



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](#)

2023년 2월
석사학위 논문

공간섭단층촬영을 이용한 부식된 구리 산화층 비파괴 측정법 연구

조선대학교 대학원

광기술훈학과

고영민

공간섭단층촬영을 이용한 부식된 구리 산화층 비파괴 측정법 연구

Nondestructive Analysis of Corroded Copper Oxidation
Using Optical Coherence Tomography

2023년 2월 24일

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

고 영 민

공간섭단층촬영을 이용한 부식된 구리 산화층 비파괴 측정법 연구

지도교수 안 태 정

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

광 기 술 공 학 과

고 영 민

고 영 민의 석사학위논문을 인준함

위원장	조선대학교	교수	박 종 락	인
위 원	부산대학교	교수	엄 태 중	인
위 원	조선대학교	교수	안 태 정	인

2022년 12월

조선대학교 대학원

목 차

ABSTRACT

제1장 서 론	1
1. 금속 부식	1
제2장 연구 배경	7
1. 기존 금속 부식 두께 측정법	7
2. 구리 산화막의 광학적 특성	10
3. OCT와 OCM	13
제3장 구성 및 실험	23
제1절 구리(Cu) 부식 시편 제작 및 측정	23
1. 부식 측정 실험 구성	23
2. 부식 시편 제작 과정	23
3. SEM-EDS 기반 산화막 두께 분석	28
제2절 OCT, OCM을 이용한 부식 측정	35
1. OCT와 OCM 실험 구성	35
2. OCT와 OCM 이미지 Data	46
제3절 이미지 품질 향상 및 산화막 두께 측정	48
1. Phase calibration	48
2. Interpolation	51
3. Peak finding algorithm	53
제4장 결과 및 논의	56

제1절 구리(Cu) 부식 시편 조성분석	56
1. XRD와 SEM-EDS point 조성분석 결과	56
제2절 SEM 파노라마 이미지와 두께 히스토그램	59
1. SEM 파노라마 이미지와 두께 히스토그램	59
제3절 OCM 이미지에서 추출한 산화물 두께 히스토그램	62
1. OCT 와 OCM 이미지에서의 산화물층	62
2. OCM 에서 추출한 두께 히스토그램	62
제4절 En-face mapping data	67
1. En-face mapping data를 이용한 국부부식 확인	67
제5장 결론	70

[참고문헌]

[감사의 글]

표 목 차

표 1.1 금속 부식의 다양한 모니터링 기법과 장단점 -----	5
표 3.1 구리 시편 열처리 장비 사양 -----	26
표 3.2 EDS Point 조성분석 Data -----	17
표 3.3 OCT와 OCM의 Scan range -----	39
표 3.4 OCT에 사용된 대물렌즈(AC254-050-C-ML)의 상세 사양 -----	44
표 3.5 표 3.4 OCM에 사용된 대물렌즈(Pal 5 nir)의 상세 사양 -----	45

그림 목 차

그림 1.1 부식의 형태에 영향을 미치는 요인 -----	3
그림 1.2 금속 부식의 다양한 예시 사진 -----	4
그림 1.3 금속 부식 모니터링 기법의 예시 사진 -----	6
그림 2.1 SEM, AES, GDS의 장비 사진 -----	9
그림 2.2 산화구리(I)와 산화구리(II)의 생성 -----	10
그림 2.3 산화구리(I)의 (a)굴절률 그래프, (b)반사율 그래프, (c)투과율 그래프 ----	12
그림 2.4 마이켈슨 간섭계와 공초점 현미경의 모식도 -----	15
그림 2.5 OCT로 촬영한 망막의 모세혈관 이미지 -----	16
그림 2.6 TD-OCT와 SD-OCT의 구성도 -----	17
그림 2.7 광섬유 기반 SS-OCT의 구성도 -----	18
그림 2.8 OCT를 이용한 금속의 부식 방지용 코팅, 페인트 두께 측정연구 -----	19
그림 2.9 OCT의 스캐닝 모드 -----	21
그림 2.10 OCT와 OCM의 Sample 단 대물렌즈 NA에 따른 DOF변화 -----	22
그림 3.1 구리 시편 연마에 사용한 장비, 연마지, Suspension -----	25
그림 3.2 연마 전후 Cu 시편 사진 -----	25
그림 3.3 구리 시편 열처리 장비 -----	26
그림 3.4 900°C에서 진공열처리로 제작한 Cu 부식 시편 -----	27
그림 3.5 Cu 부식 시편 SEM-EDS 측정 절단 위치 -----	29
그림 3.6 절단 후 콜드 마운팅 진행한 Cu 시편 사진, Pt 코팅 진행 사진 -----	29
그림 3.7 SEM-EDS에 장착 중인 마운팅 시편 -----	30
그림 3.8 Cu 부식 시편 1h-1의 SEM 이미지 -----	31
그림 3.9 EDS Mapping 분석 이미지 -----	31
그림 3.10 EDS Line 분석 Data -----	32
그림 3.11 SEM 파노라마 이미지와 추출된 산화물층 이미지 -----	34
그림 3.12 SEM 이미지에서 추출한 산화물 두께 프로파일 -----	34
그림 3.13 SEM 이미지에서 추출한 산화물 두께 히스토그램 -----	34
그림 3.14 1700 nm Swept-Source OCT의 구성도 -----	36
그림 3.15 사용된 1700 nm Swept-Source -----	37
그림 3.16 1700 nm Swept-Source의 시간에 따른 Output power와 Spectrum -----	37

그림 3.17 사용된 1700 nm Semiconductor Optical Amplifier -----	38
그림 3.18 사용된 1700 nm SOA의 입력 전류값에 따른 출력 특성 -----	38
그림 3.19 OCT와 OCM의 기준단 의 이미지 -----	39
그림 3.20 OCT의 샘플단의 이미지, 모식도 사양 -----	42
그림 3.21 OCM의 샘플단의 이미지, 모식도 사양 -----	43
그림 3.22 OCT에 사용된 대물렌즈(AC254-050-C-ML)의 사진, 투과율 -----	44
그림 3.23 OCM에 사용된 대물렌즈(Pal 5 nir)의 치수, 투과율 -----	45
그림 3.24 구리 시편을 촬영한 OCT, OCM 이미지와 A-line 그래프 -----	47
그림 3.25 Phase calibration 진행 과정 모식도 -----	48
그림 3.26 OCM으로 얻은 Ch 1과 Ch 2 이미지와 Phase calibration 전후 이미지 -----	49
그림 3.27 Ch 2 에서 추출한 Phase angle data -----	50
그림 3.28 Raw data와 Interpolation data의 A-line plot -----	52
그림 3.29 Peak finding algorithm -----	54
그림 3.30 계산된 두께를 이용한 히스토그램과 En-face mapping 이미지 -----	55
그림 4.1 Cu 부식 시편의 XRD 조성분석 데이터 -----	57
그림 4.2 Cu 부식 시편의 SEM-EDS 조성분석 데이터 -----	58
그림 4.3 시편별 SEM 파노라마 이미지와 추출된 산화물층 -----	60
그림 4.4 SEM 기반 산화물 두께 히스토그램 -----	61
그림 4.5 OCT와 OCM으로 측정된 Cu 부식 시편 이미지 -----	63
그림 4.6 OCT로 측정된 Cu 부식 시편 이미지 -----	63
그림 4.7 OCM 측정 Position 1 과 Position 2 -----	64
그림 4.8 OCM 기반 산화물 두께 히스토그램 -----	64
그림 4.9 OCM, SEM 기반 산화물 두께 히스토그램 비교 -----	65
그림 4.10 OCM SEM과 OCM의 촬영 면적 비교 -----	66
그림 4.11 En-face mapping의 에러 줄이기 -----	68
그림 4.12 OCM 기반 산화물 두께 En-face mapping 이미지 -----	69

ABSTRACT

Nondestructive Analysis of Corroded Copper Oxidation Using Optical Coherence Tomography

Young-Min Ko

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

Department of Photonic Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, nondestructive analysis of the corroded copper oxidation using optical coherence tomography (OCT) as a high-precision depth profiling method for bio-medical applications is suggested. The corrosion copper specimen was subjected to vacuum heat treatment using a Chemical Vapor Deposition(CVD) equipment. Generally, light does not transmit into metals, but enables to transmit in metal oxidized layer induced by metal corrosions. It turns out that the thickness of the copper oxide layer can be measured with OCT technique. The longer wavelength of the light, the higher transmittance of the metal oxides, We used a swept source-OCT based on 1700 nm band tunable laser source. An optical coherence microscopy (OCM) measuring the depth profile of the samples more precisely than OCT system was designed and developed. Interpolation and phase calibration were conducted to make the data of OCT and OCM better. To determine the thickness of the metal oxide from OCT depth images, a peak finding algorithm using MATLAB is developed. The measured thickness profiles of the copper oxide were agreement with the thickness measured from SEM images of the corroded metals.

제1장 서론

1. 금속 부식

금속 부식이란 환경적 요인에 의해 발생하는 금속의 기능성 저하, 파괴, 유효수명의 단축이 일어나는 것을 말한다^[1,2]. 금속 부식이 일어나는 원인은 재반응과 이온화하려는 성질 때문이다^[1]. 재반응하려는 성질이란 열역학적으로 안정한 상태(= 열역학적 에너지가 낮은 상태)로 자발적으로 변화하려는 성질이다. 우리가 사용하는 금속 대부분은 자연 상태의 광석에 에너지를 가해 정련, 제련시켜 놓은 불안정한 상태이다. 이때 대부분 금속은 산화물 상태가 더 안정적이기 때문에 부식을 통해 안정적인 상태로 되돌아가려 한다. 이온화하려는 성질은 금속 대부분이 순수한 상태보다는 이온으로서의 상태가 안정적이기 때문에 일어난다. 금속 부식에 영향을 미치는 요인은 [그림 1.1]과 같이 미세 구조, 환경, 응력, 형상, 시간 등이 존재한다^[3]. 금속 부식의 종류는 크게 건식과 습식 2가지로 나눌 수 있다^[4,5]. 이는 금속 부식이 일어나는 환경에서의 수분의 유무에 따라서 나누어지게 된다. 고온의 가스(200도 이상)의 환경에서는 건식부식, 물 또는 액체에 의해 부식되면 습식부식이라 한다. [그림 1.2]에서 다양한 부식의 예시 사진을 확인할 수 있다.

이러한 금속 부식은 산업, 경제, 인명 등에 손실과 비용을 초래하여 큰 영향을 끼치고 있다^[1,3]. 부식에 의한 설비 가동 중단, 유지 보수 비용, 부식 방지용 추가 설비, 여분의 부품 재고 보유, 보험비용 등등 많은 경제적인 비용과 시간이 투입되고 있다. 이러한 막대한 경제적 손실을 줄이기 위해서는 금속 부식에 대한 연구와 부식 모니터링 기술이 필수적이다^[6]. 조기에 부식의 유형이나 부식의 양, 부식의 진행 속도 등의 파라미터를 정확하게 측정하여 대처할 수 있다.

기존에도 다양한 방식의 부식 모니터링 기법이 존재한다. [표 1.1]에 정리되어 있는 내용과 같이 각각의 부식 모니터링 기법에 따른 측정 가능한 파라미터가 다르고 각각 장단점이 존재한다. 쿠폰 시험법^[7]은 실제 구조물이 아닌 쿠폰을 동일한 환경에 배치하여 일정 시간이 지난 뒤 질량을 측정하거나 맨눈으로 검사하는 방법이다. 이 방법은 단순하고 소요 비용이 적다는 장점을 갖고 있지만 실제 구조물이 아닌 쿠폰을 분석하여 설치 위치, 회수 시점 등에 따라서 결과의 신뢰성이

크게 달라진다는 단점을 가지고 있다. 다음은 전기 화학적인 기법이다^[6,7]. 대표적으로 선형분극, 전기화학적 임피던스 분석, 전기화학 노이즈 분석, 영저항전류 측정 등이 있다. 이 방법은 부식의 진행 속도가 느린 경우에도 단시간(수분 ~수 시간)에 측정할 수 있고 부식 기구에 대한 상세 정보를 수집할 수 있다. 하지만 전기화학 데이터 해석에 전문지식이 필요하고 추정된 부식 속도가 실제 부식 속도와 잘 맞지 않는 경우가 많다는 단점이 있다. 전기 저항법^[6~11]은 부식의 양, 속도를 측정할 수 있지만 국부부식의 감지가 어려운 단점이 있다. 수질, 유체 특성 측정은 전도도, 용존산소 농도, 유속, 온도 등의 부식에 영향을 주는 환경적 요인 또는 부식의 결과로 발생한 환경적 변화를 측정하게 된다. 해당 방법은 간접적으로 부식이 일어나는 환경 파라미터(pH, 온도, 전도도, 용존산소 농도 등등)를 측정하는 방법이기 때문에 부식의 양을 직접 측정이 불가능하고 유체 내 오염물이나 전도도 등에 의해서 오류가 발생 가능하다는 단점이 있다. 비파괴 검사^[10,11]에는 초음파, 와전류, 음향방출, 적외선 열화상, 방사선 등이 있다. 말 그대로 직접 접촉 없이 부식 측정이 가능하고 실제 현장 구조물을 대상으로 금속의 손실 또는 균열을 감지한다는 장점이 있다. 하지만 감도가 낮고 반응이 느리다는 단점이 존재한다. [그림 1.3]에서 3종류의 금속 부식 모니터링 기법의 예시 사진을 확인할 수 있다.

이 논문은 공간섭단층촬영(Optical Coherence Tomography)을 이용한 새로운 방식의 부식 비파괴 측정법을 제안한다. 기존의 비파괴 검사의 감도가 낮고 반응이 느리다는 단점을 보완할 수 있고 면적에서의 국부부식의 상태를 확인 가능하다는 장점이 있다.

공간섭단층촬영을 통해 구리 부식 시편을 3D로 촬영하게 되고 해당 데이터를 계산 및 처리를 통해 산화층의 두께를 계산한다. 최종적으로 면적에서의 국부부식의 상태를 확인할 수 있는 En-face mapping을 이용하여 부식 상태를 보여준다.

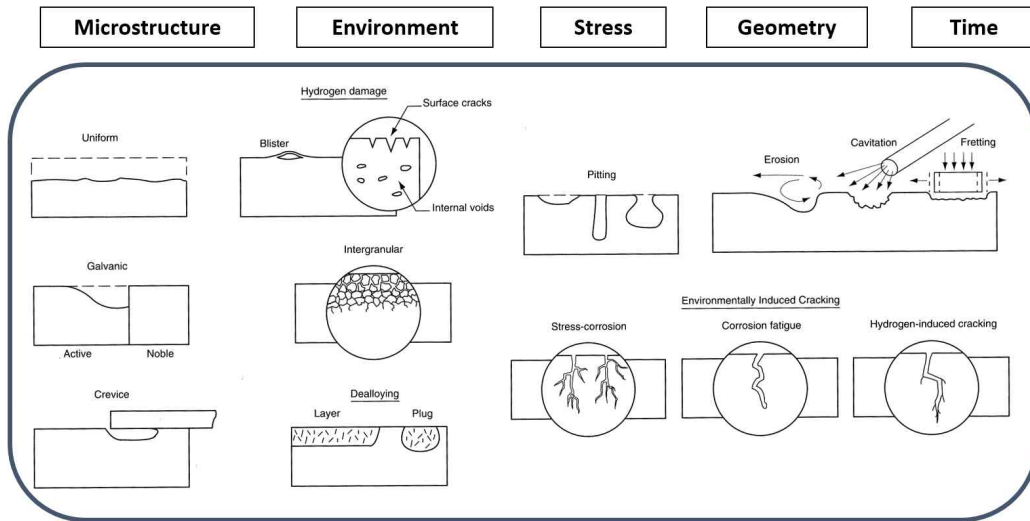


그림 1.1 부식의 형태에 영향을 미치는 요인



그림 1.2 금속 부식의 다양한 예시 사진

모니터링 기법	주기능 및 장점	한계점 및 단점
쿠폰 시험법 (질량 측정, 육안검사 등)	단순하고 소요 비용이 적음	실제 구조물이 아닌 쿠폰을 대상으로 분석함 설비 가동 중단이 필요할 수 있음 장시간(수십일 이상) 및 많은 노동력 소요 쿠폰 설치 위치, 회수 시점 등에 따라 결과의 신뢰성이 크게 달라짐
전기화학적 기법 (대표 기술: 선형분극, 전기화학적 임피던스 분석, 전기화학 노이즈 분석, 영저항전류 측정 등)	부식 속도가 느린 경우에도 단시간(수 분 ~ 수 시간)에 측정 가능 부식 기구에 대한 상세 정보 수집 가능	전기화학 데이터 해석에 전문 지식이 필요 추정된 부식 속도가 실제 부식 속도와 잘 맞지 않는 경우가 많음 장비 및 장치 관리가 까다로움 직접 접촉(전기접촉) 필요
전기저항법	균일부식의 양 및 속도 측정	국부부식 감지 어려움
비파괴 검사 (대표 기술: 초음파, 와전류, 음향방출, 적외선 열화상, 방사선 등)	직접 접촉 없이 측정 실제 현장 구조물을 대상으로 측정 비파괴 시험 금속의 손실 또는 균열 감지	감도가 낮고 반응이 느림
수질/유체 특성 측정 (pH, 전도도, 용존산소 농도, 유속, 온도, 금속 이온 농도 등)	부식에 영향을 주는 환경적 요인 또는 부식의 결과로 발생한 환경적 변화 측정	부식량 직접 측정 불가 유체 내 오염물, 전도도 등에 의해 오류 발생 가능

표 1.1 금속 부식의 다양한 모니터링 기법과 장단점

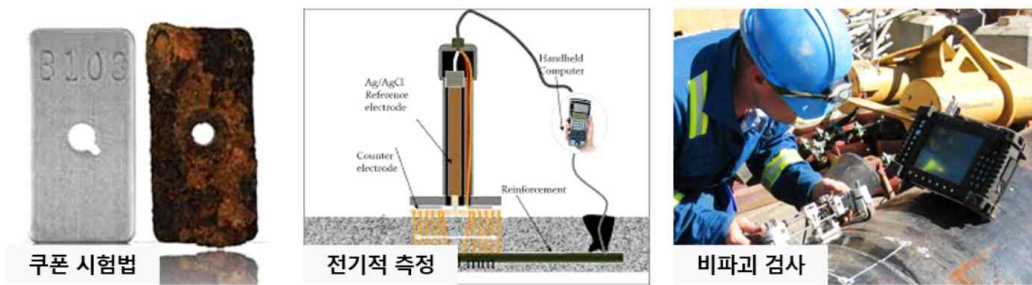


그림 1.3 금속 부식 모니터링 기법의 예시 사진

제2장 연구 배경

1. 기존 금속 부식 두께 측정법

금속의 부식으로 생성된 산화물의 두께를 측정하는 방법은 SEM, AES, GDS 등이 있다.

첫 번째로 SEM(Scanning Electron Microscope)^[12]은 전자 주사 현미경의 약자로서 Electron gun을 통해서 전자를 시료에 주사하여 상호작용에 의해 발생하는 이차전자를 검출하여 표면정보를 관찰하는 방법이다^[13]. 이차전자(Secondary Electrons)는 시편 원자의 k 궤도에서 전자와의 비탄성 충돌로부터 방출된 전자를 말한다^[Ref]. 해당 방법은 일반적인 광학현미경에서의 가시광선 대신에 파장이 더 짧은 전자를 주사하여 더 고분해능(1 nm의 공간분해능)의 이미지를 얻을 수 있다^[12,13].

해당 방법으로 산화막의 두께를 측정하기 위해서는 시편을 절단하여 장비에 들어가도록 마운팅을 진행하여야 한다. 레진이나 에폭시를 이용하여 마운팅을 진행하고 표면연마를 진행하고 촬영하게 된다. 해당 방법을 전처리 과정에 따라서 영상의 품질이 크게 달라진다는 단점을 갖는다. 해당 방법은 이후에 소개하는 2개의 방법과는 달리 이미지로 측정할 수 있지만 시편 전처리를 진행하는 시간이 오래 소요된다는 단점이 있다.

두 번째로 AES(Auger Electron Spectroscopy)는 오거 전자분광법이다^[14,15]. 진공 중에 전자빔을 주사하면 전자가 방출되어 들뜬상태가 된다. 바닥 상태로 돌아가는 과정 중에 오거 전자(Auger Electron)가 방출되게 되고 해당 에너지는 각각의 원소 고유의 값을 가져 조성분석이 가능하다. 최대 5에서 10 μ m의 면적을 측정할 수 있고 이온 스퍼터링을 이용하여 시료를 깎아 가면서 분석을 진행하여 깊이 방향으로 시료의 조성정보를 제공한다. 깊이 방향의 조성정보를 바탕으로 산화물의 두께를 알아낼 수 있다.

세 번째로 GDS(Glow Discharge Spectrometer) 글로우 방전 분광기가 있다^[16,17]. 글로우 방전 플라즈마를 사용하여 측정하려는 시료의 표면을 스퍼터링 한다. 이때

샘플 원자가 충돌을 반복하며 들뜬상태로 방출된다. 원자가 바닥 상태로 돌아갈 때 원소의 고유 파장스펙트럼을 방출하게 된다. 이 스펙트럼을 분석하여 깊이 방향에서의 시료의 조성정보를 얻는다.

[그림 2.1]에서 앞서 말한 세 종류의 장비 모습을 확인할 수 있다. 앞서 말한 세 종류의 측정법들은 모두 시료를 다시 사용 불가능한 파괴 측정법이라는 단점이 있다. 또한 현장에서 측정이 불가능하고 실험실에서 측정을 진행해야 해서 시편 제작, 측정 등에 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

이러한 단점들을 극복하기 위해서 비파괴 방식으로 현장에서 바로 두께 측정이 가능한 새로운 측정법에 관한 연구가 필요하다.

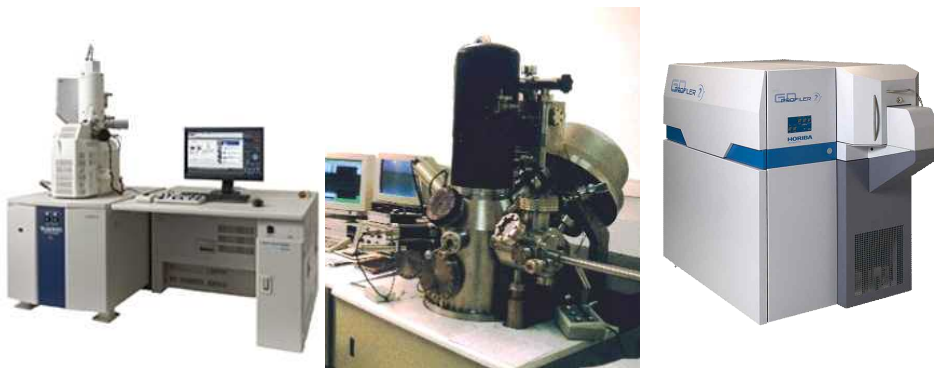


그림 2.1 SEM, AES, GDS의 장비 사진

2. 구리 산화막의 광학적 특성

본 연구에서는 부식에 의한 구리 산화막의 두께를 광학적인 방법으로 측정하려고 하고 있다. 일반적으로 금속은 표면에서 빛을 대부분 반사한다고 알려져 있다. 하지만 금속 산화물의 경우에 일부 빛을 투과한다는 연구 결과가 보고되었다. 해당 특성을 이용하여 태양빛을 흡수하는 흡수체로 금속 산화물을 이용하는 연구가 보고된 바 있다^[18].

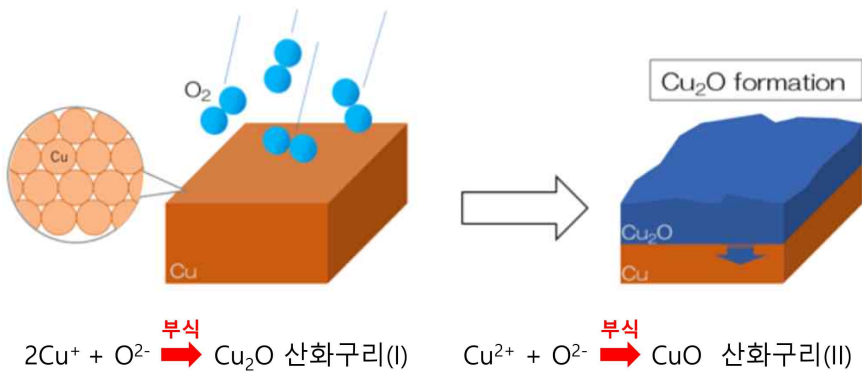


그림 2.2 산화구리(I)와 산화구리(II)의 생성^[19]

산화구리는 다양한 종류를 가지고 있지만 산화구리(I)와 산화구리(II)가 대부분이다. [그림 2.2]는 부식에 의해서 산화구리(I)와 산화구리(II)가 생성되는 것을 보여준다. [그림 2.3]에서 확인할 수 있듯이 산화구리(I)와 산화구리(II)의 굴절률은 2.7 이다^[18]. 장파장의 레이저 광에서 군굴절률(Group Velocity)은 [그림 2.3]에서 보듯이 파장에 대한 굴절률 변화가 없어 굴절률 2.7 값과 동일한 값을 두께 분석에 사용했다. 산화구리(I)의 투과율 특성은 장파장으로 갈수록 더 높은 특성을 가지고 있다^[Ref]. (Cu_2O 의 경우 $1.0 \mu\text{m}$ 에서 약 63%)

Bjorn Karlsson이 1982년에 금속 산화막을 이용하여 태양열 흡수도를 높이는 연구 결과를 보고하였다^[18]. 인위적인 산화막이 얇은 박막 코팅의 역할을 하여 금속 표면의 반사도를 낮춰 태양열 흡수율을 향상시켰다. [그림 2.3]은 Cu 금속 표면에 산화구리(I)을 형성한 후 파장에 따른 반사율을 보여준다. 정반사와 난반사에 대한 각각 반사율을 확인할 수 있다. 산화막 표면에서 반사된 빛과 산화막을 통과한

후 구리 계면에서 반사된 빛의 파장에 따라 간섭이 나타나는 것을 보여주고, 이를 통해 상당히 균일한 산화막이 형성된 것을 알 수 있다. 이것은 광학적 측정 방식을 통한 금속 산화막 측정 및 분석이 가능한 것을 보여준다.

해당 특성들을 이용하여 공간섭단층촬영을 진행할 때 시편 내부에서 산란되어 돌아오는 빛을 분석하여 산화막 두께 분석을 진행하려 한다.

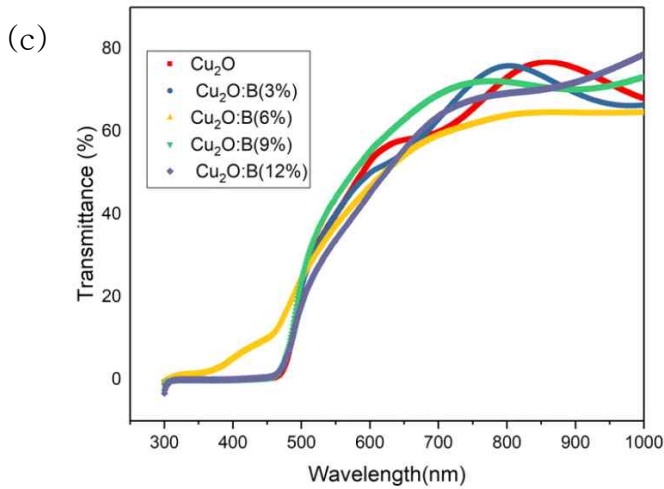
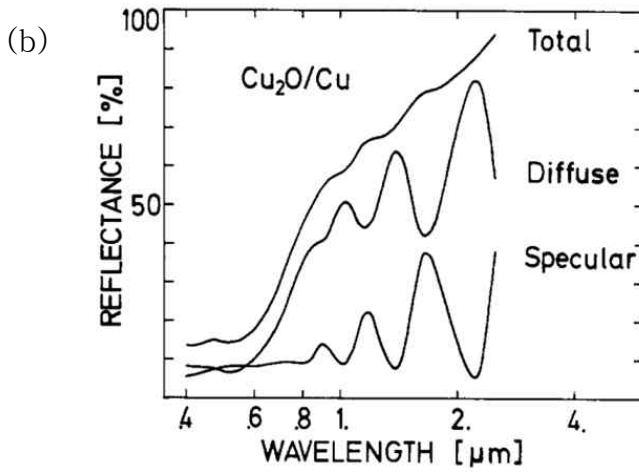
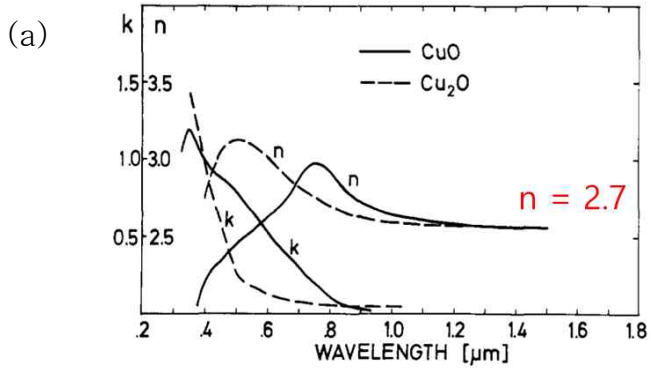


그림 2.3 산화구리(I)의

(a) 굴절률 그래프^[18], (b) 반사율 그래프^[18], (c) 투과율 그래프^[20]

3. OCT와 OCM

공간섭단층촬영(Optical Coherence Tomography, 이하 OCT)은 빛을 측정하고자 하는 샘플에 조사하고 샘플 내부에서 산란되어 돌아오는 빛을 분석하여 마이크로미터 해상도의 3차원 이미지를 획득하는 기술이다^[21]. OCT는 1991년 Science 지를 통해서 발표되었다^[22]. OCT는 [그림 2.4]의 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)^[23]와 공초점 현미경(Confocal microscopy)^[24]의 원리를 이용하여 제작되었다. 두 가지 장비의 원리를 이용한 OCT는 기존 장비보다 넓은 영역을 측정 가능하고 10 μm 이하의 분해능을 가진다. 또한 다른 장비들에 비해 빠른 데이터 수집 속도와 고해상도의 영상을 얻을 수 있고 깊이 방향으로 2~3mm 정도까지 데이터를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다^[21]. 광섬유를 이용하여 OCT를 제작할 수 있어 장비를 손으로 들고 측정이 가능할 정도로 소형화가 가능하다는 장점도 있다. 비침습적인 방법으로 샘플의 깊이 방향의 정보를 측정 가능하다는 장점이 있어 의료 영상 장비로써 적극적으로 활용되고 있다^[25]. 특히 안과에서 눈의 망막이나 모세혈관을 촬영하는데 가장 활발하게 사용하고 연구하고 있다^[26]. [그림 2.5]는 실제로 망막의 모세혈관을 직접 촬영한 이미지이다. 그 외에 소화기내과^[27]에서 위와 식도 계층 구조 측정 및 종양 진단, 피부과^[28]에서 피부의 복굴절 측정, 치과^[29,30]에서 치주 질환 진단에 사용하는 등 다양한 임상에서 활용되고 연구되고 있다.

OCT는 [그림 2.6], [그림 2.7]과 같이 측정 방법과 장비 구성에 따라 다양한 종류를 가지고 있다.

TD-OCT(Time Domain OCT)^[31]는 마이켈슨 간섭계의 Reference mirror가 앞뒤로 움직이면서 생성된 광 경로길기와 측정하고자 하는 샘플에서 산란되어 들어오는 빛의 광경로길기가 겹치면서 간섭을 일으키게 된다. 이때 광 다이오드를 이용하여 간섭신호를 전기신호를 변환하여 수치화하게 된다. Mirror와 샘플을 물리적으로 움직여야 해서 스캔 속도가 느리다는 한계를 가지고 있다.

FD-OCT(Frequency Domain OCT, Fourier Domain OCT)^[31,32]는 TD-OCT와는 달리 Reference mirror를 고정해두고 샘플 내부에서 산란되는 빛의 파장을 측정한다. 측정된 파장 정보를 푸리에 변환을 통해서 깊이 정보를 획득하게 된다. 이는 TD-OCT보다 깊이 방향으로의 스캔 속도가 빠르다는 장점이 있다. FD-OCT는

SD-OCT(Spectral Domain OCT)^[32]와 SS-OCT(Swept Source OCT)^[32]가 있다.

SD-OCT는 회절격자를 이용하여 샘플에서 산란되어 나오는 빛을 파장 성분에 따라서 공간상으로 분산시킨다. 파장 성분에 따라 분산된 빛의 광세기를 Line CCD Camera로 측정하여 분석하게 된다.

SS-OCT는 광원의 파장을 연속 선형 가변하고 하나의 PD로 광세기를 측정하게 된다. SS-OCT의 성능은 Swept source laser 광원의 Swept 파장 대역과 반복률에 의해서 결정되게 된다. Reference단이 고정되어 있고 광원의 Swept 속도가 빨라 높은 이미지 처리 속도, 고감도, 고해상도의 장점을 갖고 있다^[21,33].

이러한 OCT를 활용해서 기존에 [그림 2.8]과 같이 금속의 부식 방지용 코팅의 두께나, 페인트의 두께를 측정하려는 연구가 보고되어있다^[34,35,36]. 해당 논문들은 금속 산화물이 아닌 코팅층이나 페인트의 두께 측정하는 연구이다. 금속 부식관련 분야에 OCT기술이 적용되기 시작한 것으로 보이며, 본 연구를 통해 실제적인 금속 산화막 두께를 측정하는 기술을 처음으로 제안하였다.

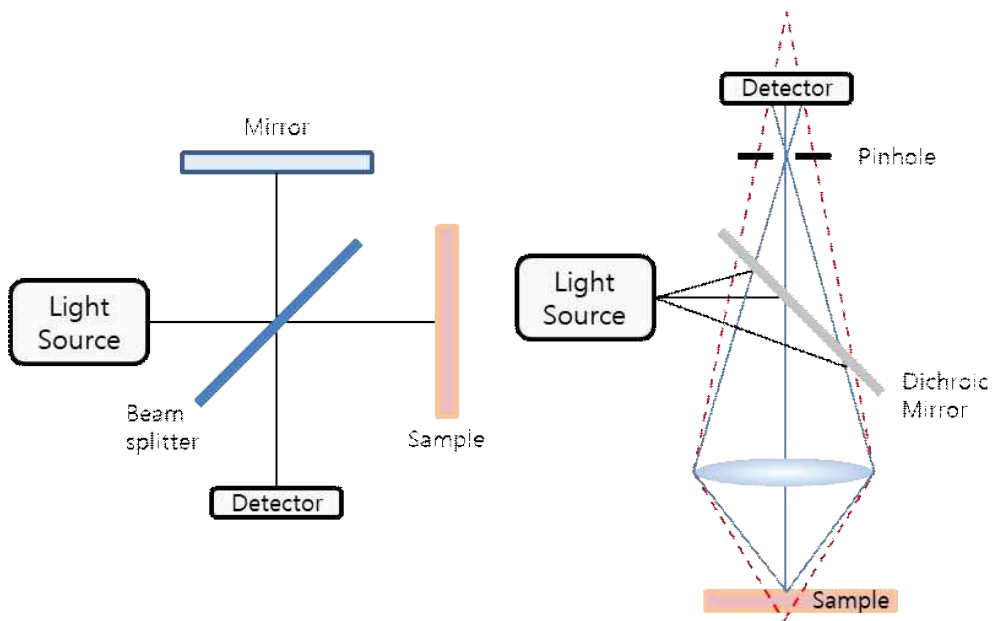


그림 2.4 마이켈슨 간섭계와 공초점 현미경의 모식도

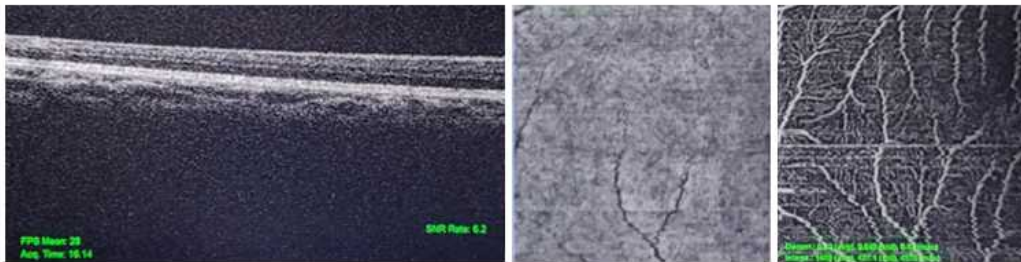


그림 2.5 OCT로 촬영한 망막의 모세혈관 이미지

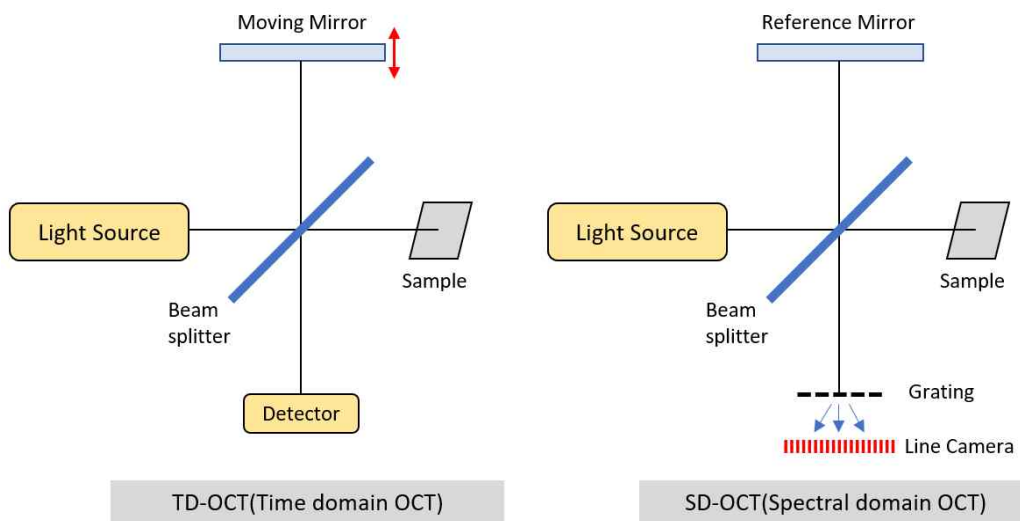


그림 2.6 TD-OCT와 SD-OCT의 구성도

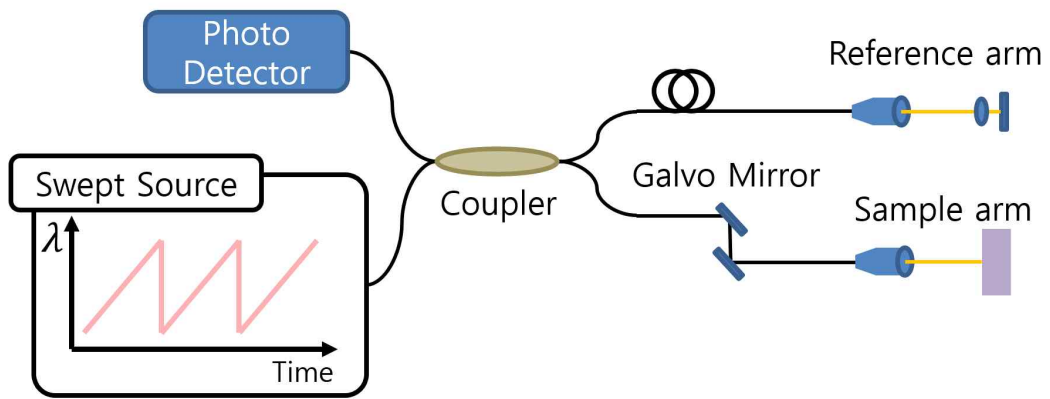


그림 2.7 광섬유 기반 SS-OCT의 구성도

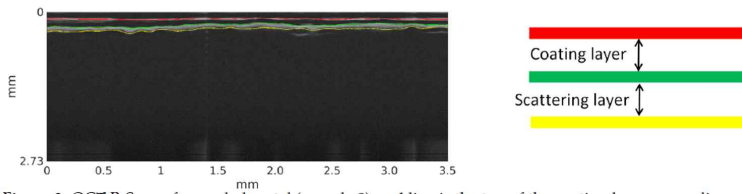


Figure 3. OCT B-Scan of corroded metal (sample 8): red line is the top of the coating layer, green line determines the end of the coating and the beginning of the corrosion, yellow line determines the end of the scattering-induced layer. Axes are given as optical path length $n \times d$.

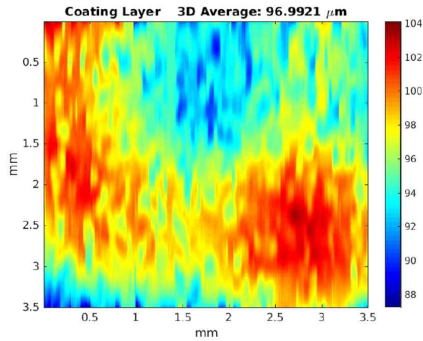


Figure 5. 3D heat map of the calculated layer thickness for the OCT measurement of sample 5.

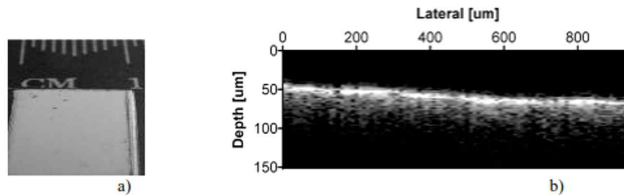


Fig. 8. Sample with anti-corrosion coating; a) sample image, b) OCT cross-sectional image.

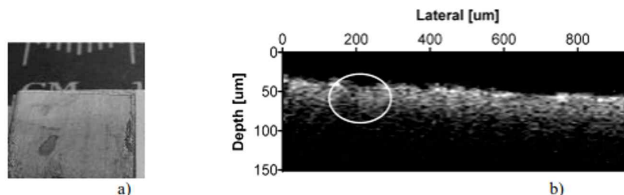


Fig. 9. Sample with anti-corrosion coating under the influence of aggressive environment; a) sample image, b) OCT cross-sectional image.

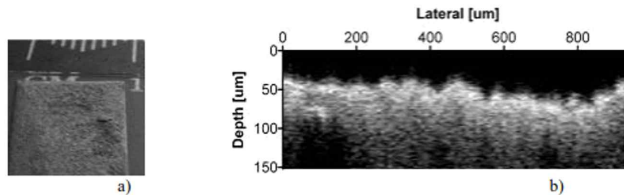


Fig. 10. Corrosive sample destruction; a) sample image, b) OCT cross-sectional image.

그림 2.8 OCT를 이용한 금속의 부식 방지용 코팅, 페인트 두께 측정연구^[35,36]

본 연구에서는 SS-OCT를 사용하여 금속의 부식 두께를 측정하려 한다. 이때 3D 이미지를 획득하게 되는데 3D 이미지를 획득하기 위한 OCT의 스캐닝 모드는 [그림 2.9]에서 확인할 수 있듯 A-Line, B-Scan, C-Scan이 있다^[21,31]. 첫 번째 A-Line은 한 지점에서의 깊이 방향 데이터를 얻게 된다. SS-OCT 기준으로 Swept Sorce가 파장을 한번 Swept 할 때 하나의 A-Line data를 얻게 된다. Galvo mirror를 이용하여 X축 방향으로 움직이면서 여러 개의 A-Line data를 얻으면 B-Scan data를 얻게 된다. 해당 데이터는 하나의 이미지로 생성할 수 있다. Y축 방향으로도 Galvo mirror를 움직여 여러 개의 B-Scan data를 얻으면 C-Scan data를 얻게 되고 최종적으로 3D 이미지를 얻게 된다. 본 연구에서는 A-Line data 704개의 pixel로 이루어져 있고 B-Scan data는 1,000개의 A-Line data, C-Scan data는 1,000개의 B-Scan data로 이루어져 있다. 최종적으로 $1000 \times 1000 \times 704$ px의 3D 이미지를 얻었다.

OCM(Optical Coherence Microscopy)^[37-40]은 OCT와 작동원리는 동일하지만 샘플단의 대물렌즈가 다르다. [그림 2.10]은 OCT와 OCM의 샘플단의 대물렌즈의 NA(Numerical Aperture)값에 따른 DOF(Depth Of Focus)차이를 보여준다. OCM에서 사용되는 대물렌즈의 NA값이 OCT보다 크다. 더 높은 NA값을 갖는 렌즈를 사용하게 되면 가로축 방향에 대하여 더 고해상도의 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 하지만 높은 NA값에 의해 DOF가 얇다는 단점을 갖는다. 본 연구에서는 부식 시편의 표면 상태를 더 고해상도로 촬영이 가능하다는 점을 활용하기 위해서 OCM을 활용하였다^[21]. 본 연구에서 개발한 OCM의 NA와 DOF값 3장 2절에 계산 결과를 보였다.

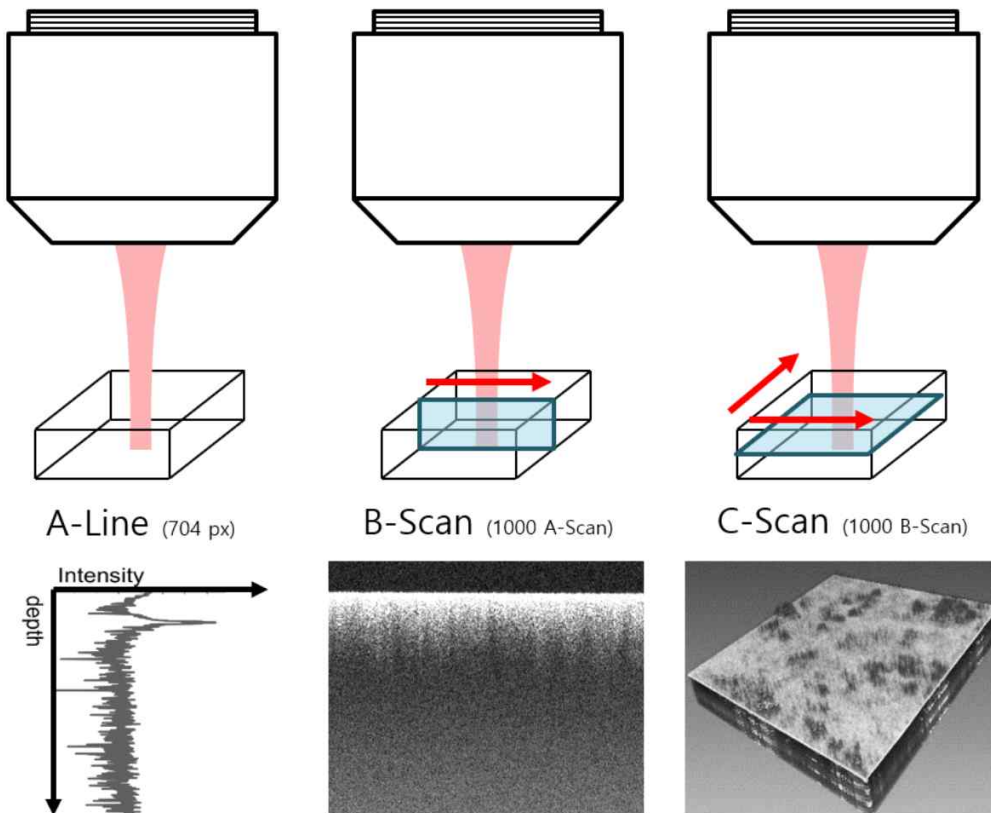


그림 2.9 OCT의 스캐닝 모드

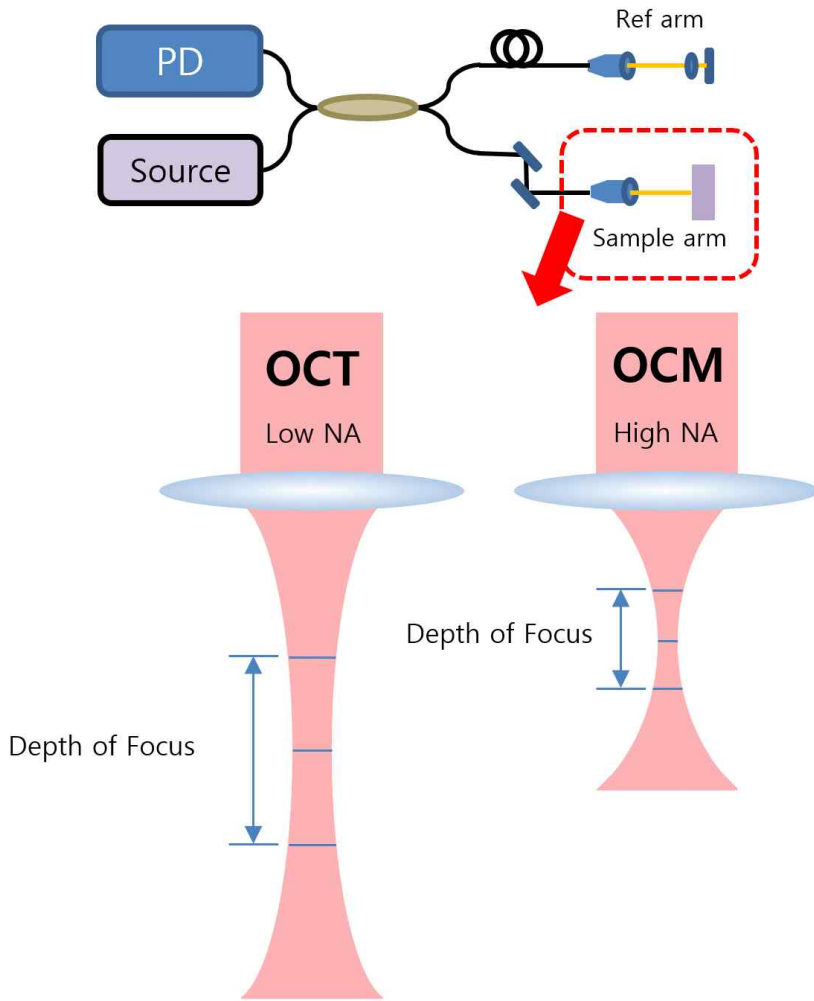


그림 2.10 OCT와 OCM의 샘플단 대물렌즈 NA에 따른 DOF변화

제3장 구성 및 실험

제1절 부식 시편 제작 및 측정

1. 부식 측정 실험 구성

본 연구에서는 OCT와 OCM을 이용하여 Cu 부식 시편의 두께를 측정하려 한다. 우선 측정용 부식 시편을 제작하게 되고 제작된 시편을 OCT와 OCM으로 측정하게 된다. 측정된 산화막 두께 데이터를 교차 검증하기 위해서 OCT와 OCM이 아닌 다른 방식의 측정법인 SEM을 이용하여 산화막의 두께를 측정하려 한다. 추가로 측정을 진행하는 산화막의 조성을 알기 위해 SEM-EDS 조성분석과 XRD 조성분석을 통해 교차 검증을 진행하려 한다.

2. 부식 시편 제작 과정

본 연구에서 사용된 Cu 부식 시편은 진공열처리를 통해서 제작된다. 우선 $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ 크기의 Cu 시편을 준비했다. 균일한 산화막을 제작하기 위해서 시편의 표면연마를 진행하였다. 각각의 다른 거칠기를 갖는 6종의 SiC(탄화규소) 연마지와 연마장비를 이용하여 4000 grit까지 표면연마를 진행하였다[그림 3.1]. 이후 Diamond Suspension을 이용하여 $1 \mu\text{m}$ 까지 미세연마를 진행하였다. [그림 3.2]에서 볼 수 있듯 미세연마 진행 후 거울처럼 보이는 것을 확인할 수 있다. 연마가 완료된 시편을 진공열처리장비(CVD)[그림 3.3]를 이용하여 진공 분위기에서 900도 열처리를 통해 최종 부식 시편을 제작하였다. 해당 진공열처리장비는 대흥과학 DVF 1600 모델이고 스펙은 [표 3.1]과 같이 최대 1600 °C까지 온도 조절이 가능하다.

일반적인 대기 중 열처리 방식으로 산화막을 제작하게 되면 OCT로 측정 불가능한 두꺼운 산화막이 제작되어 진공열처리 방식을 채택하게 되었다. 진공을 잡고 열처리를 진행하지만 장비 내부 알루미늄 튜브에 붙어있던 소량의 산소와 반응하여 산화막이 생성이 진행된다.

열처리 시간에 따른 차이를 확인하기 위해서 1h, 2h, 4h, 8h 등 4가지의 시간 차이를 두어 시편을 제작했으며, 각 시간 구간별로 2개의 시편을 제작했다. 진공열

처리는 장비에 넣은 상태로 900 °C 까지 분당 5 °C 로 승온 진행 후 900 °C 도달 후 각각의 시간 1h, 2h, 4h, 8h 열처리를 진행했다. 열처리 시간 경과 후 장비 안에서 충분히 식힌 후 시편을 꺼냈다.

제작된 시편을 이후 실험 부분에서 쉽게 설명하기 위해 1h-1, 1h-2, 2h-1, 2h-2, 4h-1, 4h-2, 8h-1, 8h-2 으로 명명했다.



그림 3.1 구리 시편 연마에 사용한 장비, 연마지, Suspension

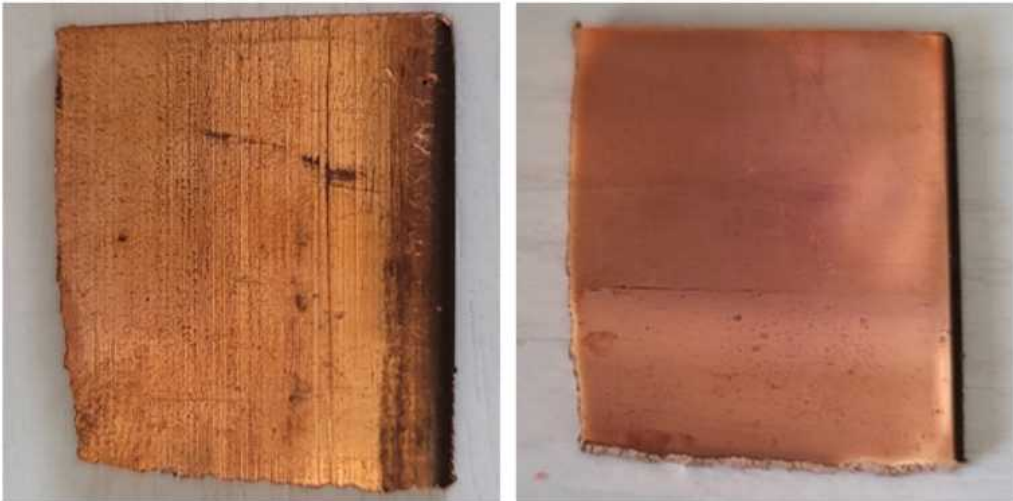


그림 3.2 연마 전후 Cu 시편 사진



그림 3.3 구리 시편 열처리 장비

Model	대흥과학 DVF 1600
WATTS	10kW Max
TEMP	1600 °C Max
VAC	760~1 Torr

표 3.1 구리 시편 열처리 장비 사양

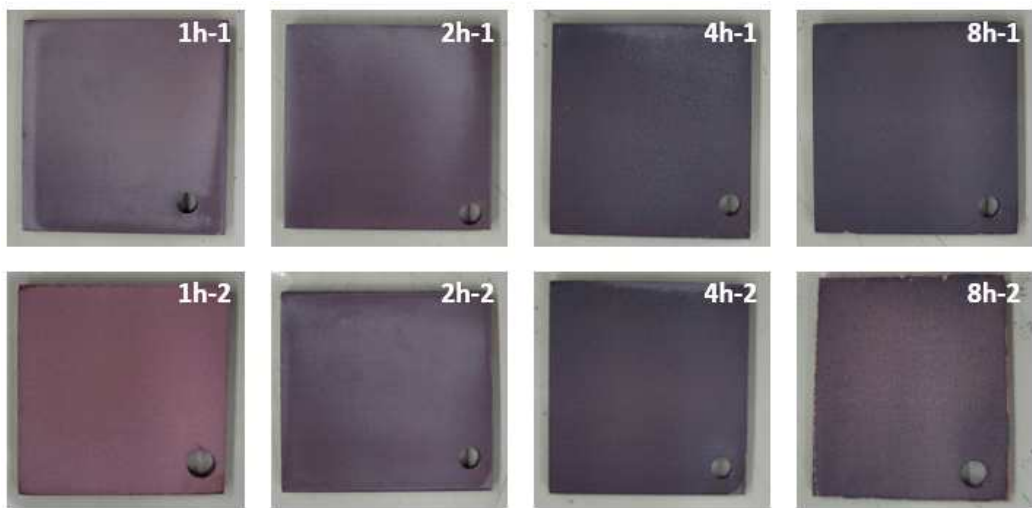


그림 3.4 900℃에서 진공열처리로 제작한 Cu 부식 시편

3. SEM-EDS 기반 산화막 두께 분석

제작된 구리 부식 시편의 조성분석과 두께 분석을 진행하기 위해서 SEM-EDS(Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive X-ray Spectrometer)를 활용했다. Cu 부식 시편의 산화막 두께를 SEM-EDS로 알아보기 위해서는 시편을 절단해서 단면을 확인해야 한다. 이때 시편에 손상이 가해지기 때문에 우선 OCT와 OCM을 측정하고 측정된 영역의 중심을 절단하였다. [그림 3.5]에서와 같은 위치를 절단 후 작은 조각은 SEM-EDS 측정용으로 사용하였다. 해당 부위를 절단하는 이유는 OCM으로 측정된 두께 값과 SEM으로 측정된 두께를 비교하기 위함이다.

[그림 3.6]에서와 같이 절단한 시편 조각을 레진을 이용하여 골드 마운팅 진행하였다. 레진 경화가 완료되면 단면을 깔끔하게 보기 위해서 연마를 진행하였다. 연마 방식은 전과 동일하게 각각의 다른 거칠기를 갖는 6종의 SiC(탄화규소) 연마지와 연마장비를 이용하여 4000 grit까지 표면연마를 진행하고 Diamond Suspension을 이용하여 1 μm 까지 미세연마를 진행하였다. 연마 진행 후 SEM-EDS 촬영 진행 시 Charge-up 현상을 방지하고 시료의 축소와 팽창을 감소시키기 위해서 카본테이프를 붙이고 Pt 코팅을 진행하였다[그림 3.6].

SEM 이미지는 산화막의 두께와 경계가 잘 보이도록 2000X의 배율로 촬영을 진행하였다. [그림 3.8]의 SEM 이미지상으로 보이는 경계면이 실제로 구리와 산화구리의 경계인지 확인하기 위해서 EDS Point 조성분석, Line 분석, Mapping 분석을 진행하였다. [그림 3.9]의 EDS Mapping 분석 이미지에서 왼쪽의 산소 분포 이미지를 보면 시료 표면에서만 거의 균일하게 산소가 분포함을 확인할 수 있다. 추가로 [그림 3.10]의 EDS Line 분석 데이터도 표면에 보이는 층에만 산소가 존재함에 따라 일반 SEM 이미지상으로 보이는 층이 실제 구리 산화막임을 확인할 수 있다. [표 3.2]의 EDS Point 조성분석 결과 구리와 산소의 원자비율(Atomic Percent)이 약 7대3인 것으로 보아 산화막은 대부분 Cu_2O 로 구성되어있다는 사실을 확인했다. 각각의 시편별로 여러 자리를 EDS Point 조성분석, Line 분석, Mapping 분석을 확인하였다. 이를 바탕으로 SEM 이미지만 촬영하여도 산화막의 두께를 측정할 수 있음을 확인하게 되었다.

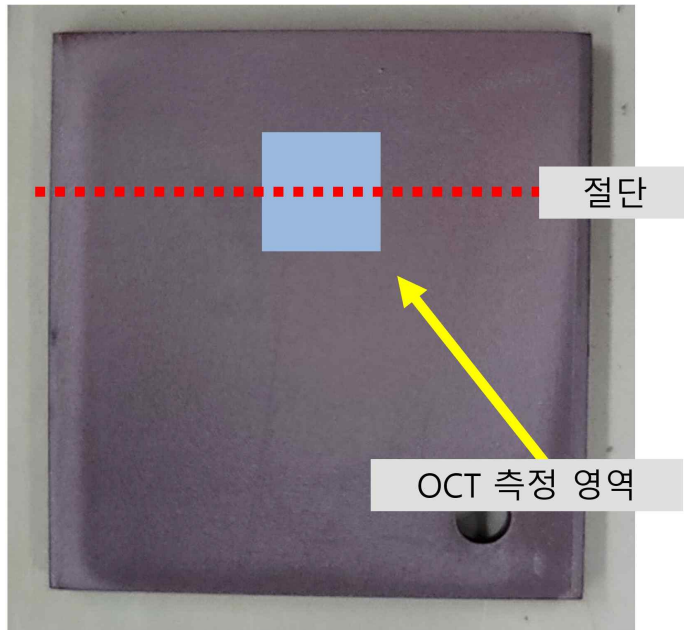


그림 3.5 Cu 부식 시편 SEM-EDS 측정 절단 위치

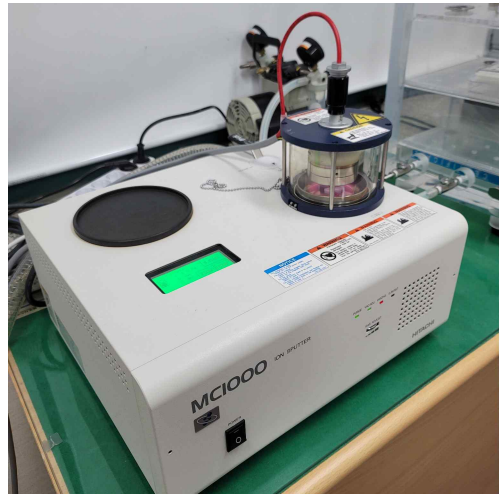


그림 3.6 절단 후 콜드 마운팅 진행한 Cu 시편 사진, Pt 코팅 진행 사진



그림 3.7 SEM-EDS에 장착 중인 마운팅 시편

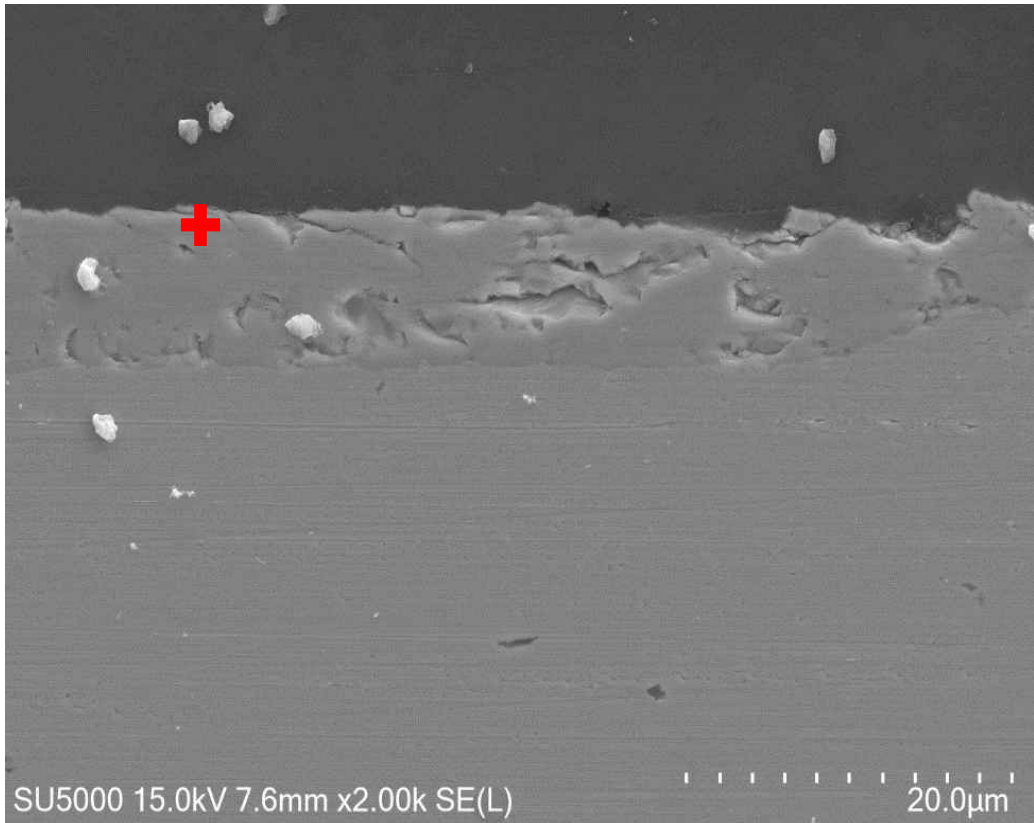


그림 3.8 Cu 부식 시편 1h-1의 SEM 이미지

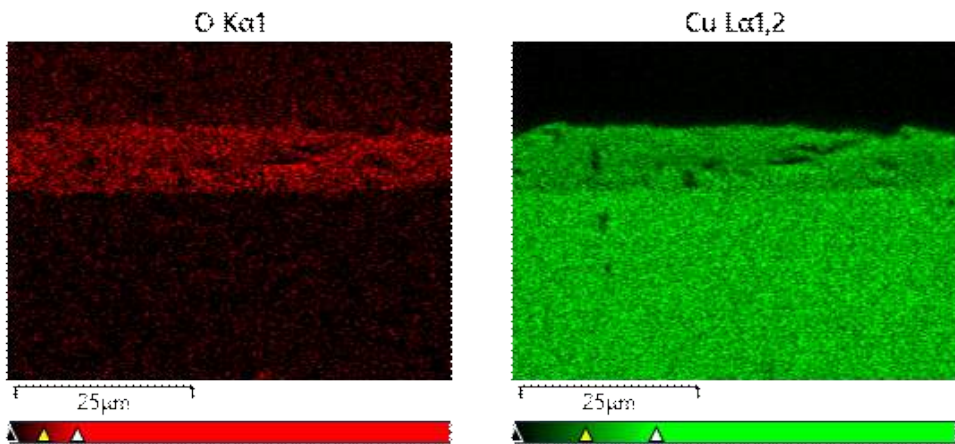


그림 3.9 EDS Mapping 분석 이미지

Element	Wt%	Atomic %
O	9.53	29.50
Cu	90.47	70.50

표 3.2 EDS Point 조성분석 Data

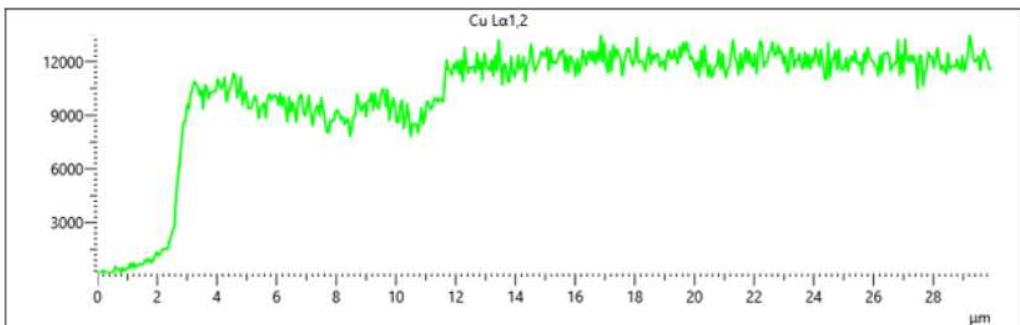
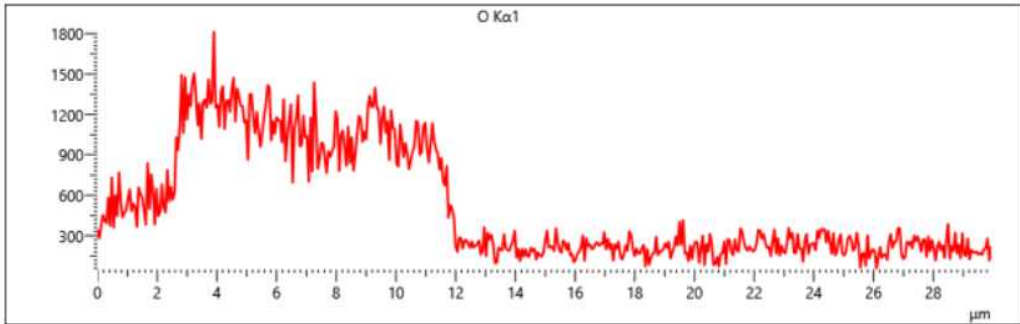
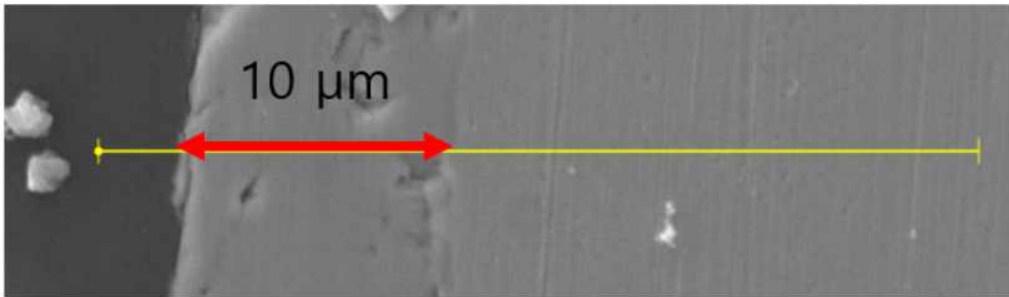


그림 3.10 EDS Line 분석 Data

SEM 이미지만 촬영하여도 산화막의 두께를 측정할 수 있음을 확인하였으니 산화막의 두께 측정하기 위해서 2000X 의 배율로 옆으로 이동하면서 SEM을 여러 장 촬영을 진행하였다. 각 시편별로 약 25장 가량을 이미지를 얻은 뒤 Photoshop 프로그램을 이용하여 파노라마 이미지로 이어 붙이는 작업을 진행하였다. [그림 3.11]은 제작한 SEM 파노라마 이미지와 추출된 산화물층 이미지를 보여준다. 산화물층 이미지는 Photoshop의 자석 올가미 툴을 사용하여 수작업으로 추출하였다. 이후 추출된 산화물층을 png 파일로 저장하였고, MATLAB으로 불러와 산화물의 두께 프로파일과 히스토그램을 분석하였다. [그림 3.12]와 [그림 3.13]은 각각 SEM 이미지에서 추출한 산화물 두께 프로파일과 이 프로파일로부터 얻은 히스토그램을 보여준다. 히스토그램을 확인 함으로써 산화막의 두께 분포를 확인할 수 있고 다른 시편들과 비교하기 수월하다는 장점이 있다.

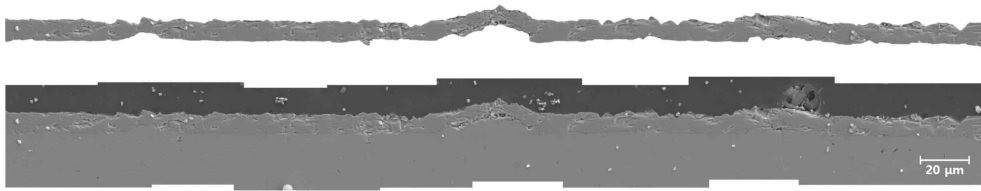


그림 3.11 SEM 파노라마 이미지와 추출된 산화물층 이미지



그림 3.12 SEM 이미지에서 추출한 산화물 두께 프로파일

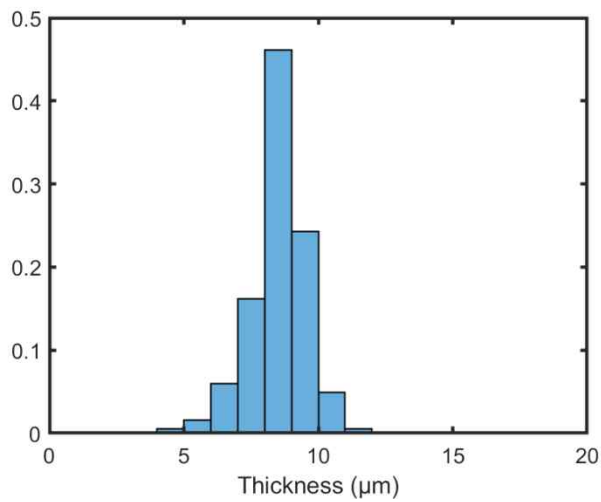


그림 3.13 SEM 이미지에서 추출한 산화물 두께 히스토그램

제2절 OCT, OCM을 이용한 부식 측정

1. OCT와 OCM 실험 구성

본 연구에서 구리 부식 시편을 측정하기 위해 광섬유 기반 1700 nm SS-OCT와 OCM을 [그림 3.14]와 같이 셋업하였다. 이 셋업에 사용한 광원[그림 3.15]은 Santec사의 1700 nm 대역의 Swept Source가 사용되었고, 파장 가변 범위는 1600 nm ~ 1790 nm 이고 Sweeping rate는 90kHz이다. [그림 3.16]은 해당 광원의 시간에 따른 Output power와 Spectrum을 보여준다. 구리 시편을 측정하다 보니 광원의 Output power가 강해서 표면에서 반사광에 의한 빛 번짐 때문에 선명한 이미지를 얻기 어려워 광원의 광 세기를 적당히 조절해줘야 한다. 광원의 세기를 조절하기 위해 일반적인 광감쇄기(Attenuator)를 사용하거나 ND filter를 사용하는 방법이 있다. 본 연구에는 광원 다음에 위치한 SOA(semiconductor optical amplifier)의 공급전류를 조절하여 최종 출력광 세기를 조절했다 [그림 3.17]. [그림 3.18]은 해당 SOA의 입력 전류값에 따른 출력 특성을 보여준다. 해당 시스템은 모두 광섬유 기반으로 제작되었는데 이 장점을 살려 샘플단과 기준단을 교체하여 OCT와 OCM을 선택적으로 사용할 수 있도록 설계하였다. [그림 3.15]에서와 같이 OCT와 OCM의 기준단을 각각 제작했다. Swept Source가 파장이 가변되는 동안 위상(Phase)이 변한다는 문제를 해결하기 위해서 위상 보정용 보조간섭계를 추가로 설계하여 부착하였다.

3D 이미지 촬영시에 Galvo mirror에 의해 빛을 스캔하듯이 샘플에 조사한다. 이때 스캔 범위는 Galvo mirror에 가해주는 입력 전압에 의해 조절할 수 있는데 OCT와 OCM의 Galvo mirror 입력 전압에 따른 스캔 범위를 [표 3.3]에서 확인할 수 있다. 본 연구에서는 OCT는 2,3 V를 사용하고 OCM은 5 V를 사용하였다.

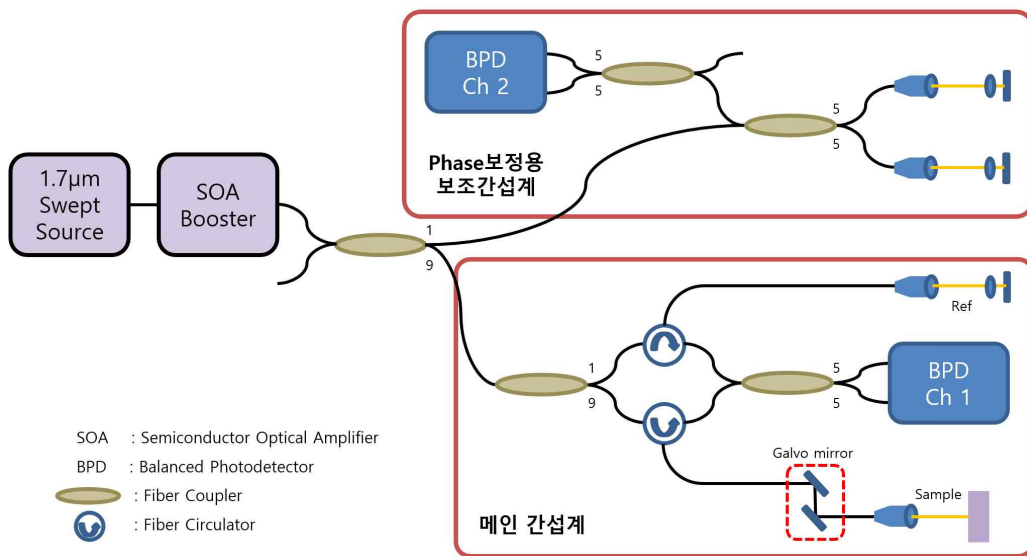


그림 3.14 1700 nm Swept-Source OCT의 구성도



그림 3.15 사용된 1700 nm Swept-Source

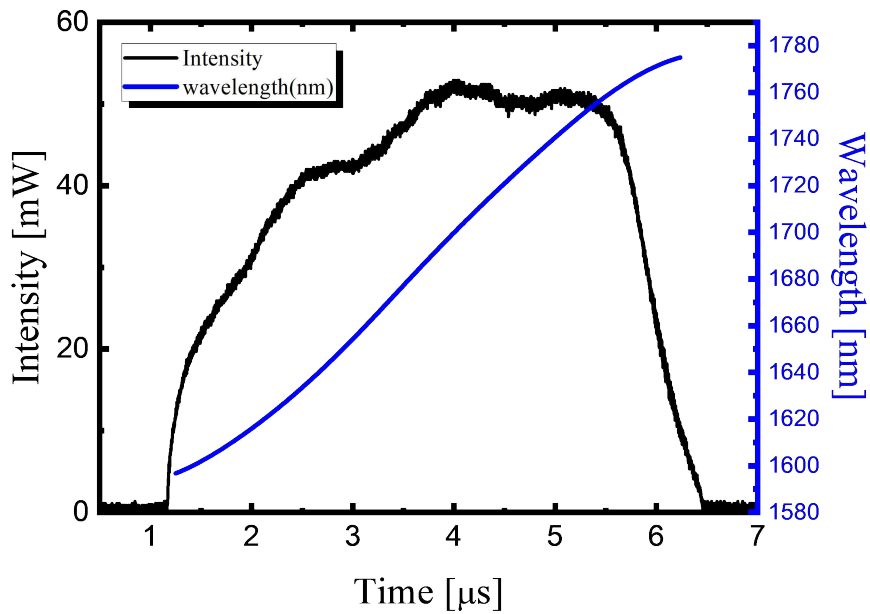


그림 3.16 1700 nm Swept-Source의 시간에 따른 Output power와 Spectrum

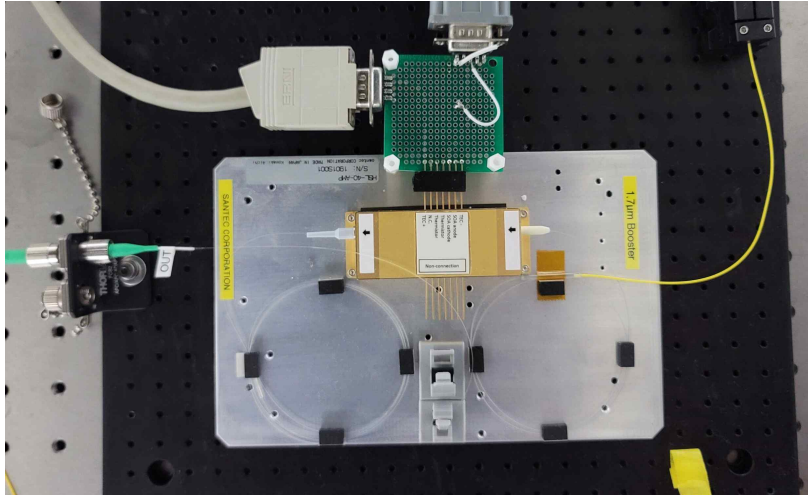


그림 3.17 사용된 1700 nm Semiconductor Optical Amplifier

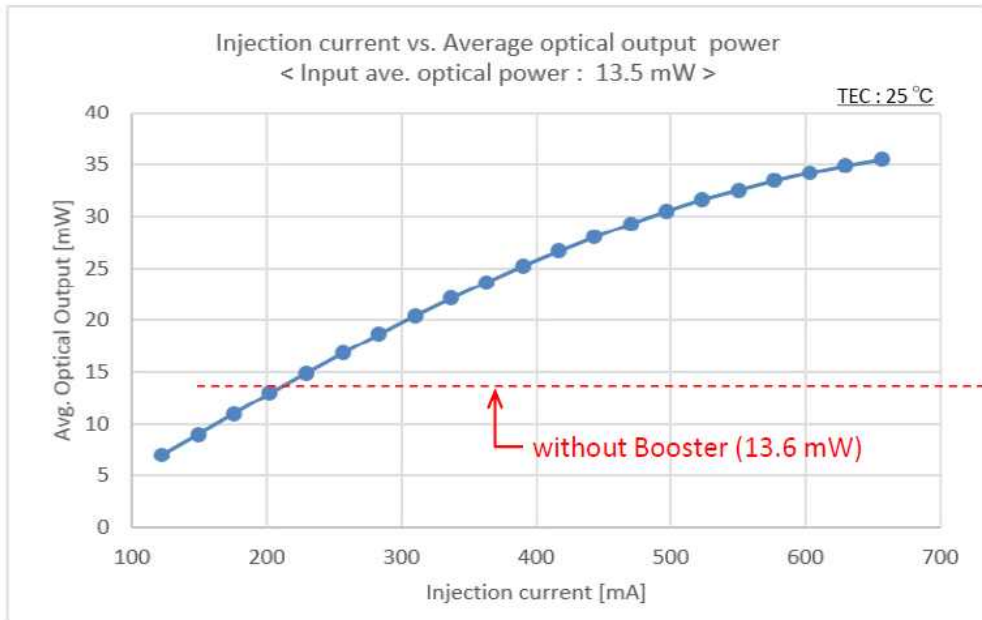


그림 3.18 사용된 1700 nm SOA의 입력 전류값에 따른 출력 특성

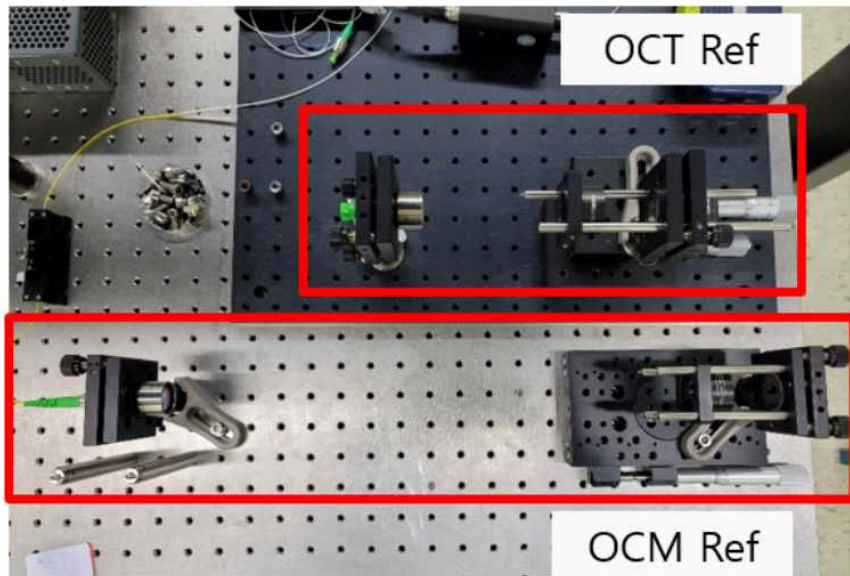


그림 3.19 OCT와 OCM의 기준단의 이미지

Galvo mirror input voltage	OCT scan range	OCM scan range
1v	2 mm	1 mm
2v	4.5 mm	1.5 mm
3v	7 mm	2 mm
4v	9 mm	3 mm
5v	11 mm	4 mm

표 3.3 OCT와 OCM의 Scan range

OCT와 OCM의 분해능(Resolution)은 Axial Resolution과 Lateral Resolution 두 가지로 나눌 수 있다.

Axial Resolution은 깊이 방향의 분해능을 뜻한다. Axial Resolution은 Swept-Source의 성능에 의해서 결정된다. 해당 시스템에서 Axial Resolution은 두께와 굴절률을 알고 있는 슬라이드 글라스의 이미지를 촬영하여 측정하였다. 1mm의 슬라이드 글라스를 사용하였고 굴절률은 1.5이다. 이미지 촬영 후 이미지에서 슬라이드 글라스의 윗면과 아랫면 사이의 간격(pixel)을 측정하고 굴절률과 슬라이드 글라스의 두께를 고려해 주면 Axial Resolution은 8.3 μm 으로 측정되었다. Axial Resolution은 아래의 식으로 계산할 수 있다^[21].

$$Axial\ Resolution(\delta z) = \frac{2\ln(2)}{n\pi} \frac{(\lambda_0)^2}{\Delta\lambda}$$

해당 식으로 계산 결과 7.0 μm 으로 계산되었다. 이론값이기 때문에 실제 측정 Axial Resolution 값과는 차이가 있다. 뒤에서는 실제로 측정한 8.3 μm 으로 계산을 진행할 예정이다.

Lateral Resolution은 가로 방향의 해상도를 뜻한다. 이는 샘플단의 대물렌즈에 의해서 결정된다. Lateral Resolution은 아래의 식으로 계산할 수 있다^[21].

$$Lateral\ Resolution(\delta x) = 0.37 \frac{\lambda_0}{NA}$$

식에서 λ_0 는 Swept-Source의 중심 파장(1680 nm)이고 NA는 샘플단 대물렌즈의 NA 값을 나타낸다. OCT와 OCM은 대물렌즈의 유효 NA(Numerical Aperture) 값은 각각 0.069와 0.15 이다. [그림 3.20]과 [그림 3.21]은 OCT와 OCM의 샘플단의 모습과 렌즈 구조, 스캔 범위, NA, Axial Resolution, Lateral Resolution을 보여준다.

위 계산식으로 계산된 OCT의 Lateral Resolution은 9.1 μm 이고 OCM은 4.1 μm 이다. OCM의 Lateral Resolution이 OCT에 비해서 2배가량 좋은 것을 확인할 수 있다. [그림 3.22] [그림 3.23] [표 3.4] [표 3.5] 는 OCT와 OCM에서 사용한 대물렌즈의 사진 치수 투과율 상세 사양을 보여준다. 두 렌즈는 사용하는 광원의 파장 대역(1700nm)에서의 투과율을 고려하여 선택했다.

OCT와 OCM의 DOF는 대물렌즈의 NA값에 의해 달라지게 된다. DOF는 아래의 식으로 계산할 수 있다^[21].

$$Depth\ of\ Focus = \frac{0.565 \cdot \lambda_0}{\sin^2\left[\frac{\sin^{-1}(NA)}{2}\right]}$$

위 계산식으로 구한 OCT의 DOF는 806 μm 이고 OCM은 169 μm 이다. OCT의 DOF가 OCM에 비해 4배이상 넓은 것을 확인할 수 있다. 해당 값은 공기 중에서의 이론값이므로 측정하려는 물질의 투과율, 흡수도, 산란의 정도, 표면 상태 등에 따라 달라진다.

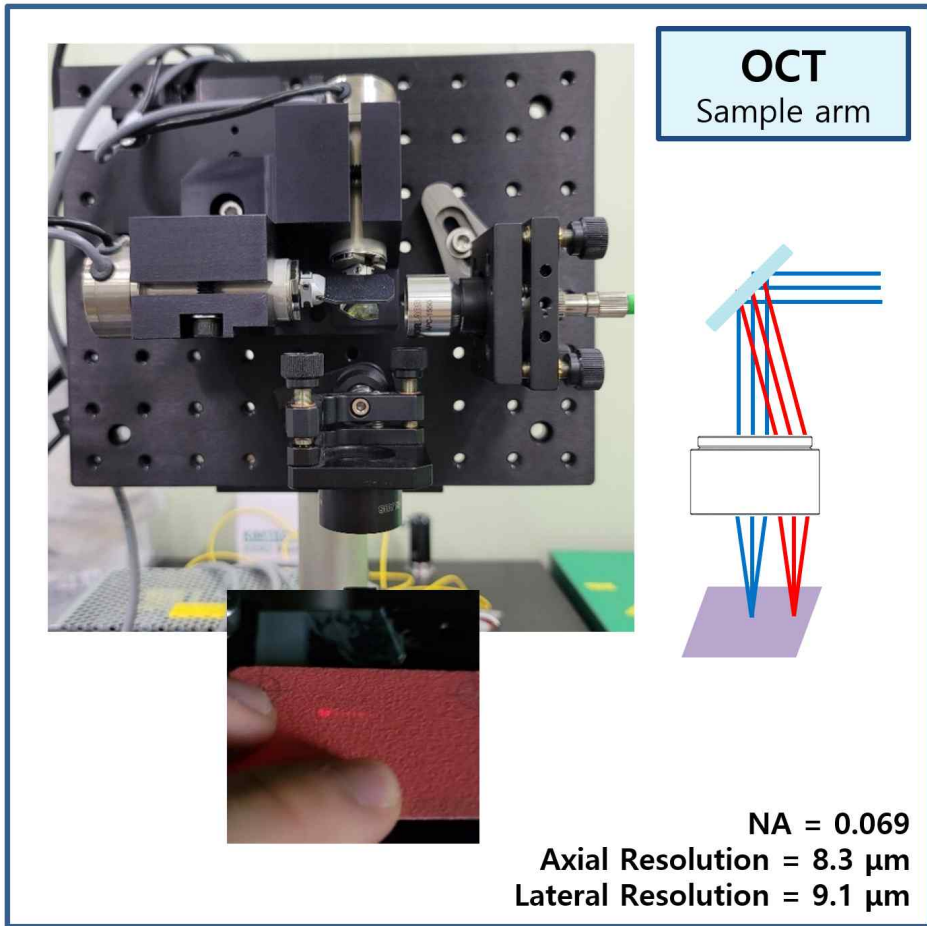


그림 3.20 OCT의 샘플단의 이미지, 모식도 사양

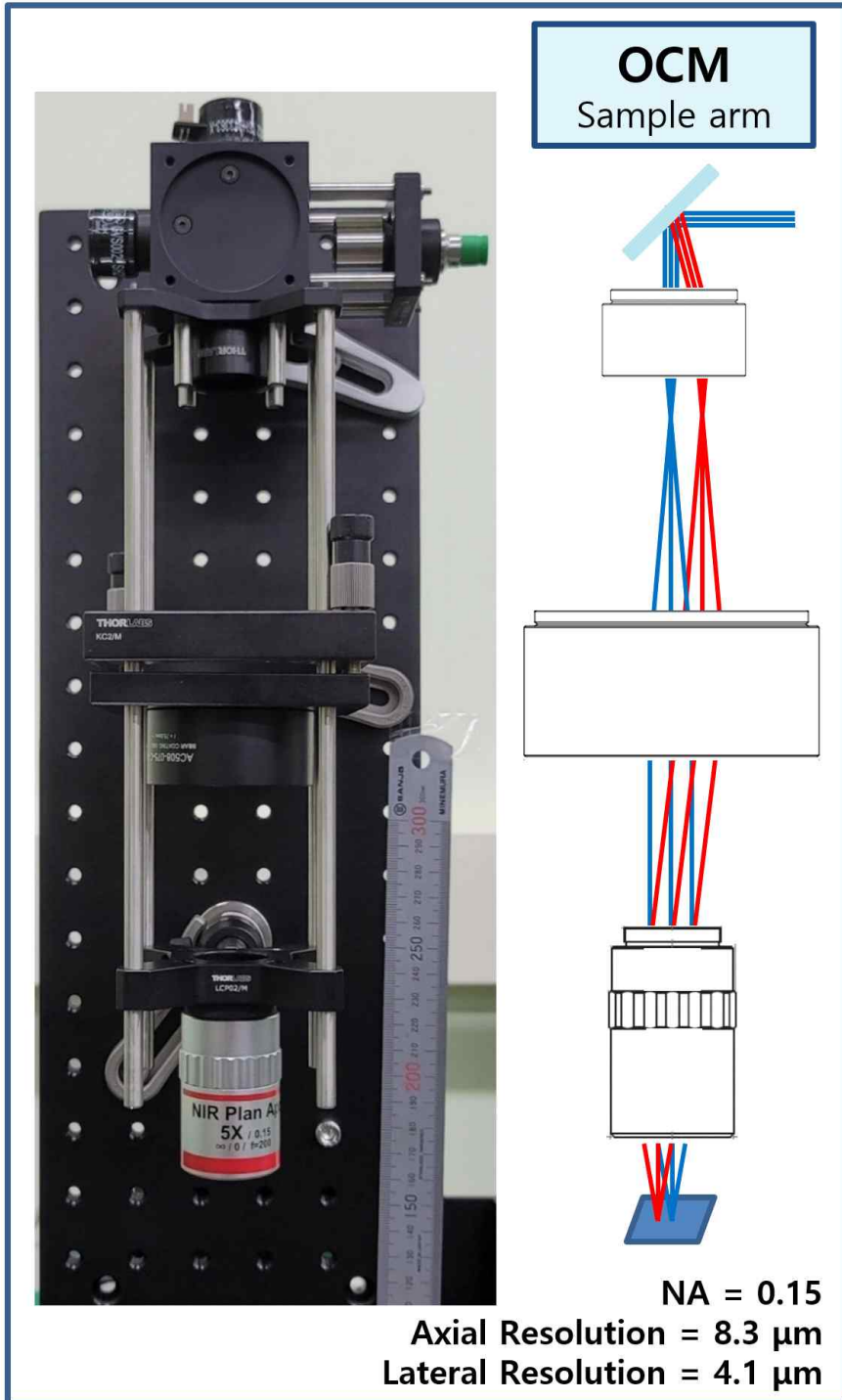


그림 3.21 OCM의 샘플단의 이미지, 모식도 사양

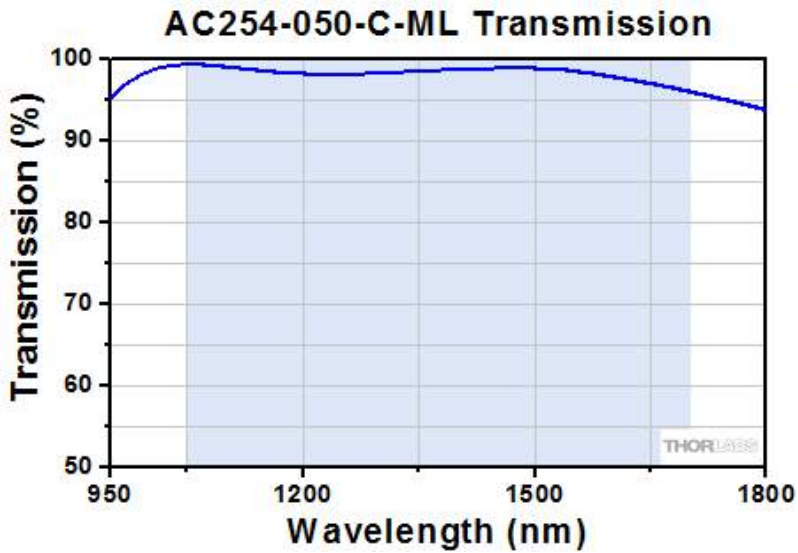


그림 3.22 OCT에 사용된 대물렌즈(AC254-050-C-ML)의 사진, 투과율

Lens Diameter (mm)	25.4mm
Working distance (WD)	37mm
Focal length f	50mm
Materialsd	N-LAK22/N-SF6HT

표 3.4 OCT에 사용된 대물렌즈(AC254-050-C-ML)의 상세 사양

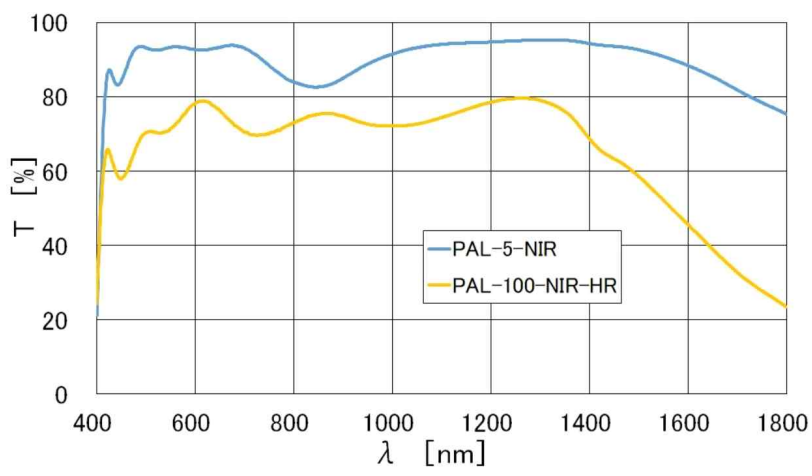
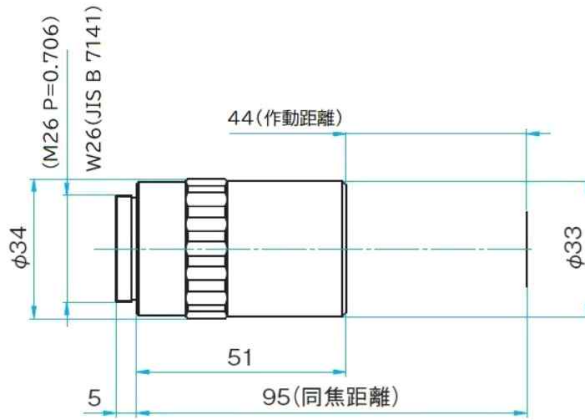


그림 3.23 OCM에 사용된 대물렌즈(Pal 5 nir)의 치수, 투과율

Numerical aperture (NA)	0.15
Pupil diameter	$\phi 12.0\text{mm}$
Working distance (WD)	44.0mm
Weight	0.24kg
Focal length f	40mm

표 3.5 OCM에 사용된 대물렌즈(Pal 5 nir)의 상세 사양

2. OCT와 OCM 이미지 데이터

CVD 장치로 제작한 Cu 부식 시편을 [그림 3-14]와 같이 구성한 OCT와 OCM 시스템을 이용해서 촬영하였다. [그림 3.24]는 OCT와 OCM으로 촬영된 산화막 이미지와 A-line 그래프를 각각 보여준다. 일단 OCT 이미지와 OCM 이미지를 비교해보면 OCT의 DOF(초점심도)가 OCM보다 더 넓어 더 깊이까지 이미지가 확인되는 것을 확인할 수 있다. 두 이미지를 확대해서 자세히 보면 OCM을 이용해 얻어진 이미지에서 확연한 산화막 레이어가 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 산화막은 A-line 그래프에서 더욱 확실하게 구분할 수 있다. A-line 그래프에서 X축은 빛의 투과 깊이를 나타내고, Y축은 부식 구리 시편에서 깊이에 따라 반사된 산란광 세기를 나타낸다. A-line 그래프에서 화살표로 표시한 두 지점 중에서 처음 화살표는 시편 표면 반사 위치이고, 두 번째 화살표는 부식된 산화막과 구리 금속 사이 경계면에서 반사된 위치를 나타낸다. OCT에서는 DOF가 OCM보다 더 깊어 두 지점 이후에 보이는 다른 반사광 신호들이 OCM에서보다 더 깊이까지 보인다. 이런 현상은 구리금속 표면에 형성된 산화막에서 다중반사에 의해 빛이 깊이까지 들어간 것처럼 보이게 되는데, DOF가 더 얇은 OCM를 이용하면 이러한 고스트 이미지를 줄여 산화막 분석에 더욱 유리하다.

A-line 그래프에서 찾은 두 첨두치에 해당하는 두 지점 사이의 거리는 굴절률과 깊이 방향 해상도를 고려해서 μm 단위로 계산할 수 있다. 결과적으로 이 값은 금속 표면에 형성된 산화막 두께로 정의하고 이미지 분석 알고리즘을 통해 산화막 두께 프로파일을 얻을 수 있다.

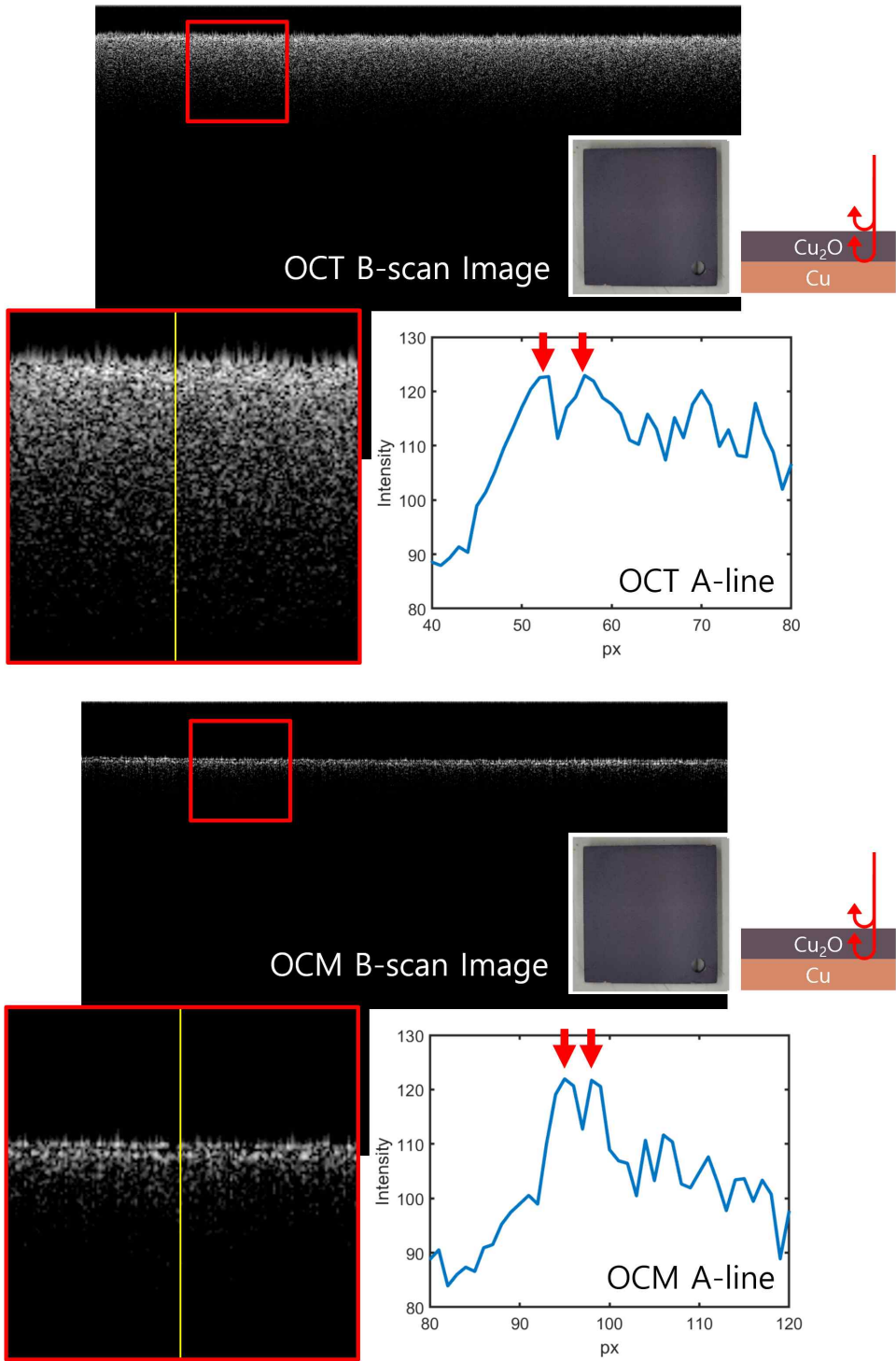


그림 3.24 구리 시편을 촬영한 OCT, OCM 이미지와 A-line 그래프

제3절 이미지 품질 향상 및 산화막 두께 측정

1. Phase calibration

Swept Source Laser는 출력 광의 파장을 연속적으로 가변하는 기능을 가지고 있다. 레이저 출력 파장을 가변하기 위해서는 레이저 공진기의 공진길이를 연속적이고 가역적으로 움직여 줘야 한다. 공진길이의 기계적인 변화는 매번 동일한 위치에서 동작하지 않는 문제가 있다. 이런 이유로 파장 가변할 때마다 출력광의 위상 변화가 발생한다. 위상 오류에 의한 측정 에러를 줄이기 위해서 [그림 3.14] 같이 OCT와 OCM을 설계할 때 보상 보정용 보조간섭계를 두었다. [그림 3.14]와 [그림 3.26]에서 구리 부식 시편 측정 OCT 간섭신호는 Balanced Photo-detector(BPD) Ch1으로 수집되고, 위상 보정용 Fixed Line 신호는 보조간섭계의 BPD Ch2에서 수집된다. [그림 3.25]에서 보이는 과정은 Phase calibration 진행 과정 모식도이다. Ch2에서 측정된 Interferogram 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)를 해주고 Fixed line 데이터를 얻는다. A-line 별로 7 px(Fixed line 데이터)을 남기고 Masking을 진행한다. 얻어낸 7 px의 Fixed line 데이터에 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 취해 위상(Phase) 값을 얻어낸다. 측정된 위상을 BPD Ch1의 실제 샘플 데이터에 곱해주게 되면 간단하게 위상을 보상해줄 수 있다. [그림 3.27]은 Phase calibration 진행중에 BPD Ch2에서 추출한 Phase 값을 보여준다. 실제로 Phase calibration 전후 이미지를 비교해보면 Phase calibration을 적용한 이미지에서 노이즈가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다^[41].

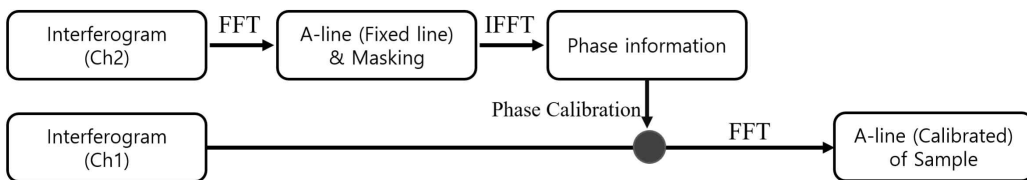


그림 3.25 Phase calibration 진행 과정 모식도

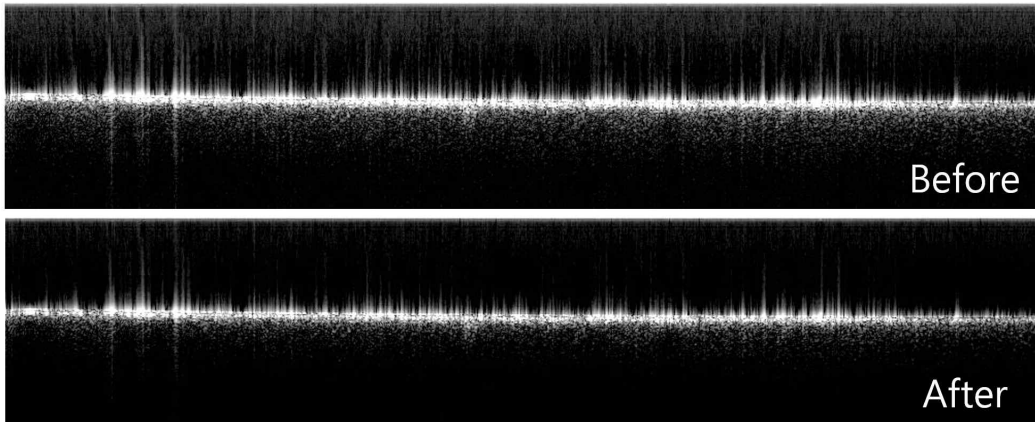
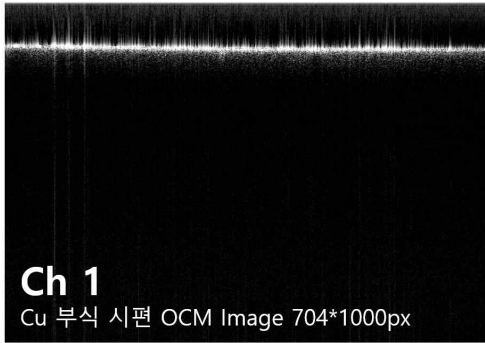


그림 3.26 OCM으로 얻은 Ch 1과 Ch 2 이미지와 Phase calibration 전후 이미지

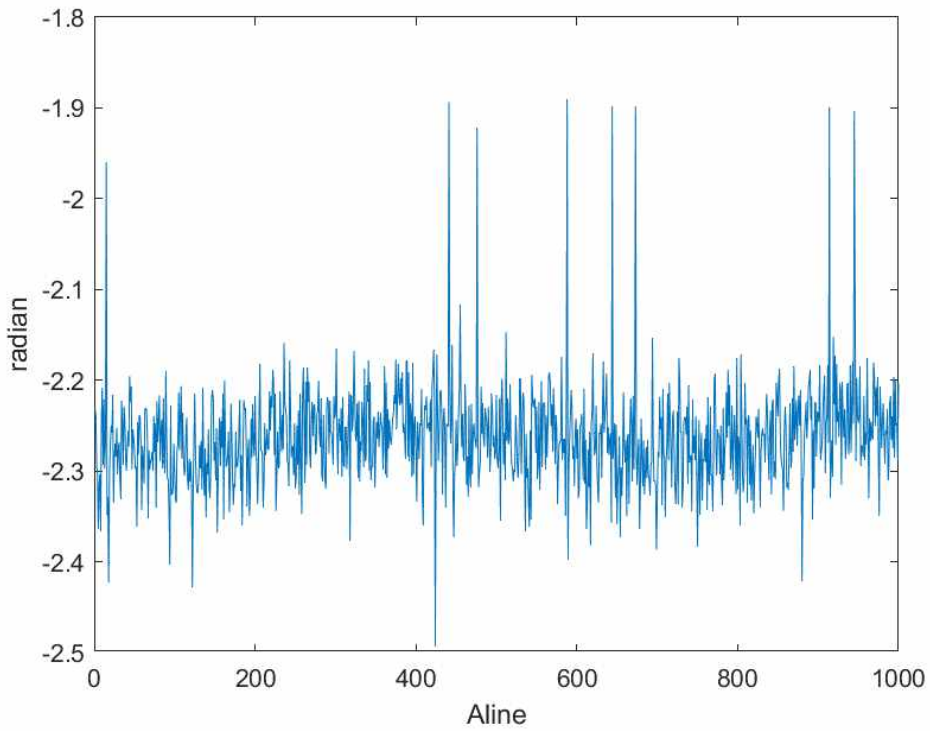


그림 3.27 Ch 2 에서 추출한 Phase angle data

2. Interpolation

Interpolation(보간)은 알고 있는 데이터의 점 집합 범위 안에 새로운 데이터점들을 추가하는 기법이다. 보간을 이용해서 누락된 데이터를 채우고, 기존데이터를 평활화하고, 예측을 수행할 수 있다^[42]. 본 연구는 Cu 부식 시편의 두께를 OCT와 OCM으로 측정하고자 한다. 하지만 OCT와 OCM의 깊이 방향 해상도가 px 당 $8.3 \mu\text{m}$ 이기 때문에 Resolution 이하의 산화막을 감지하지 못할 뿐만 아니라 한 픽셀만 움직여도 $8.3 \mu\text{m}$ 의 차이가 나게 되어 정밀한 측정이 어렵다. 예를 들어 [그림 3.28]과 같이 3 px인지 2 px인지 확신할 수 없는 상황이 나타난다. 이러한 오차를 줄이고 정확도를 높이기 위해서 데이터 사이에 Interpolation(보간)을 진행하였다. Interpolation은 MATLAB의 SPLINE 함수를 이용하여 데이터 개수를 10배 늘리게 진행하였다. Interpolation을 진행한 후 [그림 3.28]과 같이 2.7 px이라는 결과를 얻을 수 있게 되었다. SPLINE 이란 주어진 복수의 제어점을 통과하는 부드러운 곡선으로, 인접한 두 점 사이의 구간마다 별도의 다항식을 이용해 곡선을 정의한다. 3차 곡선을 이용한 보간법으로 널리 이용되고 있다^[43].

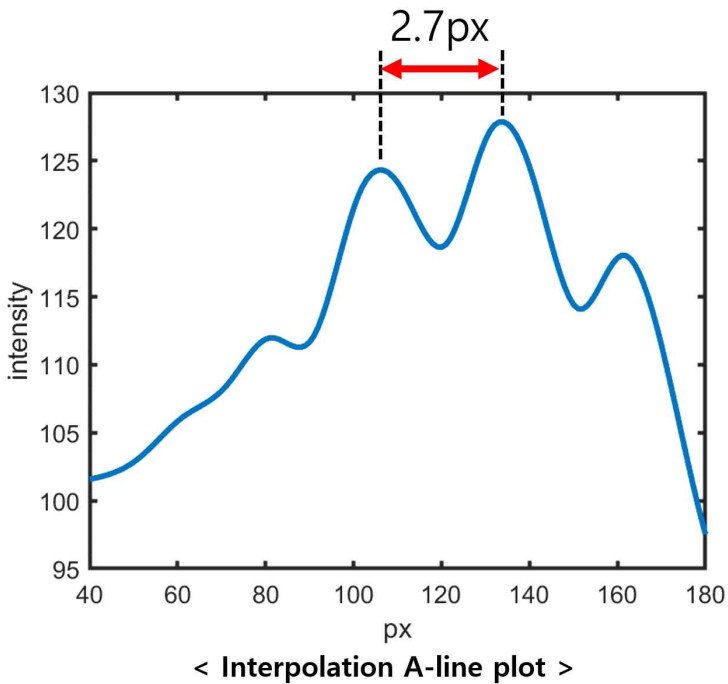
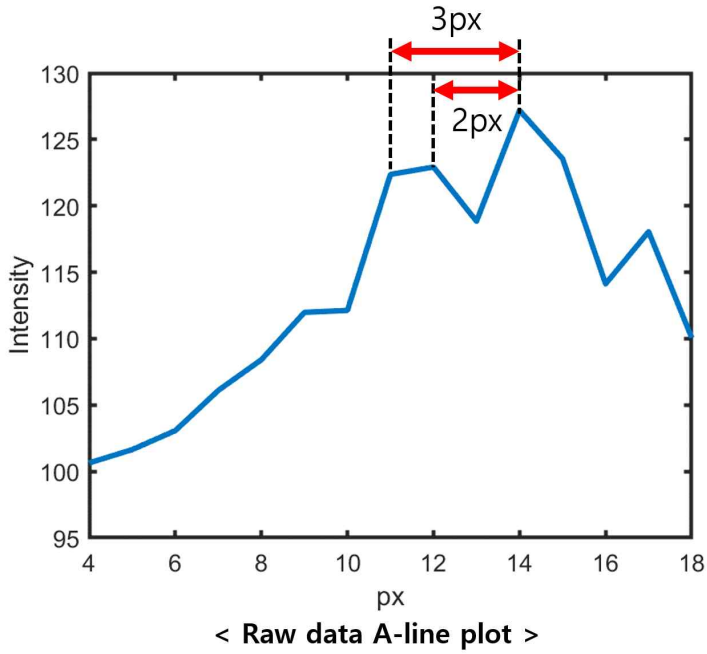


그림 3.28 Raw data와 Interpolation data의 A-line plot

3. Peak finding algorithm

3장 제2절 2. OCT와 OCM 이미지 Data에서 언급했듯이 구리 산화막의 두께는 A-line 데이터에서 시편의 표면에서의 반사된 픽과 산화물과 구리 사이 경계면에서 반사된 픽을 찾으면 구할 수 있다. [그림 3.29]는 산화막의 두께를 찾는 방법을 설명하는 그림이다. 좌측 상단 OCM B-scan 이미지는 Phase calibration과 Interpolation을 진행하여 이미지 품질을 향상시키고 에러를 줄인 이미지이다. 해당 이미지에서 A-line 데이터를 하나 불러오고 두 개의 픽이 위치한 범위를 지정해준다. 지정된 범위에서의 가장 밝은 피크지점과 두 번째로 밝은 피크지점을 찾아서 사이 간격을 찾아낸다. 전체 A-line에 대해서 각각 가장 밝은 피크지점과 두 번째로 밝은 피크 지점을 찾는 작업을 진행하면 B-scan 이미지에서의 두께 값을 알아낼 수 있다. 해당 방법을 측정된 3D 이미지 전체에 적용시켜 두께를 계산했다.

해당 방법은 OCM 이미지상에서 표면의 밝기가 강해서 생기는 빛 번짐이나 산화막의 두께가 깊이 방향 해상도보다 얇은 경우 등에 의해서 오차가 생길 수 있다. 그렇기 때문에 30 μm 이상의 값들을 오차로 생각하고 히스토그램에서는 표시 하지 않았다.

계산된 두께 데이터를 [그림 3.30]과 같이 히스토그램과 En-face mapping 이미지로 나타내었다. 히스토그램의 Y축은 정규화(Normalization)를 진행하고 나타냈다. En-face 이미지는 추가적인 방법을 사용하여 에러를 줄여 표시한다. 이는 뒤에서 더 자세하게 다루도록 하겠다.

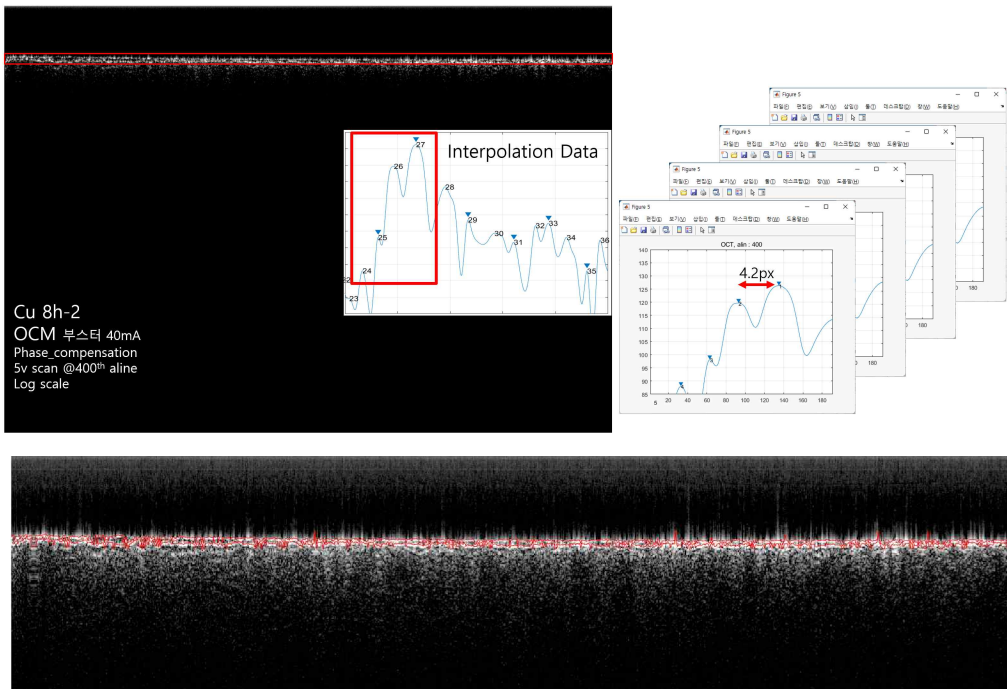


그림 3.29 Peak finding algorithm

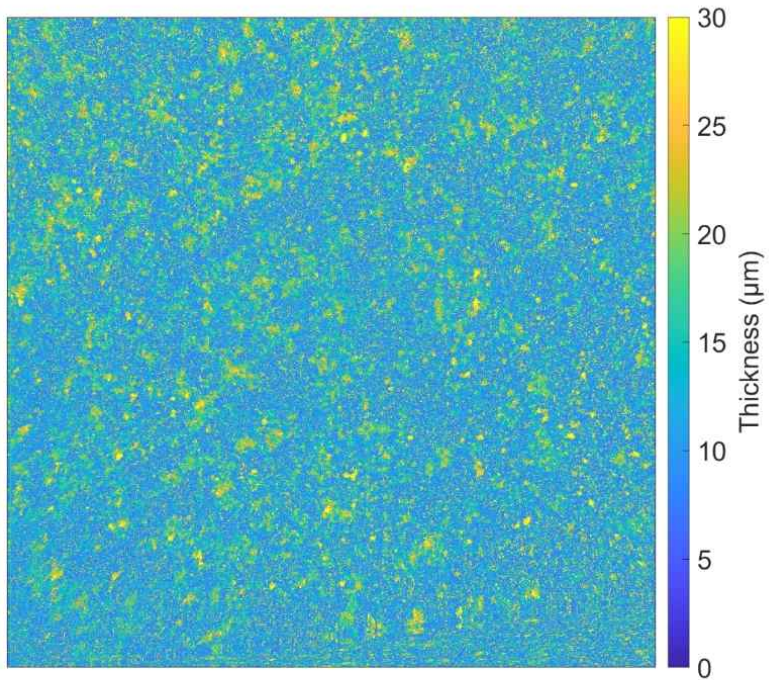
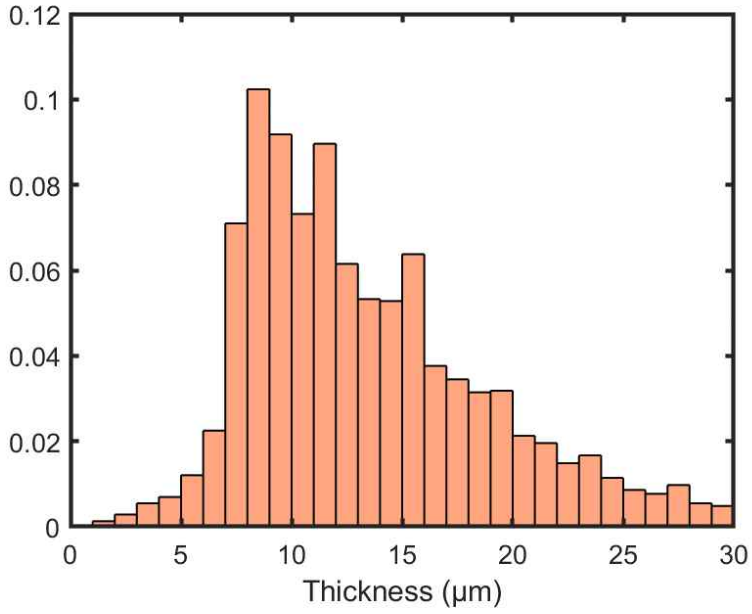


그림 3.30 계산된 두께를 이용한 히스토그램과 En-face mapping 이미지

제4장 결과 및 논의

제1절 구리(Cu) 부식 시편 조성분석

1. XRD와 SEM-EDS point 조성분석 결과

본 연구에서 제작한 구리 부식 시편의 조성을 확인하기 위해서 XRD와 SEM-EDS를 측정하였다. 제작한 8개의 시편들을 모두 측정하였으며 SEM-EDS의 경우 Point 분석으로 진행하였다. XRD(X-Ray Diffraction)란 X선을 시료에 조사하게 되면 그 빛의 일부는 회절을 일으키게 된다. 이때의 회절각과 강도는 원자별로 고유한 값을 갖는다. 회절되는 X선을 분석하여 결정성 물질의 종류와 양에 관계되는 정보를 얻을 수 있다^[Ref]. [그림 4.1]은 XRD로 측정한 구리 시편의 조성분석 데이터이다. 그래프를 확인해 보면 8개의 시편 모두 Cu_2O 의 피크와 Cu의 피크가 있는 것을 볼 수 있다. 이는 XRD 특성상 깊이 방향으로 약 30 μm 깊이까지의 조성이 모두 측정된다. 제작된 산화막보다 깊은 부분까지 측정되어 Cu가 많이 포함된 것처럼 보이는 것으로 생각된다. [그림 4.2]는 SEM-EDS Point로 측정한 구리 시편의 조성분석 데이터이다. 각각의 시편별로 여러 포인트 들을 분석하였다. 평균적으로 구리와 산소의 원자비율(Atomic Percent)이 약 7대3인 것으로 나타났다.

위의 두 가지 방법으로 측정한 결과 산화막이 대부분 Cu_2O 로 이루어져 있음을 확인하였다.

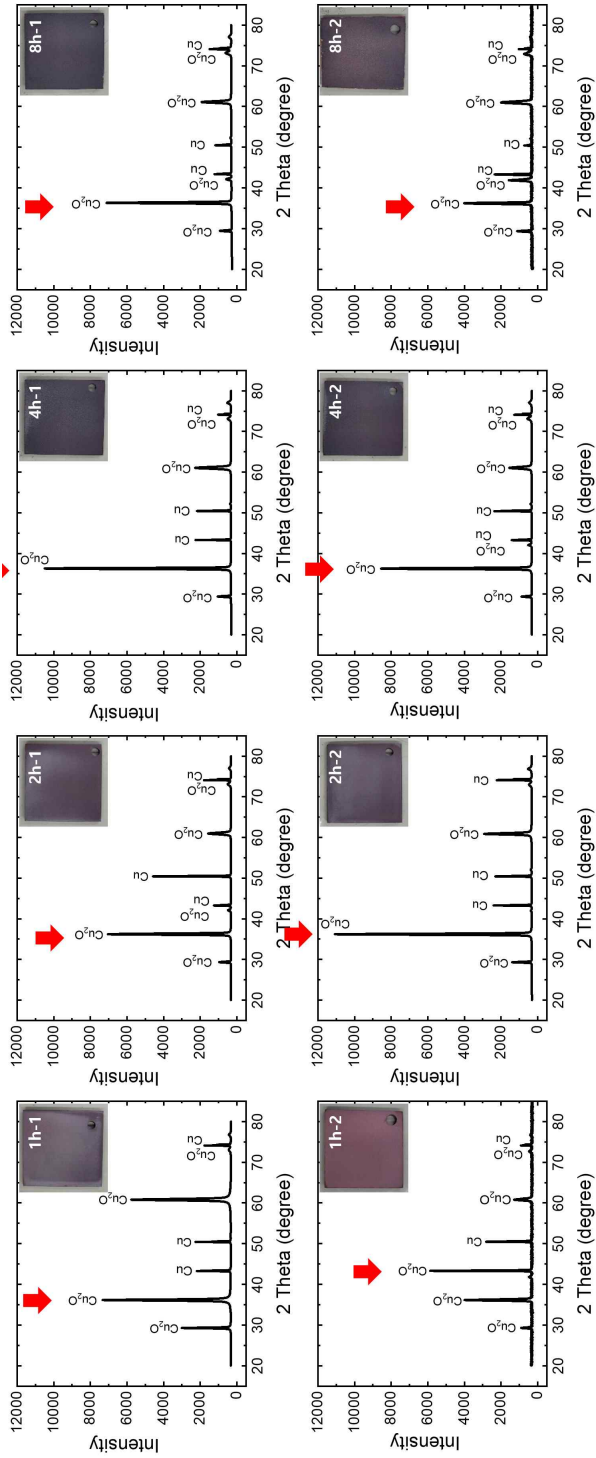


그림 4.1 Cu 부식 시편의 XRD 조성분석 데이터

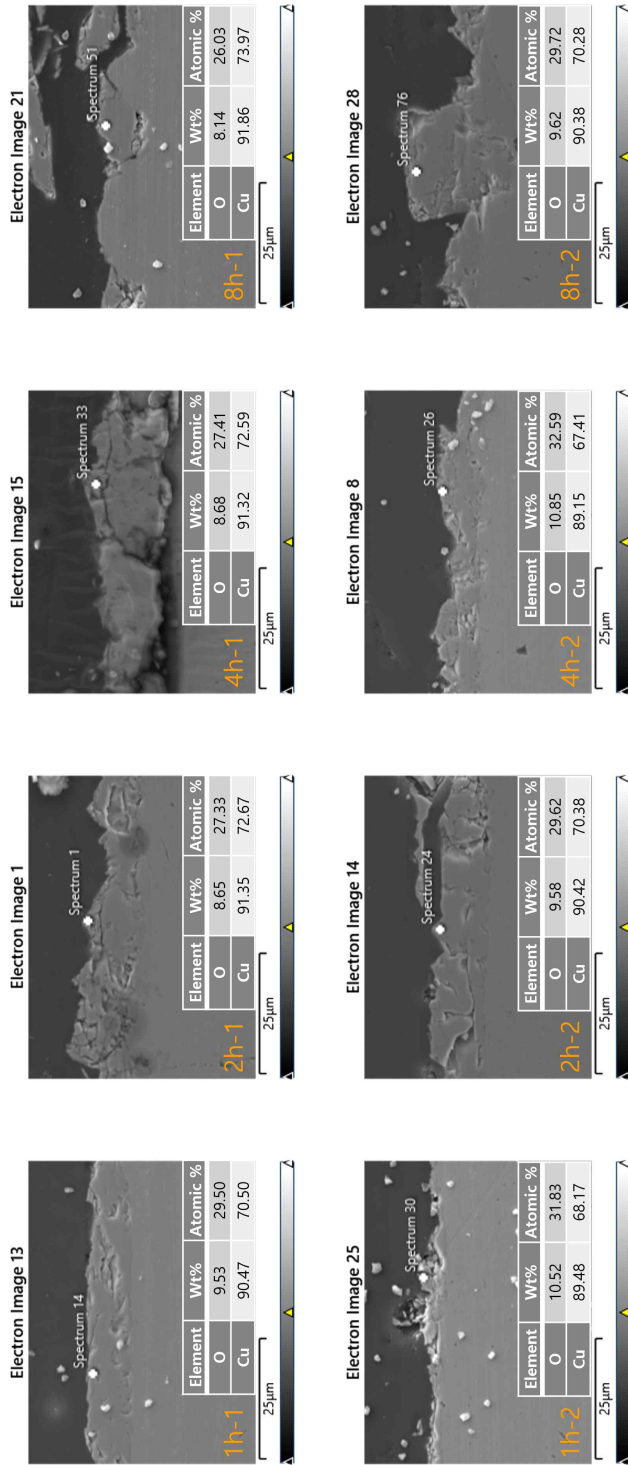


그림 4.2 Cu 부식 시편의 SEM-EDS 조성분석 데이터

제2절 SEM 파노라마 이미지와 두께 히스토그램

1. SEM 파노라마 이미지와 두께 히스토그램

각각 구리 부식 시편별로 SEM 이미지를 2000X 의 배율로 25장 촬영하였다. 직접 움직여 가면서 촬영을 진행하다 보니 각 이미지별로 겹쳐지는 부분의 범위가 달라 전체 촬영한 파노라마 이미지의 길이가 달라지게 되었다. [그림 4.3]과 같이 SEM 파노라마 이미지는 1 mm ~ 1.3 mm의 범위를 촬영하게 되었다. 4h-1번 시편은 콜드 마운팅을 진행하는 과정 중에 산화되지 않은 구리와 산화된 구리층 사이에 레진이 들어가서 경화되었다.

SEM 파노라마 이미지에서 추출된 산화물층의 모습도 [그림 4.3]에서 확인할 수 있다. [그림 4.3]에서 추출한 산화물 이미지를 바탕으로 MATLAB을 이용해 두께 프로파일을 그렸고 이것을 이용해 히스토그램을 그렸다. 히스토그램을 살펴보면 산화물의 두께 분포를 파악할 수 있다. OCM을 이용해서 산화물의 두께를 측정하는 것이 최종 목표이기 때문에 OCM으로 측정이 불가능한 샘플을 제외해야 할 필요성이 있다. OCM의 깊이 방향 해상도는 $8.3 \mu\text{m}$ 이기 때문에 그 이하의 산화물은 측정이 어렵다. [그림 4.4]에서 1h-2번 그래프를 보면 산화물의 두께가 $3 \mu\text{m}$ 근처에 분포해 있는 것을 확인할 수 있다. 1h-2번 샘플은 산화물의 두께가 OCM의 깊이 방향 해상도 보다 얇아서 제외시켰다. 4h-2번 샘플과 8h-1번 샘플은 [그림 4.3]을 보면 산화막이 생성되지 않은 부분이 많이 존재한다. [그림 4.4]의 히스토그램에서도 산화막이 생성되지 않은 부분이 확인된다. 이런 이유로 4h-2번 샘플과 8h-1번 샘플도 제외시켰다. 각 시간대별로 1개의 샘플을 가지고 비교하기 위해서 2h-2번 샘플도 제외시켰다.

최종적으로 1h-1, 2h-1, 4h-1, 8h-2번 샘플들만 비교를 진행할 예정이다.

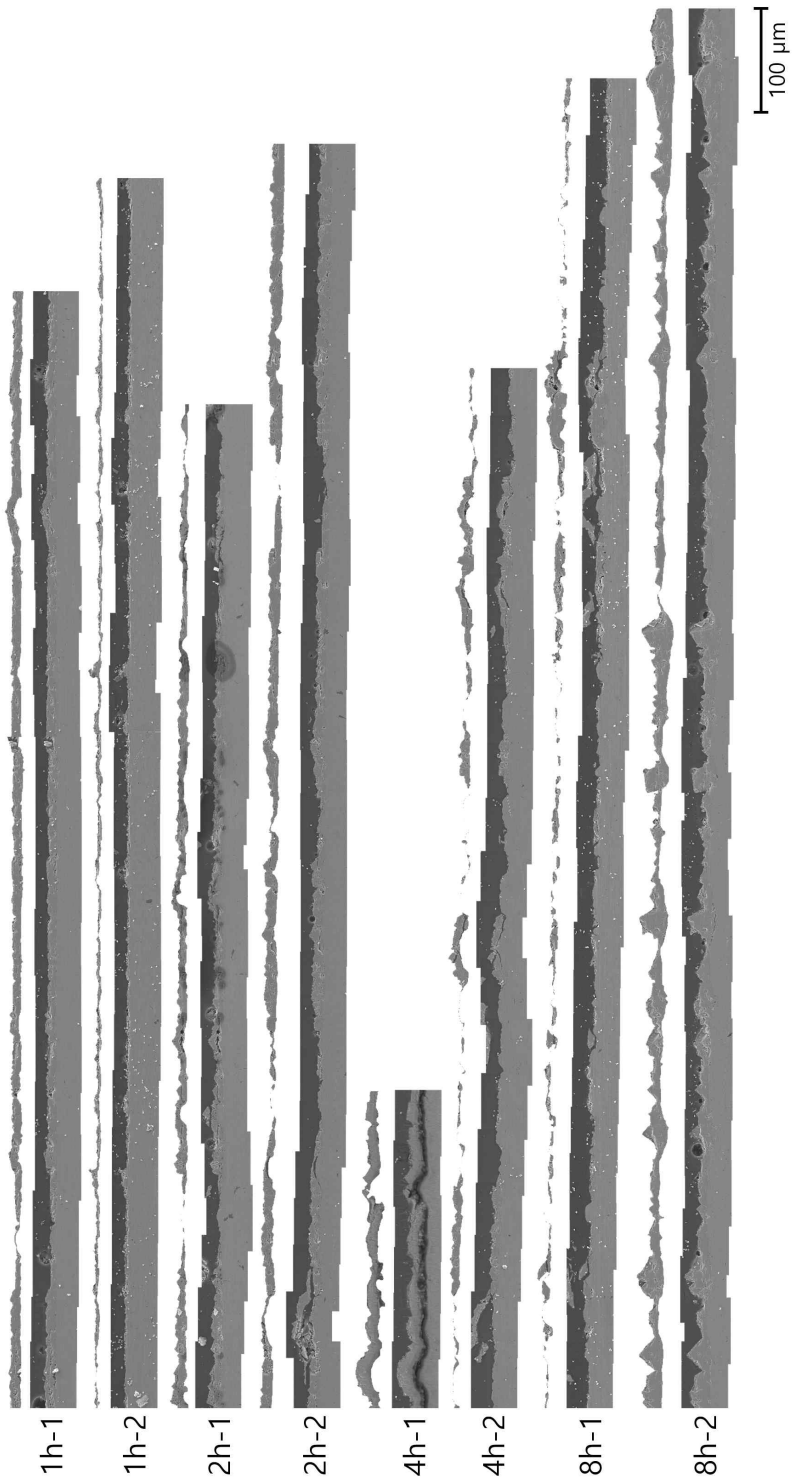


그림 4.3 시편별 SEM 파노라마 이미지와 추출된 산화물층

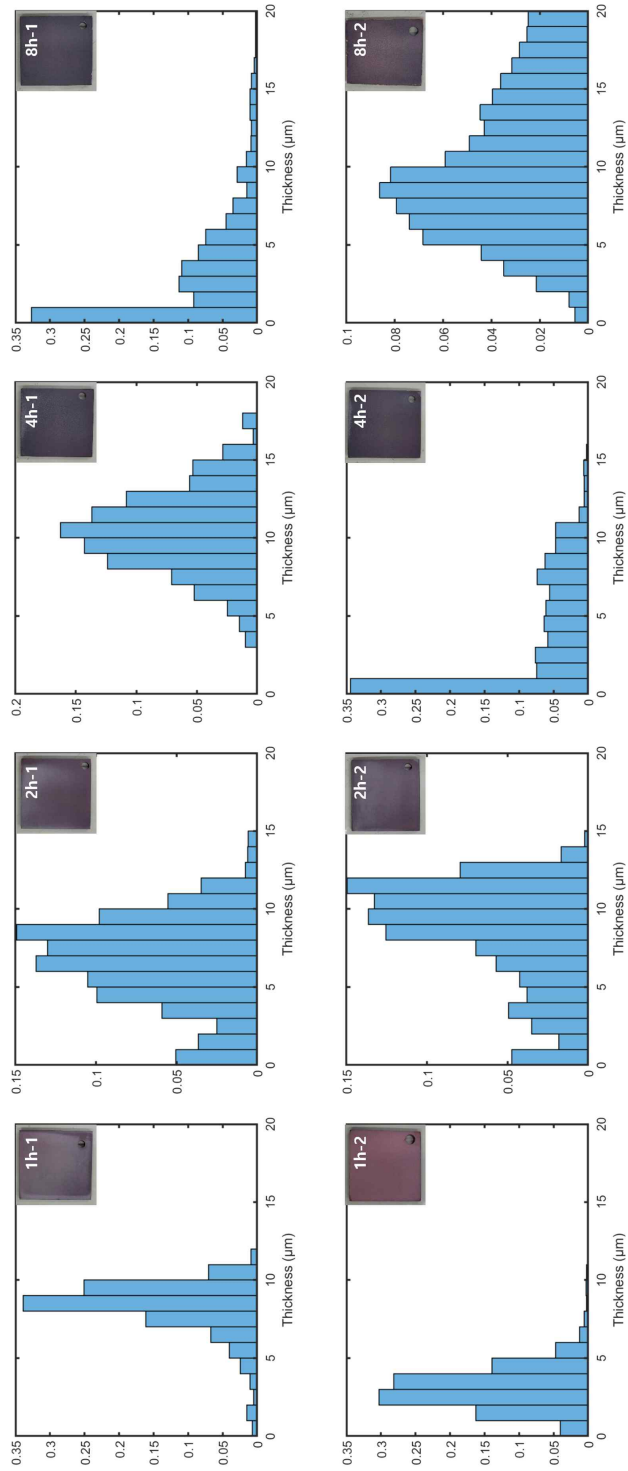


그림 4.4 SEM 기반 산화물 두께 히스토그램

제3절 OCT 와 OCM 이미지

1. OCT 와 OCM 이미지에서의 산화물층

앞에서 선정한 4가지의 샘플에 대한 OCT와 OCM 이미지를 [그림 4.6]에서 확인할 수 있다. 각각의 이미지들은 Phase calibration을 진행하여 노이즈를 감소시킨 상태이다. OCT의 DOF가 OCM보다 더 넓어 더 깊이까지 이미지가 확인된다. [그림 4.6]에서와 같이 확대해서 보면 OCM에서의 레이어가 더 뚜렷하게 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 때문에 OCM을 활용하여 산화물 두께 측정을 진행하려 한다. OCM의 Axial Resolution이 $8.3 \mu\text{m}$ 와 산화구리(I)의 균굴절률이 2.7을 고려하여 A-line에서 1 pixel은 $3.07 \mu\text{m}$ 로 계산된다. 이 환산값을 적용해서 산화층 두께를 결정할 수 있다.

2. OCM 에서 추출한 두께 히스토그램

[그림 4.7]에서는 OCM을 촬영한 부식 시편에서 서로 다른 두 측정 위치(Position 1, 2)를 보여준다. Position 1은 실제 SEM 촬영을 위해 절단한 면이 포함되어 있고, Position 2는 임의의 중앙 부분을 촬영하였다. 시편을 제작할 때 균일한 산화막을 제작하려고 미세연마를 진행했기 때문에 시편 서로 다른 지점에서 산화막 두께 분포가 비슷할 것으로 가정하고 OCM 두께 히스토그램의 경향을 비교했다. [그림 4.8]을 보면 4가지의 시편별로 Position 1과 Position 2의 OCM 두께 히스토그램을 보여준다. 각 시편별로 Position 1과 Position 2의 히스토그램의 경향이 비슷하게 나타나는 것을 확인하였다. [그림 4.9]는 앞서 비교한 Position 별 OCM 두께 히스토그램과 SEM 두께 히스토그램을 비교하는 그림이다. 시편별로 비슷한 경향으로 보이거나 일부 시편이 히스토그램의 뒷부분으로 갈수록 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이 현상은 OCM의 데이터가 SEM에 비해서 현저하게 많아서 나타나는 것으로 생각된다. [그림 4.10]에서 볼 수 있듯 SEM은 최대 1.3mm 의 산화막에 대한 하나의 라인 정보만 가지고 있지만 OCM은 $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 의 면적에 대한 산화막 정보를 가지고 있다. OCM과 SEM의 히스토그램의 경향이 비슷한 것으로 보아 OCM으로 산화물의 두께를 측정할 수 있음을 확인하였다.

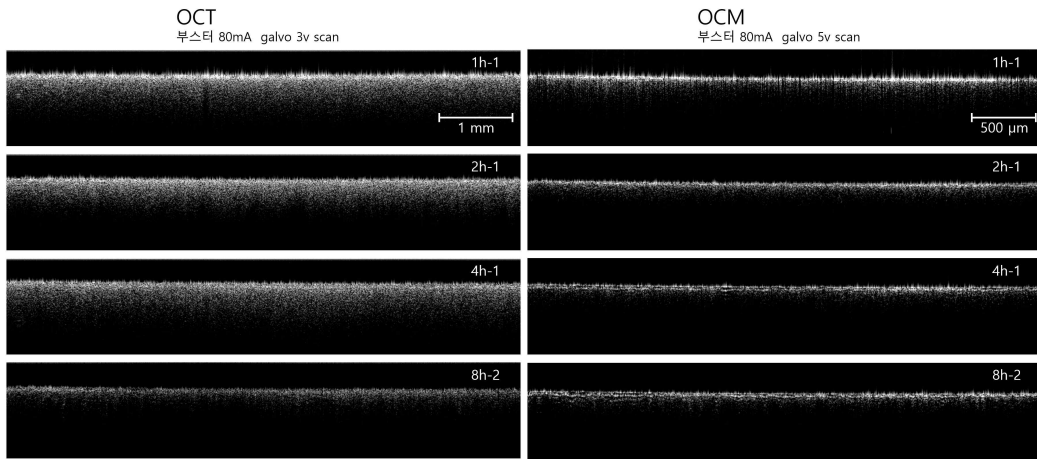


그림 4.5 OCT와 OCM으로 측정된 Cu 부식 시편 이미지

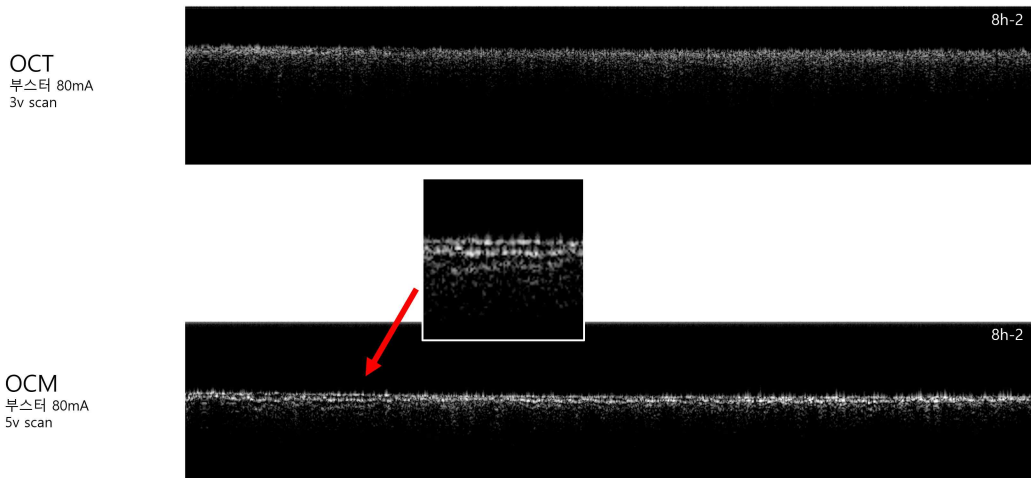
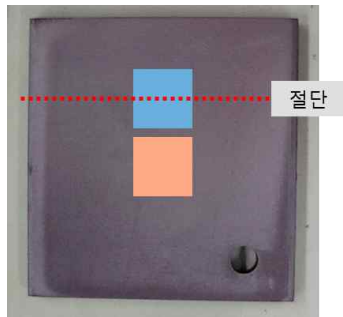


그림 4.6 OCT로 측정된 Cu 부식 시편 이미지



Position 1
Position 2

그림 4.7 OCM 측정 Position 1 과 Position 2

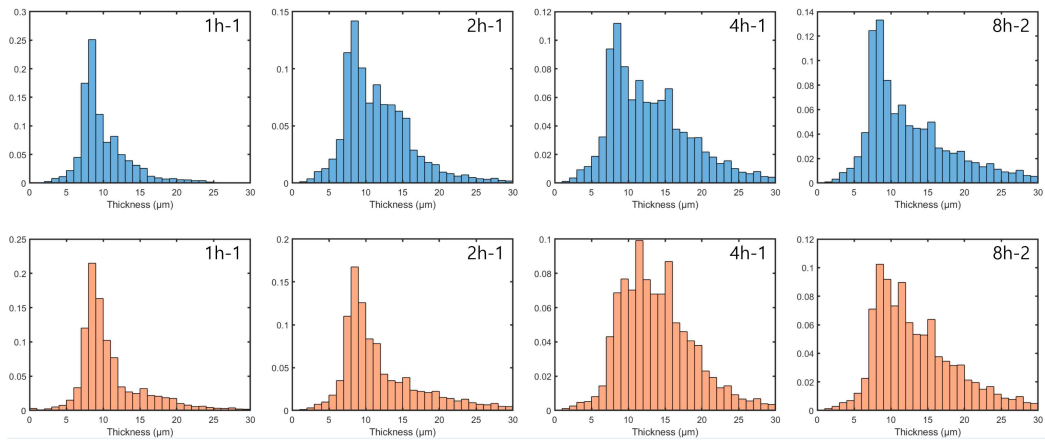


그림 4.8 OCM 기반 산화물 두께 히스토그램

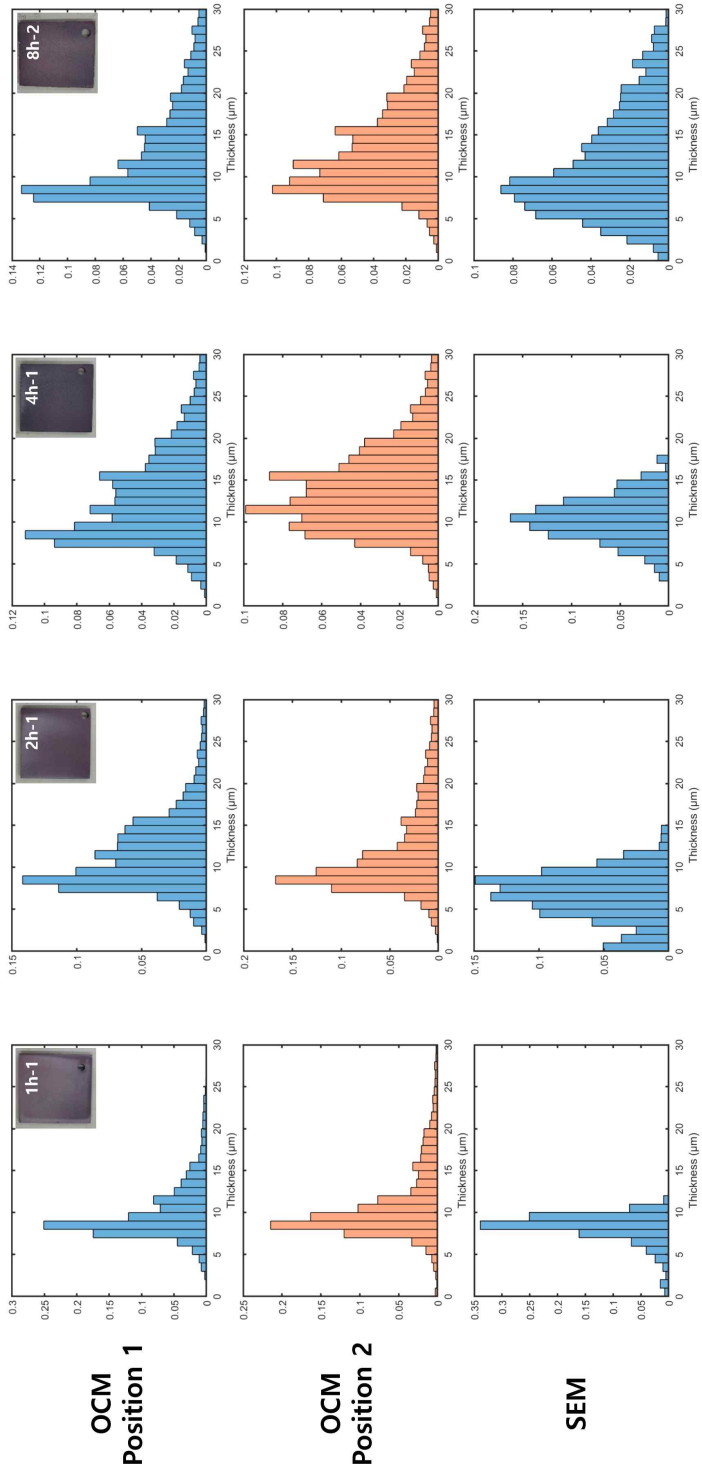


그림 4.9 OCM, SEM 기반 산화물 두께 히스토그램 비교

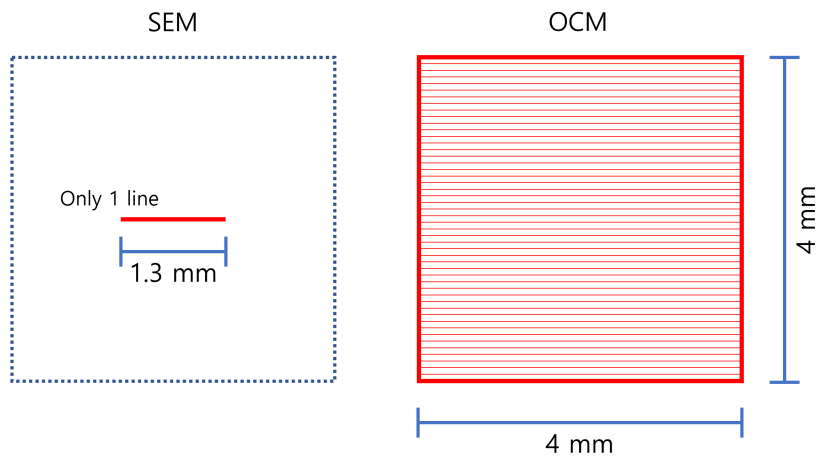


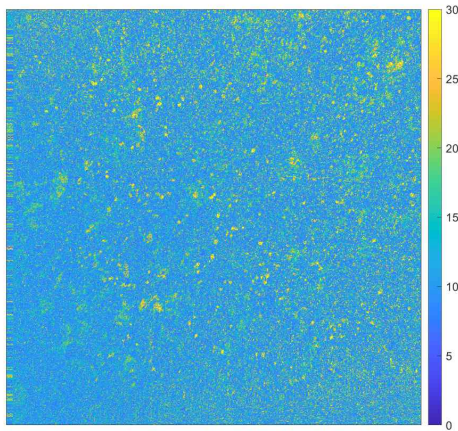
그림 4.10 SEM과 OCM의 촬영 면적 비교

제4절 En-face mapping data

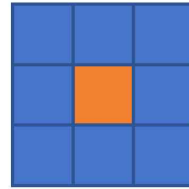
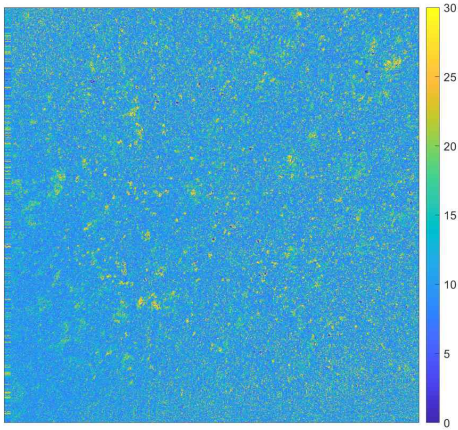
1. En-face mapping data를 이용한 국부부식 확인

최종적으로 OCM으로 측정된 산화막의 두께 정보를 En-face^[44] mapping으로 보여준다. En-face 는 프랑스어에서 파생된 용어이고 정면 이미지를 뜻한다. 측정된 OCM 3D 이미지를 기반으로 측정 시료 표면에서 바라본 듯한 이미지를 En-face 이미지라 한다. [그림 4.11]은 포지션별 $4mm \times 4mm$ 의 면적에서의 두께 En-face mapping을 보여준다. 앞선 [그림 4.8]의 히스토그램을 보면 $30 \mu m$ 까지만 그렸지만 빛 번짐에 의한 에러로 인해 $30 \mu m$ 이상의 데이터가 존재한다. 이를 바로 En-face mapping으로 그리면 동일한 에러가 이미지에 나타나게 된다.

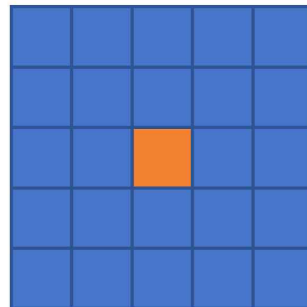
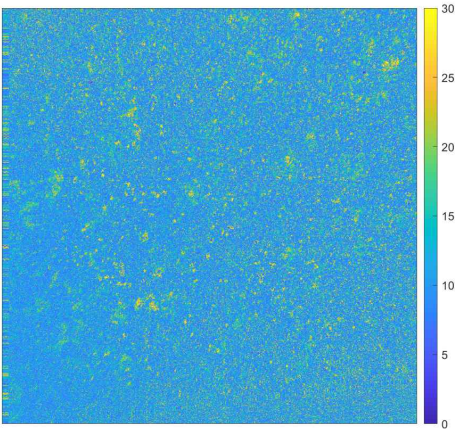
다음 과정을 통해서 에러를 줄이는 작업을 진행하였다. $30 \mu m$ 이상의 데이터를 주변 인접 3×3 px와 5×5 px 데이터의 평균으로 대체하는 작업을 진행하였다. 해당 과정을 진행하면 [그림 4.11]과 같이 원본 이미지에서의 $30 \mu m$ 이상으로 튀는 현상이 줄어들어 더 정확한 두께 정보를 얻을 수 있음을 확인했다. [그림 4.13]은 에러를 제거한 각 시편의 En-face mapping 이미지이다. 해당 이미지는 국부부식 상태를 잘 보여준다. En-face mapping 이미지를 자세하게 들여다보면 산화막의 두께가 튀는 자리들이 존재한다는 사실을 알 수 있다.



원본



30um이상인 부분
인접 3px 평균으로 대체



30um이상인 부분
인접 5px 평균으로 대체

그림 4.11 En-face mapping의 에러 줄이기

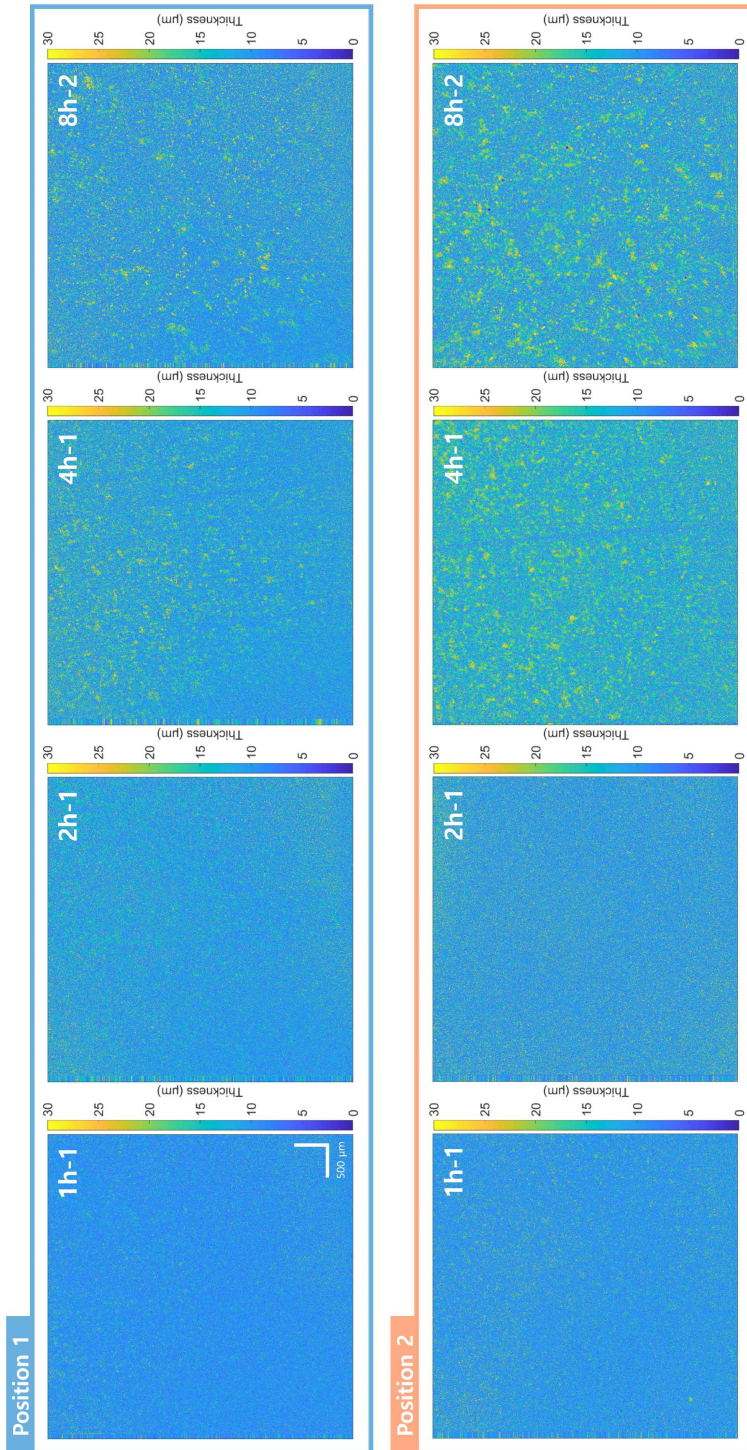


그림 4.12 OCM 기반 산화물 두께 En-face mapping 이미지

제5장 결론

본 연구는 공간섭단층촬영(OCT)을 이용한 부식된 구리 산화물의 두께에 대한 비파괴 분석법에 관한 것이다. 부식된 구리 시료는 진공열처리 장비(CVD)를 이용하여 진공 열처리하여 제작했다. 일반 금속은 광 투과성이 없지만 산화된 금속은 투과성이 있다. 이러한 특성을 이용하여 구리 산화물층의 두께를 OCT로 측정하였다. 산화구리의 투과율이 장파장으로 갈수록 높아짐에 따라 장파장인 1700 nm SS-OCT를 사용하였다. OCT보다 더 가로 방향 해상도가 좋은 OCM을 설계하여 제작하였다. OCT와 OCM의 이미지 품질의 향상시키기 위해 Interpolation과 Phase calibration을 수행하였다. OCM 측정 데이터에서 산화물의 두께를 찾고 3D 매핑하기 위해 피크 찾기 알고리즘을 개발하였다. 기존에 잘 알려진 SEM-EDS로 측정한 두께와 OCT를 이용하여 측정한 두께를 비교하여 OCT로 산화막의 두께 측정이 가능함을 확인하였다.

SEM으로 측정시 1.3 mm 범위의 하나의 단면 이미지를 얻을 때 40분가량의 시간이 소요되었다. 시편 전처리 시간까지 생각하면 시간은 더 늘어난다. 하지만 OCM을 이용하면 $4mm \times 4mm$ 의 면적의 3D 이미지를 얻는 데 10초가량이 소요된다. 비파괴 측정법의 장점이 있으면서 면적에 대한 국부부식 이미지를 확인이 가능한 OCM을 새로운 방식의 부식 비파괴 측정법으로 제안했다.

본 연구는 금속 부식 모니터링을 위해 다양한 산업에 적용 가능한 기술임을 확인했다. 향후 구리금속 이외에 다양한 금속 종류에 대한 재료분석 연구가 필요하며, 현장에서 적용할 수 있는 상용화 연구도 필요할 것으로 보인다. 얻어진 OCT/OCM 이미지로부터 산화막 두께를 더욱 정확하고 빠르게 판별할 수 있는 알고리즘 개발도 다음 과제로 남아 있다.

본 연구는 기존에 의료 및 생체 분석에 주로 이용되던 공간섭단층촬영을 금속 산화막 분석이라고 하는 새로운 응용분야를 찾고, 적용을 위한 최적화 설계를 통해 핵심기술을 획득한 것이 학문적 의의가 높다. 앞으로 실제 산업에 적용하는 실용화 연구를 통해 산업발전에 크게 기여하는 기술이 될 것으로 기대한다.

[참고문헌]

- [1] 한탑기술사사무소, “금속의 부식(腐蝕)과 방식(防蝕).” pp.1-108 (2006).
- [2] 정보통신기술용어해설, “Corrosion 부식, 녹슴.”
http://www.ktword.co.kr/test/view/view.php?m_temp1=5451
- [3] 등정철용. “부식의 원인과 종류.” Korea Mechanical Construction Contractors Association **85**, pp51-60 (1997).
- [4] 페인트엔코팅도장공사, “철강재의 부식과 방식.”
<http://www.paintncoatings.com/html/busik/busik-04.htm>
- [5] 두산백과, “부식.”
<https://terms.naver.com/entry.naver?docId=1103943&cid=40942&categoryId=32251>
- [6] 한재길, 장도연, 이규화, “부식모니터링 기술.” Korea Institute of Materials Science **12**, pp75-87 (2000).
- [7] J.G. Speight, Corrosion Monitoring and Control: Oil and Gas Corrosion Prevention, Chapter 6, pp109-149 (2014).
- [8] Garey L. Cooper, “Sensing probes and instruments for electrochemical and electrical resistance corrosion monitoring.” ASTM International, 1986.
- [9] 한국건설기술연구원, “상수도시스템의 부식측정 및 평가방법 표준화 연구” (1999).
- [10] 엠케이씨코리아, “초음파 두께 측정의 기초”
<http://mkckorea.com/basic/uttg/uttg2.htm>
- [11] 도장공사업협의회, “부식상태 조사 및 평가 - 3.1 부식의 평가법”
http://paints.or.kr/menu05_4/view.php?no=11
- [12] A. Mohammed and A. Abdullah, "Scanning electron microscopy (SEM): A review" Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics-HERVEX, Băile Govora, Romania. pp.7-9 (2018).
- [13] Zhou, Weillie, et al. "Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM)." Scanning microscopy for nanotechnology. pp.1-40 (2006).
- [14] C.C. Chang, "Auger electron spectroscopy." Surface Science **25(1)** pp.53-79 (1971).
- [15] J.C. Riviere, "Auger electron spectroscopy." Contemporary Physics **14.6**

- pp.513–539 (1973).
- [16] L. Lobo, B. Fernández, and R. Pereiro, "Depth profile analysis with glow discharge spectrometry," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* **32(5)**, pp.920–930 (2017).
- [17] A. Bengtson, "Quantitative depth profile analysis by glow discharge," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* **49(4)** pp.411–429 (1994).
- [18] Karlsson, Björn, et al., "Optical properties of some metal oxides in solar absorbers," *Physica Scripta* **25(6)** (1982).
- [19] Japan Atomic Energy Agency, "Controlling surface reactions by mixing different metals." Press Releases (2021).
<https://www.jaea.go.jp/english/news/press/2021/021903/>
- [20] H.B. ÖzcanRoron, "Doped Cuprous Oxide Thin Films: Morphological and Optical Properties," *Turkish Physical Society International Physics CongressAt* (2022).
- [21] K. Shen, "High Resolution Wide Field-of-View Optical Coherence Tomography for 3D Imaging," (2018).
- [22] D. Huang, E.A. Swanson, C.P. Lin, J.S. Schuman, W.G. Stinson, W. Chang, M.R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C.A. Puliafito, J.G. Fujimoto, "Optical coherence tomography," *Science* **254**, pp.1178–1181 (1991).
- [23] Wikipedia. "Michelson interferometer."
https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson_interferometer
- [24] Wikipedia. "Confocal Microscopy."
https://en.wikipedia.org/wiki/Confocal_microscopy
- [25] Brezinski, Mark E., et al., "Assessing atherosclerotic plaque morphology: comparison of optical coherence tomography and high frequency intravascular ultrasound," *Heart* **77(5)**, pp.397–403 (1997).
- [26] Wang, Yimin, et al., "Retinal blood flow measurement by circumpapillary Fourier domain Doppler optical coherence tomography," *Journal of biomedical optics* **13(6)** (2008).
- [27] Poneros, John M., et al., "Diagnosis of specialized intestinal metaplasia by optical coherence tomography," *Gastroenterology* **120(1)** pp.7–12 (2001).

- [28] Pierce, Mark C., et al., "Birefringence measurements in human skin using polarization-sensitive optical coherence tomography," *Journal of biomedical optics* **9(2)** pp.287-291 (2004).
- [29] Colston, Bill W., et al. "Dental OCT," *Optics Express* **3(6)**, pp.230-238 (1998).
- [30] 표세욱, et al. "치의학 분야에 대한 공간섭 단층영상기기 (optical coherence tomography) 의 적용 가능성 고찰." *대한치과보철학회지* **55(1)**, pp.100-110 (2017).
- [31] Fu-Jen, Gerd Keiser, and Ankur Gogoi, "Advanced Optical Methods for Brain Imaging." (2019).
- [32] Yasin Alibhai, A., Chris Or, and Andre J. Witkin. "Swept source optical coherence tomography: a review," *Current Ophthalmology Reports* **6(1)**, pp.7-16 (2018).
- [33] Dueik, Marcus, and Kevin Hsu, "SLEDs and swept source laser technology for OCT." *Optical Coherence Tomography* p.527 (2015).
- [34] Lawman, Samuel, et al., "Applications of optical coherence tomography in the non-contact assessment of automotive paints." *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection X* pp.116-124 (2017).
- [35] Lenz, Marcel, et al., "Spectral domain optical coherence tomography for non-destructive testing of protection coatings on metal substrates," *Applied Sciences* **7(4)**, pp.364 (2017).
- [36] Antoniuk, Paulina, et al., "Non-destructive inspection of anti-corrosion protective coatings using optical coherent tomography," *Metrology and Measurement Systems* **2** (2012).
- [37] Yamanaka, Masahito, et al., "Optical coherence microscopy in 1700 nm spectral band for high-resolution label-free deep-tissue imaging," *Scientific Reports* **6(1)**, pp.1-8 (2016).
- [38] Yamanaka, Masahito, Naoki Hayakawa, and Norihiko Nishizawa. "Signal-to-background ratio and lateral resolution in deep tissue imaging by optical coherence microscopy in the 1700 nm spectral band," *Scientific Reports* **9(1)**, pp.1-8 (2019).

- [39] Yamanaka, Masahito, Naoki Hayakawa, and Norihiko Nishizawa, "High-spatial-resolution deep tissue imaging with spectral-domain optical coherence microscopy in the 1700-nm spectral band," *Journal of Biomedical Optics* **24(7)** (2019).
- [40] Srinivasan, Vivek J., et al., "Optical coherence microscopy for deep tissue imaging of the cerebral cortex with intrinsic contrast," *Optics express* **20(3)**, pp.2220-2239 (2012).
- [41] Park, Kwan Seob, et al. "Phase stable swept-source optical coherence tomography with active mode-locking laser for contrast enhancements of retinal angiography," *Scientific Reports* **11(1)**, pp.1-10 (2021).
- [42] MathWorks. "보간."
<https://kr.mathworks.com/help/matlab/interpolation.html>
- [43] Wikipedia. "Spline."
https://ko.wikipedia.org/wiki/%EC%8A%A4%ED%94%8C%EB%9D%BC%EC%9D%B8_%EA%B3%A1%EC%84%A0
[https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_\(mathematics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Spline_(mathematics))
- [44] Leitgeb, RA "En face optical coherence tomography: 기술 검토," *Biomedical Optics Express* **10(5)**, pp.2177-2201 (2019).

[감사의 글]

짧다면 짧고 길다면 긴 학사, 석사과정 중에서 많은 것들을 배우고 느꼈습니다. 지금까지의 과정에서 도움을 주신 고마운 분들께 진심으로 감사의 인사를 올립니다. 먼저 학부, 대학원 과정 동안 지도해주신 안태정교수님 감사합니다. 늘 새로운 경험들 연구들 재밌게 할 수 있도록 도와주셔서 행복했습니다. 그리고 항상 열정이 넘치시는 광기술공학과 김진태교수님, 김현수교수님, 박종락교수님, 권민기교수님, 주기남교수님 감사합니다. 학과에 좋은 교수님들이 계셔서 여기까지 오지 않았나 생각이 듭니다. 첨단에서부터 2년간 많은 가르침 주신 엄태중교수님, 에너지인력양성사업부터 많은 가르침 주신 장희진교수님께 감사드립니다. 이번 연구에 늘 묵묵히 많은 도움준 창민이, 경빈이형, 주희누나 그리고 고등광기술연구소에서 늘 챙겨주시던 이용재박사님, 이태현씨 감사합니다. 늘 즐겁고 행복하게 실험실 생활했던 종주형, 태범이형, 수정이, 정민이형, 혜진이, 한مام이, 보현이, 승환이 까지 이번에 같이 졸업하는 현승이형, 명재형, 성태형 감사합니다. 같이 수업듣고 놀러다니던 17학번 동기들, 매일 매일 보던 동아리 친구들, 징글징글한 고등학교 친구들까지 모두에게 진심으로 감사합니다. 모두들 덕분에 이 자리까지 왔습니다. 늘 행복하세요.

무엇보다도 지금까지 키워주시고 지원해주시고 사랑해주신
엄마, 아빠, 할아버지, 할머니에게 감사드리고 싶습니다.
늘 감사하고 사랑합니다.

2022년 12월
고영민 올림