



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)

2019년 2월
석사학위논문

광섬유 다중 반사 간섭을 이용한 액체의 증발 속도 센서

조선대학교 대학원

광기술훈학과

임옥락

광섬유 다중 반사 간섭을 이용한 액체의 증발 속도 센서

Evaporation Rate Sensor For Liquids Using Fiber Optic
Multiple Reflection Interference

2019년 2월 25일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

임 옥 락

광섬유 다중 반사 간섭을 이용한 액체의 증발 속도 센서

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2018년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

임 옥 락

임 옥 락의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 진 태 인

위 원 조선대학교 교수 김 현 수 인

위 원 조선대학교 교수 안 태 정 인

2018년 11월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
제2장 이 론	4
제1절 광섬유 센서	4
1. 광섬유 센서 원리와 종류	4
2. 광섬유 센서 장점 및 응용분야	8
제2절 증발속도 측정법	12
1. 증발 속도	12
2. 기존 증발속도 측정법	14
3. 광기술 기반 증발속도 측정법	18
4. 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 측정원리	21
제3장 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 센서실험	28
제1절 용액의 굴절률 및 흡수계수 측정	28
1. 용액의 흡수계수 측정	28
2. 증발속도 측정을 위한 굴절률 측정	35
제2절 증발속도 측정연구	41
1. 증발속도 측정센서 구성	41
2. 증발속도 측정센서 실험 및 결과	52
제3절 Ferrule 끝단의 변형에 따른 증발속도 안전성 실험	61

제4장 분 석	67
제1절 측정의 신뢰성 분석	67
제2절 Hilbert 변환을 이용한 증발속도 측정	71
제3절 향후 연구 계획	87
제5장 결 론	88

[참고문헌]

[감사의 말씀]

표 목 차

표 2.1 광섬유 센서 기술의 분류 -----	7
표 2.2 광섬유의 특징과 센서로서의 이점 -----	9
표 2.3 각종 광섬유 센서의 방식과 응용 예 -----	10
표 3.1 MSLD-3 Laser Diode Driver 사양 -----	47
표 3.2 PDA30B-EC - Ge Switchable Gain Photodetector 사양 -----	49
표 3.3 Ethanol 용액의 성분표 -----	51

그림 목 차

그림 1.1 (a) '00~06'년 화학물질 사고발생 현황과 유독물 유통현황, (b) 사고원인 화학물질 현황, (c) 화학물질 사고 인명피해 현황	3
그림 2.1 광섬유 센서의 기본 구조	6
그림 2.2 세계의 광섬유 센서 시장 예측	11
그림 2.3 물(액체)의 증발	13
그림 2.4 압력을 가한 조건에서 물방울의 증발을 측정학 위한 장비 개략도	15
그림 2.5 디지털화된 물방울의 이미지 개략도	15
그림 2.6 저수지의 증발속도 측정을 위한 증발속도 접시	16
그림 2.7 증발속도를 측정하기 위한 실험 구성	17
그림 2.8 Ethanol의 증발시간에 따른 질량 손실	17
그림 2.9 (a) ~ (g)두 개의 광섬유사이에 용액의 증발에 따른 적색광의 전파손실	19
그림 2.10 Acetone, Ethanol, Hexane 용액의 증발에 대한 전송 손실	19
그림 2.11 (a) 용액에 절단된 광섬유 끝단을 찍었을 때 형성된 물방울의 예상모형, (b) 각 용액에 따른 수집된 시간의 함수로 반사된 간섭무늬	20
그림 2.12 광섬유 코어 끝단의 물방울에 대한 다중 반사원리	24
그림 2.13 박막 내의 다중 반사원리	25
그림 2.14 파장에 따른 DI Water의 흡수계수	26
그림 2.15 (a) 물방울 두께변화에 따른 광섬유 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬 시뮬레이션, (b) 광학 손실변화에 따른 광섬유 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬 시뮬레이션	27
그림 3.1 흡수 계수를 측정하기 위한 실험구성	30
그림 3.2 Laser diode의 온도변화에 따른 출력 광의 중심파장 변화	31
그림 3.3 Laser diode의 중심파장에 따른 DI Water와 Ethanol의 흡수 계수	32
그림 3.4 DI Water 용액의 흡수계수를 적용한 시뮬레이션 비교 (a) 측정된 결과와 (b) 시뮬레이션 결과	33

그림 3.5 용액 물방울의 위치에 의한 결합 손실	34
그림 3.6 Ferrule 위에 용액이 떨어지면 생기는 반사강도 변화	38
그림 3.7 SMF-28의 코어의 굴절률	39
그림 3.8 (a) Ferrule 위에 DI Water가 떨어지면 생기는 반사강도 변화, (b) Ferrule 위에 Ethanol가 떨어지면 생기는 반사강도 변화, (c) Ferrule 위에 DI Water + Ethanol가 떨어지면 생기는 반사강도 변화	40
그림 3.9 증발속도의 영향을 주는 환경을 조절하기 위한 아크릴 상자	43
그림 3.10 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 측정실험을 위한 광학계 구성	44
그림 3.11 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 측정실험 구성	45
그림 3.12 MSLD-3 Laser Diode Driver와 전류, 온도 조절부분	46
그림 3.13 MSLD-3 Laser Diode Driver의 중심과장 그래프	48
그림 3.14 PDA30B-EC - Ge Switchable Gain Photodetector	49
그림 3.15 증발에 의한 일정한 물방울의 변화를 위한 수평조절 방법	50
그림 3.16 DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭 무늬	55
그림 3.17 (a)DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환	56
그림 3.18 Ethanol 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭 무늬	57
그림 3.19 (a) Ethanol 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환	58
그림 3.20 DI Water와 Ethanol 혼합용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬	59
그림 3.21 (a) DI Water+Ethanol 혼합용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환	60
그림 3.22 용액의 증발에 따른 물방울의 위치변화에 의한 결합 손실	62
그림 3.23 (a) 일반 광패치코드 Ferrule, (b) 불산에 의한 광섬유와 Ferrule사이에 흠이 형성예상, (c) 아세톤에 의한 Ferrule 위 단면 식각, (d) 광섬유 부분이	

Ferrule 안쪽에 형성되게 제작----- 63

그림 3.24 (a) 일반 광패치코드의 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (b) 불산에 식각된 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (c) 아세톤에 식각된 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (d) 제작된 광패치코드의 Ferrule 위 단면의 깊이측정 ----- 64

그림 3.25 (a) Ferrule의 수평이 어긋남에 따른 반사광의 간섭무늬, (b) 불산 용액에 식각된 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (c) 아세톤 용액에 식각된 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (d) 제작된 광 패치코드 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (e) 수평자를 통한 Ferrule의 수평조절 후 반사광 간섭무늬 -- 65

그림 3.26 수평자를 통해 수평이 맞춰진 Mirror를 이용한 Ferrule의 수평조정 ----- 66

그림 4.1 (a) DI Water 용액에 대한 반복실험을 통한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에 각 주파수에 대한 증발속도 ----- 69

그림 4.2 Ferrule 끝단에 형성한 DI Water의 초기 물방울 두께 ----- 70

그림 4.3 (a) 정현파 형태의 신호 파형, (b) (a)신호의 Hilbert 변환변환(점선), (c) 신호의 시간에 따른 톱니 형태의 위상 변화, (d) 시간 t 에 대한 비선형 위상변화 ----- 75

그림 4.4 Ferrule 끝단 광섬유 코어-용액 사이의 계면과 용액-대기 사이의 계면에서 반사된 광의 위상 ----- 76

그림 4.5 (a) DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도에 대한 간섭무늬 부분, (b) (a)에 대한 푸리의 변환 ----- 77

그림 4.6 (a)직류신호를 제거 후 남은 교류신호에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 간섭무늬, (b) DI Water에 대한 비선형 위상변화 ----- 78

그림 4.7 a)위상변화를 이용한 시간에 따른 DI Water의 증발속도, (b) 필터를 통해 노이즈를 제거한 DI Water의 증발속도 ----- 79

그림 4.8 증발시간에 따른 각 용액의 위상변화 ----- 80

그림 4.9 (a) 증발시간에 따른 DI Water의 증발속도 (점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과 ----- 81

그림 4.10 그림 4.10 (a) 증발시간에 따른 Ethanol의 증발속도(점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과 ----- 82

그림 4.11 (a) 증발시간에 따른 혼합용액(DI+Eth)의 증발속도, (점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 혼합용액의 증발속도 측정 결과----- 83

그림 4.12 DI Water 용액에 대한 반복실험 위상변화----- 84

그림 4.13 DI Water 용액에 대한 반복실험의 증발시간에 따른 증발속도 (점선: 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과)----- 85

그림 4.14 증발시간에 따른 질량단위의 증발속도----- 86

ABSTRACT

Evaporation Rate Sensor For Liquids Using Fiber Optic Multiple Reflection Interference

Ok Rak Lim

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, an evaporation rate measurement method based on multiple reflection interference using a simple fiber optic configuration is proposed. The evaporation rate is a major factor in accident prevention and is used in various industrial, chemical, biotechnological, and biological fields. In this study, the refractive index of a liquid under an evaporation test is critical to measuring the evaporation rate. In this study, the index was measured using the Fresnel equation for reflected light. The evaporation rate sensor measures the interference signal during the evaporation of a liquid. The main frequency of an interferogram that is linearly proportional to the evaporation rate can be obtained by fast Fourier transformation of the interferogram. In our study, the evaporation rates of deionized (DI) water and ethanol were tested. Ethanol evaporated at a rate approximately four times faster than that of DI water. In addition, Hilbert transformation was used to retrieve the phase information of the interferogram over time. Our proposed method is powerful tool to monitor the evaporation of a liquid in real time. The sensor requires a tiny amount of liquid as a test sample to determine the rate of evaporation and offers high reliability and repeatability at a low cost.

제1장 서 론

증발(Evaporation)이란 액체에서 기체상으로 전이되는 현상으로 주어진 압력과 비등점 이하의 온도에서 일어난다. 대부분 증발은 직접 육안 관찰 또는 마이크로 증량 측정기를 통해 관측된다. 이와 같은 증발 측정 기술은 고정밀도를 제공하지만 테스트 중인 액체의 바로 옆에 보조 장비가 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서 증발 속도(Evaporation rate)를 액체의 표면에서 액체가 기화되어 기체 상태로 변화하는 속도로 정의한다.

산업현장에서 사용되는 인체에 유해한 휘발성 물질은 보기에 일반액체와 다르지 않아 육안으로 구분이 어렵게 때문에 심각한 산업사고로 이어질 위험이 높다[그림 1.1]. 많은 공장 및 연구실에서 유해물질을 다량으로 사용되고 있으며, 이런 화학물질의 노출에 대한 예방으로 다양한 안전시설 설치를 의무화하고 있다.^[1] 일반적인 작업장에서는 폭발위험장소로 지정되어 급배기를 통해 기화된 유해물질에 대한 노출을 최소화 하지만 냉난방 비용의 절감을 위하여 실제로는 배기가 부족하다. 이는 작업자에게 유해물질이 노출될 수 있는 소지가 있다. 따라서 사고를 미연에 예방하기 위해 증발속도의 정확한 측정과 적절한 조치를 토대로 발생할 수 있는 사고를 예방하여야 한다. 따라서 공기 중 화학물질의 양과 농도를 측정하거나 용액에 증발속도를 계산해야 한다. 최근에는 화학 혼합용액의 증발 속도를 예측하거나 측정하기 위해 몇 가지 방법이 광범위하게 연구되었다.^[2-10]

기존의 증발에 대한 연구를 보면 유해 물질의 증발속도를 측정하기에 앞서 증발속도가 많이 차이 나는 물과 에탄올을 사용하여 실험함으로써 증발속도 측정 방법 및 센서로써의 가능성을 확인한다. 1993년에 혼합액을 포함하는 에탄올과 수분의 증발에 대한 연구가 보고되었고 에탄올의 농도에 따른 증발속도를 연구하였다.^[2-3] 이후로 2000년도에 들어와서는 시간 분해형 적외선 분광법(Time resolved infrared spectroscopy)을 사용하여 혼합용액 및 용액의 증발을 측정하는 연구가 진행되었으나 측정에는 고팽창(High expansion) 장비가 필요했다.^[5-6] 최근에는 수정 진동자(Quartz crystal resonator)를 사용하여 혼합용액의 증발 속도를 정밀하게 측정하기 위한 실험이 진행되었다. 그러나 센서 구성에 있어서 제작이 복잡하다.^[7] 이스라엘 연구그룹에서 광섬유 다중 반사 간섭현상을 이용한 증발속도 측정 센서를 처음

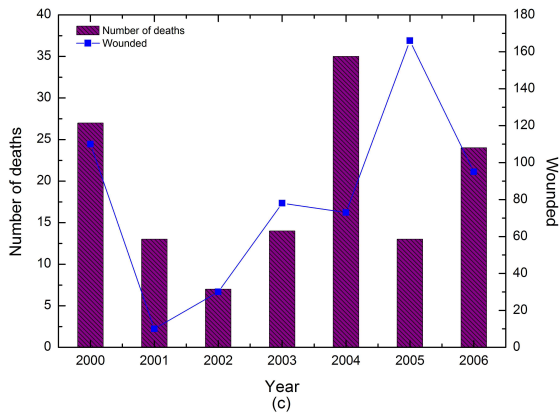
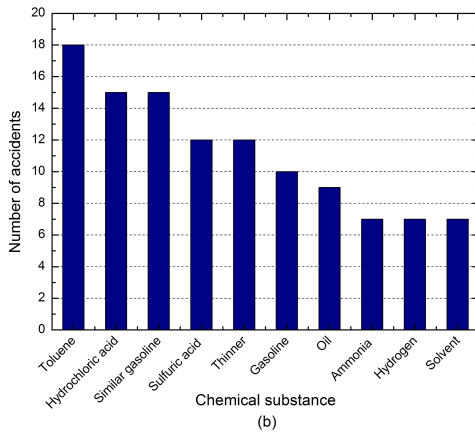
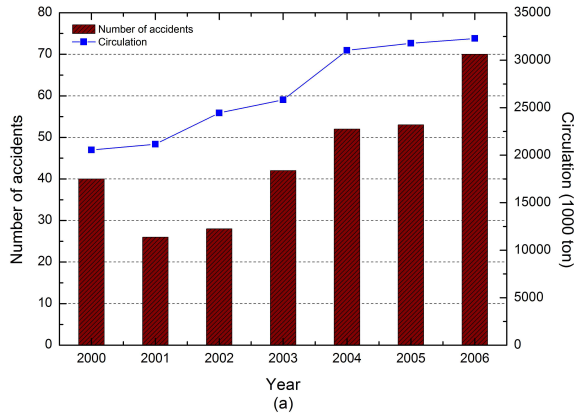


그림 1.1 (a) '00~06'년 화학물질 사고발생 현황과 유독물 유통현황, (b) 사고원인 화학물질 현황, (c) 화학물질 사고 인명피해 현황

제안하였다. 측정 장치가 간편하고 사용되는 용액 양이 적어서 효율적인 증발 측정 기술이다.^[8]

수분 증발 속도 측정은 수면 온도 모니터링(Water surface temperature monitoring)을 사용하여 광범위하게 연구됐다. 용액표면에서 방출된 적외선 복사의 강도를 흑색 캐비티(Black cavity)에 의해 방출된 복사 강도와 비교하거나 시간 경과에 따른 물질의 중량 손실을 측정한다.^[9-10] 또한, 기상 조건에 따라 모니터링하기 위해 증발 팬(Evaporation pan)의 용액 수위를 측정하여 증발속도를 결정하는 방법을 사용할 수 있다.

본 논문에서는 기존 광섬유 다중 반사 간섭을 이용한 증발속도 측정 기술의 성능향상을 위한 기술을 제안한다. 유해 물질의 증발속도를 측정하기 앞서 증발속도의 차이가 많은 DI Water과 Ethanol 용액을 통해 실험을 진행했으며, 광섬유 끝단에 형성한 물방울의 높이변화에 따른 위상변화를 광학적 측정과 Hilbert 변환을 통한 신호분석법으로 실시간 증발속도 변화를 모니터링하는 방법을 제시하였다. 또한 단순한 측정 구성과 저렴한 비용으로 높은 정확도를 가진 광섬유 간섭구조를 가진 액체의 증발 속도 센서에 대한 연구 결과를 보여준다.

제2장 이 론

제1절 광섬유 센서

1. 광섬유 센서 원리와 종류

약 50년 전에 처음으로 광섬유 센서(Optical fiber sensor)에 대한 특허가 등록되었다.^[11] 지났다. 그 이후로 변형률, 응력, 온도, 자기장, 회전, 굴절률 등 다양한 물리량을 감지하기 위한 광섬유 센서 개념과 기술이 제안되었다.^[12] 광섬유 센서는 고감도, 경량, 소형, 넓은 대역폭, 전자기 간섭에 대한 내성 및 신호 전송에 대해 용이한 장점으로 지금은 다양한 응용분야에 두루 활용되고 있다.^[13]

광섬유는 측정대상이 있는 곳에 빛을 전달하고, 이 빛과 측정하고자 하는 물리량 사이에 상호작용을 일으키는 역할을 한다. 광섬유 센서는 외부 물리량 변화에 의한 광섬유 내부로 진행되는 빛의 광학적 특성 변화를 측정하는 원리이다 [그림 2.1]. 주로 변화되는 광학적 특성은 광세기(Intensity), 파장 (Wavelength), 편광 (Polarization), 위상 (Phase) 등이 있다. 이런 특성의 미세하게 변화를 광섬유 센서로 측정함으로써 대상의 상태 및 외부 환경에 대한 물리적인 정보를 얻을 수 있다. 좀더 구체적으로 살펴보면 광섬유의 굴절률 변화로 온도, 압력, 화학물질에 의한 농도 변화, 인력, 장력 등을 측정하고, 편광과 위상 변화를 통해 주로 전기장, 자기장, 압력 등을 측정한다. 그리고 광손실 정도를 검지하여 화학물질에 의한 농도 변화, 휨 정도 등을 측정할 수 있다. 최근에는 라만 산란과 브릴루앙 산란 같은 비선형 현상을 이용한 온도, 장력을 연속 지점에서 측정이 가능한 기술이 관심을 모으고 있다.^[14]

광섬유 구성과 활용에 따라 광섬유 센서는 [표 2.1]과 같이 크게 3종류로 분류 할 수 있다. 먼저 광학식 센서는 광섬유로 전달되는 빛의 광세기 변화를 측정하는 방식으로 이것은 간단한 구성과 높은 신뢰성을 가지고 있어 다양한 분야에 실용화되었다.^[15]

두 번째로 광섬유 Pick-up probe형 센서는 빔 분리기(Beam splitter)를 통해 프로브로 전달되면서 측정 대상에 조사하게 된다. 측정대상에서 반사되어 되돌아온 광 신호를 광섬유 프로브로 획득하고 광 수신기로 전달되는 방식으로 단일모드 광섬유(Single-mode fiber, SMF)와 다중모드 광섬유(Multi-mode fiber, MMF) 등이 프로브로 사용된다. 이러한 방식으로 광섬유 레이저 도플러 속도계(Fiber optic laser doppler velocimeter, LDV)와 광섬유 방사 온도계 등

에 활용되고 있으며 비접촉식이고 고정밀도 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다.^[15]

마지막으로 광섬유 기능형 센서는 측정 대상에 의해 도파광의 위상, 편광, 강도의 변화를 이용한다. 위상과 편광 특성의 변화를 이용하는 경우로 단일 모드 광섬유와 편광 유지 광섬유에 이용되고 있으며 광 강도 변화를 이용하는 경우에는 다중모드 광섬유가 사용되어 진다. 주로 간섭현상이나 광섬유 자기광학(Magneto optics) 현상을 이용한 측정 기술로서 초고감도 측정이 가능하다. 광원으로는 가간섭성(Coherence)이 우수한 He-Ne 레이저나 반도체 레이저가 이용된다. 이러한, 간섭계 기반 센서는 대표적으로 Mach-Zender 간섭계, Michelson 간섭계, Sagnac 간섭계 등이 있다. 광세기 센서는 편광 센서와 온도 센서 등에 이용된다.^[15]

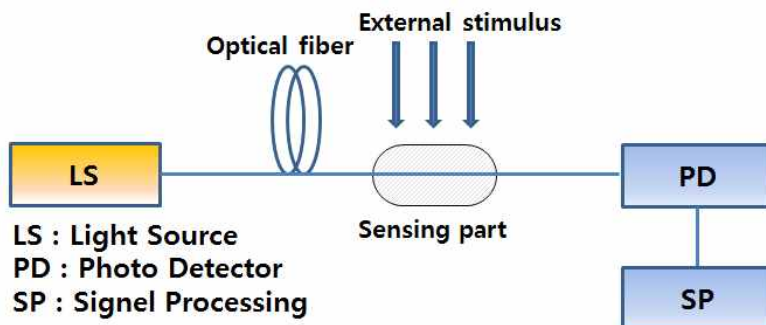


그림 2.1 광섬유 센서의 기본 구조

분류	광학식 센서	광섬유 Pick-up Probe 형 센서	광섬유 기능형 센서
측정 원리	<ul style="list-style-type: none"> • 광탄성 효과 • 전기광학 효과 • 자기광학 효과 • 광 흡수 및 방사효과 • 마이크로 밴드 손실 • 광로차단 	<ul style="list-style-type: none"> • 레이저 도플러 효과 • 발열체의 방사 • Image 광섬유 	<ul style="list-style-type: none"> • 간섭현상 <ul style="list-style-type: none"> - Mach Zender 간섭계 - Michelson 간섭계 - Sagnac 간섭계 • 광섬유 자기광학 현상
측정 인자	광세기	광주파수 · 광세기	광세기
활용 예시	광섬유 온도계	광섬유 레이저 도플러 속도계(LDV)	광섬유 레이저 자이로
특징	<ul style="list-style-type: none"> • 구조간단 • 고신뢰성 	<ul style="list-style-type: none"> • 비접촉 • 고감도 	<ul style="list-style-type: none"> • 초고감도

표 2.1 광섬유 센서 기술의 분류^[15]

2. 광섬유 센서 장점 및 응용분야

[표 2.2]에 광섬유의 특징과 센서로서의 장점을 정리하였다. 광섬유는 1 dB/km 이하의 낮은 광손실을 가지고 있어 원거리 리모트 센싱 및 분포계측 등에 응용된다. 또한 광대역과 평탄한 베이스 밴드 전송 특성을 이용하여 다과장 계측과 다지점계측을 할 수 있다. 내구성 측면에서는 광섬유는 가늘고 가볍기 때문에 설치의 자유도가 높다. 또한 유연성과 기계적 강도가 우수하기 때문에 구조물 안에 내장하여 구조물의 기계적 변형을 계측하는데 응용된다. 무엇보다도 광섬유는 외부 전자기장에 영향을 받지 않고 열에 대한 강한 내성을 가지기 때문에 고온(High temperature) 환경 및 고전계(High electric), 고자계(High magnetic) 환경에 적용이 가능하다. 이러한 장점 때문에 광섬유 센서는 토목, 건축, 방재분야에서 교량, 빌딩, 콘크리트 등의 변형 계측 및 산지, 제방 등의 붕괴를 감지하는 곳에 많이 활용된다. 보안 응용분야는 진동 검지센서로 이용되어 외부인의 침입을 검지할 수 있다. 또한 원자력, 풍력발전, 유정, 화학공정 등과 같은 에너지 및 공업에서는 석유 갱도 및 유정에서 온도분포 계측을 통해 화재를 경보하는 센서로 사용된다. 그리고 고압배관의 변형, 열화감지, 천연가스정의 압력, 풍력발전기 날개 변형 감시, 석유 탱크의 화재 감지 등에도 사용되고 있다. 광통신로 및 송전, 철도 같은 장거리 인프라에서는 광전송로의 변형과 손실을 감지하며 송전선과 철도 급전선의 온도 및 변형을 감지한다. 항공우주 분야에는 광섬유 브래그 격자(Fiber Bragg grating, FBG)를 이용한 항공기 기체의 변형을 측정하거나 로켓 연료탱크의 수명을 진단에 응용된다. 최근에는 광섬유 사냥(Sagnac) 간섭계를 이용한 광섬유 자이로 센서에 활용된다. [표 2.3]은 환경, 의료 바이오 등 기타 다양한 응용 분야에 대해 자세히 정리되어 있다^[16].

이와 같이 다양한 분야에 광섬유 센서가 활용되고 상업화되면서 광섬유 센서 시장은 더욱 확대되고 있다. [그림 2.2]에서 ElectroniCast의 광섬유 센서 시장과 기술에 대한 분석 자료를 보면 광섬유 센서 시장은 매년 30%정도 지속적으로 성장하는 것을 알 수 있다^[17].

광섬유의 특징	센서로서의 장점/응용
저손실 1dB/km 이하	원거리 리모트 센싱, 분포계측
광대역, 평탄한 베이스밴드 전송특성	다파장 계측, 다지점계측
유연성	구조물에 내장(삽입) 가능
가늘고 가볍다	부설의 자유도가 큼
기계적 고강도	변형계측에 적합함
고융점 재료	고온환경 계측
도파구조를 가짐	모드의 동작을 이용한 계측, 간섭계를 원리로 한 계측 가능
전자유도가 적다. 절연체	고전계, 자계환경에서의 계측
각종 특수섬유, 광섬유형 부품 제작 가능	편파 유지 파이버, 높은 베르데 상수 파이버, 광섬유 격자(Fiber Grating), 광섬유 결합기 등에 지원됨.

표 2.2 광섬유의 특징과 센서로서의 이점^[16]

응용 분야	검지방식과 응용 예
토목, 건축, 방재	<ul style="list-style-type: none"> 교량, 빌딩, 콘크리트, 구조물의 변형 계측 교량의 변형을 다점계측 산지, 제방 등의 붕괴 검지 마이켈슨 간섭계에 의한 고층빌딩 변위 계측
보안	<ul style="list-style-type: none"> 진동검지센서에 의한 침입 검지 링 간섭계에 의한 진동 검지, 침입 검지
에너지 및 공업 - 원 자 력 - 풍력발전 - 유 정 - 화학공정	<ul style="list-style-type: none"> 석유 강도, 유정 및 플랜트의 온도분포 계측, 화재경보 고압배관의 변형, 열화감지 천연가스정의 압력, 온도계측 풍력발전기 날개 변형 감시 유정의 압력 검지 석유탱크의 화재 검지 광섬유 도플러 센서에 의한 배관감속 검지 FBG의 주위에 팔라듐을 묻혀 수소를 연소, 수소 검지 폴리이미드 코드에 의한 내열섬유 센서
장거리 인프라 - 광통신로 - 송 전 - 철 도	<ul style="list-style-type: none"> 광전송로 변형 감지 광전송로 손실 감지 고감도 광전송망 감시: OTDR보다 고감도 송전선의 온도 검지 철도 급전선의 변형·온도 검지 페러데이 효과에 의한 전류센서 및 자기센서
항공우주	<ul style="list-style-type: none"> 항공기, 기체의 변형 분포 계측 FBG에 의한 항공기 주익의 변형 분포 계측 로켓연료탱크의 수명진단 사낙효과를 이용한 광섬유 자이로 센서 플라스틱 광섬유 FBG의 반사파장 변화를 이용한 연료 중의 함유수분 측정

표 2.3 각종 광섬유 센서의 방식과 응용 예^[16]

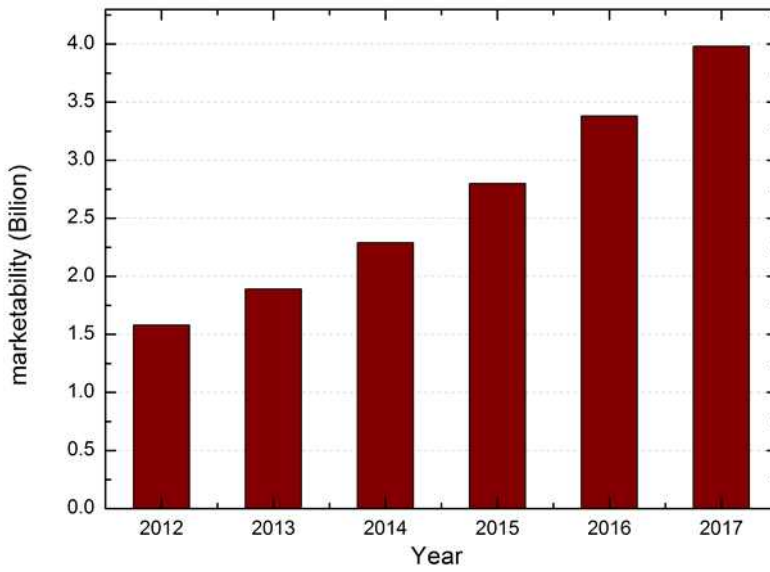


그림 2.2 세계의 광섬유 센서 시장 예측^[17]

제2절 증발속도 측정

1. 증발 속도

증발은 액체 표면의 분자들 간의 인력을 극복할 수 있는 높은 에너지를 가지는 입자들이 분자간의 인력을 끊고 대기중으로 튀어나오는 현상을 의미한다[그림 2.3]. 다시 말하면 이것은 주어진 압력에서 비등점 이하의 온도일 때 일어나며 액체에서 기체상으로 전이되는 현상이다^[18]. 일상생활에서 이러한 증발현상을 쉽게 확인할 수 있다. 가장 간단한 예로 세탁물을 건조시키기 위해 메달아 놓으면 증발현상으로 인해 세탁물 내부에 있는 액체분자가 대기중으로 증발하여 건조되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 유체가 존재하는 곳 어디에서나 증발이 어느 정도 존재한다. 예로서 식물 연구에서 액체 증발은 중요한 요소로 작용한다^[19]. 기후학에서도 비슷한 맥락으로 그 중요성을 강조하고 있다^[20]. 고속의 액체 증발과정을 실시간으로 측정하는 것은 잉크젯 프린팅^[21], 전자회로 냉각^[22], 눈물의 의학적 분석^[23]과 같은 응용 분야에 활용될 수 있다. 또한 액체 연료를 사용하는 자동차 엔진의 연료가 연소되는 부근에서 증발 속도의 측정을 위한 많은 연구가 진행되고 있다^[24, 25].

본 연구에서 주로 다루게 되는 증발 속도는 액체의 표면에서 액체가 기화되어 기체 상태로 변화하는 속도를 의미한다. 증발 속도에 영향을 주는 요인으로는 온도, 기압, 습도, 바람의 세기, 대기와 접촉하는 액체의 표면적 넓이 등이 있다.

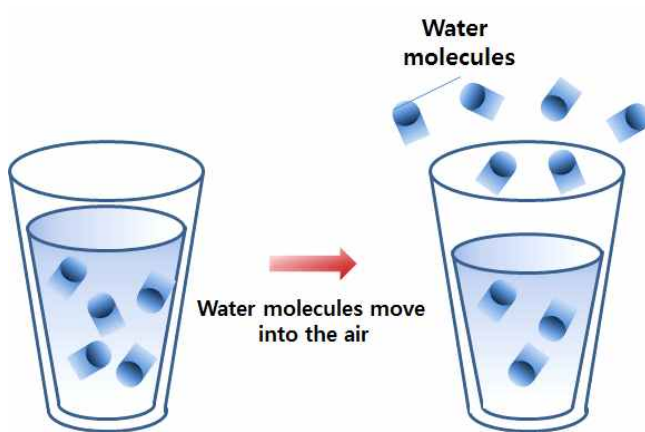


그림 2.3 물(액체)의 증발

2. 기존의 증발속도 측정방법

기존의 증발속도 측정방법은 [그림 2.4]와 같이 제작된 상자 안에 고압가스를 공급하여 압력을 가하게 되고 방울 생성기를 통해 생성된 용액은 실리카 섬유 끝단에 물방울을 형성하게 된다. [그림 2.5]와 같이 실리카 섬유 끝단에 형성된 용액의 증발 속도를 측정하기 위해 광원을 조사하면 CCD 카메라와 비디오 레코더를 통해 데이터를 기록하게 된다.^[26] 측정된 데이터는 컴퓨터를 통해 픽셀 단위로 이미지 분석기를 통해 질량을 측정하게 된다. 이와 같은 증발속도 측정은 용액에 대한 압력을 설정하여 각 환경에서의 증발속도를 측정할 수 있으나 부피가 큰 장비 구성이 필요하다는 단점이 있다.

우리 사회에 증발속도를 측정해야하는 곳은 산업현장 뿐만 아니라 실생활에 밀접한 관계가 있는 저수지를 생각할 수 있다. 저수지의 경우 물 수위 유지 관리를 위해 증발속도를 측정하게 된다[그림 2.6]. 저수지의 증발속도를 측정하는 방법으로는 총 5가지가 있는데 물 수지(Water budget) 방법, 에너지 수지 방법, 공기동역학적 방법, 앞에 두 개를 혼합한 방법인 에너지 수지 및 공기동역학적 방법, 증발접시(Evaporation pan) 측정에 의한 방법이 있다. 대표적으로 증발접시 측정법은 댐 후보지역이나 인근지역에 증발접시를 설치하여 직접 물의 증발량을 측정한다. 이 장치에서 측정된 증발량을 통해 저수지의 면적을 고려하여 총 증발량으로 환산하는 방법을 사용한다. 그러나 이 방법은 외부환경으로 인해 증발 접시의 온도가 변하게 되는 등 환경적 요인으로 오차가 발생할 수 있다. 그리고 여전히 부피가 큰 측정 장치를 사용해야 하는 단점이 있다^[27].

최근에는 증발을 측정하고 모니터링 하는 가장 보편적인 방법으로 접촉각 측정법(Contact angle goniometry)를 통해 육안으로 관찰하는 방법을 사용한다. 이와 같은 접촉각 측정법을 사용한 측정 장비는 물방울과 표면 사이의 각도를 계산하고 물방울을 확대하여 직접 관찰하게 된다^[28-29]. 또 다른 증발 속도 측정 방식으로 산업 분야에 이용되는 화학물질에 대한 연구로 [그림 2.7]와 같이 화학물질이 담긴 아크릴 수조를 설치하고 배기의 방법, 풍속, 용액의 농도, 혼합용액 등 내부 환경 요인을 조절하면서 화학물질의 증발 속도에 어떤 영향을 주는지 연구되고 있다.^[30] 이것은 시간에 따른 증발된 후 아크릴 수조에 남은 용액의 무게를 정밀한 전자저울을 이용해서 증발 속도를 측정하는 원리이다[그림 2.8].

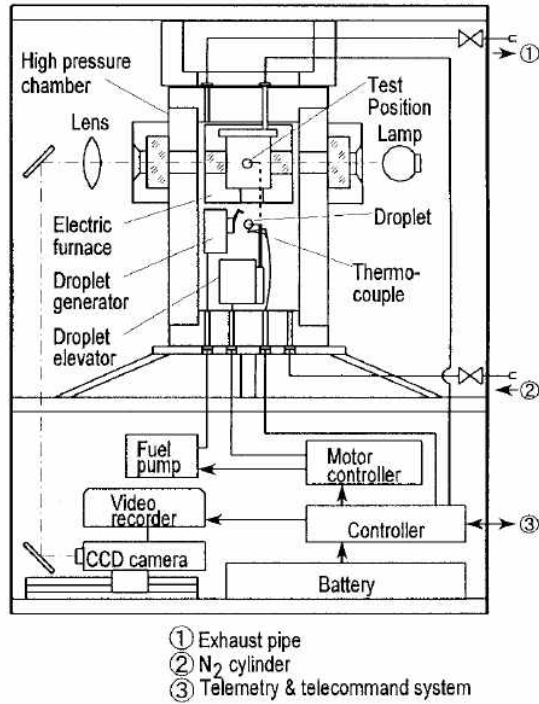


그림 2.4 압력을 가한 조건에서 물방울의 증발을 측정학 위한 장비 개략도^[26]

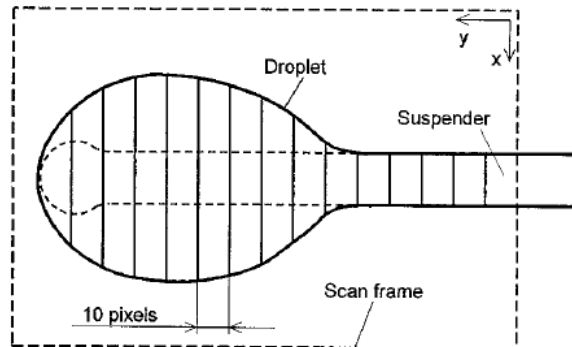


그림 2.5 디지털화된 물방울의 이미지 개략도^[26]

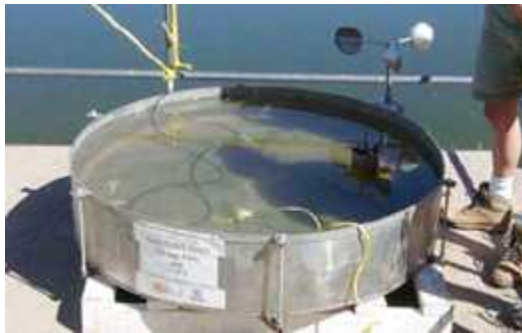


그림 2.6 저수지의 증발속도 측정을 위한 증발속도 접시^[27]

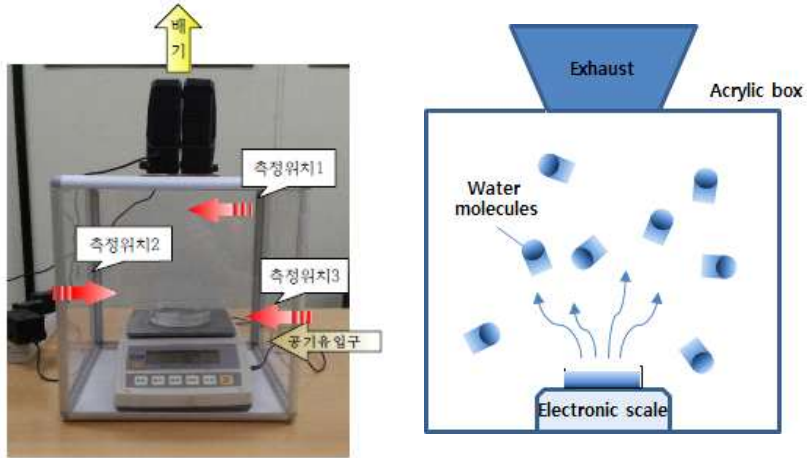


그림 2.7 증발속도를 측정하기 위한 실험 구성^[30]

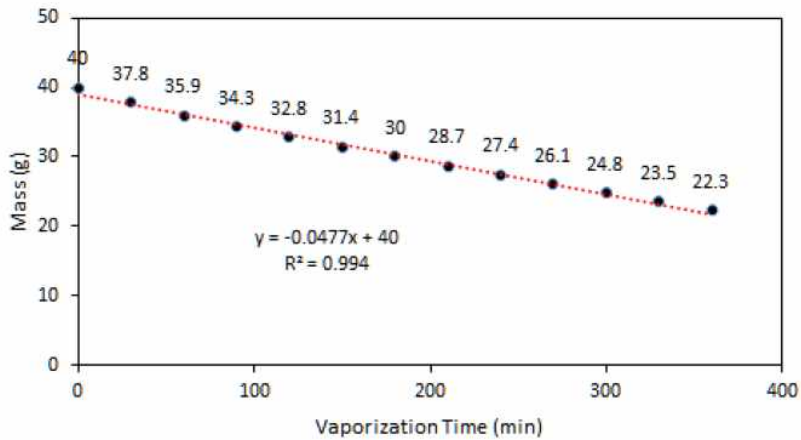


그림 2.8 Ethanol의 증발시간에 따른 질량 손실^[30]

3. 광기술 기반 증발속도 측정법

기존의 증발속도를 측정하는 방법들은 대체적으로 시간에 따라 일정한 용기 안에 액체가 증발하는 양을 측정하는 방식이 대부분이었다. 그러나 최근에는 광기술을 기반으로 증발속도를 측정하는 방법들이 활발하게 연구되고 있다.

2007년에 화학 공정을 모니터링하기 위해 시간 분해 푸리에 변환 적외선 기법이 보고되었다. 이 기술은 물과 에탄올의 증발과 실리카 물질의 중축합 반응을 모니터링하는 데 매우 효과적인 방법으로 제시가 되었다. 중축합 반응은 중합체 제작에 사용되는 안전한 분자에서 물과 같은 간단한 분자가 빠져 나오는데 이를 중합반응이라고 한다. 그러나 이러한 분석은 적외선 분광계의 특수 설계가 필요하기 때문에 사용하기 어렵다. 또한 측정에는 고풍창 장비가 필요하다는 단점이 존재한다.^[5-6]

광섬유를 이용한 증발속도 측정은 Fabry-Perot 작동 원리를 기반으로 두 개의 광섬유 사이에 존재하는 공간에 용액을 떨어뜨리고 용액이 증발함에 따라 광섬유로 진행하던 광이 용액에서 굴절되어 전파 손실로 작용한다[그림 2.9]. 이와 같은 방법을 통해 에탄올, 아세톤 및 헥산을 시료 검사 액으로 구별하고 에탄올과 헥산의 혼합물을 인식하며 증발 속도를 측정하는 센서로 연구되었다[그림 2.10]. 그러나 이 방법은 Micro-machined Fiber micro cells(MC)에 타원형 영역을 포함한 단면이 있는 특수 광섬유를 제작해야한다는 단점이 존재한다.^[8]

이와 같이 광섬유를 이용한 증발속도 측정은 절단된 광섬유를 아래쪽으로 수직하게 설치하여 용기에 담겨진 용액에 찍는 방식으로 물방울을 형성한다. 형성된 물방울 표면에서 반사된 반사광의 간섭무늬를 통해 증발속도를 측정연구가 진행되었다.[그림 2.11] 이는 본 연구와 비슷하지만 절단된 광섬유 끝단에 극소량의 용액을 사용하기 때문에 본 연구에서 측정된 간섭무늬에 비해 분석할 수 있는 간섭무늬가 적다는 단점이 존재한다.^[8]

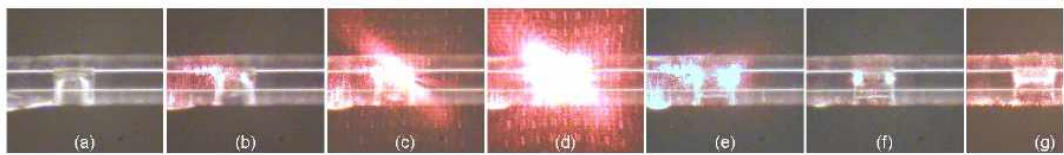


그림 2.9 (a) ~ (g) 두 개의 광섬유사이에 용액의 증발에 따른 적색광의 전파손실^[8]

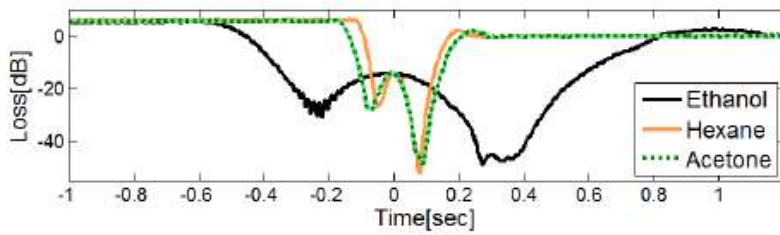


그림 2.10 Acetone, Ethanol, Hexane 용액의 증발에 대한 전송 손실^[8]

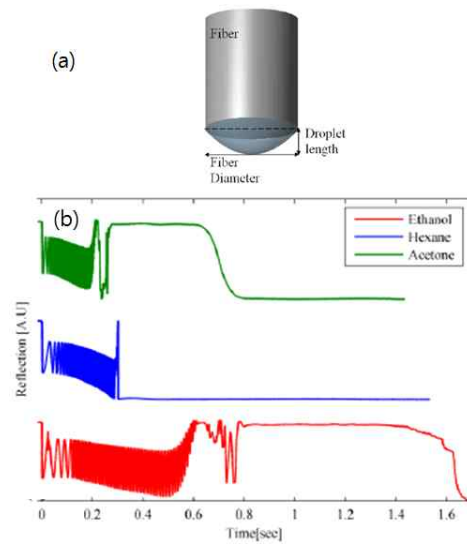


그림 2.11 (a) 용액에 절단된 광섬유 끝단을 찍었을 때 형성된 물방울의 예상모형,
 (b) 각 용액에 따른 수집된 시간의 함수로 반사된 간섭무늬^[8]

4. 다중반사를 이용한 증발속도 측정원리

광섬유 Ferrule(반사 방지 코팅 렌즈에서와 같은 반도체 재료 또는 유리) 위에 광학 코팅이
 라 붙이는 투명 재료의 박막 코팅에서 다중 반사가 널리 고려되었다. 이번 장에서는 박막 광
 학 기반으로 다중반사 현상을 이용한 액체의 증발 속도를 이론적 원리를 살펴본다. 증발 속도
 를 측정하기 위해 광 패치코드(Optical patch cord)의 Ferrule을 수직으로 세우고 그 위에 측
 정하고자 하는 용액을 한방울 떨어뜨려 Ferrule 위에 물방울을 형성한다. 굴절률 n_1 을 갖는
 광섬유 코어 내의 광이 진행하여 굴절률 n_2 인 용액 사이 계면에서 1차 반사가 일어나게 된다.
 용액으로 투과된 광이 용액과 굴절률 n_3 인 대기 사이의 계면에서 2차 반사가 일어나고 이 반
 사광은 다시 광섬유 코어 내부로 들어오게 된다. 두 지점에서 반사된 광은 서로 영향을 주면
 서 두 지점의 광 경로차에 의한 위상에 따라 보강간섭(constructive interference)과 상쇄간섭
 (destructive interference)을 형성하게 된다. 이 여기서 초기 경로차는 Ferrule 위에 떨어지는
 용액의 초기 물방울 두께(d)로 정의한다. 액체의 증발로 인해 물방울 두께가 시간에 따라 줄
 어들게 되면 두 반사된 빛의 간섭 신호의 위상이 시간에 따라 변하게 된다. 물방울의 두께가
 d 이며 수직 입사를 가정하면, 물방울의 두께 d 를 왕복하는 위상 변화 $\phi = 2 \times (2\pi/\lambda)n_2d$ 이
 다. 여기서 λ 는 자유공간에서의 파장이다. 액체 방울을 왕복하는 위상 변화와 광학 손실(α)을
 고려하여간섭 신호의 위상을 $e^{-\alpha(2d) - j\phi}$ 으로 정의한다[그림 2.12]. 단일모드광섬유에서 액체
 표면으로 수직 입사를 가정하고 증발 속도 관계식을 유도한다. [그림 2.13]와 같이 다중 반사
 를 고려하면 반사 계수 r 은 다음과 같이 정의된다.

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

그리고

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

여기서, t 는 투과 계수를 의미한다.

$$1 - t_1 t'_2 = r_1^2 \quad (3)$$

첫 번째로 반사된 빔은 $A_1 = A_0 \times r$ 이고, 두 번째는 $A_2 = A_0 \times t_1 \times t'_1 \times r_2 \times e^{-\alpha(2d) - j\phi}$ 등이다. 반사된 빔의 크기는 다음과 같다.

$$A_{reflected} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + \dots \quad (4)$$

따라서,

$$A_{reflected}/A_0 = r_1 + t_1 t'_2 r_2 e^{-\alpha(2d) - j\phi} - t_1 t'_1 r_1 r_2^2 e^{-\alpha(2d) - j2\phi} + t_1 t'_1 r_1^2 r_2^3 e^{-\alpha(2d) - j3\phi} + \dots \quad (5)$$

이는 등비급수를 나타낸다. 식 (3)을 이용하여, 식 (5)을 편리하게 더해서 다음과 같은 총 반사 계수 r 을 얻는다.

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-2\alpha d - j\phi}}{1 + r_1 r_2 e^{-2\alpha d - j\phi}} \quad (6)$$

이때의 반사율(Reflectance, R)는 다음과 같다.^[31]

$$R = |r|^2 = \frac{r_1^2 + r_2^2 e^{-4\alpha d} + 2r_1 r_2 e^{-2\alpha d} \cos\phi}{1 + r_1^2 r_2^2 e^{-4\alpha d} + 2r_1 r_2 e^{-2\alpha d} \cos\phi} \quad (7)$$

$n_1 > n_2 > n_3$ 일 때, 반사율(R)은 $\phi_m = 2(2\pi/\lambda)n_2 d = 2m\pi$, $m = 0, 1, 2 \dots$ 에 대해 최대가 된다. 2π 만큼 변화면 위상 $\phi_{m+1} = 4\pi n_2 (d + \Delta d)/\lambda = 2(m+1)\pi$ 이 된다. 여기서 Δd 는 위상이 2π 만큼 변하게 되는 증발에 의한 용액의 두께 변화로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n_2} \quad (8)$$

용액의 두께 d 는 용액이 증발함에 따라 시간 t 에 의해 $d = -\gamma t$ 로 선형적으로 감소하게 된다. 여기서 γ 는 액체의 시간에 따른 두께 감소율을 의미하며 본 연구에서는 이 값을 증발 속도로 정의한다. 따라서 증발 속도는 다음과 식과 같이 표현할 수 있다..

$$\gamma = -\frac{\Delta d}{\Delta t} = -\Delta d \times f \quad (9)$$

여기서 Δt 와 f 는 식 (7)에서 반사광 간섭 신호의 진동의 주기와 주파수이다. 따라서 액체의 굴절률(n_2)와 광원의 파장(λ)를 알고 있으면 측정된 간섭 무늬의 주파수로부터 액체의 증발되는 속도를 얻을 수 있다.

물의 증발로 가정하고 물방울의 두께(d)와 광학 손실(α)을 고려하여 MATLAB 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션은 물방울의 두께와 광학 손실에 따른 간섭무늬에 미치는 영향을 확인하기 위해 각각 5번씩 시행하였으며 예상되는 결과를 도출하였다. 광섬유의 굴절률(n_1)은 1.46, 물의 굴절률(n_2)은 1.33, 공기의 굴절률(n_3)은 1.00이며 광원에서 출력된 빛의 파장(λ)은 1556.5 nm이고 빛의 속도(c)는 2.99×10^8 m/s 로 설정하였다. 이와 같은 시뮬레이션을 통해 증발속도 측정의 가능성을 확인하였다. [그림 2.14]과 같이 1550 nm 파장대의 물의 흡수계수는 약 10 cm^{-1} 이므로^[32] 광학 손실이(α)를 10 cm^{-1} 으로 설정하고, 초기 물방울의 높이를 0.1 mm, 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm, 1.0 mm 일 때 증발되는 중에 다중 반사에 의한 간섭신호는 [그림 2.15(a)]와 같다. 간섭 신호를 보면 물방울의 두꺼울 때는 광학 흡수 등으로 인해 손실이 많다고 증발에 의해 두께가 얇아지면서 전체 신호세기가 연속적으로 증가되는 것을 볼 수 있다. 초기 물방울 두께가 얇을수록 간섭신호의 크기가 증가되는 것 역시 관찰된다. [그림 2.15(b)]는 초기 물방울의 높이(d)를 0.5 mm으로 고정하고, 광학 손실을 10 cm^{-1} , 30 cm^{-1} , 50 cm^{-1} , 70 cm^{-1} , 100 cm^{-1} 으로 설정하고 간섭신호를 관찰한 결과이다. 흡수율이 높은 액체일수록 간섭신호 초기에 광손실이 많이 발생하여 거의 간섭신호가 없다가 일정한 증발 시간이 지나 두께가 충분히 얇아지면 간섭신호가 나타나기 시작하는 것을 확인할 수 있다.

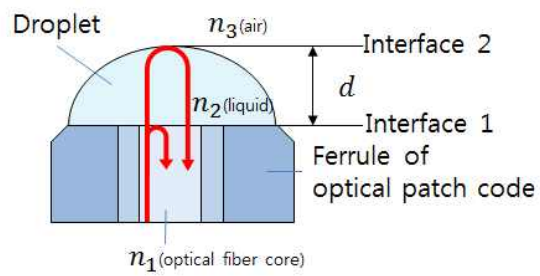


그림 2.12 광섬유 코어 끝단의 물방울에 대한 다중 반사원리

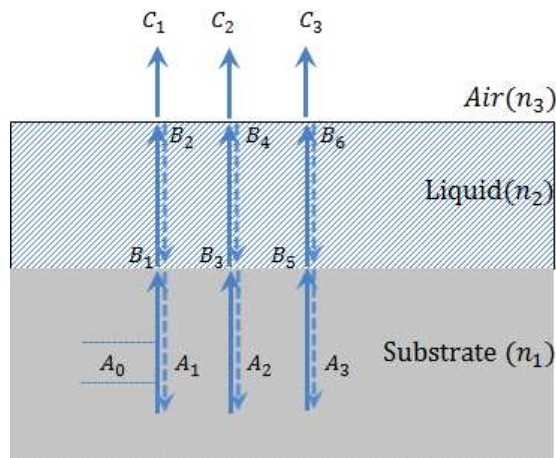


그림 2.13 박막 내의 다중 반사원리^[31]

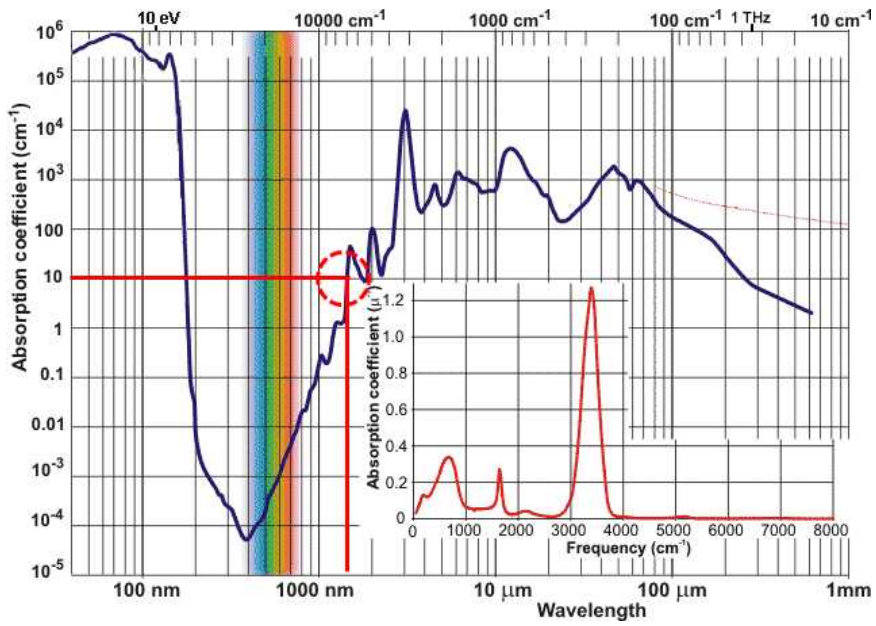


그림 2.14 파장에 따른 DI Water의 흡수계수^[32]

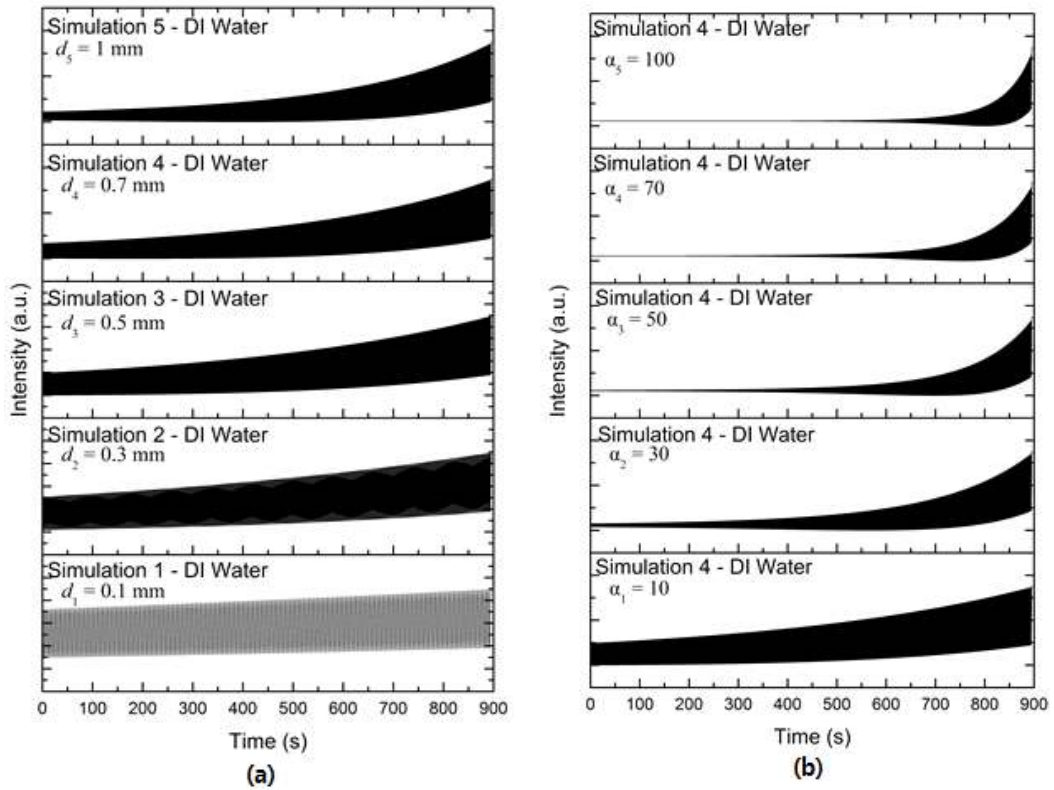


그림 2.15 (a) 물방울 두께변화에 따른 광섬유 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬 시뮬레이션, (b) 광학 손실변화에 따른 광섬유 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬 시뮬레이션

제3장 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 실험 결과

제1절 용액의 흡수계수 및 굴절률 측정

1. 용액의 흡수계수 측정

흡수 계수(Absorption coefficient)는 물질의 복사선(입자선)을 흡수하는 정도를 나타내는 계수이다. 입사하는 파동(빛)이 ‘두께’에 비례하여 감소(손실)되는 비례상수이다.

$$\frac{I_f}{I_i} = e^{-\alpha x} \quad (10)$$

여기서 α 는 흡수 계수, x 는 물체의 두께, I_i 는 처음 파동 광량, I_f 는 나중 파동 광량을 나타낸다.^[32] 광학 손실 중 흡수계수 이외에 영향을 확인하기 위해 본 실험에 사용된 측정 용액에 대한 흡수계수를 확인했다. [그림 3.1]과 같이 실험을 구성하였다. 광원으로는 레이저 다이오드를 사용하였고 석영 유리 큐벳(Quartz Glass Cuvettes)안에 용액(DI Water, Ethanol)을 넣고 조사한 빛이 큐벳을 통과하여 측정 장치인 광 검출기로 수광하게 된다. 광원의 LD 강도는 150 mA를 기준으로 온도(20~30 °C까지 1°C 간격으로 조정)를 변화해 가며 흡수 계수를 측정하였으며 광 검출기 측정 파장범위는 800 ~ 1800 nm이다. 큐벳에서의 반사 및 흡수를 고려하여 빈 석영 유리 큐벳일 때 측정한 데이터와 용액을 넣고 측정된 데이터를 차감하여 측정하였다. [그림 3.2]과 같이 레이저 다이오드의 온도를 20 ~ 30°C까지 1°C간격으로 올렸을 때 레이저 다이오드의 중심 파장이 1556.02 ~ 1556.886 nm까지 이동하였으며 그에 따른 DI Water와 Ethanol의 흡수계수의 평균은 각각 10.623 cm^{-1} , 5.494 cm^{-1} 로 측정되었다. [그림 3.3]는 파장에 따른 두 액체의 흡수계수의 측정 결과를 나타낸다. [그림 3.4]는 측정된 DI water의 흡수계수를 적용하여 앞에서 소개한 시뮬레이션 결과와 DI Water의 증발에 따른 간섭신호와 비교하였다. 이 결과를 보면 실제 DI water 증발에 의한 간섭신호에서 광손실이 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 광학 손실이 흡수계수만이 아니라 물방울 표면에서 반사되어 들어오는 광이 광섬유 코어와 수직으로 형성하지 않고 [그림 3.5]와 같이 광섬유 코어가 아닌 다른 위치로 수광될 때 발생하는 광학 손실인 결합 손실(Coupling

loss)이 추가적으로 발생한 것으로 예상된다. 액체 방울에 의한 흡수 손실과 광섬유로 들어오는 빛의 결합 손실 등이 존재하지만 여기서 측정하고자 하는 증발 속도에는 크게 영향을 주지 않는다.

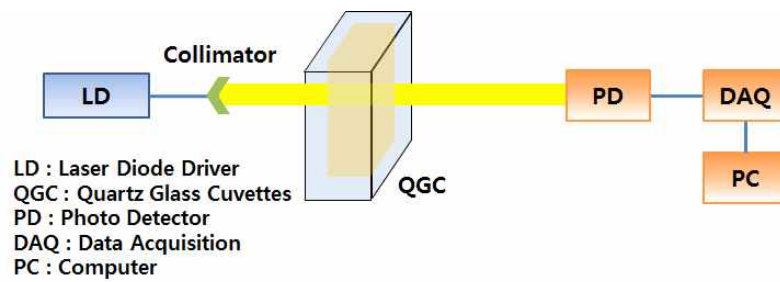


그림 3.1 흡수 계수를 측정하기 위한 실험구성

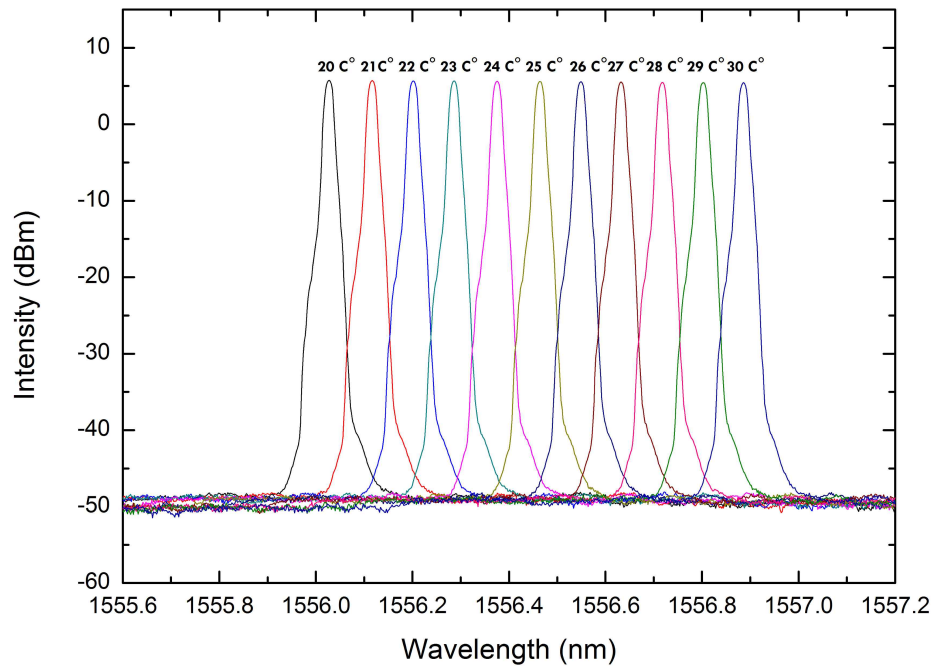


그림 3.2 Laser diode의 온도변화에 따른 출력 광의 중심파장 변화

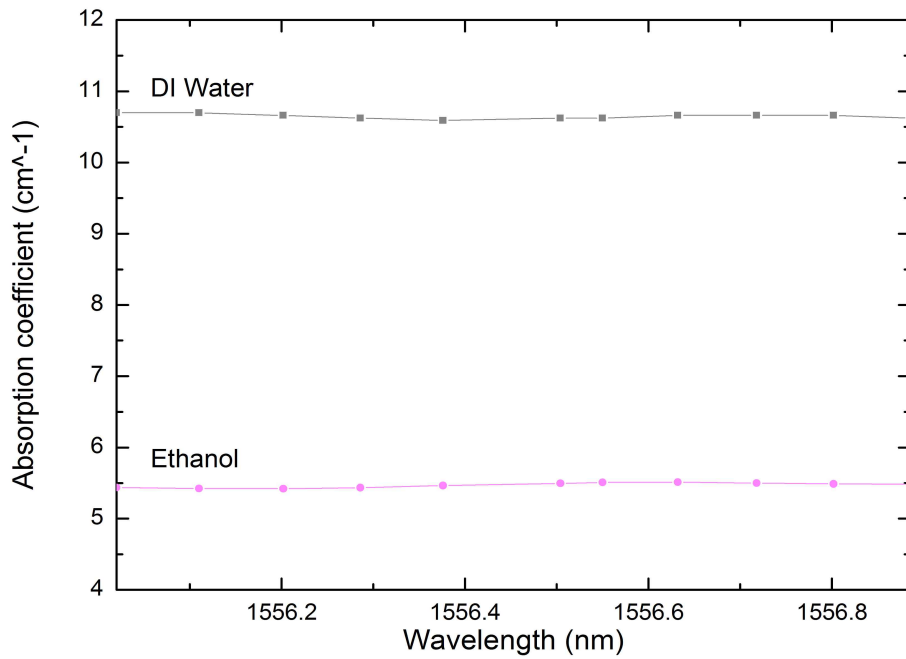


그림 3.3 Laser diode의 중심파장에 따른 DI Water와 Ethanol의 흡수 계수

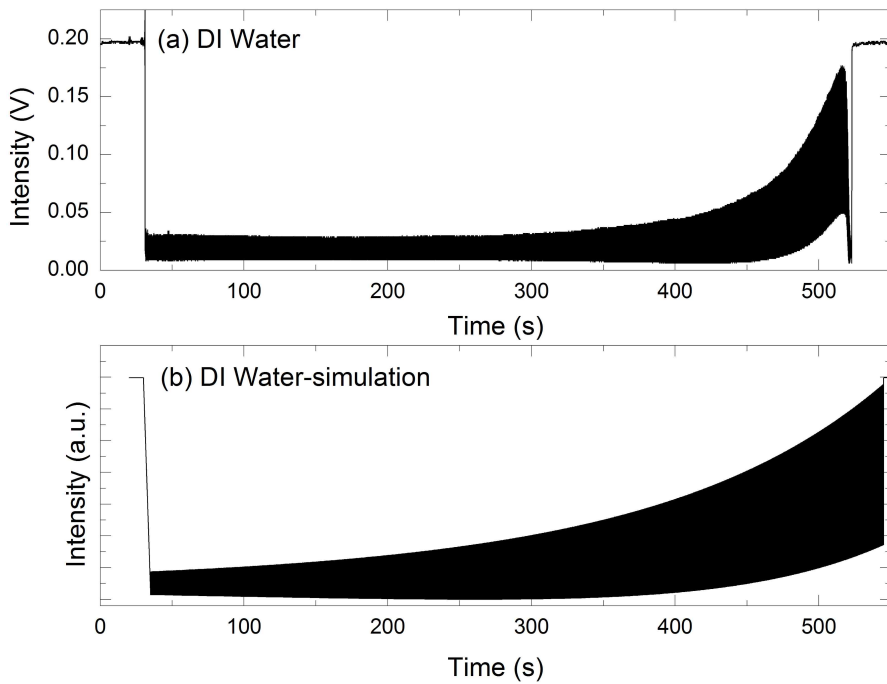


그림 3.4 DI Water 용액의 흡수계수를 적용한 시뮬레이션 비교 (a) 측정된 결과와 (b) 시뮬레이션 결과

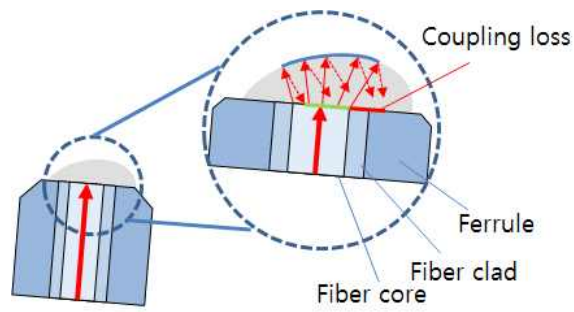


그림 3.5 용액 물방울의 위치에 의한 결합 손실

2. 증발속도 측정을 위한 굴절률 측정

앞에서 살펴봤던 식(8)과 식(9)에서 증발 속도를 계산하기 위해 용액의 굴절률을 알아야 한다. 일반적으로 증발 속도 측정에서는 굴절률을 아는 물질의 경우는 문제가 없지만 혼합물과 같은 굴절률을 알 수 없는 경우가 많이 있다. 여기서 용액의 굴절률을 실험적으로 간단하게 측정할 수 있는 방법을 제시한다. 광섬유 코어와 공기 경계에서 반사된 반사율과 광섬유 코어와 용액의 경계에서 반사율을 알면 쉽게 액체의 굴절률을 구할 수 있다.

프레넬 반사는 굴절률이 n_1 인 매질에서 진행하는 광이 굴절률 n_2 로 변하는 경계면에 입사될 때 반사되는 파와 투과되는 파의 세기(Intensity) 또는 방사조도(Irradiance)를 계산할 필요가 있다. 비유전율 ϵ_r 인 매질에서 속도 V 로 진행하는 광파에 대한 광세기 I 는 다음과 같이 전기장 크기 E_0 의 함수로 정의된다.

$$I = \frac{1}{2} V \epsilon_r \epsilon_0 E_0^2 \quad (10)$$

여기서 $\frac{1}{2} V \epsilon_r \epsilon_0 E_0^2$ 는 단위 체적당 계에서의 에너지를 나타낸다. 이와 같은 식에 속도 V 가 곱해지면 이 식은 단위 면적을 통하여 전송되는 에너지율을 나타낸다. $V = c/n$ 과 $\epsilon_r = n^2$ 이기 때문에 광세기는 nE_0^2 와 비례관계이다.

반사율(Reflectance, R)은 입사광의 세기에 대한 반사광의 세기로 측정하며 입사면에 수직과 평행인 전기장 성분으로 나누어 정의한다. 반사도 R_{\perp} , $R_{//}$ 는 다음과 같다.

$$R_{\perp} = \frac{|E_{ro,\perp}|}{|E_{io,\perp}|} = |r_{\perp}|^2 \quad \text{이고} \quad R_{//} = \frac{|E_{ro,//}|}{|E_{io,//}|} = |r_{//}|^2 \quad (11)$$

반사계수가 위상 변화를 복소수일 수 있지만, 반사도는 세기의 변화를 나타내는 실수이다. 복소수의 크기는 복소수와 공액 복소수의 곱의 함수로 정의할 수 있다. $E_{ro,//}$ 가 복소수 일 때 다음과 같다.

$$|E_{ro,//}|^2 = (E_{ro,//})(E_{ro,//})^* \quad (12)$$

여기서, $(E_{r_{o, //}})^*$ 는 $(E_{r_{o, //}})$ 의 공액 복소수이다. 수직 입사한다고 고려하는 경우에는 다음과 같이 간단하게 정의할 수 있다.^[31]

$$R = R_{\perp} = R_{//} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (13)$$

[그림 3.6]은 광섬유 끝에 측정하고자 하는 액체를 한방울 떨어뜨릴 때 반사광의 세기 변화를 도식화 한 것이다. 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬에서 초기 광 강도인 V_1 과 Ferrule 위에 용액이 존재할 때의 광 강도 V_2 을 확인할 수 있다. 식(13)을 통해 V_1 와 V_2 을 다음과 같다.

$$V_1 \propto \left(\frac{n_c + n_a}{n_c - n_a} \right)^2, \quad V_2 \propto \left(\frac{n_c + n_l}{n_c - n_l} \right)^2 \quad (14)$$

여기서 n_c, n_a, n_l 은 각각 광섬유 코어, 공기, 용액의 굴절률이다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{(n_c - n_l / n_c + n_l)^2}{(n_c - n_a / n_c + n_a)^2}$$

$$\sqrt{\frac{V_2}{V_1}} = \frac{(n_c - n_l)(n_c + n_a)}{(n_c + n_l)(n_c - n_a)}$$

$$\frac{(n_c - n_l)}{(n_c + n_l)} = \left(\frac{n_c - n_a}{n_c + n_a} \right) \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} \quad (15)$$

식 (15)의 각각의 좌측항과 우측항에 대한 값을 A 라고 할 때 우측항을 정리하면 다음과 같다.

$$A \equiv \left(\frac{n_c - n_a}{n_c + n_a} \right) \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} \quad (16)$$

V_1 , V_2 , n_c 는 알고 있는 값이므로 식 (16)에 대입하면 A 값을 계산할 수 있다. 식 (15)의 좌측항을 정리하면 다음과 같다.

$$A \equiv \frac{(n_c - n_l)}{(n_c + n_l)}$$

$$n_l = \frac{A+1}{A-1} n_c \quad (17)$$

식 (16)을 통해 계산된 반사율 R 을 식 (17)에 대입하면 용액의 굴절률 n_l 을 계산할 수 있다.

본 실험에서 사용된 광섬유 SMF-28 코어의 굴절률은 [그림 3.7]과 같이 1.464를 사용한다.^[33] [그림 3.8]에서 보면 DI Water와 Ethanol, 두 용액 5:5 혼합용액의 초기 광 강도 V_{D1} , V_{E1} , V_{DE1} 는 각각 0.198 V, 0.214 V, 0.197 V일 때 Ferrule 위의 용액이 존재할 때의 광 강도 V_{D2} , V_{E2} , V_{DE2} 는 각각 0.018 V, 0.009 V, 0.013 V로 급격히 감소한다. 이 때 식 (16)을 통해 구한 반사율은 각각 5.677 %, 3.861 %, 4.837 %이다. 각 용액의 굴절률 n_D , n_E , n_{DE} 는 식 (17)을 통해 1.3066, 1.3551, 1.3288로 계산되었다. 파장이 1550 nm 일 때 학회에 보고된 DI Water와 Ethanol의 굴절률은 1.3180와 1.3507이다^[34-35]. 측정값과 비교하여 오차가 각각 0.0114와 0.0044로 기존 보고된 굴절률과 동일한 값을 얻어 측정 정확도가 높은 것을 확인했다. DI Water에 대해 4 번 반복실험을 한 결과 각각 굴절률은 1.3045, 1.3074, 1.3063, 1.3090 로 평균 굴절률이 1.3061인 것을 확인하였다. 이와 같이 Ferrule 위의 용액에 따른 강도 변화를 통해 굴절률을 구할 수 있다.

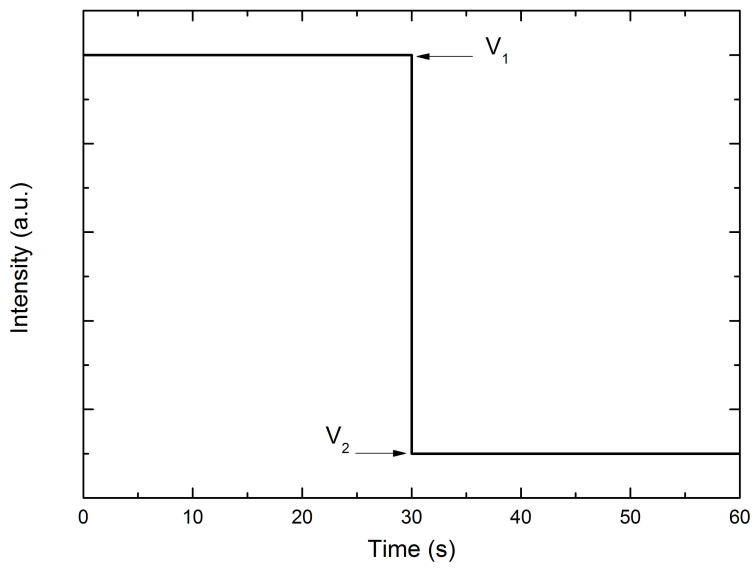


그림 3.6 Ferrule 위에 용액이 떨어지면 생기는 반사강도 변화

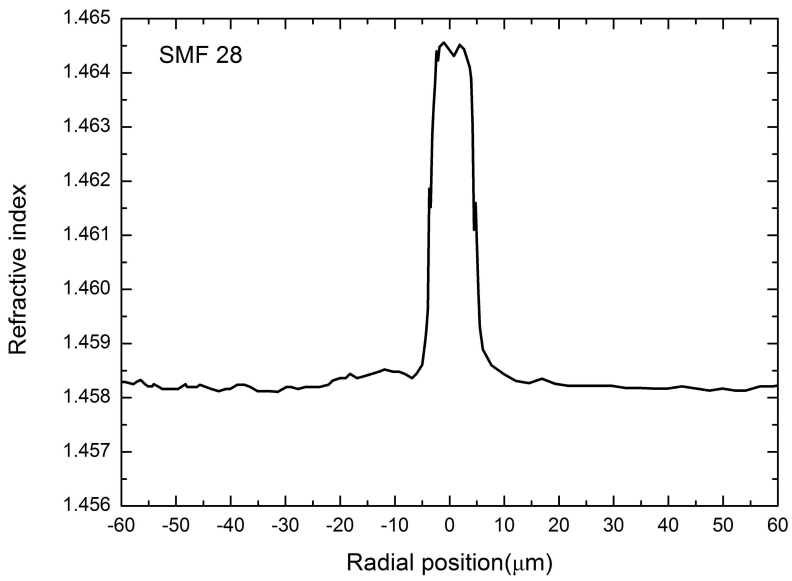


그림 3.7 SMF-28의 굴절률^[33]

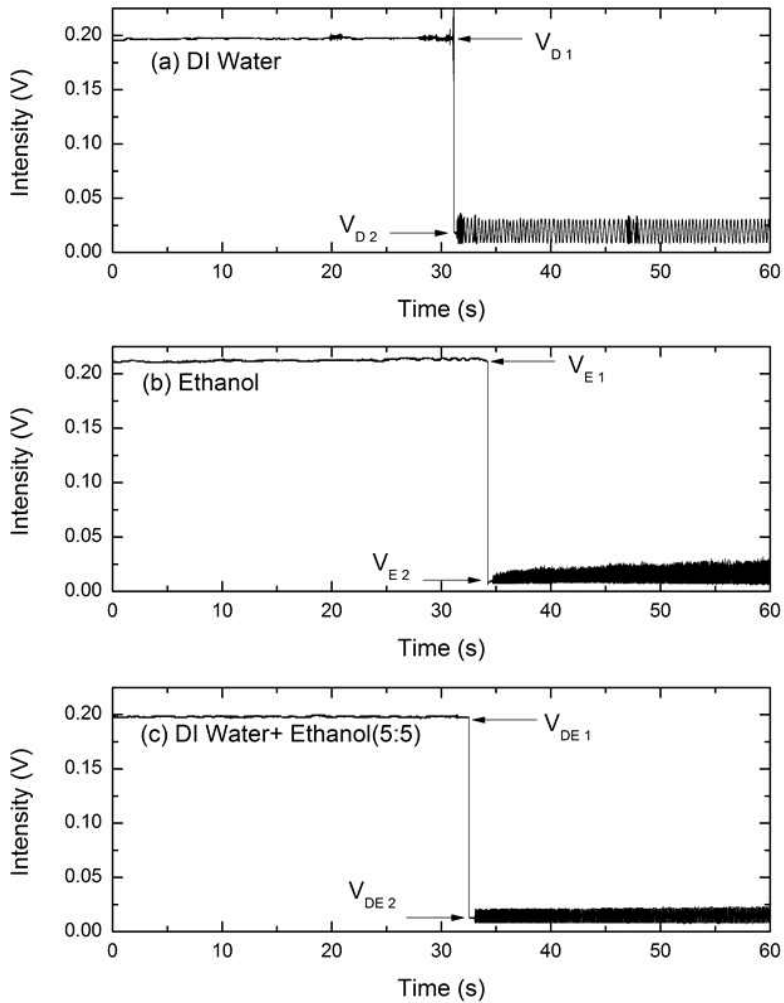


그림 3.8 (a) Ferrule 위에 DI Water가 떨어지면 생기는 반사강도 변화, (b) Ferrule 위에 Ethanol가 떨어지면 생기는 반사강도 변화, (c) Ferrule 위에 DI Water + Ethanol가 떨어지면 생기는 반사강도 변화

제2절 증발 속도 측정연구

1. 증발 속도 측정실험 구성

증발 속도의 변화에 가장 많은 영향을 주는 요소는 온도와 습도이며 이 점을 고려하여 실험을 구성해야 한다. 외부환경과 단절된 공간을 만들기 위해 아크릴 재질의 챔버를 [그림 3.9]과 같이 제작하였다. 습도를 조절하기 위하여 [그림 3.9]에서 항습장치로 제습기 파이프를 아크릴 상자 내부와 연결하는 A와 D부분을 실험 구성시 측정대상과 일직선을 피하게 설계를 하였다. 이는 제습기에서 나오는 바람에 의해 측정대상의 증발속도 변화를 고려한 설계이며 추가적으로 4개의 제습제를 아크릴 상자 내부에 넣어서 일정 습도를 유지하였다. 또한, 광원이나 장비들은 부피 및 조작의 용이성을 고려하여 전선을 통해 아크릴 상자 밖에서 조작할 수 있도록 B에 해당하는 구멍을 설계하였고 C 구멍은 위에서 용액을 떨어뜨리기 위해 설계하였으며 E는 헤어드라이기를 넣을 수 있는 구멍으로 아크릴 상자의 내부 온도 조절을 위해 설계되었다. 그 밖에 온도는 에어컨, 온풍기를 통해 실내온도를 조절하여 아크릴 내부의 온도를 조절하였다. 온도와 습도의 측정은 온습도계를 아크릴 상자안쪽 측정대상 근처에 설치하여 수시로 온도와 습도를 확인하였다.

아크릴 상자 내부에 설치한 광학계는 액체를 물방울 형태로 위에서 떨어지는 방식을 사용하였기 때문에 면적이 있는 광 패치코드를 사용하였다. 광 패치코드의 구성요소인 Ferrule 끝단에 액체 물방울을 올려놓을 수 있도록 [그림 3.10]과 같이 실험을 구성하였다. 전체 구성은 [그림 3.11]과 같다. 광학계 구성으로 광원은 가간섭성이 뛰어난 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)를 사용하였으며 설정할 수 있는 전류 범위 및 제한은 0 ~ 300 mA이며 출력 전류 안정성이 0.002 %로 안정적이다. 또한, 레이저 다이오드의 온도의 경우 15 ~ 35 °C로 설정할 수 있으며 안정성 0.01 % 미만으로 안정적이다[표 3.1]. 실험에서 레이저 다이오드의 전류와 온도를 각각 90 mA와 25 °C로 고정했을 때 광 스펙트럼 분석기(Optical Spectrum Analyzer, OSA)로 측정한 결과 중심파장이 1556.5 nm 파장이다[그림 3.13]. 파장변화를 최소화한 후 실험을 진행하였다. 본 실험에서는 단일모드 광섬유(Single-mode fiber, SMF)를 사용하였으며 광원에 타격을 주지 않게 광 아이솔레이터(Optical Isolator)와 광 패치코드 타입 중

Ferrule의 각도가 8° 가올어져 반사를 최소화하는 FC/APC 타입을 통해 광원을 보호했다. 그리고 광 서큘레이터(Optical Circulator)를 통해 Ferrule 끝단의 물방울 증발에 대한 신호를 측정부분으로 연결해준다. 측정된 신호는 [그림 3.14]와 같은 광 검출기(Photodetector, PD)로 수광하게 되고 다중간섭 신호를 데이터 수집 장치인 DAQ(Data acquisition)를 통해 전달하게 된다. 여기서 광 검출기는 800nm 에서 1800nm 까지 수광하며 첨두 파장(Peak Wavelength)는 1550nm 이다[표 3.2]. DAQ는 전압, 전류, 온도, 압력, 또는 소음 등의 전기 또는 물리적인 현상을 측정하는 역할을 수행한다. 측정된 신호는 DAQ를 통해 컴퓨터(Personal Computer, PC)로 전달되어 측정된 데이터 LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)을 통해 확인하는 방식으로 구성되었다.

Ferrule 끝단 위에 주사기로 떨어뜨린 물방울이 표면장력(Surface Tension)에 의해 Ferrule 구조상 가장자리로 퍼져서 형성하게 된다. 이후 실험에서 증발이 진행됨에 따라 물방울의 크기가 줄어들면서 Ferrule 위의 물방울이 Ferrule의 중심으로 증발되기 위해서 Ferrule을 정확한 수평으로 맞춰줘야 한다. 그러기 위해 [그림 3.15]와 같이 1차적으로 설치된 거울(Mirror)위에 수평자를 설치하고 수평을 맞춘 후에 Ferrule의 기울기를 조절하여 거울에서 반사된 광이 광섬유 코어로 들어올 수 있도록 Ferrule을 고정시킨 마운트의 각도를 조정하여 맞추는 방식으로 수평을 조정하였다. 그러나 이러한 방법은 대략적인 수평을 맞추는 작업으로 증발에 따른 물방울의 일정한 위치로 증발하기 위해서는 물방울을 떨어뜨리면서 증발하는 물방울의 형태를 현미경을 통해 물방울의 감소하는 외형을 관찰하여 Ferrule 중앙 즉, 광섬유 코어로 물방울이 형성할 수 있도록 2차적인 조정을 한다.

측정할 액체는 탈 이온수(Deionized Water, DI Water), 에탄올(Ethanol), 혼합용액으로 측정하였다. 에탄올은 순도 99%이며 [표 3.3]를 보면 아세트산(Acetic acid, CH_3COOH), 암모니아(Ammonia, NH_3), 납(lead, Pb) 등 기타 물질이 1% 혼합되어 있다[표 3.3]. 혼합용액은 전자저울을 통해 DI Water와 Ethanol을 5:5 비율로 제작하였다. 이는 혼합용액에 대한 위상변화를 관찰하기 위해 제작되었다.

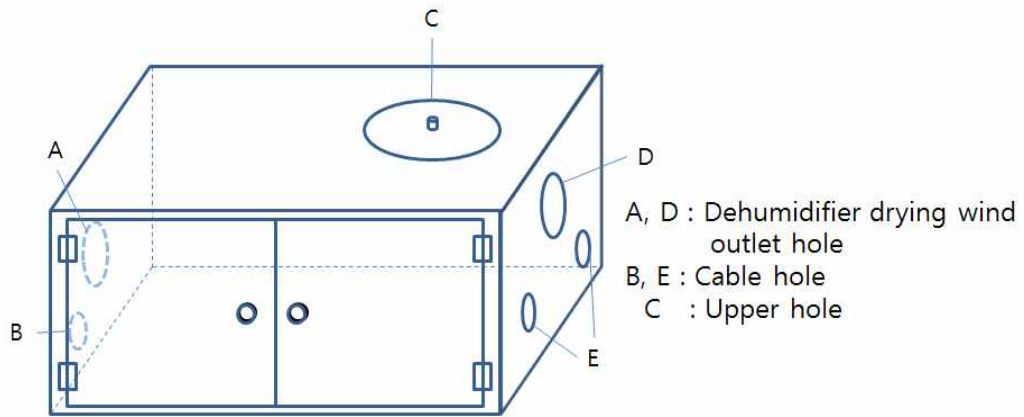


그림 3.9 증발속도의 영향을 주는 환경을 조절하기 위한 아크릴 상자

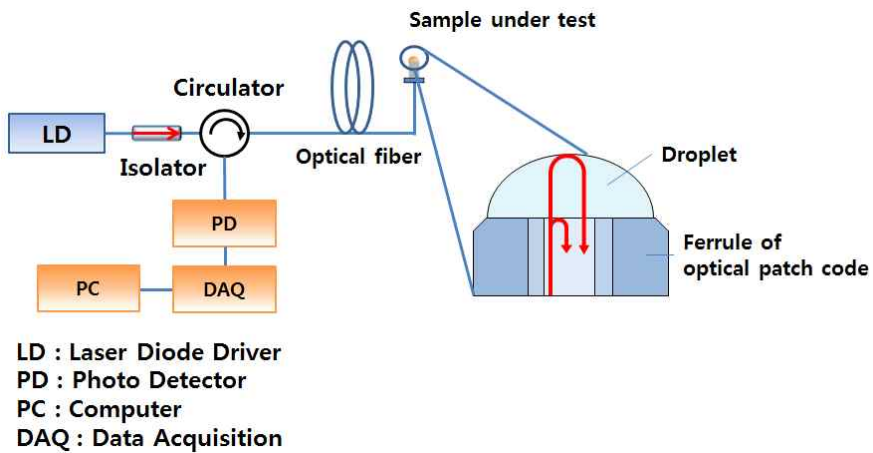


그림 3.10 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 측정실험을 위한 광학계 구성

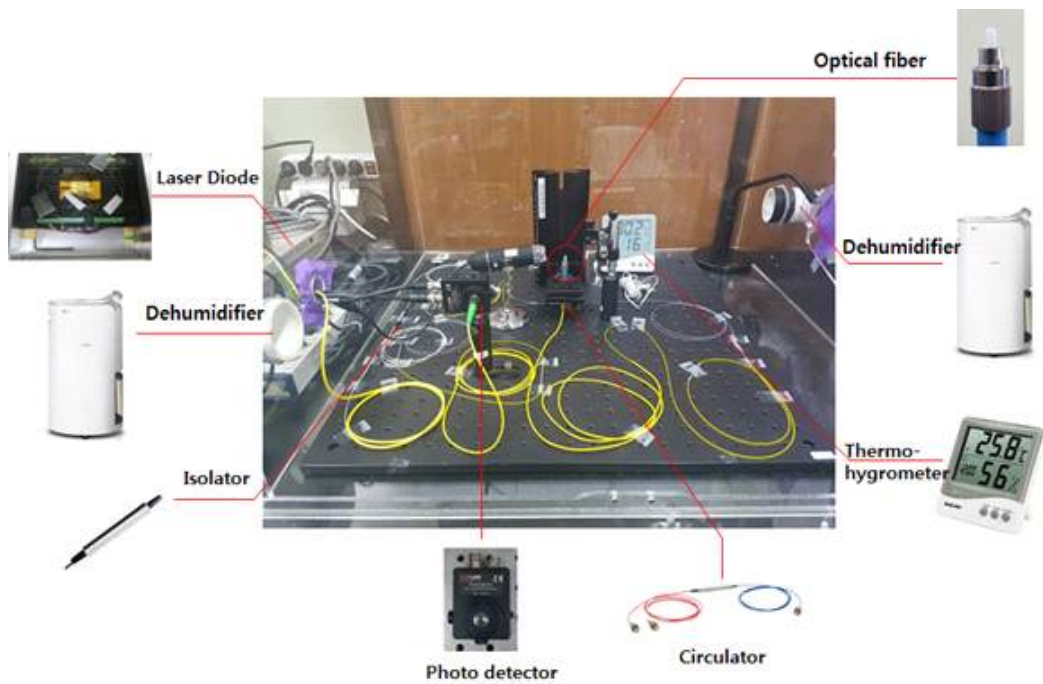


그림 3.11 다중반사 간섭을 이용한 증발속도 측정실험 구성

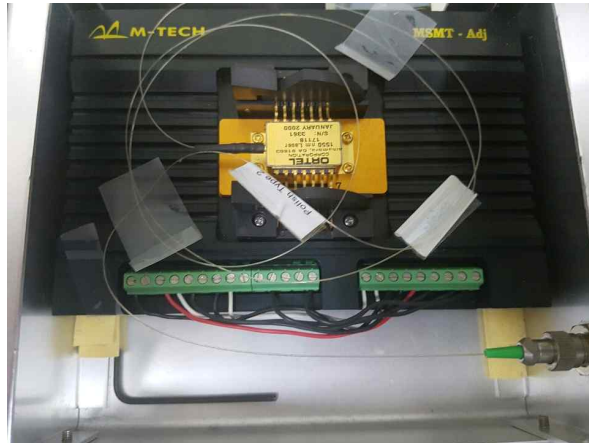


그림 3.12 MSLD-3 Laser Diode Driver와 전류, 온도 조절부분

MSLD-3 Laser Diode Driver Specifications		
OUTPUT	Current rage	0 ~ 300 mA
	Current stability	0.002 %
	Current Limite	0 ~ 300 mA
Output type common anode		
Temperature	Set Temperature	15 ~ 35 °C
	Stability	<0.01 °C
	TEC Current max	1.5 A
	Operating Temp	0 ~ 60 °C
Power Supply AC 220V		

표 3.1 MSLD-3 Laser Diode Driver 사양

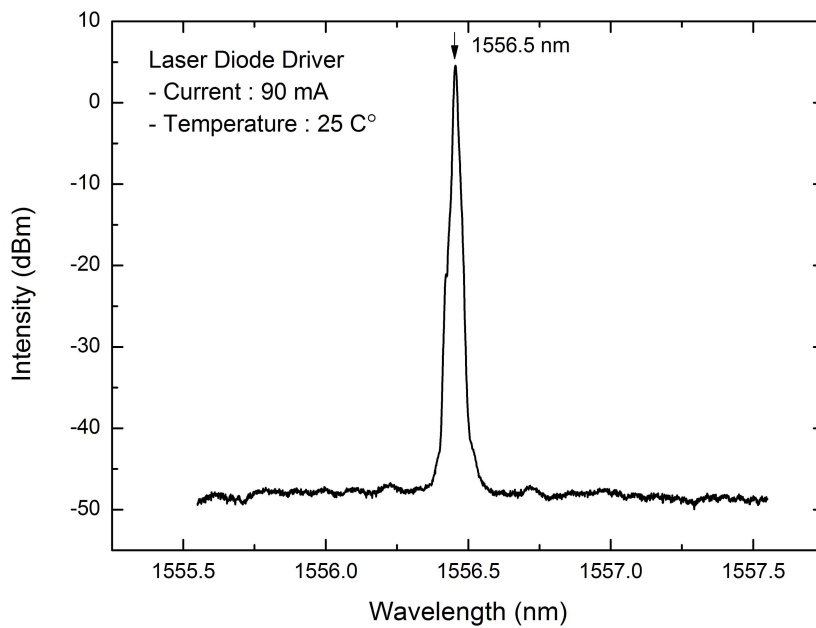


그림 3.13 MSLD-3 Laser Diode Driver의 중심파장 그래프



그림 3.14 PDA30B-EC - Ge Switchable Gain Photodetector

Ge Switchable Gain Photodetector Electrical Specifications		
Detector	-	Ge
Active Area	-	$\varnothing 3.0\text{ mm} (7.0\text{ mm}^2)$
Wavelength Range	λ	800 to
Peak Wavelength	λ_p	1550 nm 1800 nm (Typ.)
Peak Response	$R(\lambda_p)$	0.85 A/W (Typ.)
Output Impedance	-	50 Ω
Max Output Current	I_{out}	100 mA
Load Impedance	-	50 Ω to Hi-Z
Gain Adjustment Range	-	0 dB to 70 dB
Gain Steps	-	8 \times 10 dB Steps
Output Voltage	V_{out}	0 to 5 V (50 Ω)
		0 to 10 V (Hi-Z)

표 3.2 PDA30B-EC - Ge Switchable Gain Photodetector 사양

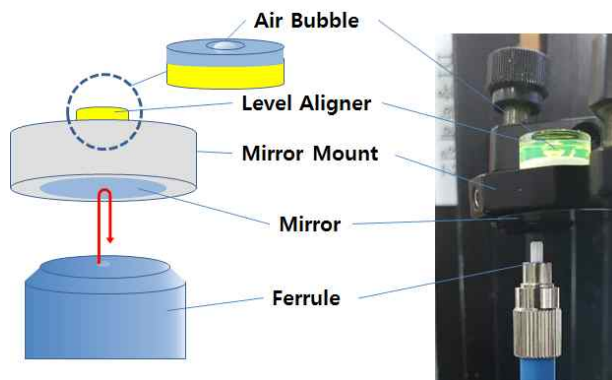


그림 3.15 증발에 의한 일정한 물방울의 변화를 위한 수평조절 방법

Ethanol specification		
Containing component	Unit	Content
Density(20℃)	<i>g/ml</i>	0.7897
Water	%	0.1
Non-Volatile Matters	%	0.001
Acid(as CH_3COOH)	%	0.002
Alkali(as NH_3)	%	0.0001
Heavy Metals(as Pb)	%	0.0001
Aldehyde and Ketone (as CH_3COCH_3)	%	0.001
Fusel Oil(as $C_5H_{12}O$)	%	0.004
Methanol	%	0.02
Assay(by Density)	v/v%	99.9

표 3.3 Ethanol 용액의 성분표

2. 증발 속도 측정센서 실험 및 결과

본 실험은 광원인 레이저 다이오드에서 출발한 광이 광섬유 내부를 진행하면서 광 아이슬레이터와 광 서큘레이터를 지나 광 패치코드 Ferrule 끝단에서 반사 및 투과된다. 여기서 용액이 Ferrule 위에 없는 경우 프레넬 반사(Fresnel reflection)가 일어나며 Ferrule 위에 주사기를 통해 용액을 떨어뜨리면 광섬유-공기 매질로 진행하던 광이 광섬유-용액으로 바뀌기 때문에 굴절률 차에 의한 반사광의 광세기가 변하게 된다. 그리고 광섬유-용액 계면에서 반사된 빛과 용액-공기 계면에서 반사된 광의 두 개의 신호가 물방울 높이만큼의 경로차를 발생시키고 그 차이에 의해 간섭신호가 형성되어 다시 광 서큘레이터를 지나 광 검출기와 DAQ를 거쳐 LabVIEW program을 통해 시간에 따른 광세기를 실시간으로 보여주게 된다.

실험 결과로 [그림 3.16]은 광섬유 끝단에서 반사되는 DI Water 용액에 대한 광의 간섭 강도 변화를 보여주며 400 ~ 401 s로 시간축을 확대해보면 선명한 사인(sin)형태를 확인 할 수 있다. 또한 용액이 Ferrule 위에 놓이는 시점인 30초대에 강도는 급격히 감소한다. 그런 다음 광섬유와 물방울 사이의 다중 코팅 구성의 간섭이 발생하고 액체가 증발되면서 시간에 따라 두께가 줄어들면서 정형과 형태의 간섭 신호를 얻을 수 있다. 액체가 증발함에 따라 광손실이 점차적으로 감소되어 파동의 진폭이 점진적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 증발이 완전히 끝난 후에 강도는 초기의 강도로 회복하는 것을 확인할 수 있다. 이때의 아크릴 상자내의 온도와 습도는 각각 27.5 °C와 23 % 이다. 본 실험에서 전체 증발시간(T)는 [그림 3.17(a)]에서 볼 수 있듯이 약 492 s이다. 또한 DI Water의 증발 속도 측정 결과에서 얻어진 간섭무늬를 고속 푸리의 변환(Fast Fourier transform, FFT)을 통해 이 신호의 주파수(f)를 약 3.537 Hz로 얻을 수 있다. 주파수 앞부분에 생기는 다른 주파수 성분은 액체가 증발되면서 발생하는 두께의 불안정한 변위 등에 의한 잡음이다.[그림 3.17(b)]. 식(8)을 통해 광원의 중심파장이 $\lambda = 1556.5 \text{ nm}$ 와 앞에서 측정된 DI Water의 굴절률이 $n_2 = 1.3066$ 일 때, Δd 는 약 595.63 nm이다. 간섭신호의 주파수와 Δd 를 가지고 식(9)에 대입하여 계산된 DI Water의 증발 속도(γ)는 $-2.106 \mu\text{m/s}$ 이다. 여기서 증발 속도가 음수를 가지는 이유는 시간에 따라 물방울의 두께가 감소하는 것을 의미한다. Ethanol 용액도 DI Water와 같이 Ferrule 위에 물방울이

놓이는 시점인 30초대에서 강도가 급격하게 감소한다. 그러나 [그림 3.18]에서 보는 바와 같이 빨리 증발하는 특성이 있는 Ethanol의 경우 물방울이 형성되어 강도가 감소된 시점부터 빠른 속도의 간섭패턴을 보여주며 이러한 빠른 증발속도로 인해 80 ~ 81 s을 확대한 그래프를 보면 노이즈를 확인할 수 있다. 이때의 아크릴 상자의 내부온도와 습도는 28.2 °C와 24 %이다. [그림 3.19]에서 Ethanol 용액의 전체 증발시간은 약 61.3 s이고, 간섭신호의 주파수는 13.19 Hz이다. 이 용액의 굴절률은 $n_2 = 1.3551$ 으로 앞에서 측정되었다. 이것으로부터 Ethanol의 두께 변화 Δd 는 약 574.31 nm이고 증발 속도는 $-7.575 \mu\text{m/s}$ 으로 얻을 수 있다. 따라서 Ethanol은 DI Water보다 약 4배 빠른 증발속도를 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이번 실험을 통해 용액의 시간에 따른 증발 속도가 계속적으로 바뀌는 것을 관찰하였다. 하지만 간섭신호의 주파수 측정을 통한 증발 속도 측정 방법에서는 증발하는 전체시간에 대한 평균 증발 속도만 계산할 수 있다. Ethanol의 경우, 증발이 모두 완료된 시점에서 초기의 강도로 회복하지 않고 불규칙적인 강도를 보이는 데 이는 Ethanol 용액의 성분 중 기타에 해당하는 용액의 잔류로 인해 완전히 증발된 이후에도 초기 수준으로 회복되는 것을 방해하는 것으로 보인다[그림 3.19(a)]. 또한 DI Water에 비해 Ferrule위에 형성하는 물방울의 크기가 작는데 이는 표면장력의 차이에 의한 것으로 주사기로 Ferrule위에 떨어뜨리면 DI Water의 경우 Ethanol 보다 표면장력이 크기 때문에 흘러넘치지 않고 물방울을 형성하는데 Ethanol의 경우 상대적으로 DI Water보다 표면장력이 낮기 때문에 일정 크기의 물방울 이상이면 Ferrule 밖으로 흘러넘치게 된다.

DI Water와 Ethanol을 혼합용액을 제작하여 증발속도를 측정하였다. DI Water와 Ethanol을 5:5로 혼합한 용액으로 이전과 같은 실험 구성을 통해 증발속도를 측정하였다. [그림3.20]에서 보면 초기의 강도가 유지되었다가 혼합용액이 Ferrule 위로 올라가는 시점인 30 s대에서 이전과 같이 강도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그 이후 점점 간섭무늬를 형성하여 진행되다가 289 s에 모든 증발이 완료되어 초기 강도로 돌아오는 현상을 보인다. 여기서 간섭무늬를 보면 초기에는 주기가 짧지만 후반으로 갈수록 주기가 길어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 증발속도가 빠른 Ethanol이 초기에 증발하고 이후에 DI Water이 증발하는 것으로 보인다. 또한 Ethanol 용액의 결과와 비슷하게 증발이 끝나고 나서 초기의 강도로 복귀하지 않고 강도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 혼합용액에 Ethanol이 함유되어 있기 때문에 기타

성분들에 의해 Ferrule위의 잔류성분들이 남아있는 것으로 판단된다. 본 실험에서 전체 증발 시간(T)는 [그림 3.21(a)]와 같이 약 256 s 이다. 이를 고속 푸리의 변환시 혼합용액의 단일 용액에서 하나의 주파수가 관측된 것과 다르게 여러 개의 주파수(f_1, f_2, f_3)가 관측되었으며 이것은 각각 3.26 Hz, 9.59 Hz, 11.53 Hz임을 확인하였다[그림 3.21(b)]. 앞에서 측정된 혼합용액의 굴절률인 1.3288을 가지고 식 (9)를 통해 각 주파수에 해당하는 증발 속도($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$)는 각각 $-1.909 \mu\text{m/s}$, $-5.616 \mu\text{m/s}$, $-6.752 \mu\text{m/s}$ 로 얻어진다.

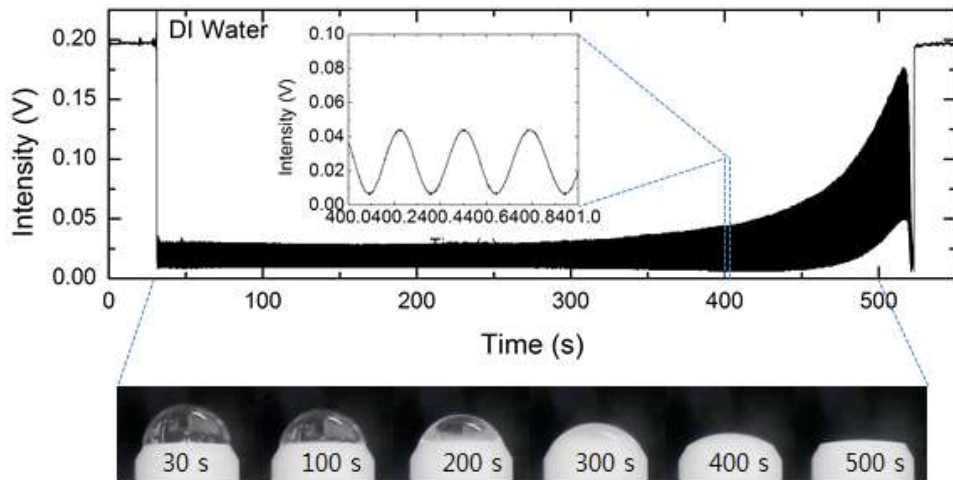


그림 3.16 DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬

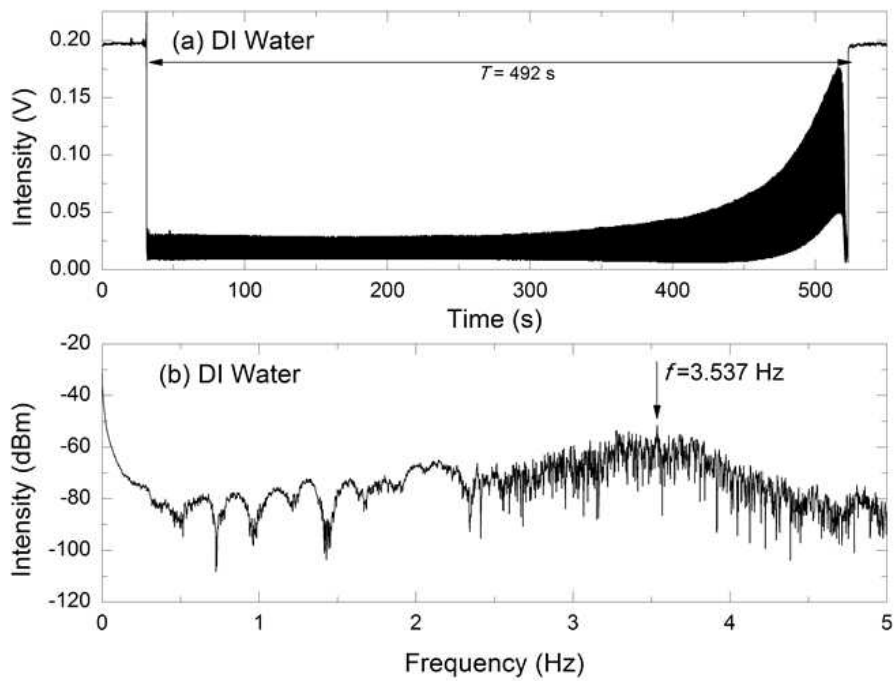


그림 3.17 (a)DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환

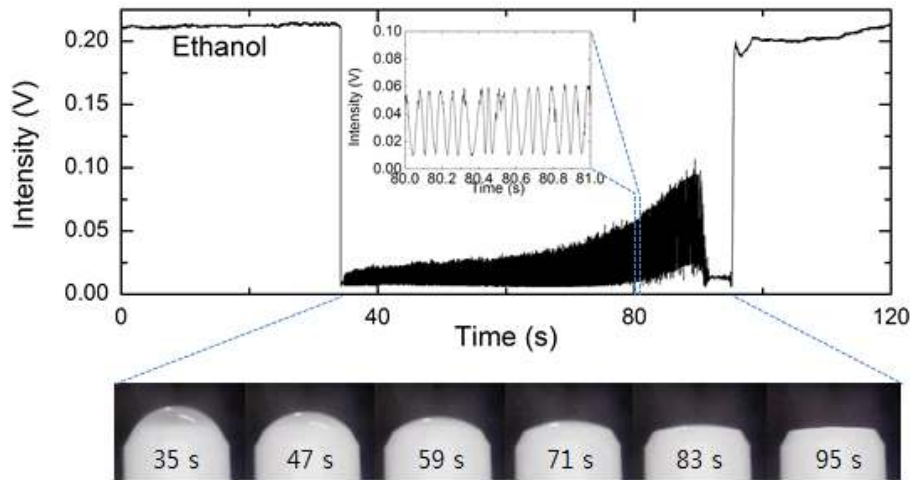


그림 3.18 Ethanol 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬

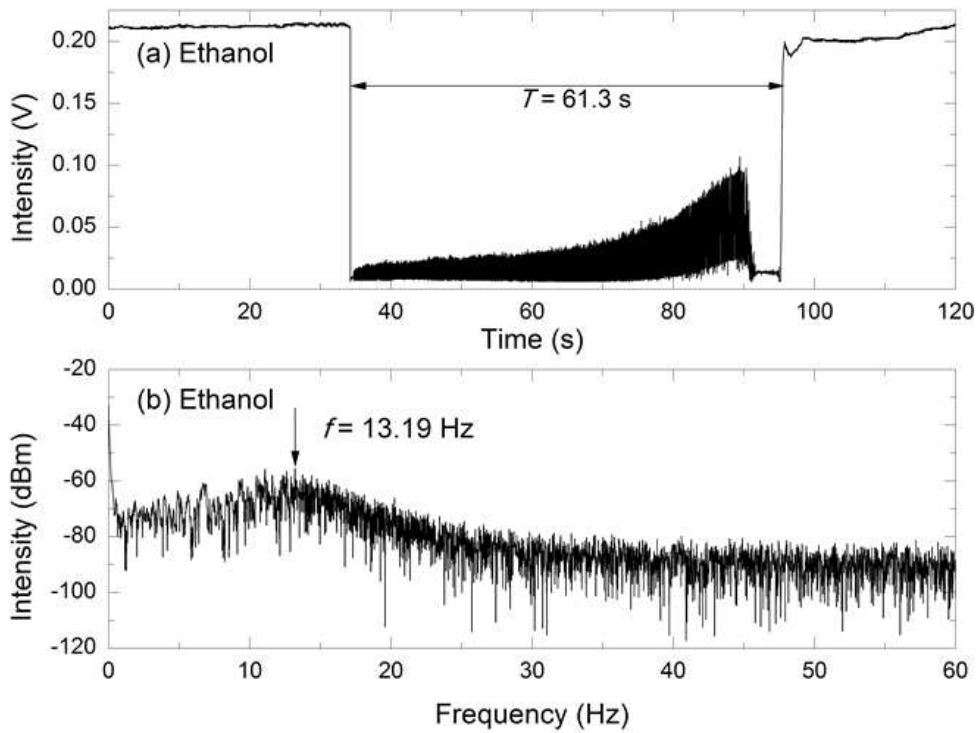


그림 3.19 (a) Ethanol 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환

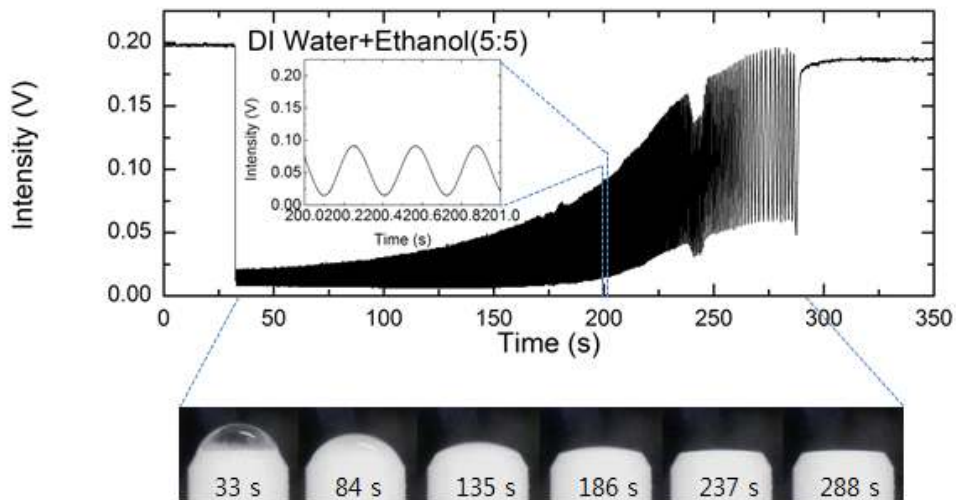


그림 3.20 DI Water와 Ethanol 혼합용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬

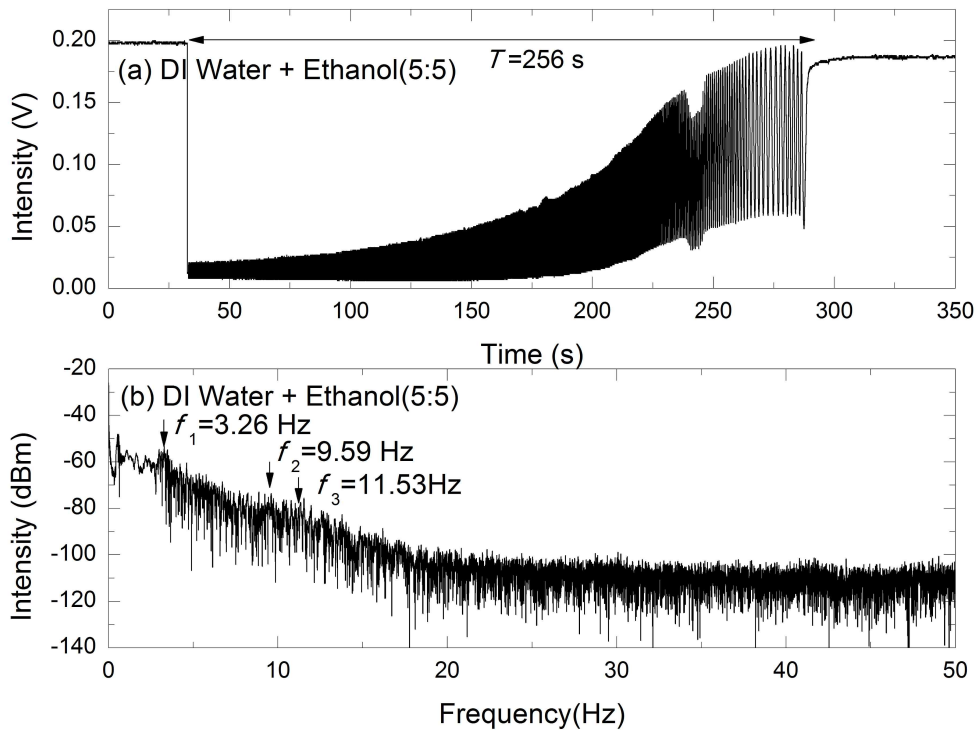


그림 3.21 (a) DI Water+Ethanol 혼합용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에서의 간섭무늬의 푸리에 변환

제3절 Ferrule 끝단의 변형에 따른 증발속도 안전성 실험

Ferrule 끝단에 떨어진 용액의 증발에 따른 광섬유 코어 중심으로 증발하는 게 이상적이다. 그러나 Ferrule의 수평이 어긋나 있을시 용액의 증발에 따른 Ferrule 끝단에서 반사되어 들어오는 간섭무늬에서 이상 현상이 발생한다. 용액이 증발함에 따라 간섭무늬가 점차적으로 초기의 강도로 회복되어야 하지만 일정지점에서 낮은 광 강도를 유지하다가 초기의 강도로 회복하는 현상이 일어난다. Ferrule 위에 형성된 용액이 증발함에 따라 물방울의 표면에서 반사되어 광섬유 코어 내부로 들어와야 하는 광이 다른 위치로 조사되기 때문이다[그림 3.22]. 이를 보완하기 위해 액체가 자유표면에서 표면을 작게 하려는 성질인 표면장력을 이용하여 Ferrule의 수평이 어긋나 있어도 일정한 간섭무늬를 형성하기 위해 Ferrule 끝단을 변형시켰다.

본 실험에 사용된 FC/PC 형태의 광 패치코드의 Ferrule에 불산(Hydrofluoric acid), 아세톤(Acetone) 용액을 주사기를 통해 Ferrule 위에 떨어뜨려 각각 40 s 동안 노출하여 식각했다. 또한, 광 패치코드를 직접 제작하여 광섬유 부분을 Ferrule 안으로 들어가게 제작하였다. 각 용액에 의해 Ferrule의 단면이 변형되어 용액을 잡아주는 역할을 수행할 것이라 예상하였다[그림 3.23].

용액 및 제작에 의한 Ferrule 단면에 상태를 확인하기 위해 각각의 제작된 Ferrule을 공초점 현미경을 이용하여 Ferrule 단면의 식각 여부 및 깊이를 측정하였다[그림 3.24]. 일반 광패치코드 Ferrule의 단면은 평탄하지만 불산에 식각한 경우 광섬유 클래드와 코어부분이 식각된 것을 확인 할 수 있다. 특히 코어부분은 클래드에 비해 더 많은 식각이 이루어진 것으로 확인된다. 아세톤의 경우 Ferrule 위 광섬유 부분이 약간 식각된 것으로 확인되었다. 제작된 광 패치코드 Ferrule의 경우 광섬유 부분 전체에 비규칙적으로 식각이 이루어진 것을 확인하였다. 그러나 용액에 의해 변형된 Ferrule의 단면은 물방울을 이상적으로 감소하는데 큰 영향을 주지 못 했다[그림 3.25]. 오히려 수평자를 이용하여 Mirror의 수평을 맞추고 반사광의 세기를 측정하여 기울어진 Ferrule의 수평을 조정하였다. Ferrule 위에 물방울을 떨어뜨려서 간섭무늬에 따른 Ferrule의 수평을 잡는 것이 Ferrule 끝단에서 반사된 반사광의 간섭무늬가 이상적으로 나오는 것을 확인하였다[그림 3.26].

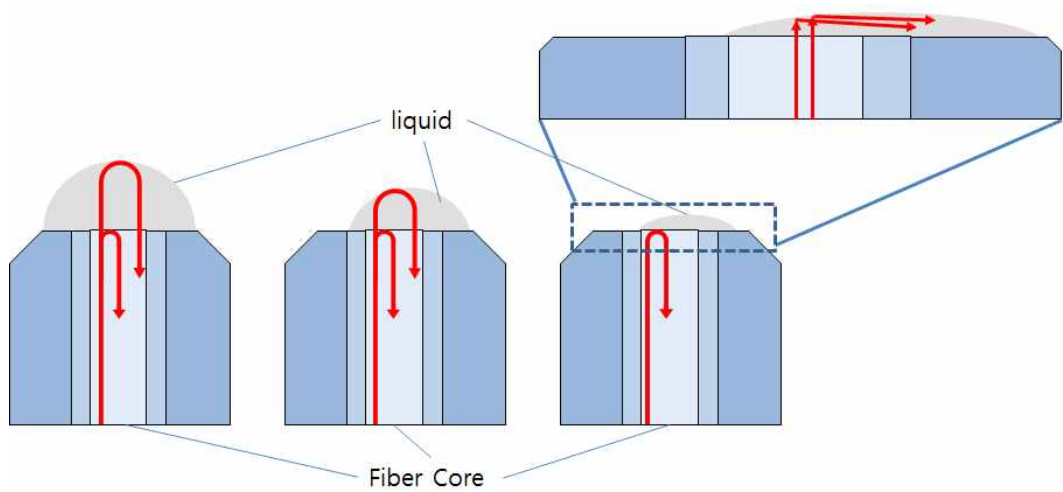


그림 3.22 용액의 증발에 따른 물방울의 위치변화에 의한 결합 손실

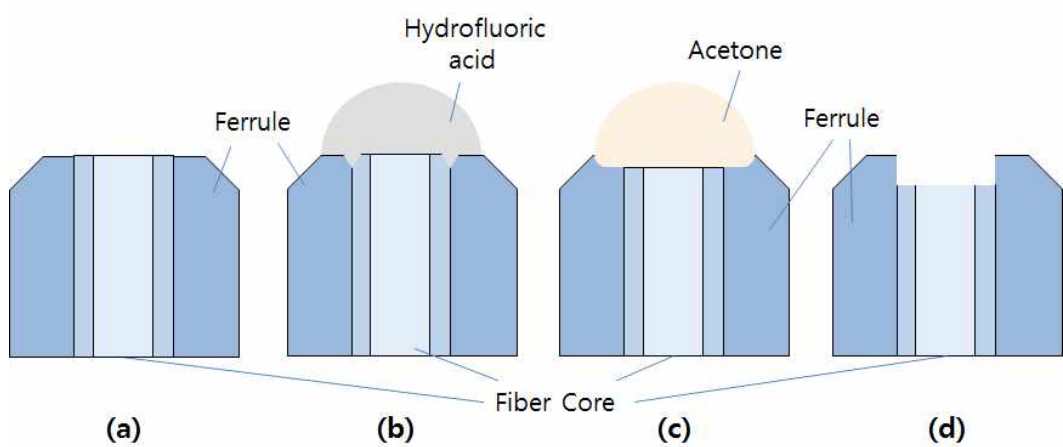


그림 3.23 (a) 일반 광패치코드 Ferrule, (b) 불산에 의한 광섬유와 Ferrule사이
 홈이 형성예상, (c) 아세톤에 의한 Ferrule 위 단면 식각, (d) 광섬유 부분이
 Ferrule 안쪽에 형성되게 제작

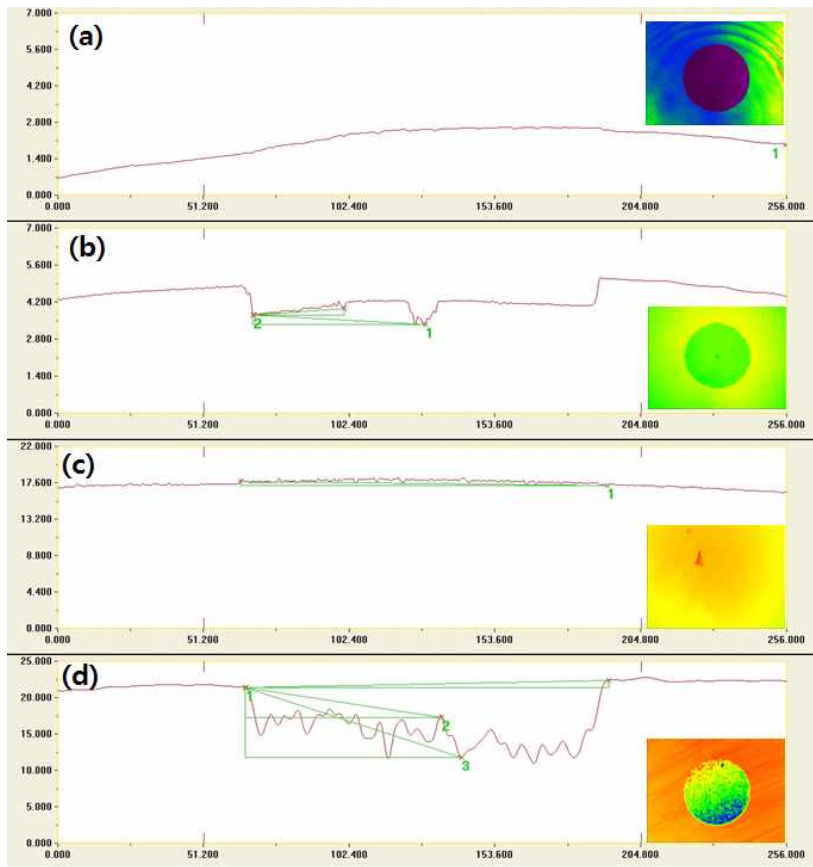


그림 3.24 (a) 일반 광패치코드의 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (b) 불산에 식각된 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (c) 아세톤에 식각된 Ferrule 위 단면의 깊이측정, (d) 제작된 광패치코드의 Ferrule 위 단면의 깊이측정

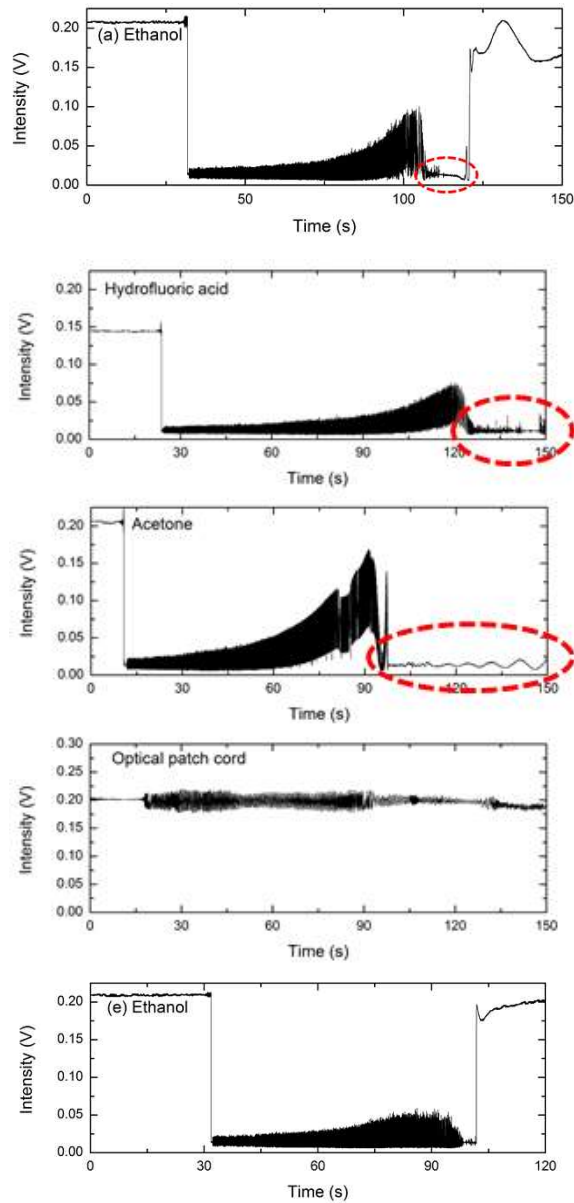


그림 3.25 (a) Ferrule의 수평이 어긋남에 따른 반사광의 간섭무늬, (b) 불산 용액에 식각된 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (c) 아세톤 용액에 식각된 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (d) 제작된 광 패치코드 Ferrule에 대한 반사광의 간섭무늬, (e) 수평자를 통한 Ferrule의 수평조절 후 반사광 간섭무늬

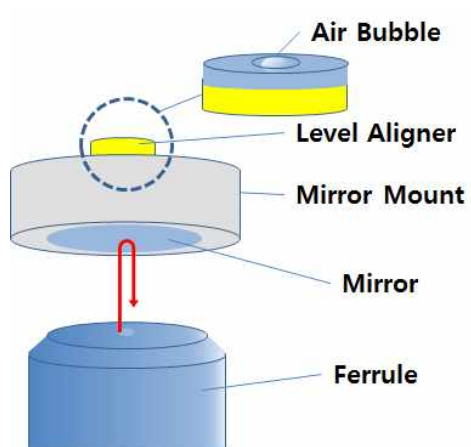


그림 3.26 수평자를 통해 수평이 맞춰진 Mirror를 이용한 Ferrule의 수평조정

제4장 분 석

제1절 측정의 신뢰성 분석

본 실험에서 증발 속도의 신뢰성을 확인하기 위해 반복실험을 진행하였다. DI Water 용액을 기준으로 4회 반복실험 진행하였다. 아크릴 상자 내부습도는 각각 24 %, 23 %, 23 %, 23 %이며 내부온도는 각각 26.2 °C, 27.6 °C, 27.5 °C, 27.6 °C 으로 전 실험과 비슷한 환경에서 실험을 진행하였다. [그림 4.1]과 같이 여러 번 측정 시 전체 증발시간(T)는 물방울의 양에 따라 각기 다르지만 증발 속도를 거의 동일하게 측정되었다. 이는 용액의 양이 증발속도에 미치는 영향이 미비하다는 것을 알 수 있다. 실질적으로 공기중에 노출되어 있는 면적에 의해 조금의 차이는 생길 수 있으나 소량의 용액을 사용하기 때문에 증발속도 측정에는 큰 영향을 주지 못한다. 식(8)을 통해 Δd 는 약 593.72 nm로 고정되어 있으므로 각각의 경우에 대한 고속 푸리의 변환으로 주파수를 구하면 각각 3.44 Hz, 3.421 Hz, 3.565 Hz, 3.466 Hz이다. 이에 따른 증발 속도는 각각 $-2.048 \mu\text{m/s}$, $-2.037 \mu\text{m/s}$, $-2.123 \mu\text{m/s}$, $-2.064 \mu\text{m/s}$ 로 얻어진다. 평균적으로 $-2.068 \mu\text{m/s}$ 의 증발속도가 측정되었으며 표준편차는 0.0331으로 여기서 제안한 증발 속도 측정법이 신뢰성이 있는 것을 알 수 있다. 또한 앞에서 측정한 증발속도인 $-2.106 \mu\text{m/s}$ 와 거의 흡사하게 얻었다.

측정된 증발속도에 대한 정확성을 확인해 보기위해 현미경의 측정 프로그램을 통해 Ferrule 끝단 위에 형성한 각 용액의 초기 물방울 두께를 확인할 수 있다. 여기서 측정된 용액에 대한 증발속도에 전체 증발시간을 곱해주면 초기 물방울 두께를 계산할 수 있다. DI Water의 반복실험한 결과를 바탕으로 초기 물방울의 두께를 비교하였다. DI Water 1 ~ 4의 전체 증발속도는 533 s, 551 s, 604 s, 608 s이며 초기 물방울의 두께는 1.128 mm, 1.118 mm, 1.274 mm, 1.246 mm으로 계산된다. 현미경으로 측정한 초기 물방울의 두께는 1.068 mm, 1.120 mm, 1.215 mm, 1.212 mm로 계산값과 비교하였을 때 거의 흡사한 결과를 얻을 수 있다[그림 4.2]. 현미경 측정값 대비 계산값의 오차는

-0.006 mm, 0.002 mm, -0.059 mm, -0.034 mm이다. 오차가 발생한 이유는 앞에서 측정한 증발 속도는 평균 증발속도이기 때문인 것으로 판단된다.

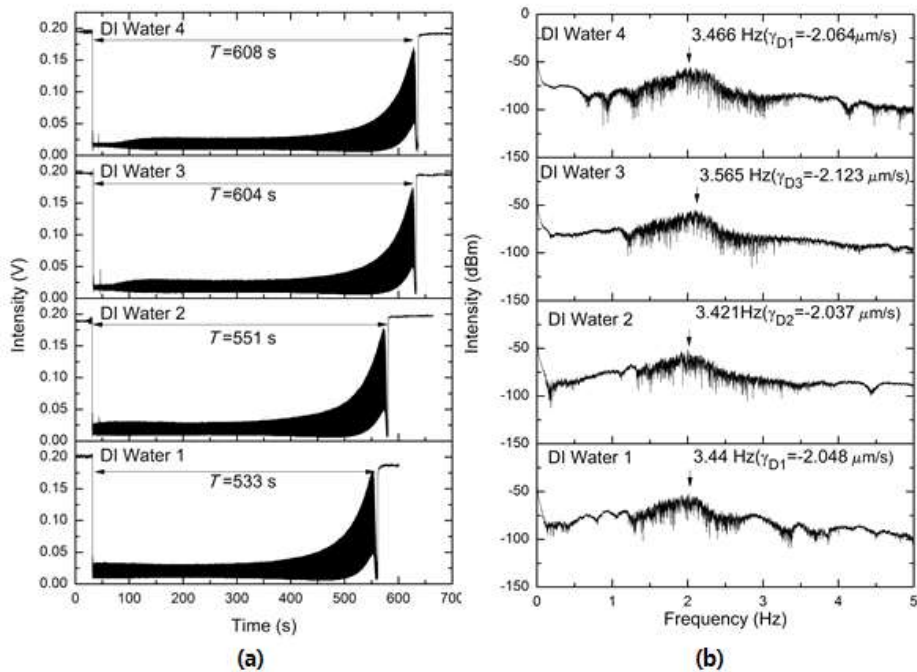


그림 4.1 (a) DI Water 용액에 대한 반복실험을 통한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도변화를 보여주는 간섭무늬, (b) (a)에 각 주파수에 대한 증발속도

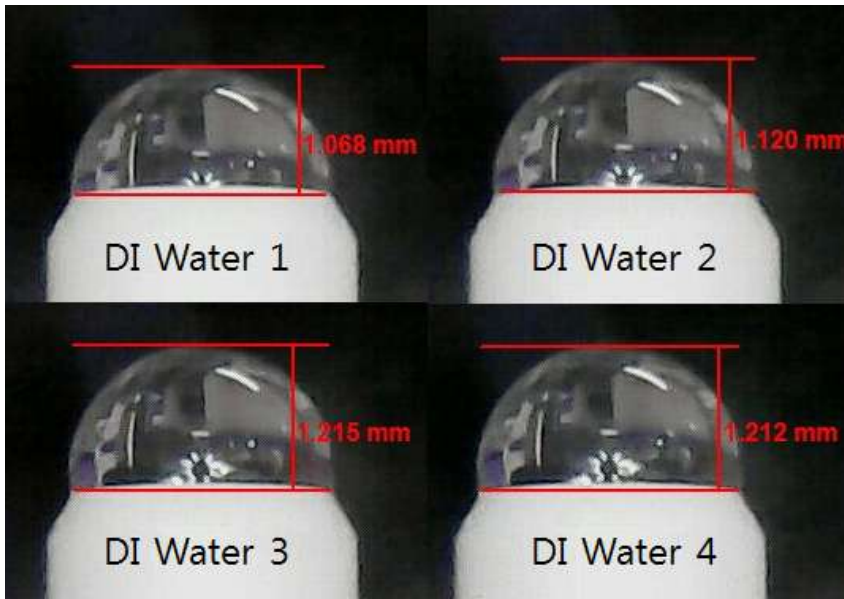


그림 4.2 Ferrule 끝단에 형성한 DI Water의 초기 물방울 두께

제2절 Hilbert 변환을 이용한 증발 속도 분석

DI Water의 증발 속도 결과에서 확대한 그래프를 보면 간섭신호의 주기가 대부분 일정한 것을 확인 할 수 있다[그림 3.16]. 그러나 Ethanol이나 혼합용액의 경우 간섭무늬의 주기가 시간에 따라 달라지는 것을 관측할 수 있으며 이것은 주파수 분석에서 노이즈 성분이 많이 포함되어 나타난다. 이는 Ethanol 보다 DI Water의 증발이 비교적 느려서 안정적으로 증발하기 때문이다. 반면 Ethanol의 경우 증발속도가 빠르기 때문에 증발하는 도중에 물방울의 표면이 떨리게 되면서 증발 속도 측정에 오차요인으로 작용하게 된다. 이러한 노이즈에 의한 증발 속도 오차를 Hilbert 변환을 통해 보다 정확한 실시간 증발 속도를 분석할 수 있다. Hilbert 변환은 [그림 4.3]과 같이 전개된다.^[34] Ferrule 끝단에서 반사된 광의 간섭신호는 다음과 같다.

$$y(t) = A \sin(\varphi(t) - \varphi(t-z) + \phi_0) + DC \quad (18)$$

여기서 $\varphi(t)$ 는 Ferrule 끝단에 반사된 광의 위상이고 $\varphi(t-z)$ 는 물방울 표면에서 반사된 광의 위상이다[그림 4.4]. 또한 신호의 직류 성분 DC 를 디지털 필터를 이용해서 제거해주면 다음 식과 같이 교류 신호로 표현할 수 있다.

$$y_{ac}(t) = A \sin(\varphi(t) - \varphi(t-z) + \phi_0) \quad (19)$$

여기서 식 (19)에서 $\varphi(t) - \varphi(t-z) + \phi_0 = \Phi(t)$ 라 할 때 식 (19)의 신호를 Hilbert 변환을 하면 기존 신호의 위상이 $\pi/2$ 만큼 이동시키게 되어 아래와 같은 신호를 얻게 된다.

$$y_{ac}(t) = A \sin \Phi(t) \quad (20)$$

$$H(y_{ac}) = A \cos \Phi(t) \quad (21)$$

식 (20)과 식(21)을 통해 간섭신호의 위상은 다음과 같이 유도된다.

$$\Phi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{y_{ac}}{H(y_{ac})}\right) = kn(2d) = \frac{4\pi}{\lambda}n \times d(t) \quad (22)$$

여기서 k 는 전파상수, n 은 액체의 굴절률, d 는 액체 방울의 최대두께이다. 식 (22) 통해 시간에 따른 위상변화를 관찰할 수 있다. 또한 식 (22)를 미분해주면 다음과 같이 증발속도를 구할 수 있다.

$$\gamma(t) = \frac{d(d(t))}{dt} = \frac{\lambda}{4\pi n} \frac{d\Phi}{dt} \quad (23)$$

[그림 4.5(a)]와 같은 DI Water의 간섭무늬를 고속 푸리의 변화를 통해 직류 신호를 없애고 교류 신호를 Hilbert 변환하면 [그림 4.6(a)]와 같다. 두 그림을 통해 [그림 4.6(b)]와 같이 시간에 따른 DI Water의 비선형 위상변화를 확인 할 수 있다. [그림 4.6(b)]을 미분하면 주파수이므로 식 (23)을 통해 증발시간에 따른 증발속도를 구할 수 있게 된다[그림 4.7(a)]. 그러나 노이즈가 심하기 때문에 시간에 따른 정확한 증발속도에 대해 알기 쉽지 않다. [그림 4.7(a)]을 고속 푸리에 변화를 통해 고주파수 노이즈 신호를 제외하면 [그림 4.7(b)]와 같이 시간에 따른 증발속도를 확인할 수 있다.

[그림 4.8]에서 각 용액에 대한 증발시간에 따라 변화하는 위상을 확인 할 수 있다. 여기서 DI Water와 Ethanol의 경우 위상변화는 선형적인 형태를 보이는 반면 혼합용액의 경우 비선형적인 형태를 보이는 것을 확인했다. 혼합용액의 증발의 경우 초기에는 Ethanol과 비슷한 기울기로 위상 변화가 생기다가, 시간이 갈수록 DI Water의 기울기와 비슷해지는 것으로 보아 초기에는 Ethanol이 주로 증발되다가 거의 증발이 된 후에 남은 Water가 증발하는 것으로 보인다. 여기서 각 용액의 위상 그래프의 기울기는 주파수를 의미한다. 기울기가 크다는 것은 증발속도가 빠르다는 것을 의미하고, 기울기가 적다는 것은 증발속도가 느리다는 것을 의미한다. 이를 통해 DI Water는 Ethanol에 비해 증발속도가 느리다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 증발시간에 대한 위상변화를 미분해주면 식 (23)과 같이 증발 속도를 얻을 수 있다. DI Water, Ethanol, 혼합용액의 시간에 따른 증발 속도는 각각 [그림 4.9], [그림 4.10], [그림 4.11]에서 확인할 수 있다. 여기서 증발시간에 따른 증발속도 그래프는 양수로 표시하였다. 각 용액에 대한 증발속도 그래프의 점선은 앞서 계산한 평균 증발속도를 의미한다. DI Water

용액의 증발시간에 따른 증발속도는 처음에는 $-1.75 \mu\text{m}/\text{s}$ 의 증발속도로 시작하여 약 300 s 이후에는 평균 증발속도인 $-2.106 \mu\text{m}/\text{s}$ 로 증발속도로 증가됨을 알 수 있다. 또한 Ethanol의 용액의 경우 처음에는 약 $-10.5 \mu\text{m}/\text{s}$ 의 높은 증발속도를 시작으로 점차적으로 감소하여 약 $-7 \mu\text{m}/\text{s}$ 의 증발속도를 보인다. Ethanol의 경우 증발시간에 따른 증발속도가 각 지점에서 큰 노이즈를 보이는데 이는 빠른 증발속도를 가지는 Ethanol에 의해 물방울 표면이 진동하기 때문으로 예상된다. 혼합용액의 경우 초기에는 약 $-7.5 \mu\text{m}/\text{s}$ 의 증발속도를 보이지만 이후 감소하여 약 200 s에는 $-2 \mu\text{m}/\text{s}$ 의 낮은 증발속도를 보이게 된다. 이를 통해 초기에는 혼합용액의 구성 중 Ethanol 용액의 증발이 주로 일어나고 후반에는 DI Water의 증발에 일어나는 것을 알 수 있다. 또한, 각 용액에 대한 평균 증발속도(점선)는 증발시간에 따른 증발속도 그래프에서 증발이 어느정도 진행된 후반에 형성되어 있는데 이는 고속 푸리에 변환을 통해 확인한 주파수에서 가장 높은 지점을 선택하였기 때문이다.

DI Water 용액에 대한 반복 실험한 데이터를 통해 위상변화 시 큰 차이가 없음을 확인하였다[그림 4.12]. 또한 증발시간에 대한 증발속도 그래프에서도 전체적으로 비슷한 경향을 가지는 것을 확인하였다[그림 4.13].

본 연구에서 증발속도는 Ferrule 위의 물방울 두께정보를 통해 확인하였다. 그러나 일반적인 증발속도는 증발시간에 따른 증발량으로 표현해야 한다. 이를 위해 Ferrule 위에 형성한 물방울을 반구로 가정하고 질량에 대한 증발속도(γ_g)를 계산하였다. 여기서 시간에 따른 반구의 부피(V)는 $(2/3)\pi d(t)^3$ 으로 표현할 때 DI Water와 Ethanol의 밀도(ρ)를 곱해주면 질량은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M(t) = \frac{2}{3}\pi d(t)^3 \rho \quad (24)$$

여기서 $d(t)$ 는 시간에 따른 물방울의 두께 정보를 의미한다. 식 (24)를 미분하고 식 (22)를 대입하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{\rho \lambda^2}{8\pi n^2} \times \phi^2(t) \times \gamma(t) \quad (25)$$

여기서 DI Water와 Ethanol의 밀도(ρ)는 각각 10^6 g/m^3 , $789 \times 10^3 \text{ g/m}^3$ 이다. DI Water와 Ethanol에 대한 증발시간에 따른 위상변화의 제곱인 $\phi^2(t)$ 와 증발시간에 따른 증발속도를 나타내는 $\gamma(t)$ 를 대입하여 [그림 4.14]와 같은 결과를 확인하였다. 이때의 증발속도는 증발시간에 따른 감소하는 증발량을 표현하기 위해 음수로 계산하였다. DI Water 용액은 초기에 시간에 따른 증발량은 미비하였으나 이후 점차적으로 증가하여 최대 $-11.37 \text{ } \mu\text{g/s}$ 의 증발속도를 보였다. DI Water 용액에 비해 빠른 증발속도를 가지는 Ethanol 용액의 경우 DI Water 용액에 비해 증발속도가 단시간에 급격하게 변하여 최대 $-7.2 \text{ } \mu\text{g/s}$ 의 증발속도를 보인다.

[그림 4.14]의 각 용액에 대한 적분을 통해 초기 Ferrule 위에 형성하는 질량을 확인할 수 있다. DI Water와 Ethanol 용액에 대한 적분한 결과 초기 질량은 각각 1.8 mg, 0.15 mg으로 확인했다. 또한, 평균 증발속도를 통해 초기 질량을 확인할 수 있는데 이는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M = \rho \times \frac{2}{3} \pi (T \times \gamma)^3 \quad (26)$$

여기서 M 은 Ferrule 위에 형성한 초기 물방울의 질량을 의미하며, 용액의 밀도(D), 전체 증발시간(T)와 평균 증발속도(γ)의 곱으로 반구의 반지름을 표현된다. 이를 통해 DI Water와 Ethanol의 초기 물방울의 질량은 각각 2.33 mg, 0.16 mg으로 확인된다. 이는 앞서 계산값과 각각 0.53 mg, 0.01 mg의 오차값을 가진다. 식 (26)을 통한 계산값은 평균 증발속도를 통해 계산하였기 때문에 앞서 계산값과 차이가 발생한 것으로 예상된다.

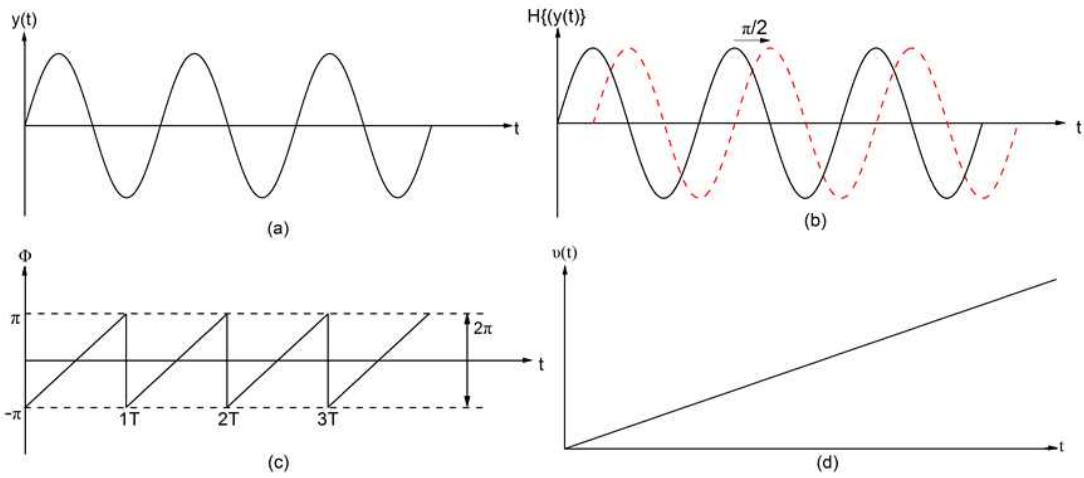


그림 4.3 (a) 정현파 형태의 신호 파형, (b) (a)신호의 Hilbert 변환변환(점선), (c) 신호의 시간에 따른 톱니 형태의 위상 변화, (d) 시간 t 에 대한 비선형 위상변화^[34]

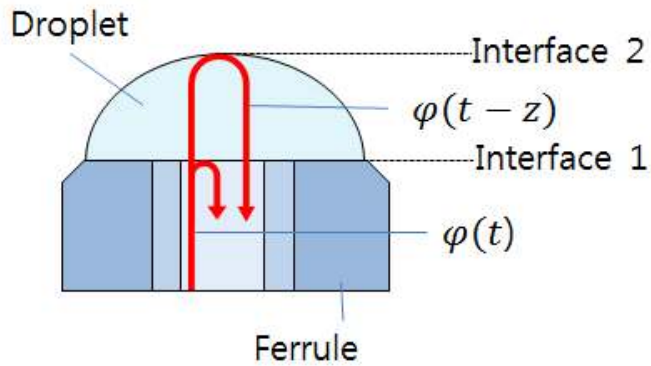


그림 4.4 Ferrule 끝단 광섬유 코어-용액 사이의 계면과 용액-대기 사이의 계면에서 반사된 광의 위상

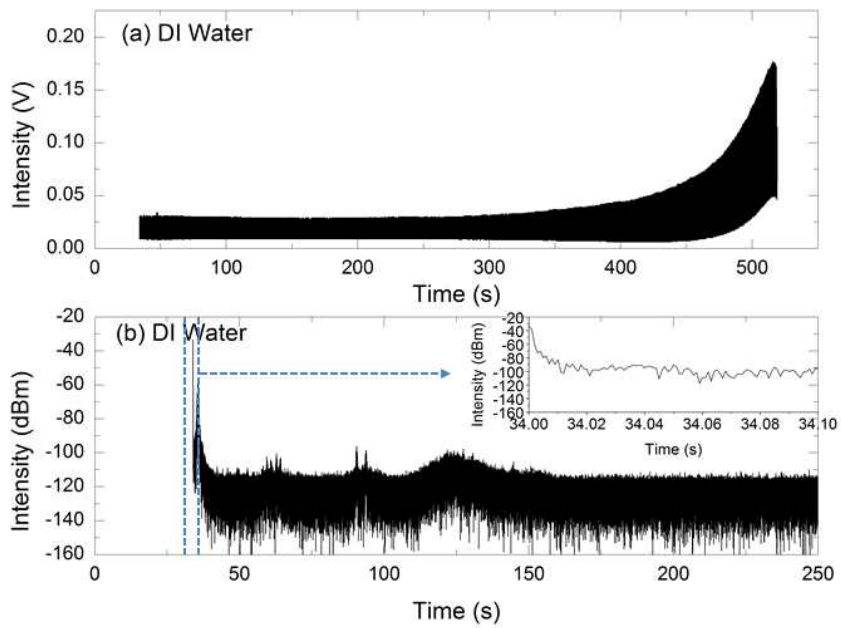


그림 4.5 (a) DI Water 용액에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 강도에 대한 간섭무늬 부분, (b) (a)에 대한 푸리의 변환

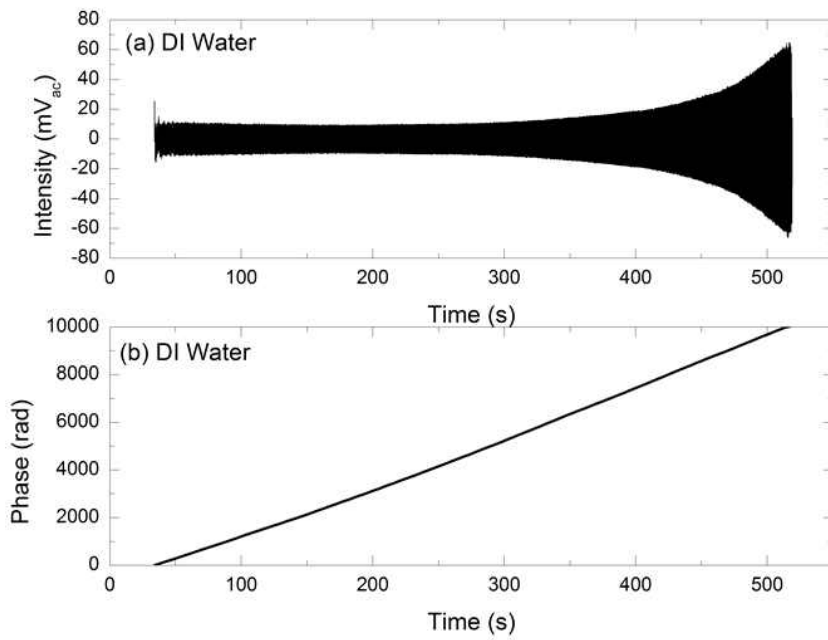


그림 4.6 (a)직류신호를 제거 후 남은 교류신호에 대한 Ferrule 끝단에서 반사된 간섭무늬, (b) DI Water에 대한 비선형 위상변화

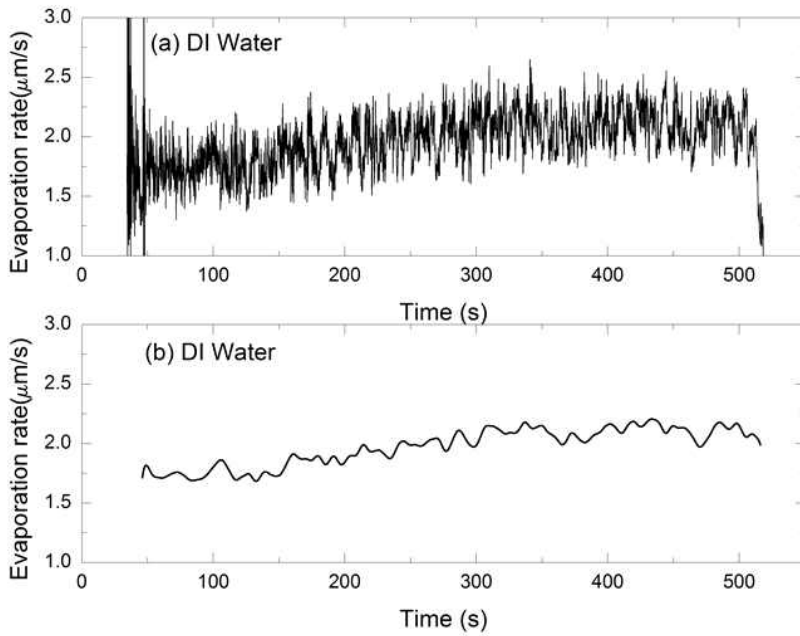


그림 4.7 (a) 위상변화를 이용한 시간에 따른 DI Water의 증발속도, (b) 필터를 통해 노이즈를 제거한 DI Water의 증발속도

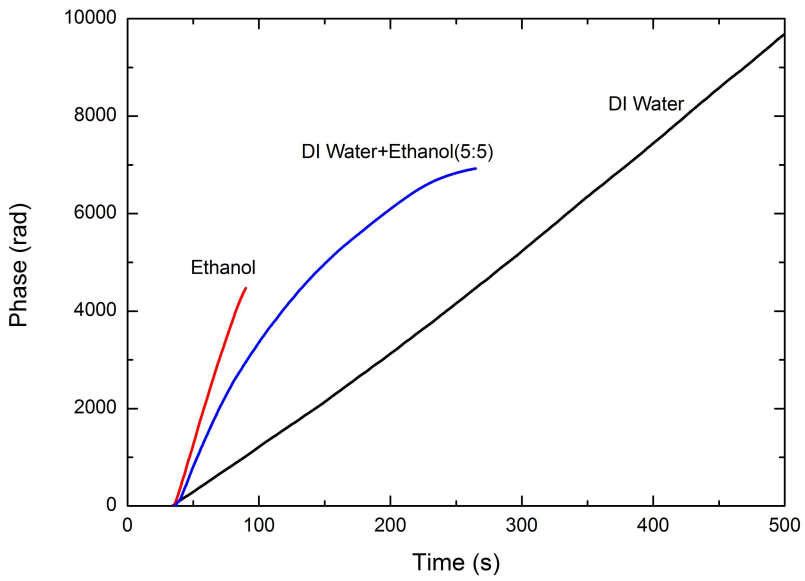


그림 4.8 증발시간에 따른 각 용액의 위상변화

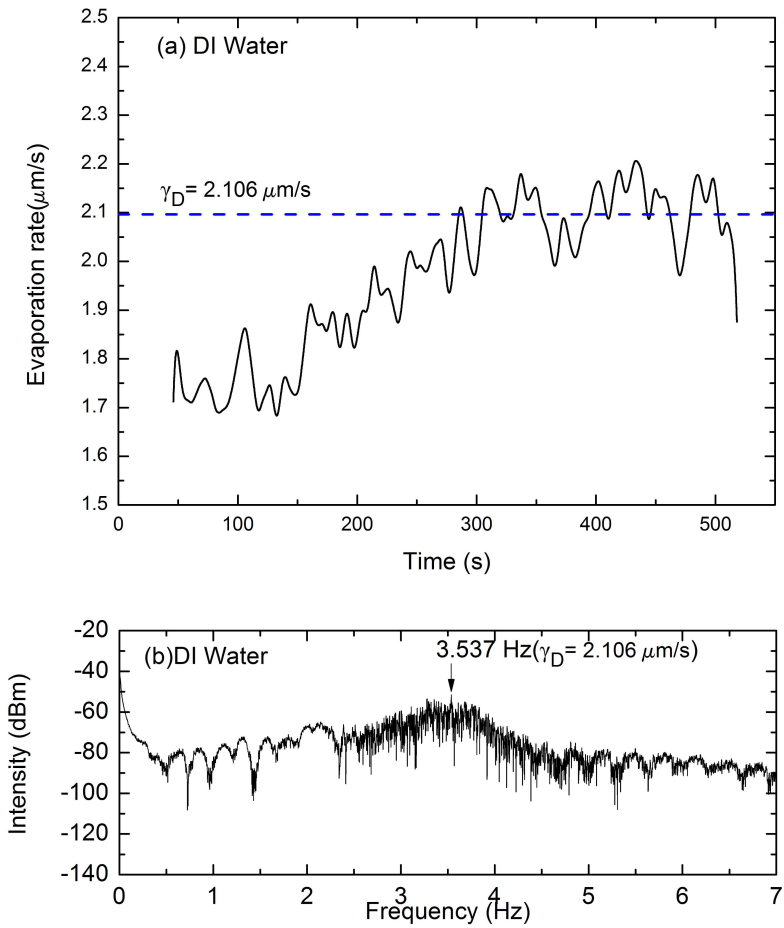


그림 4.9 (a) 증발시간에 따른 DI Water의 증발속도 (점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과

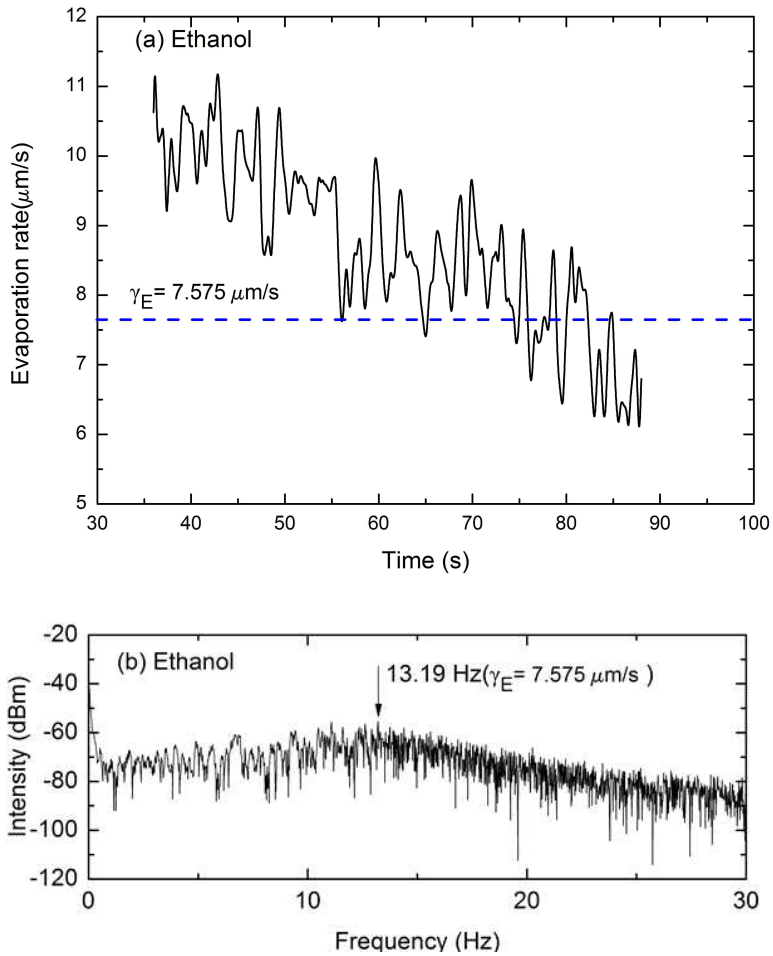


그림 4.10 (a) 증발시간에 따른 Ethanol의 증발속도(점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과

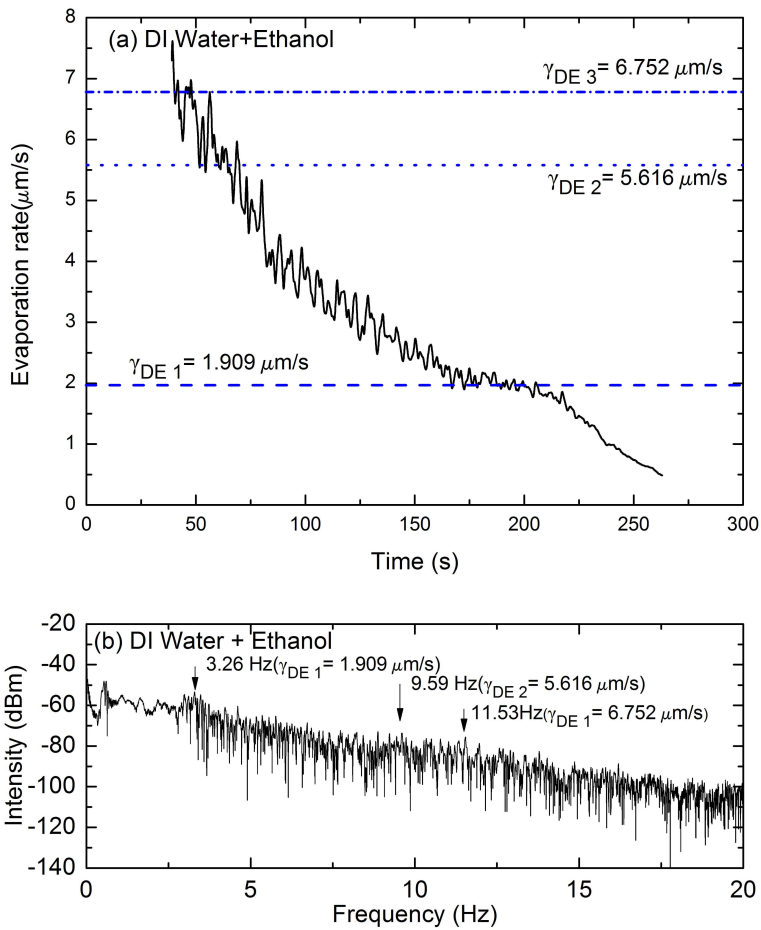


그림 4.11 (a) 증발시간에 따른 혼합용액(DI+Eth)의 증발속도, (점선: 주파수 분석법을 이용한 측정 결과), (b) 주파수 분석법을 이용한 혼합용액의 증발속도 측정 결과

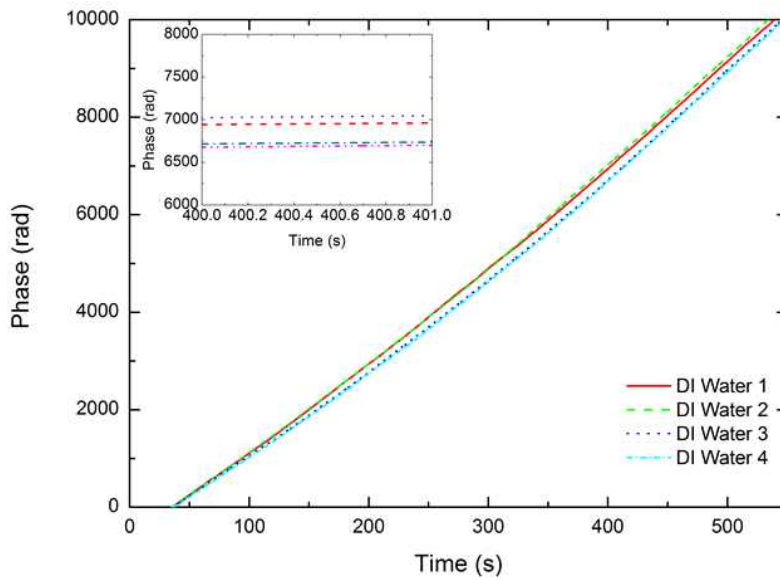


그림 4.12 DI Water 용액에 대한 반복실험 위상변화

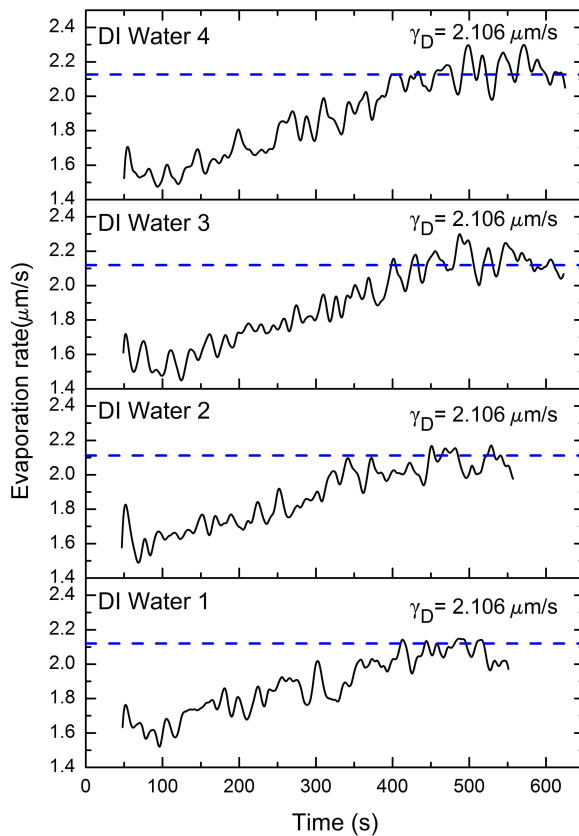


그림 4.13 DI Water 용액에 대한 반복실험의 증발시간에 따른 증발속도
 (점선: 주파수 분석법을 이용한 증발속도 측정 결과)

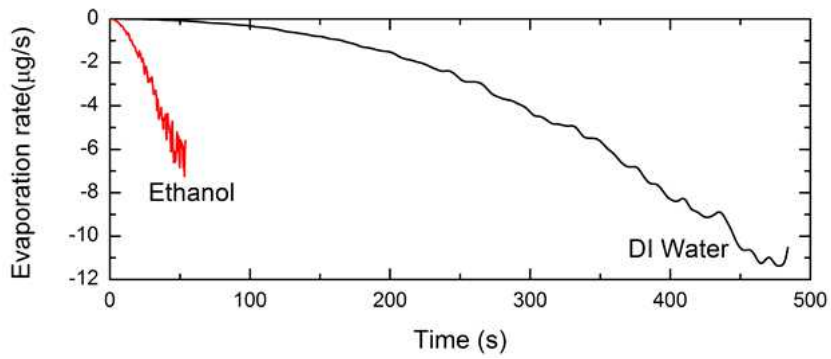


그림 4.14 증발시간에 따른 질량단위의 증발속도

제3절 향후 연구 계획

증발속도를 측정하기 위해 Ferrule 위에 떨어뜨리는 용액의 양 또한 매우 중요한 요소이다. 본 실험에서 주사기를 통해 Ferrule 위에 용액을 떨어뜨리기 때문에 같은 양의 용액에 대한 정확한 측정을 위해 용액의 밀도에 따른 일정한 압력을 통해 용액에 따른 일정한 형태의 물방울을 형성할 수 있는 장치가 필요하다.

Ferrule 위에 존재하는 용액은 초기에 표면장력에 의해 이상적인 물방울의 형태를 형성하지만 용액의 물방울이 증발하여 점차적으로 감소할 때 Ferrule의 기울기에 의해 한쪽으로 모아지는 현상이 일어나게 된다. 이는 광섬유 코어에서 투과된 광이 용액과 대기사이의 계면에서 반사되어 광섬유 코어로 들어가는 것을 방해하는 요소로 작용하게 된다. 이와 같은 손실을 막기 위해 수평계를 이용하여 Ferrule의 수평을 맞추는 작업과 용액을 Ferrule 위에 떨어뜨려 반사된 강도변화를 확인을 통해 조정할 수 있지만 완벽한 수평을 맞추기는 어려운 구조이다. 이를 보완하기 위해 Ferrule을 수평으로 자동고정 할 수 있는 구조가 필요하다. 또한 다양한 Ferrule 모형의 변형을 통해 용액의 물방울이 광섬유 코어쪽으로 점차적으로 줄어드는 구조에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서 DI Water와 Ethanol 용액에 대한 증발속도를 측정하였으나 이후 다양한 화학물에 대한 증발속도의 측정이 필요하다.

제5장 결 론

본 논문은 간단한 광섬유 구성을 통한 다중 반사 간섭을 기반으로 증발속도를 측정하는 방법을 제안한다. 광섬유를 이용한 다중반사 간섭을 이용하여 광섬유-용액 계면에서 반사된 광과 용액 표면 사이의 간섭 주파수를 고속 푸리에 변환을 이용하여 증발속도를 측정했다. 제안된 센서는 낮은 비용으로 높은 신뢰성 및 반복성으로 증발속도를 결정하기 위해 시험 샘플로 매우 적은 양의 액체가 필요하다. 또한 외부환경(온도, 습도, 풍속, 면적 등)에 많은 영향을 받는 증발속도를 안정적으로 측정하기 위한 아크릴 박스와 광패치코드 Ferrule의 단면을 변형해가며 불산, 아세톤, 직접 제작된 광패치코드 Ferrule을 통해 증발속도 안정성을 확보에 대한 연구를 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 DI Water에 대한 증발시간에 따른 Ferrule 끝단에서의 반사된 간섭무늬 신호를 확인하였고 광학 손실로 예상했던 용액에 대한 흡수계수를 측정하여 이를 시뮬레이션에 적용했을 때 측정된 DI Water 용액의 간섭무늬를 비교 시 흡수계수 외에 광학 손실이 존재하는 것을 확인하였으며 이는 결합 손실로 예상하였다. 또한, 증발속도 측정에 중요한 요소로 작용하는 용액의 굴절률을 Ferrule 위에 존재하는 용액의 유무를 통해 반사되는 반사율로 용액의 굴절률을 측정하였고 학회에 보고된 기존의 굴절률과 근사한 값을 측정했다.

본 논문에서 DI Water와 Ethanol에 대한 평균 증발속도를 측정하였고 그 결과 각각 $-2.106 \mu\text{m/s}$ 와 $-7.575 \mu\text{m/s}$ 로 측정되었다. 이는 약 4배의 차이를 보였다. Ferrule 끝단을 변형시켜 반사된 간섭신호를 확인하였으며 Ferrule의 수평의 중요성을 확인하였다. 또한, Hilbert 변환을 이용하여 용액의 증발시간에 따른 위상변화와 증발속도를 실시간으로 모니터링 하였다. 또한, 증발시간에 따른 증발량을 계산하여 질량단위의 증발속도를 모니터링 하였다. 각 용액은 비슷한 경향성을 보였으며 DI Water와 Ethanol 각각 최대 $-11.37 \mu\text{g/s}$, $-7.2 \mu\text{g/s}$ 의 증발속도를 확인했다. 이를 통해 초기 물방울의 질량을 계산하였다. 향후 본 연구를 통해 개발된 액체의 증발 속도의 실시간 측정 기술은 화학, 바이오, 생물학 등 다양한 분야에 활용될 것으로 기대된다.

[참고문헌]

- [1] 국립환경과학원, 유해화학물질 사고사례집, 환경부, 2007
- [2] K. D. O'Hare and P. L. Spedding, Chem. Eng. J. 48, 1 (1992).
- [3] K. D. O'Hare, P. L. Spedding, and J. Grimshaw, Dev. Chem. Eng. Min. Process. 1, 118 (1993).
- [4] R. L. Smith, Ann. Occup. Hyg. 45, 437 (2001).
- [5] P. Innocenzi, L. Malfatti, S. Costacurta, T. Kidchob, M. Piccinini, and A. Marcelli, J. Phys. Chem. A 112, 6512 (2008).
- [6] P. Innocenzi, L. Malfatti, M. Piccinini, A. Marcelli, and D. Grosso, J. Phys. Chem. A 113, 2745 (2009).
- [7] H. Song, C.-R. He, C. Basdeo, J.-Q. Li, D. Ye, D. Kalonia, S.-Y. Li, and T.-H. Fan, Int. J. Heat Mass Transfer 100, 800 (2016).
- [8] Preter, Eyal, and רטרפ ליא. Evaporation Sensing Using Fiber Optics. Bar Ilan University, Department of Engineering, 2013.
- [9] Y. Moroi, T. Yamabe, O. Shibata, and Y. Abe, Langmuir 16, 9697 (2000).
- [10] U. Narusawa and G. S. Springer, J. Colloid Interface Sci. 50, 392 (1975).
- [11] Culshaw, Brian. "Optical fiber sensor technologies: opportunities and perhaps pitfalls." Journal of lightwave technology 22.1 (2004): 39-50.
- [12] 김희제, "센서 공학-기초 및 활용편", 홍릉과학출판사(2010)
- [13] B. Lee, J. Albert, A. Galtarossa and J. M. L. Higuera, "Preface to the topical issue on optical fiber sensors," Optical Fiber Technology, 2013.
- [14] 광섬유 센서 기술
(<http://optics.hanyang.ac.kr/~shsong/hitechphysics-note/sensor/sensor-2.html>)
- [15] 송정태, 이경식. (1996). 광섬유 센서기술 : 원리 및 응용. 전기의세계, 45(9), 9-17.
- [16] 월간전기 광섬유 센서의 특징 및 응용분야
(http://www.energy.co.kr/atl/view.asp?a_id=8161)
- [17] 세계의 광섬유 센서 시장 예측과 분석-ElectronicCast(2011-2016)
(<http://blog.naver.com/giikorea2?Redirect=Log&logNo=60165593288>)

- [18] Langmuir, "The constitution and fundamental properties of solids and liquids. II. Liquids. 1," *Journal of the American Chemical Society*(1917)
- [19] K. G. McNaughton and P. G. Jarvis, "Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation," *Water deficits and plant growth*, vol. 7, no. 1, pp. 1-47, 1983.
- [20] T. L. Delworth and S. Manabe, "The influence of potential evaporation on the variabilities of simulated soil wetness and climate," *Journal of Climate*, vol. 1, no. 5, pp. 523-547, 1988.
- [21] T. Kawase, H. Siringhaus, R. H. Friend and T. Shimoda, "Inkjet printed via-hole interconnections and resistors for all-polymer transistor circuits," *Advanced Materials*, vol. 13, no. 21, p. 1601, 2001.
- [22] T. Shedd and A. Pautsch, "Spray impingement cooling with single-and multiple-nozzle arrays. Part II: Visualization and empirical models," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 15, pp. 3176-3184, 2005.
- [23] E. Goto, K. Endo, A. Suzuki, Y. Fujikura, Y. Matsumoto and K. Tsubota, "Tear evaporation dynamics in normal subjects and subjects with obstructive meibomian gland dysfunction," *Investigative ophthalmology & visual science*, vol. 44, no. 2, pp. 533-539, 2003.
- [24] A. Lefebvre and J. Chin, "Steady-state evaporation characteristics of hydrocarbon fuel drops," *AIAA journal*, vol. 21, no. 10, pp. 1437-1443, 1983.
- [25] A. Kryukov, V. Y. Levashov and S. Sazhin, "Evaporation of diesel fuel droplets: kinetic versus hydrodynamic models," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 47, no. 12, pp. 2541-2549, 2004.
- [26] Nomura, Hiroshi, et al. "Experimental study on high-pressure droplet evaporation using microgravity conditions." *Symposium (International) on Combustion*. Vol. 26. No. 1. Elsevier, 1996
- [27] 저수지의 증발량 산정 방법 (<https://waterforall.blog.me/120183050172>)
- [28] C. Bourges-Monnier and M. Shanahan, "Influence of evaporation on contact angle," *Langmuir*, vol. 11, no. 7, pp. 2820-2829, 1995.

- [29] S. Rowan, M. Newton and G. McHale, "Evaporation of microdroplets and the wetting of solid surfaces," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 99, no. 35, pp. 13268
- [30] 엄철중, '휘발성 물질의 증발속도 및 공기혼합특성', 충북대학교(2017)
- [31] Kasap, Safa O., and Ravindra Kumar Sinha. *Optoelectronics and photonics: principles and practices*. Vol. 340. New Jersey: Prentice Hall, 2001.A
- [32] Water Absorption Spectrum
(http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_vibrational_spectrum.html)
- [33] Rego, Gaspar M., Jose L. Santos, and Henrique M. Salgado. "Refractive index measurement with long-period gratings arc-induced in pure-silica-core fibres." *Optics Communications* 259.2 (2006): 598-602.
- [34] Hale, George M., and Marvin R. Querry. "Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region." *Applied optics* 12.3 (1973): 555-563.
- [35] Sani, Elisa, and Aldo Dell'Oro. "Spectral optical constants of ethanol and isopropanol from ultraviolet to far infrared." *Optical Materials* 60 (2016): 137-141.
- [34] Ahn, Tae-Jung, Ji Yong Lee, and Dug Young Kim. "Suppression of nonlinear frequency sweep in an optical frequency-domain reflectometer by use of Hilbert transformation." *Applied optics* 44.35 (2005): 7630-7634.

저작물 이용 허락서

학 과	광기술공학과	학 번	20177080	과 정	석 사
성 명	한글: 임 옥 락 한문: 林 玉 洛 영문: Ok Rak Lim				
주 소	광주광역시 서구 화운로 175번길 15				
연락처	E-MAIL : ook132@naver.com				
논문제목	한글 : 광섬유 다중 반사 간섭을 이용한 액체의 증발 속도 센서 영어 : Evaporation Rate Sensor For Liquids Using Fiber Optic Multiple Reflection Interference				

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

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함. 다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

동의여부 : 동의() 반대()

2019년 2월

저작자: 임 옥 락 (서명 또는 인)

조선대학교 총장 귀하

[감사의 말씀]

지금까지 저에게 많은 도움을 주신 분들께 졸업논문을 통해 감사인사를 전합니다.

먼저 저의 지도교수님인 안태정 교수님께 감사인사를 전하고 싶습니다. 3년 동안 미숙한 저에게 많은 경험을 통해 더 넓은 세상으로 도약할 수 있는 날개를 선사해주시고 항상 저희를 생각해주시며 작은 것에도 최선을 다해 배려해주신 덕분에 석사과정 기간 동안 뜻깊고 행복한 시간이었습니다. 연구자로서 항상 새로운 것에 대한 배움의 자세를 알려주신 김진태 교수님, 온화한 미소로 더 많은 것을 알려주시려고 노력해주신 김현수 교수님, 어려웠던 내용을 이해하기 쉽게 풀어서 설명해주신 박종락 교수님, 어떠한 질문에도 미소로 답변해주신 권민기 교수님, 학생들을 위해 하나라도 더 알려주시려고 열정 넘치는 모습을 보여주신 주기남 교수님께 감사한 마음을 표현합니다. 또한, 인자한 미소로 저희에게 많은 것들을 알려주신 백세종 교수님, 광기술 융합 부식 모니터링 사업과 새로운 관점에서 효율적인 방법을 가르쳐주신 장희진 교수님, 에너지인력 양성 사업으로 많은 도움을 주신 조홍현 교수님에게 감사의 말씀드리고 싶습니다.

항상 옆에서 든든한 버팀목이 되어주고 작은 일에도 조심스럽게 배려해줬던 실험실 동기이자 친구인 희택이와 저를 잘 챙겨주고 항상 한결같이 응원해주며 다양한 방면에서 많은 것들을 알려주었던 경서에게 진심으로 고마운 마음을 전하고 싶습니다. 짧은 기간이지만 잘 따라줬던 종주에게도 감사의 말을 전하고 싶고 대학원 생활에 도움을 주신 많은 선배 분들과 앞으로 광기술공학과를 더 밝은 미래로 이끌어가는 후배님들의 도움에 감사드립니다. 즐겁고 행복했던 대학원 생활을 같이 보낸 동기들과 많은 기쁨은 나눴던 재료공학과 친구들에게도 진심으로 감사의 인사를 전합니다.

또한 대학 생활을 함께 보내며 대학원에 들어와서도 힘들 때 옆에 있어준 종배와 고등학교 친구들에게도 고맙다고 말하고 싶습니다. 그리고 지금에 저를 있게 해주시고 묵묵히 아낌없는 지원과 사랑을 보내주신 저희 부모님과 힘들 때 든든한 지원군이 되어주고 슬플 때 위로해줬던 형님에게도 감사의 말씀 전합니다.

이 외에도 많은 분들이 도움을 주셨지만 언급하지 못한 점에 대해 죄송하고 모든 분들이 앞으로 하시는 일에 건승하며 건강하고 행복하시길 바랍니다.