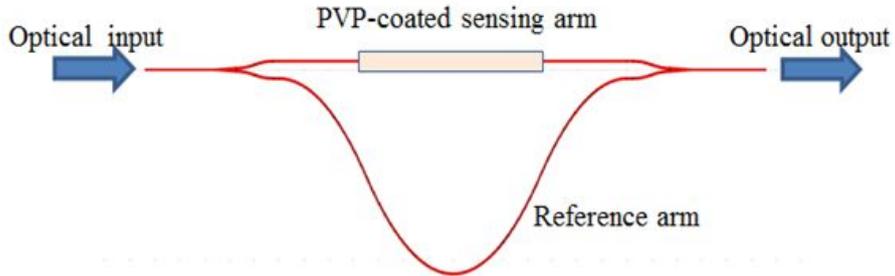


그림 3-2. PLC에 만들어진 MZI 개요도

PLC 센서 모듈은 마하젠더 간섭계 형태로 한쪽 팔에는 PVP를 코팅하였고, MZI PLC 센서 모듈의 양 끝단은 광섬유 형태이며, 양팔의 경로차는 100  $\mu\text{m}$ 으로 디자인하였다.

제작된 MZI PLC 센서 모듈 단면은 그림 3-3과 같다. 광도파로의 코어 크기는  $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 이며, 코어의 굴절률은 1.45, 클래드의 굴절률은 1.44로 설계하였다. 오버 클래드의 두께는 센싱부 식각 공정의 정확도를 위해 코어 부분 위로부터  $20\ \mu\text{m}$  두께로 증착하였다. 제작된 PLC 기반 센서의 단면은 한쪽 팔의 코어가 드러날 정도로 오버 클래드가 식각된 구조로써, 식각된 깊이는 오버 클래드의 두께인  $20\ \mu\text{m}$ 정도이며, 식각 폭은  $200\ \mu\text{m}$ , 길이는  $5\ \text{mm}$ 이다. 여기서, 식각에 의한 코어 손상 또는 광전송 손실을 최소화하고자 식각 깊이는 오버 클래드 두께와 동일한  $20\ \mu\text{m}$  정도를 유지하였다.

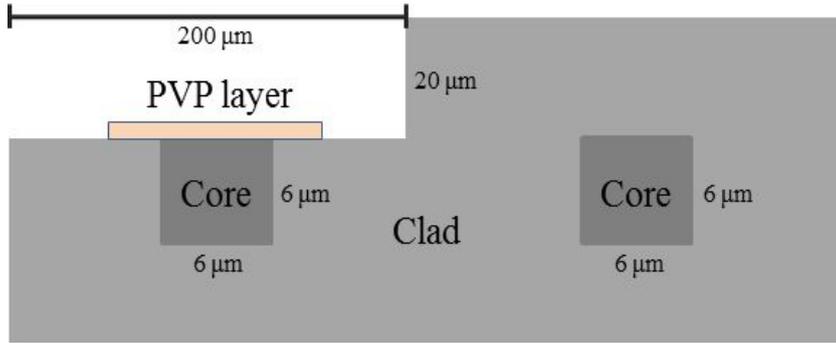


그림 3-3. 제작된 MZI PLC 센서 단면도

PLC에 만들어진 MZI 두 팔 중에 식각된 한쪽 팔 부분에 습도에 민감한 PVP 코팅막을 형성하기 위해 이소프로필 알코올을 솔벤트로 사용하여 가루상태인 PVP를 솔루션 상태로 만든 후, 광도파로의 식각된 부분에 소량 코팅하였다.

그림 3-4는 제작된 센서모듈의 사진이다. 간섭계 형태로 구현된 습도센서는 PVP가 코팅된 한쪽 팔이 습도의 변화에 민감하게 반응하여 광손실 및 굴절을 변화를 나타내고, 이로 인해 PVP 도포된 팔의 광도파로상의 유효 굴절률의 변화를 일으킨다. 그러므로 두 팔을 지나 중첩되는 광은 광경로차를 가지게 되고, 이에 따라서 파장변화에 따라서 측정된 간섭무늬의 변화를 유도하게 된다.

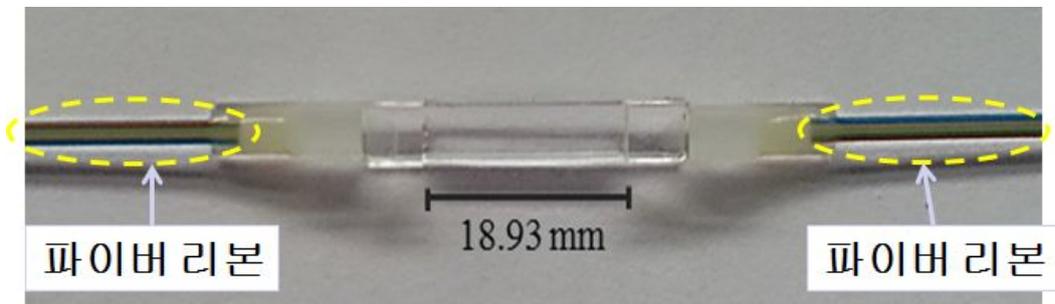


그림 3-4. 제작된 MZI PLC 센서 모듈 사진

## 제2절 경화조건에 따른 스펙트럼 측정

간섭계 형태로 구현된 MZI PLC 센서모듈은 PVP가 코팅된 한쪽 팔이 상대습도의 변화에 민감하게 반응하여 클래드층의 유효굴절률 변화를 일으킨다. 그로 인해, 코어와 클래드층간의 모드가 변화되어, 광세기가 변화한다.[26] 또한, 유효굴절률의 변화로 인해 간섭계에 측정되는 광세기의 위상이 바뀌게 되고, 두 팔을 지나 중첩되는 광은 광 경로차를 가지게 되며, 이에 따라서 측정된 광 간섭무늬의 변화를 유도하게 된다. 그림 3-5와 같이, 제작된 MZI PLC 센서모듈을 항온항습기(WEISS사의 C340, 온도 -72~180℃, 상대습도 10~90%) 안에 고정하고, 경화조건에 따른 투과 스펙트럼의 변화를 측정하였다.

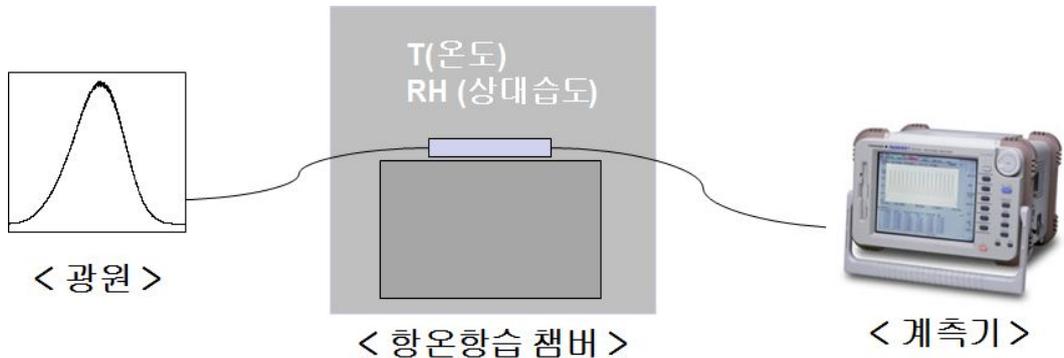


그림 3-5. 제작된 MZI PLC 센서 모듈 실험 개략도

실험에서 사용된 광원으로는 FBG Tech사의 SLED 1550모델이고, 중심파장은 1550 nm이며, 광원의 반치폭은 30 nm, 중심 파장에서의 출력은 -30dBm 이다. YOKOGAWA사의 AQ6331모델인 광스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)를 이용하여 광원에서 입사된 빛이 PVP가 코팅된 MZI PLC 센서를 통과한 뒤 나타나는 광스펙트럼을 측정

하였다. 이때, OSA의 분해능은 0.05 nm로 측정을 수행하였다.

그림 3-6은 PVP가 코팅된 센서모듈을 각각 다른 환경에서 경화시킨 후, 상대습도 환경에 따른 투과 스펙트럼을 측정한 결과이다. 그림 3-6(a)는 실내 자연경화 조건(온도 25℃, 상대습도 60%)에서 제작된 센서를 습도 변화에 노출하여 측정한 스펙트럼이고, 그림 3-6(b),(c)는 상대습도 20%, 온도 30℃로 유지된 항온항습 조건(온도 30℃, 상대습도 20%)하에서 경화시킨 센서를 상대습도 20 ~ 80% 그리고 80% ~ 90%에 노출시켰을 때 측정한 스펙트럼이다. 실험에서는 두 센서 모두 상온의 온도(25℃)를 동일하게 유지하면서, 상대습도를 20%부터 70%, 20%부터 80%까지 10% 간격으로 유지하였고, 80%부터 90%까지는 습도 변화를 보다 조밀하게 조절하여 5% 간격으로 변화시키면서 간섭무늬 변화를 측정하였다. 또한, 습도센서를 이용하는데 있어서 파장 특성의 변화를 측정하는 것도 유용하지만, 간단히 광세기만을 측정함으로써 상대습도를 예측할 수 있다면 습도센서로의 활용도가 크게 향상될 것으로 기대되어 각각의 조건에서 광세기도 같이 측정하였다.

그림 3-6(a)에서 보면, 상대습도가 20 ~ 80% 까지 증가함에 따라 장파장으로 천이되며 광세기가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 장파장 천이는 PVP의 수분 흡수로 인해 클래드층의 유효굴절률이 증가하여 간섭계의 위상을 변화시킨 것이다. 또한, 광세기의 감소는 굴절률 증가로 인한 코어와 클래드층 사이의 굴절률 차가 줄어들어 내부 전반사 조건이 변화되는 것으로 생각할 수 있다.[26] 하지만, 그림 3-6(b)에서 보듯이 높은 상대습도 환경에서는 스펙트럼이 단파장으로 움직이며 광세기도 전반적으로 증가되는 것을 볼 수 있다. 이것은 PVP가 높은 상대습도에서 용해되어 굴절률이 공기와 같은 값으로 감소함으로 인해 원래의 간섭무늬 형태로 돌아가려는 경향을 보이는 것으로 예상된다.

그림 3-7은 20%부터 80%사이의 상대습도에 따라 측정된 광세기 값을 보여주고 있다. 상대습도 40%부터 80%구간까지는 선형성을 잘 유지하고 있으나, 40% 이하 구간에서는 광세기 변화가 매우 급격하게 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고, 상대습도 80%이상

구간은 PVP가 높은 상대습도에 의해 용해되어 원래의 간섭무늬 형태로 돌아가기 때문에 고려하지 않았다.

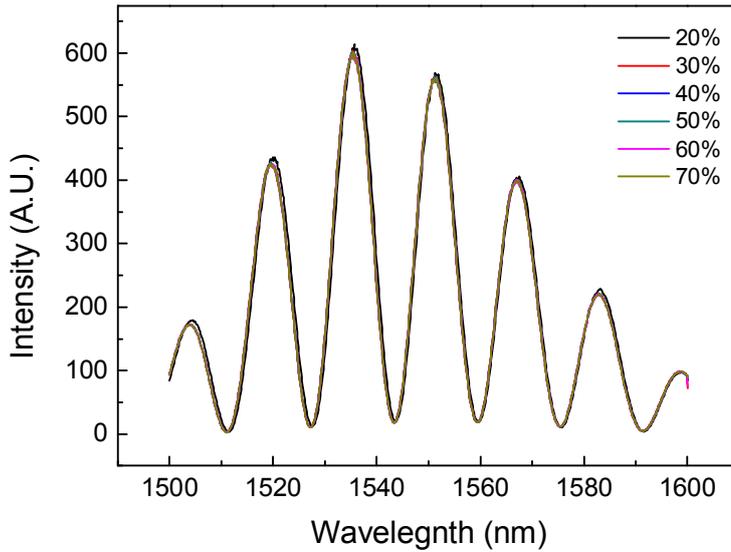


그림 3-6(a). 자연경화 조건(온도 25℃, 상대습도 60%)에서 상대습도에 따른 투과 스펙트럼(상대습도 20 ~ 70%, 온도 25℃ 고정)

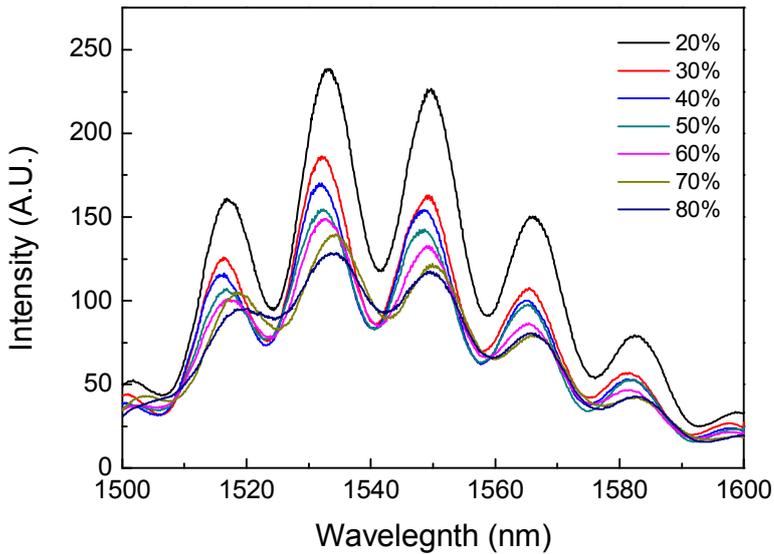


그림 3-6(b). 향온향습 경화 조건(온도 30℃, 상대습도 20%)에서 상대습도에 따른 투과 스펙트럼(상대습도 20 ~ 80%, 온도 25℃ 고정)

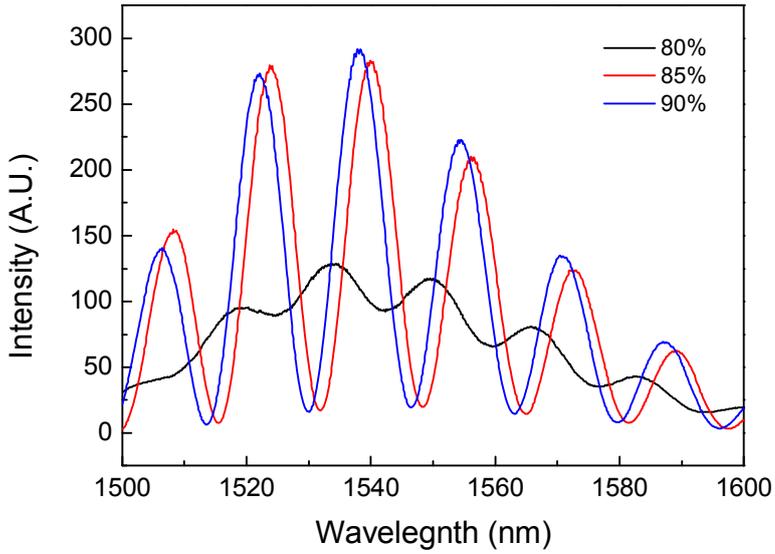


그림 3-6(c). 항온항습 경화 조건(온도 25℃, 상대습도 60%)에서 상대습도에 따른 투과 스펙트럼(상대습도 80 ~ 90%, 온도 25℃ 고정)

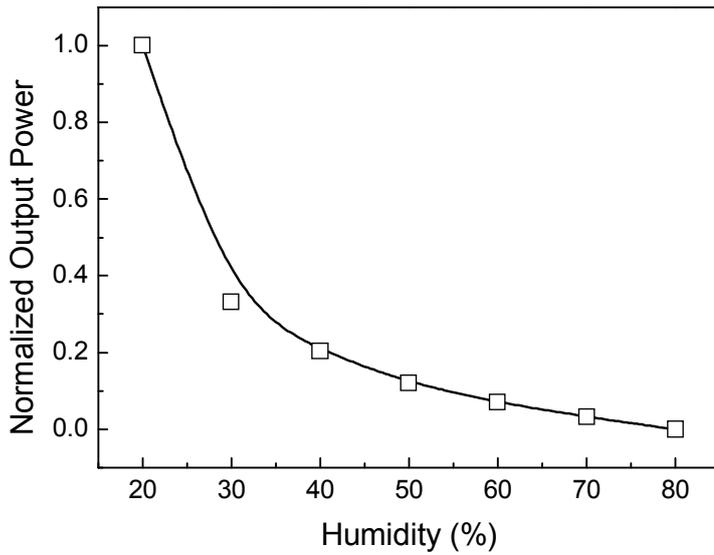


그림 3-7. 상대습도에 따른 광세기 측정 값(항온항습경화조건에서 제작된 습도센서 이용, 온도 25℃ 고정)

### 제3절 온 · 습도 변화에 따른 스펙트럼 측정

#### 1. 온도 변화에 따른 스펙트럼 측정

항온항습경화 조건(온도 30℃, 상대습도20%)하에서 MZI PLC 센서모듈을 항온 항습기 안에 고정된 후, 상대습도를 고정시키고 온도를 변화시키면서 투과 스펙트럼을 측정하였다. 아래의 그림 3-8부터 그림 3-13, 표 3-1부터 표 3-6까지와 같이, 상대습도는 20 ~ 70% 까지 10% 간격으로 변화시켰고, 온도는 각각 고정된 상대습도환경에서 30 ~ 80℃까지 10℃ 간격으로 변화시키면서 OSA를 이용하여 투과 스펙트럼을 측정하였다. 그림 3-8(a)부터 그림 3-13(a)까지는 고정된 상대습도환경 조건에서 온도에 따른 간섭무늬를 나타낸 결과이고, 그림 3-8(b)부터 그림 3-13(b)까지, 표 3-1부터 표 3-6까지는 그림 3-8(a)부터 3-13(a)의 OSA로 측정한 간섭무늬에서 peak점들을 온도변화에 따른 파장의 변화를 정리한 결과이다. 그림 3-8(a)와 (b), 표 3-1은 상대습도 20% 조건에서 온도가 변화되었을 때 파장의 위치가 최대 약 3.4 nm 정도 장파장으로 천이하였다. 그림 3-8(a)안에 보이는 설명은 각각 온도와 습도 조건을 나타낸 것으로 T30 H20은 온도 30℃이고 상대습도가 20%인 경우를 나타낸다. 그림 3-9(a)와 (b), 표 3-2는 상대습도 30% 조건에서 온도 변화에 따른 간섭무늬를 측정하고 이를 분석한 결과이다. 파장의 변화가 약 1.3 nm 미만의 범위에서 동일하게 장파장으로 천이됨을 볼 수 있었다. 이는 제작된 센서가 상대습도 20%와 30% 환경을 비슷한 환경(저습)으로 인지한 결과로 예상된다. 그림 3-10(a)와 (b), 표 3-3은 상대습도 40% 경우에 스펙트럼을 측정한 결과이다. 측정한 결과 파장이 최대 약 2.5 nm 정도 장파장으로 이동하였다. 그림 3-11(a)와 (b), 표 3-4는 상대습도 50%에서 측정한 결과이다. 이 경우에는 약 2.5 nm 미만으로 파장 천이가 장파장으로 일어났으며, 그림 3-12(b), 표 3-5에서 보이듯이 상대습도 60% 조건에서 최대 2.0 nm 미만으로 장파장으로 천이됨을 확인할 수 있었다. 마지막으로 그림 3-13(a)와 (b), 표 3-6은 상대습도 70%에서 측정한 결과로 최종 온도에서

파장의 변화가 1 nm 미만으로 이동된 것을 볼 수 있었다. 이는 PVP가 고습환경에서 용해되어 온도의 변화와는 상대적으로 덜 민감하게 반응하며, 그로 인해서 센서 모듈의 민감성이 감소된 결과로 볼 수 있다.

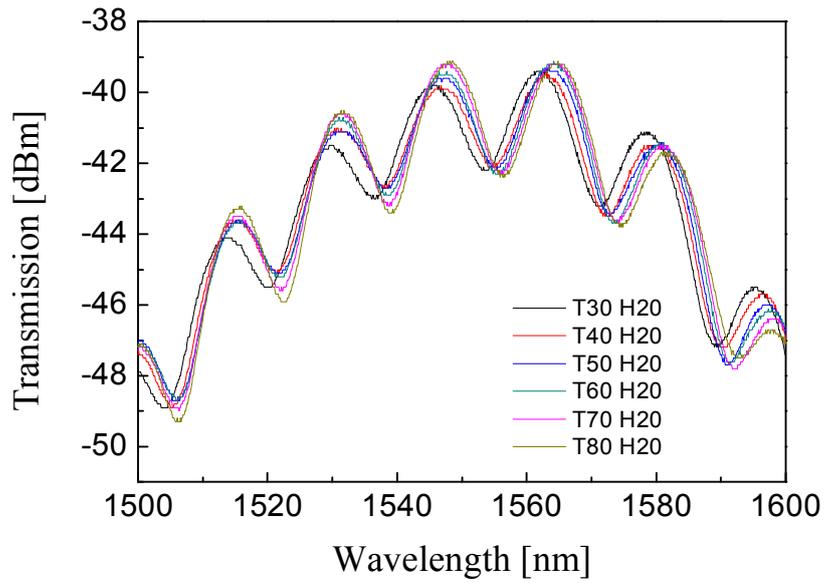


그림 3-8(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 20% 고정)

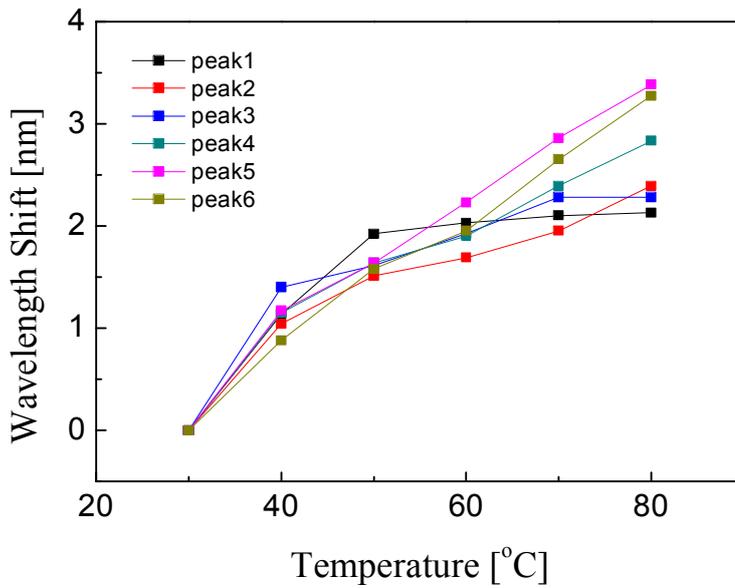


그림 3-8(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화 (상대습도 20% 고정)

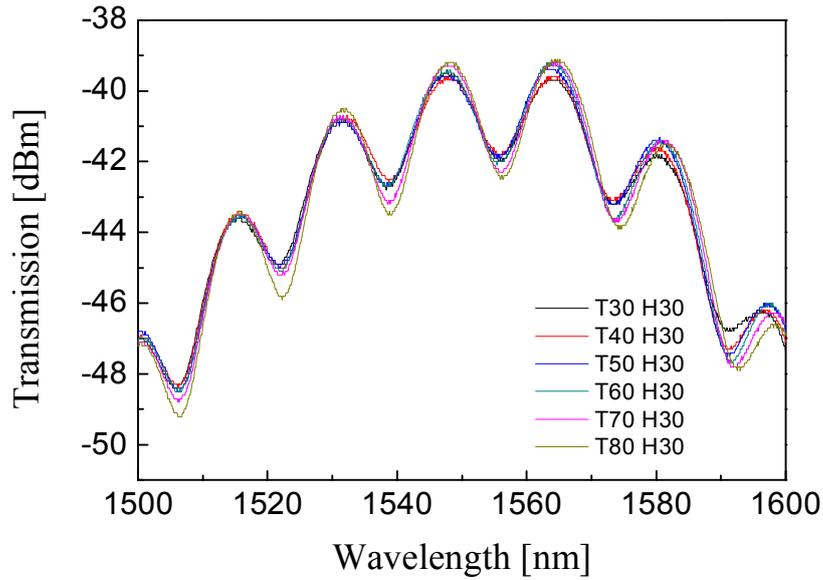


그림 3-9(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 30% 고정)

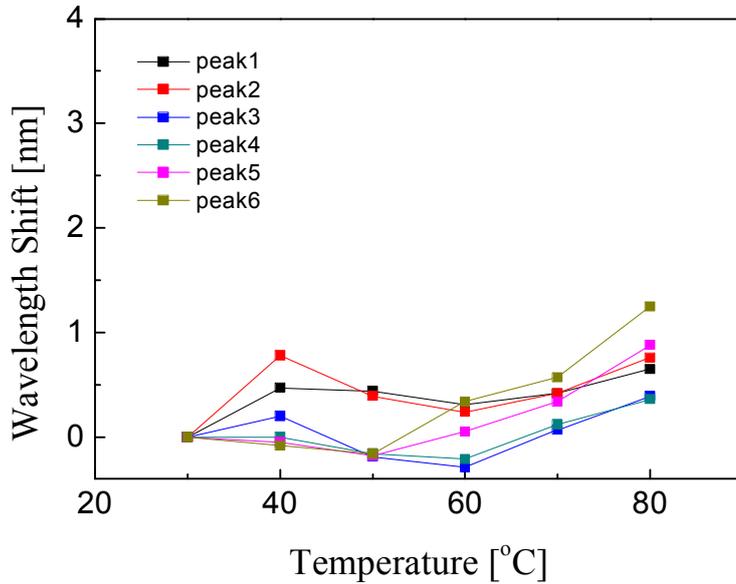


그림 3-9(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화(상대습도 30% 고정)

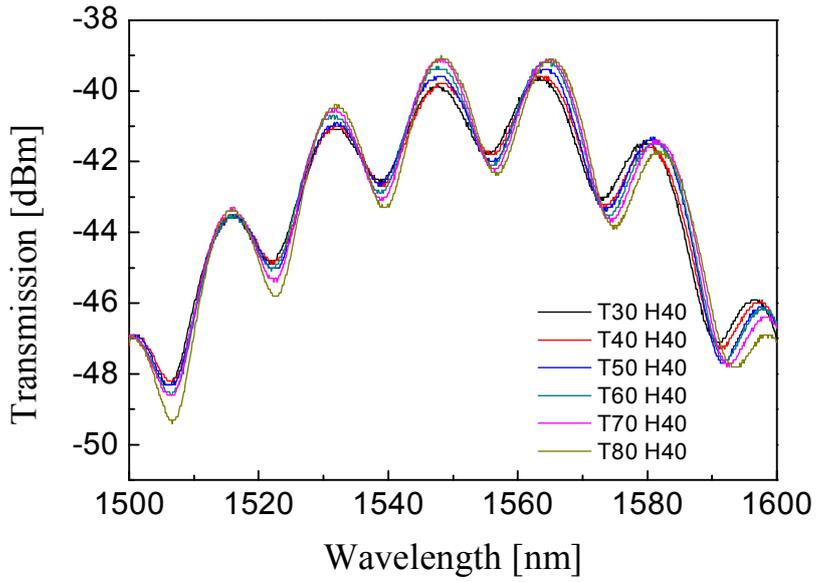


그림 3-10(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 40% 고정)

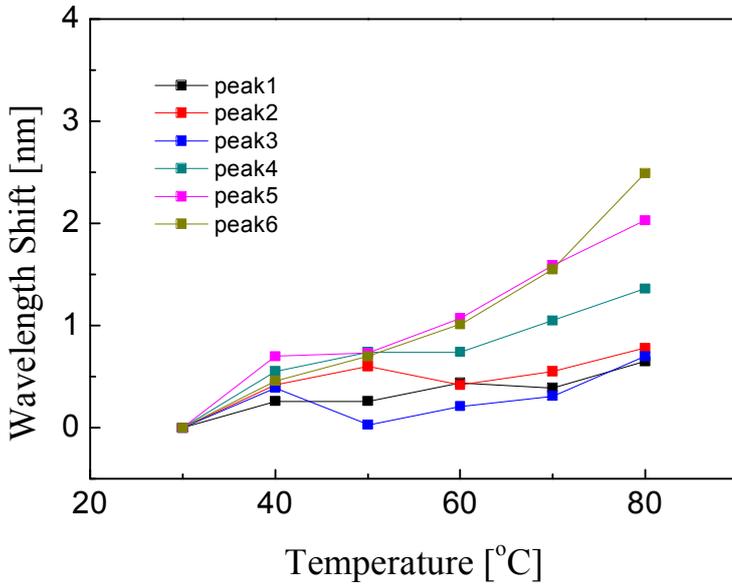


그림 3-10(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화(상대습도 40% 고정)

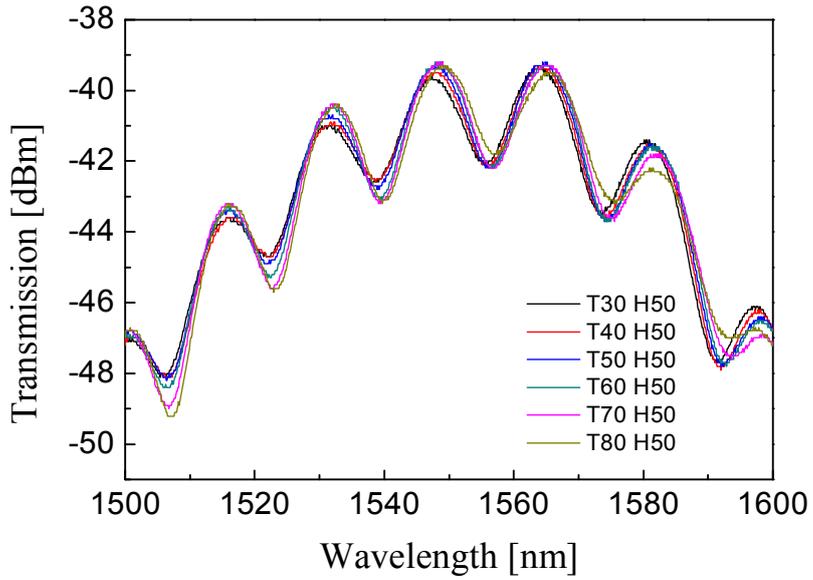


그림 3-11(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 50% 고정)

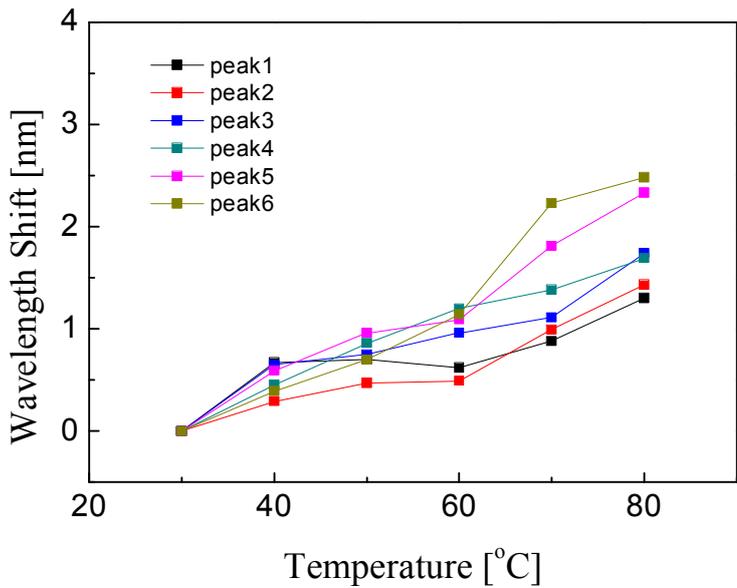


그림 3-11(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화(상대습도 50% 고정)

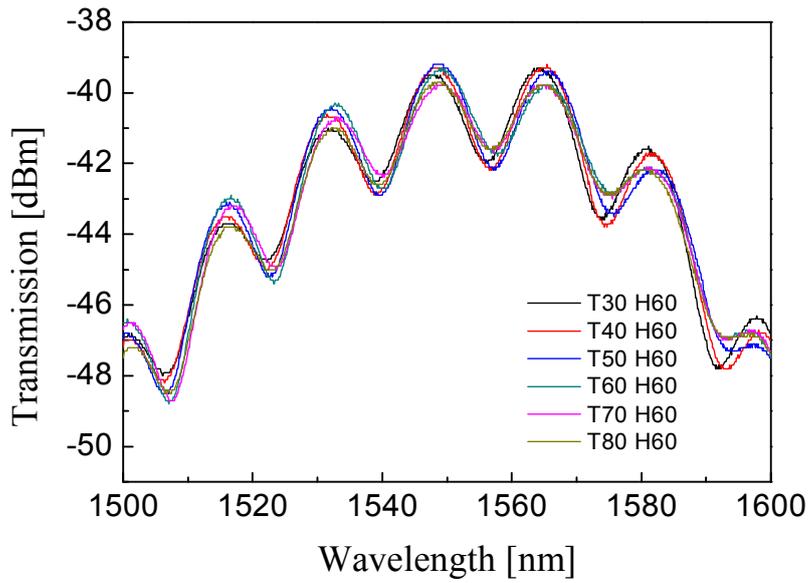


그림 3-12(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 60% 고정)

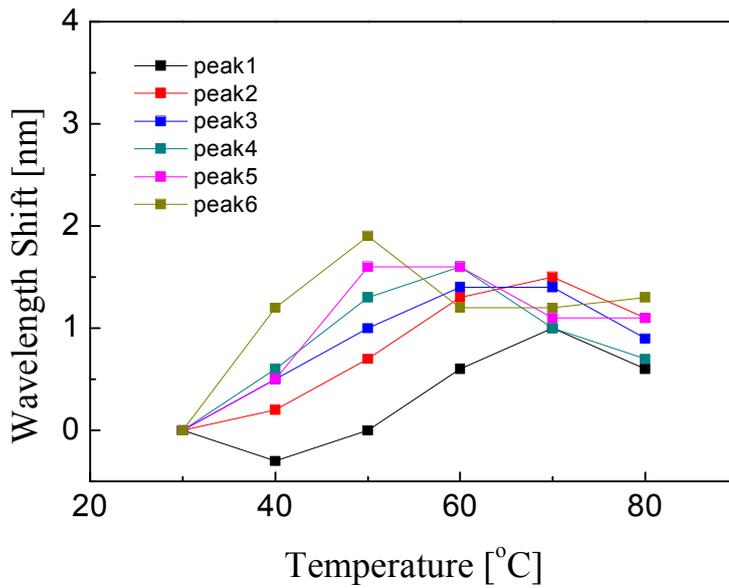


그림 3-12(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화(상대습도 60% 고정)

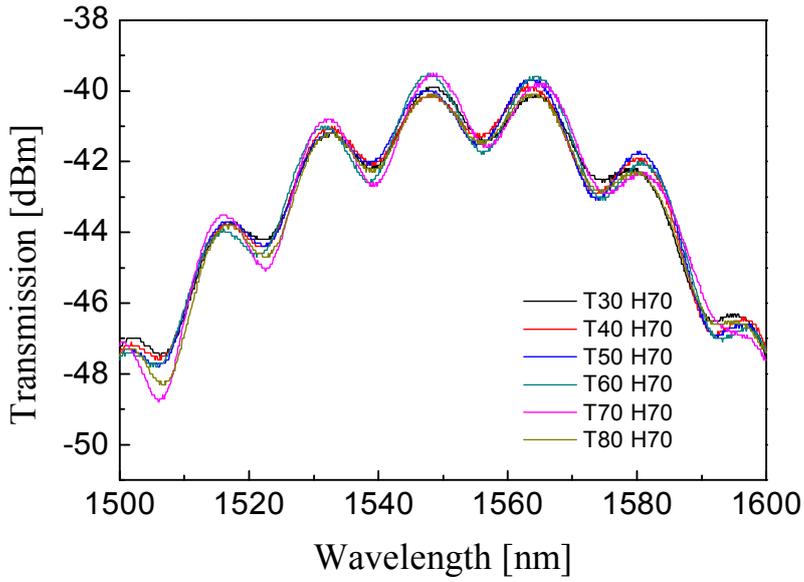


그림 3-13(a). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 스펙트럼 (상대습도 70% 고정)

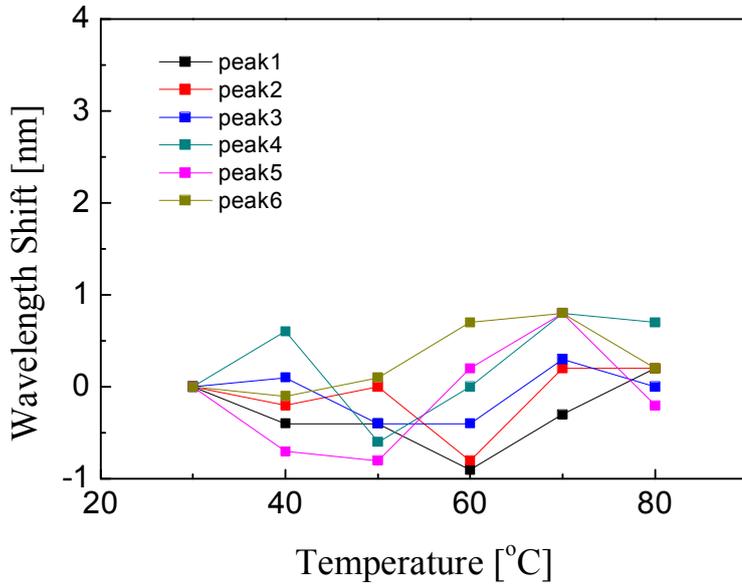


그림 3-13(b). 온도변화(30 ~ 80°C)에 따른 파장 변화 (상대습도 70% 고정)

표 3-1. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 20% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	0.47	0.78	0.20	0	-0.05	-0.08
50℃	0.44	0.39	-0.19	-0.16	-0.18	-0.16
60℃	0.31	0.24	-0.29	-0.21	0.05	0.34
70℃	0.42	0.42	0.07	0.12	0.34	0.57
80℃	0.65	0.76	0.39	0.36	0.88	<b>1.28</b>

표 3-2. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 30% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	1.14	1.04	1.40	1.15	1.17	0.88
50℃	1.92	1.51	1.61	1.64	1.64	1.58
60℃	2.03	1.69	1.92	1.90	2.23	1.95
70℃	2.10	1.95	2.28	2.39	2.86	2.65
80℃	2.13	2.39	2.28	2.83	<b>3.38</b>	3.27

표 3-3. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 40% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	0.67	0.29	0.65	0.45	0.59	0.39
50℃	0.70	0.47	0.75	0.86	0.96	0.70
60℃	0.62	0.49	0.96	1.20	1.09	1.14
70℃	0.88	0.99	1.11	1.38	1.81	2.23
80℃	1.30	1.43	1.74	1.69	2.33	<b>2.48</b>

표 3-4. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 50% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	0.26	0.42	0.39	0.55	0.70	0.46
50℃	0.26	0.60	0.03	0.74	0.73	0.70
60℃	0.44	0.42	0.21	0.74	1.07	1.01
70℃	0.39	0.55	0.31	1.05	1.59	1.55
80℃	0.65	0.78	0.70	1.36	2.03	<b>2.49</b>

표 3-5. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 60% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	<b>-0.3</b>	0.2	0.5	0.6	0.5	1.2
50℃	0.0	0.7	1.0	1.3	1.6	<b>1.9</b>
60℃	0.6	1.3	1.4	1.6	1.6	1.2
70℃	1.0	1.5	1.4	1.0	1.1	1.2
80℃	0.6	1.1	0.9	0.7	1.1	1.3

표 3-6. 온도변화(30 ~ 80℃)에 따른 파장 변화 (상대습도 70% 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
30℃	0	0	0	0	0	0
40℃	-0.4	-0.2	0.1	0.6	-0.7	-0.1
50℃	-0.4	0.0	-0.4	-0.6	-0.8	0.1
60℃	<b>-0.9</b>	-0.8	-0.4	0.0	0.2	0.7
70℃	-0.3	0.2	0.3	0.8	0.8	<b>0.8</b>
80℃	0.2	0.2	0.0	0.7	-0.2	0.2

## 2. 습도 변화에 따른 스펙트럼 측정

이번에는 MZI PLC 센서 모듈을 항온 항습기 안에 고정하고, 온도를 고정시키고 상대 습도변화에 따라서 투과 스펙트럼을 측정하였다. 아래의 그림 3-14부터 그림 3-19까지, 표 3-7부터 표3-12까지와 같이, 온도는 30 ~ 80℃까지 10℃ 간격으로 변화시켰고, 상대습도는 각각 고정된 온도조건에서 20 ~ 70%까지 10% 간격으로 변화시키면서 OSA를 이용하여 투과 스펙트럼을 측정하였다. 먼저 고정된 온도 환경 조건에서 상대습도 변화에 따른 간섭무늬를 측정하였고 이후에 상대습도 변화에 따른 peak 점들의 파장 변화를 분석하였다.

그림 3-14, 표 3-7에서 보이는 결과는 온도 30℃에서 상대습도 변화에 의한 파장 변화를 보여주고 있다. 이 경우 간섭무늬가 최대 약 3.3 nm 정도 장파장으로 천이되었다. 그림 3-15, 표 3-8은 온도 40℃에서 간섭무늬가 약 2.5 nm 정도 장파장으로 천이됨을 알 수 있었다. 하지만, 상대습도가 60% 이상의 구간에서는 단파장으로 천이됨을 볼 수 있는데, 센서 모듈에 코팅된 PVP가 공기 중 물 분자에 의해 용해되기 시작하여 굴절률이 감소되어 스펙트럼의 변화가 단파장으로 이동한 것으로 예상된다. 그림 3-16, 표 3-9에서 보이듯이 온도 50℃인 경우에는 간섭무늬가 약 2.0 nm 장파장으로 천이하였다. 그림 3-17, 표 3-10에서는 온도 60℃로 고정된 경우로 간섭무늬가 약 1.0 nm가 천이되었다. 그러나 이 두 경우 고온에서 높은 상대습도 구간에서 단파장으로 천이되는 경향이 더 빨라졌다. 이는 고온일수록 높은 상대습도에서 PVP의 습도센서로써 활용도가 떨어짐을 보여주는 결과이다.

마지막으로 그림 3-18과 그림 3-19, 표 3-11과 표 3-12에서 보이는 결과는 온도가 일정한 경우 상대습도 변화에 따라 파장 변화의 개연성이 떨어짐을 보이며, 특히 온도 80℃ 경우에는 상대습도와는 무관하게 PVP가 공기 중의 물분자에 대한 센싱 능력이 매우 둔감함을 보여주고 있다.

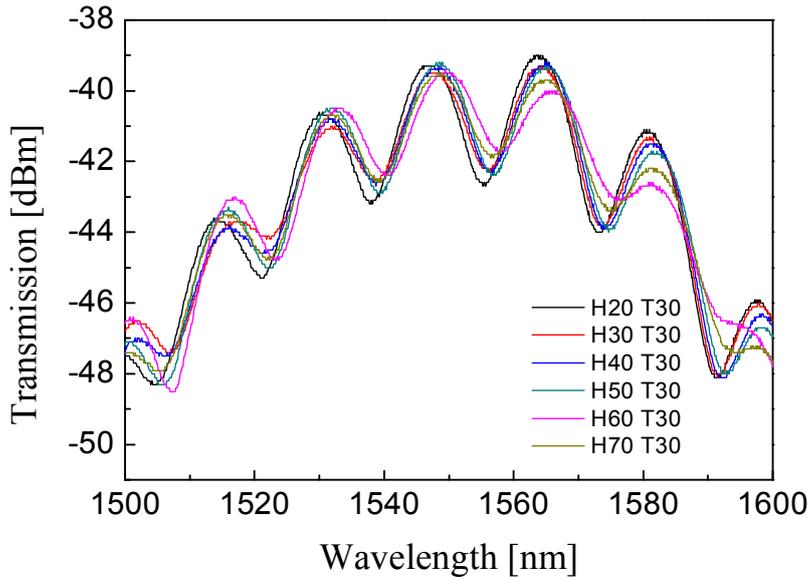


그림 3-14(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 30°C 고정)

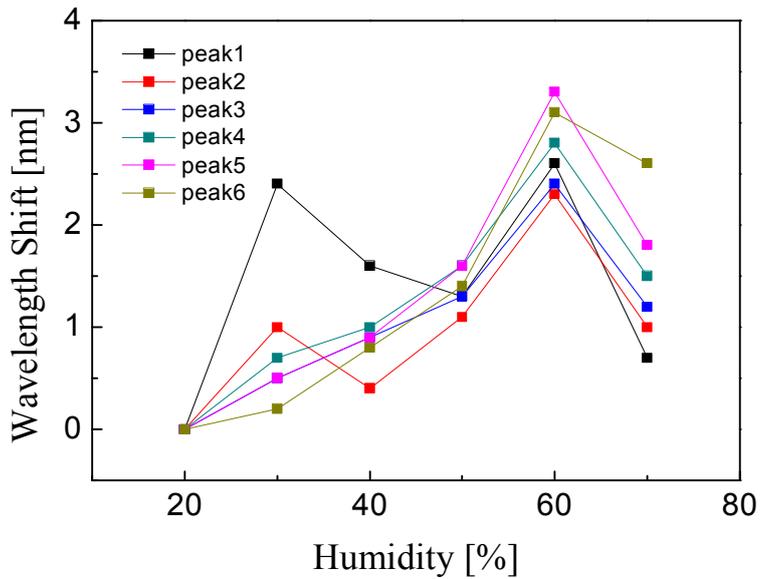


그림 3-14(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 30°C 고정)

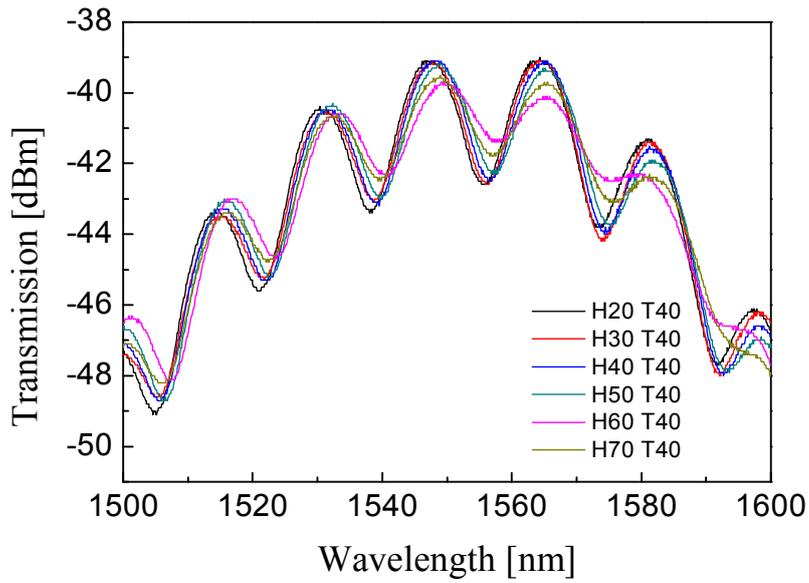


그림 3-15(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 40°C 고정)

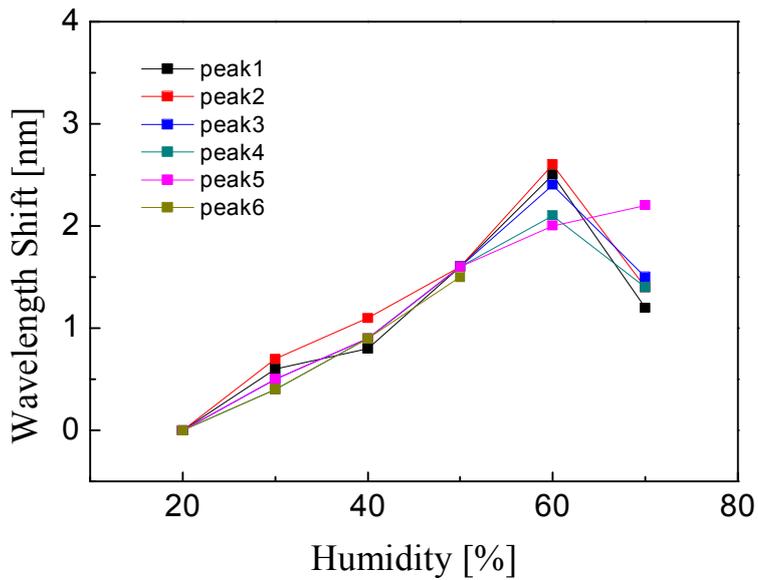


그림 3-15(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 40°C 고정)

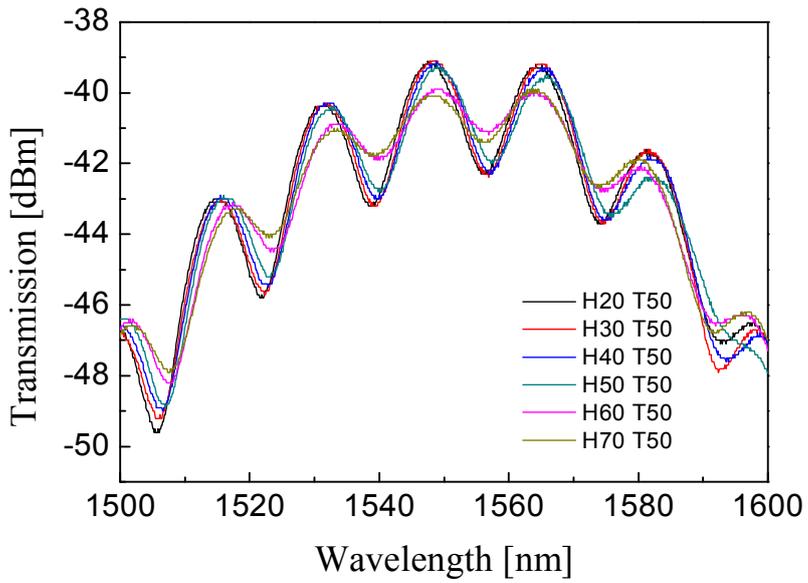


그림 3-16(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 50°C 고정)

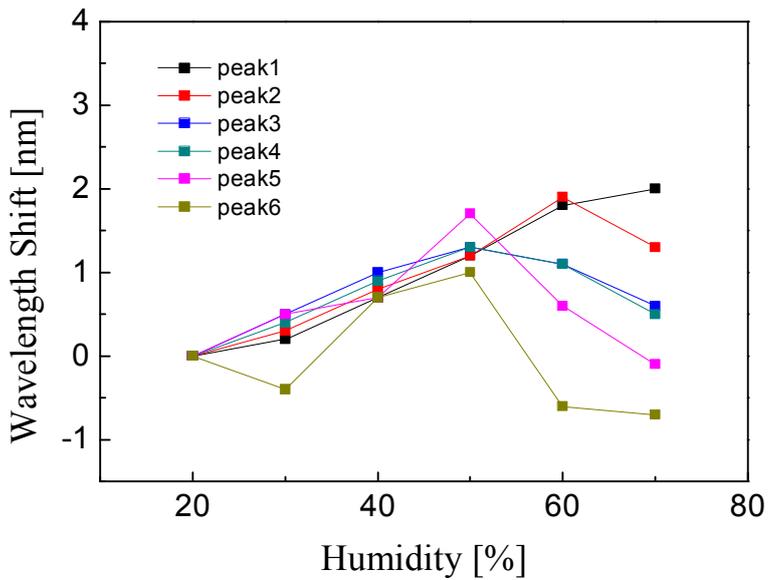


그림 3-16(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 50°C 고정)

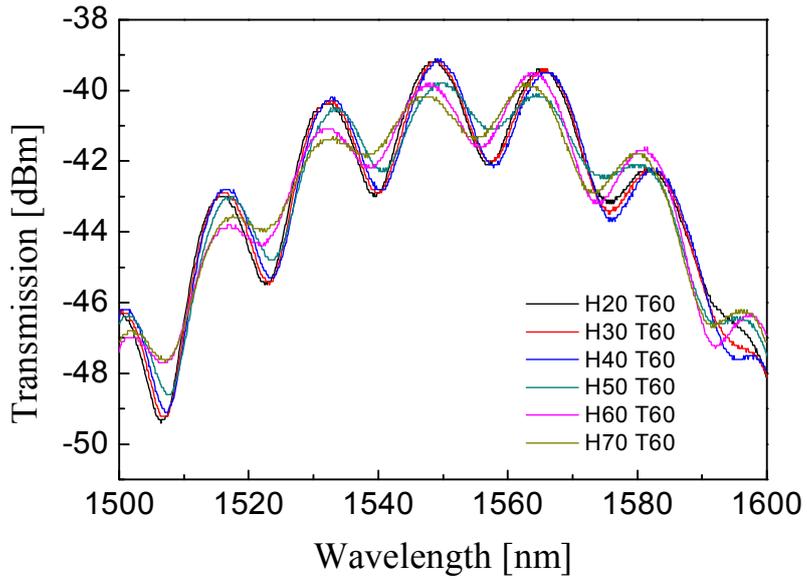


그림 3-17(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 60°C 고정)

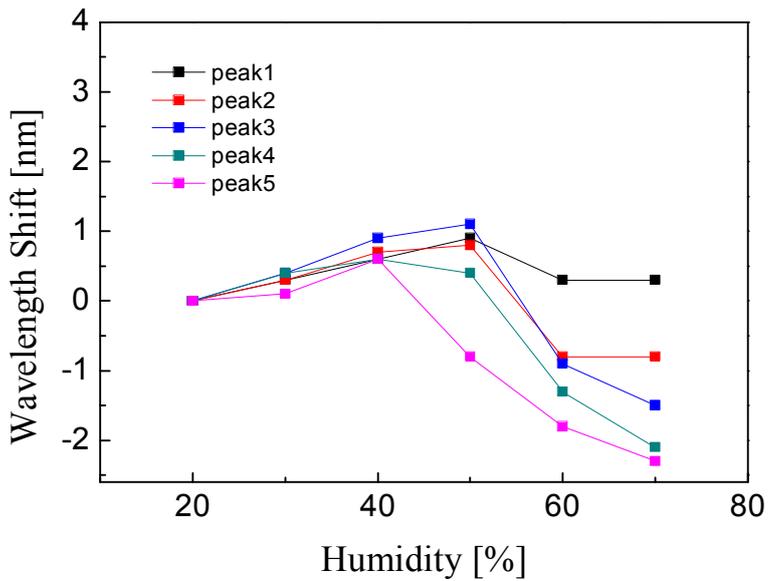


그림 3-17(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 60°C 고정)

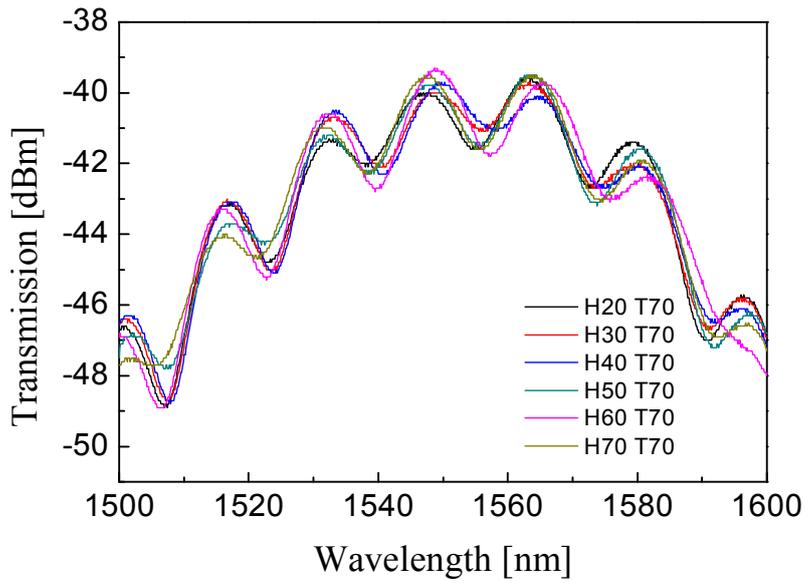


그림 3-18(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 70°C 고정)

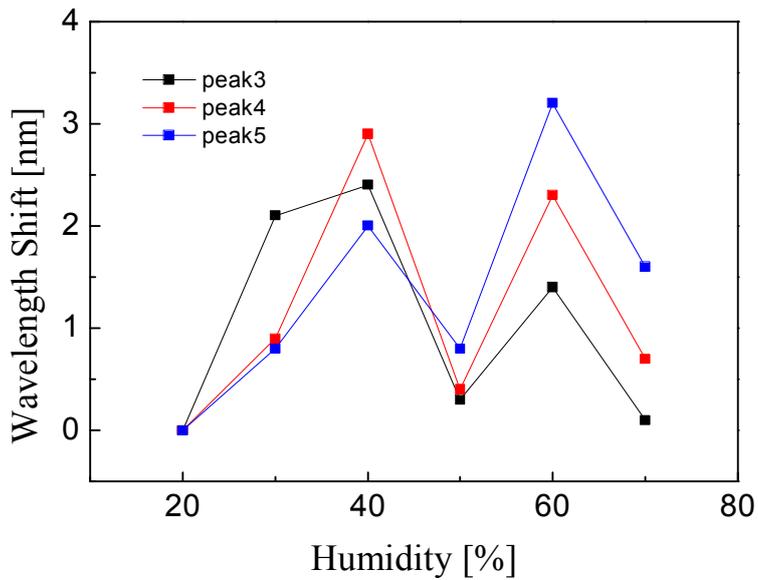


그림 3-18(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 70°C 고정)

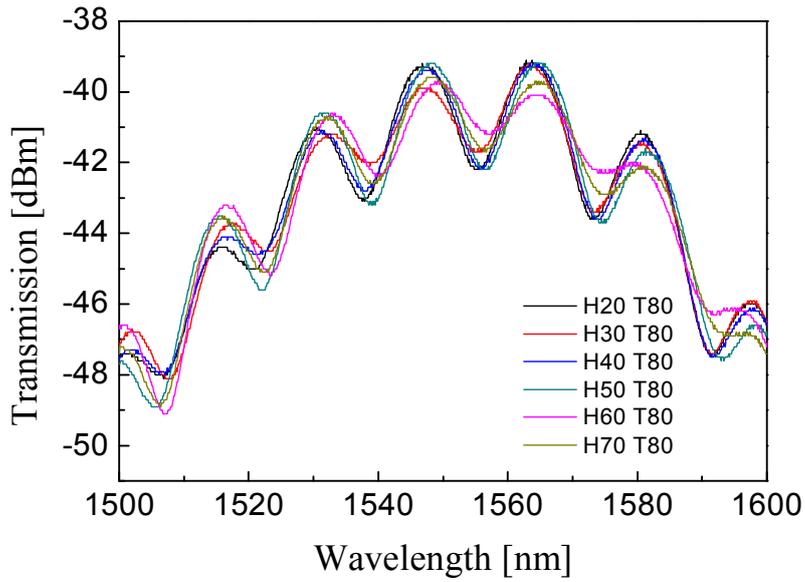


그림 3-19(a). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 스펙트럼 (온도 80°C 고정)

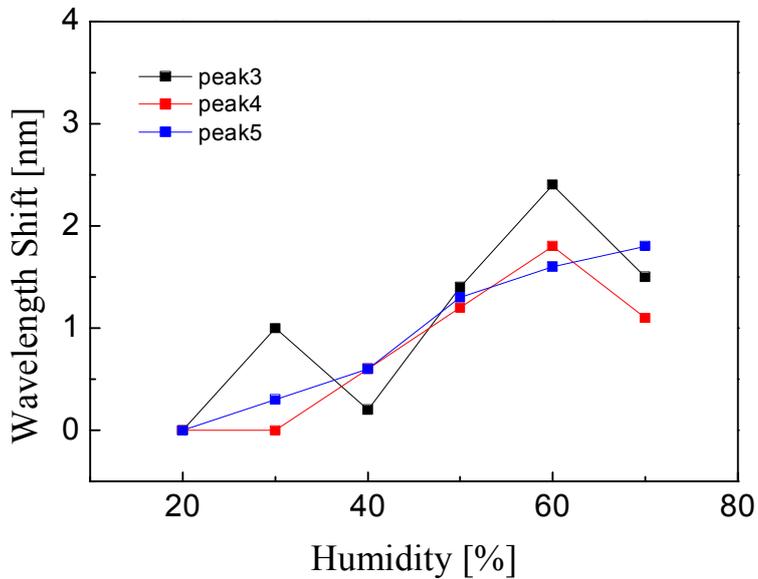


그림 3-19(b). 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화(온도 80°C 고정)

표 3-7. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 30℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	0	0	0	0	0	0
30%	0.6	0.7	0.5	0.4	0.5	0.4
40%	0.8	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9
50%	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.5
60%	2.5	<b>2.6</b>	2.4	2.1	2.0	1.9
70%	1.2	1.4	1.5	1.4	2.2	2.2

표 3-8. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 40℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	0	0	0	0	0	0
30%	2.4	1.0	0.5	0.7	0.5	0.2
40%	1.6	0.4	0.9	1.0	0.9	0.8
50%	1.3	1.1	1.3	1.6	1.6	1.4
60%	2.6	2.3	2.4	2.8	<b>3.3</b>	3.1
70%	0.7	1.0	1.2	1.5	1.8	2.6

표 3-9. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 50℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	0	0	0	0	0	0
30%	0.2	0.3	0.5	0.4	0.5	-0.4
40%	0.7	0.8	1.0	0.9	0.7	0.7
50%	1.2	1.2	1.3	1.3	1.7	1.0
60%	1.8	<b>1.9</b>	1.1	1.1	0.6	-0.6
70%	2.0	1.3	0.5	0.5	-0.1	-0.7

표 3-10. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 60℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	0	0	0	0	0	-
30%	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	-
40%	0.6	0.7	<b>0.9</b>	0.6	0.6	-
50%	<b>0.9</b>	0.8	1.1	0.4	0.4	-
60%	0.3	-0.8	-0.9	-1.3	-1.3	-
70%	0.3	-0.8	-1.5	<b>-2.1</b>	<b>-2.1</b>	-

표 3-11. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 70℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	-	-	0	0	0	-
30%	-	-	1.0	0.0	0.3	-
40%	-	-	0.2	0.6	0.6	-
50%	-	-	1.4	1.2	1.3	-
60%	-	-	<b>2.4</b>	1.8	1.6	-
70%	-	-	1.5	1.1	1.8	-

표 3-12. 상대습도변화(20 ~ 70%)에 따른 파장 변화 (온도 80℃ 고정)

	peak1	peak2	peak3	peak4	peak5	peak6
20%	-	-	0	0	0	-
30%	-	-	2.1	0.9	0.8	-
40%	-	-	2.4	2.9	2.0	-
50%	-	-	0.3	0.4	0.8	-
60%	-	-	1.4	2.3	<b>3.2</b>	-
70%	-	-	0.1	0.7	1.6	-

## 제4장 결과 및 고찰

### 제1절 경화 조건에 따른 스펙트럼 측정 결과 분석

제작된 센서 모듈을 자연경화 조건과 항온항습 조건에서 경화시킨 후 상대습도 변화에 따른 투과 광스펙트럼을 측정하였다. 자연 경화조건은 온도 25℃, 상대습도60% 조건에서 경화된 것이고, 항온항습 조건은 온도 30℃, 상대습도20% 조건에서 경화시킨 것이다. 경화 조건에 따른 스펙트럼에서 보듯이, PVP가 코팅된 습도센서 모듈은 온도와 상대습도가 잘 제어되지 않고, 일정하지 않은 자연경화 조건보다 항온항습 환경에서 경화된 경우 상대습도 변화에 더 민감하게 반응함을 확인할 수 있었다. 자연경화된 조건에서는 PVP가 이미 공기 중에 포함된 수증기와 충분히 반응하였기 때문에 상대습도 변화에 대해서 민감성이 크지 않은 것으로 판단된다. 이 결과를 통해서 PVP의 경화 조건이 센서 제작에 있어서 매우 중요한 요소임을 확인할 수 있었다.

하지만, 그림 3-6(b),(c)를 비교해 보면 80%가 넘는 상대습도에 이르러서는 PVP가 높은 상대습도에서는 민감도가 감소하여 원래의 간섭무늬 형태로 변화됨을 알 수 있다. 또한, PVP는 높은 상대습도 환경(약 80% 이상)에서는 수용성 폴리머이므로 공기 중의 수분에 의해 용해가 시작되어 상대습도 변화의 계측이 어려운 것으로 예상된다. 이 값보다 낮은 상대습도 환경에서는 제안된 센서가 충분히 활용될 수 있을 것으로 보인다. 그림 3-7에서 볼 때, 제안된 센서는 상대습도 40%부터 80% 구간에서는 광세기가 선형에 가깝게 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 30% 이하의 습도 구간에서는 광세기 변화가 매우 급격하게 일어나므로, 광세기 측정만으로도 매우 정확도로 상대습도 변화의 측정이 가능할 것으로 예상된다.

## 제2절 온·습도 변화에 따른 스펙트럼 측정 결과 분석

본 논문에서는 MZI PLC에 PVP를 코팅하여 센서모듈을 제작하였고, 온·습도 변화에 따른 투과 광스펙트럼 측정 결과를 통하여 제안된 MZI PLC 습도센서가 습도 측정에 적절하게 이용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 측정된 스펙트럼을 보면 온도와 상대습도 변화에 따라 PVP의 굴절률이 바뀌고, 굴절률의 변화로 인해 간섭계의 위상천이 및 간섭무늬의 변화가 발생하는 것으로 설명하고자 하였다.

그림 3-20에서 보이듯이, 고정된 상대습도에서 온도를 변화시킨 경우, 상대습도가 20% 온도변화에 따라서 스펙트럼이 장파장 쪽으로 천이되는 경향성을 보였다. 이러한 경향은 상대습도 60% 정도까지 나타났다. 하지만 상대습도 70% 경우에는 이러한 경향성을 보이지 않고 파장 천이의 특성을 나타내지 못하였다. 그림 3-21은 온도를 고정시키고 상대 습도를 변화시킨 경우 스펙트럼의 변화를 분석한 결과이다. 전체적으로 저습환경에서는 파장 천이의 선형성을 볼 수 있었고, 고습환경으로 갈수록 이러한 선형성이 증가하는 것이 아니고 역으로 발생하여 단파장으로 발생함을 알 수 있었다. 다시 말해, 저습환경에서는 온·습도가 증가함에 따라 파장 천이가 장파장으로 발생하는 것을 알 수 있었다. 하지만, 고습환경에 이르러서는 저습환경보다 스펙트럼 천이가 단파장쪽으로 정도가 적게 발생하며, 고온으로 갈수록 스펙트럼 천이에 대한 개연성이 없는 것을 확인할 수 있었다. 이를 해결하기 위해서는 높은 상대습도에서도 민감도가 저해되는 것을 방지할 수 있는 PVP와 잘 반응하는 다른 폴리머 재료를 함께 사용하는 방법이 있다. 다만, 다른 폴리머 재료와 함께 사용하는 경우에 습도에 대한 반응성이 낮아질 것으로 예상됨에 따라 추가적인 실험을 통해 최적의 혼합 비율을 선정해야 할 것이다. 본 실험에서 구현된 PVP를 이용한 PLC 기반 습도센서는 일정 상대습도 구간(40% ~ 80%)에서 계측하는데 유용하며, PVP 이외의 다른 흡습성 폴리머를 함께 사용하면 습도에 대한 센서 특성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

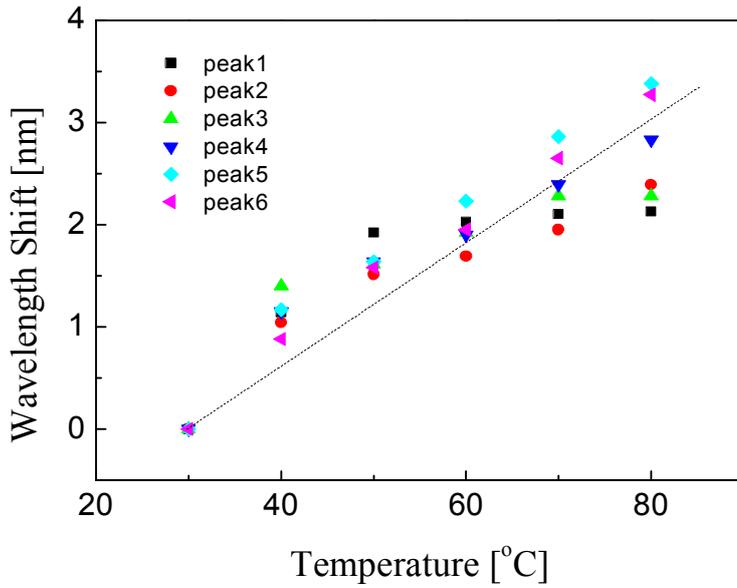


그림 3-20(a). 온도 변화에 대한 파장 변이(상대습도 20% 고정)

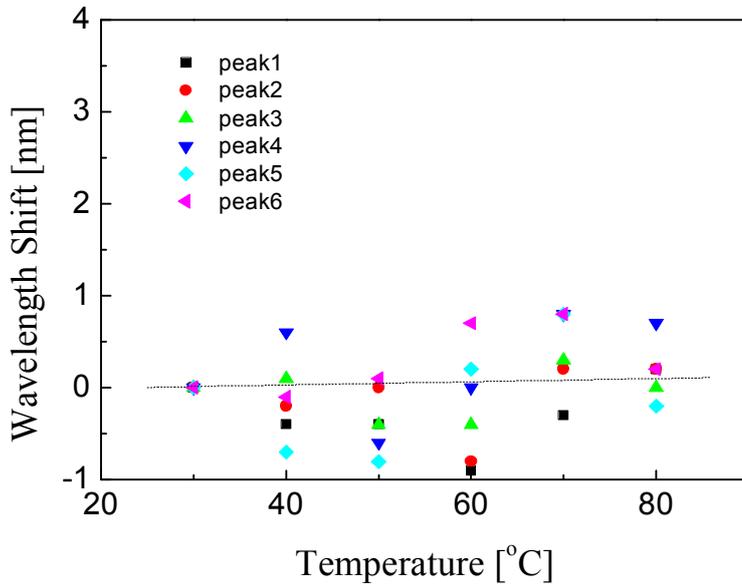


그림 3-20(b). 온도 변화에 대한 파장 변이(상대습도 70% 고정)

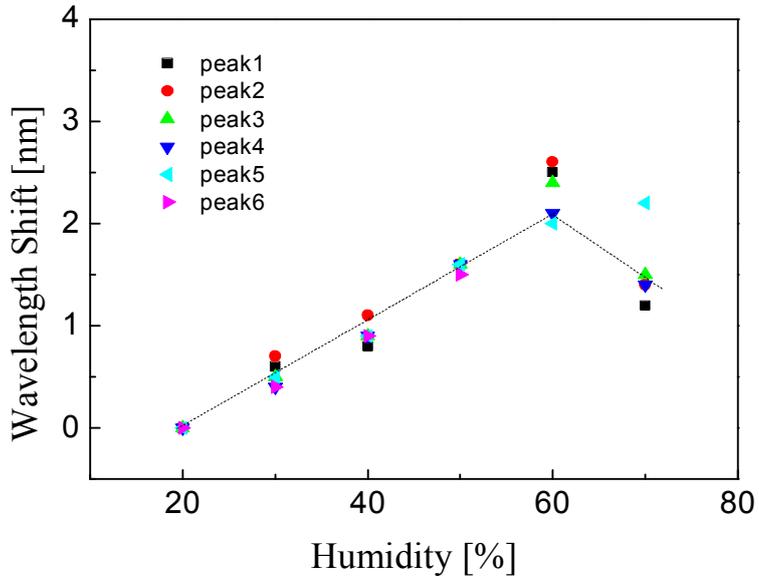


그림 3-21(a). 상대습도 변화에 대한 파장 변이(온도 40°C 고정)

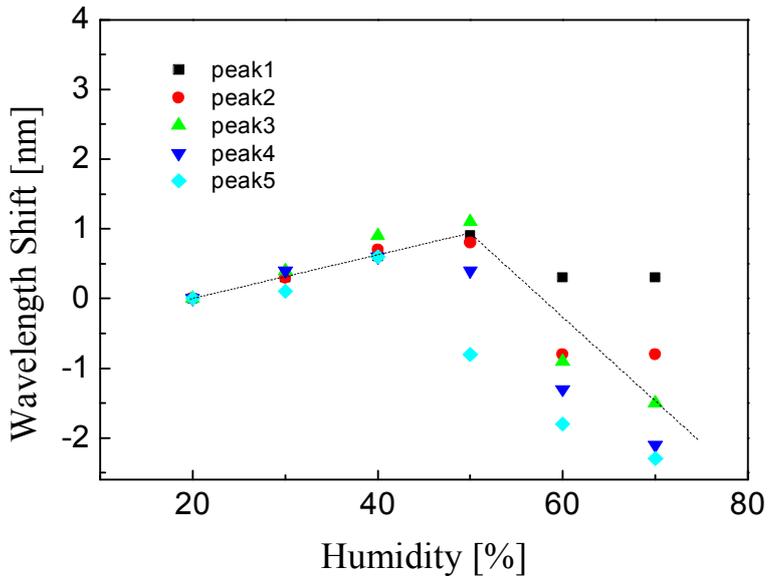


그림 3-21(b). 상대습도 변화에 대한 파장 변이(온도 60°C 고정)

## 제 5장 결론

흡습성을 가지는 PVP를 습도 감지물질로써 사용하여 PLC상에 형성된 마하젠더 간섭계의 한쪽 팔을 식각 후 PVP 코팅하여 상대습도 변화에 민감한 습도센서를 제작하였다. 제작된 센서 모듈은 PVP의 상대습도에 따른 굴절률 변화에 의해서 투과 광 스펙트럼의 파장 천이를 나타내었고, 이를 통해서 상대습도 변화에 대한 특성을 계측할 수 있었다. 실험 결과, 항온항습경화(온도 30℃, 상대습도20%) 조건이 자연경화 조건(온도 25℃, 상대습도60%)보다 상대습도 변화에 더 민감하게 반응하였고, 광세기만을 측정 한 결과, 상대습도 40~80% 구간에서 선형성이 유지됨을 알 수 있었다.

그리고, 온도 특성 실험을 통하여 온도 증가에 따라 장파장으로 이동함을 알 수 있었고, 상대습도가 높은 환경에서 PVP 용해로 인해 민감성이 감소하여 파장의 변화가 감소함을 알 수 있었다. 상대습도 특성 실험에서는 상대습도 증가에 따라 장파장으로 이동함을 알 수 있었지만, 높은 상대습도 구간에서는 PVP가 공기 중 물 분자에 의해 용해되어, 굴절률이 감소하고 스펙트럼이 단파장으로 이동함을 알 수 있었다. 이는 온도가 증가할수록 PVP가 더 빨리 용해되어 더 낮은 상대습도 구간에서도 단파장으로 이동함을 알 수 있었다.

본 실험에서는 PVP 단일 물질만을 코팅하여 사용하였지만 아크릴레이트, 폴리이미드, 셀룰로오스 등의 습도 민감성 물질과 혼합하여 사용하게 된다면 실험결과에서 제시된 단점들을 극복할 수 있을 것으로 예상되며, 보다 넓은 범위에 걸쳐 주변 습도상태를 민감하게 감지할 것으로 기대된다. 또한, 신호 안정화를 위해 실험과정에서 항온항습 유지시간과 경화조건을 다양하게 고려한다면 보다 정확한 습도센서로써의 활용이 가능하다고 생각된다.

PLC 기반 습도센서는 기존 광섬유 기반 습도센서에 비해 대량 생산이 가능하여 저가의 습도센서를 구현할 수 있는 장점을 가지고, 취급상의 안전성과 편리함의 장점을 가

질 수 있다. 그리고 센서 헤드 부분의 노출로 인해 높은 감도 특성을 가질 수 있으므로 습도 모니터링이 필요한 다양한 응용분야에서 활용도가 클 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- [1] K. R. Sohn, K. T. Kim, and J. W. Song, “Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass overlay-waveguide” , *Sens. Actuators*, 101, 2002, pp. 137-142.
- [2] J. M. Corres, F. J. Arregui, and I. R. Matias, “Design of humidity sensors based on tapered optical fibers” , *J. Light. Technol*, 24, 2006, pp. 4329-4336.
- [3] Q. Wu, Y. Semenova, J. Mathew, P. Wang, and G. Farrell, “Humidity sensor based on a single-mode hetero-core fiber structure” , *Opt. Lett*, 36, 2011, pp. 1754-1754.
- [4] S. Muto, O. Suzuki, T. Amano, and M. Morisawa, “A plastic optical fiber sensor for real-time humidity monitoring” , *Meas. Sci. Technol*, 14, 2003, pp. 746-750.
- [5] P. Kronenberg, P. K. Rastogi, P. Giaccari, and H. H. Limberger, “Relative humidity sensor with optical fiber Bragg grating” , *Opt. Lett*, 27, 2002, pp. 1385-1387.
- [6] T. L. Yeo, T. Suna, L. T. V. Grattan, D. Parry, R. Lade, and B. D. Powell, “Characterization of a polymer-coated fiber Bragg grating sensor for

relative humidity sensing” , Sens. Actuators. B. Chem, 2005, vol.110, pp. 148-155.

- [7] Hao. Wang, Honglei. Guo, Gaozhi. Xiao, Nezh. Mrad, Alex. Kazemi, et al, “Phase-shifted fiber-Bragg-grating-based humidity sensor” , Proc. SPIE 8720. Photonic Applications for Aerospace. Commercial and Harsh Environments IV, 2013, pp. 872019.
- [8] M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas, N. Madanopoulos, and N. A. Vainos, “Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide) cobalt chloride coating” , Appl. Opt, 2006, vol. 45, pp. 4567-4571.
- [9] L. M. Hu, C. C. Chan, X. Y. Dong, Y. P. Wang, P. Zu, W. C. Wong, W. W. Qian, and T. Li, “Photonic crystal fiber strain sensor based on modified Mach-Zehnder interferometer” , IEEE Photon. J, 2012, vol. 4, pp. 114-118.
- [10] Tao Li, Xinyong Dong, Chi Chiu Chan, Kai Ni, Shuzin Zhang, and Perry Ping Shum, “Humidity Sensor With a PVA-Coated Photonic Crystal Fiber Interferometer” , IEEE Sensors. J, 2013, vol. 13.
- [11] F. Prieto, B. Sepulveda, A. Calle, A. Liobera, C. Dominguez, L. M. Lechuga, “Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications” , Sens. Actuators, B. Chem, 2003, vol. 92, pp. 151-158.

- [12] Busse S, Depaoli M, Wenz G and Mittler S, “An integrated optical Mach-Zehnder interferometer functionalized by  $\beta$ -cyclodextrin to monitor binding reactions” , Sens. Actuators, B. Chem, 2001, vol. 80, pp. 116-124.
- [13] Himeno. A, Kato. K, Miya. T, “Silica-based planar lightwave circuits” , Selected Topics in Quantum Electronics. IEEE Journal of, 1998, vol. 4, pp. 913-924.
- [14] Kent A. Murphy, Machael F. Gunther, Ashish M. Vengsarkar, and Richard O. Claus, “Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-perot optical fiber sensors” , Optics. Lett, 1991, vol. 16, Issue 4, pp.273-275.
- [15] Anbo Wang, Hai Xiao, J. Wang, Zhiyong Wang, W. Zhao, and R. G. May, “Self-Calibrated Interferometric-Intensity-Based Optical Fiber Sensors” , Journal of Lightwave Tech, 2001, vol. 19, Issue 10, pp. 1495.
- [16] Brooks J, Moslehi B, B. Y. Kim, Shaw. H. J, “Time-domain addressing of remote fiber-optic interferometric sensor arrays” , Journal of Lightwave Tech, 1987, vo l.5, Issue 7, pp. 1014-1023.
- [17] A. Charaz, B. E. Jones, “A distributed optical-fibre sensing system for multi-point humidity measurement” , Sens. Actuators, A. Physical, 1995, vol. 47, pp. 491-493.
- [18] Yuelan Lu, Tao Zhu, Liang Chen, Xiaoyi Bao, “Distributed vibration sensor

based on coherent detection of Phase-OTDR” , Lightwave Tech., 2010, vol. 28, pp. 3243-3249.

[19] 안태완, "고분자 화학", 문운당, 1992, 제 5 장.

[20] A. W. Snyder, J. D. Love, "Optical Waveguide Theory" , London NewYork Chapman and Hall, 1983, pp. 589-666.

[21] 김창민, "도파 및 직접광학" , Ohm사, 1999, pp. 165-279.

[22] N. Imoto, N. Shimizu, H. Mori, M. Ikeda, "Sputtered Silica Waveguides with an Embedded Three-dimensional Structure" , J. Lightwave Tech. 1993, LT-1(1), pp. 289-294.

[23] D. M. Manos, D. L. Flamm, "Plasma Etching an Introduction" , Academic Press, New York, 1989, pp. 91-99.

[24] 정영윤, "화염가수분해 증착법에 의한 붕소첨가 실리카 도파로의 제작 및 특성 연구" , 박사학위논문, 1996.

[25] 이종덕, "실리콘 집적회로 공정기술" , 대영사, 1996, pp. 271-284, 303-316.

[26] M. Morisawa, H. Yokomori, "Effect of doping swelling polymer cladding with phthalocyanine dye in optical fiber humidity sensor" , Proc of SPIE, 2011, vol. 7753, 77534F-1.

# Publication

## Journal Papers

1. 김주하, 김명진, 정은주, 황성환, 이우진, 최은서, 노병섭. “폴리비닐피롤리돈이 코팅된 마하젠더 간섭계 기반의 평판형 광도파로 습도센서,” 한국광학회, vol. 24, no. 5, pp. 251-255, 2013.

## Conference Papers

1. 김주하, 김명진, 정은주, 최은서, 노병섭, “Humidity sensor using PVP-coated optical planar waveguide”, 종합학술대회(한국센서학회), pp. 76-76, 2013.

2. 김주하, 정은주, 김명진, 최은서, 노병섭, “평판형 광도파로 기반의 마젠더 간섭형 센서를 이용한 온도 측정”, 20주년 광전자 및 광통신 학술회의(C00C), pp. 317-318, 2013.

3. 정은주, 이우진, 김명진, 황성환, 김계원, 안종배, 김주하, 노병섭, 선민영, “광섬유 패치코드 기반 온도 측정 센서”, 20주년 광전자 및 광통신 학술회의(C00C), 2013.

4. 이승석, 김주하, 최은서, 박형주, “광섬유 광학계를 이용한 SD-OCT 시스템”, 20

주년 광전자 및 광통신 학술회의(C00C), pp. 274-276, 2013.

5. 이승석, 김주하, 박형주, 김현식, 김상우, 김옥준, 최홍란, 최은서, “PZT 스캐너를 이용한 OCT영상 획득”, 20주년 광전자 및 광통신 학술회의(C00C), pp. 269-271, 2013.

6. 마혜준, 이승석, 김주하, 신용진, 최은서, “미세 단층촬영기법을 이용한 박막의 두께 측정”, 가을학술논문발표회(한국물리학회), pp. 149-149, 2013.

7. 김주하, 이승석, 최은서, “이중 슬릿을 이용한 광학적 두께 측정법”, 하계학술발표회(한국광학회), pp. 27-27, 2013.

8. 김명진, 정은주, 이우진, 황성환, 노병섭, 김주하, 최은서, “스크래치된 플라스틱 광섬유를 이용한 아크플래시 센서”, 동계학술발표회(한국광학회), 2013.

9. 최은서, 이승석, 김주하, 김현식, 박형주, “회절격자 기반의 광단층영상기법 성능 향상을 위한 Background noise 제거방법:Proof-Of-Concept 실험”, 봄학술논문발표회(한국물리학회), pp. 172-173, 2013.

10. 최은서, 이승석, 김주하, 김현식, 박형주, “Phase-sensitive interferometer를 이용한 광섬유 굴절을 분포 영상화”, 가을학술논문발표회(한국물리학회), pp. 136-136, 2012.

11. 최은서, 마혜준, 이승석, 김주하, “광섬유 커플러를 이용한 full-field optical coherence tomography 개발 및 특성평가”, 봄학술논문발표회(한국물리학회), pp.

180-180, 2012.

12. 최은서, 마혜준, 이승석, 김주하, 김현식, “광분산기를 이용한 공초점 현미경 구현”, 하계학술발표회(한국광학회), pp. 43-43, 2012.

13. 신용진, 최은서, 마혜준, 이승석, 김주하, “광영상기법을 이용한 도광판 가공조건 연구”, 제 19회 광전자 및 광통신 학술회의(COOC), pp. 10-10, 2012.

14. 신용진, 최은서, 이승석, 김주하, “LED 조명시스템에서 도광판의 산란패턴 설계”, 가을학술논문발표회(한국물리학회), pp. 136-136, 2012.