

20CTAP-
C151927
-02

콘크리트
구조물에
적합한
페인트블
응력
측정센서
개발

최
종
보
고
서

2021

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

보안 과제(), 일반 과제() / 공개(), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000377-01)

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 979-11-91160-28-4

콘크리트 구조물에 적합한 페인트블 응력 측정센서 개발 최종보고서

2021. 2. 10.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

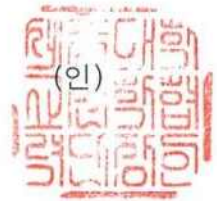
국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

'콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발'(연구개발 기간 : 2019. 4. 15. ~ 2020. 12. 31.) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2021. 2. 10.

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단

(대표자) 이 수 용



주관연구기관책임자: 정 상 업

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C 151927-02	해당 단계 연구 기간	2020.1.1. - 2020.12.31	단계구분	2단계/ 총 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발			
연구책임자	정상업	해당단계 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:100,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:100,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 16명 외부: 명	총 연구비	정부:200,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:200,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	세종대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	3	2(출원)				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

보고서 면수
141

<국문 요약문>

연구의 목적 및 내용	연구 개발 목표 - 콘크리트 구조물 비접촉식 응력 측정에 적합한 페인터블 센서 및 제반 기술 개발 연구 개발 내용 - 본 연구에서 제안하는 페인터블(Paintable) 응력 측정용 센서는 센싱용 물질을 콘크리트 구조물에 도장하고, 레이저를 이용하여 비접촉식으로 응력을 측정할 수 있는 기술임 - 이를 위해, 비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료를 제작하고, 압축·인장시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상을 규명하며, 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계를 규명하고자 함				
연구개발성과	- 비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료 제작 - 압축·인장시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명 - 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계 규명				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	활용계획 - 페인터블 응력센서를 콘크리트 구조물 도장에 사용하여, 토목 구조물 응력 측정 및 SOC 유지관리 기술 고도화 기대효과 - 세계 최초의 원천 기술 확보 - 신재료, 신장비 개발로 연구성과 확대 및 실용화 추진 가능 - 콘크리트 구조물 유지관리 기술 첨단화로 시설물 안전에 기여				
핵심어 (5개 이내)	페인터블 센서	응력 센싱	피에조분광법	콘크리트 도장	비접촉센싱

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Research purpose - Development of non-contact paintable stress sensor for concrete structure Contents - Development of paintable stress sensors for non-contact concrete stress sensing - Investigation of piezospectroscopic effect of paintable stress sensors by compression (or tension) test - Investigation of stress transfer mechanism between paintable stress sensor and parent material				
Results	- Paintable material for non-contact concrete stress sensing - Piezospectroscopic coefficient of paintable stress sensor - Stress transfer relation between paintable stress sensing layer and parent material				
Expected Contribution	- Intellectual property (IP) on world-first, core technology - Preoccupying global construction market - Expand new research areas on material and equipment - Securing public safety				
Keywords	Paintable Sensor	Stress Sensing	Piezo-spectroscopy	Concrete Paint	Non-contact Sensing

〈 목 차 〉

제 1 장. 연구개발과제의 개요	1
1.1. 연구개발의 개요	1
1.2. 연구개발 범위	3
1.2.1. 연구개발의 최종목표 및 최종성과물	3
1.2.2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거	5
제 2 장. 연구수행내용 및 성과	6
2.1. 연구개발 추진 방법	6
2.1.1. 비접촉식 응력센싱용 도료 제작 및 응력전달 규명	6
2.1.2. 페인터블 응력 센서의 피에조분광현상 규명 및 측정방법 설계	7
2.1.3. 연차별 연구 접근방법	8
2.2. 비접촉식 응력센싱용 도료 제작 및 응력전달 규명	10
2.2.1. 센싱물질 선정	10
2.2.1.1. 고분광 물질 문헌 연구	11
2.2.1.2. 소결	13
2.2.2. 페인트를 이용한 콘크리트 응력측정을 위한 압분광 시스템 구성	18
2.2.2.1. 분광 시스템 구축	18
2.2.2.2. 2차원 맵핑 시스템 구축	22
2.2.2.3. 라만 분광 시스템 하드웨어 구축	23
2.2.2.4. 계측/분석 프로그램 개발	26
2.2.3. 응력센싱용 페인트 시편 분광검출을 측정	28
2.2.3.1. 적합 페인트 선정	28
2.2.3.2. 초기 형광 스펙트럼 측정	30
2.2.3.3. 페인트 시편제작	33
2.2.3.4. 측정 파라미터 선정 실험	36
2.2.3.5. 페인트 시편 분광검출을 측정	38
2.2.3.6. 소결	45
2.2.4. 페인트-모재 응력전달관계 규명	46
2.2.4.1. 실험 구성	46
2.2.4.2. 압축하중시험 설계	48
2.2.4.3. 응력전달관계 규명 및 압분광 효과 검증	49
2.2.4.4. 토의	52
2.2.4.5. 소결	53

2.2.5. 결론	54
2.3. 하중시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명	55
2.3.1. 페인터블센서 정의	55
2.3.1.1. 제안 방법 1 : 일반도료를 기반으로한 페인터블 센서	55
2.3.1.2. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서	55
2.3.2. 페인터블센싱용 재료 선택	56
2.3.3. 센서 제작을 위한 기초 분광실험	62
2.3.4. 피에조분광효과 검증을 위한 휨 하중시험	67
2.3.4.1. 하중시험 방법	67
2.3.4.2. 제안 방법 1 : 일반도료를 기반으로한 페인터블 센서	68
2.3.4.3. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서	76
2.3.4.4. 소결	76
2.3.5. 피에조분광효과 검증을 위한 압축 하중시험	83
2.3.5.1. 하중시험 방법	83
2.3.5.2. 제안 방법 1 : 일반도료를 기반으로한 페인터블 센서	87
2.3.5.3. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서	94
2.3.5.4. 소결	101
2.3.6. 평균응력 측정방법	103
2.3.6.1. 하중시험 방법	103
2.3.6.2. 하중시험 결과	106
2.3.7. 콘크리트 표면 응력 분포에 대한 고찰	109
2.3.7.1. 프로그램을 통한 시뮬레이션	109
2.3.7.2. 실험적 연구	111
2.3.7.3. 소결	111
2.3.8. 질적성과지표 검증	112
2.3.8.1. 응력센싱용 도료의 피에조분광현상 규명	112
2.3.8.2. 응력 측정 거리	114
2.3.8.3. 계측 정확도	115
2.3.8.4. 응력 측정 속도	116
2.3.8.5. CNT 기반 기술 대비 원가 절감	117
2.4. 유한요소해석을 통한 측정 응력값 불균일 현상에 대한 규명	119
2.4.1. 개요	119
2.4.2. 소결	124
2.5. 결론	125
2.5.1. 1차년도 연구	125
2.5.2. 2차년도 연구	126

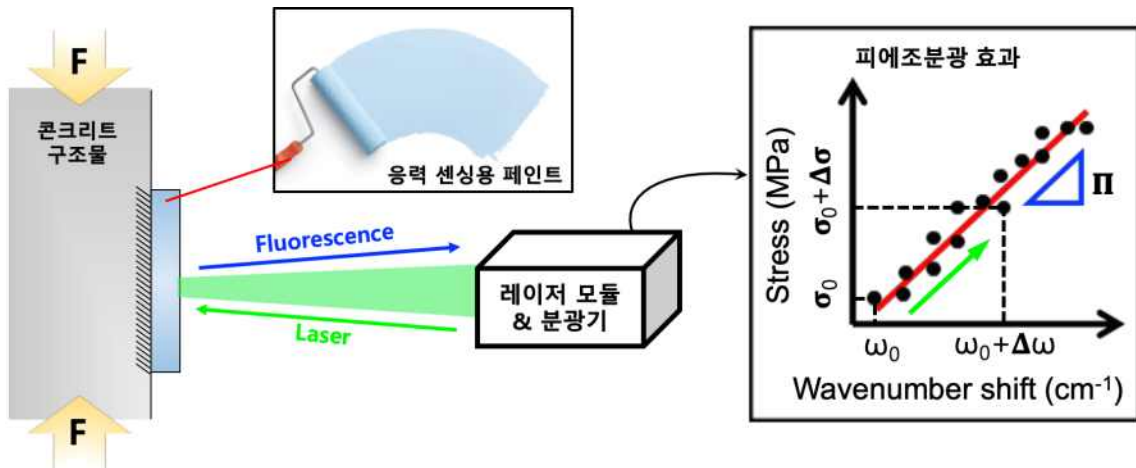
2.6. 연구개발과제의 대표 연구 실적	128
제 3 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	135
3.1. 목표 및 달성도	135
3.2. 핵심 연구성과	136
3.2.1. 핵심 연구성과 개요	136
3.2.2. 핵심 연구성과별 설명	136
3.3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책	137
제 4 장. 연구개발성과의 활용 계획	139
4.1. 최종성과물의 활용방안	139
4.2. 기대성과 및 파급효과	140
붙임. 참고문헌	141

제1장. 연구개발과제의 개요

1.1. 연구개발의 개요

○ 페인터를 급속 응력측정 센싱기술 개발

- 본 연구에서 제안하는 페인터블(Paintable) 응력 측정용 센서는 센싱용 물질을 콘크리트 구조물에 도장하고, 레이저를 이용하여 **비접촉식**으로 응력을 측정할 수 있는 기술임
- 레이저기반 기술 특성상, 추가적인 배선 및 **전력 공급이 필요 없음**
- 가진 레이저 조사와 응력계측을 동시에 진행할 수 있는 **급속 응력측정기술**임
- 단가가 저렴한 재료를 응력센싱에 사용하여, 시공비가 저렴한 **경제적인 센싱기법**임

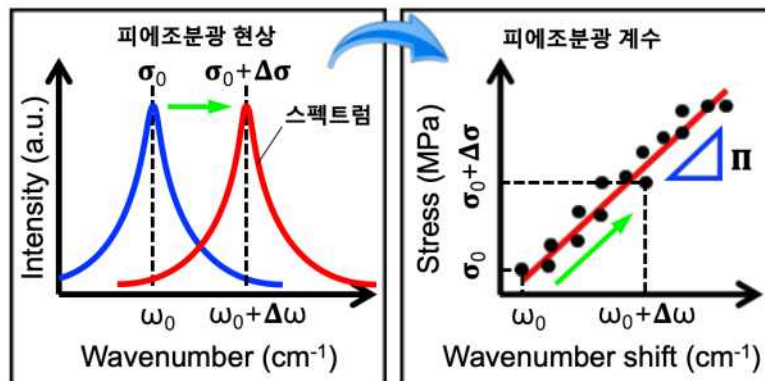


<페인터블 응력 센싱기술 기본 개념>

○ 피에조분광법을 이용한 응력 측정기술 ^{1), 2)}

- 분광법 : 재료분석에 사용되는 기술로서, 재료가 갖는 화학적 지문(fingerprint)인 스펙트럼을 기반으로 화학조성을 분석함
- 피에조분광법 : 대상물이 압축(또는 인장)응력을 받으면, 스펙트럼이 무응력(Stress-free) 상태 스펙트럼의 좌(또는 우)로 이동하며, 그 이동(shift)하는 양은 가해진 응력의 크기와 비례함

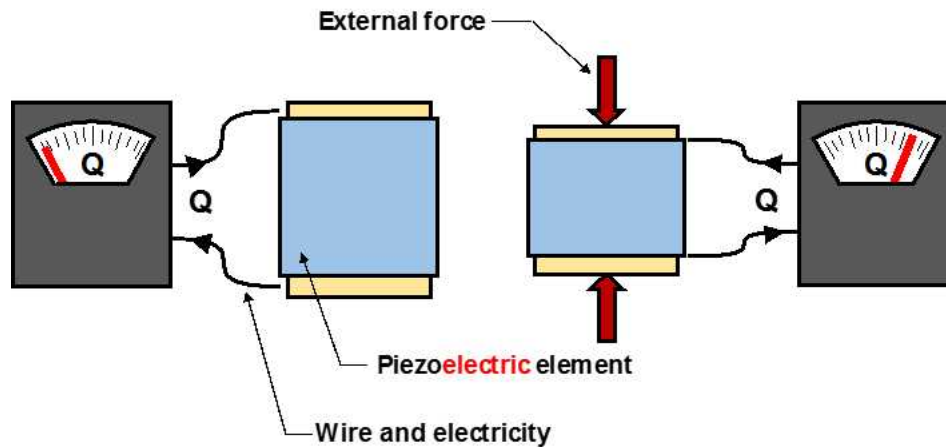
☞ “**피에조분광 효과(Piezo-spectroscopic effect)**”



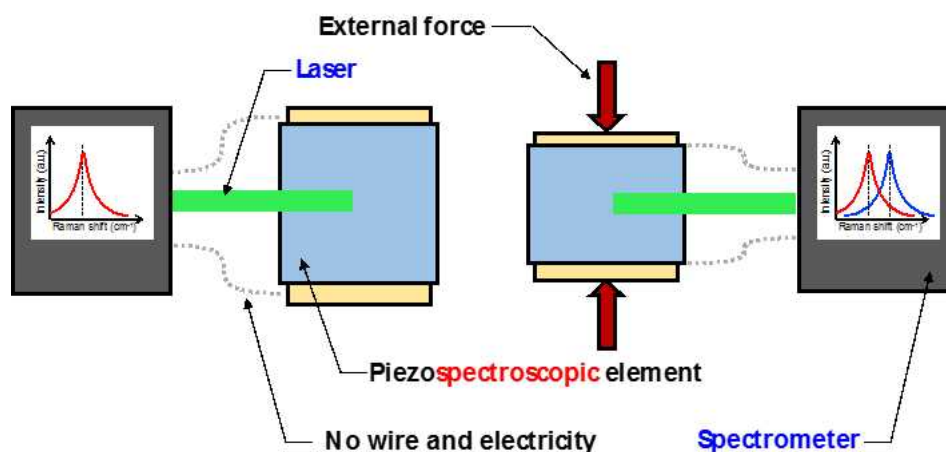
<피에조분광기반 응력 측정기술 기본 개념>

○ 라만 분광법 및 압분광 효과를 이용한 응력측정 기법

- 라만 분광법은 대상물질에 레이저를 조사하고, 산란되는 레이저로부터 대상물질의 분자구조를 분석하기 위해 주로 사용됨. 라만 스펙트럼은 대상물의 화학적 “지문 (Fingerprint)” 으로써, 대상물의 분자조성을 단시간에 분석할 수 있는 효과적인 기술임. 실제로, 이산화철의 라만 스펙트럼은 $200\text{cm}^{-1}\sim 800\text{cm}^{-1}$ 범위에 6개의 첨두값 가지며, 각 첨두값의 위치(파수 또는 Wavenumber)로부터 해당물질이 삼산화철임을 알 수 있음
- 이와 함께, 대상물이 압축 또는 인장 응력을 받으면, 해당 첨두값들이 응력이 없을 때 획득된 스펙트럼을 기준으로 좌(또는 우)로 이동하며, 이동하는 양(Peak shift)은 응력의 크기와 비례함. 이를 “**압분광 효과 (Piezospectroscopic effect)**” 라고 하며, 기검증된 기술로써, 반도체 및 기계장치의 차열피막 등의 박막에 발생하는 잔류응력 측정 등에 활발히 사용됨
- 본 기술은 레이저를 이용한 비접촉식 응력 측정방법으로 전극의 매설이나 전원 공급, 배선 등이 필요하지 않으며, 광물의 산란 특성을 이용한 측정방법이기 때문에 전기장 발생 등의 추가적인 장치를 필요로 하지 않음. 또한, 비파괴 방법이기 때문에 실내시험 뿐만 아니라, 실제로 건설된 토목 구조물에 직접적인 적용이 가능함. 아래 그림은 압전 효과에 의한 응력 측정 방법과 압분광 효과에 의한 응력 측정 방법의 비교를 보임



<압전 효과(Piezo-electric effect)에 의한 응력 측정 방법>



<압분광 효과(Piezo-spectroscopic effect)에 의한 응력 측정 방법>

- 분광기와 레이저를 필요로 하는 본 기술의 특성상, 장비의 고도화는 응력측정의 해상도에 직접적인 영향을 미침. 최근 고해상도 CCD와 레이저 기술의 발달로 응력측정의 해상도가 높아짐과 동시에, 장비가 소규모화되어 실제 현장 적용에도 매우 높은 가능성을 지님

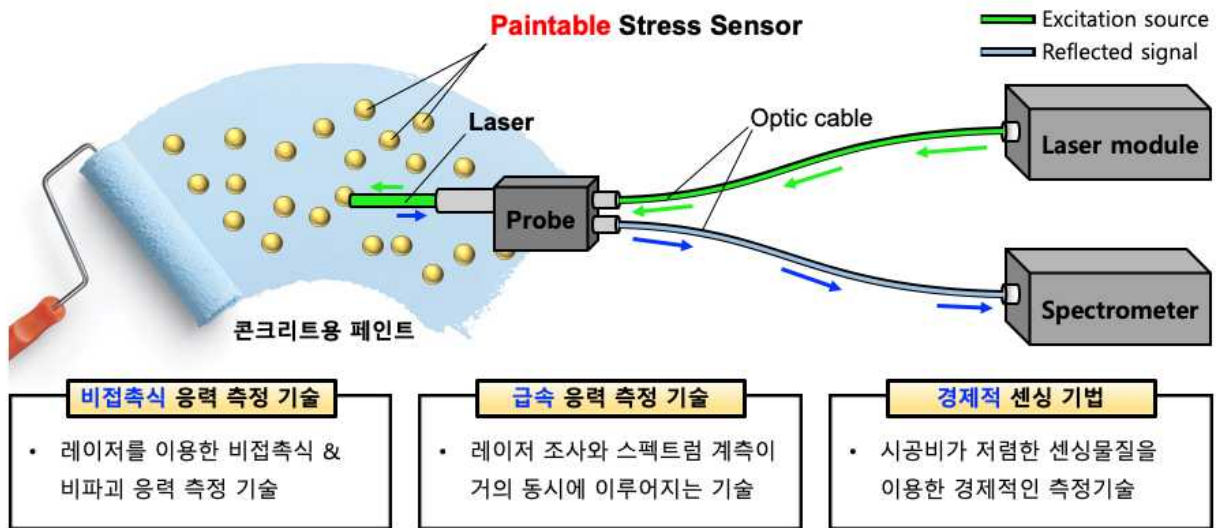
1.2. 연구개발 범위

1.2.1. 연구개발 최종목표 및 최종성과물

① 최종목표 및 최종성과물

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	콘크리트 구조물 비접촉식 응력 측정에 적합한 페인터블 센서 및 제반 기술 개발
세부 목표	① 비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료 제작 ② 압축·인장시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명 ③ 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계 규명

- 본 연구의 최종 목표는 피에조분광기술을 기반으로한 콘크리트 구조물 응력 측정용 페인터블 센서 및 제반 기술 개발임. 비접촉식, 급속응력 측정 및 경제적 센싱 기법인 본 기술 개발을 위하여, 3가지 핵심요소기술(CTE)을 설정함



<페인터블 응력센서 기본 개념>

■ CTE 1 : 비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료 제작

비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료 제작을 위하여, 피에조분광현상을 갖고있는 페인트 혼합용 센싱물질을 선정하고, 응력측정을 위해 필요한 혼합비율에 대한 연구를 수행할 예정임. 주로 실내시험이 수행될 예정이며, 응력센싱물질이 도포된 시멘트 모르타 시편에대한 분광검출을 측정시험이 수행될 예정임

■ CTE 2 : 압축·인장시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명

콘크리트에 도포된 응력센싱물질이 일정 수준 이상의 피에조분광효과(또는 피에조분광 계수)를 보여야 응력센싱이 가능함. 따라서, 콘크리트 시편에 대한 압축(또는 인장) 시험을 수행하여, 배합비에 따른 피에조분광현상을 규명하고, 최종적으로 최적 배합비를 선정함

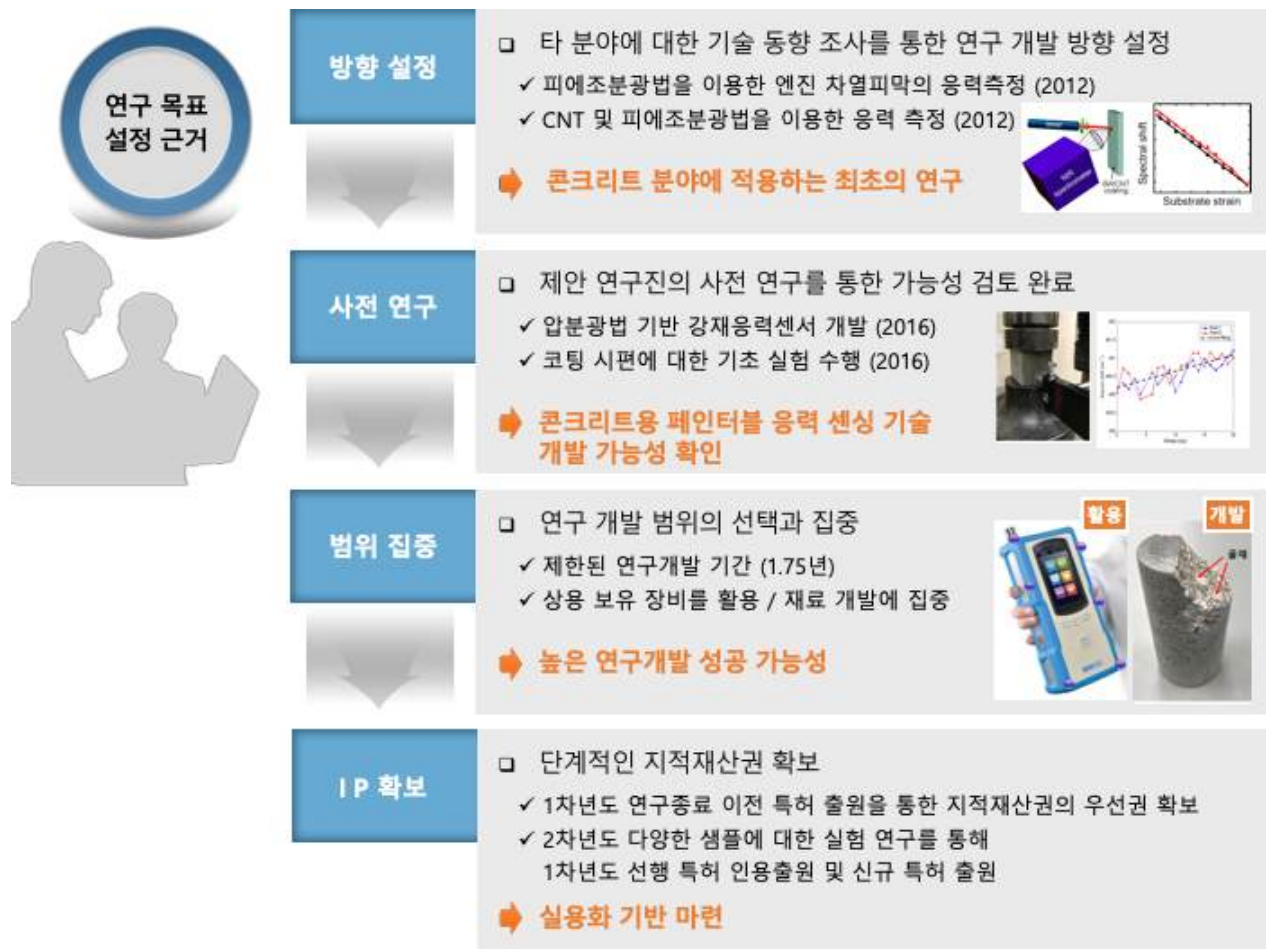
■ CTE 3 : 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계 규명

모재에 가해지는 응력을 페인트 층에서 정확하게 측정하기 위해서는, 모재인 콘크리트와 응력센서 페인트 층간의 응력전달 관계를 규명해야함. 따라서, 유한요소해석을 이용하여 응력전달 관계를 규명하고, 이를 응력센싱용 도료 제작 디자인에 반영함

- 즉, 본 연구의 최종 성과물은 콘크리트 구조물 응력측정을 위한 페인터블 응력 센서임. 따라서, 응력센싱을 위한 페인트 혼합용 센싱물질을 선정하는 과정과 함께, 다수의 하중시험을 통한 페인터블 응력센서의 피에조분광현상 규명이 이루어질 예정이며, 유한요소해석을 통하여 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계가 규명될 예정임. 최종적으로는, 위에서 개발된 페인터블 응력 센서 및 제반 기술들을 콘크리트 구조물 응력측정에 적용하기 위한 설계서가 제시될 예정임

② 설정근거

- 본 연구의 최종 연구 성과물은 피에조분광기술을 기반으로한 콘크리트 구조물 응력 측정용 페인터블 센서임.
- 연구 목표 및 연구개발 범위의 설정 근거
 - ✓ 문헌조사 및 사전 연구를 통한 도전적인 목표 설정 : 세계 최초의 연구
 - ✓ 제한된 연구개발 기간 및 예산에 따른 연구 범위 집중
 - ✓ 현재 TRL2 단계에서 TRL4 단계까지 연구 개발하여 원천기술 확보에 주력



<추진 전략의 창의성>

1.2.2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

최종성과물	기술성숙도		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
콘크리트 구조물 응력 측정을 위한 페인터블 응력 센서	TRL 3	TRL 4	(연구시작시) ■ 피에조분광 기술은 차열피막의 응력 측정 분야에서 기검증된 기술이나, 콘크리트에 페인트 형식으로 도포되어 응력을 측정한 사례는 전무함. 따라서, 연구 착수단계에는 기술적 개념 정립이 종료되고, 일부 실험적인 증명이 이루어진 단계인 TRL 3에 해당함 (연구종료시) ■ 본 연구 종료 시에는, 실내실험을 통하여, 센싱재료 및 혼합비율을 결정하고, 피에조분광현상을 규명하게 됨. 따라서, 실험실 성능평가 단계인 TRL 4에 해당함

1.2.3. 연구개발 핵심성과 및 연구내용

연번	핵심성과물	성과유형 [※]	핵심성과 개요
1	응력센싱용 도료 제작	재료	비접촉식 콘크리트 응력센싱용 페인터블 센서 제작을 위하여, 피에조분광현상을 갖고있는 페인트 혼합용 센싱물질을 선정하고, 응력측정을 위해 필요한 혼합비율에 대한 연구를 수행하는 단계임. 주로 실내실험을 수행하고, 응력센싱물질이 도포된 시멘트 모르타 시편에 대한 분광검출을 측정시험이 수행될 예정임
2	피에조분광현상 규명	기타 (현상규명)	콘크리트에 도포된 응력센싱물질이 일정 수준 이상의 피에조분광효과(또는 피에조분광계수)를 보여야 응력센싱이 가능함. 따라서, 콘크리트 시편에 대한 압축(또는 인장) 시험을 수행하여, 배합비에 따른 피에조분광현상을 규명하고, 최종적으로 최적 배합비를 선정함
3	응력전달관계 규명	기타 (현상규명)	모재에 가해지는 응력을 페인트 층에서 정확하게 측정하기 위해서는, 모재인 콘크리트와 응력센서 페인트 층간의 응력전달 관계를 규명해야함. 따라서, 유한요소해석을 이용하여 응력전달 관계를 규명하고, 이를 응력센싱용 도료 제작 디자인에 반영함

제2장. 연구수행내용 및 성과

2.1. 연구개발 추진 방법

본 연구에서는 (1) 비접촉식 콘크리트 응력센싱용 도료를 제작하고, (2) 하중시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상을 규명하며, 이를 바탕으로 (3) 비접촉식 응력 측정에 적합한 페인터블 센서를 개발하는데 그 목적이 있다. 이와 같은 연구목표를 달성하기 위한 연구개발 추진 일정 및 핵심 연구 접근 방법은 아래와 같음

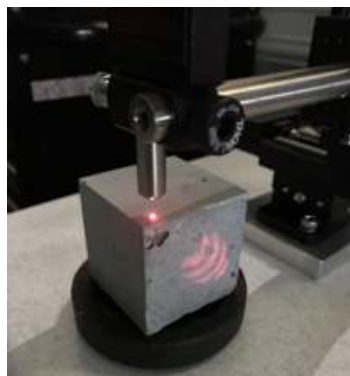
2.1.1. 비접촉식 응력센싱용 도료 제작 및 응력전달 규명

○ 비접촉식 응력센싱용 도료 제작

- (문헌연구) 피에조분광현상을 갖고 있는 페인트 혼합용 센싱물질 가선허정
- (실내실험) 응력센싱물질의 혼합비가 다른 페인트가 도포된 시편제작 및 분광검출율 측정

○ 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계 규명

- (시뮬레이션) 다양한 두께, 재료, 혼합비를 갖는 페인터블 센서 및 콘크리트 시편에 대한 유한요소모델을 구성하고, 이를 해석하여 콘크리트와 페인트의 응력전달관계 규명
- (실내시험) 시뮬레이션 중 1건 이상의 케이스에 대한 시편제작 및 실내실험을 수행하고, 그 결과를 비교/검증 함



<시편 분광검출율 측정시험 일예>



<연구개발 계획 흐름도>

2.1.2. 페인터블 응력 센서의 피에조분광현상 규명 및 측정방법 설계

○ 하중시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명

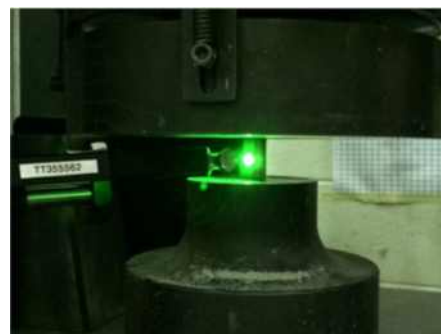
- (시편제작) 1차년도에서 선정된 응력센싱물질이 포함된 페인트가 도포된 시편제작
- (실내시험) 압축(또는 인장)시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명
- (실내시험) 응력측정센서의 품질일관도 평가를 위한 응력 맵핑 수행

○ 페인터블 응력 센싱 기술을 이용한 콘크리트 구조물 응력 측정방법 설계

- (실내시험) 국소적응력 측정기술을 전역적 응력에 적용하기 위한 장초점 렌즈를 적용한 하중시험 수행
- (실내시험) 적용성 확대를 위한 다양한 콘크리트 배합비(2종 이상)에 대한 시험 수행
- (설계서작성) 페인터블 응력 센서 및 제반 기술들을 콘크리트 구조물 응력 측정에 적용하기 위한 구상 및 설계서 작성



(a) 모르터 시편



(b) 압축하중시험 전경

<시편 및 압축하중시험의 일예>



<연구개발 계획 흐름도>

2.1.3. 연차별 연구 접근 방법 (기존 계획 대비 변경 내용 및 수행 내용 대조표)

○ 1차년도

기존 연구 계획	실 수행 내용	계획변경이 있을 경우 그 이유
- 비접촉식 응력센싱용 도료 제작	- 피에조분관현상을 갖는 페인트 혼합용 센싱물질 가선택 - 응력센싱물질의 혼합비가 다른 페이트가 도포된 시편제작 및 분광검출을 측정	- 변경 없음
- 모재와 응력센서 층간의 응력전달 관계 규명	- 모르터 시편 제작 후 페인트를 표면에 도포하고, 해당 시편에 대한 응력 실험 을 통한 모재-응력센서 층간의 응력전달 관계 규명 - 이를 위하여, 2차년도 수행 예정이었던, 하중시험용 분석 알고리즘 개발, 압축하중시험 등의 과업을 1차년도에 일부 선수행함 - 따라서, 2차년도에는 1차년도에 개발된 분석 알고리즘 및 하중시험환경을 이용하여, 접착력 값을 실험적으로 얻고, 이를 이용한 시뮬레이션을 수행할 예정	- 페인트층과 모재(혹은 페인트층-바인더층-모재)와의 접착력은 시뮬레이션을 수행하는데 중요한 파라미터이지만, 해석적으로는 해당 값을 얻기 어려움 - 즉, 하중시험을 통하여 모재와 페인트층과의 응력전달을 관계를 실험적으로 검증하고, 이를 이용하여 시뮬레이션이 수행되어야 함 - 따라서, 2차년도에 수행예정이었던 연구내용(하중 실험에 필요한 것)들의 일부분을 1차년도에 선수행하고, 1차년도 시뮬레이션 부분을 2차년도로 변경 편성함



<1차년도 연구 수행 내용>

○ 2차년도

기존 연구 계획	실 수행 내용	계획변경이 있을 경우 그 이유
- 압축·인장시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명	- 피에조분광현상을 갖는 페인트 혼합용 센싱물질 선정 - 응력 센싱물질이 포함된 시편 제작 - 하중시험을 통한 피에조분광현상 규명 - (추가수행) 대상 구조물에 대한 재도장시, 대상 구조물 응력 이력을 알기 어려운 제안기술을 보완하기 위하여, <u>재도장을 필요로 하지 않는 페인터블 센싱 기술에 대한 연구를 2차년도에 추가 수행함</u>	- (추가수행) 1차년도 수정/보완요구사항 중에 하나인 “재도장에 따른 응력센서 기능 미비로 인한 보완책 마련(장기거동 특성 고려) 필요”에 대한 기술 분석 결과, 기존 제안방식(상용 페인트를 이용한 방법)의 경우, 재도장을 하게되면 응력에 대한 이력관리를 하기 어렵다는 문제점을 발견함 - 따라서, 이와 같은 문제를 해결할 수 있도록, 재도장을 필요로 하지 않는 센싱물질/기법 개발을 추가적으로 수행함
- 페인터블 응력 센싱 기술을 이용한 콘크리트 구조물 응력 측정방법 설계	- (기존계획) 모르터 시편 제작을 완료 하였으며, 11월 말 中 2종의 시편에 대한 실내 실험 수행 예정	- 변경 없음
- (시뮬레이션을 통한) 응력전달관계 규명	- (계획변경) 레이저 조사 (irradiation) 깊이에 따른 측정 응력값 불균일 현상을 유한요소해석을 통하여 규명함	- 실내하중실험 데이터 분석과정에서, 레이저의 조사 위치(깊이 방향, 폭방향)에 따라서, 그 결과값이 상이한 현상을 발견함 - 특히, 동일한 위치에 레이저를 조사(irradiation)하더라도, 레이저의 깊이방향 조사위치(투과깊이)에 따라 그 결과값이 일정하지 않음을 발견함 - 실험만으로는 증명할 수 없는 현상을 규명하기 위하여, 유한요소해석을 수행함

2.2. 비접촉식 응력센싱용 도료 제작 및 응력전달 규명

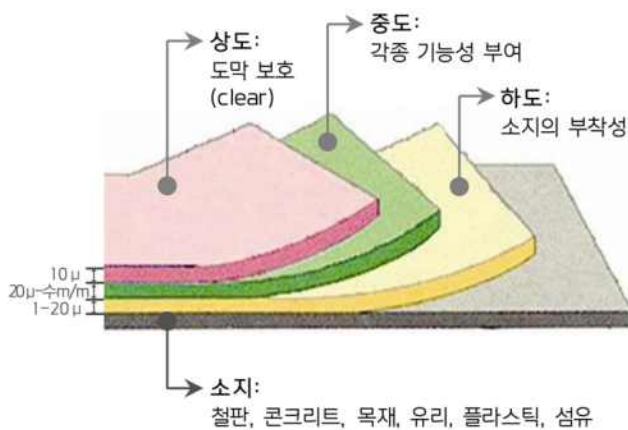
2.2.1. 센싱물질 선정

구조물에 인가된 응력을 페인트를 이용하여 비접촉식으로 측정하기 위해서는 해당 페인트에 고분광 물질이 포함되어있어야 하며, 그 물질이 1) 라만 (또는 형광) 스펙트럼을 가지며, 선명도(intensity)가 높고, 쉽게 구별할 수 있는 단일(또는 여러 개의) 첨뒳값을 가져야 한다. 또한, 2) 그 소재의 압분광 효과(Piezospectroscopic effect)가 규명되어있어야 한다. 압분광 효과가 기규명되지 않은 소재는 다이아몬드 앤빌 셀(Diamond anvil cell)등 을 이용하여 그 압분광 효과를 규명할 수 있으나, 본 연구의 과업에는 포함하지 않는다.

페인트는 소지의 외관에 도막을 형성함으로써, 각종 원자재나 완제품의 노화, 산화 등을 방지하여 수명을 연장시키고, 방수, 방오, 내화, 전자파 차폐, 단열 등의 특수 목적에 부합한 기능을 부여하며, 주위와의 조화로운 색상을 구현하는 핵심 소재이다. 즉, 모재에 가해지는 응력을 측정하기 위해서 페인트를 사용하지 않기 때문에, 페인트를 이용한 구조물의 응력측정에 대한 가능성은 알려진바 없다. 또한, 페인트는 일반적으로 안료, 중합제, 용제, 첨가제로 구성된다고 알려져 있으나, 제조사에서 페인트의 화학성분을 공개되지 않기 때문에, 위에서 언급한 고분광 물질이 페인트에 포함되어 있는지는 알려진바 없다.

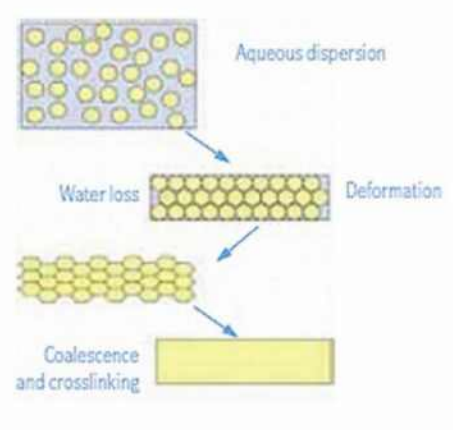
따라서, 본 연구에서는 압분광 효과가 규명된 물질 중에서, 응력 센싱물질로써 페인트에 이미 포함되어 있거나, 혹은 페인트와 혼합하여 응력 센싱물질로 사용될 가능성이 높은 소재 6가지(산화알루미늄, 삼산화철, 이산화규소, 산화크롬, 그래핀(혹은 흑연), 이산화티타늄) 물질에 대한 문헌연구를 수행하고, 해당 연구로부터 응력센싱물질을 선정하고자 한다.

페인트 도막의 구조



자료: 산업연구원

페인트가 제품에 입혀지는 원리



자료: 키움증권

<페인트 도막의 구조 및 원리>

〈페인트의 구성요소 및 주요성분〉

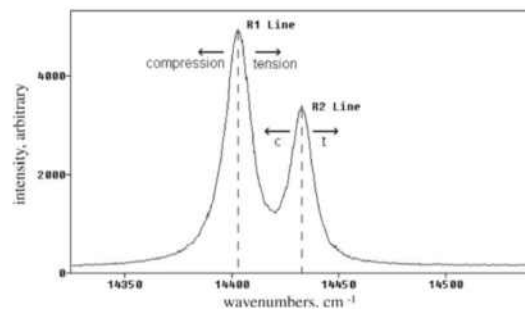
구분	주요 재료	용도
안료	이산화티타늄(백색), 화철(황, 적, 흑) 프탈로시아닌(청, 녹색), 퀴나크리돈(적)	고체의 입자로 도료의 색상, 은폐력, 중량효과를 나타냄(주요재료: TiO ₂)
중합제	식물성 (대두유, 아마유, 야자유) 유지 가공품 (지방산, 피마자유) 천연수지 가공품 (에스테르검, 경화 로진) 합성수지(비닐, 아크릴, 에폭시, 우레탄, 에멀션) 폴타르, 피치	도막을 형성하는 액상물질로 도료의 물성을 결정
용제	석유계 혼합용제(톨루엔, 크실렌) 메탄올, 에탄올, 아세톤, 상수도물, 증류수	중합체를 녹여 도료의 점도상태를 조절하여 유동성을 부여하고 도장작업을 향상시킴
첨가제	가소제, 건조제, 분산제, 곰팡이방지제, 방오제 (파라핀, 코발트, 망간, 계면활성제, 유기주석화합물, 실리카, 왁스, 페놀 등)	소량을 첨가하여 도료의 성능을 향상시킴

자료: 산업연구원, 키움증권

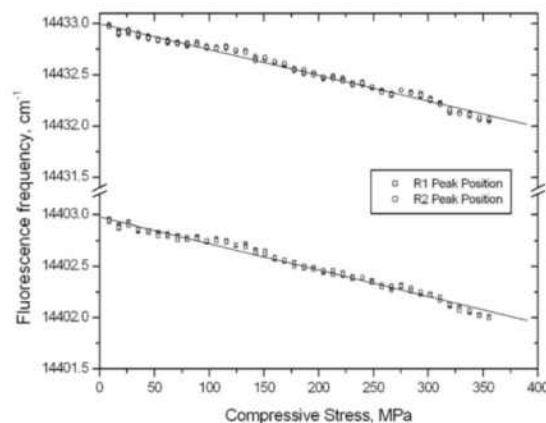
2.2.1.1. 고분광 물질 문헌 연구

① 산화알루미늄 (Al₂O₃, Aluminum oxide, Alumina)

산화알루미늄은 페인트 광택효과를 내기 위하여 페인트에 일부 포함된 물질로써, 전기 절연이 우수하고, 기계강도 및 압축강도가 높다. 또한 높은 내부식성 및 내마모성 특징으로 코팅재료로 널리 사용된다. 이와 같은 산화알루미늄은 형광 스펙트럼(아래 그림)과 라만 스펙트럼을 모두 갖고 있으며, 형광 스펙트럼의 경우, 14,402 cm⁻¹ 와 14,432 cm⁻¹ 에서 침묵값을 갖는다. 그 압분광 현상 또한 이미 검증되었다(K.G. Dassios and C. Galiotis, “Fluorescence studies of polycrystalline Al₂O₃ composite constituents: piezo-spectroscopic calibration and application”, *Applied Physics*, 2004)³⁾. 아래 그림은 압축응력 상태에서 R1 line, R2 line이 이동하는 것을 보인다. 즉, 산화알루미늄이 압축응력을 받을 경우, 두 침묵값은 응력을 받지 않는 상태의 형광 스펙트럼의 좌측으로 이동(Shift)하고, 반대(인장)의 경우에는 우측으로 이동하는 특성을 갖으며, 그 이동량은 인가된 응력과 선형적인 관계를 갖는다.



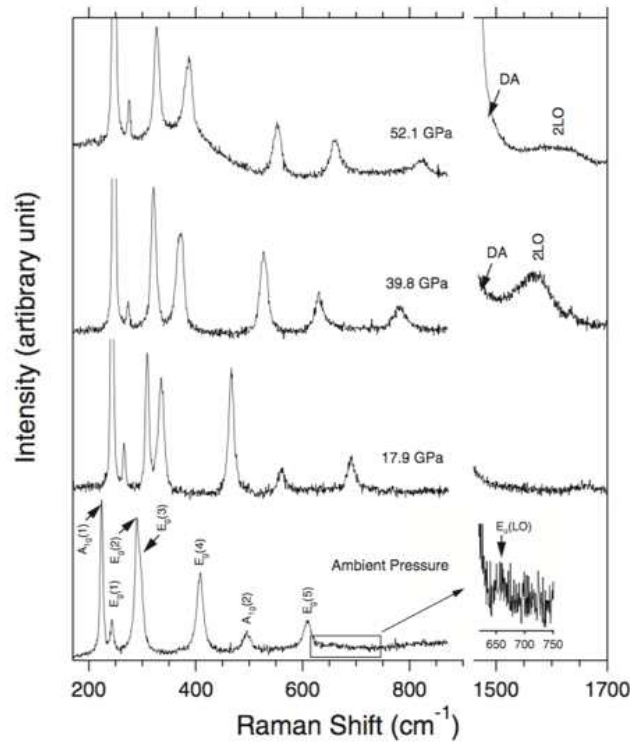
〈응력이 없는 상태의 산화알루미늄 형광 스펙트럼〉



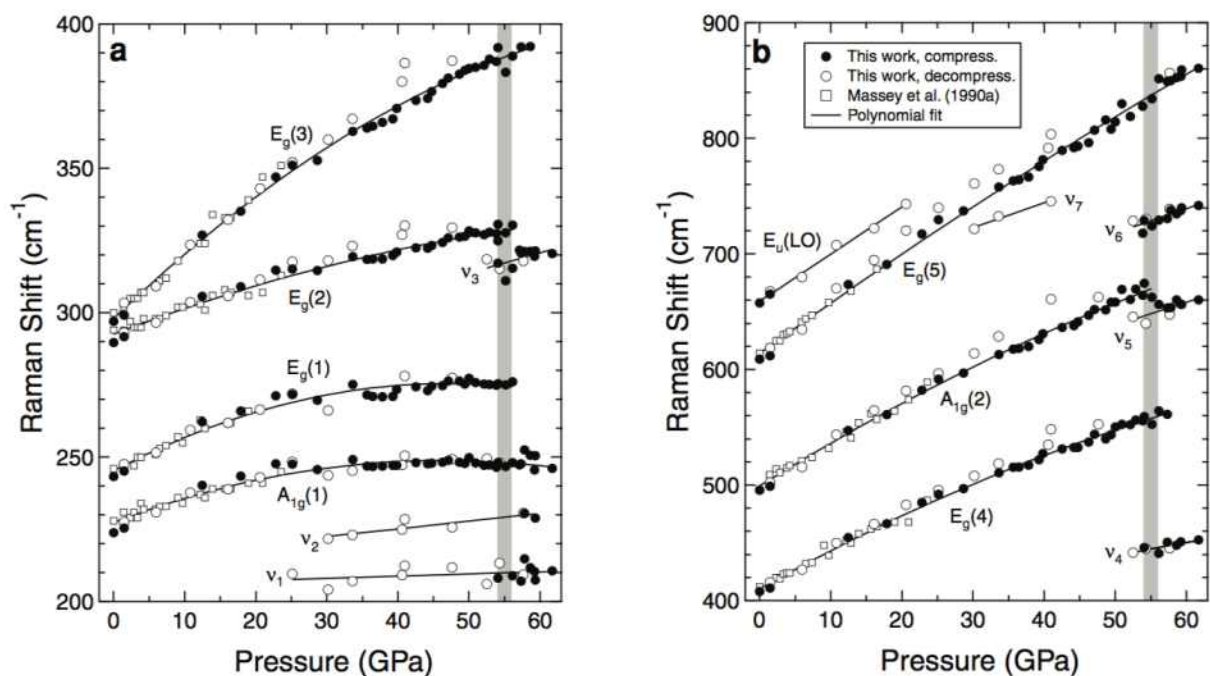
〈응력상태(0 MPa-400 MPa)에서의 산화알루미늄 R1, R2 band 의 파수 이동〉

② 삼산화철 (Fe_2O_3 , Iron(III) oxide, Hematite)

삼산화철은 가장 안정한 산화철이며, 전자기적 특성과 낮은 가격, 낮은 독성 및 열적/화학적 안정성으로 산업 여러 분야에서 사용된다. 이와 같은 삼산화철은 라만 스펙트럼을 가지며, 224 cm^{-1} , 243 cm^{-1} , 290 cm^{-1} , 408 cm^{-1} 에서 주요 첨두값을 갖는다. 그 압분광현상 또한 이미 검증되었다(S.-H. Shim and T. Duffy, “Raman spectroscopy of Fe_2O_3 to 62 GPa”, *American Mineralogist*, 2001)⁴⁾. 아래 그림은 인가된 압축응력에 따라서 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보인다. 즉, 삼산화철이 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동하며, 각각의 첨두값은 인가된 응력에 대하여 각기 다른 민감도를 갖는다.



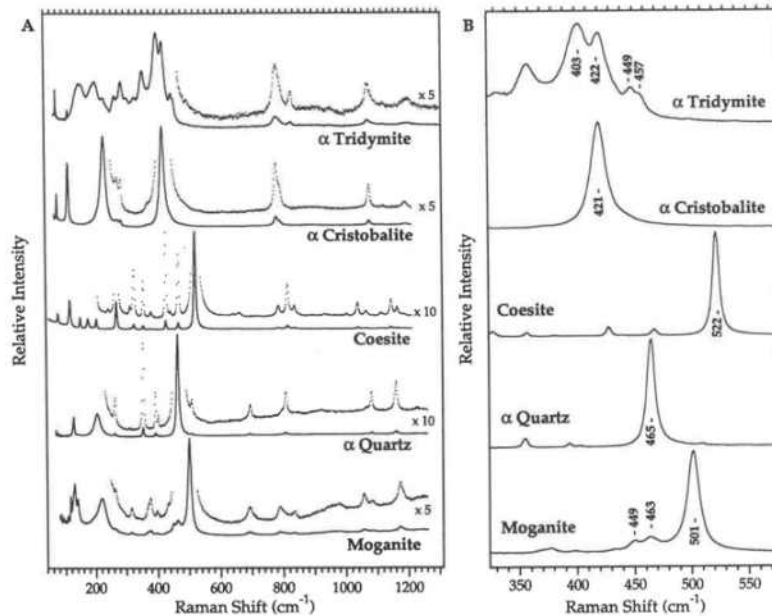
<응력상태(0 GPa-62 GPa)에서의 삼산화철 라만 스펙트럼>



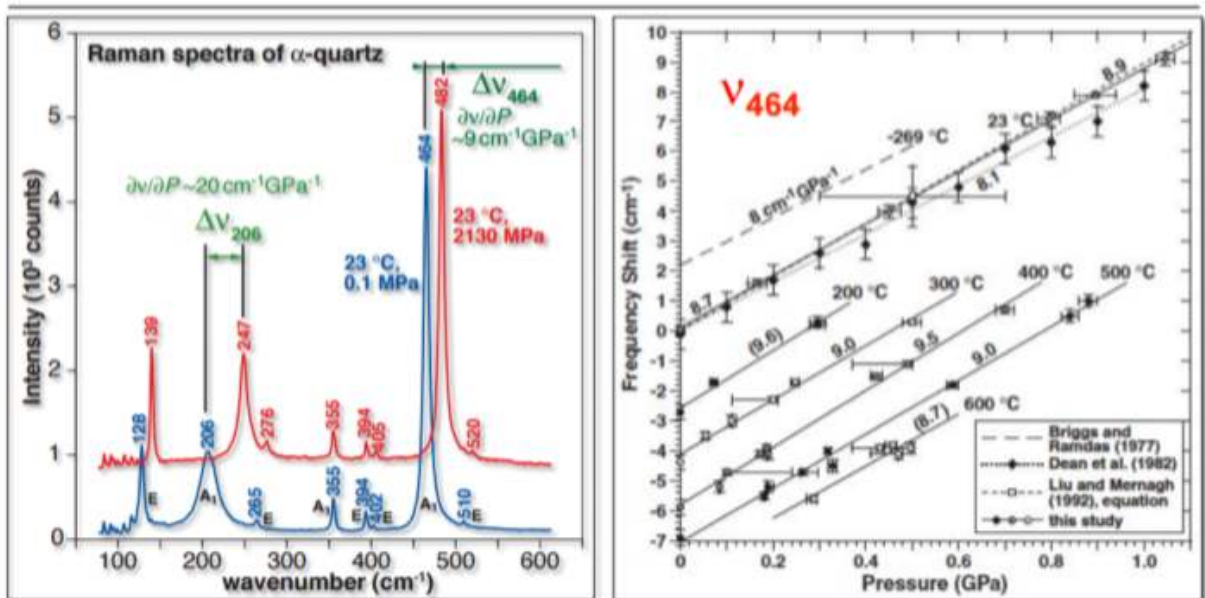
<응력상태(0 GPa-62 GPa)에서의 Fe_2O_3 주요 라만 밴드의 파수 이동>

③ 이산화규소 (SiO₂, Silicon dioxide, Silica)

이산화규소는 실리카라고도 알려진 규소의 산화물로, 반도체, 절연 전선 및 섬유 광케이블 제조 등의 전자 업계에서 오랫동안 사용되었으며, 유리, 금속 합금, 콘크리트 등 다양한 용도에 사용된다. 이와 같은 이산화규소는 라만 스펙트럼을 가지며, 464 cm⁻¹ 주변에서 주요 첨두값을 갖는다. 그 압분광 현상 또한 이미 검증되었다(C. Schmidt and I-M. Chou, “The hydrothermal diamond anvil cell for Raman spectroscopic studies of geologic fluids at high pressures and temperatures”, Presentation Material)⁵⁾. 아래 그림은 응력에 따라 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보이며, 이산화규소가 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동함을 알 수 있다.



<다양한 형태를 갖는 이산화규소의 라만 스펙트럼>



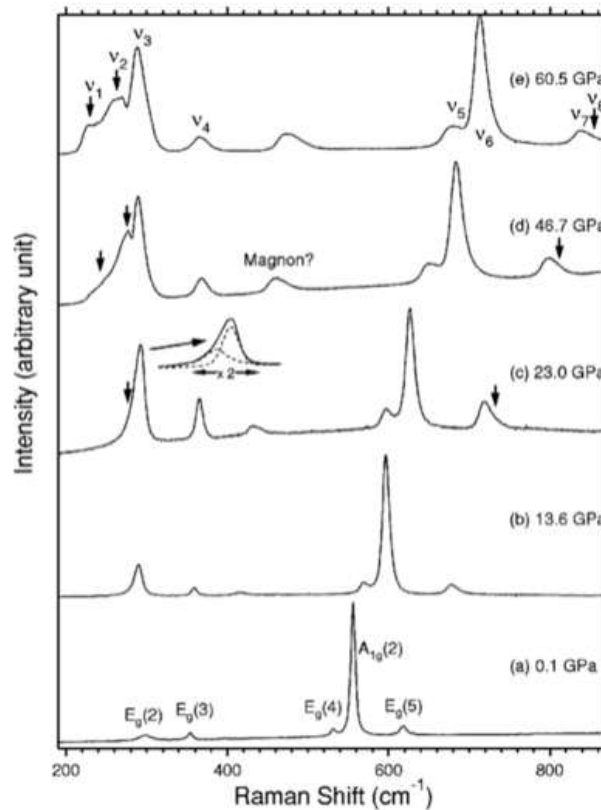
V₂₀₆: <2.5 GPa at RT, but high resolution
V₄₆₄: to ~600 °C, to ~3 GPa (10 GPa at RT)

Schmidt and Ziemann (2000)

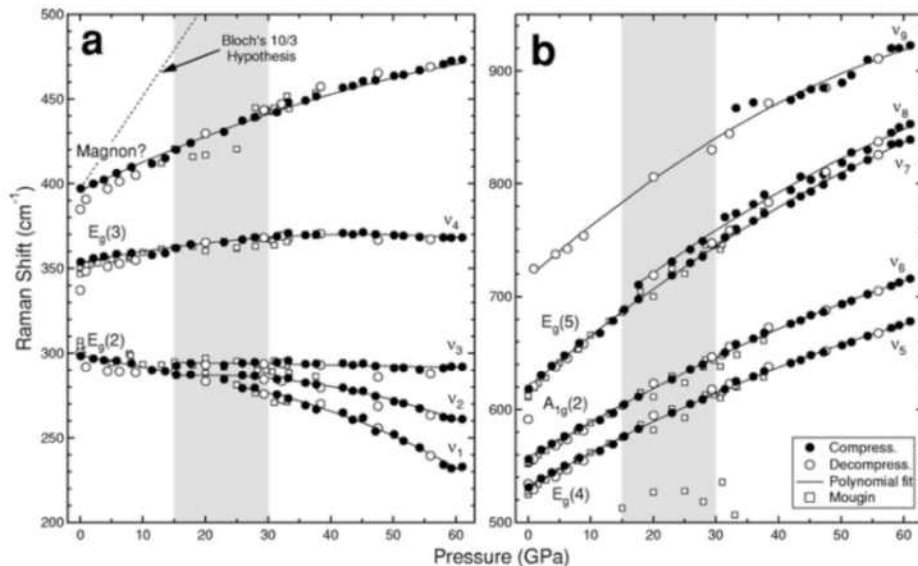
<응력상태에서 α-quartz 이산화규소의 주요 라만 밴드의 파수 이동>

④ 산화크롬 (Cr_2O_3 , Chromium oxide, Chromia)

산화크롬은 화학적으로 안정하고, 산화알루미늄과 유사하게 내열성, 내부식성 및 내마모성이 우수한 특성이 있어, 코팅을 포함한 다양한 산업에서 사용된다. 이와 같은 산화크롬은 라만 스펙트럼을 가지며, 550 cm^{-1} 에서 주요 첨두값을 가지며, 그 압분광 현상 또한 이미 검증되었다(S.-H. Shim, “Raman spectroscopy and x-ray diffraction of phase transitions in Cr_2O_3 to 61 GPa”, *Physical Review*, 2004)⁶⁾. 아래 그림은 응력에 따라 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보이며, 산화크롬이 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동함을 알 수 있다.



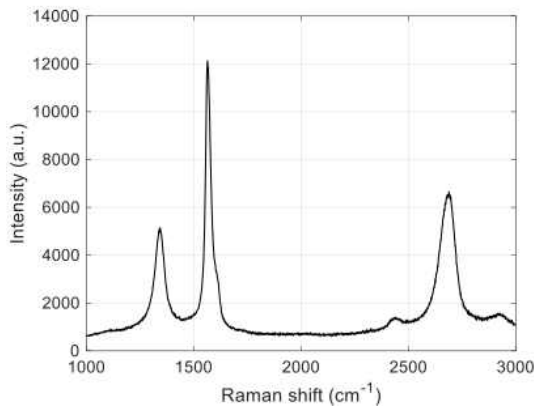
<응력상태(0.1 GPa-60.5 GPa)에서의 산화크롬 라만 스펙트럼>



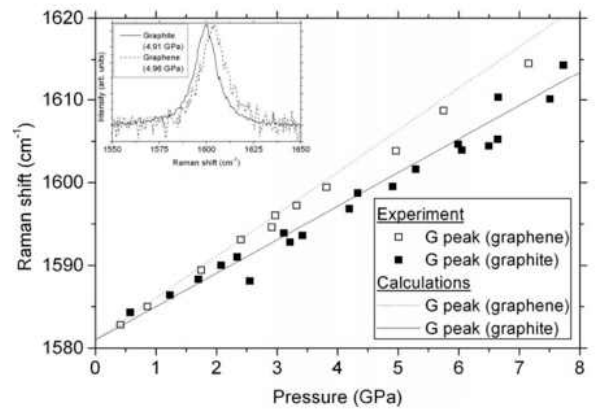
<응력상태(0.1 GPa-60.5 GPa)에서의 산화크롬 주요 라만 밴드의 파수 이동>

⑤ 그래핀 (Graphene)

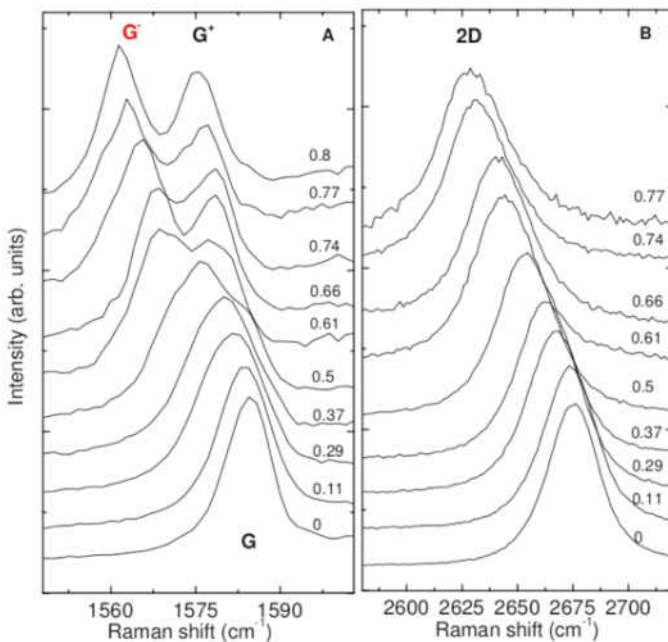
그래핀은 화학적으로 비활성이며, 우수한 물리적 성질을 갖고 있어 최근 각광 받는 물질이며 그 응용범위가 무궁무진하다. 이와 같은 그래핀은 라만 스펙트럼을 가지며, $1,350\text{ cm}^{-1}$ (D band), $1,580\text{ cm}^{-1}$ (G band), $2,700\text{ cm}^{-1}$ (2D band) 주변에서 주요 첨두값을 갖는다. 그 압분광 현상 또한 이미 검증되었다(John E. Proctor et al., “High-pressure Raman spectroscopy of graphene”, *Physical Review*, 2009 ⁷⁾, T. M. G. Mohiuddin et al., “Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, parand sample orientation”, *Physical Review*, 2009 ⁸⁾). 아래 그림들은 압축/인장응력 하에서 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보이며, 그래핀이 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동하고, 반대의 경우 좌측으로 이동함을 확인할 수 있다.



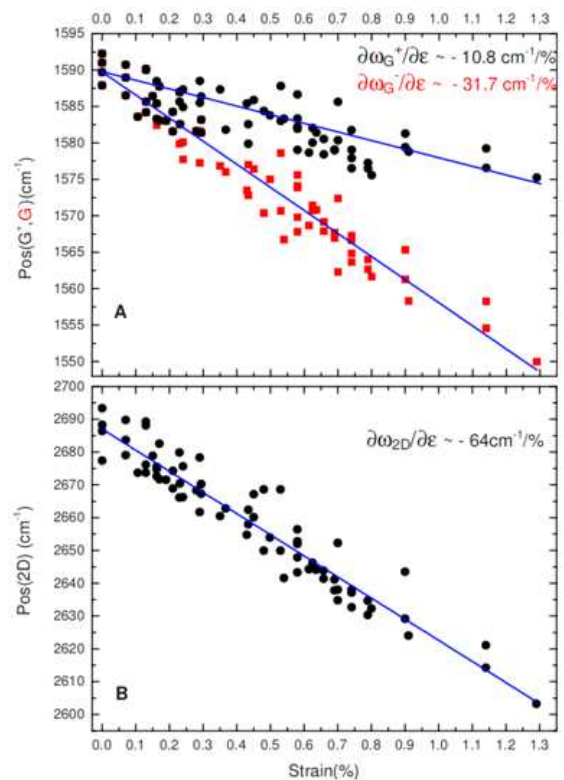
<응력이 없는 상태의 그래핀 라만 스펙트럼>



<압축응력 하에서 그래핀 주요 라만 밴드의 파수 이동>

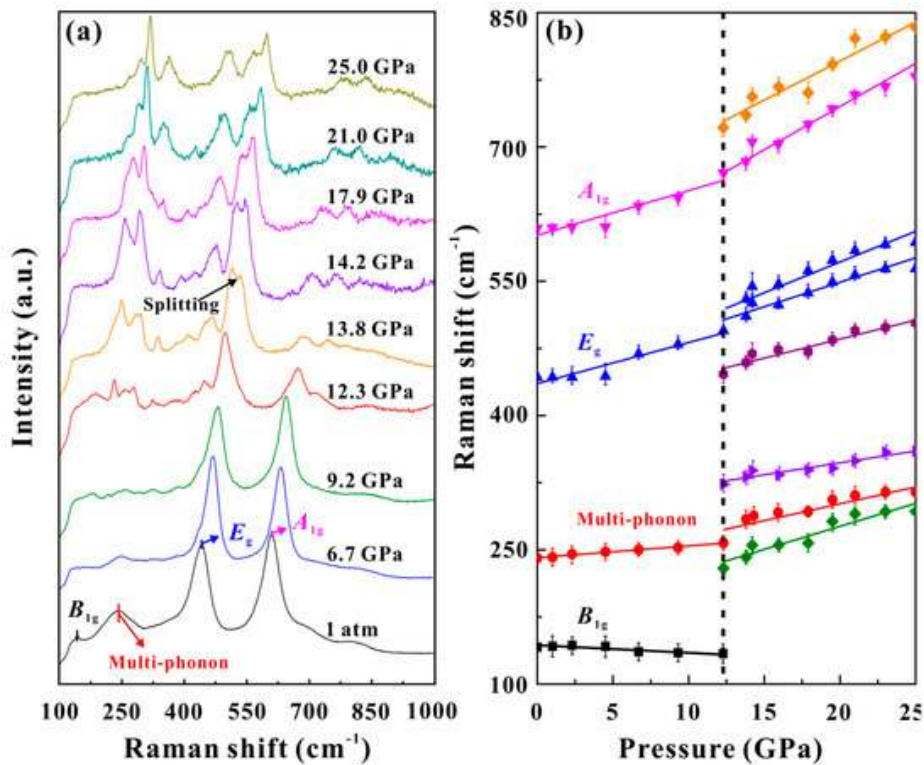


<인장응력 하에서 그래핀 주요 라만 밴드의 파수 이동>



⑥ 이산화티타늄 (TiO₂, Titanium dioxide)

TiO₂는 일반 페인트에 들어있는 물질로, 라만 분광법에 민감하게 반응한다고 알려져 있으며, 143, 242, 441, 609 cm⁻¹ 등에서 첨두값을 보인다(Meiling Hong et al., “Structural Phase Transition and Metallization of Nanocrystalline Rutile Investigated by High-Pressure Raman Spectroscopy and Electrical Conductivity”, *Minerals*, 2019⁹⁾). 특히, 441, 609 cm⁻¹에 해당하는 첨두값들이 압축 하중하에서 크게 변화함(우측으로 이동)을 아래 그림을 통하여 확인할 수 있다. 다만, 441cm⁻¹의 경우 12.3 GPa 이후에 2개의 밴드로 분리되는 것을 확인할 수 있으나, 일반적으로 콘크리트에 가해지는 응력보다 매우 높은 값이므로, 본 연구에서는 고려하지 않도록 한다.



<압축하중 하에서 TiO₂ 주요 라만 밴드의 파수 이동>

2.2.1.2. 소결

본 장에서는 산화알루미늄, 삼산화철, 이산화규소, 산화크롬, 그래핀, 이산화티타늄 등 총 6 종류의 물질에 대한 문헌연구를 통해 해당 물질들의 압분광 현상에 대하여 알아보았고, 이를 통하여 응력 센싱용 도료 첨가제를 가선평가하였다. 첨가제 선정에 고려된 주요 인자 및 해당 6 종류의 후보 물질에 대한 검토 결과는 아래와 같다.

- ① 페인트에 기포함된 물질 (도료의 화학적 변화 최소화)
- ② 형광분광법, 라만분광법을 통하여 그 침투값을 확인할 수 있는 물질
- ③ 압분광효과(Piezospectroscopic effect)를 확인할 수 있는 물질

<응력 센싱용 도료 첨가제 선정 주요인자 및 검토 결과>

	산화알루미늄	삼산화철	이산화규소	산화크롬	그래핀	이산화티타늄
페인트 기포함된 물질	○	×	×	×	×	○
형광 or 라만 분광 Active	형광 & 라만	라만	라만	라만	라만	라만
압분광효과 규명된 물질	○	○	○	○	○	○

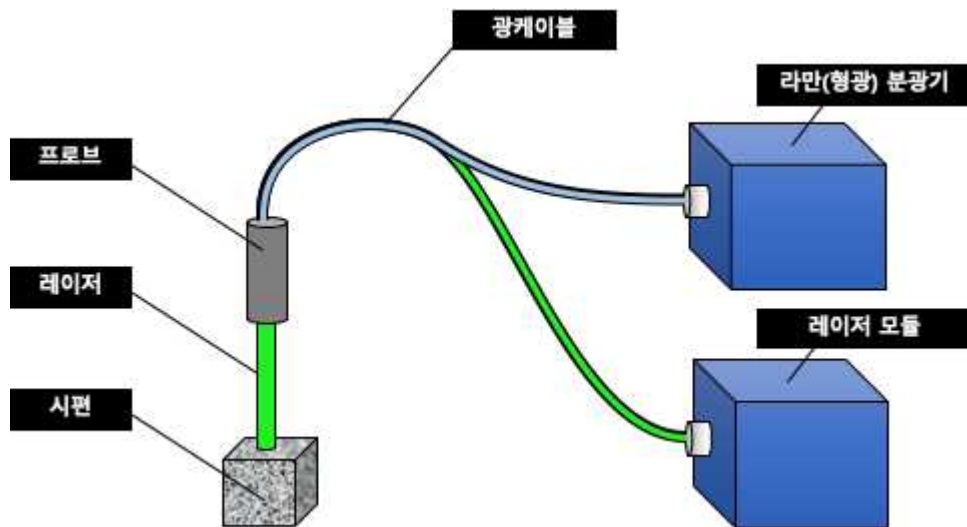
위 결과에 따라, ① 페인트에 기포함되어 있으며, ② 형광 또는 라만 분광 스펙트럼에서 분별이 가능한 침투값을 갖고, ③ 그 침투값에 대한 압분광효과가 규명된 산화알루미늄과 이산화티타늄이 첨가제 후보군으로 가선평가되었다. 해당 결과와 함께, 1차년도에 사용할 장비의 사양을 고려하여 최종 1종의 첨가제를 선정하였다.

1차년도 연구에 사용된 분광 장비는 532nm의 단색광을 기반으로한 라만 분광시스템과 형광 분광 시스템으로써, 동일한 광원(532nm 레이저)을 사용한다. 산화알루미늄(형광&라만)과 이산화티타늄(라만)의 경우 모두 라만분광 스펙트럼 및 주요 침투값을 갖기 때문에 모두 첨가제로 사용 가능하지만, 532nm를 사용할 경우 일반 건설용 도료에 포함된 산화알루미늄이 갖는 높은 형광스펙트럼으로 인하여, 다른 라만 스펙트럼을 확인할 수 없을 가능성이 매우 크다. 따라서, 본 연구에서는 산화알루미늄을 1차년도 최종 첨가제로 선정하여, 그 활용 가능성을 판단하였으며, 2차년도에 785nm 레이저 기반 분광시스템을 구축하여, 응력센싱물질로써의 이산화티타늄의 활용 가능성도 실험적으로 검토하였다.

2.2.2. 페인트를 이용한 콘크리트 응력측정을 위한 압분광 시스템 구성

2.2.2.1. 분광 시스템 구축

2장에서 최종적으로 선택된 물질인 산화알루미늄은 압분광 특성을 보이며, 라만분광법 또는 형광 분광법을 이용하여 그 측정이 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 라만 분광 시스템과 형광 분광 시스템을 각각 구성하였다. 단, 두 시스템은 하나의 광원을 사용하기 때문에 레이저 장치와 프로브는 공유도록 시스템을 구성하였다. 아래 그림은 라만(혹은 형광) 분광 시스템의 개략도 및 각 장치별 세부 특징을 보이며, 실제 구축된 라만 분광 시스템과 형광 분광 시스템도 함께 나타내었다. 세부 장비별 특징은 아래 설명하도록 한다.



<라만/형광 분광 시스템 개략도>



(a) 라만 분광 시스템



(b) 형광 분광 시스템

<라만/형광 분광 시스템>

<라만 분광기 및 레이저 모듈 세부 내용>

라만 분광기	
Spectral range	150–3400 cm^{-1}
Spectral resolution	$\sim 3.5 \text{ cm}^{-1}$ @ 614 nm
Detector type	CCD array
Pixel number	2048 detector elements
Integration time	100ms ~ 30 mins
형광 분광기	
Spectral range	600–800 nm (12,500–16,667 cm^{-1})
Spectral resolution	0.4 nm
Detector type	CCD Array
Pixel number	2048 detector elements
Integration time	5 ~ 65,535 ms
레이저	
Laser wavelength	532 nm
Max. output power	>40mW at laser port (50mW max)

① 라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈

- 두 가지 모듈이 하나로 통합된 장비로써, 아래 그림 (b)에서 좌측에 분광기, 우측에 레이저 모듈이 설치되어 있음. 본 모듈만으로는 실험을 수행할 수 없으며, 프로브와 연결해서 사용해야함
- 분광기는 slit, collimating mirror, diffraction grating, focusing mirror, CCD detector 로 구성됨



(a) 라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈



(b) 프로브 연결부

<라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈>

② 형광 분광기

- 산화알루미늄 형광 분광 실험을 위한 분광기로, 실험을 수행하기 위해서는 레이저 및 프로브가 필요함
- 분광기 구성은 라만 분광기와 동일하지만, 측정할 수 있는 주파수 대역이 다름

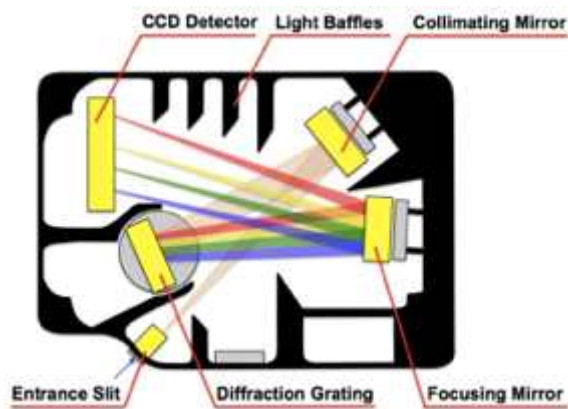


(a) 형광 분광기 전면부 (프로브 연결부)



(b) 형광 분광기 후면부 (USB 연결부)

<형광 분광기>



<분광기 내부 구성도>

③ 프로브

- 시편에 레이저를 조사하고, 반사되는 신호를 취득하기 위한 장비로써, 광섬유를 이용하여 분광기/레이저와 연결됨
- 위의 프로브 내부도에 표시된 것처럼, 조사하는 레이저와 동일한 주파수의 파장을 상쇄하기 위한 필터와 다수의 렌즈로 구성됨

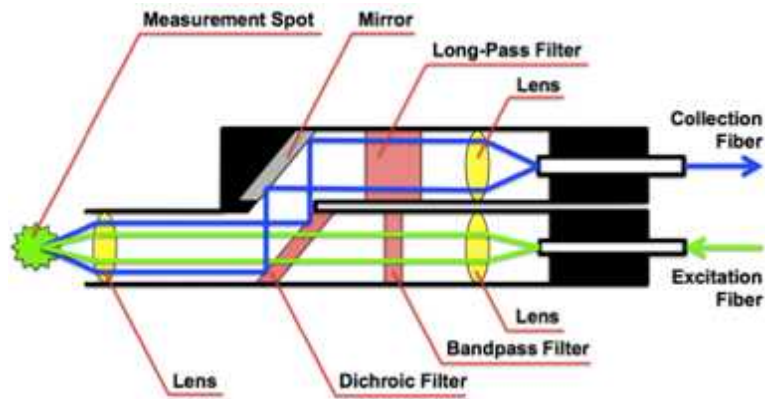


(a) 프로브, 광섬유 및 레이저 트리거



(b) 프로브

<라만 및 형광 분광 스펙트럼 측정용 프로브>



<프로브 내부 구성도>

④ 레이저 보안경

- 사용중인 532nm의 레이저로부터 눈을 보호하기 위한 장비로써, 180-532nm 주파수 대역의 신호를 차단함



(a) 레이저 보안경 및 케이스



(b) 레이저 통과가능 주파수 대역 (180-532nm)

<레이저 보안경>

⑤ 프로브 거치대

- 프로브를 안정적으로 고정하기 위한 거치대로써, 유니버설 암(Universal arm)과 연결하여 사용함
- 2차원 모터 스테이지와 결합하여 프로브를 세밀하게 이동하는데 사용됨



(a) 프로브 거치대



(b) 프로브가 거치된 모습

<라만/형광 프로브 거치대>

⑥ 2차원 모터 스테이지 및 컨트롤러

- 계측 위치를 세밀하게 조작하기 위해, 프로브 거치대와 연결되어 사용함



(a) 2차원 모터 스테이지

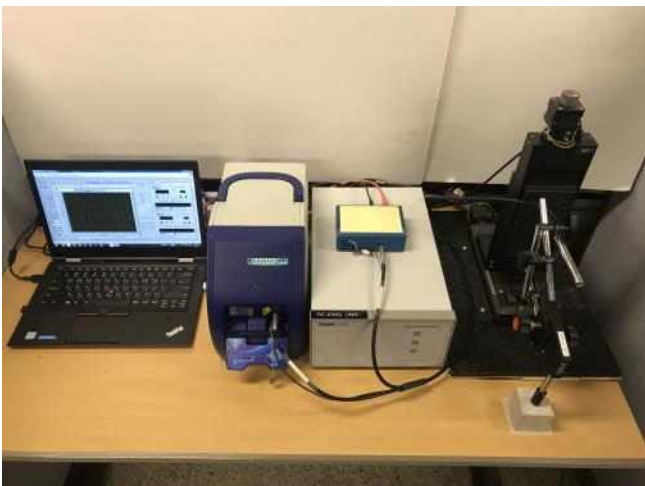


(b) 2ch 모터 스테이지 컨트롤러

<2차원 모터 스테이지 및 컨트롤러>

2.2.2.2. 2차원 맵핑 시스템 구축

위에서 설명된 라만/형광 분광 시스템과 2차원 모터 스테이지를 이용하여 최종적으로 구성된 라만/형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템은 아래 그림과 같다. 해당 장비를 이용하여 최소 $0.1\ \mu\text{m}$, 최대 100 mm만큼 라만 프로브를 정밀하게 움직일 수 있기 때문에, 응력측정위치와 레이저 초점 거리를 정밀하게 조절 가능하다. 해당 시스템 구동 프로그램도 본 연구에서 자체적으로 개발되었으나, 자세한 사항은 다음 절에서 언급하도록 한다. 본 보고서에서 언급되는 모든 라만/형광 스펙트럼은 해당 시스템을 이용하여 계측된 데이터이다.



(a) 라만/형광 분광법 기반 응력 측정 시스템



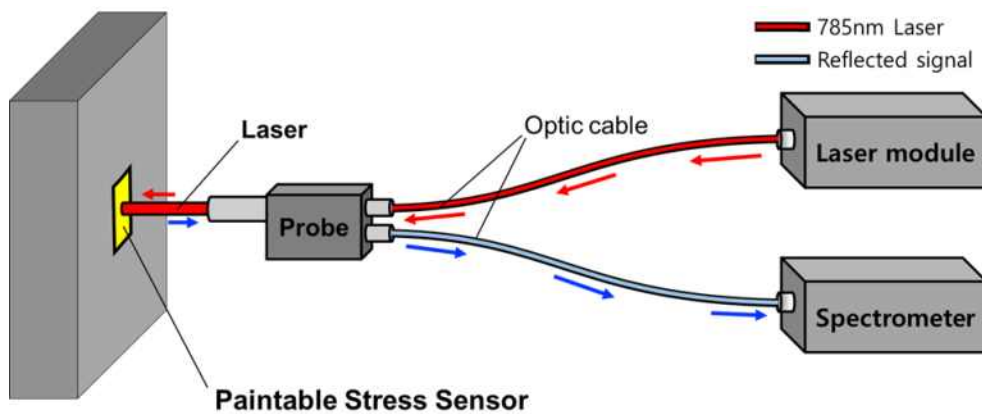
(b) 시스템 구동 화면

<라만/형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템>

2.2.2.3. 라만 분광 시스템 하드웨어 구축

1차년도에 사용했던 분광 시스템은 532nm(녹색) 파장대의 레이저를 사용하는 라만 분광 및 형광 분광 시스템이다. 532nm 파장대의 레이저의 경우, 강한 에너지를 사용하기 때문에 스펙트럼의 intensity가 높다는 장점을 갖고 있지만, 우리가 원하는 신호 이외에 배경신호 및 잡음의 intensity도 함께 높아진다는 단점을 갖고 있다. 이러한 이유로, 화학 분석에는 785nm 파장대의 레이저도 함께 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는, 2차년도 연구를 진행하는 과정에서 785nm(적색) 파장을 갖는 레이저를 사용하는 라만 분광 시스템을 구축하고, 실험에 적극 활용하였다.

아래 그림은 라만 분광 시스템의 개략도 및 각 장치별 세부 특징을 보이며, 실제 구축된 라만 분광 시스템도 함께 나타내었다. 세부 장비별 특징은 아래 설명하도록 한다. 본 장에 표기된 이외의 장비(프로브 거치대, 2차원 모터 스테이지, 2채널 모터 스테이지 컨트롤러, 맵핑 시스템), 하드웨어 구동 소프트웨어(SpectroMapper) 및 데이터 분석 프로그램은 1차년도에 개발한 시스템을 사용하거나 일부 수정하여 사용하였다.



<라만 분광 시스템 개략도>



<라만 분광 시스템>

<라만 분광기 및 레이저 모듈 세부 내용>

라만 분광기	
Spectral range	65-2800 cm^{-1}
Spectral resolution	$\sim 3.5 \text{ cm}^{-1}$ @ 912 nm
Detector type	CCD array
Pixel number	2048 detector elements
Integration time	100ms ~ 30 mins
레이저	
Laser wavelength	785 nm
Max. output power	455mW at excitation port (340mW max at probe)

① 라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈

- 두 가지 모듈이 하나로 통합된 장비로써, 아래 그림 (b)에서 좌측에 분광기, 우측에 레이저 모듈이 설치되어 있음. 본 모듈만으로는 실험을 수행할 수 없으며, 프로브와 연결해서 사용해야함
- 분광기는 slit, collimating mirror, diffraction grating, focusing mirror, CCD detector 로 구성됨



(a) 라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈



(b) 프로브 연결부

<라만 분광기 및 레이저 일체형 모듈>

② 프로브

- 시편에 레이저를 조사하고, 반사되는 신호를 취득하기 위한 장비로써, 광섬유를 이용하여 분광기/레이저와 연결됨
- 위의 프로브 내부도에 표시된 것처럼, 조사하는 레이저와 동일한 주파수의 파장을 상쇄하기 위한 필터와 다수의 렌즈로 구성됨



(a) 프로브, 광섬유 및 레이저 트리거



(b) 프로브

<라만 및 형광 분광 스펙트럼 측정용 프로브>

④ 레이저 보안경

- 사용중인 785nm의 레이저로부터 눈을 보호하기 위한 장비로써, 785-830nm 주파수 대역의 신호를 차단함



(a) 레이저 보안경 및 케이스



(b) 레이저 통과가능 주파수 대역 (785-830nm)

<레이저 보안경>

2.2.2.4. 계측/분석 프로그램 개발

① 계측 프로그램

라만/형광 분광기, 레이저 모듈, 2차원 모터 스테이지는 제조사가 각기 다르기 때문에 상용 통합 플랫폼이 존재하지 않는다. 따라서, 본 연구에서는 세 가지 시스템을 통합적으로 작동하기 위하여 SpectroMapper v2.1 라는 계측 프로그램을 독자적으로 개발하여 사용한다.

LabVIEW를 기반으로 개발된 해당 프로그램은, 분광기 구동 파트, 레이저 구동 파트, 모터 구동 파트로 구분된다.

○ 분광기 구동 파트

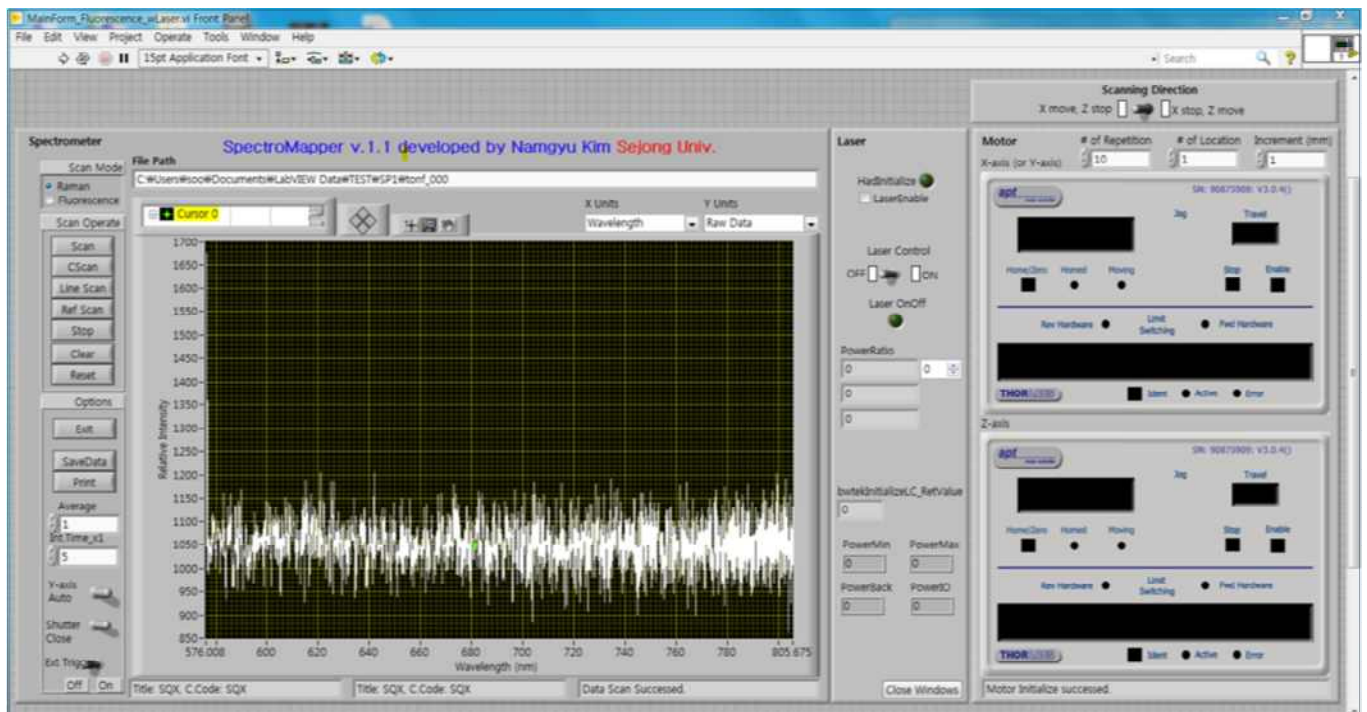
- 계측할 신호 결정가능 (라만 스펙트럼 또는 형광 스펙트럼)
- 일회계측, 다회계측, 선형 맵핑계측 기능 선택가능
- 계측 시간 조정 및 데이터 평균화 기능 탑재

○ 레이저 구동 파트

- 최대 50 mW의 레이저 출력을 총 11단계로 조절 가능
- Standalone으로 사용가능

○ 모터 구동 파트

- X 방향 스캔 또는 Z 방향 스캔 가능
- 총 계측 지점 수, 두 점 사이의 거리, 한 계측지점에서의 반복계측 수를 조절 가능
- 모터의 움직임(움직임 속도 등)을 세부적으로 조절 가능



<SpectroMapper v.2.1 (라만/형광 분광법 기반 응력 계측 프로그램)>

② 분석 프로그램

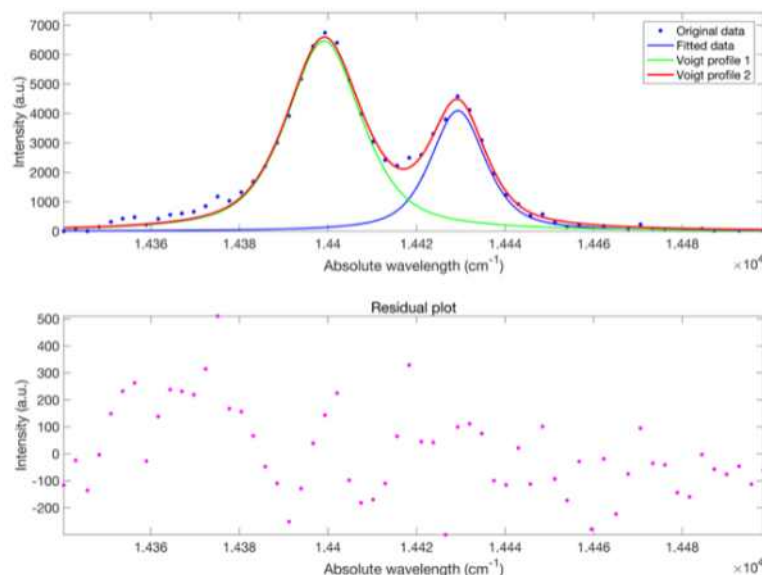
페인트가 도포된 시멘트 모르타 시편에 대한 하중 시험으로부터 수집된 다수의 라만/형광 스펙트럼들로부터 압분과 효과(하중-파수 변화)를 확인하기 위해서는, 1) ASCII code reader, 2) Background elimination, 3) Curve fitting with Voigt profile(s), 4) spectral averaging, 5) Piezo-spectroscopic (PS) coefficient calculation 의 과정이 필요하다. 본 연구에서는 많은 데이터를 효율적으로 처리하기 위하여, CPU병렬 연산기능을 이용한 데이터 처리 프로그램을 MATLAB 을 기반으로 개발하였다.

```

1 %~~~~~
2 %~~~~~
3 %~~~~~
4 %~~~~~
5 %~~~~~
6 %~~~~~
7 %~~~~~
8 %~~~~~
9 %~~~~~
10 %~~~~~
11 %~~~~~
12 %~~~~~
13 %~~~~~
14 %~~~~~
15 %~~~~~
16 %~~~~~
17 %~~~~~
18 %~~~~~
19 %~~~~~
20 %~~~~~
21 %~~~~~
22 %~~~~~
23 %~~~~~
24 %~~~~~
25 %~~~~~
26 %~~~~~
27 %~~~~~
28 %~~~~~
29 %~~~~~
30 %~~~~~
31 %~~~~~
32 %~~~~~
33 %~~~~~
34 %~~~~~
35 %~~~~~
36 %~~~~~
37 %~~~~~
38 %~~~~~
39 %~~~~~
40 %~~~~~
41 %~~~~~
42 %~~~~~
43 %~~~~~
44 %~~~~~
45 %~~~~~
46 %~~~~~
47 %~~~~~
48 %~~~~~
49 %~~~~~
50 %~~~~~
51 %~~~~~
52 %~~~~~
53 %~~~~~
54 %~~~~~
55 %~~~~~
56 %~~~~~
57 %~~~~~
58 %~~~~~
59 %~~~~~
60 %~~~~~
61 %~~~~~
62 %~~~~~
63 %~~~~~
64 %~~~~~
65 %~~~~~
66 %~~~~~
67 %~~~~~
68 %~~~~~
69 %~~~~~
70 %~~~~~
71 %~~~~~
72 %~~~~~
73 %~~~~~
74 %~~~~~
75 %~~~~~
76 %~~~~~
77 %~~~~~
78 %~~~~~
79 %~~~~~
80 %~~~~~
81 %~~~~~
82 %~~~~~
83 %~~~~~
84 %~~~~~
85 %~~~~~
86 %~~~~~
87 %~~~~~
88 %~~~~~
89 %~~~~~
90 %~~~~~
91 %~~~~~
92 %~~~~~
93 %~~~~~
94 %~~~~~
95 %~~~~~
96 %~~~~~
97 %~~~~~
98 %~~~~~
99 %~~~~~
100 %~~~~~

```

<MATLAB기반 라만/형광 데이터 처리 프로그램>



<Voigt profile를 이용한 curve fitting>

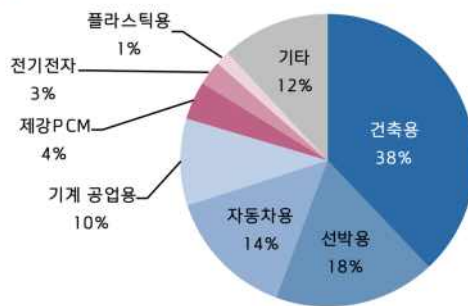
2.2.3. 응력센싱용 페인트 시편 분광검출율 측정

본 장에서는 구조물 응력센싱용 페인트를 선택하고, 2장에서 선택된 응력 센싱물질(산화알루미늄)을 페인트에 배합한 후 시멘트 모르타르 시편에 도포하고, 형광 분광법을 이용하여 분광검출율 측정 시험을 수행하였다.

2.2.3.1. 적합 페인트 선정

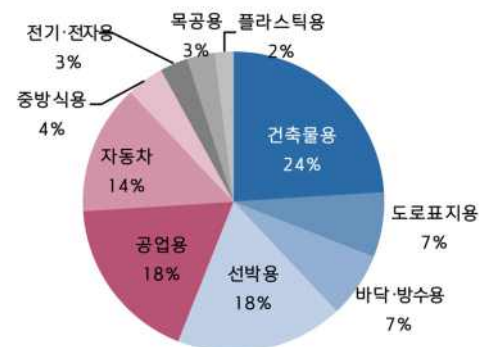
페인트는 주로 건축물용, 공업용, 선박용, 자동차용으로 많이 사용되며, 그 외에도 방수, 목공 및 도로표지용 등에 사용된다. 그 중에서도 건축물용 페인트의 수요가 가장 크며, 건축물 주요재료의 하나인 시멘트의 경우 주로 수성도료를 이용한다. 따라서 본 연구에서는, 건축용 페인트 시장 및 수성도료 페인트 시장 점유율이 높은 삼화페인트의 제품들을 실험 대상으로 선정하고, 페인트시편을 제작하였다.

페인트 용도별 시장 규모



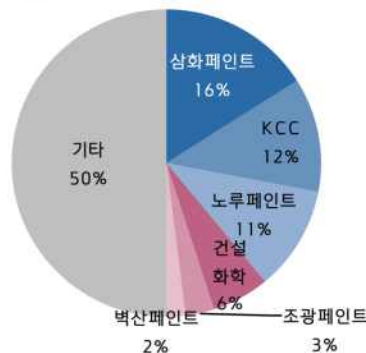
자료: 페인트유통협회

페인트 세부 수요처별 비중



자료: 키움증권 추정

건축용 페인트 시장 점유율 (2000년)



자료: 한국페인트유통협회, 키움증권

수성도료 점유율



자료: 키움증권 추정

<페인트 수요처별 비중 및 시장 점유율>

<수성 페인트 및 유성 페인트 특징>

	수성 페인트	유성 페인트
특징	- 냄새가 많음 - 건조가 빠름 - 가격이 저렴함 - 물로 희석 가능함 - 유성 페인트 위에 덧바름 불가 - 실내에 적합한 은은한 광도 많음 - 바니쉬(니스)로 마감이 필요함 - 주로 실내에 사용	- 냄새가 심함 - 건조가 느림 - 가격이 상대적으로 비쌈 - 휘발성 용제(신나)로 희석해서 사용 - 수성 페인트 위에 덧바름 가능 - 광도가 높음 (번쩍임) - 마감이 필요없음 - 주로 실외에 사용
용도	- DIY 가구 및 소품, 목재, 건물의 외벽이나 콘크리트, 몰탈(시멘트벽), 벽지 등	- 주로 건축물의 내,외부용 도장재, 철재 구조물의 부식 방지, 목재용의 마감재로 사용

아래 그림은 본 연구에서 사용된 수성, 유성 페인트 및 수성 페인트 접착에 사용되는 수성바인더를 보인다. 일반적으로 콘크리트에 사용되는 4가지의 수성페인트(P1-P4)가 사용되었고, 강재에 사용되는 유성페인트(P5)도 1종 선택되어 비교되었다. 또한, 이외에도, 접착제 및 코팅제로 쓰이는 Cotoronics사의 Ceramic adhesive(P6)와 ZYP coatings사의 스프레이 타입의 Aerosol alumina(P7)도 추가적으로 선택되어 응력 센싱 능력이 검토되었다. 여기서, P6과 P7은 응력 센싱 물질인 Alumina(산화알루미늄)를 포함하고 있다고 알려져 있다.

<페인트 시료번호 및 특징>

시료번호	용도	성분/특징	광택	시공성
P1	수성-목재 실내용	아크릴에멀전과 수용성 우레탄수지	반광	시공성 좋음
P2	수성-콘크리트 실내용	아크릴에멀전과 수용성 우레탄수지	반광	시공성 좋음
P3	수성-콘크리트 실내용	아크릴에멀전 수지	무광	시공성 중간
P4	수성-콘크리트 실외용	1종 합성수지 에멀전도료	무광	시공성 중간
P5	유성-강재용	에나멜 수지	무광	시공성 매우 좋음
P6	코팅 접착제	Ceramic alumina fiber adhesive	무광	시공성 나쁨
P7	코팅제	Aerosol alumina	무광	시공성 좋음



(a) 수성-목재 실내용 (반광)
P1



(b) 수성-콘크리트 실내용 (반광)
P2



(c) 수성-콘크리트 실내용 (무광)
P3



(d) 수성-콘크리트 실외용 (무광)
P4



(e) 유성-강재용
P5



(f) 바인더
(수성페인트 접착제)

<수성/유성 페인트 및 바인더>



(a) Ceramic adhesive
(Cotoronics 사 제품)
P6



(b) Aerosol alumina
(ZYP coatings 사 제품)
P7

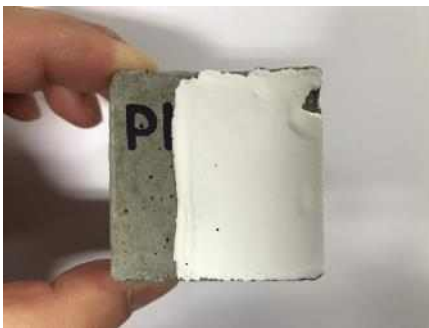
<알루미나 접착/코팅제 및 알루미나 스프레이>

2.2.3.2. 초기 형광 스펙트럼 측정

① 페인트

페인트 광택효과를 주기위하여, 일부의 경우에 산화알루미늄을 페인트 제조과정에서 첨가한다. 따라서, 페인트가 응력센싱 가능물질인 산화알루미늄을 다량 함유하고 있다면, 추가적인 산화알루미늄을 넣지 않고 응력측정 가능성을 확인할 수 있다. 즉, 형광 분광 시스템을 통하여 산화알루미늄의 선명한 첨두값을 확인할 수 있다면, 산화알루미늄을 더 추가하지 않고 압분광 효과 검증이 가능하다. 이를 확인하기 위하여, 시편 제작에 사용된 페인트를 대상으로 형광 분광실험을 수행하고, 그 스펙트럼을 분석하였다.

아래 그림은 초기 분광검출을 측정을 위하여, 시멘트 모르터 시편에 도포된 페인트 및 알루미늄 코팅제를 보인다. P1-P6의 경우에는 페인트 붓을 이용하여 해당 안료를 도포하였고, P7의 경우에는 스프레이 타입이므로, 시편 상단 약 30cm 지점에서 알루미늄을 스프레이 하였다. 여기서, 그림 속 시료 표면에 마커(검정, 혹은 붉은색)로 표기된 시료번호는 무시한다.



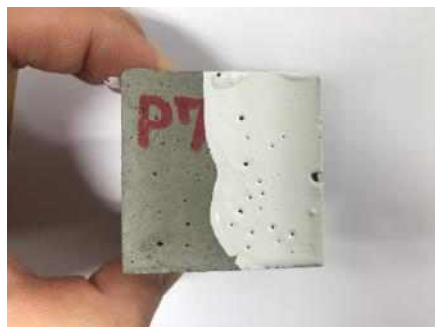
(a) P1



(b) P2



(c) P3

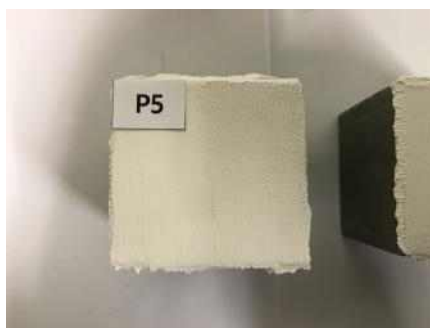


(d) P4



(e) P5

<수성/유성 페인트가 도포된 시멘트 모르터 시편>



(a) P6



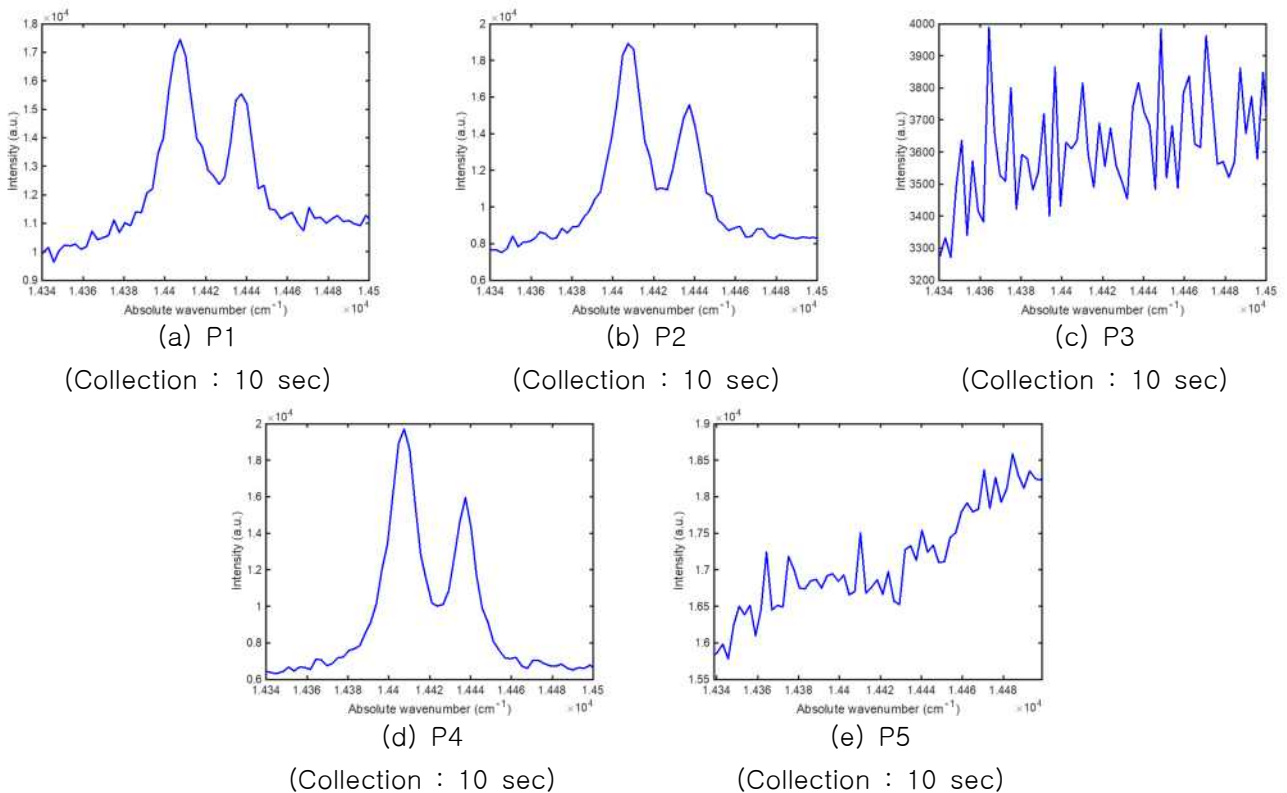
(b) P7

<알루미늄 코팅제가 도포된 시멘트 모르터 시편>

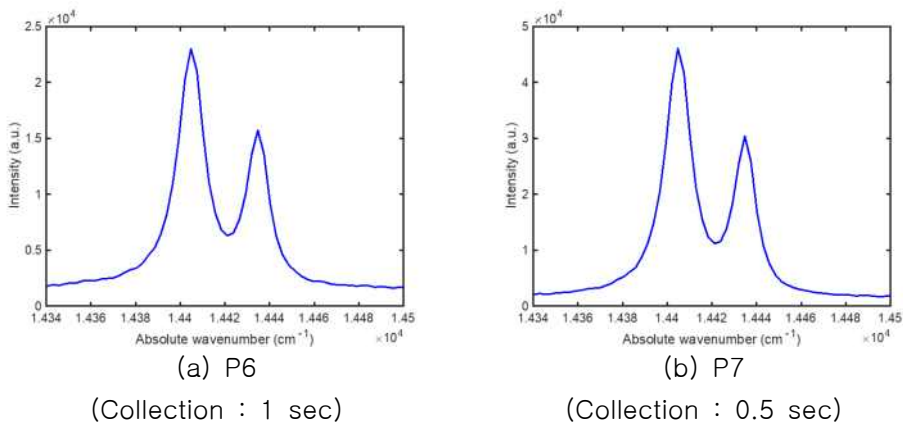
아래 그림은 시험에 사용된 페인트로부터 측정된 대표적인 형광 스펙트럼들을 보인다. P1-P5에 해당하는 형광스펙트럼은 한 곳에서 10초 동안 계측된 스펙트럼을 보이며, P6, P7의 경우에는 10초 동안 계측할 경우 데이터가 saturation되어, 각각 1초, 0.5초 동안 계측된 스펙트럼을 나타내었다.

아래 그림에서 보이는 것처럼, 대부분의 수성페인트의 경우에는 형광스펙트럼에서 표적 침투값 ($14,402\text{ cm}^{-1}$, $14,432\text{ cm}^{-1}$)을 확인할 수 있었다. 즉, 알루미늄을 포함하고 있었다. 그 중에서도 P4 (수성-콘크리트 실외용)의 경우에 가장 많은 알루미늄을 포함하고 있음을 확인하였다. 다만, P3(수성-콘크리트 무광)과 P5(유성)의 경우에는 형광스펙트럼 상에서 알루미늄의 R1, R2 line 들을 확인할 수 없었다. 즉, P1, P2, P4의 경우에는 긴 계측시간(10초)에 대비하여, 그 분광검출율이 낮았고, P3과 P5(유성)의 경우에는 알루미늄을 확인할 수 없었다. 따라서, 페인트에 포함된 알루미늄을 응력센서로 사용하기에는 그 절대량이 부족함을 확인하였다. 다만, P6와 P7의 경우에는 해당 도료의 높은 알루미늄 비율로 인하여, 짧은 계측시간에도 불구하고 높은 분광검출율을 보임을 확인할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 P1-P5 페인트에 대해서는 산화알루미늄 분말을 추가적으로 첨가하여 그 분광검출율(Intensity)을 확인하고, 배합비에 따른 분광검출율의 변화를 확인하며, 최종적으로 높은 배합비를 갖는 페인트 시편에 대하여 압분광 효과를 규명할 예정이다.



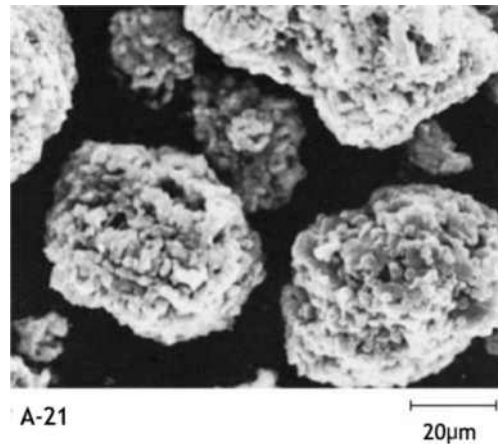
<수성/유성 페인트가 도포된 시멘트 모르타르 시편의 형광스펙트럼>



<알루미늄 코팅제가 도포된 시멘트 모르타르 시편의 형광스펙트럼>

② 산화알루미늄

본 연구에서는 페인트에 산화알루미늄 분말을 추가하는 시편을 제작하도록 한다. 연구에서 사용된 산화알루미늄은 SUMITOMO CHEMICAL 에서 생산된 제품이며, 아래 SEM 이미지와 같이 입자 크기는 약 $2\sim4\ \mu\text{m}$ 이며, 약 99.7%의 γ -산화알루미늄으로 구성되어있다. 자세한 구성성분비는 아래 표와 같다. 산화알루미늄은 라만 스펙트럼과 형광 스펙트럼을 모두 갖고 있으나, 형광 스펙트럼의 침묵값이 더 선명하고 Intensity 높기 때문에, 본 연구에서는 형광 스펙트럼만을 다루도록 한다.



<알루미나 파우더 SEM 이미지>

<산화알루미늄 분말 화학 조성>

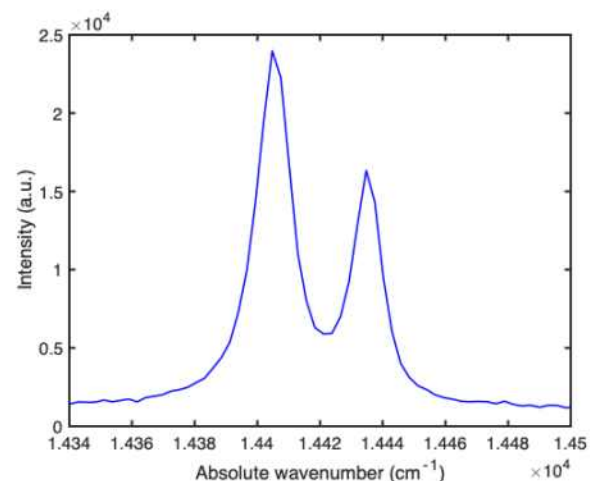
구성성분	H ₂ O	L.O.I*	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	Al ₂ O ₃
조성범위(%)	0.04	0.05	0.01	0.01	0.26	99.7

*L.O.I: Loss of ignition

아래 그림은 실험에 사용된 산화알루미늄 분말의 일부와 해당 분말시편으로부터 1초 동안 수집된 형광 스펙트럼을 보인다. 그림(a-b)에서 보이는 것처럼, 본 실험에서 사용된 산화알루미늄은 순백색을 띄며, 일반적으로 알려진 산화알루미늄의 형광 스펙트럼과 동일하게 $14,402\ \text{cm}^{-1}$, $14,432\ \text{cm}^{-1}$ 에서 침묵값을 갖는다.



(a) 시편 제작에 사용된 산화알루미늄 분말



(b) 산화알루미늄 형광 스펙트럼

<산화알루미늄(Al₂O₃, Alumina) 분말 및 형광 스펙트럼>

2.2.3.3. 페인트 시편제작

① 시멘트 모르터 시편제작

페인트에 알루미나를 첨가하고, 그 비율에 따른 분광검출율을 측정하기 위해서는 원주형시편 보다는 입방체시편이 적합하다. 따라서 본 연구에서는 시멘트 모르터 시편을 ASTM specification C109/109M (the standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar)의 기준에 맞게 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 의 크기로 동일하게 제작하였다. 포틀랜드 시멘트 및 일반모래가 사용되었으며, 시편제작과정을 수월하게 하기위하여 약 1%정도의 알루미나분말이 배합과정에 포함되었다. 모든 경우에 대하여 시멘트:모래:물의 비율은 1:2.45:0.485로 일정하게 유지하였다. 아래 그림은 제작된 모르터 시편의 일부를 보인다.



<시멘트 모르터 시편>

② 알루미나 첨가제 함량비 결정 및 페인트 시편 제작

압분광효과의 경우, 페인트에 들어있는 산화알루미늄의 함량비의 영향을 받는다. 따라서, 그 배합비에 대한 검토가 필요하지만, 현재까지 페인트에 들어있는 산화알루미늄의 함량비를 고려하여 압분광효과를 검토한 연구는 세계적으로 전무하다. 따라서, 본 연구에서는 페인트 첨가제(산화알루미늄)가 시공성을 방해하지 않으면서, 센서의 역할도 할 수 있는 적절한 함량비를 찾고자 한다. 아래 표는 최종적으로 선택된 산화알루미늄 첨가 페인트시편의 알루미나 함량비(10%, 20%, 30%)를 보인다.

<페인트 시편 함량비 및 분류번호>

시료번호	추가 알루미나 함량비	시편 분류번호	비고
P1	10 %	P1R10	—
	20 %	P1R20	—
	30 %	P1R30	—
P2	10 %	P2R10	—
	20 %	P2R20	—
	30 %	P2R30	—
P3	10 %	P3R10	—
	20 %	P3R20	—
	30 %	P3R30	—
P4	10 %	P4R10	—
	20 %	P4R20	—
	30 %	P4R30	—
P5	10 %	P5R10	—
	20 %	P5R20	—
	30 %	P5R30	—
P6	0 %	P6	추가 알루미나 없음
P7	0 %	P7	추가 알루미나 없음

※ 여기서 비율은 페인트 중량을 기준으로한 알루미나의 상대적 비율을 의미함

페인트 시편은 총 6단계를 거쳐서 제작되었다. 첫 단계에서는 시편을 준비하고, 알콜솜을 이용하여 시편을 세척하였다. 다음으로는 페인트와 모르터 시편간의 접착력을 높이기 위하여, 바인더를 모르터 시편에 도포하였다. 유성시멘트, 알루미나 코팅, 알루미나 스프레이의 경우 바인더 도포과정은 생략되었다. 다음으로 페인트 및 알루미나를 계량하고, 시멘트 모르터에 알루미나가 포함된 페인트를 1회 도포하였다. 여기서, 초기에는 페인트를 롤러를 이용하여 도포하였으나, 일관적인 시편을 만들기 어려움이 있었다. 따라서 본 연구에서는, 미술용 붓을 이용하여 알루미나가 포함된 페인트를 모르터 시편에 도포하였다. 또한, 균질한 시편 제작을 위하여, 물(또는 신나)로 페인트를 희석하는 과정은 생략되었다. P6, P7의 경우에는 알루미나를 추가로 넣지 않았으며, P6의 경우에는 P5와 동일한 방법으로 페인트가 모르터 시편에 도포되었고, P7의 경우에는 시멘트 모르터 표면으로부터 30cm를 이격하여 알루미나 스프레이를 분사하였다. 분광검출을 측정을 위하여, 모든 시편은 최소 7일 이상 상온에서 건조되었다.



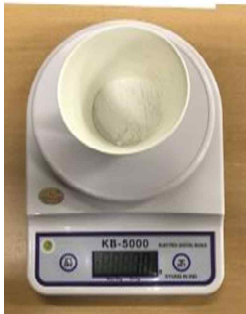
(a) 시편 준비



(b) 바인더 도포(수성의 경우)



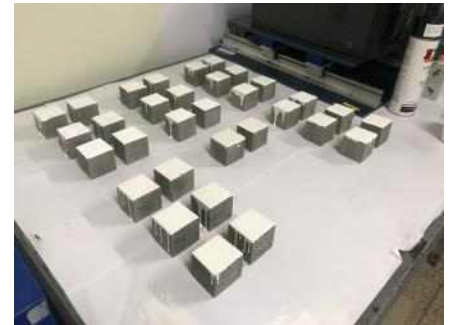
(c) 페인트 계량



(d) 알루미나 계량



(e) 페인트 도포



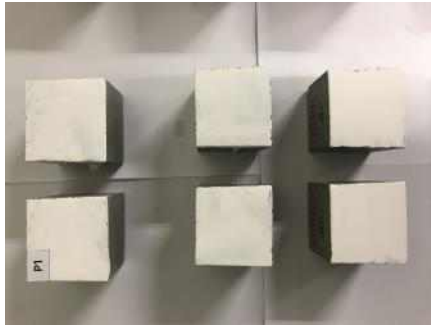
(f) 건조

<페인트 시편 제작 과정>

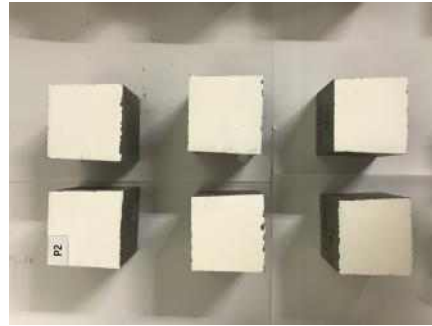


<알루미나 스프레이의 경우>

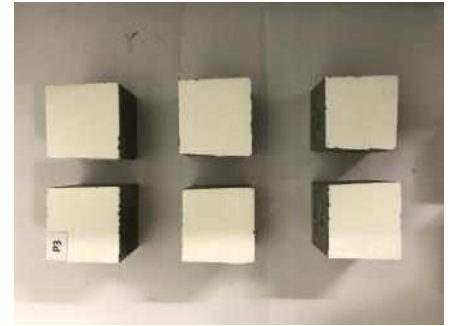
아래 그림은 최종적으로 제작된 페인트 시편의 일부를 보인다. P1시편의 경우, 페인트를 1회만 도포하였기 때문에 일부 시멘트 모르터 표면에 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 알루미나의 비율이 30%인 경우에는 같은 페인트인 경우에도 높은 알루미나 비율로 인해 시멘트 모르터 표면의 비침이 사라짐을 확인할 수 있다.



(a) P1



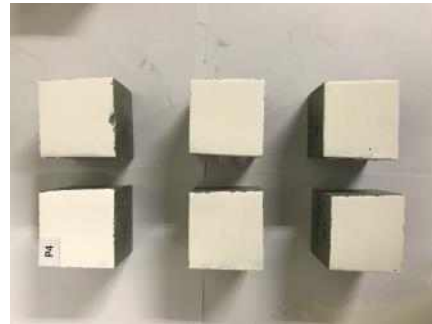
(b) P2



(c) P3



(d) P4

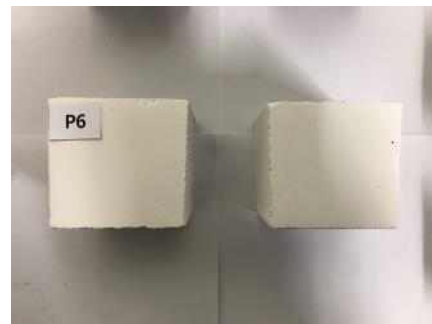


(e) P5

<완성된 수성/유성 페인트 시편(P1-P5)>



(a) P6



(b) P7

<완성된 알루미나 코팅 시편 (P6-P7)>

③ 첨가제가 포함된 페인트 시편 제작시 주의사항

수성페인트 시편을 제작할 때, 페인트를 롤러를 이용하여 도포할 경우, 그림(a)에 보이는 것처럼, 시편의 일부분에는 페인트가 잘 도포되지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 그림 용 붓을 이용하여 시편을 제작하였다. 또한 알루미늄 스프레이의 경우, 시공성도 좋고 균일한 시편을 제작할 수 있는 반면, 스프레이 분사거리가 30cm이하로 시편과 가까울 경우, 아래그림(b)와 같이, 재료의 응집현상이 일어남을 확인할 수 있었다.



(a) P1



(b) P7

<제작오류 (P1, P7)>

2.2.3.4. 측정 파라미터 선정 실험

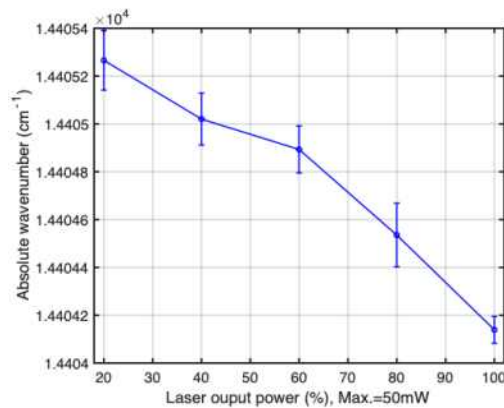
레이저를 시편에 조사하여 스펙트럼을 수집하는 경우, 레이저 출력, 레이저에 의한 표면 온도변화 등이 결과값에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 절에서는 파라메트릭 스터디를 통하여, 재료시험 및 압분광 효과 규명에 일관적으로 사용할 파라미터를 결정하였다. 앞 장에서 소개된 형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템(아래 그림)과 분석 프로그램을 이용하여 각각 형광 스펙트럼을 수집하고 분석하였다.



<측정 파라미터 선정 실험에 사용된 실험 셋업>

① 레이저 출력 (Laser output power)

레이저의 출력은 형광 스펙트럼 첨두값들의 Intensity에 영향을 주고, 동시에 초기 파수의 위치를 결정짓는 중요한 인자 중에 하나이기 때문에, 하중실험을 수행하기 전에 그 값에 대한 검토가 반드시 필요하다. 본 연구에서 사용하는 레이저 모듈은 최대 50mW의 출력으로 레이저 방출이 가능하며, 레이저 출력을 조절할 수 있다. 아래 그림은 레이저 출력에 따른 산화알루미늄이 포함된 시편의 초기 파수값 변화를 보인다. 이와 같이 레이저 출력이 변함에 따라, 초기 파수값도 선형적으로 같이 변화함을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는, 100%의 레이저 출력(50mW)을 모든 실험에 대하여 동일하게 사용하여, 레이저 출력으로 인한 초기 첨두값의 차이를 상쇄하고자 한다. 여기서 낮은 레이저 출력을 사용하지 않은 것은, 레이저의 출력이 낮은 경우, 높은 intensity의 스펙트럼을 기대하기 어렵고, 대부분의 토목시설물은 실외에 건설되기 때문에, 외부에서 오는 빛에 대한 영향을 줄이기 위하여 가장 큰 레이저 출력을 사용하여 실험을 수행하였다.



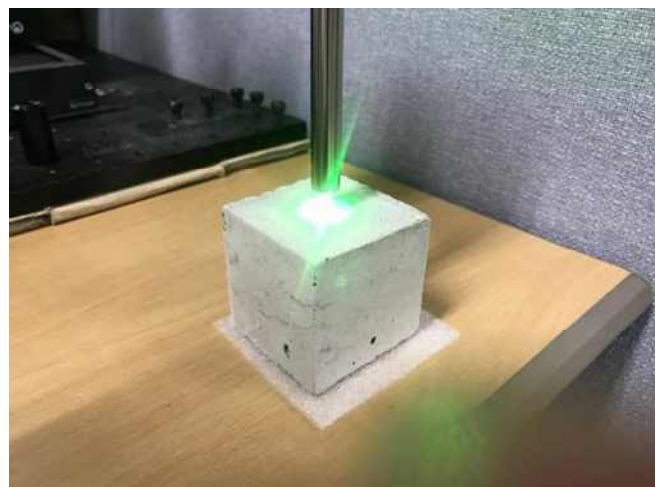
<레이저 output power에 따른 파수값 변화>

② 시편 표면 온도

레이저 조사에 의한 시편 표면온도 상승으로 파수 변화가 있을 수 있다. 따라서, 응력변화에 의한 파수 변화만을 측정하기 위하여, 아래 그림과 같이 열화상카메라를 이용하여 레이저 조사에 의한 산화알루미늄이 첨가된 페인트 시편의 발열시험을 수행하였다. 50mW의 레이저 출력으로 30초간 시편 표면에 레이저를 조사한 후, 그 온도를 측정하였으나, 레이저 조사 전/후의 온도변화는 발견할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 레이저에 의한 표면 온도변화 및 이로인해 발생하는 파수 변화는 무시하도록 한다.



(a) 레이저 조사에 의한 시멘트 발열 측정



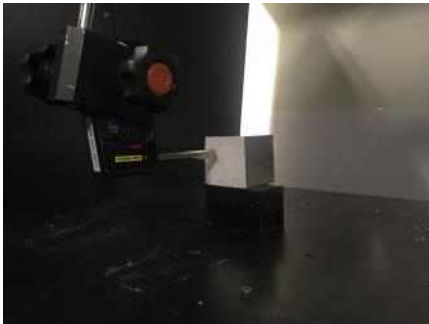
(b) 532nm 레이저가 조사되고 있는 모르타르 시편

<레이저 조사에 의한 페인트 시편의 발열 측정시험>

2.2.3.5. 페인트 시편 분광검출율 측정

① 시험 개요

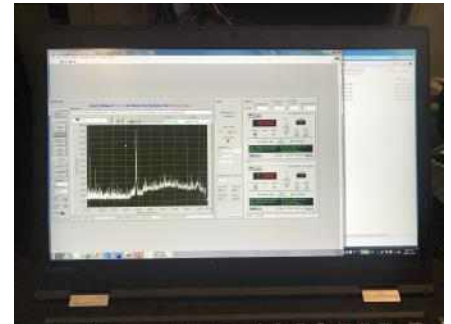
형광 분광법은 단색광 레이저를 이용한 점단위 측정기술이기 때문에 면적단위의 분광검출율을 측정하기 위해서는 2축이상의 모터스테이지를 이용하여 면적스캔(혹은 맵핑)을 수행해야 한다. 본 연구에서는 2축 모터스테이지와 결합된 형광 분광시스템을 이용하여 페인트 시편에 대한 분광검출율을 측정하였다. 아래 그림은 분광검출율 측정을 위한 시험 구성을 보인다. 분광시스템은 4.4절에서 사용된 시스템을 사용하였으며, 외부 광원으로부터 발생하는 오차를 줄이기 위하여 암실을 제작하여 맵핑 시험을 수행하였다.



(a) 초점거리 조정 및 조사 위치 결정



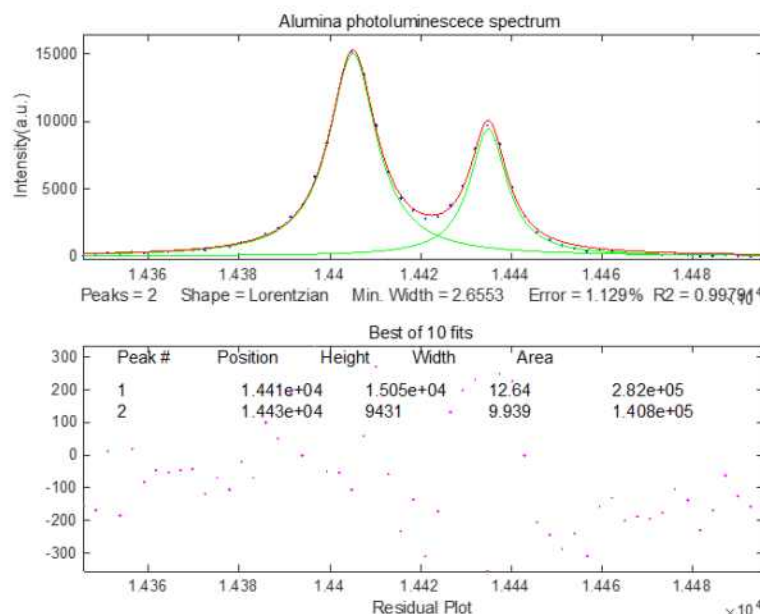
(b) 맵핑 시험 수행 (암실)



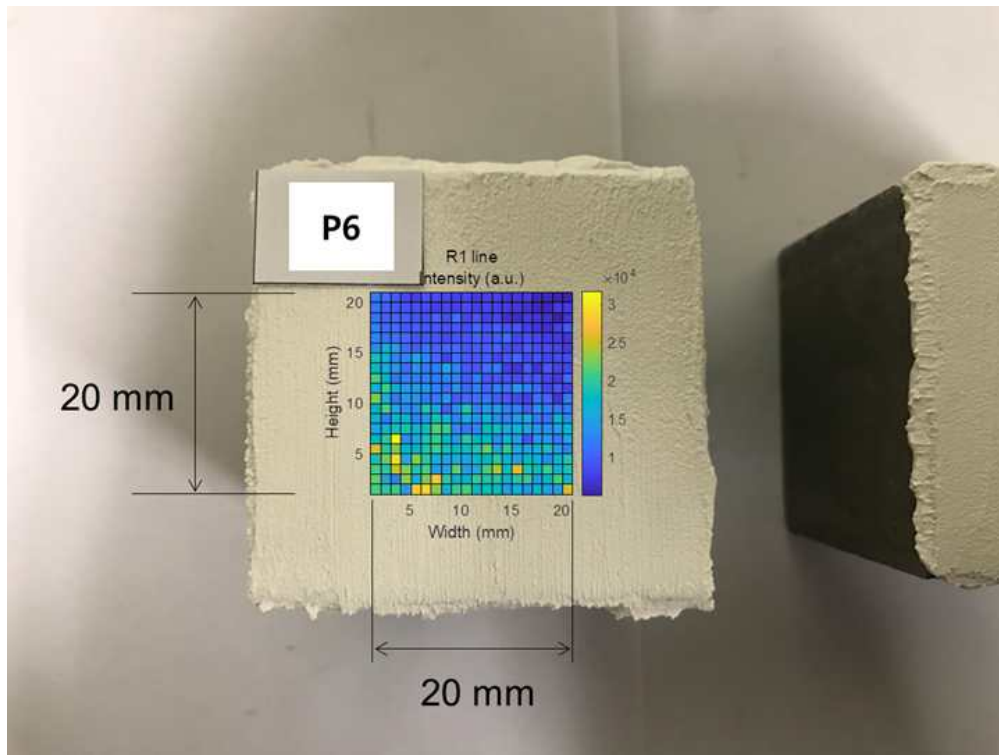
(c) 데이터 계측 수행

<분광검출율 측정시험 구성>

분광검출율은 아래 예시와 같이 페인트시편 중심부 20 mm × 20 mm 면적에 대하여 수행되었다. 각각의 시편에 대하여 441지점에 대한 맵핑 시험이 수행되었으며, 스펙트럼의 saturation을 고려하여 각 지점당 계측 시간은 1초로 설정하여 모든 페인트 시편에 대하여 동일하게 적용하였다. 다만, 알루미나 스프레이 (P7) 시편의 경우에는 intensity가 매우 높기 때문에, 예외적으로 계측 시간을 0.5초로 설정하였다. 즉, 각각의 지점에서 아래와 같이 하나의 알루미나 형광스펙트럼을 계측하게 되며, peak deconvolution과정을 통하여, R1 line과 R2 line의 intensity를 정밀하게 측정할 수 있다. 따라서, 최종적인 분광검출율은 각 시편으로부터 획득된 해당 intensity값들을 평균하여 계산하였다.



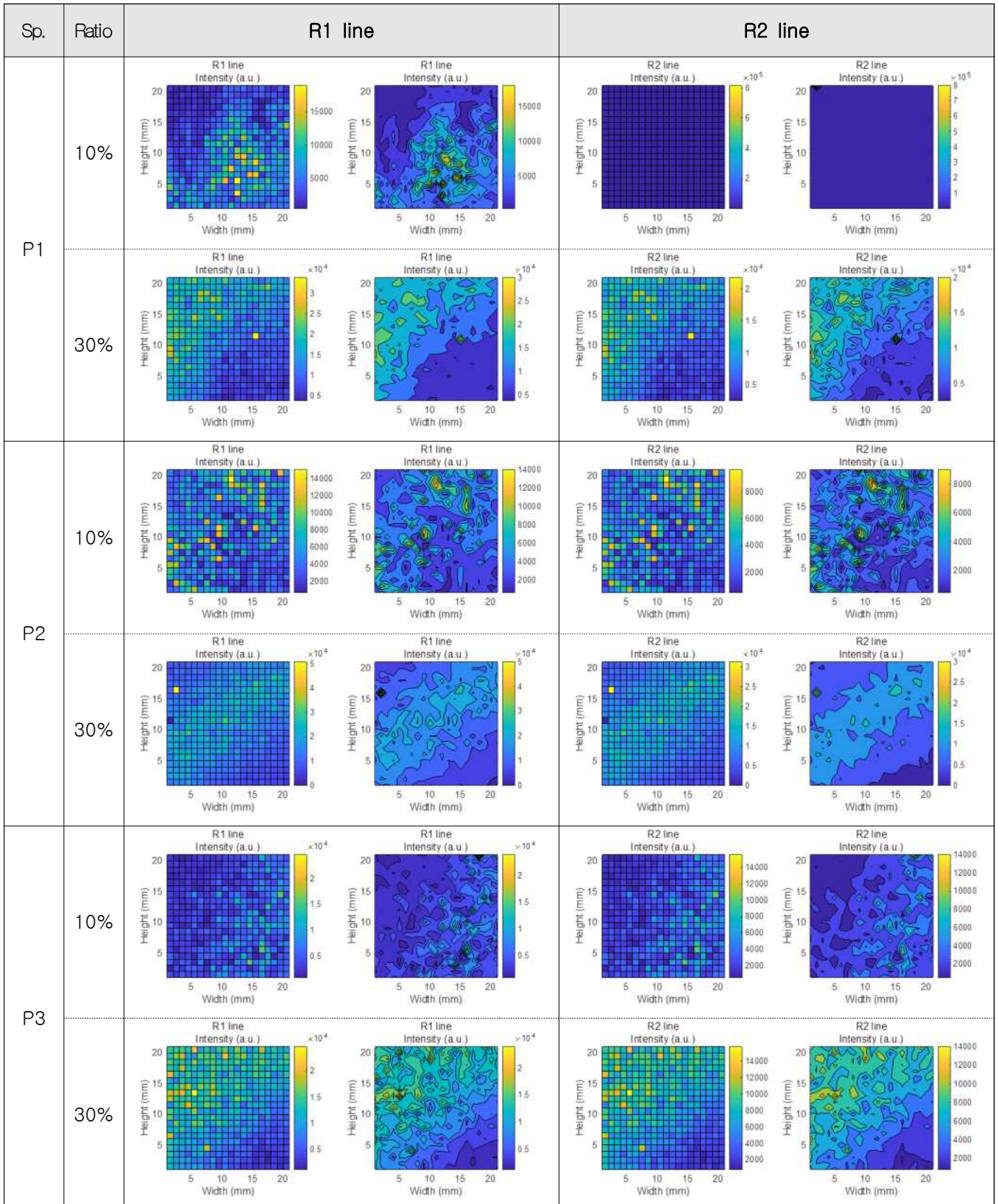
<알루미나 형광스펙트럼 peak deconvolution 과정>



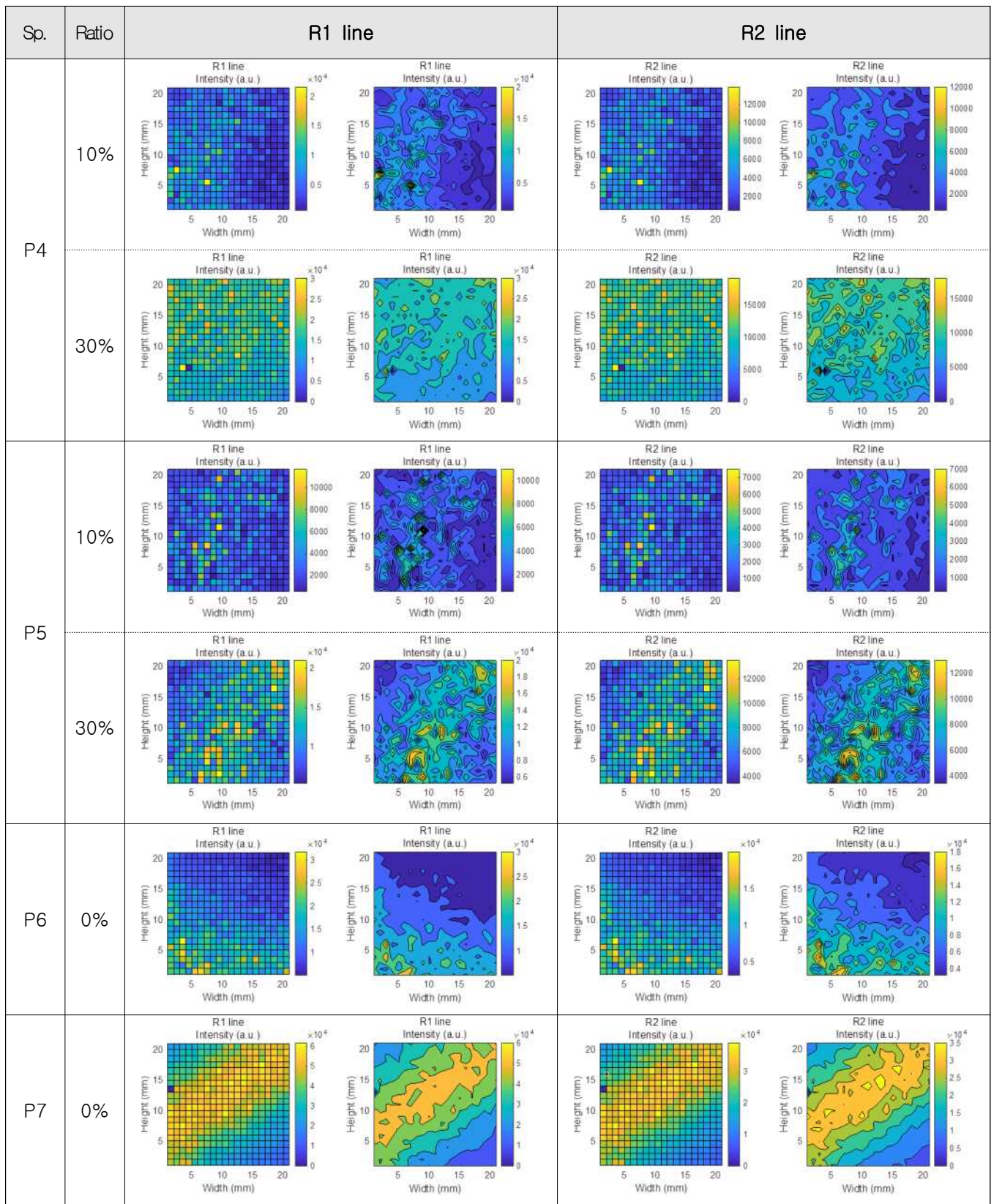
<페인트 시편 분광검출율 측정위치>

② 분광검출율 맵핑(mapping)

아래 그림은 분광검출율(즉, spectral intensity)을 맵핑한 결과를 보인다. 노란색은 높은 intensity를 의미하며, 파란색은 상대적으로 낮은 intensity를 나타낸다. 좌측 열은 R1 line에 대한 결과이며, 우측 열은 R2 line에 대한 결과를 보인다. R1 line에 대한 intensity가 상대적으로 높기 때문에 본 연구에서는 R1 line에 초점을 두고 결과를 확인하였다. 각 열당 배치된 두 개의 맵은 각각 기본맵핑결과(좌측)와 등고선맵핑결과(우측)를 보인다.



<분광검출율 맵핑 결과 (P1-P3)>

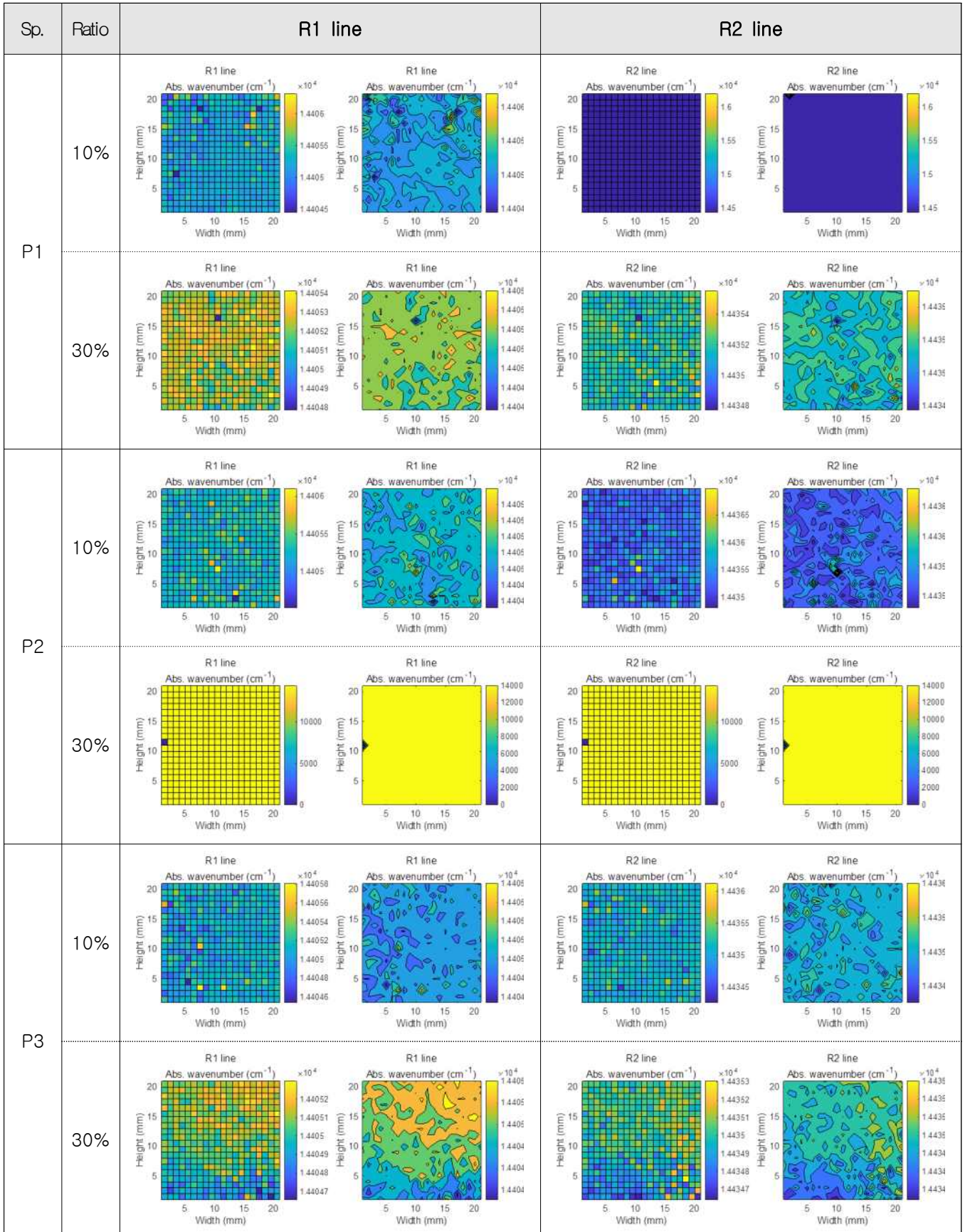


<분광검출율 맵핑 결과 (P4-P7)>

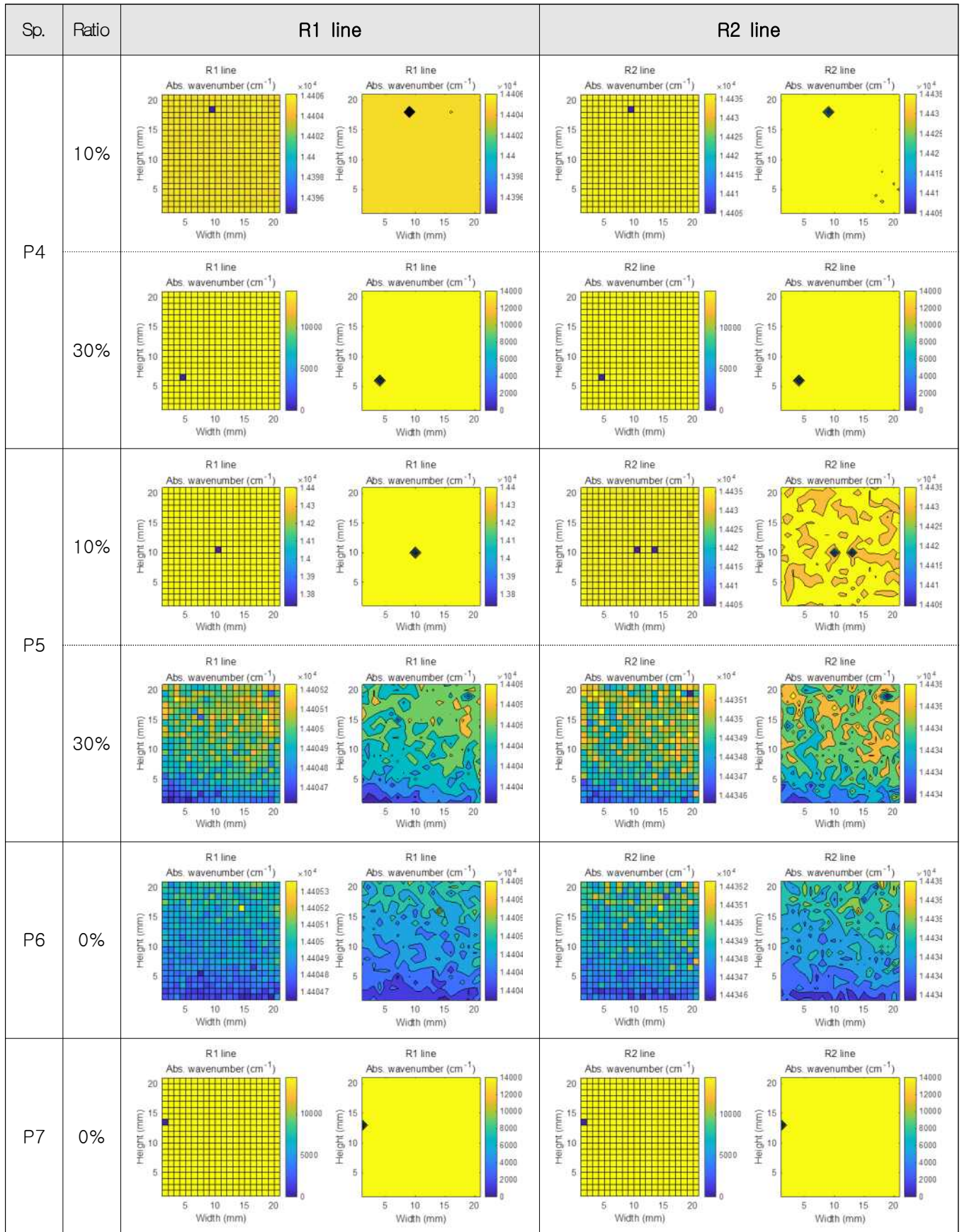
분광검출율 맵핑 시험을 통하여, 알루미늄이 10%이상 추가된 페인트 시편에서는 거의 모든 지점에서 알루미늄의 형광 스펙트럼을 수집할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 페인트에 첨가한 알루미늄의 비율이 높아질수록, 그 분광검출율(intensity)이 높아짐을 확인할 수 있었다. 이와함께, 분광검출율 맵상에서 지역적으로 intensity가 높은 부분이 존재하는 것을 통하여, 페인트를 도포할 당시에 알루미늄 분말이 일부 묻쳐있거나, 혹은 페인트 도포 두께가 일정하지 않음을 간접적으로 확인할 수 있다.

③ 초기 파수값(Absolute wavenumber) 맵핑(mapping)

초기 파수값을 통하여, 현재 페인트 표면에 작용하는 미세 잔류응력을 확인할 수 있다. 해당 잔류응력은 페인트 건조과정에서 발생하므로 2차년도에서 최종적으로 압분광계수를 구하는 과정에서 고려해야 할 인자이다. 분광검출을 맵과 동일하게, 좌측 열은 R1 line에 대한 결과이며, 우측 열은 R2 line에 대한 결과를 보인다. 각 열당 배치된 두 개의 맵은 각각 기본맵핑결과(좌측)와 등고선맵핑결과(우측)를 보인다.



<초기 Absolute wavenumber 맵핑 (P1-P3)>



<초기 Absolute wavenumber 맵핑 (P4-P7)>

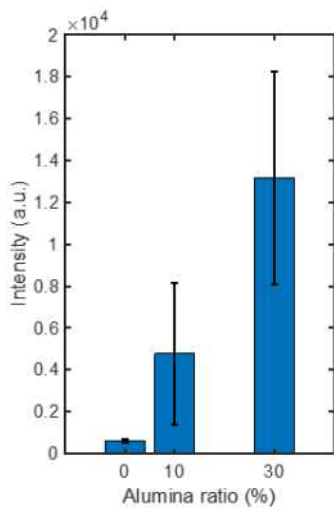
대부분의 경우에서, $\pm 0.5 \text{ cm}^{-1}$ 이내에서 초기 파수분포를 갖음을 확인할 수 있었다. 다만, P2R30 (P2, 30%), P4, P5R10 (P5, 10%)의 경우에는, 일부 지역에서 알루미늄 분광검출율(intensity)이 매우 낮아서(짙은 콘색 점) 초기 파수값 분포를 시각적으로 확인할 수 없었다. 즉, 초기 파수값이 0 (혹은 매우 낮은값)이 되어, 그 외 지역이 모두 노란색으로 동일하게 표시되었다.

④ 알루미나 함량별 분광검출율

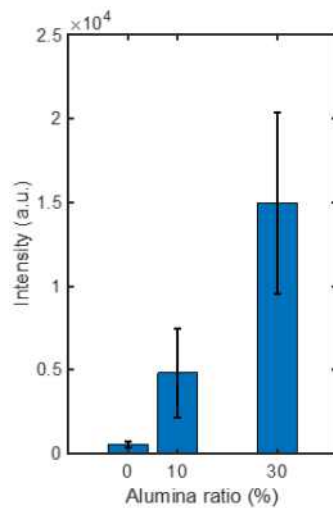
분광검출율(intensity)은 레이저가 조사된 지역의 산화알루미늄의 양을 의미한다. 이를 분석하기 위하여, 본 장에서는 4.5.2장에 나타난 분광검출율 맵핑결과를 페인트에 추가된 알루미나 함량비별로 나타냈다. 평균 분광검출율을 비교하기 위하여, 아래 그림과 같이 막대그래프를 이용하여 나타내었으며, y축은 평균 intensity를 나타내고, x축은 추가된 알루미나의 함량비를 나타낸다. 여기서, 평균 intensity는 R1 line에 대한 값만 사용하여 계산되었다. P6, P7의 경우에는 추가된 알루미나가 없기 때문에 Alumina ratio 0% (x축)에 대해서만 나타내었다. 추가 알루미나가 20%인 경우에 대해서는 데이터 오류로 인하여, 본 보고서에서는 나타내지 않는다. P1-P5의 경우에는 한 지점당 1초동안 계측된 데이터를 사용하였으며, P7의 경우에는 높은 intensity로 인한 데이터 saturation으로 인하여, 0.5초로 계측시간을 조정하여 사용하였다. 따라서, 해당 값의 두배를 해주면 1초 계측시간에 대한 대략적인 분광검출율을 계산할 수 있다.

P1-P5 시편에서 추가 알루미나가 없는 경우, 평균 분광검출율은 1,000 이하였으나(P3, P5의 경우 0), 추가 알루미나의 함량비가 10%인 경우에 평균 분광검출율이 약 5,000 으로 상승한 것을 모든 경우에서 확인할 수 있다. 또한, 알루미나 함량비가 30%인 경우에는 약 10,000 이상의 분광검출율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 높은 산화알루미늄 함량비를 가질 경우에 형광 스펙트럼의 검출율(Detectability)이 좋아짐을 확인할 수 있었으며, 그 관계는 선형임을 아래 그림을 통하여 확인할 수 있다.

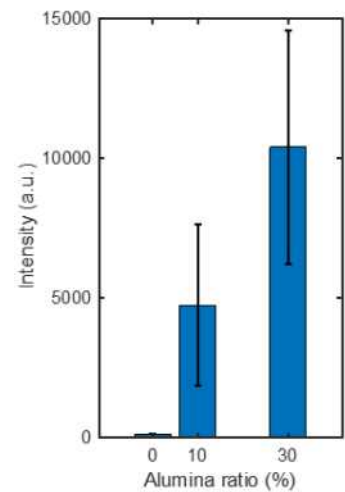
분광검출율은 데이터 계측시간과 데이터 분석 정확도에 관련이 있기 때문에, 압분광 법에서 매우 중요한 지표이다. 즉, 분광 검출율이 낮을 경우, (혹은 일부만 높은 분광검출율을 가질 경우) 실험적으로 데이터 계측이 어렵고, 데이터 분석하는 과정에서 응력 값이 일관적이지 않을 가능성이 크다. 따라서, 2차년도에 시편의 압분광계수를 계산하는 과정은 알루미나 함량비가 최소 30% 이상인 시편에 대해서 수행하도록 한다.



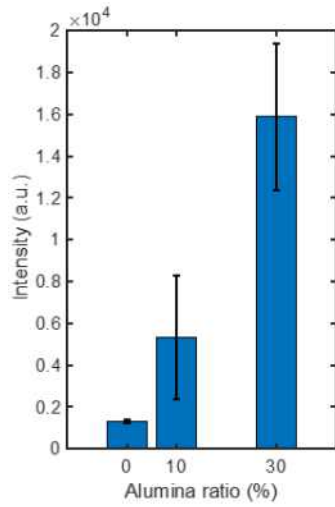
(a) P1
(Collection time : 10 sec)



(b) P2
(Collection time : 10 sec)

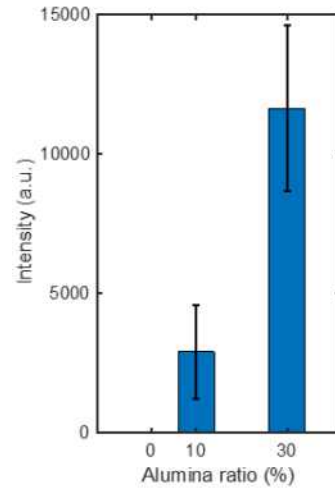


(c) P3
(Collection time : 10 sec)



(d) P4

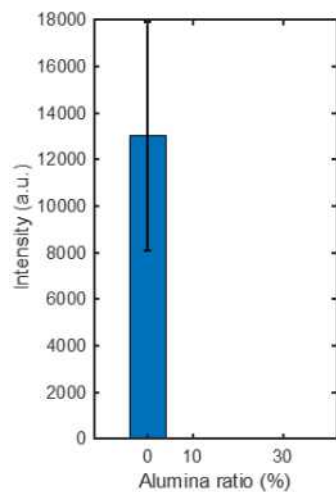
(Collection time : 10 sec)



(e) P5

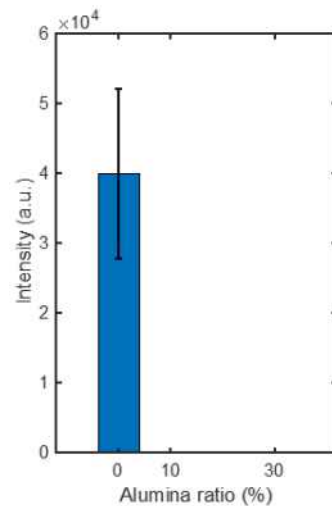
(Collection time : 10 sec)

<산화알루미늄 함량비에 따른 스펙트럼 선명도(Intensity) 비교 (P1-P5)>



(a) P6

(Collection time : 1 sec)



(b) P7

(Collection time : 0.5 sec)

<산화알루미늄 함량비에 따른 스펙트럼 선명도(Intensity) 비교 (P6-P7)>

2.2.3.6. 소결

본 장에서는 수성/유성 페인트 및 알루미나 코팅재에 대한 재료 실험을 수행하고, 여러 가지 알루미나 함량비(0%, 10%, 20%, 30%)를 갖는 페인트를 모르타 시편에 도포하여 실험 시편을 제작하였다. 실험에 사용된 파라미터(계측시간, 레이저 출력값, 온도 등)는 본시험 이전에 정의 되었으며, 모든 실험에서 동일하게 적용되었다. 다만, 스펙트럼 계측 시간의 경우에는 장비 한계를 고려하여 일부 수정(P7)하였다.

수성페인트의 경우에는 P3을 제외하고 다른 수성페인트의 경우에는 기본적으로 알루미나가 포함 (약 1,000의 intensity)되어있음을 실험적으로 확인하였으며, 특히 외부용 수성페인트인(P4)의 경우에는 다른 실내용 수성페인트보다 월등히 높은 알루미나가 포함되어있음을 확인하였다. 다만, 실외실험 환경(외부 대기 노출, 불특정 광원 등)을 고려하여, P4의 경우에도 추가적으로 알루미나를 넣어서 그 함량비를 높였다. 수성/유성 페인트의 경우 알루미나 함량비를 높임에 따라 그 분광검출율이 선형적으로 증가하였고, 함량비가 30% 이상이었을 때, 평균 intensity가 약 10,000 이상임을 확인하였다.

본 시험 장비 및 구성 특성상, 분광검출율이 10,000 이상인 경우에 응력측정 결과가 정확하므로, 압분광 계수 분석 실험(2차년도)은 알루미나 함량비가 최소 30% 이상인 시편에 대해서 수행하도록 한다. 다만, 장비의 한계를 고려하여 함량비의 최대값 또한 제시될 예정이다.

2.2.4. 페인트-모재 응력전달관계 규명

2.2.4.1. 실험 구성

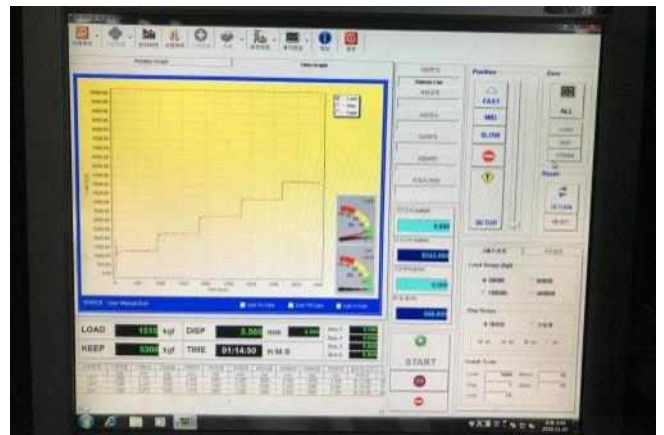
페인트-모재간의 응력전달관계를 규명하기 위하여, UTM장비를 이용한 압축하중시험을 수행하였다. 아래 장비는 300톤급 규모의 UTM 장비와 형광 분광 시스템을 보인다. 해당 장비를 이용하여 페인트 시편에 압축하중을 인가하고, 시편의 전면부(페인트면)와 후면부(페인트가 없는면)에서 측정된 변형률을 비교하여, 페인트-모재 간의 응력전달관계를 규명하였다. 추가적으로, 형광 분광 시스템을 이용하여 하중이 인가된 페인트 시편 표면에서 발생하는 형광 스펙트럼을 수집하고, 그 데이터를 분석하여 압분광 효과를 규명하였다.



(a) Universal testing machine



(b) UTM 컨트롤러

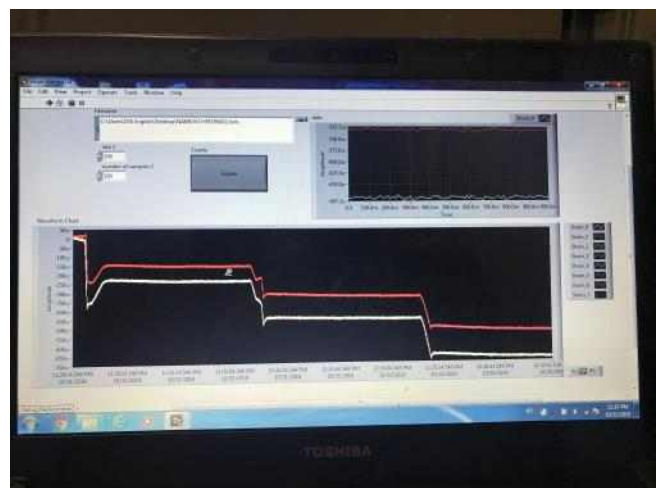


(c) UTM 구동 프로그램

<페인트 압분광 효과 규명을 위한 UTM 셋업 (300tonf 급)>



(a) 변형률 측정 장비 (사진 최우측)



(b) 변형률 측정 코드

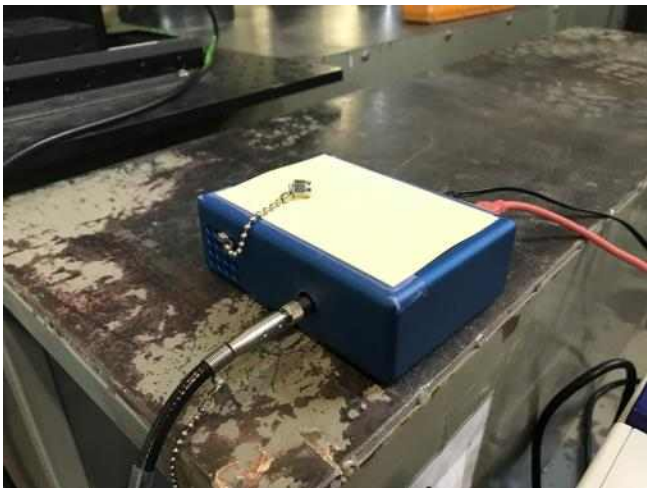
<페인트-모재 응력 전달 규명을 위한 변형률 계측 시스템>



(a) 실험 구성 전경



(b) 532nm 레이저



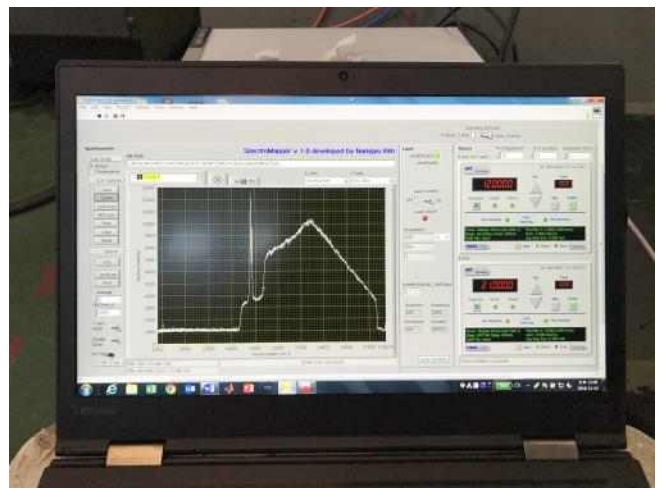
(c) 분광기



(d) 모터스테이지 컨트롤러

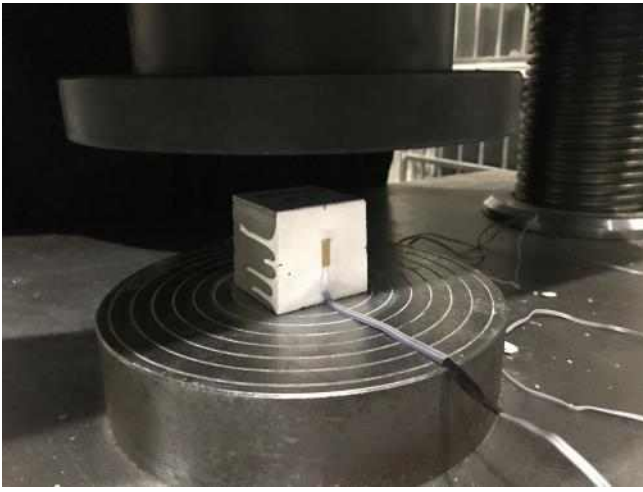


(e) 2차원 모터스테이지 및 프로브



(f) 시스템 구동 프로그램

<페인트 압분광 효과 규명을 위한 분광기 시스템>



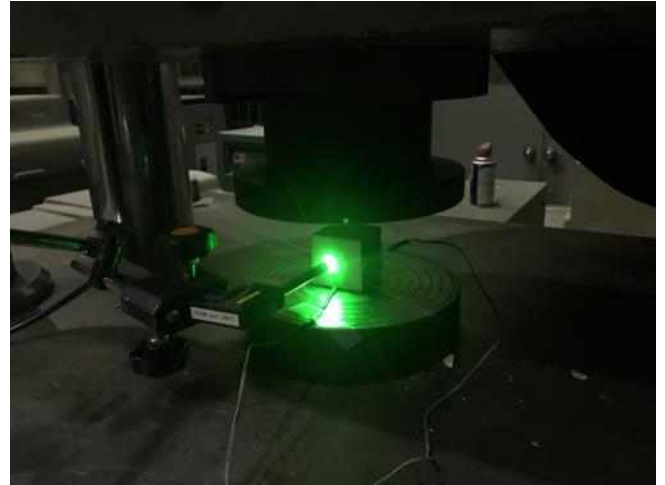
(a) 변형률계 설치-페인트 표면



(b) 변형률계 설치-모르터 표면



(c) 변형률계가 설치된 페인트 시편



(d) 레이저 조사중인 페인트 시편

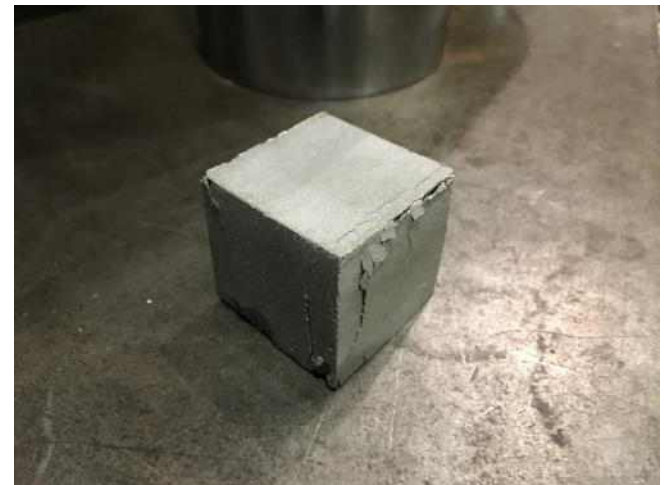
<페인트-모재 응력 전달 규명을 위한 시험 구성>

2.2.4.2. 압축하중시험 설계

압축하중시험에 사용될 최대 하중의 크기를 선정하기 위하여, 모르터 시편에 대한 압축강도측정 실험을 수행하였다. 아래 그림은 시멘트 모르터 압축강도 실험 및 압축강도 실험 후 파괴된 시편을 보인다. 실험결과, 평균적으로 약 20 tonf (78 MPa)의 압축력이 시편에 인가된 이후에 시편이 파괴됨을 확인하였다. 따라서, 선형구간에서의 응력 전달 및 압분광 효과를 구명하기 위하여, 본 연구에서는 최대 40 MPa 이하의 하중을 5단계로 나누어 시편에 인가하도록 한다.

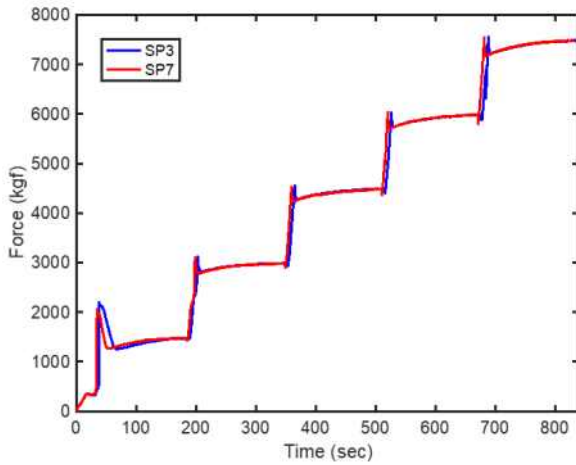


(a) 시멘트 모르터 압축강도 실험

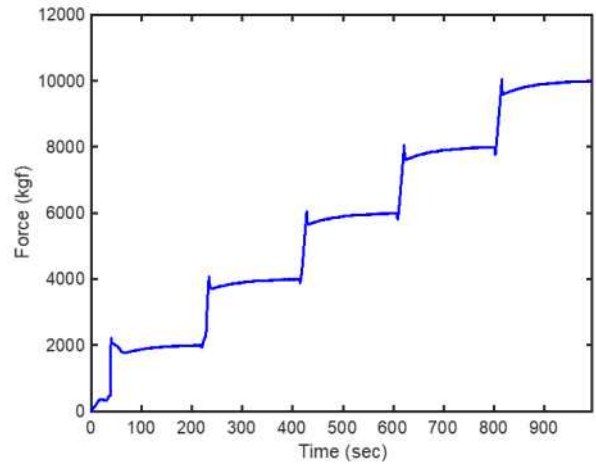


(b) 압축강도 실험 후 파괴된 시편

<시멘트 모르터 시편 파괴 실험>



(a) P3(수성페인트), P7(알루미나 스프레이)



(b) P5(유성페인트)

<페인트-모재간 응력 전달 규명을 위해 설계된 압축하중 단계>

2.2.4.3. 응력전달관계 규명 및 압분광 효과 검증

페인트-모재간의 응력전달관계를 규명하고, 압분광 효과를 검증하기 위하여, 위 절(5.2)에서 정의된 압축하중을 페인트가 도포된 시편에 인가하고, 각 단계별로 변형률(페인트, 모재)과 형광 스펙트럼 데이터를 수집하였다. 응력전달관계는 대표적 시편 3종류(P3, P5, P7)에 대하여 진행되었다. 수성페인트의 경우, 바인더에 의해 모재와 페인트의 접착력이 결정되므로, 이를 고려한 응력전달관계를 규명하기 위하여 수성페인트 1종(P3)이 시험시편으로 선정되었다. 유성페인트의 경우 모재와 페인트가 직접 접착되므로 유성페인트 1종(P5)도 응력전달관계 규명을 위해 선택 되었으며, 알루미나 코팅제 중에서 시공성이 좋고, 상대적으로 피막 두께가 얇은 알루미나 스프레이 시편(P7)도 최종적으로 시험 시편으로 선정되었다.

변형률의 경우 1초에 100개의 데이터를 계측(100Hz)하였고, 시편의 크기를 고려하고, 미소면적에 대한 변형률을 측정하기 위하여 강재에 주로 사용되는 변형률계를 페인트 표면 및 모르터 시편 표면에 부착하여 실험을 진행하였다.

형광 스펙트럼의 경우에는 레이저 조사면적($d=0.085\text{mm}$)에 해당하는 지점에서의 스펙트럼을 수집하게 되므로, 매우 작은 지점($d=0.085\text{mm}$)에서 스펙트럼을 수집하게된다. 따라서, 하나의 스펙트럼으로부터(혹은 한 지점에서) 도출된 값을 해당 지점의 대표응력으로 산정하기에는 무리가 있다. 따라서, 본 연구에서는 약 1.6 mm 정도를 20등분하여 총 20개의 지점에서 형광스펙트럼들을 수집하고, 이로부터 계산되는 평균 파수값을 해당 지점에서의 응력 측정계산에 사용하려고 한다. 다시 말하면, 0.08 mm의 간격(0.05mm 겹침)으로 총 20 지점에 대한 선형스캔 방식을 이용하여 다수의 스펙트럼을 수집하고, 이를 평균화하였다.

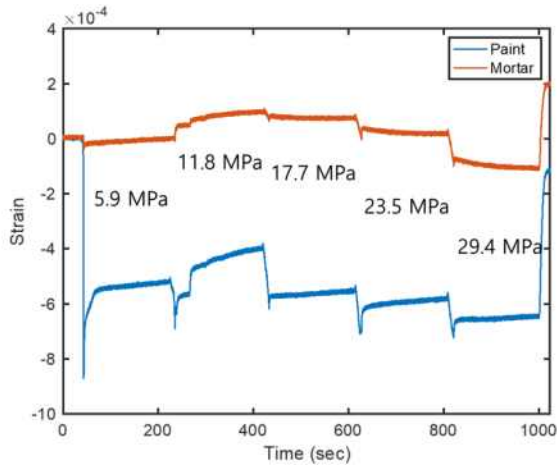
① P3 (실내용 수성페인트, 알루미나 함유량 30%)

시료 전면부(페인트 표면)와 후면부(모르터 표면)에 변형률계를 설치하고, 압축하중을 인가하여 양면에 발생하는 변형률의 크기를 비교함으로써 페인트-모재간의 응력 전달을 규명하고자 하였다.

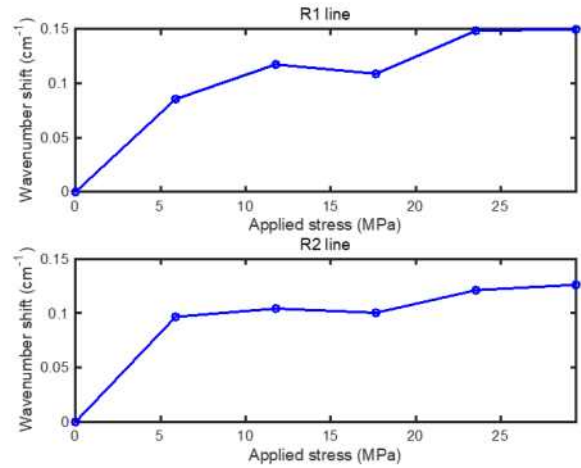
아래 그림(좌측, 붉은색실선)에서 볼 수 있는 것처럼, 5.9 MPa의 압축하중(1st step)을 모르터 시편에 인가하였을 때, 모르터 표면에는 최초 음의 방향의 변형률(압축)이 발생하였으나, 11.8 MPa(2nd step)의 압축하중이 인가된 경우, 양의 방향의 변형률(인장)이 발생한 것을 확인할 수 있다. 그 후 하중 단계(17.7 MPa, 23.5 MPa, 29.4 MPa)에서는 모두 음의 방향의 변형률이 발생한 것을 확인할 수 있다. 페인트 표면에서 측정된 변형률(좌측, 파란색)의 경우에는 변형률의 방향성은 모르터 표면에서 측정된 것과 유사하나, 그 크기의 차이가 큼을 확인할 수 있다. 이는 두꺼운 페인트 두께

또는 바인더의 접착력에 의해 발생한 응력 전달차이로 보인다.

압분광 효과 검증 실험의 경우, 압축하중이 가해지는 동안 전반적으로 R1 line의 파수가 변화함을 확인할 수 있다. 다만, 29.4 MPa(5th step)의 하중이 인가된 경우, 레이저 조사 위치 주변에 균열이 일부 발생함을 시각적으로 확인하였고, 압분광 효과 검증 실험 결과에서도 압축력이 23.5 MPa(4th step)에서 29.4 MPa(5th step)로 상승하는 구간에서 추가적인 파수 변화가 없음을 확인하였다.



<페인트-모재간 응력 전달>



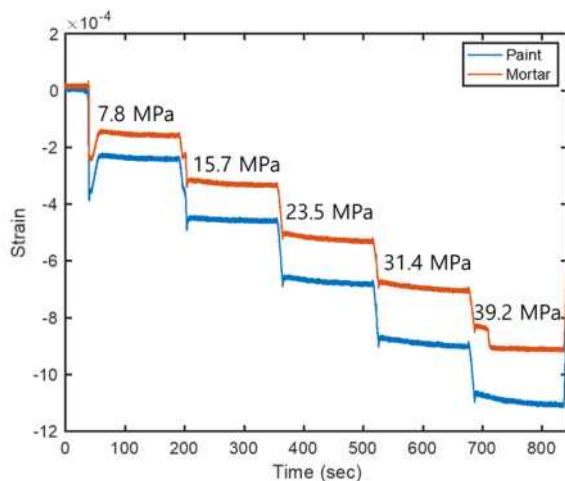
<압분광 효과 검증 실험 결과>

<P3(수성페인트) 압축하중시험 결과>

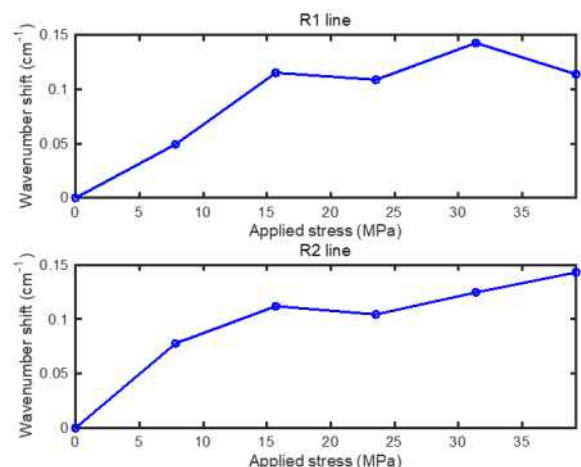
② P5 (유성페인트, 추가 알루미나 함유량 30%)

유성페인트의 경우, 수성페인트보다 약 10 MPa 정도 큰 압축하중을 시편에 가하고, 그때 발생하는 응력전달 관계를 규명하였다. 아래 그림(좌측, 붉은색실선)에서 볼 수 있는 것처럼, 압축하중이 인가되었을 때, 모르터 표면과 페인트 표면에서 측정된 변형률의 경향이 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 또한, 그 크기 차이도 수성페인트보다 상대적으로 적음을 확인할 수 있었다. 따라서 유성 페인트의 경우, 페인트 표면에 인가된 변형률을 측정함으로써 모재(모르터 시편)에 가해지는 변형률을 환산하여 계산할 수 있다.

압분광 효과 검증 실험의 경우, 압축하중이 가해지는 동안 R1 line의 파수가 양의 방향으로 선형적으로 변화함을 확인할 수 있다. 다만, 23.5 MPa(3rd step)의 하중이 인가된 경우, 스펙트럼이 일부 음의 방향으로 이동하였으나, 31.4 MPa(4th step)인가 되었을 때, 다시 양의 방향으로 스펙트럼이 이동하였다. 최종적으로는 양의방향으로 선형적 거동함을 확인하였다.



<페인트-모재간 응력 전달>

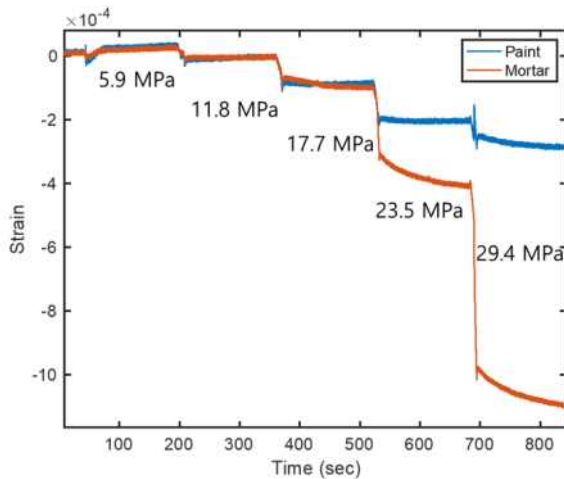


<압분광 효과 검증 실험 결과>

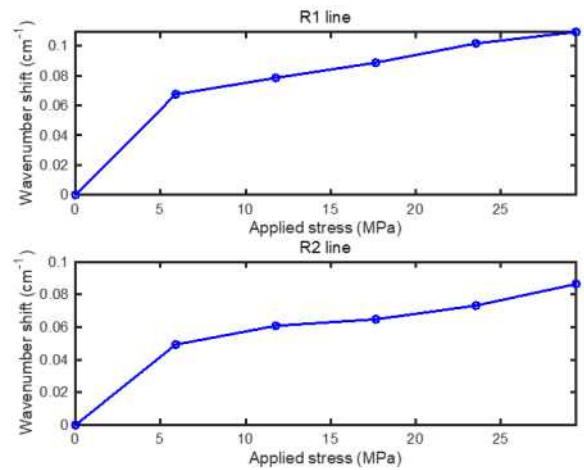
<P5(유성페인트) 압축하중시험 결과>

③ P7 (알루미나 스프레이, 추가 알루미나 함유량 0%)

알루미나 스프레이의 경우, 수성페인트와 동일한 압축하중을 시편에 가하고, 그때 발생하는 응력 전달 관계를 규명하였다. 아래 그림(좌측, 붉은색)에서 볼 수 있는 것처럼, 17.7 MPa(3rd step) 압축하중이 인가 될 때까지는, 모르터 표면과 페인트 표면에서 측정된 변형률의 경향이 매우 유사하고, 해당 변형률 값도 거의 같음을 확인할 수 있었다. 다만, 23.5 MPa(4th step)이 가해진 경우, 변형률계가 설치된 모르터 표면에 균열이 발생하여, 변형률값이 매우 커짐을 확인할 수 있었다. 하지만, 알루미나 스프레이가 도포된 표면의 변형률은 일정하게 증가함을 확인할 수 있었다. 압분광 효과 검증 실험의 경우, 압축하중이 가해지는 동안 R1 line의 파수가 양의 방향으로 선형적으로 변화함을 확인할 수 있다.



<페인트-모재간 응력 전달>

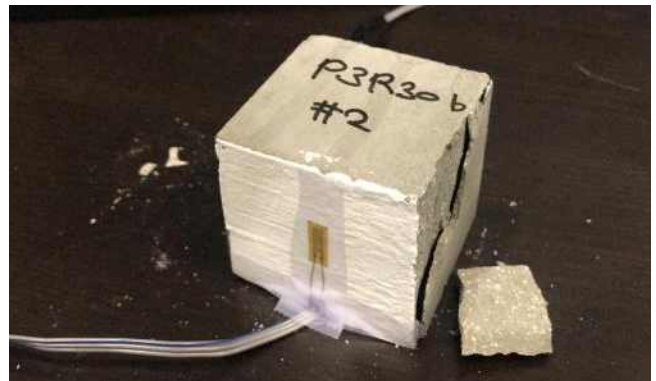


<압분광 효과 검증 실험 결과>

<P7(알루미나 스프레이) 압축하중시험 결과>

2.2.4.4. 토의

1차년도 연구목표는 첨가제에 따른 페인트의 분광검출율을 분석하고, 페인트-모재간의 응력전달을 규명하는 것이다. 2차년도에는 1차년도에 결정된 첨가제 비율을 바탕으로 실험 시편을 제작하고, 압분광현상을 분석하며, 압분광 계수를 구하는 것이 최종적인 목표이다. 1차년도 연구 수행과정에서 페인트층에 대한 압분광현상을 일부 기수행하고 그 결과를 5.3에 나타내었다. 해당 실험과정에서 아래 그림과 같이 시편에 인가된 압축하중이 압축강도에 도달하기 전에, 시편에 균열이 발생하고, 부분적으로 파괴되는 현상을 확인할 수 있었다. 즉, P5와 P7의 실험의 경우에는 페인트가 도포된 면에 균열이 발생하여 해당 면이 떨어져 나가는 현상이 나타났다. 따라서, 이와 같은 균열이 페인트 도포면에 발생하게 되면, 하중-과수 변화 관계를 정확하게 분석하기 어렵다. 따라서, 2차년도 연구에서는 아래와 같은 압축하중시험용 입방체시편과 함께, 인장(혹은 휨)시험 시편을 함께 제작하여, 압분광현상 분석 및 압분광 계수 분석 연구를 진행하고자 한다.



<P3(수성페인트) 압축하중시험 종료 후 시편상태>



<P5(유성페인트) 압축하중시험 종료 후 시편상태>



<P7(유성페인트) 압축하중시험 종료 후 시편상태>

2.2.4.5. 소결

본 장에서는 페인트-모재간 응력전달을 규명하고, 추가적으로 압분광 효과를 규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하였다. 압분광 효과를 압축하중-변위가 선형인 구간에 대하여 규명하기 위하여, 시멘트 모르타 시편에 대한 최대강도 실험을 수행하였다. 실험결과, 본 연구에서 사용된 모르타 시편의 압축강도가 약 78 MPa 임을 확인하였다. 따라서, 이로부터 약 50%에 해당하는 40 MPa를 최대 압축하중으로 선정하고, 압축하중시험을 수행하였다.

페인트-모재간 응력전달 규명 시험의 경우, 알루미나 스프레이가 가장 우수한 응력전달능력을 보였고, 그 다음으로 유성 페인트 (P4, 30%)였으며, 상대적으로 수성페인트의 응력전달능력이 떨어지는 것을 확인하였다. 이는 수성페인트의 경우 바인더를 중간층으로 사용하기 때문에, 응력전달율이 현저히 떨어지는 것으로 판단된다. 즉, 수성 페인트의 경우, 바인더와 모재와의 접착력 및 바인더와 페인트간의 접착력이라는 불확실성이 추가로 존재하며, 페인트 및 바인더의 두께로 인하여, 변형률의 경향은 비슷하지만, 그 값이 다를 수 있다. 유성 페인트의 경우, 페인트 도포당시 작업성이 우수하였으며, 분광검출율 및 초기 파수값도 일관적이었다. 또한, 모재와 페인트의 응력전달도 매우 우수함을 실험적으로 확인하였다. 알루미나 스프레이의 경우에는 시공성도 우수하며, 코팅되는 두께가 다른 시편들보다 얇기 때문에, 압축하중상태에서 센싱부(도포된 알루미나)와 모재(모르타)가 유사한 변형률을 보임을 확인하였고, 이를 통하여 응력전달이 가장 우수함을 확인하였다.

압분광현상 규명 시험의 경우, 30MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 양의 방향으로 약 0.15 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다만, 일부 하중 구간에서는 거동이 선형적이지 않은 구간도 존재하였다.

2.2.5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발을 위하여, 페인트 첨가제를 선정하고, 최적 비율을 선정하였으며, 페인트-모재간 응력전달을 실험적으로 규명하였다. 또한, 추가적으로 페인터의 압분광 효과를 규명하는 연구를 수행하였다.

[페인트 첨가제 선정 및 비율결정]

페인트의 화학조성은 일반적으로 알려져 있지 않으나, 페인트의 광택발현을 위하여 일부 페인트의 경우 알루미늄을 첨가한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 레이저를 이용하여 수성/유성 페인트 및 알루미늄 코팅재에 대한 형광 스펙트럼을 분석하여, 일부 페인트 경우 알루미늄을 포함하고 있음을 실험적으로 검증하였다. 따라서, 페인트에 포함된 알루미늄을 응력센싱물질로 사용하여, 모재의 응력을 측정하고자 하였다. 다만, 스펙트럼의 선명도 혹은 분광검출율(intensity)을 높여 응력센싱 정확도를 높일 수 있도록, 알루미늄을 추가로 페인트에 혼합하여 그 분광검출율 변화를 관찰하였다. 그 결과, 수성/유성 페인트의 경우 알루미늄 함량비를 높임에 따라 그 분광검출율이 선형적으로 증가하였고, 함량비가 30% 이상이었을 때, 평균 intensity가 약 10,000 이상임을 확인하였다.

[페인트 압분광 효과 분석을 위한 압분광 시스템 구축]

형광시스템을 구축하고, 계측 위치와 그 초점거리를 세밀하게 조절할 수 있도록, 2차원 맵핑 시스템을 개발하였다. 또한, 계측/분석 프로그램을 자체적으로 선개발(기존 2차년도 연구범위)하여 데이터 분석을 할 수 있는 통합 시스템을 구축하였다.

[페인트-모재간 응력전달 규명 및 압분광현상 규명]

페인트-모재간 응력전달을 규명하고, 추가적으로 압분광현상을 규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하고, 페인트 시편에 대한 압축하중시험을 수행하였다.

페인트-모재간 응력전달 규명 시험의 경우, 알루미늄 스프레이가 가장 우수한 응력전달능력을 보였고, 그 다음으로 유성 페인트였으며, 상대적으로 수성페인트의 응력전달능력이 떨어지는 것을 실험적으로 검증하였다. 이는 수성페인트의 경우 바인더를 중간층으로 사용하기 때문에, 응력전달율이 떨어지는 것으로 판단된다.

압분광현상 규명 시험의 경우, 30MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 양의 방향으로 약 0.15 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다만, 일부 하중 구간에서는 거동이 선형적이지 않은 구간도 존재하였다. 이는 2차년도 연구를 통하여 구체적으로 밝혀질 예정이다.

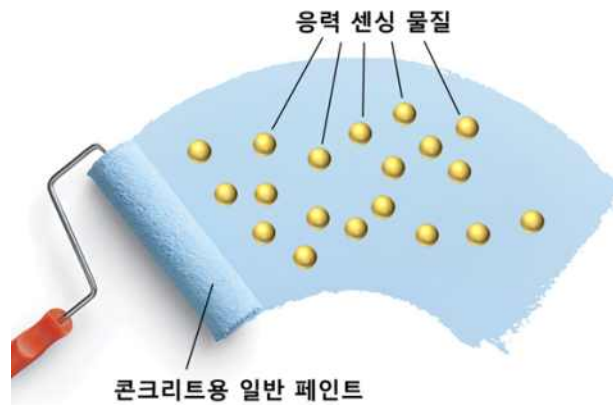
2.3. 하중시험을 통한 페인터블 센서의 피에조분광현상 규명

2.3.1. 페인터블 센서 정의

본 장에서는 본 연구를 통하여 제안하는 “페인터블 센서”에 대해서 정의하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 페인터블 센서는 두 종류이며, 각각 (1) 건설에 사용되는 도료(페인트, Paint)를 활용한 페인터블 센서, (2) 재도장이 필요 없는 접착식 페인터블 센서로 구분된다. 자세한 내용은 각 장에 나타내도록 한다.

2.3.1.1. 제안 방법 1 : 일반도료(Paint)를 기반으로 한 페인터블 센서

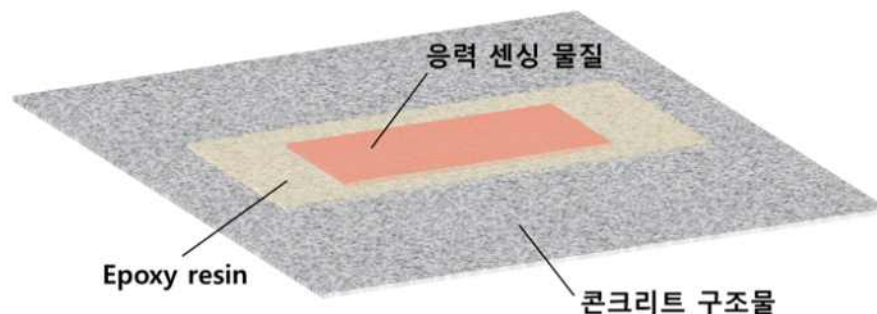
연구개발계획서 제안당시 제안했던 방법은, 일반도료를 기반으로 한 페인터블 센서이다. 즉, 일반도료에 들어있는 피에조분광현상을 갖는 물질을 이용하거나 혹은 그 물질을 더 첨가하여, 일반 페인트 자체를 응력 센서로 활용하는 방법이다. 본 방법의 경우, 페인트에 이미 많은 양이 포함되어있는 Al_2O_3 나 TiO_2 를 응력센서 직접 활용할 수 있다는 장점이 있다.



<제안 방법 1 개념도>

2.3.1.2. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서

접착식 페인터블 센서의 경우에는, 변형률계와 유사하게 대상 구조물 표면에 비접촉식 응력 센싱을 가능하게 하는 물질을 부착하고, 투명한 에폭시레진(Epoxy resin)을 이용하여 응력 센싱 물질을 대상물과 접착 및 외부 환경으로부터 보호한다. 여기서, 투명한 에폭시레진을 사용함으로써, 레이저가 응력 센싱 물질에 직접 조사(Irradiation)될 수 있도록 한다.



<제안 방법 2 개념도>

2.3.2. 페인트블센싱용 재료 선택

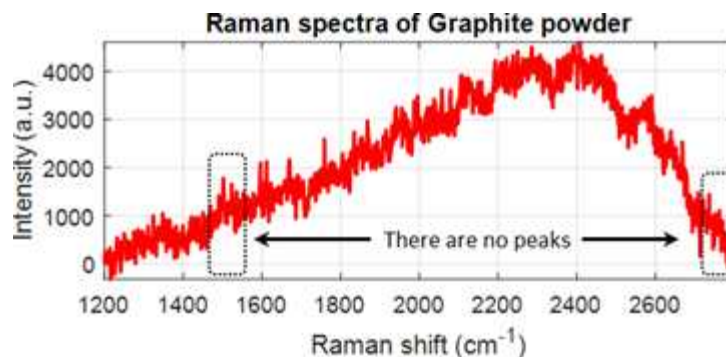
본 장에서는 페인트블센싱용 물질을 선택하는 과정을 보인다. 1차년도에도 센싱물질 선정과정을 수행하였으나, 1차년도에 사용했던 분광 시스템은 532nm(녹색) 파장대의 레이저를 사용하는 시스템으로써, 배경신호 및 잡음의 intensity가 매우 높다는 단점을 갖고 있었다. 따라서, 해당 차년도(1차년도)에는 주로 형광분광법과 관련된 연구 및 실험을 수행하였다. 2차년도에는 785nm(적색) 파장대의 레이저를 사용한 시스템을 새로이 구축하여, 라만 분광법과 관련된 내용을 보강하였다.

○ Graphite powder

흑연이라고 불리우는 Graphite는 다결정질 물질로써, 강한 라만 스펙트럼(1560 cm^{-1} , 2770 cm^{-1})을 갖는다고 알려져 있는 물질이다. 해당 물질을 본 연구에 활용하기에 앞서, 본 연구진이 보유하고 있는 Portable spectrometer에서도 동일한 분광검출율을 갖는지 실내실험(분광검출율 계측)을 통하여 확인하였다. 그 결과, 아래 그림과 같이 높은 배경신호 intensity로 인하여, 기존에 알려진 1560 , 2770 cm^{-1} 에서는 침두값을 확인할 수 없음을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 Graphite에 대한 피에조분광효과 검토는 하지 않도록 한다.



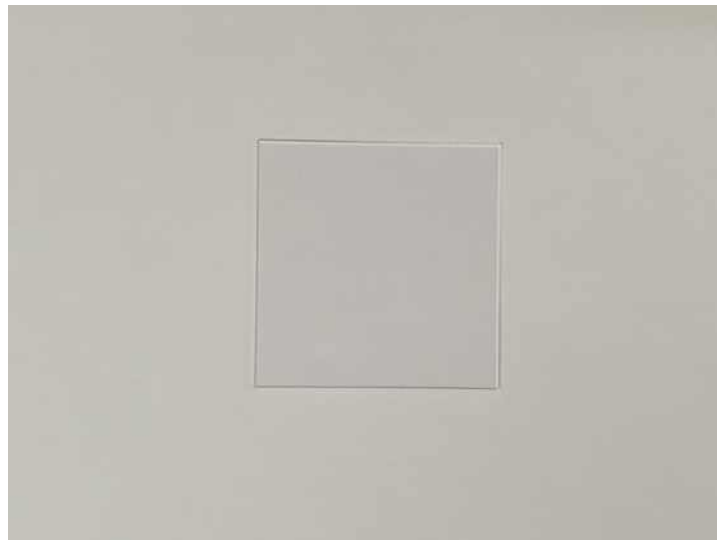
<Graphite Powder>



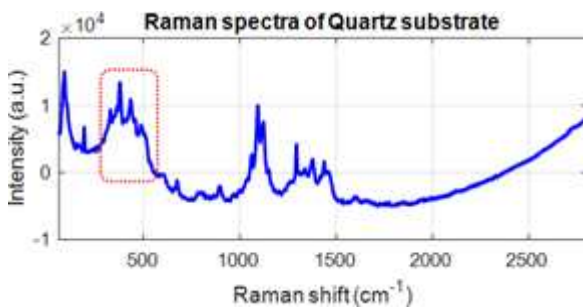
<Graphite Raman spectrum>

○ Quartz substrate

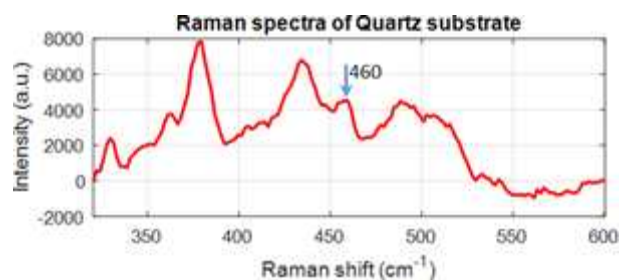
SiO₂로 잘 알려진 Quartz는 다결정질 물질로써, 라만 스펙트럼 460cm⁻¹에서 높은 첨두값을 보인다고 알려진 물질이다. 본 연구에서는 해당 물질을 구매하여, Portable spectrometer를 이용하여 Quartz substate(아래 그림, 30x30mm, 500μm두께)에 대한 분광검출을 측정 실험을 수행하였다. 그 결과, 아래 그림 (a~b)처럼 460cm⁻¹에 일부 첨두값이 확인 되지만, 응력측정에 사용할 수 있도록 독립적으로 첨두값이 위치하지 않았고(하중재하시 첨두값이 좌·우로 이동하므로 독립적으로 위치하는 것이 필요함), 그 첨두값도 다른 peak에 비하여 상대적으로 낮았다. 또한, 460cm⁻¹에 위치한 첨두값을 intensity를 높이기 위하여, focal length 조절 및 laser output power를 조절해 보았지만, 다른 값들도 함께 높아져버려 상대적인 intensity에는 별다른 변화가 없었다. 따라서 본 연구에서는 Quartz에 대한 피에조분광효과 검토는 하지 않도록 한다.



<Quartz substrate>



(a) Range (0~3000 cm⁻¹)

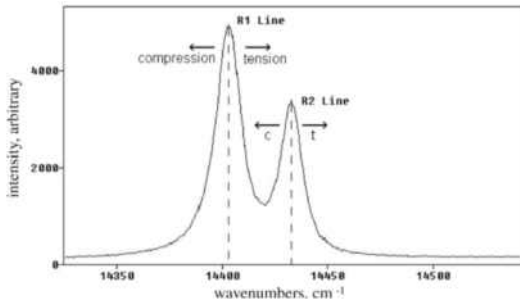


(b) Range (300~600 cm⁻¹)

<Quartz Raman spectrum>

○ Alumina powder ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)

산화알루미늄은 페인트 광택효과를 내기 위하여 페인트에 일부 포함된 물질로써, 전기 절연이 우수하고, 기계강도 및 압축강도가 높다. 또한 높은 내부식성 및 내마모성 특징으로 코팅재료로 널리 사용된다. 이와 같은 산화알루미늄은 라만 스펙트럼과 형광 스펙트럼을 모두 갖고 있으며, 라만 스펙트럼의 경우, 375, 417, 432, 450, 578, 642 and 751 cm^{-1} 에 첨두값을 갖는다고 알려져있다. 형광 스펙트럼의 경우에는 14,402 cm^{-1} 와 14,432 cm^{-1} 에서 첨두값을 갖으며, 그 압분광 현상 또한 이미 검증되었다(아래 그림 참조).

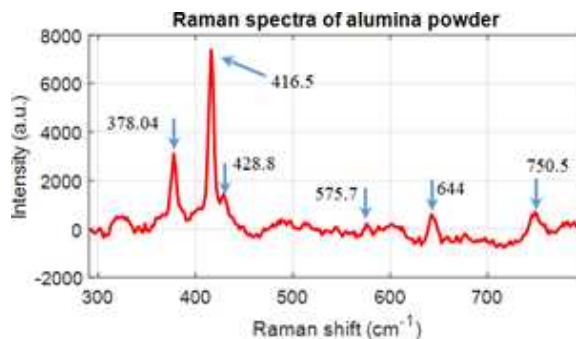


<응력이 없는 상태의 산화알루미늄 형광 스펙트럼>



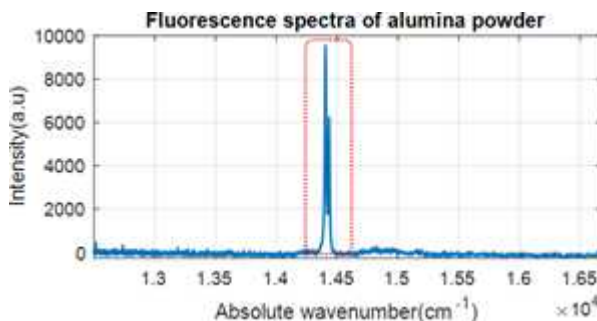
<Alumina powder>

이와 같은 산화알루미늄에 대한 실내 분광검출을 실험을 2차년도에 구축한 Portable Raman spectrometer를 이용하여 수행하였다. 그 결과, 아래 그림과 같이, 417과 378 cm^{-1} 에서 가장 높은 첨두값을 보이는 라만 스펙트럼을 얻을 수 있음을 확인하였다.

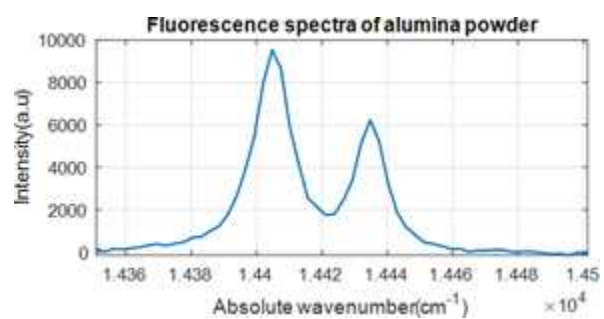


<Alumina Raman spectrum>

또한, Portable Fluorescence Spectrometer를 이용한 실험도 동일 시편에 대하여 수행하였다. 그 결과, 아래 그림과 같이, 14404, 14434 cm^{-1} 에서 매우 강력한 intensity를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 해당 물질을 이용하여 피에조분광효과를 검증할 계획이다.



(a) Range (0~16500 cm^{-1})



(b) Range (14350~14500 cm^{-1})

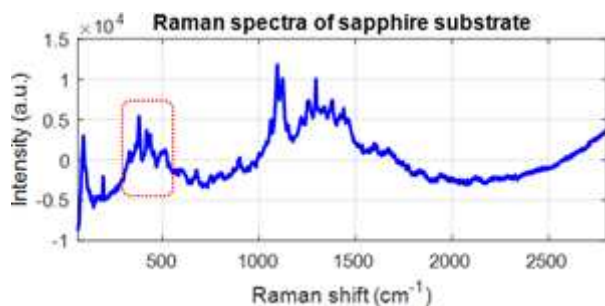
<Alumina Fluorescence spectrum>

○ Sapphire substrate

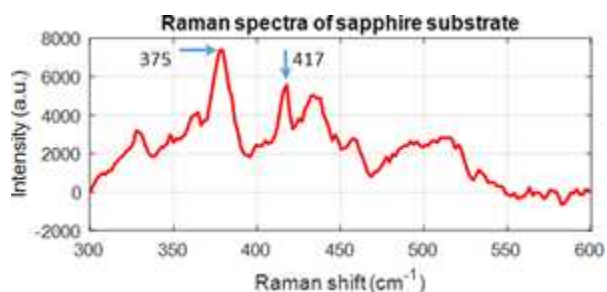
Sapphire는 gemstone으로써, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 를 포함하고 있다고 알려져 있다. 이에 Portable Raman & Fluorescence spectrometer를 이용하여 Sapphire substrate($30\text{mm} \times 30\text{mm}$, $430\mu\text{m}$ 두께)의 분광 검출율을 확인하였으나, 아래 그림과 같이, 두 결과 (라만 분광법 및 형광 분광법) 모두 낮은 intensity를 보임을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 Sapphire에 대한 피에조분광효과 검토는 하지 않도록 한다.



<Sapphire substrate>

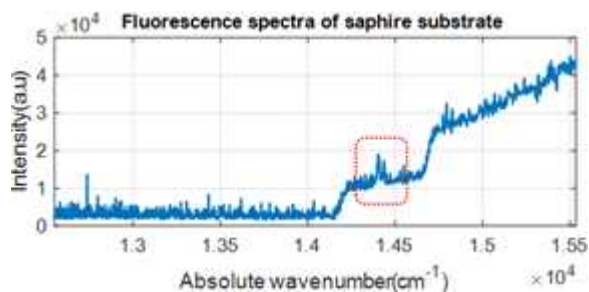


(a) Range (0~3000 cm^{-1})

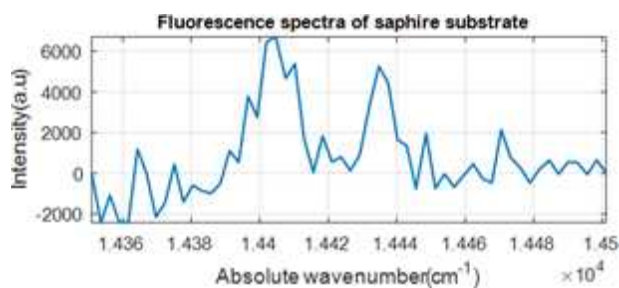


(b) Range (300~600 cm^{-1})

<Sapphire Raman spectrum>



(a) Range (0~16500 cm^{-1})



(b) Range (14350~14500 cm^{-1})

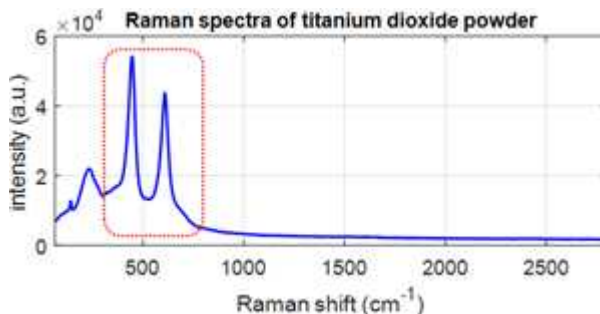
<Sapphire Fluorescence spectrum>

○ Titanium dioxide (TiO₂)

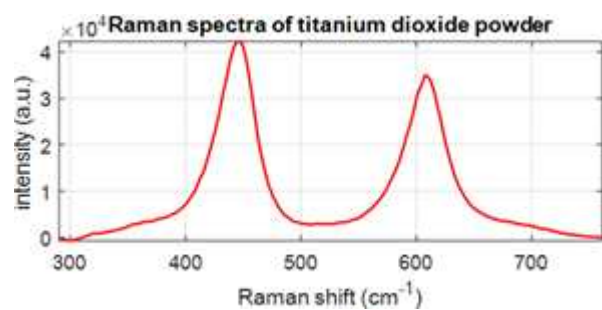
TiO₂는 일반적인 페인트에도 들어있는 물질로, 라만 분광법에 민감하게 반응한다고 알려져 있으며, 143, 447, 612, 826 cm⁻¹에 첨두값을 보인다고 알려져 있다. 이와 같은 첨두값을 확인하기 위하여, 보유중인 Portable Raman spectrometer을 이용하여 Titanium dioxide power(아래 그림)의 분광검출을 측정 실험을 수행하였다. 그 결과, 아래 그림과 같이 447, 608 cm⁻¹에서 매우 강력한 intensity를 보임을 확인할 수 있었다. 이와 같이 매우 강력한 intensity를 보일 경우, 하중인가에 의한 첨두값의 움직임을 명확하게 볼 수 있는 큰 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 Alumina와 함께, 해당 물질을 이용하여 피에조분광효과를 검증할 예정이다.



<Titanium Powder>



(a) Range (0~3000 cm⁻¹)



(b) Range (300~750 cm⁻¹)

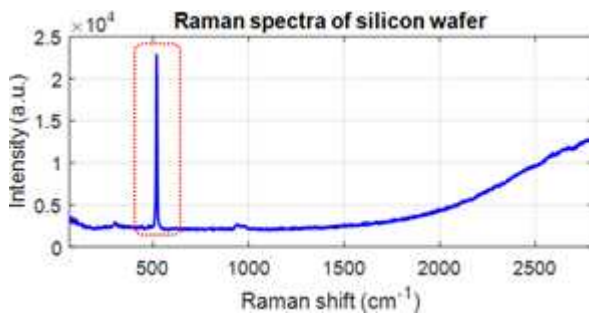
<Titanium Raman spectrum>

○ Silicon wafer

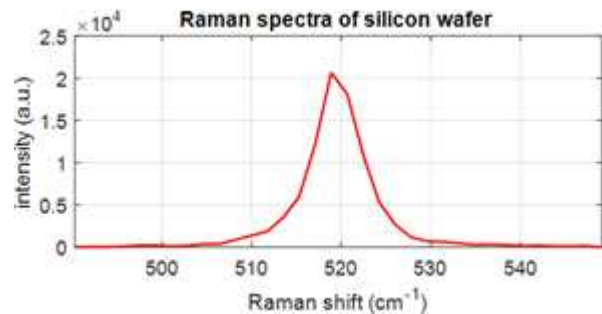
Silicon wafer는 silicon ingot을 포함한 물질로써, 라만 분광법에 민감한 물질로 알려져 있다. 대상 물질은 silicon wafer를 일부를 자른 단결정 물질로써, 520cm^{-1} 에 주요한 단일 첨두값을 갖는다고 알려져 있다. 본 연구에서는 P type silicon wafer (100mm 지름, $525\text{ }\mu\text{m}$ 두께)를 구매하여 실험에 사용하였다(아래그림). 해당 시편에 대한 라만 분광검출을 측정 실험 결과, 아래 그림과 같이 매우 강력한 intensity를 보임을 확인할 수 있었다. 앞서 말한바와 같이, 강력한 intensity를 보일 경우, 하중인가에 의한 첨두값의 움직임을 명확하게 볼 수 있는 큰 장점이 있다. 또한, 본 물질은 단결정 물질이기 때문에, 본 연구에서 사용하는 다른 어떤 물질보다, 실험에 대한 결과가 일관적일 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Alumina, Titanium dioxide와 함께, Silicon wafer를 이용하여 센서를 제작하고, 이에 대한 피에조분광효과를 검증할 예정이다.



<Silicon wafer>



(a) Range ($0\sim3000\text{ cm}^{-1}$)



(b) Range ($490\sim550\text{ cm}^{-1}$)

<Silicon Raman spectrum>

○ 센싱 재료 선택

본 연구에서는 단일(또는 2개) 첨두값을 가지며, 그 분광검출율이 매우 높은 Alumina powder, Titanium dioxide, Silicon wafer를 최종적인 센싱 재료로 선택하여 페인터블 센서를 제작하고, 이에 대한 피에조분광효과를 검증한다.

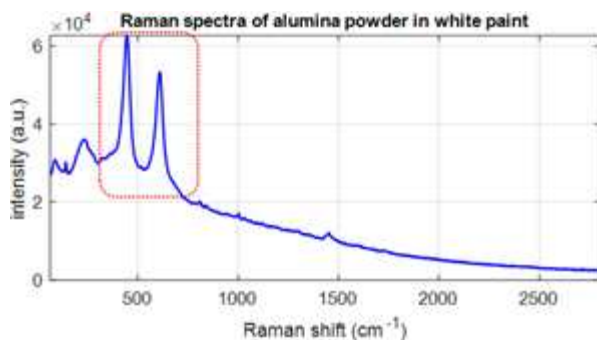
2.3.3. 센서 제작을 위한 기초 분광실험

2.3.3.1. 제안 방법 1 : 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

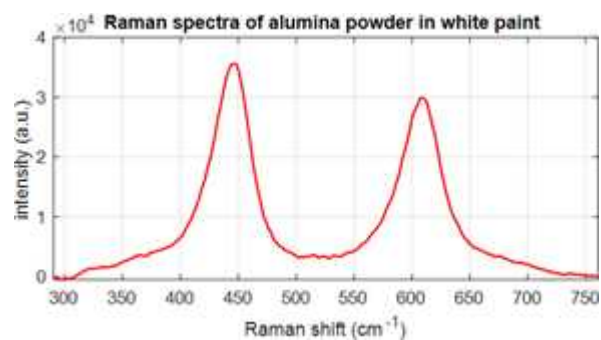
일반도료를 기반으로한 페인터블 센서의 경우에는, 센싱 재료로 선택된 물질 중에서 분말 형태로 되어 있는 Alumina powder, Titanium dioxide 만을 센서로 만들어 피에조분광효과를 검증하였다. 즉, 건축물에 일반적으로 사용되는 수성페인트에 가루 형태의 센싱 물질을 혼합하고, 이를 모재에 도포하여 최종 시편을 제작하였다.

○ Alumina powder

Alumina powder의 경우, 1차년도 사전 실험결과를 바탕으로 수성 페인트 무게 기준 10%를 Alumina powder로 치환한 시편을 만들어 분광 검출을 측정 실험을 수행하였다. Alumina의 경우 라만 분광법과 형광 분광법에 모두 민감하므로, 두 테스트를 모두 수행하였다. 하지만, 실내실험을 통하여 계측된 라만 스펙트럼(아래)과 같이, Alumina의 일반 수성 페인트에 기본적으로 들어있는 Titanium dioxide(TiO_2)의 강한 peak들도 인하여, Alumina의 peak들이 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.



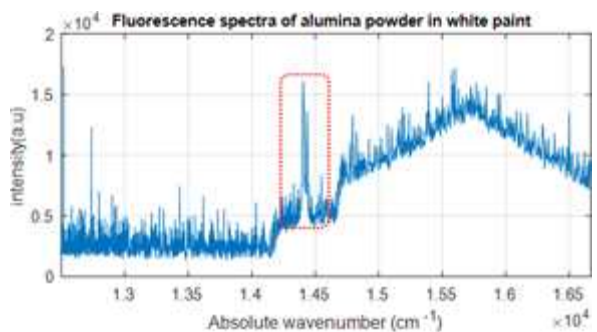
(a) Range (0~3000 cm^{-1})



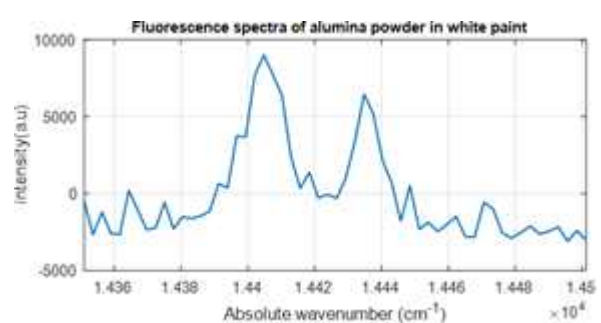
(b) Range (300~760 cm^{-1})

<라만 스펙트럼 : Alumina power mixed in paint>

수성 페인트 무게 기준 10%를 Alumina powder로 치환한 시편에 대한 형광 스펙트럼 분석 실험의 경우에는, 아래 그림과 같이 명확한 Alumina의 peak들을 확인할 수 있었다. 따라서, Alumina powder를 일반 수성페인트에 혼합한 시편은, 형광 분광법을 이용해서만 그 피에조분광효과가 규명될 예정이다.



(a) Range (12900~16500 cm^{-1})

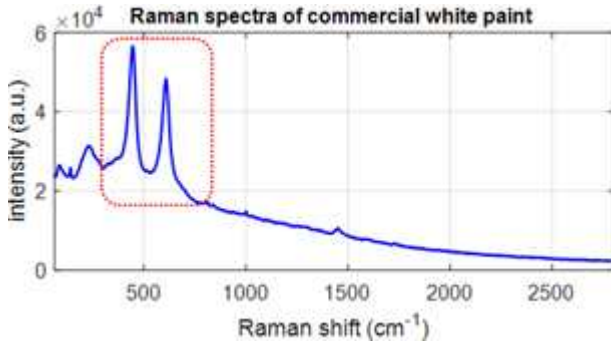


(b) Range (14360~14500 cm^{-1})

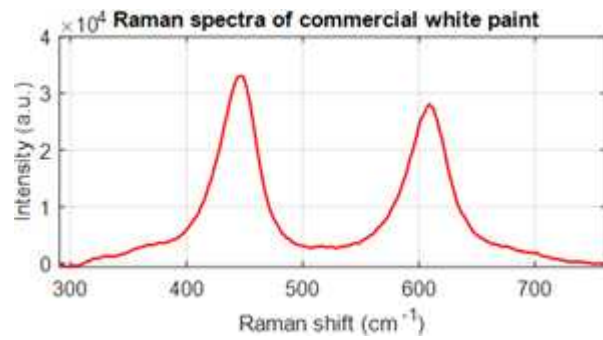
<형광 스펙트럼 : Alumina power mixed in paint>

○ Titanium dioxide

Titanium dioxide의 경우, 초기에는 Titanium dioxide 분말을 일반 수성 페인트에 추가하여 실험을 수행할 계획이었다. 하지만, 여러 종류의 일반 수성 페인트에 대한 라만 스펙트럼을 분석한 결과, 이미 충분한 intensity를 가질만큼의 Titanium dioxide가 페인트에 포함되어 있는 것으로 확인되어, Titanium dioxide 분말 추가 없이, 일반 페인트에 포함된 Titanium dioxide에 대한 피에조분광효과가 규명될 예정이다. 아래 그림들을 통하여, 여러 종류의 일반 수성 페인트의 라만 스펙트럼에서 Titanium dioxide가 모두 발견됨을 확인할 수 있다.

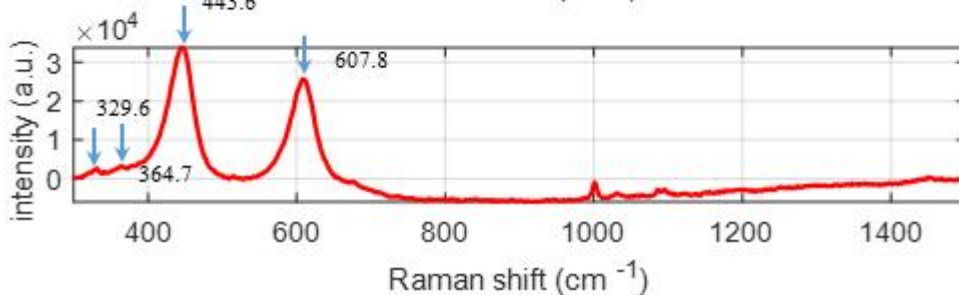
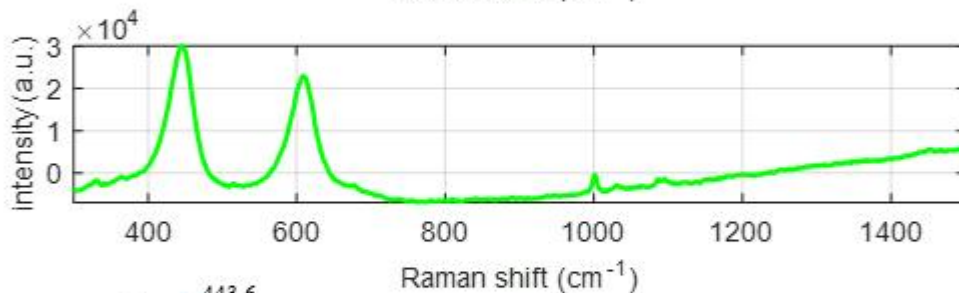
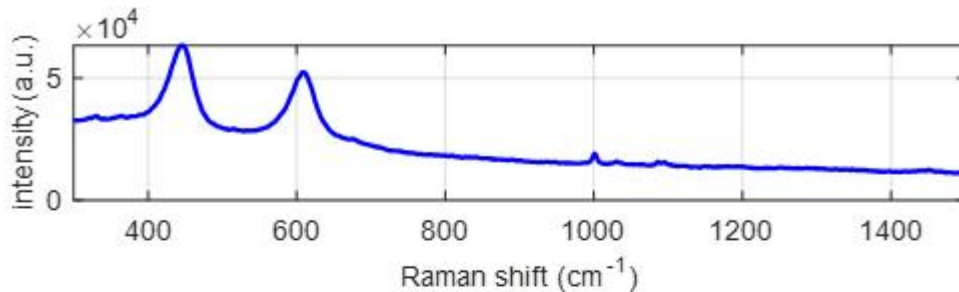


(a) Range (0~3000 cm⁻¹)



(b) Range (300~760 cm⁻¹)

<라만 스펙트럼 : 일반 수성 페인트>



<라만 스펙트럼 : 그 외 일반 수성 페인트>

2.3.3.2. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서

일반도료를 기반으로한 페인터블 센서의 경우에는, 재도장을 하게될 경우, 응력 측정이력을 알 수 없을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는, 에폭시를 이용한 페인터블 센서도 추가로 개발하여 피에조분광현상을 규명하였다. 본 연구에서 사용한 에폭시 레진은 KEIN社의 에폭시이다. 여기서, 응력 측정시 레이저가 에폭시 층을 관통하여, 모재에 맞붙어있는 센싱층에 다다를때까지의 에너지 손실을 최소화하기 위하여, 투명에폭시(아래 그림)를 사용하였다.

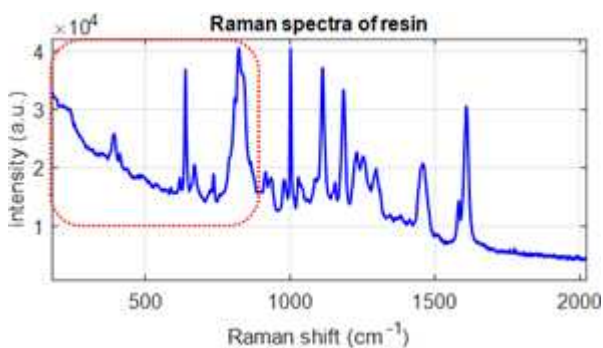
제안 방법 2에 선택된 센싱 재료는 분말 형태로 되어 있는 Alumina powder, Titanium dioxide 와, 자체적으로 구조적 형태를 갖고 있는 Silicon wafer이다. 분말 형식의 재료는 투명에폭시와 혼합하여 최적 실험 시편을 제작하였으며, Silicon wafer는 투명에폭시를 이용하여 센싱부를 고정하는 역할을 수행할 수 있도록 시편을 제작하였다.



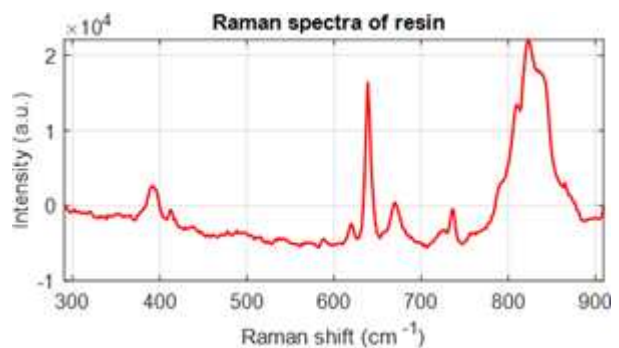
<시편제작에 사용된 에폭시 주제(右)및 경화제(左)>

○ Alumina powder

Alumina powder의 라만 스펙트럼의 경우, 아래 (1)에폭시 레진의 라만 스펙트럼과 (2)Alumina 분말이 혼합된 에폭시 레진의 라만 스펙트럼에서 알 수 있는 것처럼, Alumina의 첨두값들($375, 417 \text{ cm}^{-1}$)이 에폭시 레진의 첨두값들에 가려져 보이지 않는 것을 확인할 수 있다. 즉, Alumina 경우, 라만 스펙트럼을 사용할 시, 에폭시 레진과 혼합되어 응력 센싱물질로 사용되기 어려움을 확인하였다.

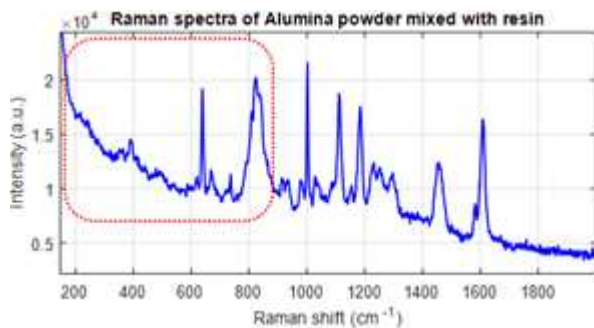


(a) Range ($0 \sim 2000 \text{ cm}^{-1}$)

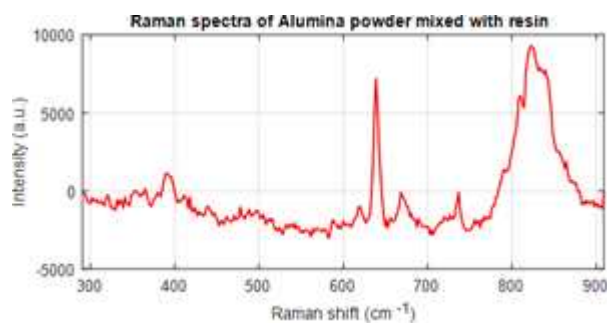


(b) Range ($300 \sim 900 \text{ cm}^{-1}$)

<라만 스펙트럼 : 에폭시 레진>



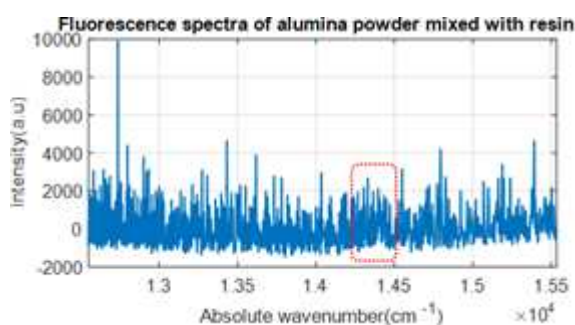
(a) Range (0~2000 cm^{-1})



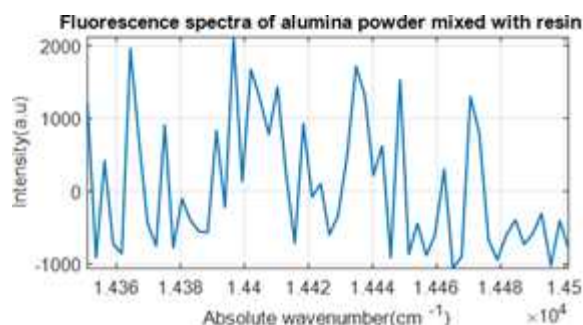
(b) Range (300~900 cm^{-1})

<라만 스펙트럼 : Alumina 분말이 혼합된 에폭시 레진>

Alumina powder의 형광 스펙트럼의 경우, 일반적으로 intensity가 매우 높다. 따라서, 레진과의 혼합 이후에도 충분한 intensity가 발현될 것으로 기대하였으나, 아래 그림과 같이, 레이저가 레진 상단부에 초점이 맞춰진 경우에는, 14402, 14432 cm^{-1} 인근에서 peak 값을 확인하기 어려웠다.



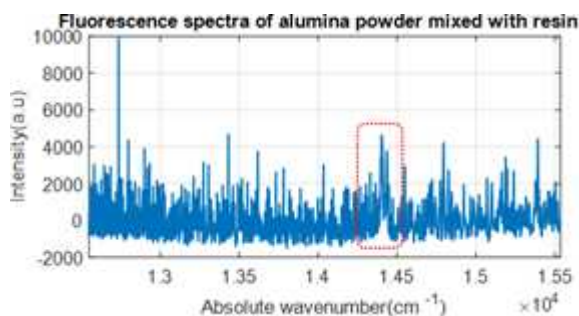
(a) Range (12900~15500 cm^{-1})



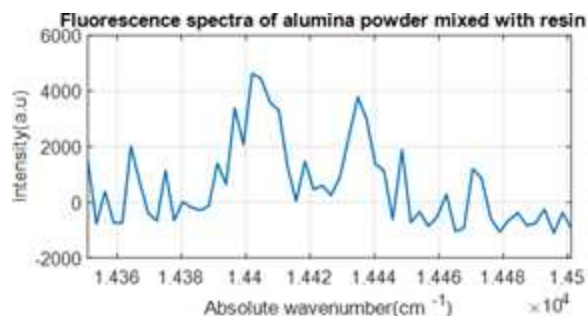
(b) Range (14350~14500 cm^{-1})

<형광 스펙트럼 : Alumina 분말이 혼합된 에폭시 레진 (초점 위치 : 레진 상단부)>

하지만 아래 그림과 같이 레이저의 초점을 레진 하단부(모재와의 접착면)에 맞췄을 경우에는 그 peak를 확인할 수 있음을 확인할 수 있었다. 즉, 레진에 섞여있는 Alumina 분말이 대부분 레진 하단부에 분포하고 있음을 본 형광 스펙트럼을 통하여 유추할 수 있다. 따라서, 응력 실험을 수행할 경우, 레이저의 초점은 레진 하단부에 맞춰질 예정이다.



(a) Range (12900~15500 cm^{-1})

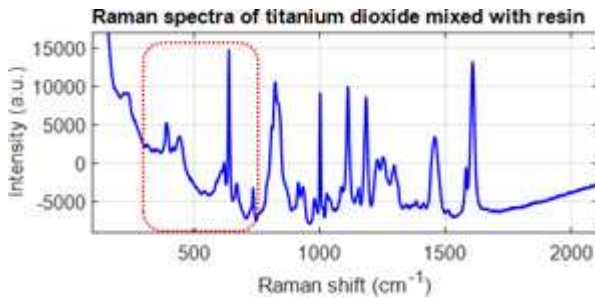


(b) Range (14350~14500 cm^{-1})

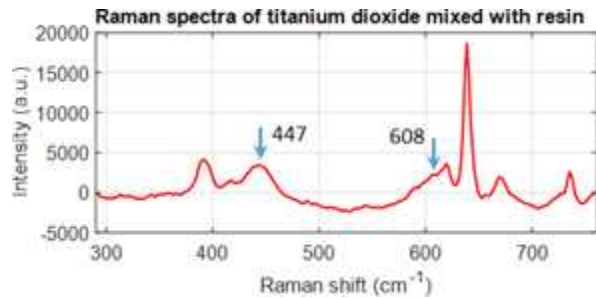
<형광 스펙트럼 : Alumina 분말이 혼합된 에폭시 레진 (초점 위치 : 레진 하단부)>

○ Titanium dioxide powder

Titanium dioxide의 경우에도, 상기 Alumina분말처럼 하단에 가라앉는지 라만스펙트럼을 이용하여 확인하였다. 그 결과, 아래 그림과 같이, Titanium dioxide의 주요 peak인 $447, 608\text{cm}^{-1}$ 을 확인할 수는 있었지만, 그 레진 상단부에서는 intensity가 낮음을 확인할 수 있었다. 따라서, Alumina 분말과 동일하게 응력 실험을 수행할 경우, 레이저의 초점은 레진 하단부에 맞춰져야 할 것으로 판단된다.

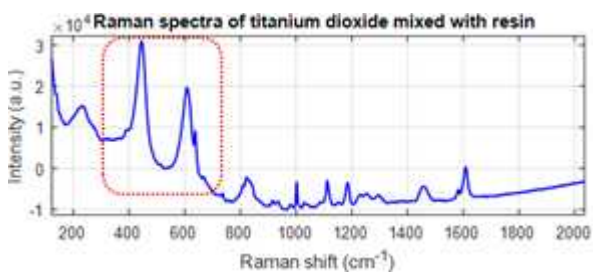


(a) Range ($0\sim 2000\text{ cm}^{-1}$)

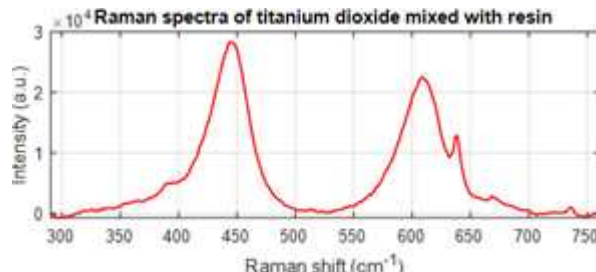


(b) Range ($300\sim 750\text{ cm}^{-1}$)

<라만 스펙트럼 : Titanium dioxide 분말이 혼합된 에폭시 레진 (초점 위치 : 레진 상단부)>



(a) Range ($150\sim 2000\text{ cm}^{-1}$)

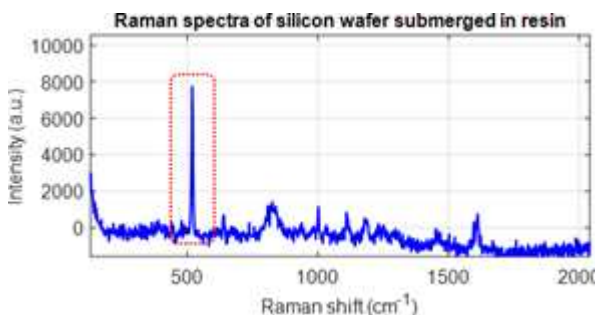


(b) Range ($300\sim 750\text{ cm}^{-1}$)

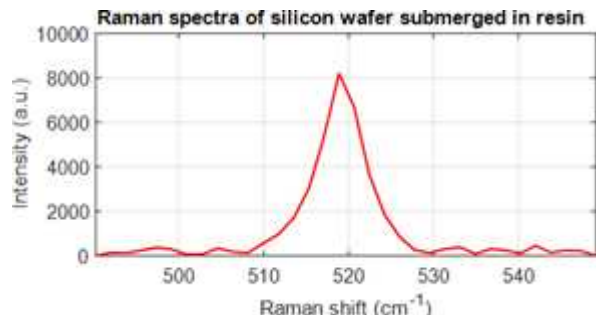
<라만 스펙트럼 : Titanium dioxide 분말이 혼합된 에폭시 레진 (초점 위치 : 레진 하단부)>

○ Silicon wafer

Silicon wafer의 경우, 다른 분말 재료와는 다르게 그 자체가 구조체를 이루기 때문에, 레이저 초점에 대한 고려를 할 필요가 없다. 또한, 520cm^{-1} 에 존재하는 단일 peak이 에폭시 레진 내부에서도 선명하게 보이는 것을 아래 라만 스펙트럼으로부터 확인할 수 있다. 따라서, 레진을 이용하여 대상 시편에 부착된 Silicon wafer가 응력 센서로서 가장 높은 가능성을 갖고 있다고 판단된다.



(a) Range ($0\sim 2000\text{ cm}^{-1}$)



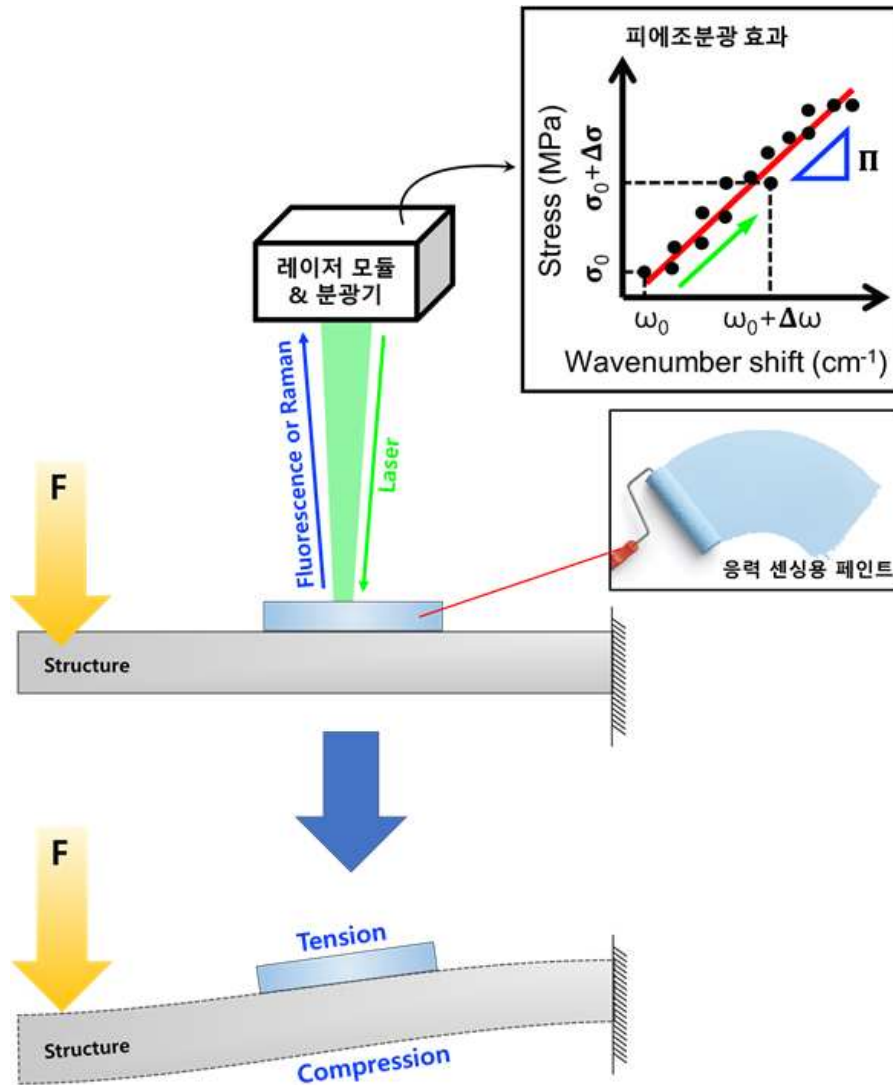
(b) Range ($4900\sim 550\text{ cm}^{-1}$)

<라만 스펙트럼 : Titanium dioxide 분말이 혼합된 에폭시 레진 (초점 위치 : 레진 상단부)>

2.3.4. 피에조분광효과 검증을 위한 휨 하중시험

2.3.4.1. 하중시험 방법

아래와 같은 간이 휨하중실험 방법을 통하여, 페인터블 센서의 피에조분광효과를 검증하였다. 기존에 계획했던 입방체 시편에 대한 압축하중 시험의 경우, 대상물 표면에서의 불균일한 응력분포로 인하여, 피에조분광효과 검증이 어려웠다. 따라서, 피에조분광효과 검증 및 피에조분광계수 도출을 위해 일단구속 휨하중실험을 수행하여, 대상 구조물 상단에는 인가되는 인장응력에 대한 피에조분광효과를 검증하였다. 또한, 하중 제거 과정에서도 동일한 실험을 수행하여, 피에조분광효과 재연성에 대한 검증을 수행하였다.



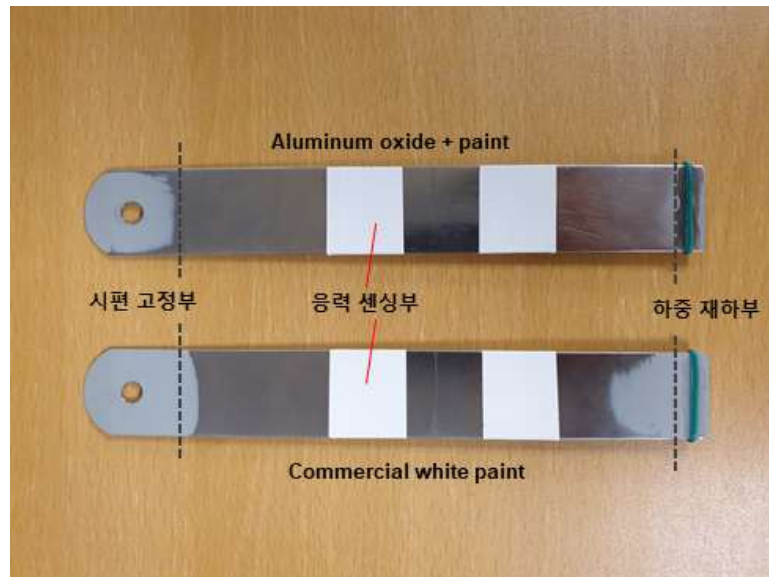
<제안 방법 1 개념도>

여기서, 센싱물질에 따라 형광분광법이 필요한 경우에는 기보유중인 형광분광장비(532nm 녹색 레이저 광원)를 사용하여 실험을 진행하였고, 라만분광법이 필요한 경우에는 본 과제 2차년도에 구축한 라만분광장비(785nm 적색 레이저 광원)를 사용하여 실험을 진행하였다. 그 외, 실험에 필요한 모터 스테이지 시편 고정용 지그 등은 모든 실험에 동일하게 사용되었다.

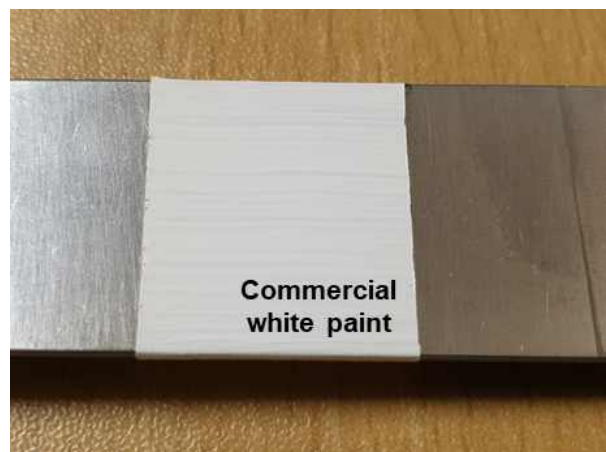
2.3.4.2. 제안 방법 1 : 일반도료(Paint)를 기반으로 한 페인터블 센서

○ 시편 제작

아래 그림은 본 연구를 위해서 제작된 실내실험용 간이 휨하중실험 시편(폭:2.25 cm, 길이:10 cm, 두께:0.9 cm)을 보인다. 좌측에 구멍이 뚫려있는 부분은 시편을 지그에 고정하기 위한 시편 고정부이며, 우측 끝 부분은 하중 재하를 위한 하중 재하부를 보인다. 중앙에 흰색으로 표현된 부분은 레이저를 조사하여 대상물의 응력을 측정하는 응력 센싱부를 보인다. 응력 센싱부에 도포된 물질은 각각 Alumina powder가 혼합된 페인트(10%)와 Titanium dioxide가 이미 포함되어 있는 일반 페인트이다.



<제작된 휨하중실험용 시편>



<페인터블 센싱부 (확대)>

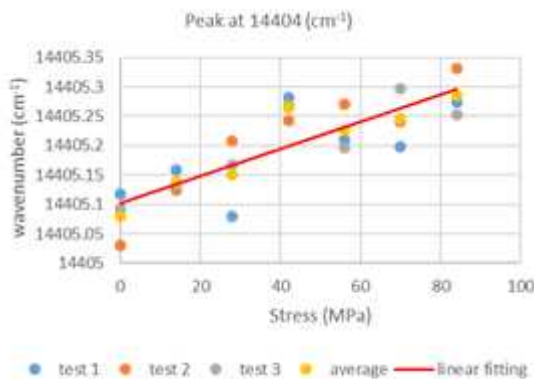
○ Alumina powder in paint (형광 분광법)

피에조분광효과(혹은 압분광효과)라고 불리는 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 하중을 총 7단계로 인가(Loadng test)하고, 각 하중단계에서의 형광 스펙트럼을 계측하여, 14404, 14434 cm^{-1} 두 peak의 파수 이동량을 계산하였다. 또한, 다결정구조에 의한 응력 전달의 불확실성(비일관적인 응력 전달)을 고려하기 위하여, 각기 다른 3지점(그룹 1, 그룹 2, 그룹 3)에서 형광 스펙트럼 계측을 수행하였다.

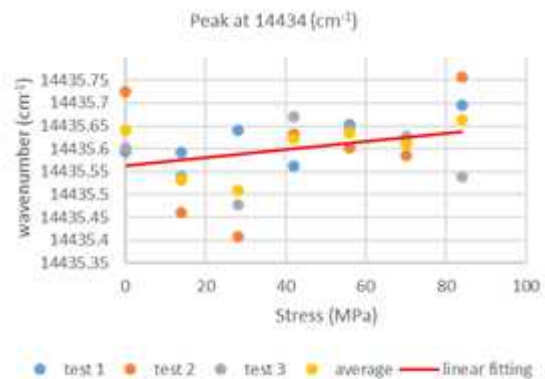
총 7단계의 하중인가(Loadng test)가 종료되면, 해당종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 수행하였다.

■ Loading test 결과

본 결과는 Loading test 결과를 보인다. X축은 인가된 인장응력을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치(파수)를 나타낸다. Alumina의 형광 스펙트럼의 경우, 14404, 14434 cm^{-1} 에서 두 peak(첨두값)을 갖으므로, 아래는 해당 두 peak의 결과를 각각 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이, 스펙트럼은 각기 다른 3개의 위치에서 계측되었으며, 계측 일관성을 확인하기 위하여 1개의 위치에서 총 3개의 스펙트럼을 수집하여 분석하였다.

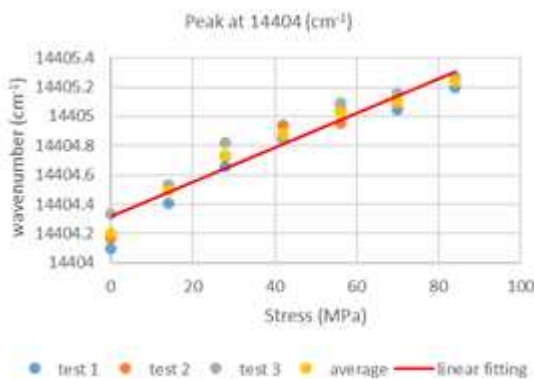


(a) 14404 cm^{-1}

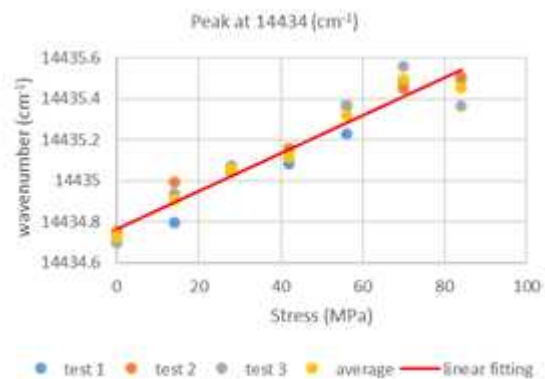


(b) 14434 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Loadng test) : Alumina powder in paint (그룹 1)>

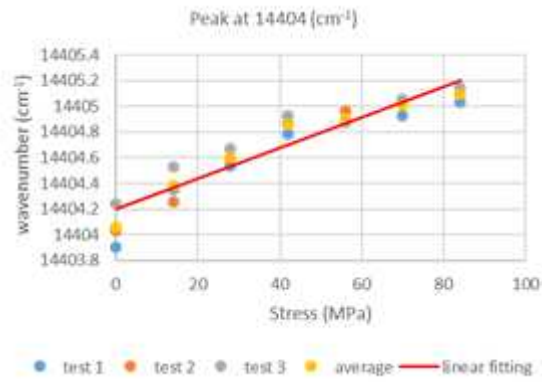


(a) 14404 cm^{-1}

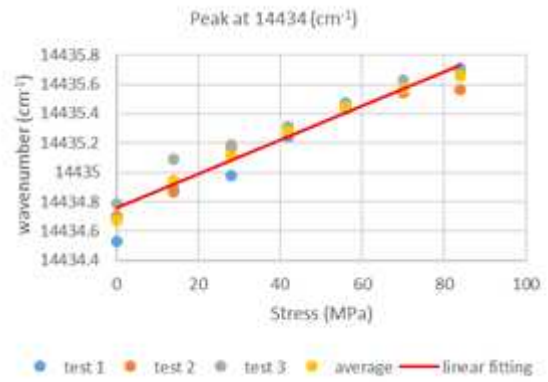


(b) 14434 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Loadng test) : Alumina powder in paint (그룹 2)>



(a) 14404 cm^{-1}



(b) 14434 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계>Loading test) : Alumina powder in paint (그룹 3)>

그룹 1의 결과를 제외하고는 시각적으로도 하중-파수 변화 관계가 선형인 것을 확인할 수 있으며, 아래 표를 통해서도 높은 R-square(90%)를 갖는 것을 확인할 수 있다. 즉, Unloading test에서도 일관적인 결과를 얻는다면, 페인트에 섞인 Alumina를 응력 센서로 사용할 수 있는 가능성이 높음을 말한다.

그룹 1의 경우에는 다결정 물질로 인한 비일관적인 응력 전달에 의한 것으로 판단된다. 아래 표의 a는 하중-파수 변화 관계를 나타내는 주요 인자로서, 피에조분광계수(또는 압분광계수) 값이 본 값에 해당한다.

<하중-파수 변화 관계표>Loading test) : Alumina powder in paint>

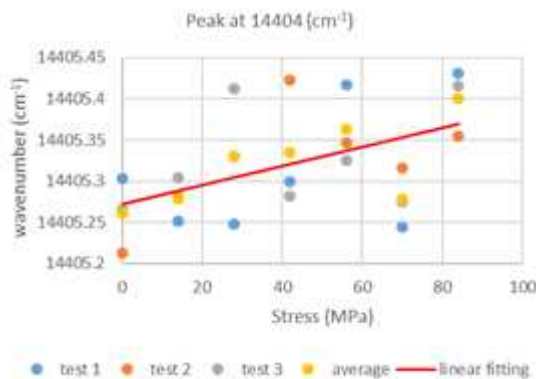
Peak	Group #	Test number	a ($\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)	b (cm^{-1})	R ²
14404 cm^{-1} (R1 band)	#1	1	0.00172	14405.115	0.4746
		2	0.00305	14405.078	0.8559
		3	0.00212	14405.111	0.7364
	#2	1	0.01261	14404.227	0.9382
		2	0.01163	14404.319	0.9321
		3	0.01102	14404.401	0.9612
	#3	1	0.01243	14404.11	0.8948
		2	0.01317	14404.14	0.9202
		3	0.01005	14404.36	0.9299
	Average (std.)		0.0086 (± 0.0048)	14404.54 (± 0.4315)	—
14434 cm^{-1} (R2 band)	#1	1	0.000913	14435.583	0.3798
		2	0.001362	14435.538	0.1039
		3	0.000382	14435.569	0.0285
	#2	1	0.00986	14434.709	0.966
		2	0.008938	14434.805	0.9693
		3	0.009002	14434.781	0.8669
	#3	1	0.0136	14434.62	0.9726
		2	0.0107	14434.78	0.9413
		3	0.0103	14434.87	0.9729
	Average (std.)		0.00722 (± 0.00495)	14435.03 (± 0.4071)	—

■ Unloading test 결과

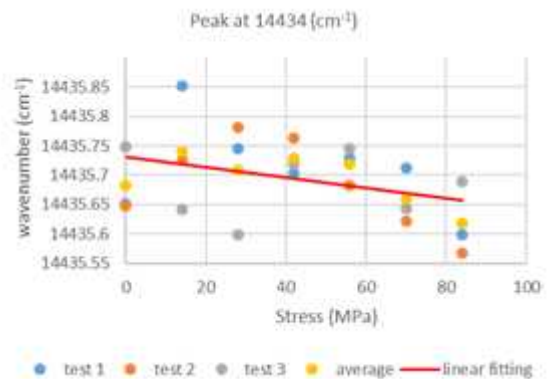
본 결과는 Unloading test 결과를 보인다. 즉, 상기 Loading test의 마지막 하중 단계(Step 7)를 초기단계로 하고, 하중을 제거하는 실험결과를 나타낸다. 여기서, X축은 제거된 인장응력(=압축응력)을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치를 나타낸다. Alumina의 형광 스펙트럼의 경우, 14404, 14434 cm^{-1} 에서 peak를 나타내므로, 아래는 각각의 결과를 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이, 스펙트럼은 각기 다른 3개의 위치에서 측정되었으며, 측정 일관성을 확인하기 위하여 1개의 위치에서 총 3개의 스펙트럼을 수집하여 분석하였다.

아래 그림과 표에 따르면, 그룹 1의 14434 cm^{-1} peak 만이 응력 센싱에 사용될 수 있는 음(-)의 경사를 보인다. 하지만, 해당 경사(0.0017 $\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)값도 Loading test의 경사(0.0086 $\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)값보다는 현저히 작은 것을 그림과 표에서 확인할 수 있다.

이와 같은 비복원성은, 최초 페인트와 Alumina가 한 개의 구조체를 이루고 하중을지지 하였으나, 인장하중이 가해진 후에 재료 분리·표면 갈라짐 등으로 인하여, 구조체가 분해되어 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 초기에는 응력센서의 역할을 하였으나, 페인트 층에 대한 반복적인 하중인가로 인하여, 응력센싱 기능을 상실한 것으로 판단된다.

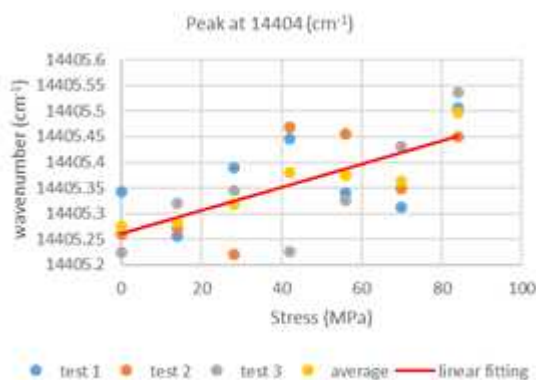


(a) 14404 cm^{-1}

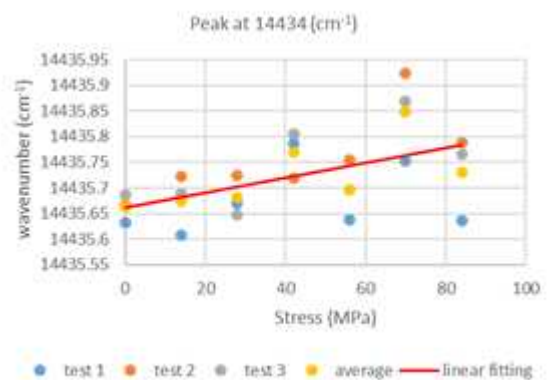


(b) 14434 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Alumina powder in paint (그룹 1)>



(a) 14404 cm^{-1}



(b) 14434 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Alumina powder in paint (그룹 2)>

<하중-파수 변화 관계표(Unloading test) : Alumina powder in paint>

Peak	Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
14404 cm ⁻¹ (R1 band)	#1	1	0.001375	14405.255	0.2742
		2	0.001308	14405.268	0.3677
		3	0.000785	14405.292	0.1398
	#2	1	0.001423	14405.311	0.2611
		2	0.002431	14405.251	0.4952
		3	0.002897	14405.222	0.6298
	Average (std.)		0.001703 (±0.000792)	14405.266 (±0.031467)	—
14434 cm ⁻¹ (R2 band)	#1	1	-0.001153	14435.761	0.1941
		2	-0.00140	14435.743	0.2970
		3	-7.14286E-05	14435.687	0.0014
	#2	1	0.000686	14435.645	0.0932
		2	0.002030	14435.671	0.5604
		3	0.001640	14435.668	0.3932
	Average (std.)		0.000288 (±0.001419)	14435.696 (±0.045769)	—

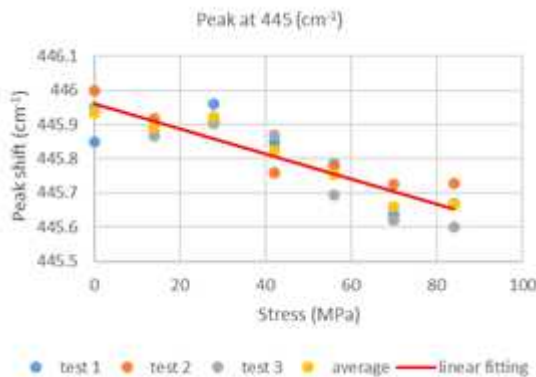
○ Titanium dioxide powder - 일반 수성 페인트 (라만 분광법)

앞선 실험과 동일하게, 피에조분광효과(혹은 압분광효과)라고 불리는 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 하중을 총 7단계로 인가(Loadng test)하고, 각 하중단계에서의 라만 스펙트럼을 계측하여, 445, 608 cm^{-1} 두 peak의 파수 이동량을 계산하였다. 또한, 다결정구조에 의한 응력 전달의 불확실성(비일관적인 응력 전달)을 고려하기 위하여, 각기 다른 3지점(그룹 1, 그룹 2, 그룹 3)에서 라만 스펙트럼 계측을 수행하였다.

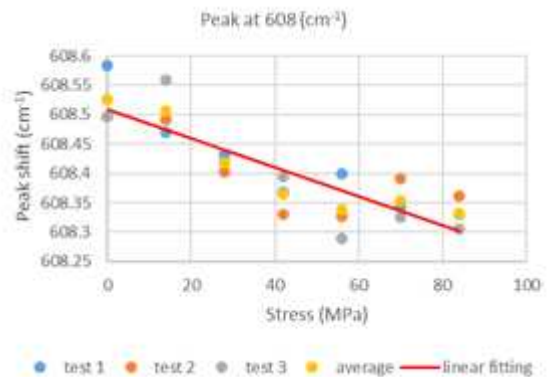
총 7단계의 하중인가(Loadng test)가 종료되면, 해당종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 수행하였다.

■ Loading test 결과

본 결과는 Loading test 결과를 보인다. X축은 인가된 인장응력을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치를 나타낸다. Titanium dioxide의 라만 스펙트럼의 경우, 445, 608 cm^{-1} 에서 peak를 나타내므로, 아래는 각각의 결과를 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이, 스펙트럼은 각기 다른 3개의 위치에서 계측되었으며, 계측 일관성을 확인하기 위하여 1개의 위치에서 총 3개의 스펙트럼을 수집하여 분석하였다.

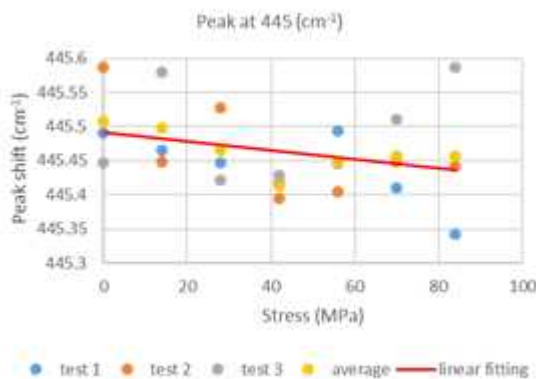


(a) 445 cm^{-1}

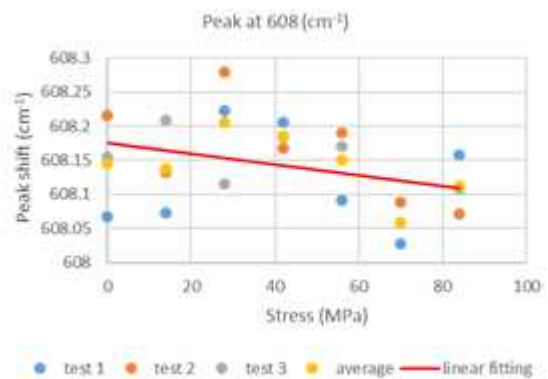


(b) 608 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Loadng test) : Titanium dioxide powder in paint (그룹 1)>

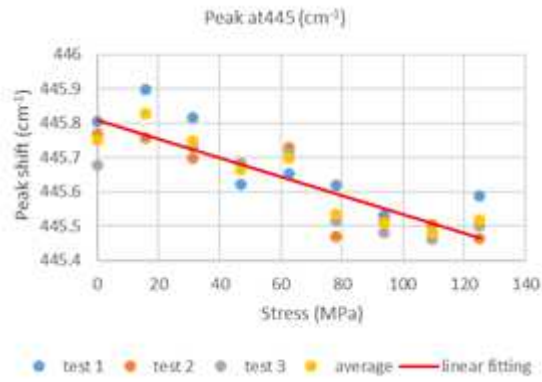


(a) 445 cm^{-1}

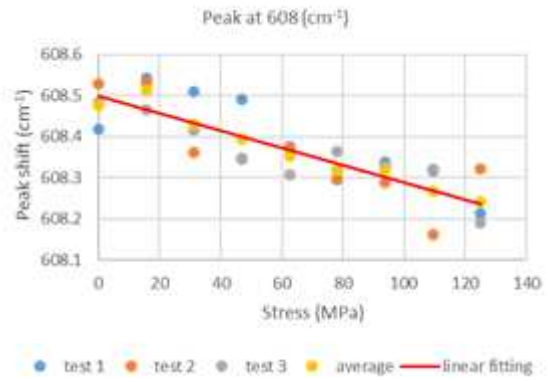


(b) 608 cm^{-1}

<하중-파수 변화 관계(Loadng test) : Titanium dioxide powder in paint (그룹 2)>



(a) 445 cm⁻¹



(b) 608 cm⁻¹

<하중-파수 변화 관계>Loading test) : Titanium dioxide powder in paint (그룹 3)>

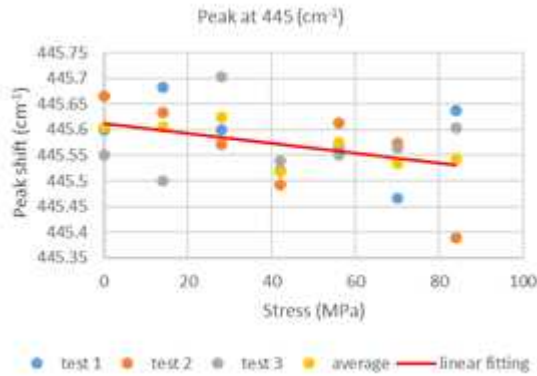
본 Loading test의 경우, 대부분의 경우에서 일관적이지 않은 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서, Unloading test에서도 비슷한 양상을 가질 것으로 판단되며, 이로 인하여, 응력 센서로 활용하기 어려울 것으로 판단된다. 이와 같은 거동의 원인은 1) peak이 넓은 폭을 갖고 있기 때문에 발생하는 peak deconvolution의 부정확함과, 2) 다결정물질에 의한 비일관적인 응력전달이 기인한 것으로 판단된다.

<하중-파수 변화 관계표>Loading test) : Titanium dioxide powder in paint>

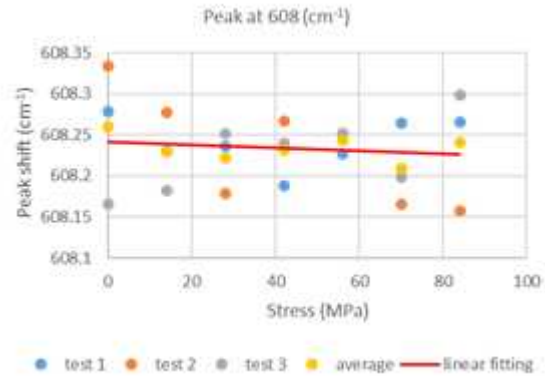
Peak	Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
445 cm ⁻¹	#1	1	-0.00311	445.9361	0.6527
		2	-0.00339	445.9733	0.8811
		3	-0.00446	445.9739	0.8802
	#2	1	-0.0013	445.4929	0.5402
		2	-0.00142	445.5248	0.3916
		3	0.000786	445.4553	0.1121
	#3	1	-0.002862	445.8477	0.7609
		2	-0.002719	445.7912	0.8112
		3	-0.002649	445.7865	0.7266
	Average (std.)		-0.00235 (±0.0015)	445.75 (±0.2093)	-
608 cm ⁻¹	#1	1	-0.00268	608.5308	0.8447
		2	-0.00173	608.4724	0.5595
		3	-0.00298	608.5237	0.791
	#2	1	0.000133	608.1153	0.0029
		2	-0.00155	608.2285	0.4144
		3	-0.00097	608.1841	0.3269
	#3	1	-0.00217	608.5248	0.7126
		2	-0.00227	608.4984	0.7008
		3	-0.00188	608.4763	0.8113
	Average (std.)		-0.00179 (±0.00093)	608.3949 (±0.1679)	-

■ Unloading test 결과

Loading test 결과와 유사하게, Unloading test 의 경우에도, 하중-파수 이동의 관계가 비 일관적이며, 그 R-square 도 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 결과를 바탕으로, 추가적인 처리없이 수성 페인트 자체를 레이저 기반 비접촉식 응력 센서로 사용하는 것에는 많은 어려움이 있다는 것이 확인되었다.

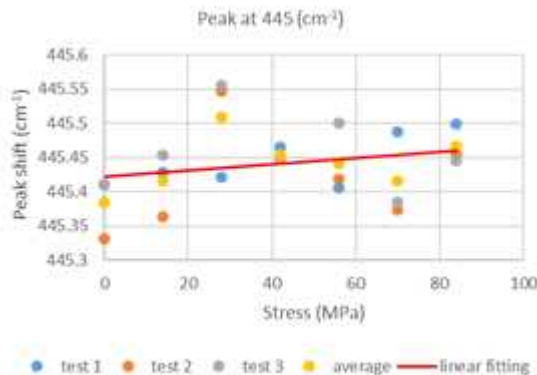


(a) 445 cm⁻¹

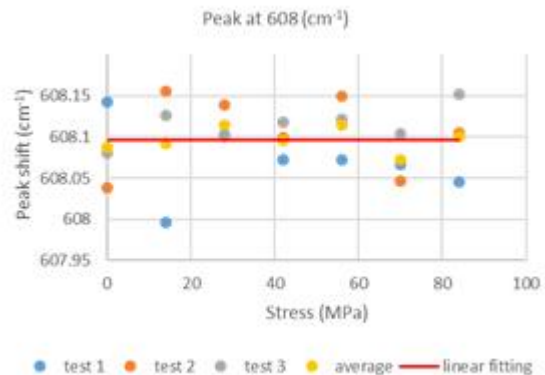


(b) 608 cm⁻¹

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Titanium dioxide powder in paint (그룹 1)>



(a) 445 cm⁻¹



(b) 608 cm⁻¹

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Titanium dioxide powder in paint (그룹 2)>

<하중-파수 변화 관계표(Unloading test) : Titanium dioxide powder in paint>

Peak	Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
445 cm ⁻¹	#1	1	-0.000903	445.6196	0.1448
		2	-0.002318	445.6598	0.5517
		3	0.000334	445.5588	0.0241
	#2	1	0.000941	445.4060	0.5594
		2	0.000670	445.3916	0.0786
		3	-0.000232	445.4668	0.0153
	Average (std.)		-0.000251 (±0.001209)	445.517 (±0.11245)	-
608 cm ⁻¹	#1	1	5.86735E-05	608.2388	0.0033
		2	-0.001727	608.3058	0.6134
		3	0.001104	608.1804	0.5137
	#2	1	-0.000471	608.0908	0.0975
		2	-2.04082E-05	608.1055	0.0002
		3	0.000487	608.0942	0.4273
	Average (std.)		9.47891E-05 (±0.00096)	608.169 (±0.08883)	-

2.3.4.3. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서

○ 시편 제작

아래 그림은 본 연구를 위해서 제작된 실내실험용 간이 휨하중실험 시편(폭:2.25 cm, 길이:10 cm, 두께:0.9 cm)을 보인다. 제안 방법 1에 사용한 시편과 동일한 모재를 사용하였다. 다시 말하면, 좌측 침단에는 시편을 지그에 고정하기 위한 구멍이 뚫려 있으며, 우측 침단에는 하중 재하를 위한 하중 재하부가 위치한다. 중앙에 흰색으로 표현된 부분은 레이저를 조사하여 대상물의 응력을 측정하는 응력 센싱부를 보인다. 응력 센싱부에 도포된 물질은 각각 Alumina powder가 혼합된 resin과 Titanium dioxide가 혼합된 resin, 그리고 마지막으로 Silicon wafer가 포함된 resin을 보인다.



<휨하중실험용 시편 : Alumina powder + 에폭시 레진>



<휨하중실험용 시편 : Titanium dioxide powder + 에폭시 레진>



<휨하중실험용 시편 : Silicon wafer + 에폭시 레진>

○ Silicon wafer in resin (라만 분광법)

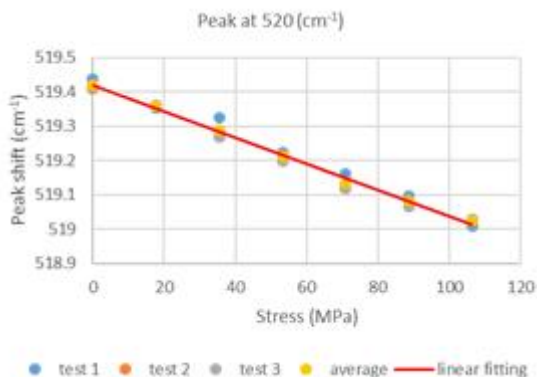
Alumina와 Titanium dioxide power가 혼합된 에폭시 레진의 경우, 그 형광/라만 스펙트럼의 intensity가 충분히 크지 않기 때문에, peak deconvolution 과정이 잘 이루어지지 않는 등의 문제점이 발견되었다. 따라서 본 제안 방법2에서는 Silicon wafer가 포함된 에폭시 레진에 대한 라만 분광법 실험을 수행하고, 그 결과를 분석하기로 한다.

앞선 시험과 동일하게 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 하중을 총 7단계로 인가 (Loading test)하고, 각 하중단계에서의 라만 스펙트럼을 계측하여, 520cm^{-1} peak의 파수 이동량을 계산하였다. 각기 다른 4지점(그룹 1, 그룹 2, 그룹 3)에서 라만 스펙트럼 계측을 수행하였으며, 각 실험은 3번씩 반복되었다.

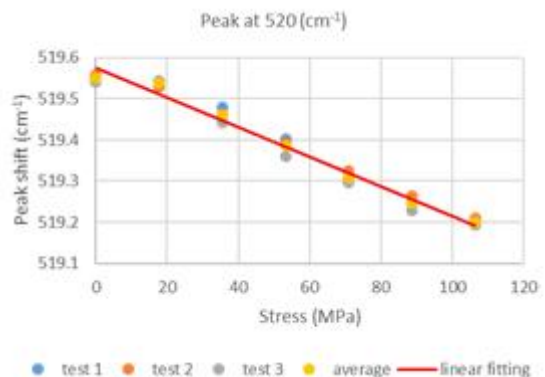
총 7단계의 하중인가(Load test)가 종료되면, 해당 종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 동일하게 수행하였다.

■ Loading test 결과

본 결과는 Loading test 결과를 보인다. X축은 인가된 인장응력을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치를 나타낸다. Silicon wafer의 라만 스펙트럼의 경우, 520cm^{-1} 에서 peak를 나타내므로, 아래는 해당 peak의 이동 결과를 나타낸다. 위에서 설명한 바와 같이, 스펙트럼은 각기 다른 4개의 위치에서 계측되었으며, 계측 일관성을 확인하기 위하여 1개의 위치에서 총 3개의 스펙트럼을 수집하여 분석하였다.

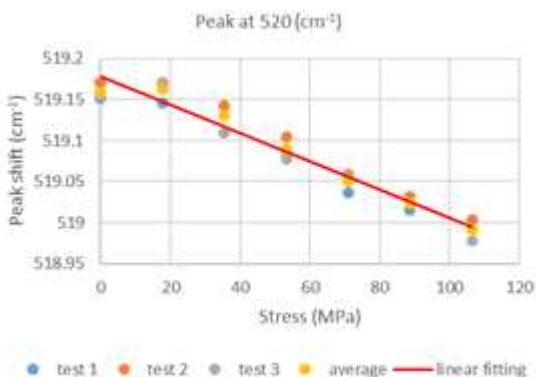


(a) 그룹 1

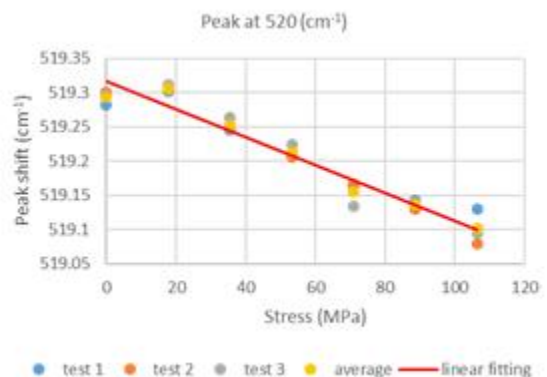


(b) 그룹 2

<하중-파수 변화 관계(Load test) : Silicon wafer in resin (w/o heat treatment)>



(a) 그룹 3



(b) 그룹 4

<하중-파수 변화 관계(Load test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

Loading test 결과에서 알 수 있듯이, Silicon wafer in resin의 경우, 인장응력이 시편에 인가된 경우에 매우 일관적인 파수 이동결과를 보이는 것을 그림과 표에서 확인할 수 있다. 또한, 그 경사값이 피에조분광계수 또한 일관적으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, Unloading test에서도 일관적인 결과를 보인다면, Silicon wafer in resin을 응력 센서로 사용할 수 있는 가능성이 높음을 말한다.

<하중-파수 변화 관계표>Loading test) : Silicon wafer in resin (w/o heat treatment)>

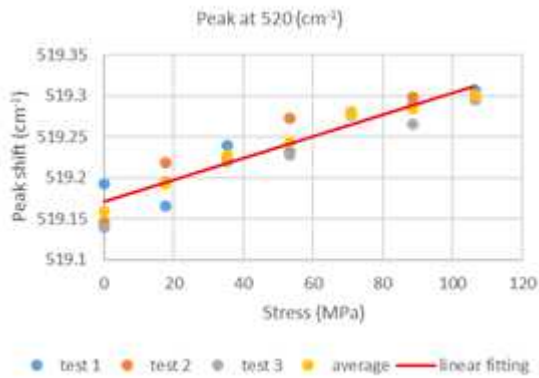
Peak	Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
520 cm ⁻¹	#1	1	-0.003960	519.439	0.9925
		2	-0.003721	519.409	0.991
		3	-0.003811	519.410	0.9876
	#2	1	-0.003698	519.586	0.9758
		2	-0.003439	519.574	0.9941
		3	-0.003658	519.567	0.9739
	Average (std.)		-0.003714 (±0.000172)	519.497 (±0.086293)	-

<하중-파수 변화 관계표>Loading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

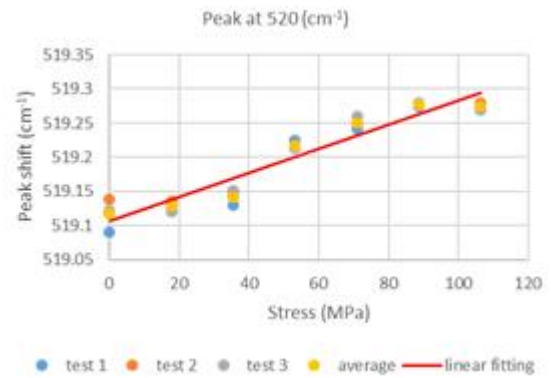
Peak	Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
520 cm ⁻¹	#3	1	-0.001707	519.171	0.9408
		2	-0.001729	519.189	0.9685
		3	-0.001757	519.174	0.9594
	#4	1	-0.001723	519.3022	0.9361
		2	-0.002206	519.322	0.9773
		3	-0.002176	519.324	0.9256
	Average (std.)		-0.001883 (±0.000239)	519.247 (±0.07616)	-

■ Unloading test 결과

본 결과는 Unloading test 결과를 보인다. X축은 제거된 인장응력(압축응력)을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치를 나타낸다. 520cm^{-1} 에서 파수 변화를 확인한 결과, 아래와 같이 하중이 제거 될수록(압축응력이 인가될수록) 양의 방향으로 파수 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. 인장응력을 인가하였을 때, 음의 방향으로 파수 변화가 일어난 것을 고려하면, 힘의 방향도 센싱할 수 있다는 것을 의미한다.



(a) 그룹 1



(b) 그룹 2

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

<하중-파수 변화 관계표(Unloading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

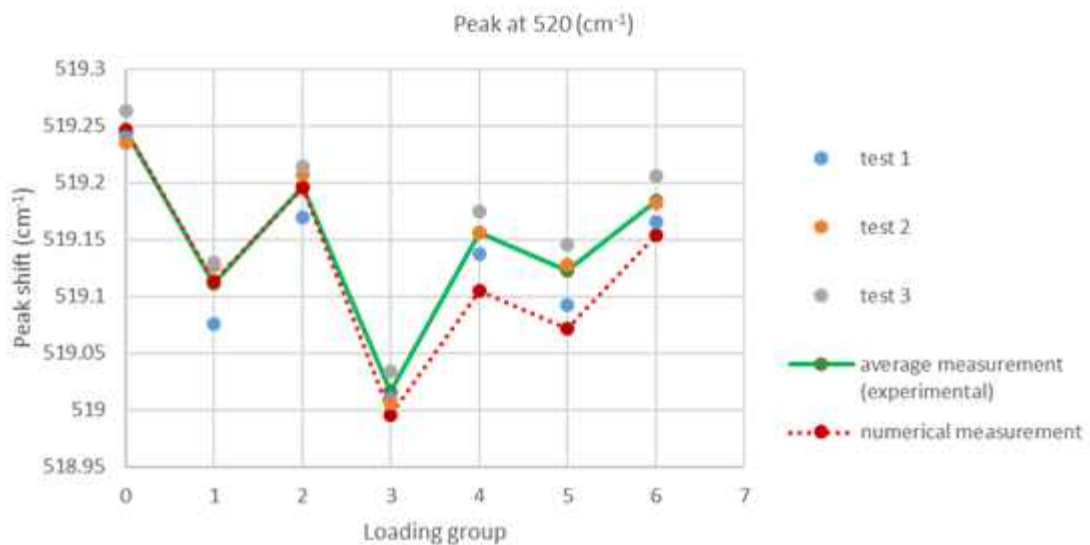
Peak	Group #	Test number	a ($\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)	b (cm^{-1})	R ²
520 cm^{-1}	#1	1	0.001271	519.1755	0.8725
		2	0.001365	519.1755	0.8748
		3	0.001335	519.1604	0.9207
	#2	1	0.001893	519.0934	0.9172
		2	0.001627	519.119	0.9107
		3	0.001776	519.1082	0.916
	Average (std.)		0.001544 (± 0.000257)	519.138 (± 0.03619)	—

■ 하중인가/제거 반복 테스트

본 테스트에서는 임의의(Random) 한 하중을 Silicon wafer가 부착된 시편에 가했을 때, 상기 표에서 도출한 피에조분광계수로부터 구해지는 하중값이 이론적으로 계산된 하중값과 얼마나 유사한지 확인하는 실험이다. 그림에서 녹색실선은 실험적으로 계산된 값이며, 적색 점선은 이론적으로 계산된 값을 말한다. 초기 3케이스 동안에는 이론값이 실험값이 거의 동일하였으며, 마지막 3케이스의 오차도 약 0.051cm^{-1} 로 작았다.

<하중인가/제거 반복 테스트 : Silicon wafer in resin>

Load sequence	0	1	2	3	4	5	6
Load (gram)	0	200 Loading	150 Unloading	250 Loading	200 Unloading	50 Loading	150 Unloading
Stress (MPa)	0	+70.95	-53.21	+106.42	-70.95	+17.74	-53.21



<실험값과 이론값 비교 테스트 결과 : Silicon wafer in resin>

2.3.4.4. 소결

본 연구에서는 콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발을 위하여, 페인트 첨가제를 선정하고, 부착방법을 제안하였으며, 응력 센서의 피에조분광효과를 규명하였다.

[페인트 압분광 효과 분석을 위한 압분광 시스템 구축]

기존 보유중인 형광시스템이외에도 라만분광시스템을 새로이 구축하고, 계측 위치와 그 초점거리를 세밀하게 조절할 수 있도록, 2차원 맵핑 시스템을 개발하였다. 또한, 계측/분석 프로그램을 자체적으로 개발하여 데이터 분석을 할 수 있는 통합 시스템을 구축하였다.

[페인터블 센서 정의]

본 연구에서는 2가지의 페인터블 센싱 방법에 대하여 제안하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

본 방법은 기존 연구개발계획서 제출 당시 제안한 방법으로, 건설용 도료에 피에조분광효과를 갖는 분말을 혼합하여, 해당 물질을 응력센싱 물질로 활용하는 방법이다. 따라서, 페인트 첨가제에 대한 선정과정이 필수적이다.

(2) 접착식 페인터블 센서

본 방법은 재도장에 대한 문제를 해결하기 위하여, 2차년도에 제안한 방법으로, 일반적인 도료를 사용하는 것이 아니라, 에폭시 레진등의 접착제를 이용하여, 센싱가능물질을 구조물 표면에 부착하는 방식이다.

[페인트 첨가제 선정]

페인트의 화학조성은 일반적으로 알려져 있지 않으나, 페인트의 광택발현을 위하여 일부 페인트의 경우 알루미늄 및 TiO_2 를 첨가한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 레이저를 이용하여 수성 페인트에 대한 라만/형광 스펙트럼 분석을 통하여, 일부 수성 페인트의 경우 알루미늄 및 TiO_2 를 포함하고 있음을 실험적으로 증명하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

일반도료를 이용한 페인터블 센서의 경우, 기존 도료에 포함된 물질을 센싱 물질로 사용하는 것이 가장 안정도가 높다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄과 TiO_2 를 최종 첨가제로 선정하여 분광검출을 실험을 수행하였다.

(2) 접착식 페인터블 센서

접착식 페인터블 센서의 경우에는 센서 자체가 구조체인 Silicon wafer를 선택하여 에폭시 레진을 이용하여 대상 구조물에 부착하였다.

[피에조분광현상 규명]

상기 준비한 시편에 대하여, 피에조분광현상을 규명하기 위한 휨하중시험을 수행하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

일반도료를 기반으로한 페인터블 센서의 경우에는, 최초 하중이 인가될 당시에는 선형적인 하중-파수변화간의 관계가 선형적인 결과를 보였다. 하지만, 반복 시험을 수행하자, 센싱 재현도가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 비복원성은, 최초 페인트와 Alumina(혹은 TiO_2)가 한 개의 구조체를 이루고 하중을 지지 하였으나, 인장하중이 가해진 후에 재료 분리·표면 갈라짐 등으로 인하여, 구조체가 분해되어 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 초기에는 응력센서의 역할을 하였으나, 페인트 층에 대한 반복적인 하중인가로 인하여, 응력센싱 기능을 상실한 것으로 판단된다.

(2) 접착식 페인터블 센서

Silicon wafer를 에폭시 레진을 이용한 구조물에 부착한 방법은, Loading test, unloading test에서 하중-파수변화가 모두 선형적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상을 통하여, 인장하중과 압축하중을 구분할 수 있음을 확인할 수 있었고, 계산된 피에조분광계수를 통하여 계산된 응력값과 유한요소해석(이론적)을 통하여 계산된 응력값이 매우 유사한 것을 바탕으로, 본 연구에서 제안하는 “접착식 페인터블 센서”에 대한 높은 가능성을 확인하였다.

2.3.5. 피에조분광효과 검증을 위한 압축 하중시험

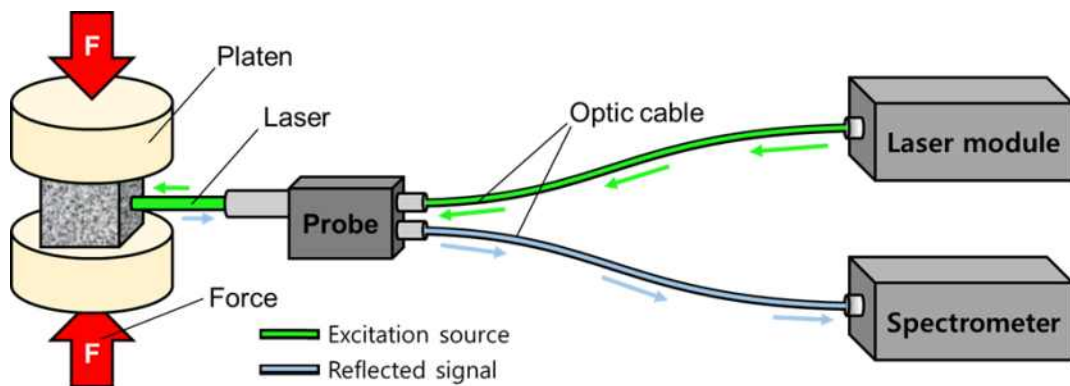
2.3.5.1. 하중시험 방법

○ 분광 시스템 및 압축하중시험 시스템

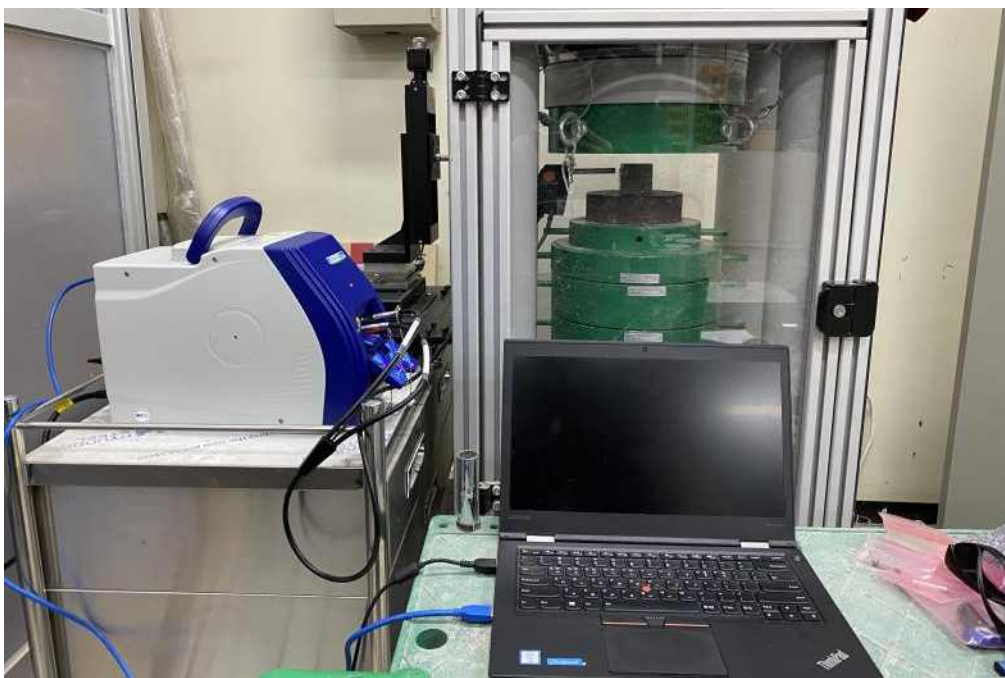
본 장에서는 압축하중시험 방법을 통하여, 페인트블 센서의 피에조분광계수 도출 및 관련 질적성과 지표 달성여부를 검증하였다. 또한, 하중 제거 과정에서도 동일한 실험을 수행하여, 피에조분광효과 재연성에 대한 검증을 수행하였다.

아래 그림은 압축하중시험 개념도, 실제 실험전경(사진) 및 실험에 사용된 압축하중시험 순서를 보인다. 피에조분광효과 검증을 위하여 300톤급 압축 실험기를 활용하여 실험을 수행하였으며, ± 20 kN의 증분량을 갖고 압축하중시험을 수행하였다. 단, 하중 Step 1의 경우, 장비의 한계로 인하여 15kN의 압축력을 초기값으로 인가하였다.

여기서, 센싱물질에 따라 형광분광법이 필요한 경우에는 기보유중인 형광분광장비(532nm 녹색 레이저 광원)를 사용하여 실험을 진행하였고, 라만분광법이 필요한 경우에는 2차년도에 구축한 라만분광장비(785nm 적색 레이저 광원)를 사용하여 실험을 진행하였다. 그 외, 실험에 필요한 모터 스테이지, 시편 고정용 지그 등은 모든 실험에 동일하게 사용되었다.



<압축하중시험 개념도>



<본 실험에 사용된 압축하중시험기 및 분광 시스템>



<설치된 압축하중시편(제안방법 1) 및 스펙트럼 계측용 프로브 (532nm 레이저 조사 中)>



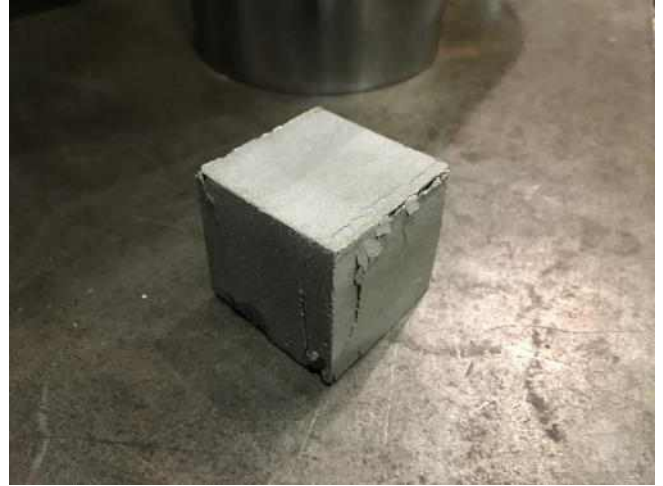
<설치된 압축하중시편(제안방법 2) 및 스펙트럼 계측용 프로브 (785nm 레이저 조사 中)>

○ 압축하중실험 설계

압축하중시험에 사용될 최대 하중의 크기를 선정하기 위하여, 모르터 시편에 대한 압축강도측정 실험을 수행하였다. 아래 그림은 시멘트 모르터 압축강도 실험 및 압축강도 실험 후 파괴된 시편을 보인다. 실험결과, 평균적으로 약 20 tonf (78 MPa)의 압축력이 시편에 인가된 이후에 시편이 파괴됨을 확인하였다. 따라서, 선형구간에서의 응력 전달 및 압분광 효과를 구명하기 위하여, 본 연구에서는 최대 40 MPa 이하의 하중을 5단계로 나누어 시편에 인가하도록 한다.



(a) 시멘트 모르터 압축강도 실험

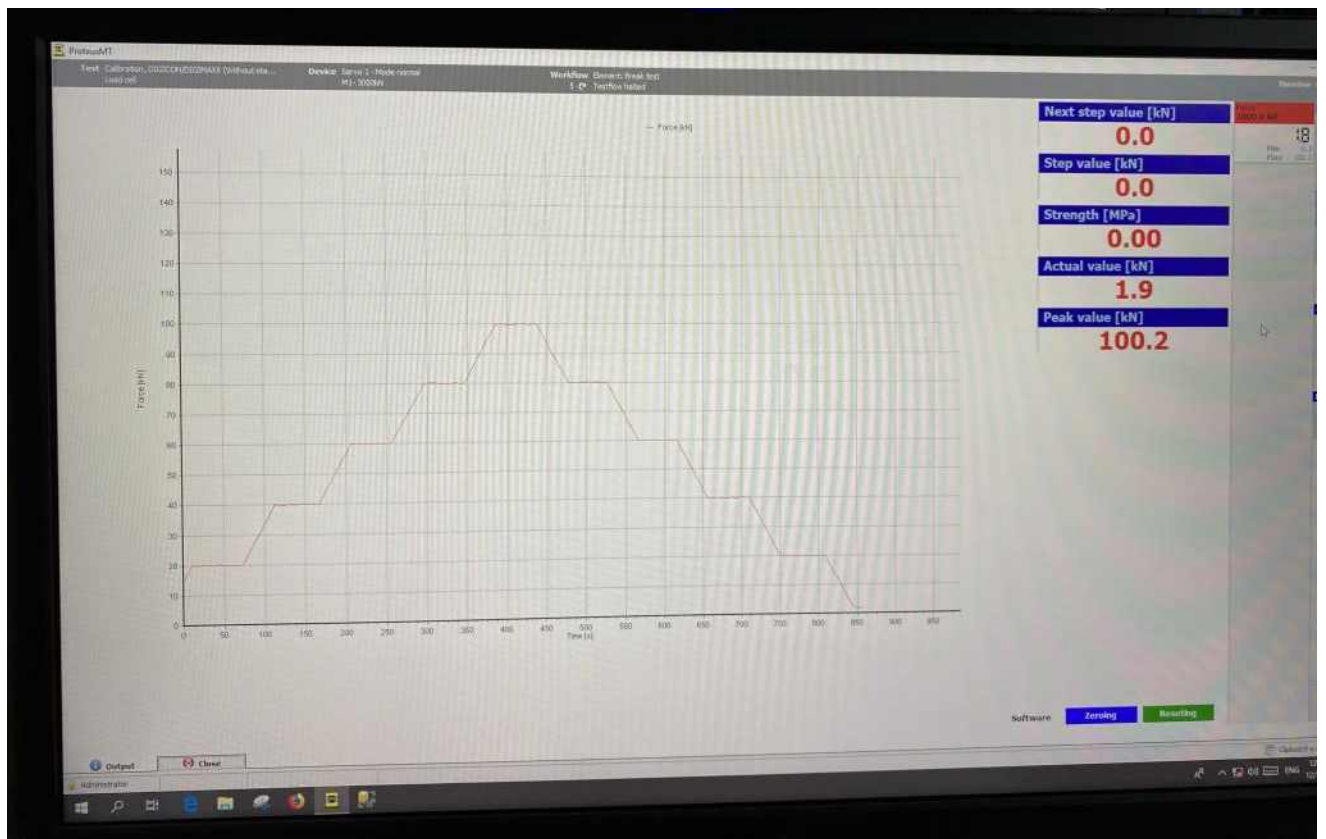


(b) 압축강도 실험 후 파괴된 시편

<시멘트 모르터 시편 파괴 실험>

<압축하중실험 순서>

순서	구분	Force (kN)	Stress (MPa)
1	하중 인가 (+ 15 kN)	15	6
2	하중 인가 (+ 5 kN)	20	8
3	하중 인가 (+ 20 kN)	40	16
4	하중 인가 (+ 20 kN)	60	24
5	하중 인가 (+ 20 kN)	80	32
6	하중 인가 (+ 20 kN)	100	40
7	하중 제거 (-20 kN)	80	32
8	하중 제거 (-20 kN)	60	24
9	하중 제거 (-20 kN)	40	16
10	하중 제거 (-20 kN)	20	8
11	하중 제거 (-18 kN)	1.7~1.9	0.72



<피에조분광효과 검증을 위한 시간-압축력 그래프>

2.3.5.2. 제안 방법 1 : 일반도료를 기반으로한 페인터블 센서

○ 시편 제작

아래 그림은 본 연구를 위해서 제작된 압축하중시험용 입방체 시편(폭:50 mm, 길이:50 mm, 두께:50 mm)과 그 제작과정을 보인다. 본 연구에서는 시멘트 모르타르 시편을 ASTM specification C109/109M (the standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortar)의 기준에 맞게 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ 의 크기로 동일하게 제작하였다. 포틀랜드 시멘트 및 일반모래가 사용되었으며, 시편제작과정을 수월하게 하기 위하여 약 1%정도의 알루미나분말이 배합과정에 포함되었다. 모든 경우에 대하여 시멘트 : 모래 : 물의 비율은 1 : 2.45 : 0.485로 일정하게 유지하였다. 아래 그림은 제작된 시멘트 모르타르 시편의 일부를 보인다.



<압축하중시험을 위하여 제작된 시멘트 모르타르 시편>

위의 시멘트 모르타르가 제작된 후, 표면의 불순물 등을 제거하기 위하여 표면을 연마하였다. 다음으로, 응력집중현상 등을 방지하기 위하여 중앙부 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 를 제외한 부분은 마스킹 테이프를 붙여, 일정한 페인팅 작업을 할 수 있도록 하였다. 다음으로 해당 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 구간에 바인더를 도포하고 30분 동안 상온에 보관하였다.



<페인트 가이드를 위한 마스킹 테이프가 붙여진 시멘트 모르타르 시편>

그 후, 알루미나 파우더가 혼합된 페인트(10% weight ratio)를 바인더가 도포된 부분에 추가로 도포하였다. 마스킹 테이프 제거 과정에서 발생할 수 있는 페인트의 미세 균열을 방지하기 위하여, 페인트가 굳기 전에 마스킹 테이프를 제거 하였다(페인트 도포 후 5분 이내 제거완료). 페인트가 굳는 동안 먼지와 접촉이 없도록 비닐커버를 씌어 하루이상 상온에 보관하고 실험하였다. 단, 페인트와 비닐커버는 비접촉한 상태로 보관하였다. 아래 그림의 중앙 흰색으로 표현된 부분이 응력 센싱부로, 해당 부분에 레이저를 조사하여 응력을 측정하게 된다.

단, Titanium dioxide power가 혼합된 에폭시 레진의 경우, 그 형광/라만 스펙트럼의 intensity가 충분히 크지 않기 때문에, peak deconvolution 과정이 잘 이루어지지 않는 등의 문제점이 발견되었다. 따라서 본 제안 방법1에서는 Alumina powder가 포함된 페인트에 대한 실험만을 수행하고, 수집된 스펙트럼을 분석하여 결과를 확인하였다.

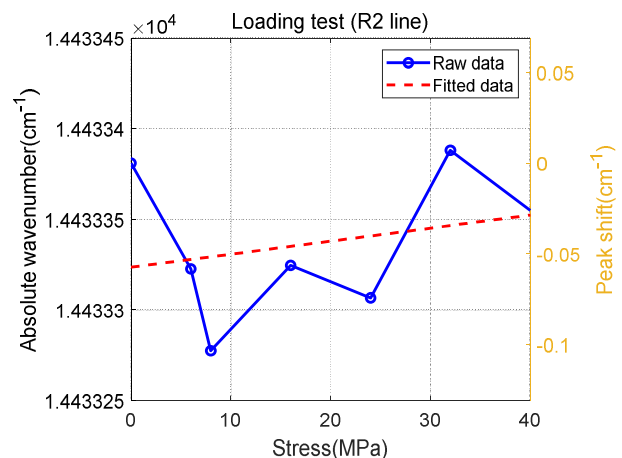
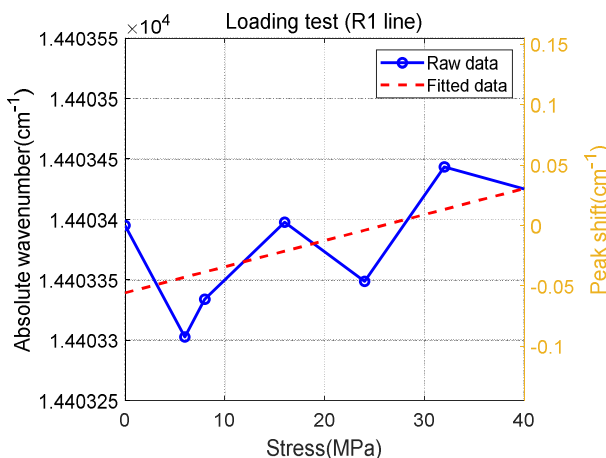


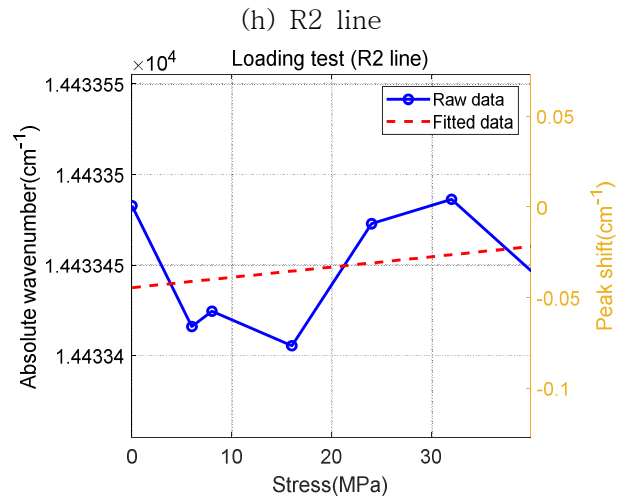
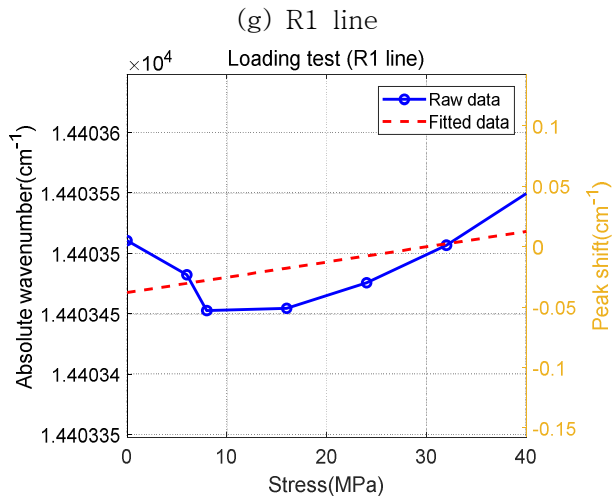
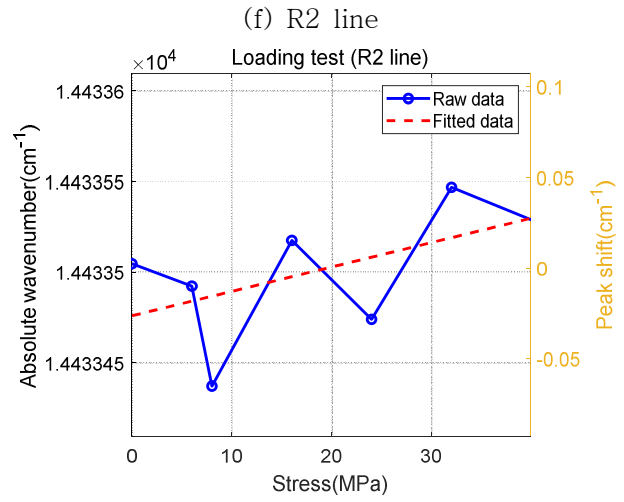
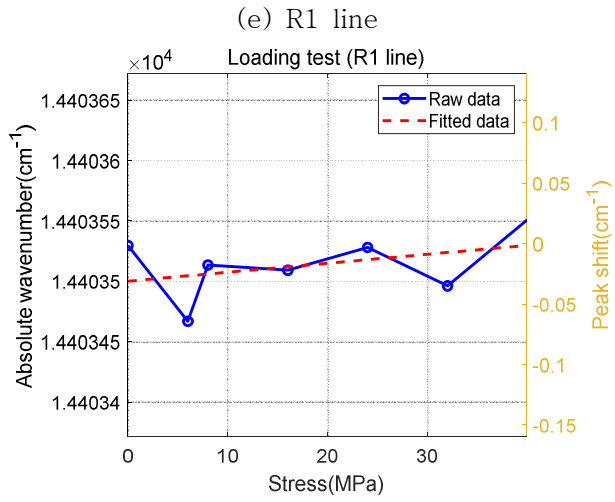
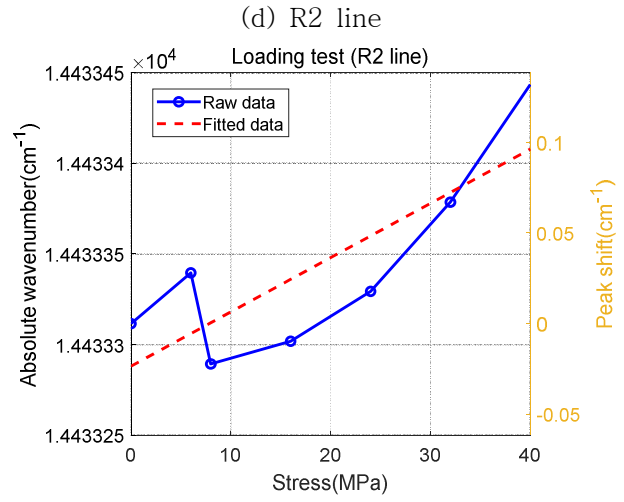
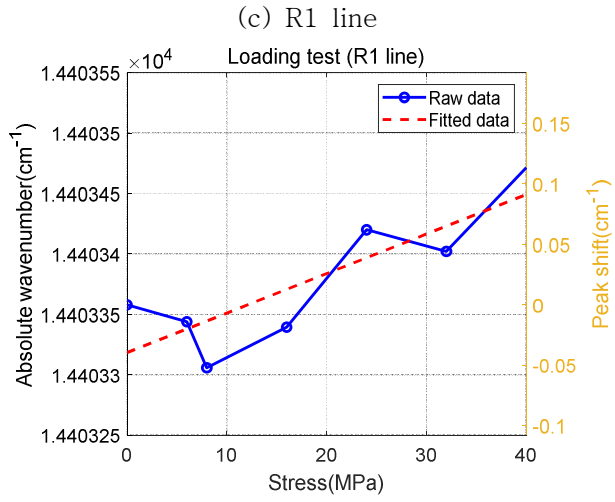
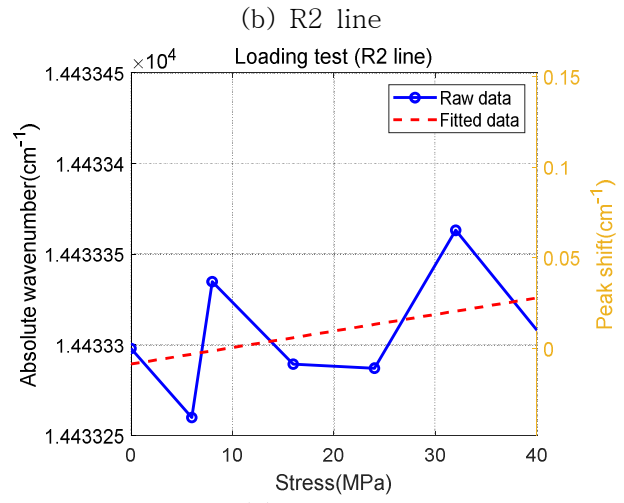
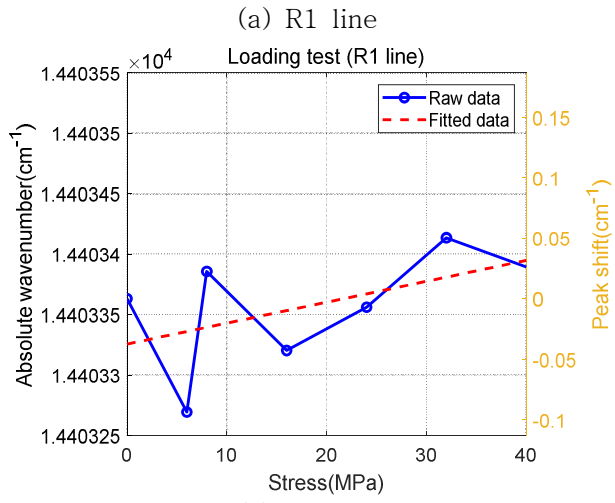
<본 연구에서 제작된 분광-압축하중실험을 위한 입방체 시편>

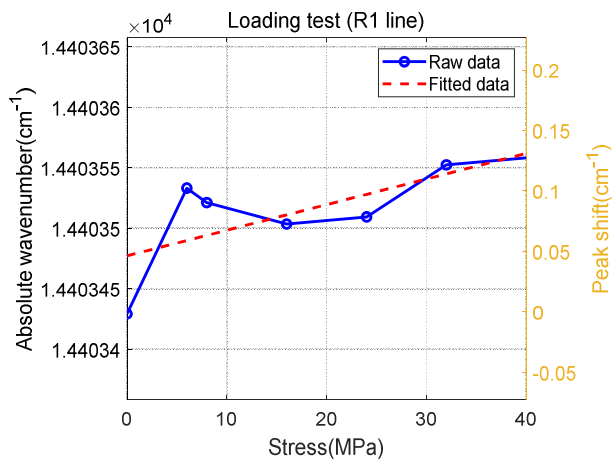
피에조분광효과(혹은 압분광효과)라고 불리우는 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 하중을 총 5단계로 인가(Load test)하고, 각 하중단계에서의 형광 스펙트럼을 계측하여, 14404, 14434 cm^{-1} 두 peak의 파수 이동량을 계산하였다. 총 5단계의 하중인가(Load test)가 종료되면, 해당 종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 수행하였다. 여기서, 모든 스펙트럼은 각각 15초 동안 계측되었다.

○ Loading test 결과

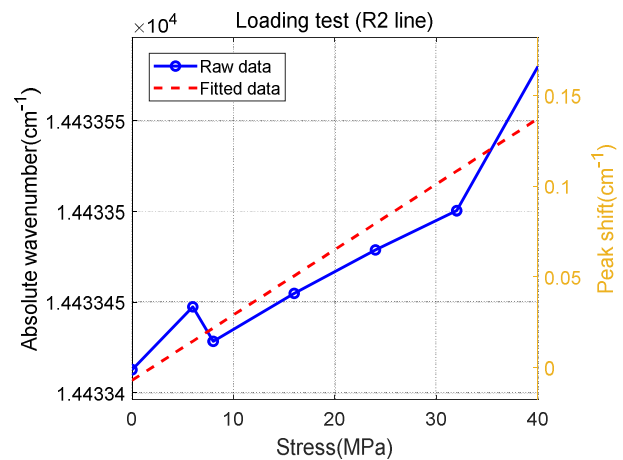
아래 결과는 Loading test 결과를 보인다. X축은 인가된 인장응력을 나타내며, Y축은 각 peak의 위치를 나타낸다. Alumina의 형광 스펙트럼의 경우, 14404 cm^{-1} (R1 line), 14434 cm^{-1} (R2 line)에서 peak을 나타내므로, 아래는 좌측 행은 R1 line, 우측 행은 R2 line의 결과를 각각 나타낸다.







(k) R1 line



(l) R2 line

<하중-파수 변화 관계(Loading test) : Alumina in powder>

Loading test의 경우, 위 그림에서 알 수 있듯이 40MPa의 압축하중이 점진적으로 인가됨에 따라, R1 line과 R2 line이 대부분 양의 방향으로 이동하고 있음을 확인할 수 있으나, 파수 변화의 크기가 일관적이지 않고 선형적인 거동을 하지 않았다.

이와 같은 결과를 통해, 제안방법 1을 통해 만들어진 시편(Alumina in paint)은 모재에 인가된 하중이 페인트 층까지 일량하게 전달되지 못하여 그 피에조 분광효과를 규명하기 어려운 것으로 판단된다. 즉, 일반적인 소규모 실험실 단위의 실험에서는, 도장의 두께를 세밀하게 조정하기 어렵고, 그 분포도 제어하기 어려우며, 다결정 물질을 센서로 사용하여 비일관적인 응력 전달이 일어난 것으로 판단된다.

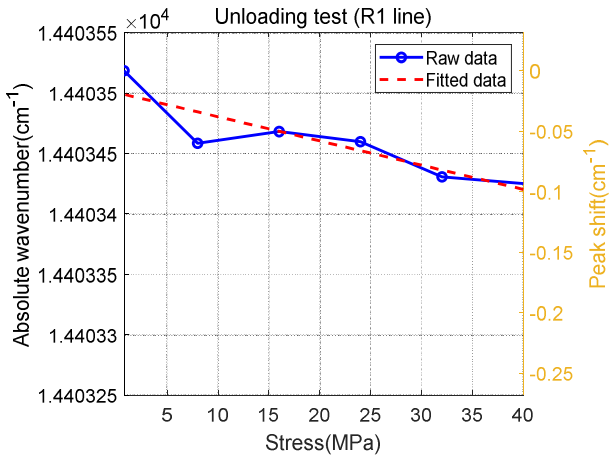
또는, 파수 변화량이 매우 미소하여 본 연구에 활용된 포터블 분광 시스템으로는 그 피에조 분광효과를 규명하기 어려운 것일 수도 있으나, 본 실험결과 만을 바탕으로 해당 결론을 내리기는 어렵다. 따라서, 높은 분광 해상도를 갖는 Benchtop 시스템을 이용한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

<응력-wavenumber shift 관계 선형회귀분석결과 (Loading test)>

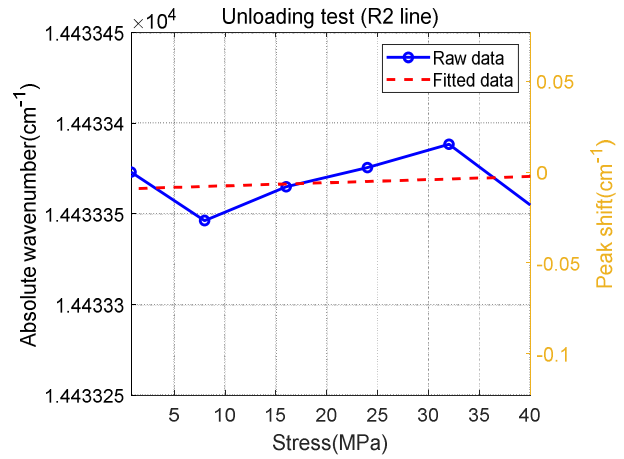
Group #	Test number	R1 line (14402 cm ⁻¹)			R2 line (14432 cm ⁻¹)		
		a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#1	1	0.00215830	14403.3392	0.38307	0.00071852	14433.3236	0.068810
	2	0.00173040	14403.3256	0.27248	0.00091195	14433.2894	0.154730
	3	0.00327110	14403.3183	0.71336	0.00299130	14433.2881	0.673260
#2	1	0.00074001	14403.5002	0.16122	0.00134590	14433.4759	0.290970
	2	0.00126160	14403.4676	0.28599	0.00056721	14433.4376	0.062207
	3	0.00211970	14403.4772	0.51725	0.00360710	14433.4068	0.890300

○ Unloading test 결과

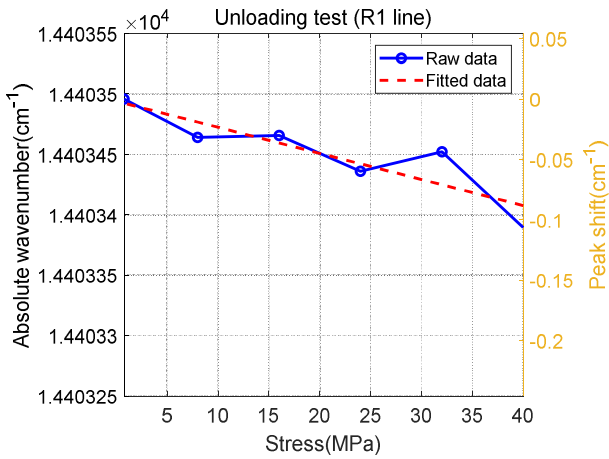
Loading test의 경우에는 비록 동일한 하중 하에서 발생하는 파수변화의 크기는 상이하였지만, 그 방향성은 양의 방향으로 동일하였다. 하지만 Unloading test의 경우에는 휨실험 결과와 유사하게 그 결과가 매우 일관적이지 못하였다. 이와 같은 비복원성은, 최초 페인트와 Alumina가 한 개의 구조체를 이루고 하중을 지지 하였으나, 인장하중이 가해진 후에 재료 분리·표면 갈라짐 등으로 인하여, 구조체가 분해되어 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 초기에는 모체에서 센서 층으로 동일한 방향성을 가진 응력이 일부 전달 되었으나, 페인트 층에 대한 반복적인 하중인가로 인하여, 응력 센싱 기능을 상실한 것으로 판단된다.



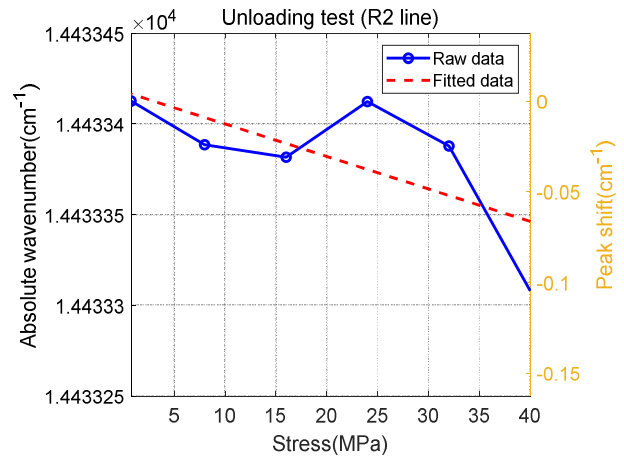
(a) R1 line



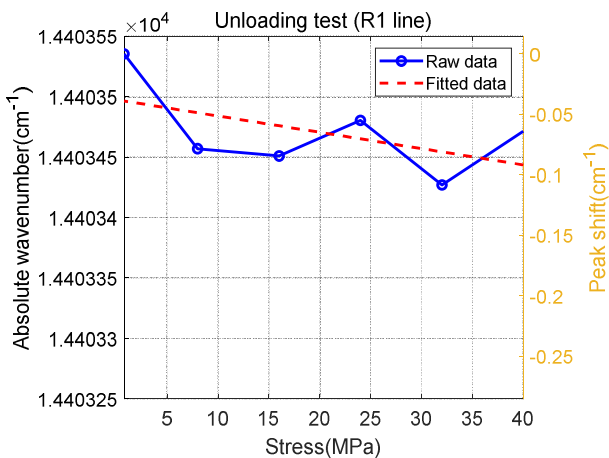
(b) R2 line



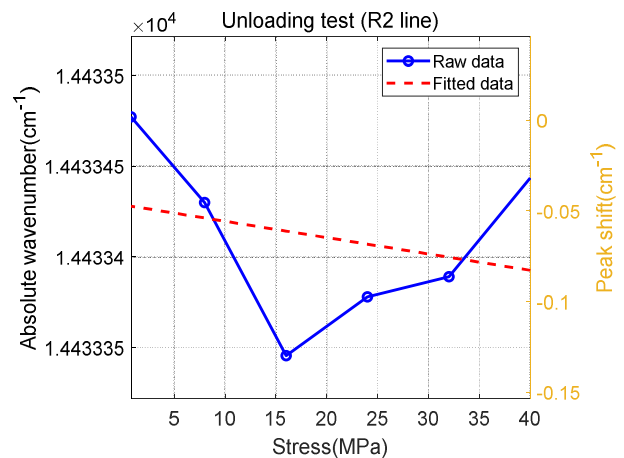
(c) R1 line



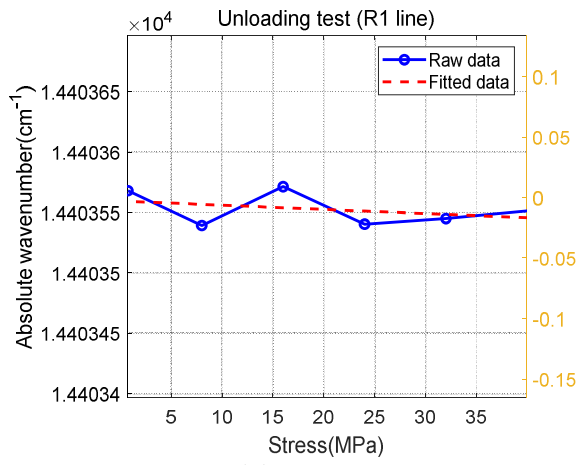
(d) R2 line



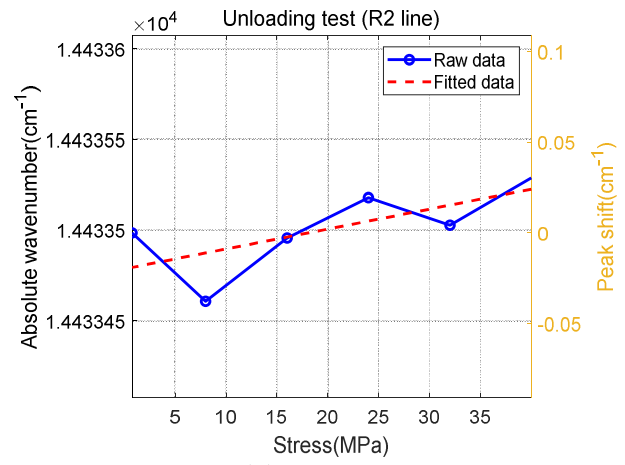
(e) R1 line



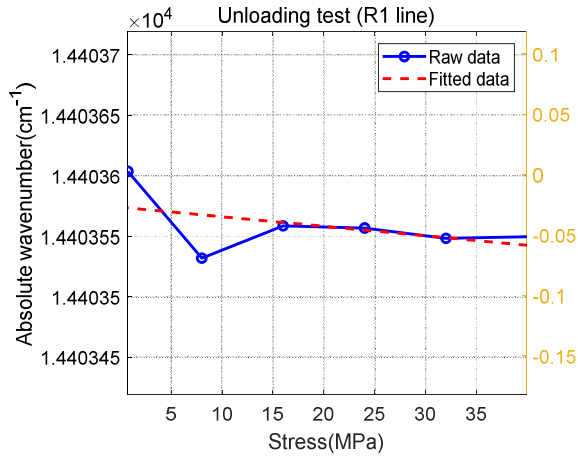
(f) R2 line



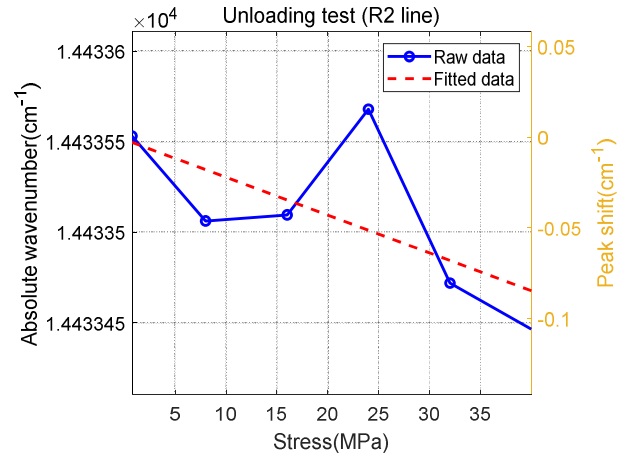
(g) R1 line



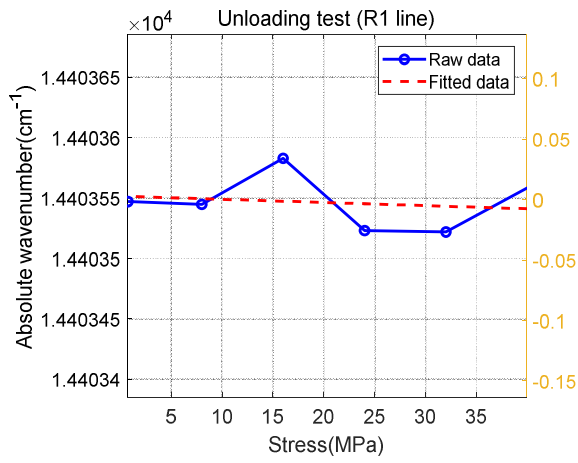
(h) R2 line



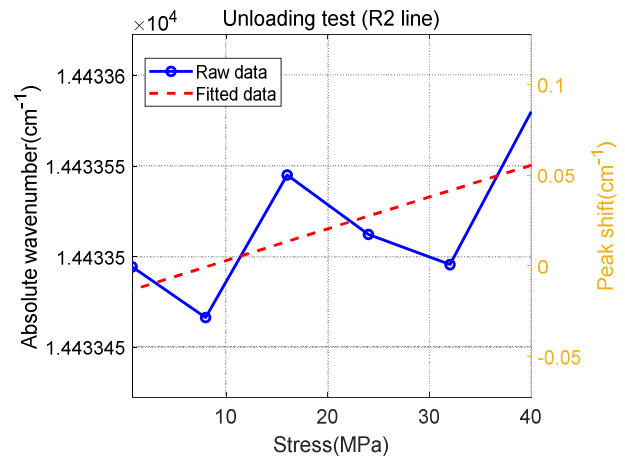
(i) R1 line



(j) R2 line



(k) R1 line



(l) R2 line

<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Alumina in powder>

<응력-wavenumber shift 관계 선형회귀분석결과 (Unloading test)>

Group #	Test number	R1 line (14402 cm ⁻¹)			R2 line (14432 cm ⁻¹)		
		a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#1	1	-0.00200260	14403.5004	0.78923	0.00017132	14433.3638	0.027897
	2	-0.00215880	14403.4939	0.79280	-0.0017931	14433.4180	0.472710
	3	-0.00134880	14403.4975	0.29362	-0.00090214	14433.4286	0.076023
#2	1	-0.00034714	14403.5595	0.13474	0.0010993	14433.4785	0.484610
	2	-0.00078719	14403.5741	0.23039	-0.0020867	14433.5512	0.444400
	3	-0.00026141	14403.5515	0.028438	0.0017555	14433.4803	0.405830

주안점 ☞	- 제안방법 1 (일반도료를 기반으로한 페인터블 센서)은 일관적이지 않은 결과로 인하여 본 연구에서 활용된 장비 만으로는 그 피에조 분광효과를 증명하기 어려움
----------	--

2.3.5.3. 제안 방법 2 : 접착식 페인터블 센서

○ 시편 제작

아래 그림은 본 연구를 위해서 제작된 압축하중실험용 입방체 시편(폭:50 mm, 길이:50 mm, 두께:50 mm)과 그 제작과정을 보인다. 제안 방법 1에 사용한 시편과 동일한 모재(시멘트 모르터)를 준비하고, 시편 표면을 연마한 후, 실리콘 실란트(Silicone sealant)를 이용하여 접착식 페인터블 센서 몰드(mold)를 만들었다(아래그림의 시멘트 모르터 상단 흰색 부분). 몰드가 충분히 경화할 수 있도록 5시간 동안 시편을 상온에서 보관하였다. 다음으로, 응력센싱부인 Silicon wafer 를 super glue를 이용하여 시멘트 모르터 표면에 부착하고, 충분한 접착력을 갖도록 1시간동안 상온에 보관하였다. 마지막으로, resin을 몰드 안쪽(Silicon wafer 상단)에 도포하고 2일 동안 상온에서 보관하였다.



<실리콘 실란트(Silicone sealant)가 도포된 시멘트 모르터 시편>

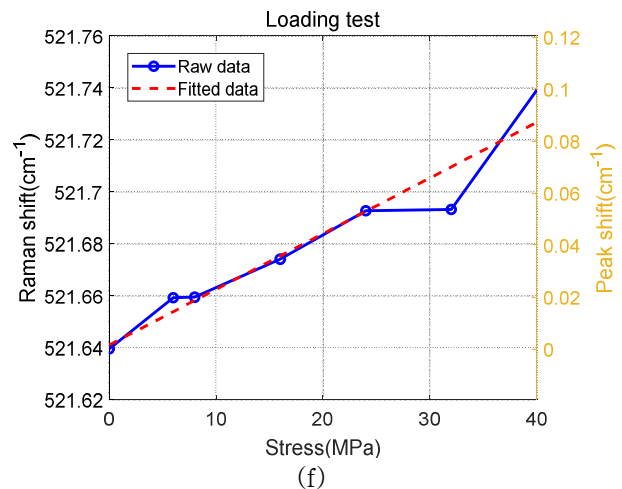
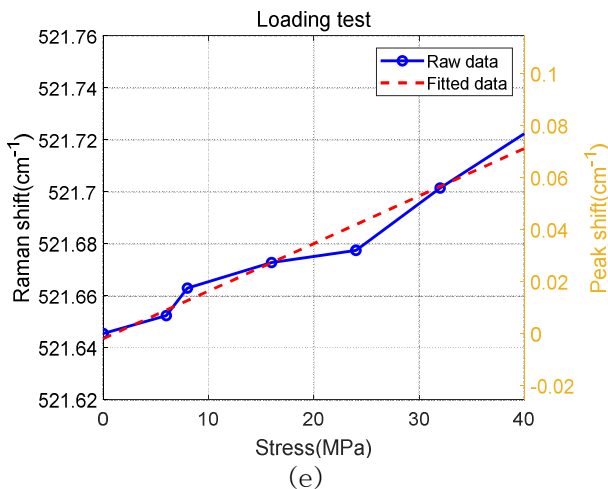
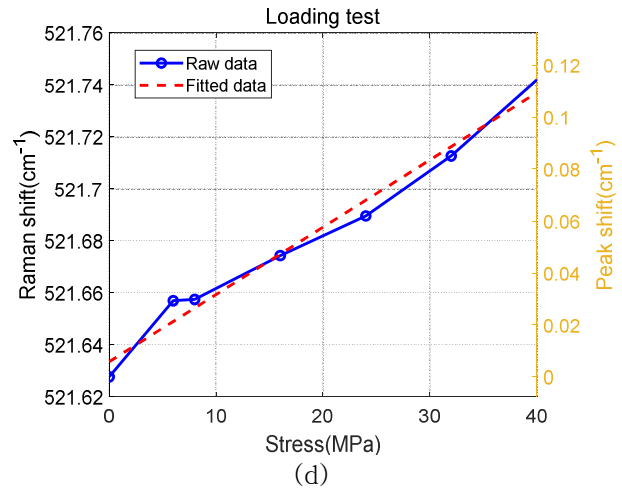
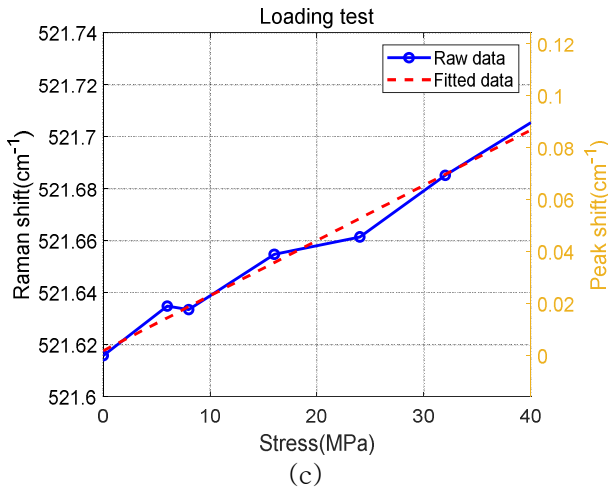
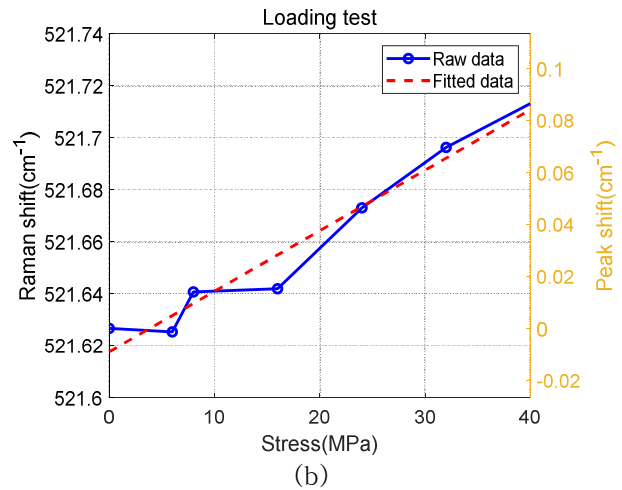
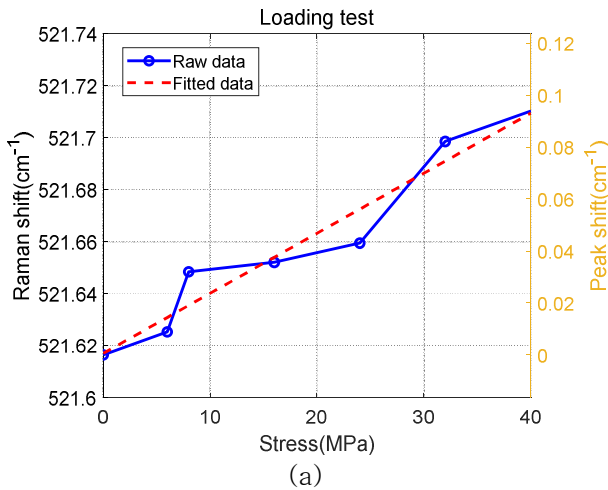


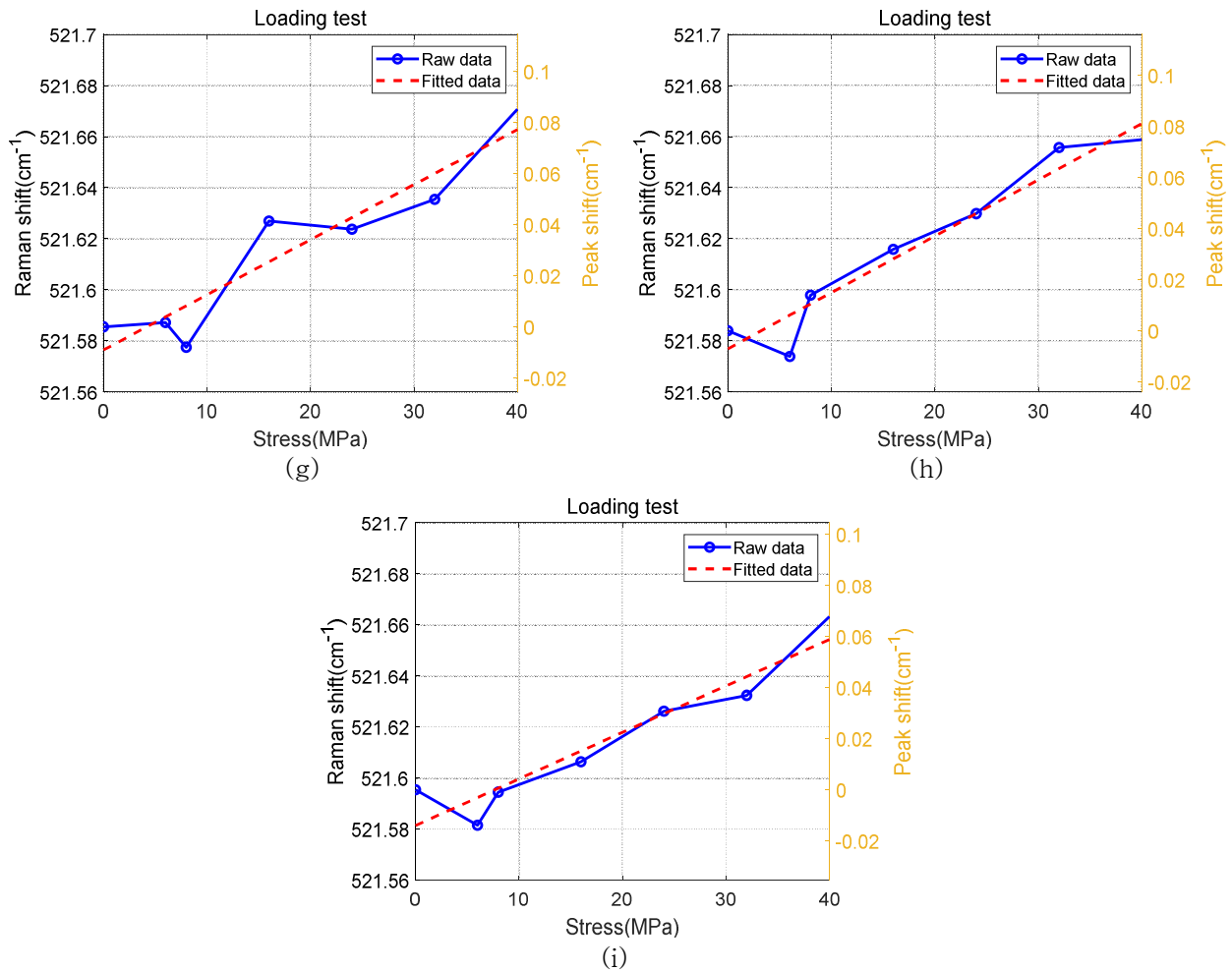
<본 연구에서 제작된 분광-압축하중실험을 위한 입방체 시편>

앞선 시험과 동일하게 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 하중을 총 5단계로 인가 (Loading test)하고, 각 하중단계에서의 라만 스펙트럼을 계측하여, 520cm^{-1} peak의 파수 이동량을 계산하였다. 총 5단계의 압축하중 인가단계가 종료되면, 해당 종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 동일하게 수행하여 그 재현성을 검증하였다. 아래 그림은 Loading test결과를 나타낸다. 모든 스펙트럼은 각각 10초 동안 계측되었다.

○ Loading test 결과

본 결과는 Loading test 결과를 보인다. X축은 인가된 압축응력을 나타내고, 좌측 Y축은 각 하중 단계에서 수집/분석된 라만 스펙트럼의 520cm^{-1} peak 위치를 나타내며, 우측 Y축은 초기하중 (0kN)을 기준으로 파수의 변화를 상대적으로 나타낸 결과(peak shift)를 보인다.





<하중-파수 변화 관계 (Loading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

Loading test 결과에서 알 수 있듯이, Silicon wafer in resin의 경우, 압축응력이 시편에 인가된 경우에 매우 일관적인 파수 이동결과를 보이는 것을 위 그림과 표에서 확인할 수 있다. 또한, 그 경사값인 피에조분광계수 또한 일관적으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, Unloading test 에서도 일관적인 결과를 보인다면, Silicon wafer in resin을 응력 센서로 사용할 수 있는 가능성이 높음을 말한다.

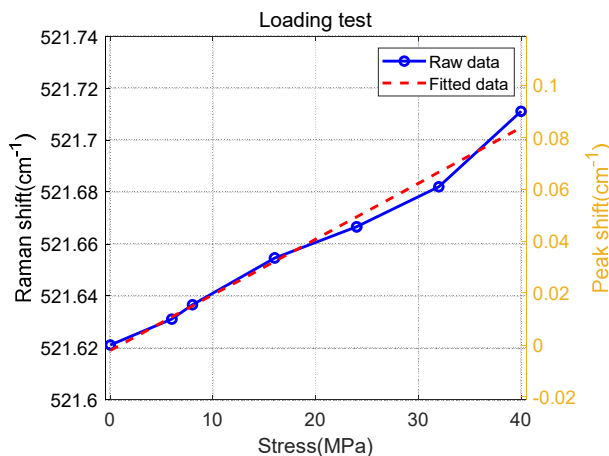
<응력-Raman shift 관계 선형회귀분석결과 (Loading test)>

Group #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#2	1	0.0023107	521.6170	0.941196
	2	0.0023282	521.6176	0.954350
	3	0.0021239	521.6176	0.984004
#3	1	0.0025895	521.6334	0.979376
	2	0.0018298	521.6435	0.963732
	3	0.0021421	521.6410	0.928136
#5	1	0.0021590	521.5764	0.883556
	2	0.0022065	521.5768	0.933606
	3	0.0018222	521.5814	0.901358

위에서 측정된 응력-파수변화 관계로부터, 피에조분광 계수(또는 압분광계수, piezospectroscopic coefficient)를 계산할 수 있으며, $\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$ 의 단위로 주로 표기된다. 여기서 피에조분광계수란, 아래 식과 같이 인가된 응력과 파수 변화의 관계를 나타내는 상수이며, 해당 값은 하중-파수 변화 그래프를 linear curve fitting 함을 통하여 계산할 수 있다.

$$\Delta v = \Pi_{ij} \sigma_{ij} \quad (1)$$

여기서, Δv 는 파수 변화 (cm^{-1}) Π_{ij} 는 피에조분광 계수(압분광 계수), σ_{ij} 는 인가된 응력(GPa)을 나타낸다. 아래 표는 본 연구에서 제안한 ‘제안 방법 2’인 접착식 페인터블 센서(Silicon wafer in resin)에 대한 분광 실험으로부터 획득한 데이터를 바탕으로 산출된 피에조분광 계수를 보인다. 최종적으로 도출된 피에조분광 계수는 전체 데이터에 대한 평균값인 $2.1680 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$ 이며, 이는 1 GPa의 응력이 대상 구조물에 인가될 경우 라만 스펙트럼이 2.1680 cm^{-1} 만큼 양의 방향으로 이동함을 의미한다. 따라서, 피에조분광 계수값을 미리 알고 있다면, 구조물에 레이저를 조사하여 수집된 스펙트럼의 파수의 이동량을 통하여 간단한 산술식 만으로 현재 구조물에 인가된 하중(센서 설치 이후에 대해)의 크기와 방향(압축/인장)을 계산할 수 있다. 여기서, 아래표의 ‘All spectrum’은 각각의 계산된 a, b를 산술 평균한 것이 아니라, 동일한 하중조건에서 수집된 모든 스펙트럼을 평균화하고, 이를 선형 회귀를 통하여 계산한 a, b값을 나타낸다.



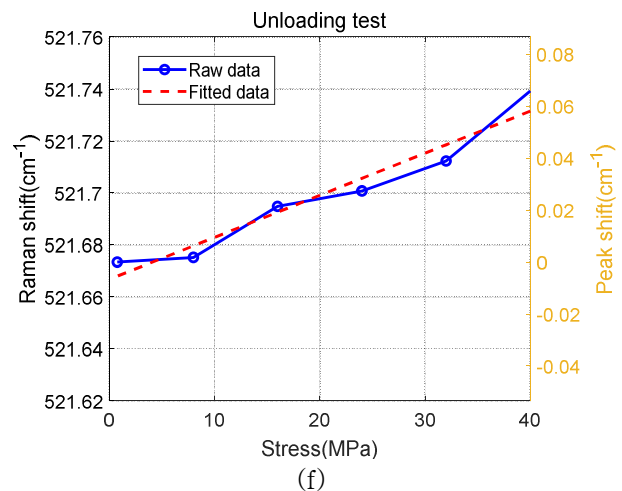
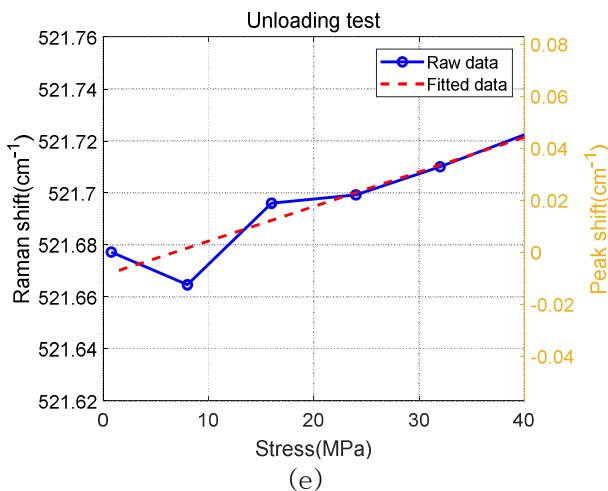
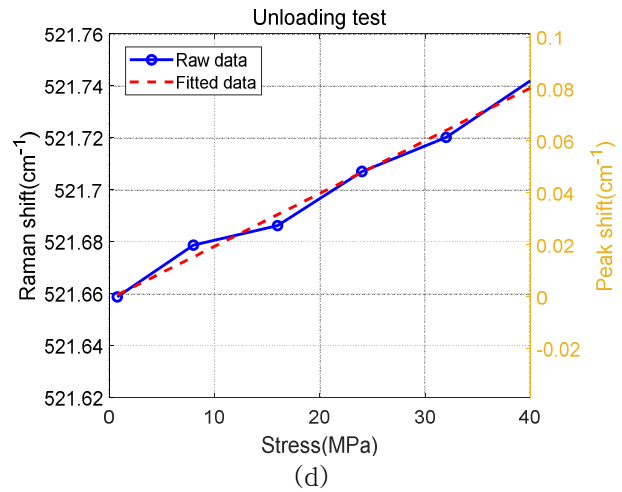
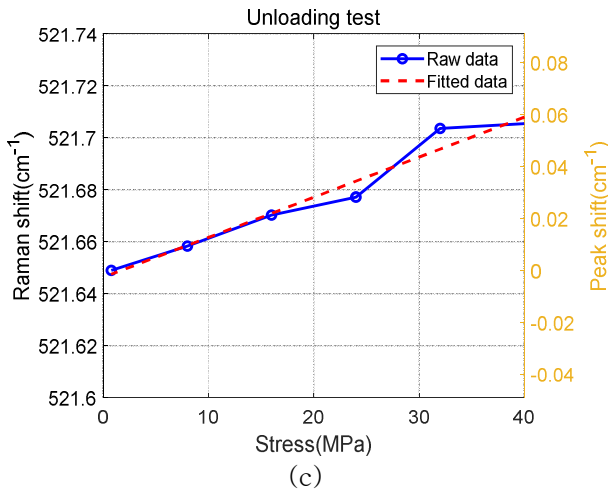
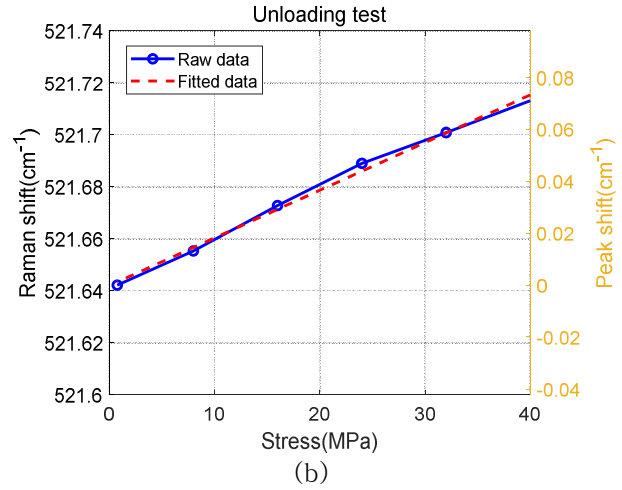
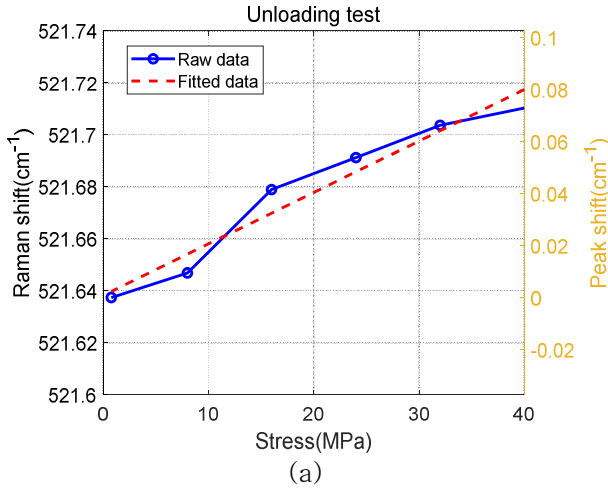
<응력-Raman shift 관계>

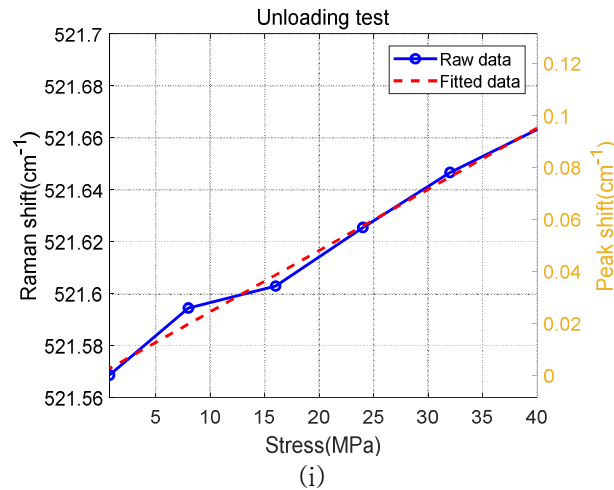
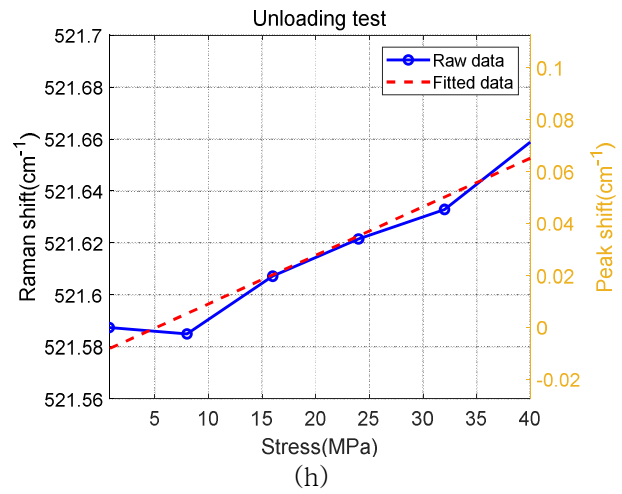
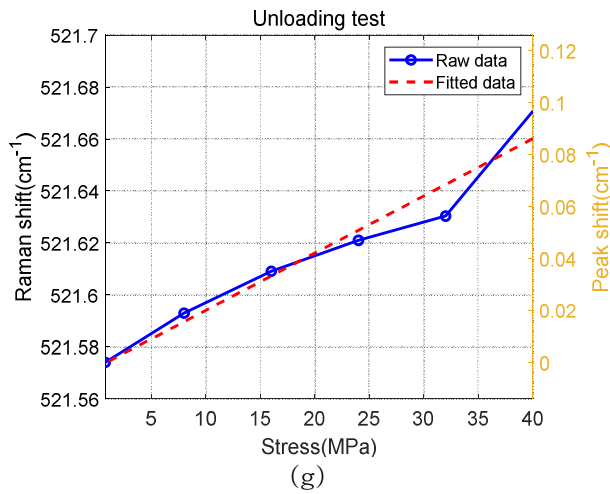
<Piezospectroscopic coefficient (Loading test)>

Order	Linear regression results		Piezospectroscopic coefficient ($\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$)
	a ($\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)	b (cm^{-1})	
1	0.0023107	521.6170	2.3107
2	0.0023282	521.6176	2.3282
3	0.0021239	521.6176	2.1239
4	0.0025895	521.6334	2.5895
5	0.0018298	521.6435	1.8298
6	0.0021421	521.6410	2.1421
7	0.0021590	521.5764	2.1590
8	0.0022065	521.5768	2.2065
9	0.0018222	521.5814	1.8222
Average (std.)	0.0021680 (0.00024)	521.6116 (0.02697)	$\Pi = 2.1680 (0.24026)$
All spectrum	0.00221456	521.6189	$\Pi = 2.2215$

○ Unloading test 결과

본 결과는 Unloading test 결과를 보인다. X축은 제거된 압축응력(인장응력)을 나타내고, 좌측 Y축은 각 하중 단계에서 수집/분석된 라만 스펙트럼의 520cm^{-1} peak 위치를 나타내며, 우측 Y축은 하중이 0 MPa 일때를 기준으로 파수의 변화를 상대적으로 나타낸 결과(peak shift)를 보인다. 520cm^{-1} 에서 파수 변화를 확인한 결과, 아래와 같이 하중이 제거 될수록(인장응력이 인가될수록) 음의 방향으로 파수 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있다(Unloading test이기 때문에 초기 하중에 40MPa). 압축응력을 인가하였을 때, 양의 방향으로 파수 변화가 일어난 것을 고려하면, 힘의 방향도 센싱할 수 있다는 것을 다시한번 확인할 수 있다.





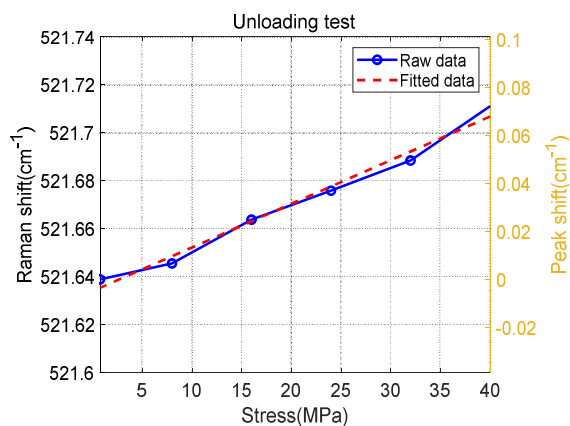
<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

Unloading test 결과에서 알 수 있듯이, Silicon wafer in resin의 경우, 압축응력이 인가된 시편에서 압축응력을 조금씩 제거하는 경우에도 매우 일관적인 파수 이동결과를 보이는 것을 위 그림과 아래 표를 통하여 확인할 수 있다. 또한, 그 경사값인 피에조분광계수 또한 일관적으로 계산되는 것을 확인할 수 있다.

<응력-Raman shift 관계 선형회귀분석결과 (Unloading test)>

Specimen #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#2	1	0.0019791	521.6382	0.949846
	2	0.0018359	521.6419	0.994628
	3	0.0015415	521.6463	0.959413
#3	1	0.0020307	521.6579	0.988188
	2	0.0013299	521.6682	0.860821
	3	0.0016198	521.6667	0.942189
#5	1	0.0022008	521.5721	0.947688
	2	0.0018683	521.5779	0.951968
	3	0.0023583	521.5694	0.989251

앞서 설명한 바와 같이, 피에조분광 계수(Piezospectroscopic coefficient)란 응력-파수이동 간의 관계를 나타내는 계수로써 $\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$ 의 단위로 주로 표기된다. 아래 표는 상기 동일한 실험조건의 Unloading test에 대해 산출된 피에조분광 계수를 보인다. 도출된 피에조분광 계수는 전체 데이터에 대한 평균값인 $1.8627 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$ 이며, 이는 1 GPa의 응력이 대상 구조물에 인가될 경우 라만 스펙트럼이 1.8627 cm^{-1} 만큼 양의 방향으로 이동함을 의미한다. 상기 Loading test와 동일하게, 아래표의 'All spectrum'은 각각의 계산된 a, b를 산술 평균한 것이 아니라, 동일한 하중조건에서 수집된 모든 스펙트럼을 평균화하고, 이를 선형 회귀를 통하여 계산한 a, b값을 나타낸다.



<응력-Raman shift 관계>

<Piezospectroscopic coefficient (Unloading test)>

Order	Linear regression results		Piezospectroscopic coefficient ($\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$)
	a ($\text{cm}^{-1}/\text{MPa}$)	b (cm^{-1})	
1	0.0019791	521.6382	1.9791
2	0.0018359	521.6419	1.8359
3	0.0015415	521.6463	1.5415
4	0.0020307	521.6579	2.0307
5	0.0013299	521.6682	1.3299
6	0.0016198	521.6667	1.6198
7	0.0022008	521.5721	2.2008
8	0.0018683	521.5779	1.8683
9	0.0023583	521.5694	2.3583
Average (std.)	0.0018627 (0.00033)	521.6265 (0.04137)	$\Pi = 1.8627 (0.3257)$
All spectrum	0.0018209	521.6339	$\Pi = 1.8209$

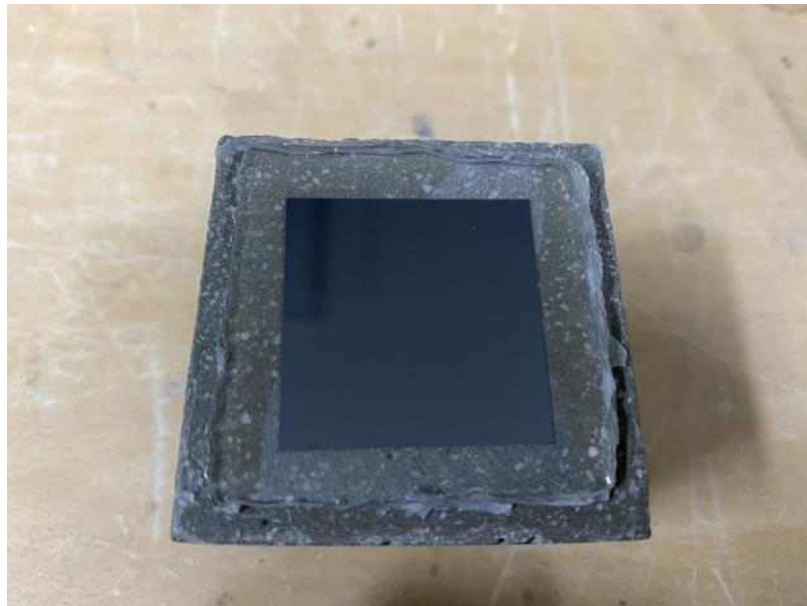
주안점	- 제안방법 2 (접착식 페인터블 센서)는 압축하중-파수변화가 매우 일관적이었으며, 그 재현성도 매우 높았음 - 즉, 본 연구를 통해 검증된 피에조 분광효과를 통해, 비접촉식 응력센싱을 할 수 있을 것으로 기대됨
-----	---

2.3.5.4. 소결

본 장에서는 피에조분광효과 검증을 위하여, 두 가지 제안방법에 대한 압축하중시험을 수행하고 피에조분광효과가 발견된 방법에 대하여 피에조분광계수(piezospectroscopic coefficient)를 실험적으로 도출하였다.

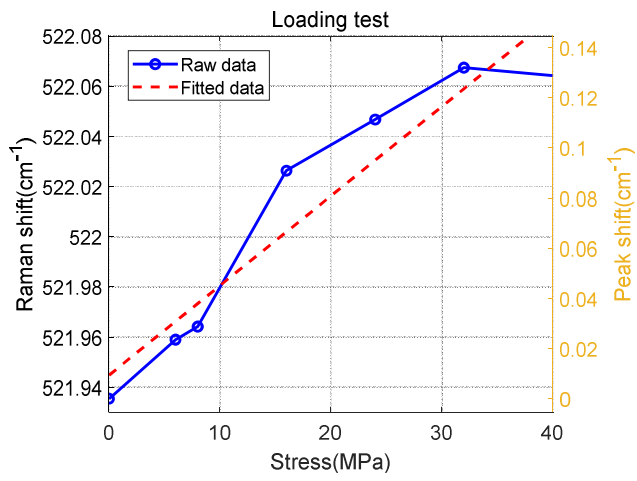
첫 번째 제안방법인 일반도료를 기반으로한 페인터블 센서의 경우, Loading test에서는 인가된 응력의 크기를 알 수 있을 만큼의 측정 정확성이 발견되지는 않았으나, 응력의 방향성(압축, 인장)을 알 수 있을만큼의 파수 변화(양의방향, 음의방향 이동)를 관찰할 수 있었다. 하지만 Unloading test에서는 휨실험과 유사하게 그 패턴을 발견하기 어려웠다. 따라서, 본 실험결과에서 사용된 실험장비로는 그 응력의 변화량을 측정하기는 어려운 것으로 판단된다.

두 번째 제안방법인 접착식 페인터블 센서의 경우, Loading test 및 Unloading test에서 일관적인 파수변화를 보였다. 이를 통하여, 응력의 방향성(압축, 인장) 뿐만 아니라, 도출된 피에조분광계수를 통하여, 인가된 하중의 크기도 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 다만, 본 연구에서 사용된 포터블 분광기의 해상도로 제한으로 인하여, 매우 정밀한 응력크기의 변화를 확인할 수는 없었으나, 해상도가 높은 분광기를 구매하는 것을 통하여 본 문제는 해결될 것으로 판단된다.

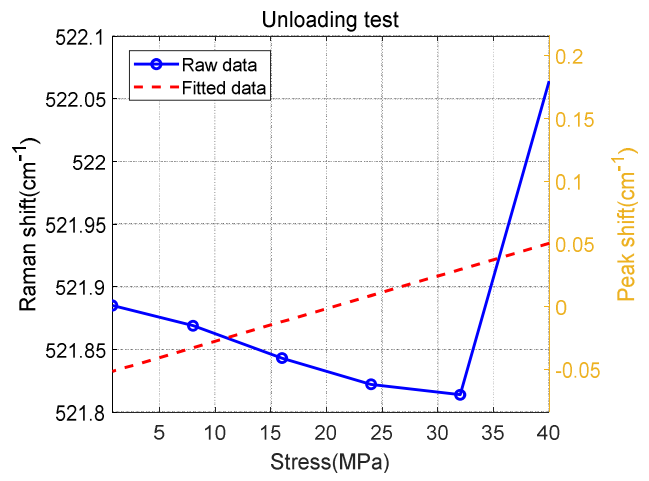


<압축하중실험과정에서 센서부 박리현상이 발생한 시편 (좌하단부, 우상단부의 흰색 부분)>

다만, 위 그림과 같이, 시편에 압축하중이 인가되는 과정에서 박리현상이 발생한 경우도 있었다. 이와 같은 경우에도 피에조 분광효과가 있음을 실험적으로 확인하였으나, 다른 시편들과는 다른 양상(경사 등)을 보였다. 그 일례로, 아래 그림과 같이 인가되는 압축하중이 증가 할수록 선형적 파수변화(아래 그림 a)를 하다가, 센서부 박리가 발생한 후(아래 그림 b-32MPa 지점) 센서부로 전달되던 응력이 사라지면서 선형성을 잃는 것이다. 따라해, 접착식 페인터블 센서의 경우에도 모제와 센서층간의 접착력이 중요한 인자인 것으로 확인된다. 다만, 센싱부의 박리현상이 Silicon wafer의 형상(삼각형 또는 사각형)에 기인하는지 또는 크기(부착면의 면적 등)에 기인하는지에 대해서는 추가적인 연구를 통하여 밝혀내야 할 것으로 판단된다. Silicon wafer 형상과 응력전달간의 관계를 규명하기 위해서는 해당 시편을 다양한 크기와 모양을 갖도록 절단해서 시편을 만들어야 하지만, 박판(thin-film) 특성상, 일반적인 도구로 대상물을 절단하게 되면 thin-film상 미세 균열들로 인하여, 응력센서로 사용할 수 없기 때문에, 본 연구에서도 제조사가 지원하는 크기만으로 시편을 구매하여 사용하였다.



(a) Loading test



(b) Unloading test

<압축하중실험과정에서 센서부 박리현상이 발생한 시편의 하중-파수 변화 그래프>

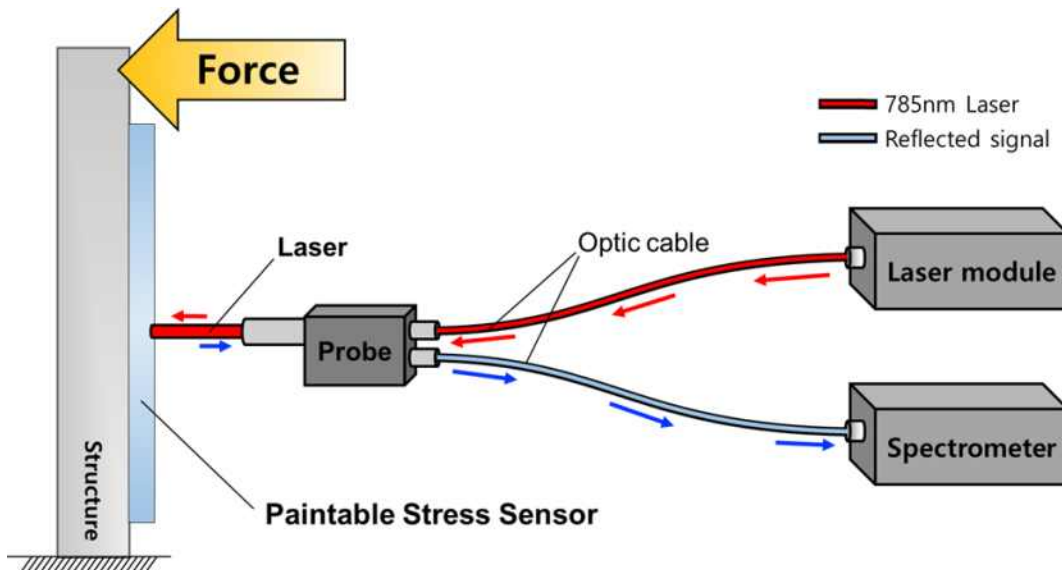
2.3.6. 평균응력 측정방법 : 렌즈를 이용한 평균응력 측정방법

2.3.6.1. 하중시험 방법

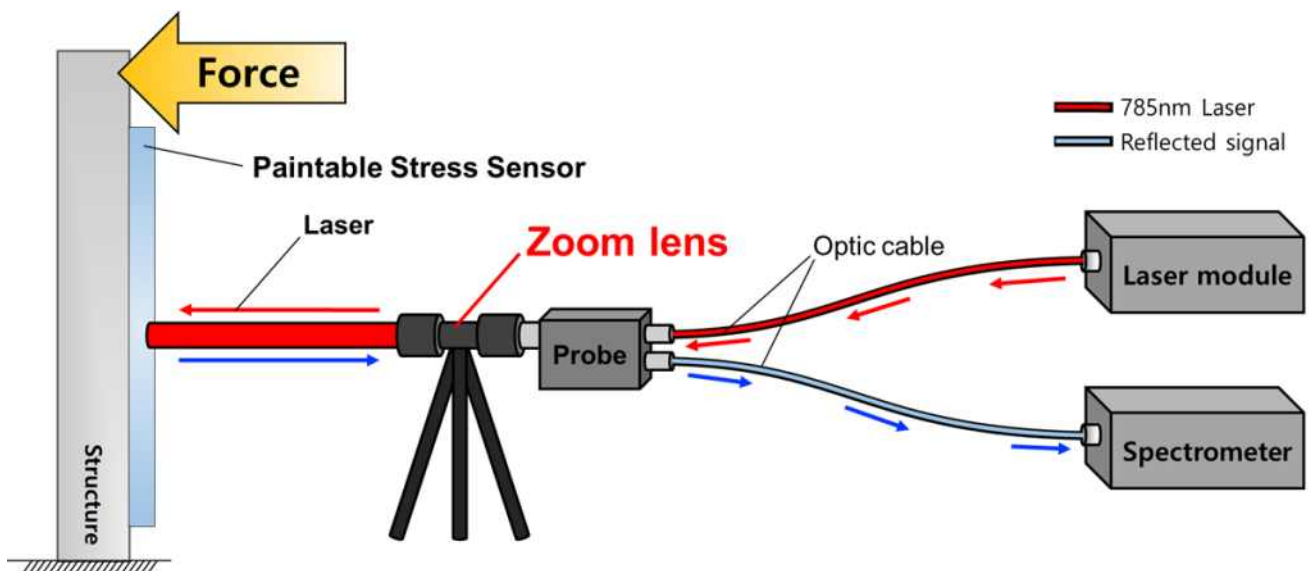
본 연구를 통하여, 레이저를 이용한 비접촉식 페인터블 응력측정센서의 활용 가능성이 검토되었다. 여기서 계측된 응력은 레이저가 조사된 면적에서 발생한 응력을 측정하게되는데, 일반적으로 사용되는(또한 본 연구에서 사용된) 포터블 분광시스템의 레이저 조사 직경은 μm 단위(본 연구에서 사용된 장비는 $85\ \mu\text{m}$)이다. 따라서, 미소한 면적에서 발생한 응력이 해당지역의 응력 상태를 대표한다고 단언할 수 없다. 따라서, 일정 지역의 응력을 평균화 하는 방법의 개발이 필요하다.

레이저를 이용한 일부 다른 센싱기술에서는 모터스테이지 등을 이용하여 일정 지역의 값을 평균화하는 방법을 제안하여 사용 중이지만, 본 연구에서는 줌렌즈를 활용하여 평균화된 응력을 직접 측정하고자 한다. 아래 그림은, 줌 렌즈를 이용한 응력측정 방법의 구성도를 보인다. 본 방법의 장점은 두 가지로, ① 첫 번째로는, 대상 면에 조사되는 레이저의 면적이 커지게 됨에 따라, 평균 응력을 측정가능하며, ② 줌 렌즈를 사용하게 되면서 원거리 응력 측정이 가능하다.

본 연구에서는, 이와 같은 줌렌즈를 활용한 페인터블 센서의 평균응력측정방법을 제안하고, 실험적으로 검증하였다.



<일반 프로브를 이용한 기존 응력측정 제안방법>



<줌 렌즈를 이용한 제안 응력측정 제안방법>

○ 시편 제작

본 응력평균화 방법은 줌렌즈를 사용하여 레이저 조사 면적을 넓히는 방법이기때문에, 레이저가 조사될 물질의 종류와는 상관없다. 따라서 본 연구에서는 한 종류의 시편(Silicon wafer가 포함된 resion)에 대해서만 검증하였다.

아래 그림은 본 연구를 위해서 제작된 실내실험용 간이 휨하중실험 시편(폭:2.25 cm, 길이:10 cm, 두께:0.9 cm)을 보인다. (제안 방법 1에 사용한 시편과 동일). 다시 말하면, 좌측 침단에는 시편을 지그에 고정하기 위한 구멍이 뚫려 있으며, 우측 침단에는 하중 재하를 위한 하중 재하부가 위치한다. 중앙부 Resin 은 레이저를 조사하여 대상물의 응력을 측정하는 응력 센싱부를 보인다. 응력 센싱부에 도포된 물질은 Silicon wafer가 포함된 resin이다.



<휨하중실험용 시편 : Silicon wafer + 에폭시 레진>

○ 하중실험 설계 : 휨실험

줌렌즈를 활용한 평균응력측정 방법에 사용된 하중은 아래와 같다. 본 연구에서는 최대 106 MPa의 하중을 총 6단계(증분 +17.74 MPa)로 나누어 휨시편에 인가하였다. 총 6단계의 휨하중 인가가 종료되면, 해당 종료값을 초기값으로 하고, 하중을 단계별로 제거하는 Unloading test를 동일하게 수행하여 그 재현성을 검증하였다.

<압축하중실험 순서>

Load step	0	1	2	3	4	5	6
Stress(MPa)	0	17.74	35.57	53.21	70.95	88.68	106.42

○ 줌렌즈 사양 및 시험 전경

본 연구에서 사용된 줌렌즈는 BWTEK에서 판매하는 상용제품으로 최대 60 mm 까지 Working Distance를 조절(모델에 따라 최대 6 m까지 가능)할 수 있으며, 이때 레이저 조사 면적이 최대가 된다. 즉, 줌 렌즈를 부착한 프로브를 이용하여 대상 시료의 표면으로부터 60 mm 거리에서 레이저를 조사할 경우, 레이저 조사부의 직경 약 2.3 mm 가 된다. 즉, 직경 2.3 mm 에 해당하는 원에서 얻어진 스펙트럼의 평균값을 측정하게 된다.

<본 연구에서 사용된 줌 렌즈의 사양>

Model	Name	Suitable Raman Excitation Range	Working Distance (adjustable)	Aperture Diameter	Focused Laser Spot Diameter
RTS200-VIS-NIR	Zoom Lens 20 – 60 mm	500 – 850 nm	20 – 60 mm	23 mm	~0.21 mm @ 20 mm ~2.3 mm @ 60 mm
RTS200-NIR	Zoom Lens 20 – 60 mm NIR	785 – 1064 nm			
RTS201-VIS-NIR	Zoom Lens 60 – 600 mm	500 – 850 nm	60 – 600 mm	48 mm	~0.22 mm @ 60 mm ~2.6 mm @ 600 mm
RTS201-NIR	Zoom Lens 60 – 600 mm NIR	785 – 1064 nm			
RTS202-VIS-NIR	Zoom Lens 0.6 – 6 m	500 – 850 nm	0.6 – 6 m	70 mm	~0.6 mm @ 0.6 m 8.5 mm @ 6 m

아래 그림은 줌렌즈 설치 이해를 돕기 위한 설치 예 및 실제 본 연구에서 활용된 시스템을 보인다. 본 연구에서는 최대 직경을 갖는 원에서의 평균응력을 측정하기 위하여, Working distance를 60 mm으로 유지하였기에, 레이저가 조사되는 면적을 육안으로 확인 가능한 것을 사진에서 확인할 수 있다. 본 실험에서 785nm 적색 레이저를 사용하였기에, Silicon wafer 시편 상단에서 붉은 색으로 조사된 레이저를 확인할 수 있다. 본 시스템을 통하여 계측된 응력값은 해당 면적의 값을 평균화한 응력이다.



<프로브에 설치 가능한 줌 렌즈(예)>



(a) 줌렌즈를 이용한 응력 측정기술



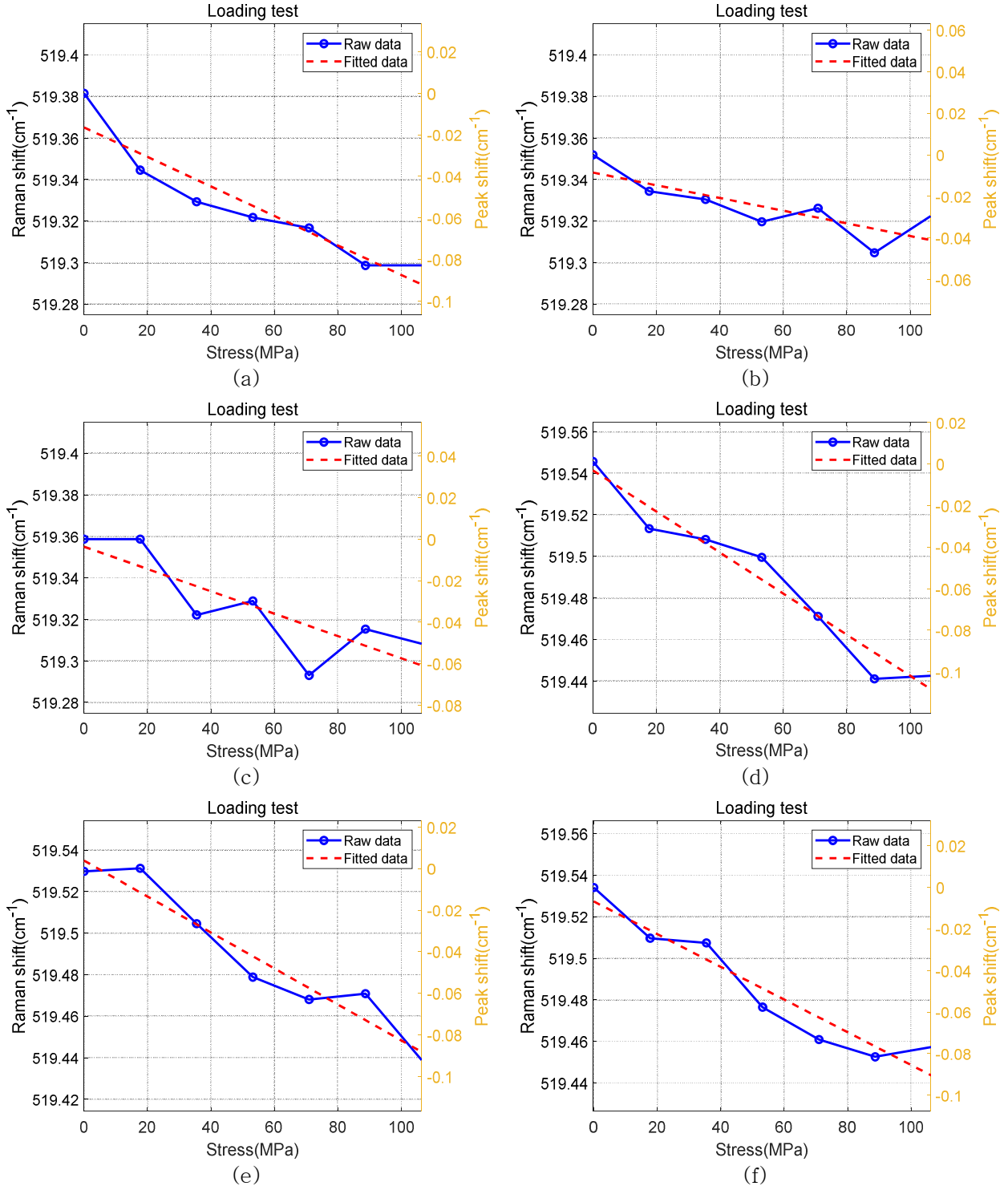
(b) 레이저 조사 거리측정을 위한 자

<프로브에 설치된 줌렌즈 및 레이저가 조사된 페인터블 응력시편>

2.3.6.2. 하중시험 결과

○ Loading test 결과

줌렌즈를 사용했을 때의 하중-파수 변화와의 관계를 확인하기 위하여, 각 하중단계에서의 라만 스펙트럼을 계측하여, 520 cm^{-1} peak의 파수 이동량을 계산하였다. 여기서, 각 하중단계에서 스펙트럼은 각각 80초 동안 계측되었으며, 시편과 렌즈의 이격거리는 60 mm 이다. 아래 그림은 줌렌즈를 이용하여 계측된 Loading test결과를 나타낸다. 센싱부에 발생한 응력은 인장응력이다.



<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

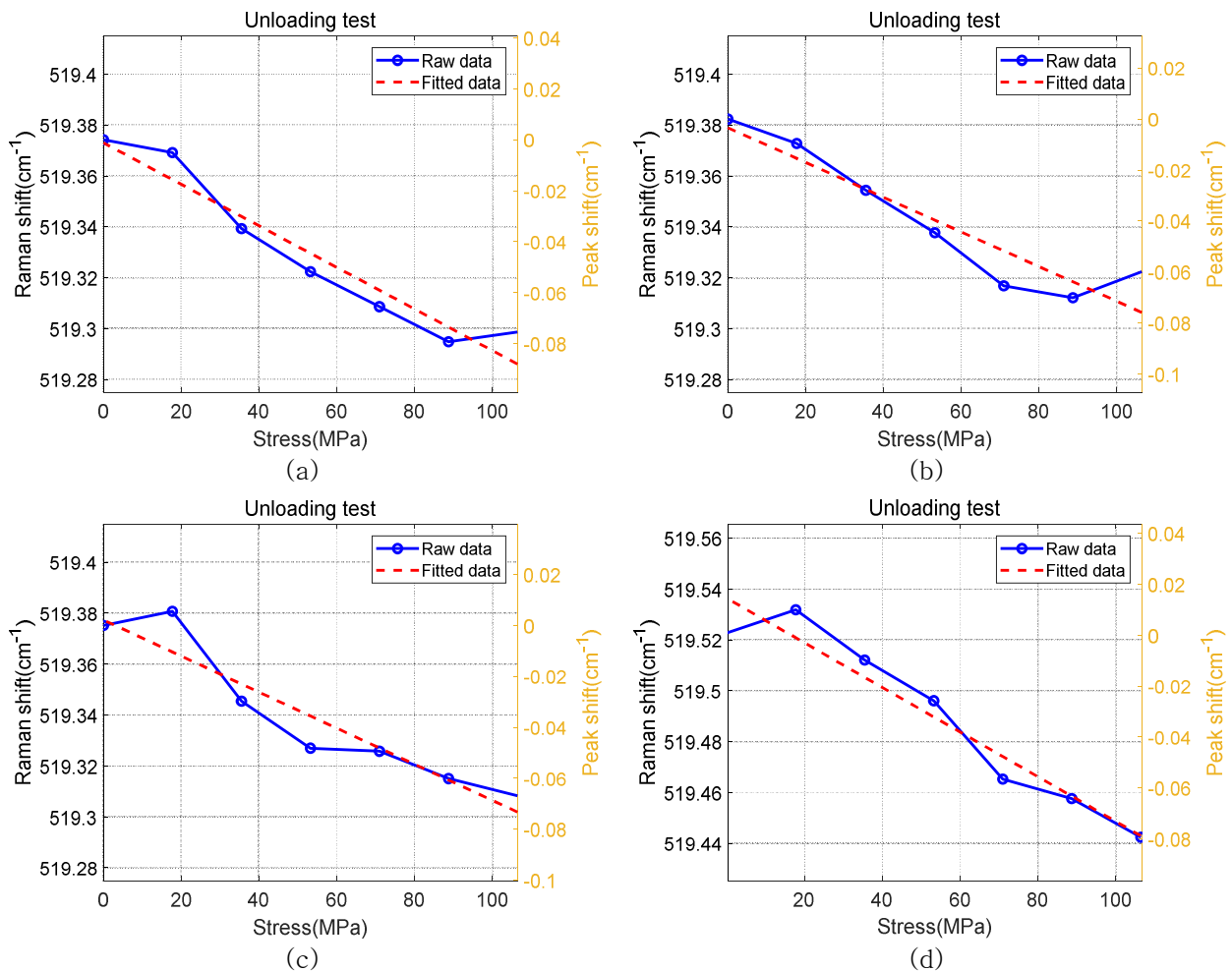
줌렌즈를 이용한 Loading test 결과에서 알 수 있듯이, Silicon wafer in resin의 경우, 인장응력이 시편에 인가된 경우에 일관적인 파수 이동(음의 방향)결과를 보이는 것을 위 그림과 표에서 확인할 수 있다. 또한, 그 경사도 음의 방향으로 동일하게 나타남을 실험적으로 확인하였다. 다만, 실제 표면에 발생하는 응력의 편차로 인하여, 그 값에 일부 오차가 있는 것을 확인하였다.

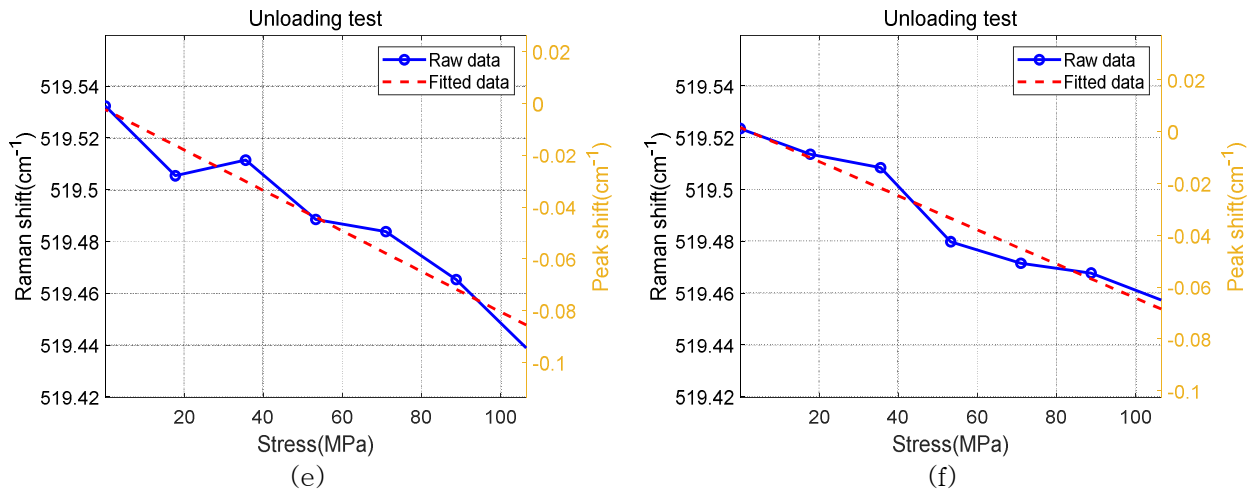
<응력-Raman shift 관계 선형회귀분석결과 (Unloading test)>

Specimen #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#1	1	-0.00071053	519.3651	0.88504
	2	-0.0003062	519.3434	0.65772
	3	-0.00053745	519.355	0.69364
#2	1	-0.00098908	519.5414	0.95053
	2	-0.00086569	519.5349	0.93341
	3	-0.00078719	519.5274	0.9117

○ Unloading test 결과

아래 그림은 줌렌즈를 이용하여 계측된 Unloading test결과를 나타낸다. Loading test와 동일한 계측시간 (80초), 시편과의 이격거리 (60mm)를 유지하여 측정된 결과를 보인다. 시편에 휨하중이 가해짐에 따라, 센서부 및 시편 상부에는 Loading case와 동일하게 인장응력이 발생하게 된다.





<하중-파수 변화 관계(Unloading test) : Silicon wafer in resin (w/ heat treatment)>

줌렌즈를 이용한 Unloading test 결과도 Loading test와 동일한 방향 파수 이동(음의 방향)을 보이는 것을 확인하였으며, 그 경사도 동일함을 실험적으로 확인하였다. 이와 같은 실험결과를 바탕으로 응력측정 실험체로부터 최대 60 mm 까지 거리에서 응력을 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 본 결과를 바탕으로 질적성과지표 중에 하나인 응력 측정거리 10 mm 이상의 지표를 달성하였다고 판단한다.

이와 함께, 분광시스템 제조사의 브로셔(보고서)에 따르면, 상용 줌렌즈를 활용하여 최대 6m (6,000 mm) 의 거리에서도 라만 스펙트럼을 계측할 수 있다고 보고하고 있다. 6 m 의 거리에서 계측할 경우, 레이저 조사 직경이 8.5 mm 까지 확장된다. 따라서, 접근이 어려운 해상교량의 교각 부, 케이블교량(사장교, 현수교 등)의 주탑 등의 응력측정에 본 제안 기술을 사용한다면 매우 효율적일 것으로 판단된다.

<응력-Raman shift 관계 선형회귀분석결과 (Unloading test)>

Specimen #	Test number	a (cm ⁻¹ /MPa)	b (cm ⁻¹)	R ²
#2	1	-0.00081676	519.3731	0.93335
	2	-0.00068182	519.3789	0.88103
	3	-0.00070907	519.3774	0.8973
#3	1	-0.00087707	519.5364	0.93463
	2	-0.00078187	519.531	0.93588
	3	-0.0006586	519.5239	0.95145

주안점	- 줌렌즈를 이용한 평균응력 측정방법은 레이저가 조사되는 면적을 넓히는 방법으로, 본 연구를 통하여 페인터블 센서에 대한 활용성이 검증됨 - 즉, 본래 기술로는 마이크로 단위(85 μm)의 직경을 갖는 원에서 발생하는 응력을 측정할 수 있었다면, 본 기술을 통하여 밀리미터(2.3 mm) 직경을 갖는 원에서 발생하는 응력을 평균화 할 수 있음을 실험적으로 검증함 - 상용제품으로 8.5 mm 까지 레이저 조사 직경을 넓힐 수 있으므로, 접근이 어려운 지역에 본 기술을 활용하면 효율적일 것으로 판단됨
-----	---

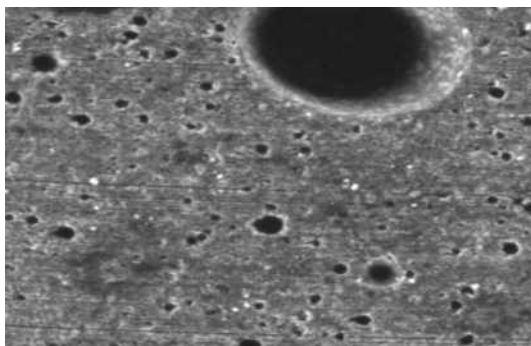
2.3.7. 콘크리트 표면 응력 분포에 대한 고찰

이론적으로, 콘크리트 시편에 힘을 가하였을 때, 응력분포는 대상 시편 내에서 고르게 발생하여야 한다. 하지만, 실제로는 시편 내 골재의 모양, 골재 배열, 공극 등과 같은 재료 자체의 불균질성에 따라 응력분포가 다르게 발생하게 된다. ① 상용 유한요소해석 프로그램을 통한 시뮬레이션과 ② 실험적인 연구 등의 선행 연구 결과를 바탕으로, 본 연구에서 얻어진 결과와 그 원인을 분석하였다.

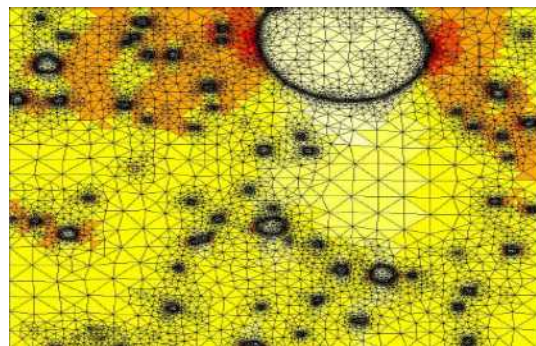
2.3.7.1. 프로그램을 통한 시뮬레이션

○ FEM을 이용한 공극의 분포에 따른 응력분포 해석

본 논문(김보석 외, 화상 이미지 기반 FEM 해석을 이용한 기포제 혼입 시멘트 페이스트의 역학 성능 평가, *한국건축시공학회지*, 2015)¹⁰⁾에서는 구조용 경량 기포 콘크리트의 역학적 성능을 평가하기 위하여, 기포제 혼입률에 따른 시멘트 페이스트를 제작하고 OOF(Object-Oriented Finite elements)라는 화상 이미지를 통한 재료의 미세구조 FEM 해석을 할 수 있는 프로그램을 이용하여 응력 분포를 확인하였고, 그 결과는 아래와 같다.



<화상 분석기를 활용한 콘크리트 표면>

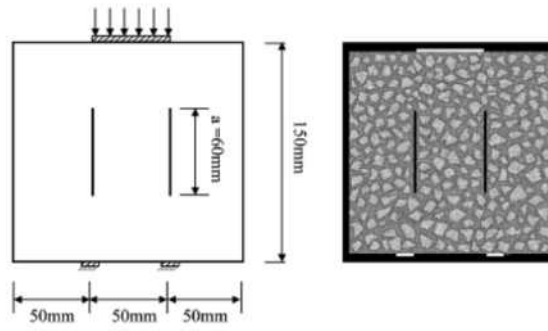


<OOF를 활용한 콘크리트 표면 응력 분포>

콘크리트 표면 응력 분포를 확인해보면, 큰 공극주변에서 응력집중현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 동일한 시편 내에서도 다양한 크기의 공극이 불균등한 위치에 분포해 있기 때문에 실제 하중실험을 수행 하였을 때, 공극 환경에 따라 응력 분포가 다르게 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 연구에서 일부 발생한 비선형적인 하중-파수변화도, 실제 시멘트 모르타르 시편에 발생한 불균등한 응력분포에 기인한 것으로 판단된다.

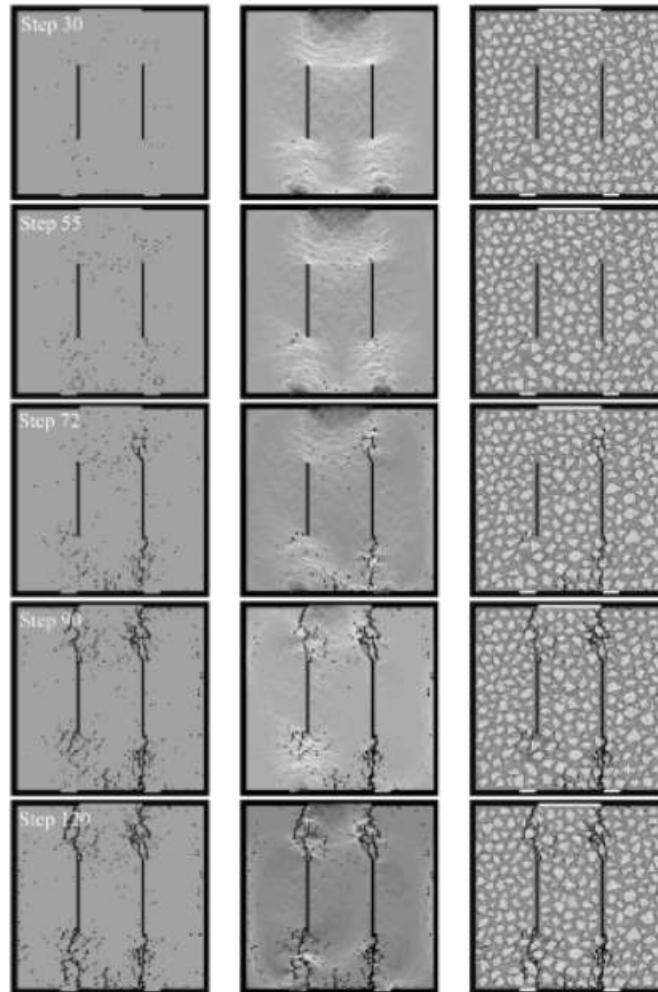
○ Mesoscopic mechanical model

본 논문(W.C.Zhu and C.A.Tang, Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model, *Construction and Building Materials*, 2002)¹¹⁾에서는 외부 힘에 의한 콘크리트 파단 과정을 시뮬레이션 하였다. Meso-level 에서 유사취성(콘크리트) 물질의 불균질성을 반영하기 위하여, 탄성계수/강도를 포함한 재료의 역학적 매개변수를 통계 밀도 함수에 의해 정의된 Weibull 분포를 따라 가정하고, 수치모델의 해석을 진행하였다. 시편을 구성하는 엘리먼트 사이의 연속적인 관계에서, 손상이 점차적으로 증가할 때 탄성계수의 감소를 고려하여 모델을 구성하였다.



(a) Specimen geometry

(b) Numerical model



(a) AE distribution

(b) Maximum tensile stress

(c) Cracking pattern

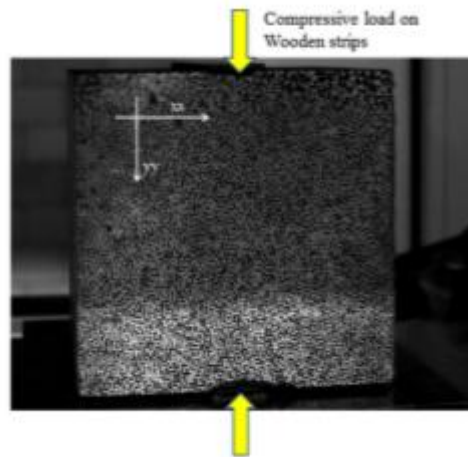
<콘크리트 파단 시뮬레이션 결과>

위 테스트 결과, 같은 사이즈를 갖는 노치가 시편에 있는 환경에서 상단에 힘을 가하였을 때 동일한 위치에서 균열이 발생하는 것이 아니라, 다른 한쪽에서 먼저 결함이 발생한 후 반대편에 결함이 발생하였다. 이는 하중 근처의 다양한 골재 크기를 갖고 있는 콘크리트 재료의 불균질한 특성 때문에 더 많은 혹은 적은 하중 편심이 시편에 유발되기 때문이다.

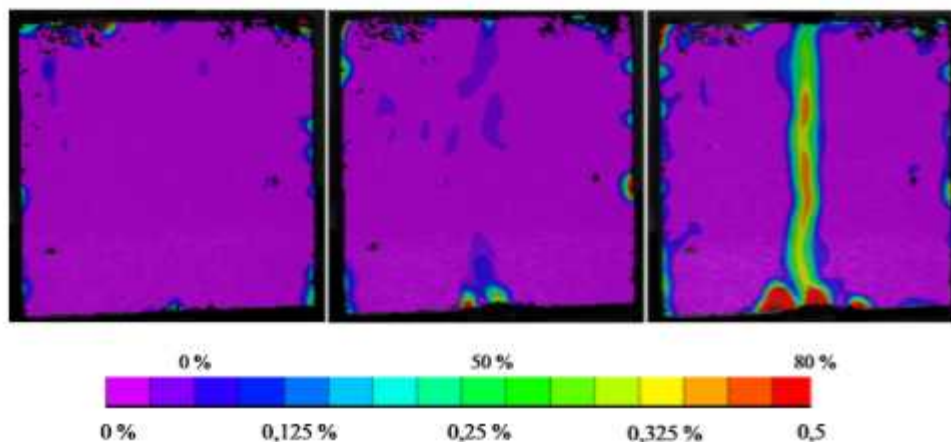
이와 같은 결과를 바탕으로, 실제 압축하중 시편의 표면에서 매우 일량한 하중 분포가 발생하지 않을 수 있다는 것을 확인하였다.

2.3.7.2. 실험적 연구

본 연구(Hugo Egüez Álava et al., Chloride interaction with concretes subjected to a permanent splitting tensile stress level of 65%, *Construction and Building Materials*, 2016)¹²⁾에서는, 정방형 시편 상단에 압축력을 가하였을 때, 이에 따른 주 변형(e_1)을 DIC 기법을 통하여 확인하였다. 주 변형(e_1)은 e_{xx}, e_{yy}, e_{xy} 의 변환(수치적 변화)으로부터 구하고 이를 변형률 맵으로 작성하였다.



<압축 재하 실험>



<정방형 시편에 발생하는 변형률 contour>

위 DIC 결과와 같이, 정방형 시편에 일축 압축 하중 재하시험을 한 경우, 표면에서 발생하는 변형률은 이론적인 결과 (유한요소해석 결과) 와는 다르다. 즉, 표면에서의 변형률 분포는 불균등하며, 이는 재료의 불균질성에 기인하는 것으로 판단된다.

2.3.7.3. 소결

위와 같은 논문들의 결과를 종합해보면, 콘크리트에 힘을 가하였을 때 응력이 균일하게 발생하지 않는 것은 콘크리트라는 재료의 불균질성이 가장 큰 원인으로 판단된다. 콘크리트 시편을 제작할 때, 골재 배열, 골재 사이 간격 등은 임의로 조작할 수 없기에, 동일한 재료와 비율을 이용하여 시편을 제작하여도 그 하중 전달 관계는 다르다. 따라서, 압축하중재하 시험에서 일부 발견된 비선형적인 하중-파수 관계는 실제 시멘트 모르타르 시편에 발생한 불균등한 응력 분포에 기인한 것으로 판단된다.

2.3.8. 질적성과지표 검증

2.3.8.1. 응력센싱용 도료의 피에조분광현상 규명 (목표치 : 최소 1종)

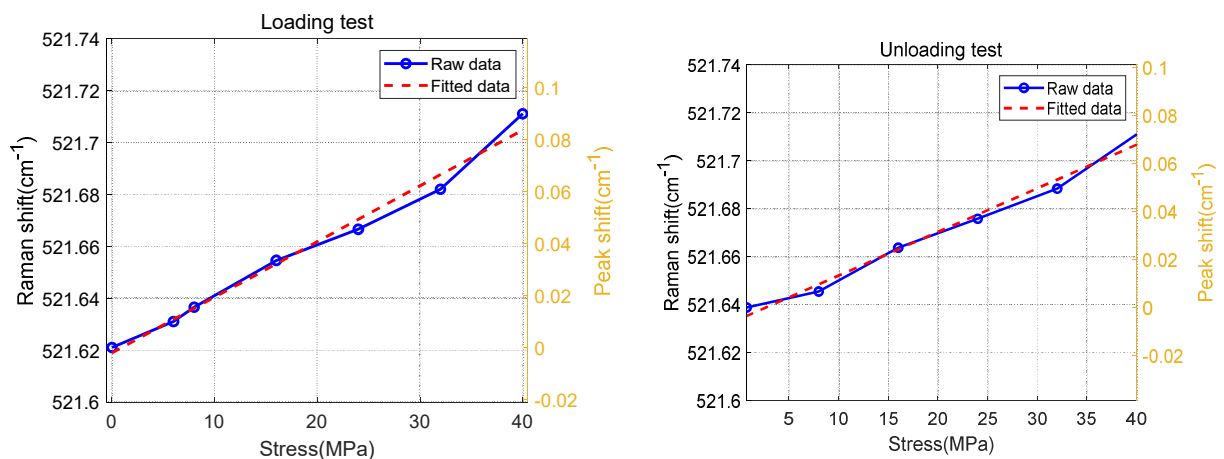
본 연구에서는 두 가지 제안방법에 대한 압축하중시험을 수행하고 피에조분광효과가 발견된 방법에 대하여 피에조분광계수(piezospetroscopic coefficient)를 실험적으로 도출하였다. 총 3가지 조합에 대한 피에조분광현상을 규명하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

질적 성과지표 → 달성

[질적 성과지표] 피에조분광현상 규명 1종 이상



<센서가 도포된 하중시편>



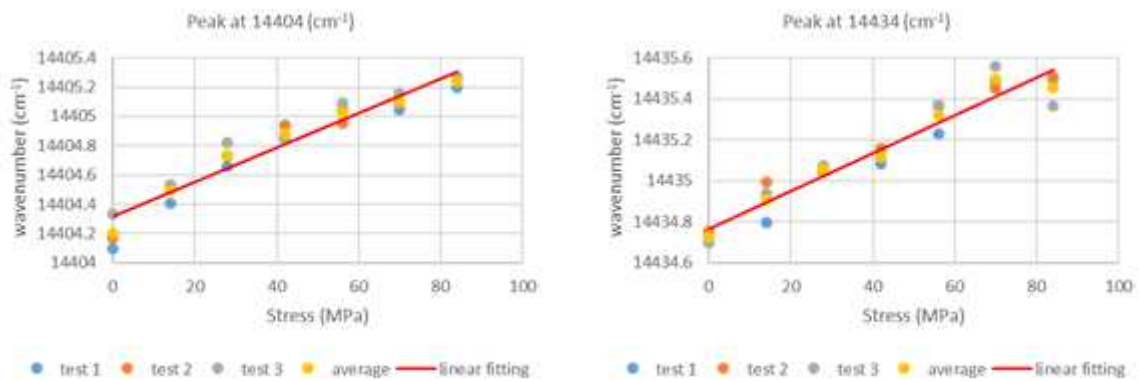
<압축하중-파수 변화 결과>

- 본 연구에서는 최소 1종 이상의 시편에 대해 최대 40MPa의 압축하중을 가하고, 5단계로 나누어 인가하고, 이때 하중-파수변화 관계가 선형성을 갖는지 확인하여 질적성과 달성여부를 검증함
- 위 그림과 같이, 압축하중-파수변화 관계가 선형성을 가짐을 실험적으로 검증함. 즉, [질적 성과지표]에 해당하는 '피에조분광현상 규명 최소 1종'을 달성함

위 1 종의 결과 이외에도, 아래와 같은 방법(Alumina + paint, Titanium dioxide powder in paint)에 대해서도 피에조분광현상을 규명하였다.



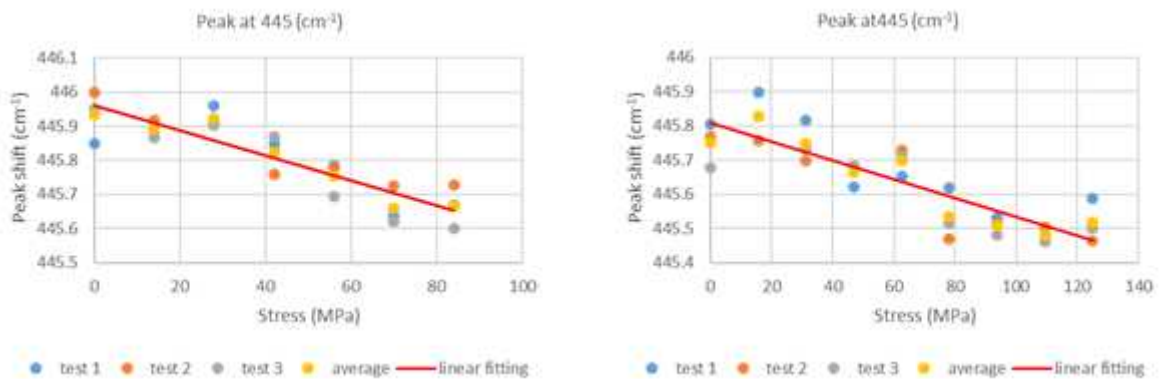
<Alumina가 추가된 페인트가 도포된 시편>



<인장하중인가 실험 결과 : 하중-파수의 선형적인 관계 규명>



<일반 페인트가 도포된 시편>



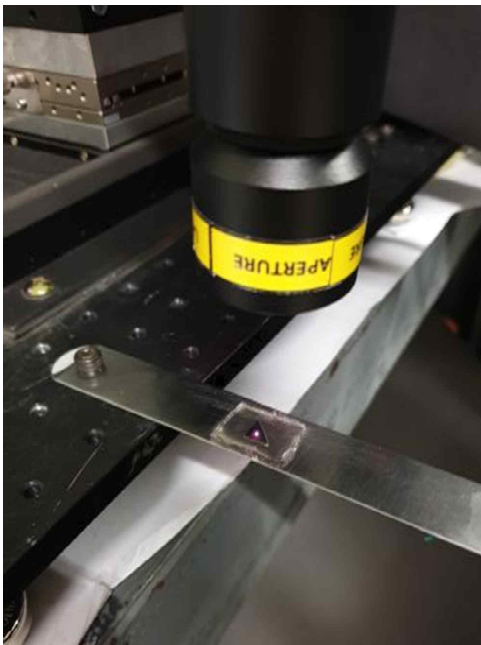
<인장하중인가 실험 결과 : 하중-파수의 선형적인 관계 규명>

2.3.8.2. 응력 측정 거리 (목표치 : 10 mm 이상)

본 연구에서는 레이저를 이용한 비접촉식 응력방법을 제안하였다. 이와 같은 “비접촉식”기술에 대한 검증을 위하여, 응력 측정 이격 거리를 10 mm 이상으로 설정하였다. 여기서 10 mm 란 응력 측정 시편과 프로브와의 이격 거리를 의미하며, 분광법에서는 Focal length라고도 표현된다. 본 연구에서는 줌렌즈를 활용하여, 일정지역의 응력을 평균화함과 동시에, 원거리에서도 측정 가능케 하였다. 응력 측정거리 10 mm 이상에 대한 실험적인 검증 결과는 아래와 같다.

질적 성과지표 → 달성

[질적 성과지표] 응력 측정 이격거리 10 mm 이상

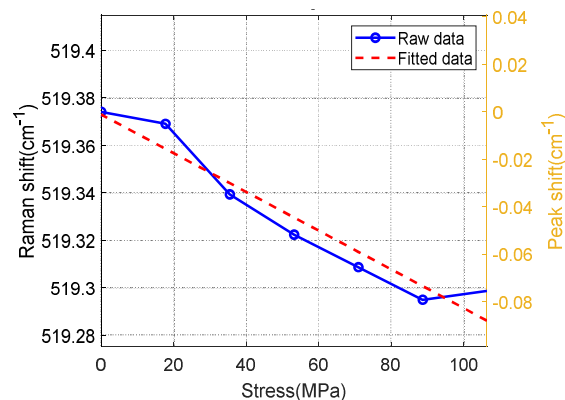


(a) 줌렌즈를 이용한 응력 측정기술



(b) 레이저 조사 거리측정을 위한 자

<프로브에 설치된 줌렌즈 및 레이저가 조사된 페인터블 응력시편>



<프로브에 설치된 줌렌즈 및 레이저가 조사된 페인터블 응력시편>

- 본 연구에서는 줌렌즈를 응력측정에 도입하는 것을 통하여, 일정지역의 응력을 평균화 하였을 뿐만 아니라, 응력측정 대상 시편부터 프로브 선단까지의 거리를 60 mm 로 이격하여 응력을 측정하였음
- 즉, 질적성과지표인 “응력 측정 거리 10 mm 이상”을 달성함

2.3.8.3. 계측 정확도 (목표치 : ± 10 MPa)

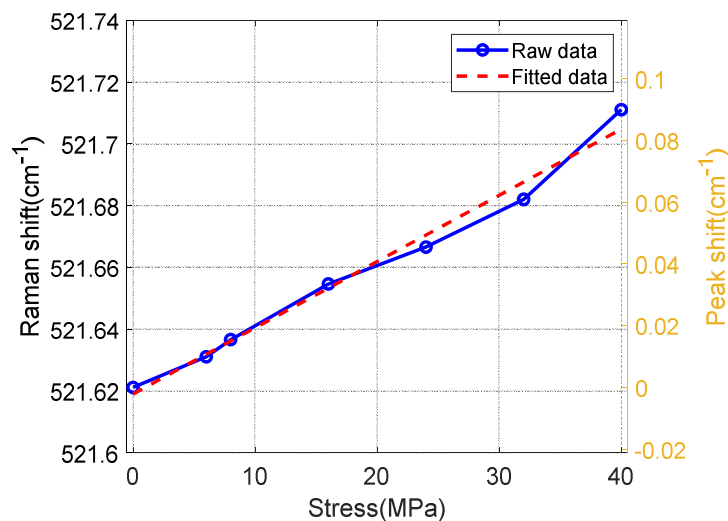
본 연구에서는 피에조 분광현상 규명과 함께, 계측 정확도 ± 10 MPa 이라는 질적 성과지표를 설정하였다. 이는 본 연구에서 사용된 포터블 분광시스템의 해상도와도 연관이 되는 지표이다. 해당 질적 성과지표 달성 여부 검토 결과는 아래와 같다.

질적 성과지표 → 달성

[질적 성과지표] 계측 정확도 ± 10 MPa

<시멘트 모르터 시편에 인가된 압축하중 단계>

Load step	0	1	2	3	4	5	6
Stress(MPa)	0	6	8	16	24	32	40



<상기 압축하중인 시편에 인가 되었을 때 하중-파수변화 관계>

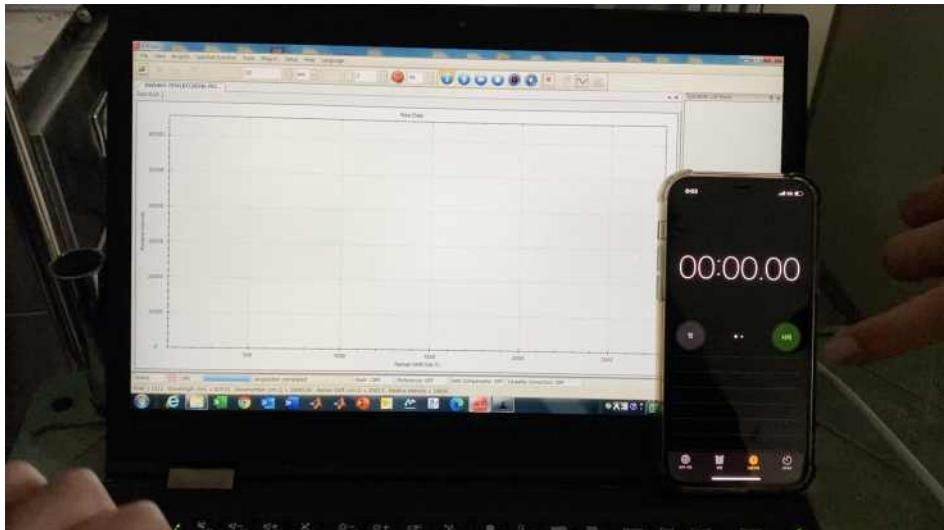
- 본 연구에서는 하중 0인 단계를 포함하여, 총 7단계의 압축하중을 시편에 인가하여, 계측 정확도를 분석하였음. 여기서 8MPa의 하중 증분량을 사용하였으며, 이때도 하중-파수변화의 관계가 매우 선형적임을 실험적으로 검증함 (위 그래프 참조)
 - 시편에 20 MPa의 압축하중이 인가된 경우를 가정하여, 실험적/이론적 결과를 비교함
 - 시편에 20 MPa의 압축하중이 인가되었을 경우, 이론적으로 0.04443 cm^{-1} 의 파수변화가 발생해야함 (본 연구를 통해 규명된 상기 시편의 피에조 분광계수는 $2.2215 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$ 임)
 - 즉, 이론적 파수변화량은, $2.2215 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa} \times 20 \text{ MPa} = 0.04443 \text{ cm}^{-1}$ 임
 - 상기 그래프(우측 Y-axis 참조)의 파란색 실선에서 20 MPa 압축하중인가시 0.04 cm^{-1} 의 파수변화가 발생하는 것으로 나타남
 - 실험치와 이론치가 매우 유사함
- 즉, 오차 목표치인 $\pm 10 \text{ MPa}$ 이하의 하중증분량도 계측가능하다는 상기 실험결과를 바탕으로, 질적성과지표인 “계측 정확도 $\pm 10 \text{ MPa}$ ”를 달성하였다고 판단함

2.3.8.4. 응력 측정 속도 (목표치 : 30초 이하)

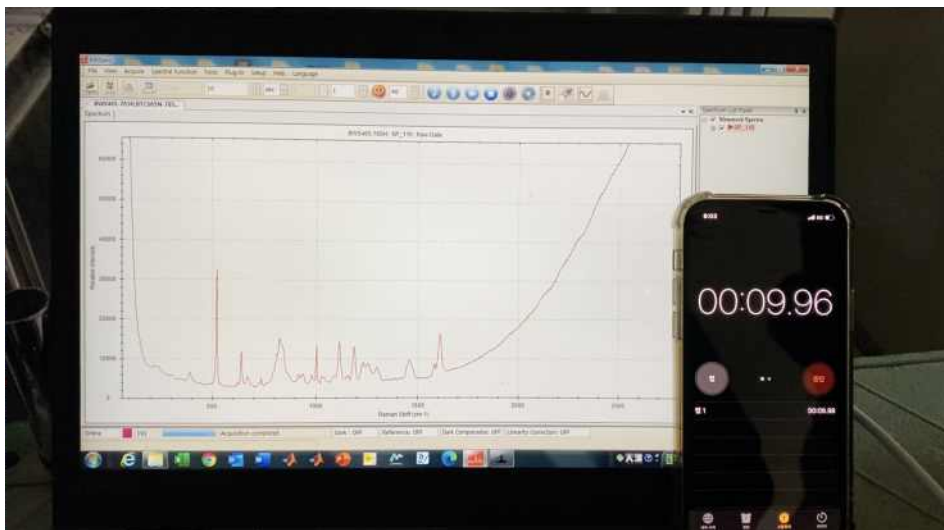
분광법을 이용한 응력 측정은, ① 레이저 조사 → ② 반사신호 수집(스펙트럼) → ③ 데이터 분석 (peak deconvolution)으로 총 3단계로 이루어져 있다. 여기서 ①, ② 단계는 거의 동시에 이뤄지기 때문에, 실제로는 2단계로 볼 수 있다. 또한, ③ 단계의 경우는 수집된 스펙트럼으로부터 응력을 계산하는 산술과정이기 때문에 일반적인 컴퓨터에서도 1초 이내에 완료되며, 고사양 컴퓨터의 경우 그 속도를 측정하기 어려울 만큼 빠른시간 안에 완료된다. 즉, 응력 측정 속도를 계산할 때, ③ 단계는 무시할 만큼 짧다. 따라서, 본 연구에서는 응력 측정 속도를 측정하기 위해서 단일 스펙트럼의 수집 속도를 측정하여 그 달성여부를 검토하였다.

질적 성과지표 → 달성

[질적 성과지표] 응력 측정 속도 30초 이하



(a) 스펙트럼 계측 이전



(b) 하중인가 상태에서의 스펙트럼 계측 완료

<응력 측정 속도 검증 (질적성과지표)>

→ 위의 단일 스펙트럼 수집 속도가 10초 미만인 것을 바탕으로, 질적성과지표인 “응력 측정 속도 30초 이하”를 달성하였다고 판단함

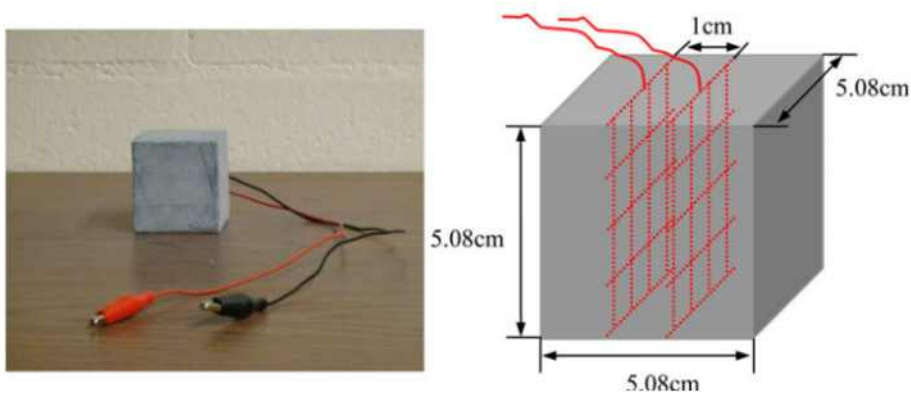
2.3.9.5. CNT 기반 기술 대비 원가 절감 (목표치 : 50% 이상)

본 연구(콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발)에 앞서, 많은 연구자를 통하여 CNT를 이용한 자가센싱용 스마트콘크리트 개발과 관련된 연구가 진행된 사례가 있다. 하지만, 시멘트 배합시 첨가된 CNT 비율 및 시편의 크기 등이 각 연구마다 상이하기 때문에, 본 기술과의 경제성 비교를 위하여 모든 케이스를 분석하는 것에는 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 동일한 시편 크기 및 실험 방법(압축하중인가)을 이용하여 자가응력센싱 능력을 검증한 기술과 본 기술의 경제성을 비교 분석 하고자 한다.

질적 성과지표 → 달성

[질적 성과지표] CNT 기반 기술 대비 원가 절감 50%이상

Baoguo Han et al. 은 “Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors”¹³⁾라는 논문에서 본 연구와 동일하게 압축하중실험용 입방체 시편(50.8 mm × 50.8 mm × 50.8 mm)에 carbon Nanotube(CNT)를 넣고, stress sensor(응력 센서)로써의 기능을 실험적으로 검증하였다.



<경제성 비교대상군인 CNT를 활용한 자가센싱용 모르터 시편¹²⁾>

사용된 시멘트:모래 비율을 1:2.5라고 할 때, 입방체 시편 1개 제작에 소요되는 시멘트의 양은 아래와 같이 계산될 수 있다.

○ Given data

- Volume of mortar = $0.0508 \text{ m} \times 0.0508 \text{ m} \times 0.0508 \text{ m} = 0.000131 \text{ m}^3$
- Density of cement = 1440 kg/m^3
- Mix ratio = 1:2.45 (One part is cement and 2.45 part is sand)
- Total portion = $1+2.45 = 3.45$
- Part of cement = $1/3.45$
- Part of sand = $2.5/3.45$

○ Calculation

- Wet volume of mortar = 0.000131 m^3
- Dry volume of mortar = wet volume $\times 1.33 = 0.000131 \text{ m}^3 \times 1.33 = 0.000174 \text{ m}^3$
- Weight of cement = part of cement $\times$ volume $\times$ density of cement
 $= (1/3.45) \times 0.000174 \text{ m}^3 \times 1440 \text{ kg/m}^3 = 0.072776 \text{ kg} = 72.776 \text{ gram}$

위의 계산으로 입방체 시편 1개에는 약 77 gram의 시멘트가 소요되는 것으로 확인되었다. 따라서, 해당논문에서 사용된 CNT의 양이 0.1wt% 인 것을 고려하면, 자가센싱용 입방체 시편을 제작하기 위해서 약 7 gram의 CNT가 필요한 것으로 계산된다.

동일한 크기의 입방체 시편 1개에 대하여, 본 연구에서는 다래 그림과 같이 한 변의 길이가 약 1~1.2 cm인 silicon wafer를 응력센서로 사용하여 하중-파수변화 관계를 규명하였다. 따라서, 동일한 크기의 시편제작에 사용된 센싱물질의 가격을 비교하여, 그 경제성을 분석하였다.



<본 연구에서 그 피에조분광효과가 규명된 모르터 시편>

공정한 가격분석을 위하여, 화학제품 전문 생산업체인 sigma aldrich에 공개된 단가를 비교하였다. 단, 제품의 입도 및 순도에 따라 가격에 차이가 있으므로, 6종의 제품의 환산단가를 평균한 값을 비교하도록 한다. 첨가제별 기준무게 및 환산단가는 아래 표와 같다.

<Silicon wafer 기준무게별 단가 및 환산단가>

	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4	제품 5	제품 6
기준 직경 (in)	2 in	2 in	2 in	3 in	3 in	2 in
판매 단위 ea/pack	1 ea	1 ea	1 ea	1 ea	5 ea	1 ea
단가 (원)	220,000 원	197,800 원	206,800 원	358,900 원	1,064,200 원	194,600 원
환산단가 (원/ea/in)	110,000 원	98,900 원	103,400 원	119,633 원	70,947 원	97,300 원
필요수량단가 (원/ea/약 1.2cm)	55,000 원	49,450 원	51,700 원	59,816 원	35,473 원	48,650 원
평균필요수량단가 (원/1ea/1.2cm)						50,015 원

<CNT의 기준무게별 단가 및 환산단가>

	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4	제품 5	제품 6
기준무게 (g)	1 g	25 g	1 g	0.25 g	1 g	1 g
단가 (원)	193,600 원	1,193,200 원	1,624,500 원	394,900 원	1,833,000 원	1,136,400 원
환산단가 (원/1kg)	193,600,000 원	47,728,000 원	1,624,500,000 원	1,597,600,000 원	1,833,000,000 원	1,136,400,000 원
평균환산단가 (원/1kg)						1,072,138,000 원
평균환산단가 (원/7g)						7,504,966 원

위 표와 같이, 동일 크기의 시편에 대하여 Silicon wafer의 필요수량단가가 CNT 보다 약 150 배 이상 저렴한 것을 알 수 있다. 또한, 응력측정을 위하여 추가로 전선 배선이 필요한 기존 스마트 콘크리트와 달리, 레이저를 이용한 비접촉 응력측정 기술의 특성상, 센서 매립에 필요한 추가적인 비용이 알루미늄 분말 이외에는 없다. 즉, 동일한 크기의 시편을 제작한다고 할 때, 본 연구에서 제안하는 센싱 기술이 CNT가 포함된 자가센싱용 스마트콘크리트의 가격보다 150배 이상 저렴한 것으로 판단된다.

→ 이를 통하여, 질적성과지표인 “CNT 기반 기술 대비 원가 절감 50% 이상”을 달성하였다고 판단함

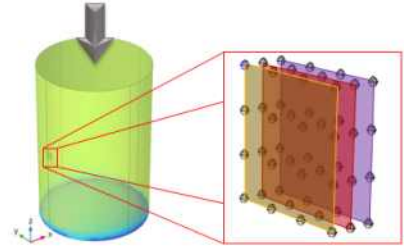
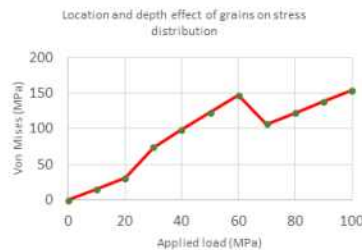
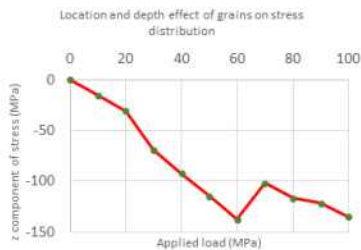
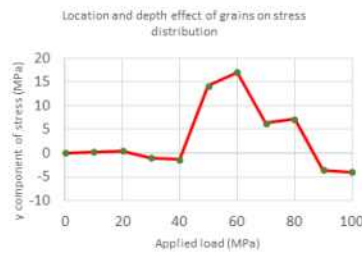
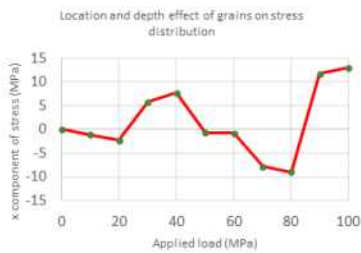
2.4. 유한요소해석을 통한 측정 응력값 불균일 현상에 대한 규명

2.4.1. 개요

본 연구를 통하여 수행한 많은 실내하중실험 데이터 분석과정에서, 레이저의 조사 위치(깊이방향, 폭방향)에 따라서, 그 결과값이 기대했던 결과와 상이한 현상을 다수 발견하였다. 특히, 동일한 위치에 레이저를 조사(irradiation)하더라도, 레이저의 깊이방향 조사위치(투과깊이)에 따라 그 결과값이 일정하지 않음을 발견하였다. 따라서, 실험만으로는 증명할 수 없는 이러한 현상을 규명하기 위하여, 유한요소해석을 수행하였다.

□ Depth and layer analysis

(Distance between each grain 0.5mm)



Sapphire (alumina) material properties

$$E_z = 386 \text{ GPa}$$

$$E_x = 381.88 \text{ GPa}$$

$$E_y = 381.88 \text{ GPa}$$

$$\theta_{xy} = \theta_{yx} = 0.25 \text{ (compliance matrix is symmetric matrix)}$$

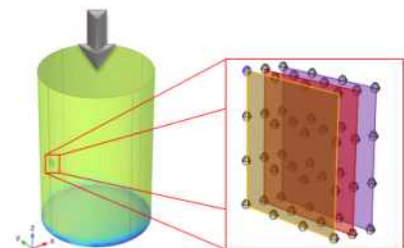
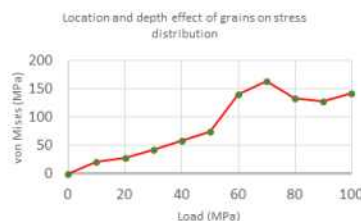
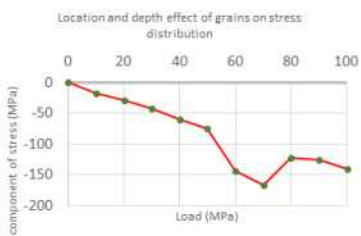
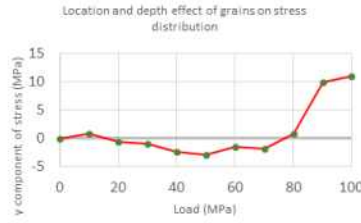
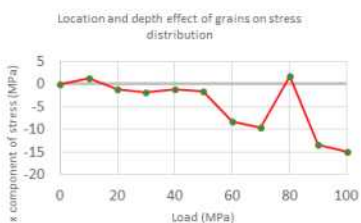
$$\theta_{zx} = \theta_{zy} = 0.24 \text{ (transversal isotropic assumption)}$$

$$G_{xz} = G_{yz} = 146.8 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1 + \theta_{xy})} = 152.75 \text{ GPa}$$

□ Depth and layer analysis

(Distance between each grain 0.5mm)



Sapphire (alumina) material properties

$$E_z = 386 \text{ GPa}$$

$$E_x = 381.88 \text{ GPa}$$

$$E_y = 381.88 \text{ GPa}$$

$$\theta_{xy} = \theta_{yx} = 0.25 \text{ (compliance matrix is symmetric matrix)}$$

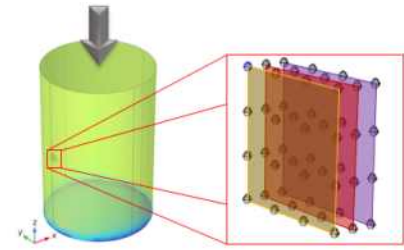
$$\theta_{zx} = \theta_{zy} = 0.24 \text{ (transversal isotropic assumption)}$$

$$G_{xz} = G_{yz} = 146.8 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1 + \theta_{xy})} = 152.75 \text{ GPa}$$

□ Depth and layer analysis

(Distance between each grain 0.5mm)



Sapphire (alumina) material properties

$$E_z = 386 \text{ GPa}$$

$$E_x = 381.88 \text{ GPa}$$

$$E_y = 381.88 \text{ GPa}$$

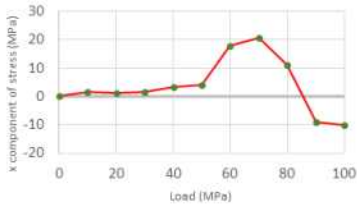
$$\vartheta_{xy} = \vartheta_{yx} = 0.25 \text{ (compliance matrix is symmetric matrix)}$$

$$\vartheta_{zx} = \vartheta_{zy} = 0.24 \text{ (transversal isotropic assumption)}$$

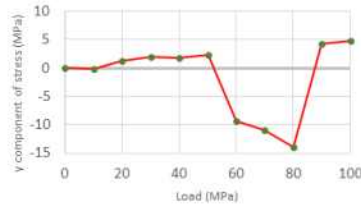
$$G_{xz} = G_{yz} = 146.8 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1 + \vartheta_{xy})} = 152.75 \text{ GPa}$$

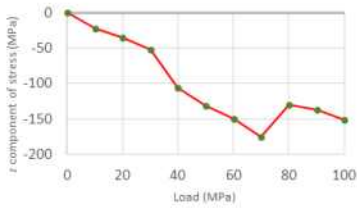
Location and depth effect of grains on stress distribution



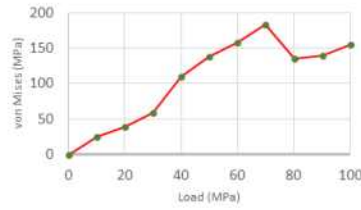
Location and depth effect of grains on stress distribution



Location and depth effect of grains on stress distribution

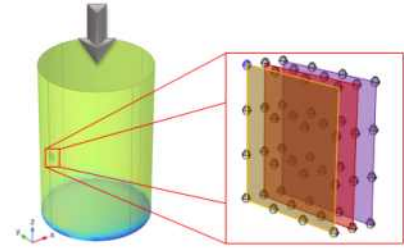
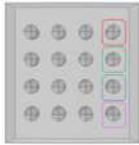


Location and depth effect of grains on stress distribution



□ Depth and layer analysis

(Distance between each grain 0.5mm)



Sapphire (alumina) material properties

$$E_z = 386 \text{ GPa}$$

$$E_x = 381.88 \text{ GPa}$$

$$E_y = 381.88 \text{ GPa}$$

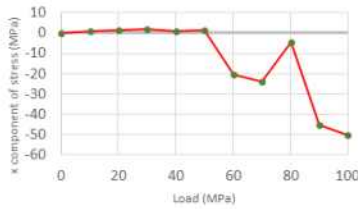
$$\vartheta_{xy} = \vartheta_{yx} = 0.25 \text{ (compliance matrix is symmetric matrix)}$$

$$\vartheta_{zx} = \vartheta_{zy} = 0.24 \text{ (transversal isotropic assumption)}$$

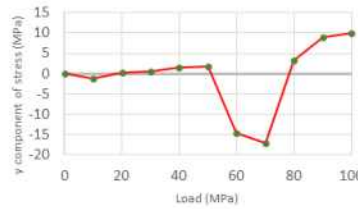
$$G_{xz} = G_{yz} = 146.8 \text{ GPa}$$

$$G_{xy} = \frac{E_y}{2(1 + \vartheta_{xy})} = 152.75 \text{ GPa}$$

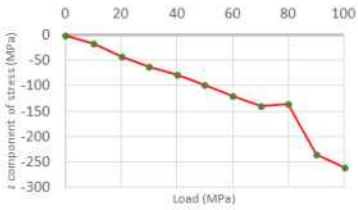
Location and depth effect of grains on stress distribution



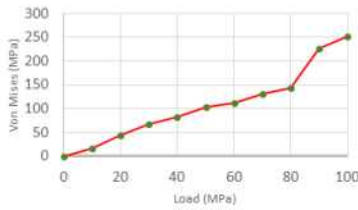
Location and depth effect of grains on stress distribution

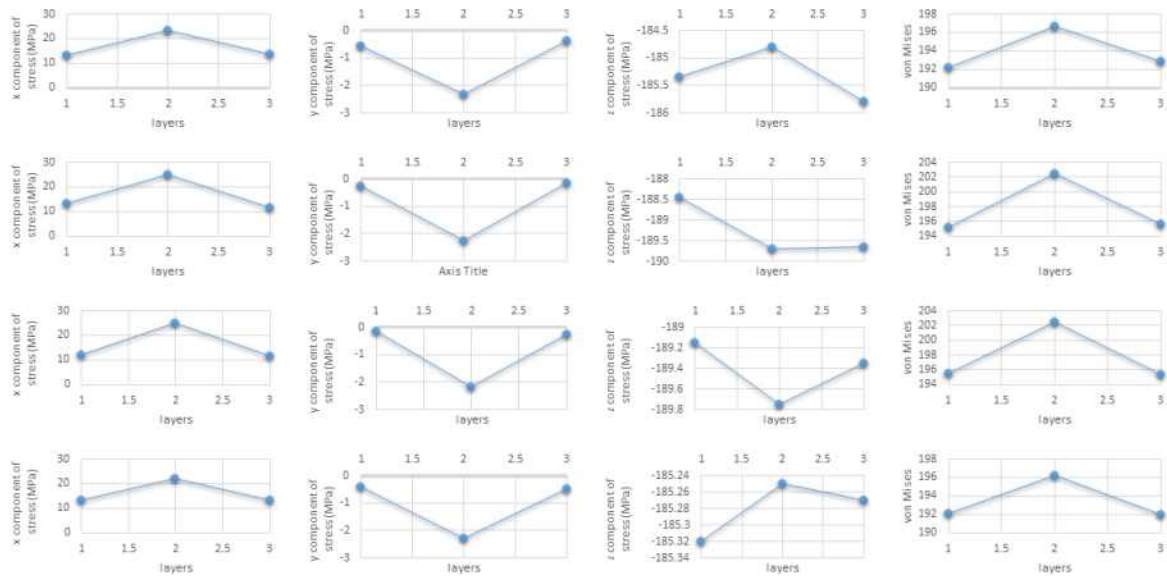


Location and depth effect of grains on stress distribution



Location and depth effect of grains on stress distribution





1

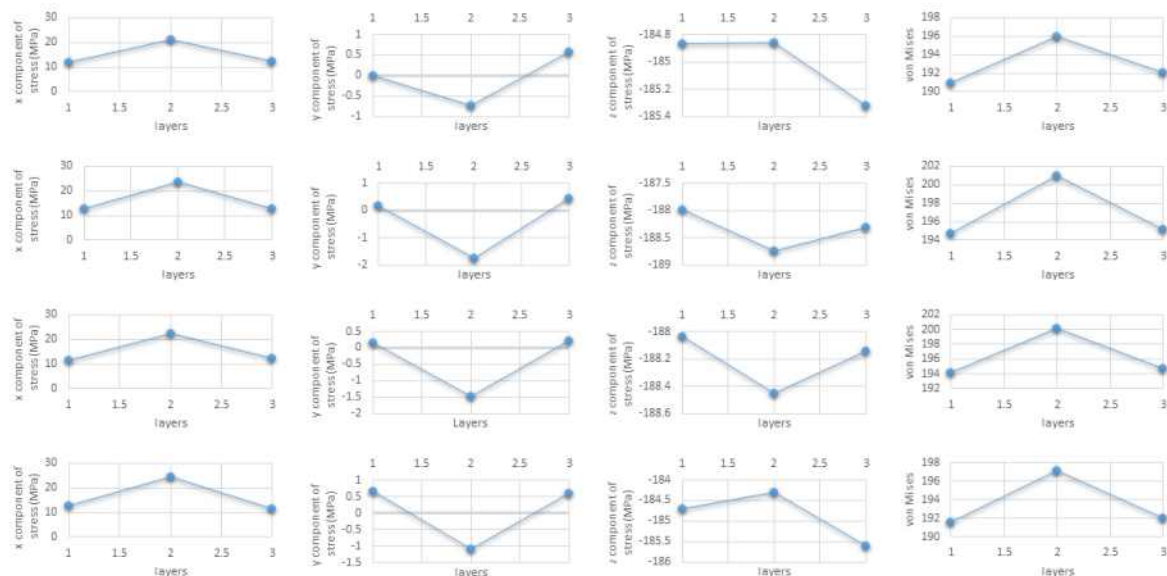
2

3

4

□ Depth analysis

- (Distance between each grain 0.5mm)
- (constant load was applied(100MPa))



5

6

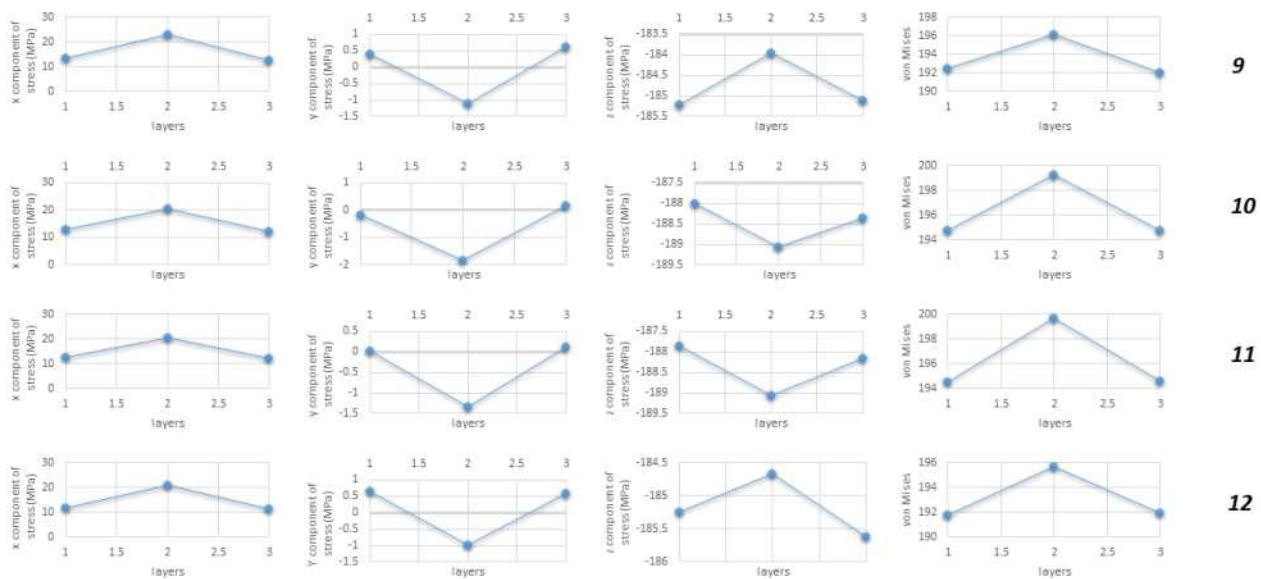
7

8

□ Depth analysis

- (Distance between each grain 0.5mm)
- (constant load was applied(100MPa))





□ Depth analysis

(Distance between each grain 0.5mm)

(constant load was applied(100MPa))



□ Depth analysis

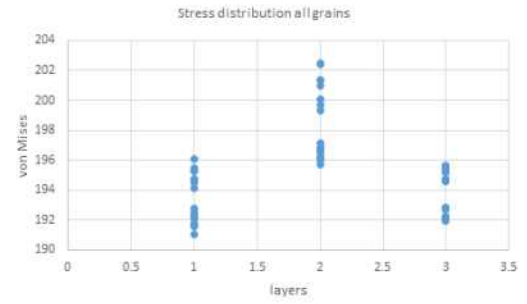
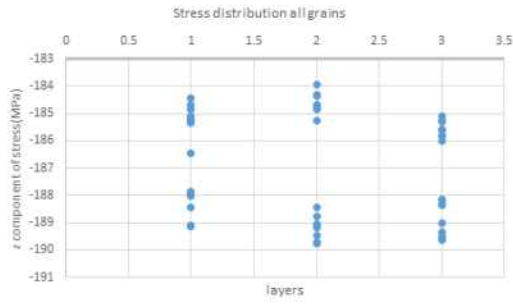
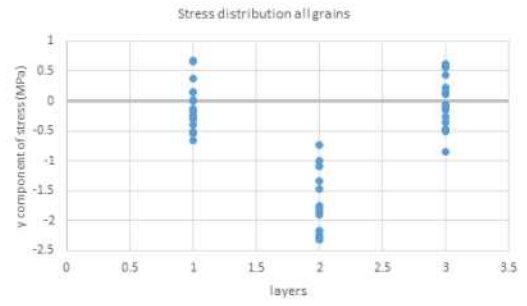
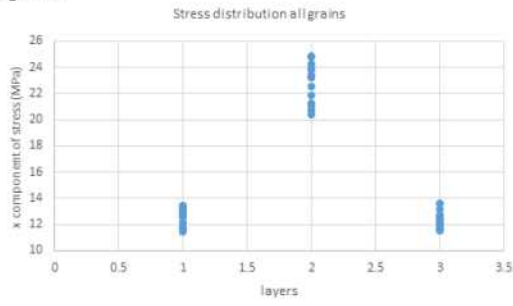
(Distance between each grain 0.5mm)

(constant load was applied(100MPa))



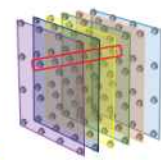
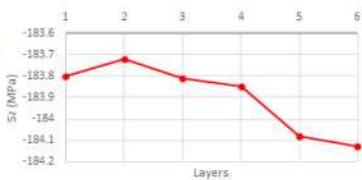
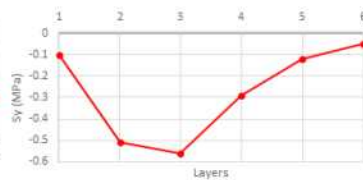
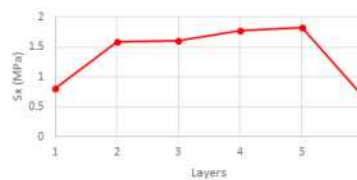
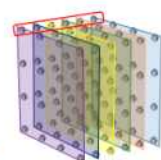
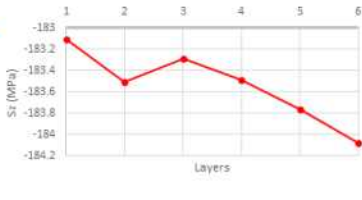
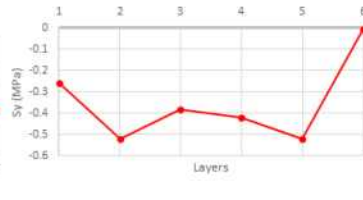
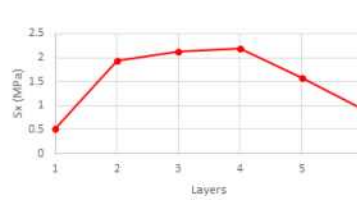
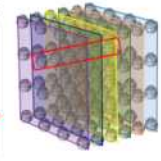
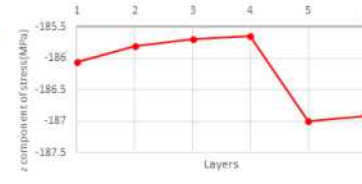
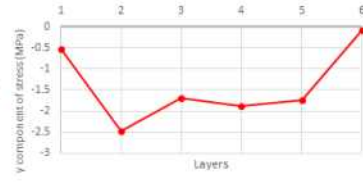
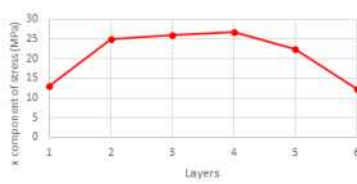
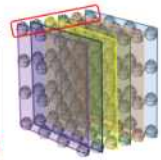
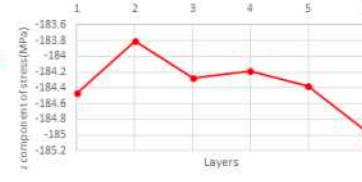
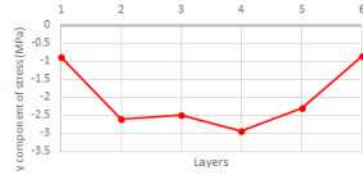
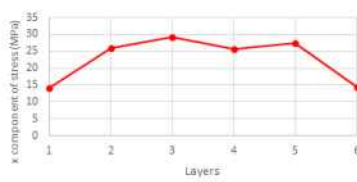
□ Depth analysis

- (Distance between each grain 0.5mm)
- (constant load was applied(100MPa))
- All 16 grains



Simulation of the concrete specimen with alumina (orthotropic assumption) as additive.

- alumina grain size 0.4mm diameter.
- Distance: 0.5 mm
- Orthotropic
- 100 MPa applied load



2.4.2. 소결

본 장에서는 대상 시편에 인가되는 하중이 증가함에 따라, 파수가 선형적으로 이동하지 않고, 경향성 없이 이동하는 현상을 유한요소해석 방법을 이용하여 분석하였다. 즉, 페인트에 분말을 혼합하여 제작된 시편의 하중재하실험의 경우, 하중-파수변화의 관계가 선형적이지 않은 경우가 실험적으로 다수 발견되었다. 이와 같은 결과는, 대상물 표면에 도포된 페인트가 1개의 구조체로 거동하지 않아 하중전달이 잘 이루어지지 않을 경우에도 발생하지만, 레이저의 조사 위치에 따라서도 그와 같은 결과를 얻을 수 있다.

관련 유한요소해석결과, 육안으로는 레이저가 동일한 위치에 조사되고 있다고 확인되지만, 실제로는 시편에 변형이 발생하면서 레이저가 깊이 방향으로 더 깊은 곳에 조사되면, 다른 층(Layer)의 응력을 측정할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 현상 때문에, 하중-파수변화의 관계가 선형적이지 않거나, 불규칙 적인 것을 확인하였다.

2.5. 결론

본 연구에서는 비접촉식으로 구조물 응력을 측정할 수 있는 페인터블 응력 센서 개발을 위하여, 콘크리트 구조물에 적용 가능한 최적 도료 선정 및 부착방법을 제안하고, 이를 실험적으로 검증하였으며, 최종적으로 해당 센싱물질에 대한 피에조분광효과를 규명하는 연구를 수행하였다. 연차별 세부 연구내용 및 결론은 아래와 같다.

2.5.1. 1차년도 연구

[응력센싱용 도료 첨가제 가선택]

페인트의 화학조성은 일반적으로 알려져 있지 않으나, 페인트의 광택발현을 위하여 일부 페인트의 경우 알루미늄 및 이산화티타늄을 첨가한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 문헌연구 및 실내실험을 통하여, 해당 물질들에 대한 라만/형광 스펙트럼 및 피에조 분광 효과가 존재함을 확인하였다. 그 물질들 중에서도 스펙트럼의 선명도(intensity)가 매우 우수한 산화알루미늄과 건설용 도료 구성물질 중 매우 높은 구성비를 갖는 이산화티타늄이 1차 첨가제 후보군으로 선정되었다.

[비접촉식 응력측정을 위한 라만분광 시스템 구축]

본 연구기관에서 532nm 레이저를 사용하는 라만분광시스템과 형광시스템을 기 보유하고 있으나, 532nm를 사용하게 될 경우, 건설용 도료에 포함된 산화알루미늄이 매우 높은 배경신호(background signal)를 만들어, 다른 물질의 라만 스펙트럼을 계측하기 어려웠다. 따라서, 785nm 레이저를 광원으로 사용하는 라만분광 시스템을 구축하여 본 연구에 활용하고자 하였으며, 785nm 분광시스템에 대한 계측/분석 프로그램을 자체적으로 개발하여 데이터 분석에 활용하였다. 여기서, 785nm 레이저를 사용할 경우, 산화알루미늄의 높은 배경신호가 발생되지 않기 때문에, 상대적으로 매우 intensity가 낮은 라만 신호를 확인하는데 효과적이다.

[페인트-모재간 응력전달 규명]

페인트-모재간 응력전달을 규명하고, 피에조분광현상을 일부 선규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하고, 페인트 시편에 대한 압축하중시험을 수행하였다. 페인트-모재간 응력전달 규명 시험의 경우, 알루미늄 스프레이가 가장 우수한 응력전달능력을 보였고, 그 다음으로 유성 페인트였으며, 상대적으로 수성페인트의 응력전달능력이 떨어지는 것을 실험적으로 검증하였다. 이는 수성페인트의 경우 바인더를 중간층으로 사용하기 때문에, 응력전달율이 떨어지는 것으로 판단된다. 압분광현상 규명 시험의 경우, 30MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 양의 방향으로 약 0.15 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다만, 일부 하중 구간에서는 거동이 선형적이지 않은 구간도 존재하였다.

2.5.2. 2차년도 연구

[페인터블 센서 정의 (두가지 방법 제안)]

본 연구에서는 2가지의 페인터블 센싱 방법에 대하여 제안하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로 한 페인터블 센서

본 방법은 기존 연구개발계획서 제출 당시 제안한 방법으로, 건설용 도료에 피에조분광효과를 갖는 분말을 혼합하여, 해당 물질을 응력센싱 물질로 활용하는 방법이다. 따라서, 페인트 첨가제에 대한 선정과정이 필수적이다.

(2) 접착식 페인터블 센서

본 방법은 재도장에 대한 문제를 해결하기 위하여, 2차년도에 제안한 방법으로, 일반적인 도료를 사용하는 것이 아니라, 에폭시 레진등의 접착제를 이용하여, 센싱가능물질을 구조물 표면에 부착하는 방식이다.

[페인트 첨가제 선정]

페인트의 화학조성은 일반적으로 알려져 있지 않으나, 페인트의 광택발현을 위하여 일부 페인트의 경우 알루미늄 및 TiO_2 를 첨가한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 레이저를 이용하여 수성 페인트에 대한 라만/형광 스펙트럼 분석을 통하여, 일부 수성 페인트의 경우 알루미늄 및 TiO_2 를 포함하고 있음을 실험적으로 증명하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

일반도료를 이용한 페인터블 센서의 경우, 기존 도료에 포함된 물질을 센싱 물질로 사용하는 것이 가장 안정도가 높다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄과 TiO_2 를 최종 첨가제로 선정하여 분광검출을 실험을 수행하였다.

(2) 접착식 페인터블 센서

접착식 페인터블 센서의 경우에는 센서 자체가 구조체인 Silicon wafer를 선택하여 에폭시 레진을 이용하여 대상 구조물에 부착하였다.

[피에조분광현상 규명]

상기 준비한 시편에 대하여, 피에조분광현상을 규명하기 위한 휨하중시험을 수행하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

일반도료를 기반으로한 페인터블 센서의 경우에는, 최초 하중이 인가될 당시에는 선형적인 하중-파수변화간의 관계가 선형적인 결과를 보였다. 하지만, 반복 시험을 수행하자, 센싱 재현도가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 비복원성은, 최초 페인트와 Alumina(혹은 TiO_2)가 한 개의 구조체를 이루고 하중을 지지 하였으나, 인장하중이 가해진 후에 재료 분리·표면 갈라짐 등으로 인하여, 구조체가 분해되어 발생하는 것으로 판단된다. 즉, 초기에는 응력센서의 역할을 하였으나, 페인트 층에 대한 반복적인 하중인가로 인하여, 응력센싱 기능을 상실한 것으로 판단된다.

(2) 접착식 페인터블 센서

Silicon wafer를 에폭시 레진을 이용한 구조물에 부착한 방법은, Loading test, unloading test에서 하중-파수변화가 모두 선형적으로 나타남을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상을 통하여, 인장하중과 압축하중을 구분할 수 있음을 확인할 수 있었고, 계산된 피에조분광계수를 통하여 계산된 응력값과 유한요소해석(이론적)을 통하여 계산된 응력값이 매우 유사한 것을 바탕으로, 본 연구에서 제안하는 “접착식 페인터블 센서”에 대한 높은 가능성을 확인하였다.

[페인터블 응력센서의 피에조분광 계수 (piezospectroscopic coefficient) 도출]

상기 두가지 제안방법에 따라, 2가지 종류의 시멘트 모르타 압축하중시험 시편을 제작하고, 압축하중을 시편에 인가하여 피에조분광계수를 도출하였다.

(1) 일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서

피에조분광현상 규명을 위한 휨시험결과와 유사하게, 시멘트 모르타 시편에 대한 압축하중시험에서도, 압축하중이 점진적으로 인가됨에 따라, R1 line과 R2 line이 대부분 양의 방향으로 이동하고 있음을 확인할 수 있으나, 파수 변화의 크기가 일관적이지 않고 선형적인 거동을 하지 않았다.

이와 같은 결과를 통해, 제안방법 1을 통해 만들어진 시편(Alumina in paint)은 모재에 인가된 하중이 페인트 층까지 일량하게 전달되지 못하여 그 피에조 분광효과를 규명하기 어려운 것으로 판단된다. 즉, 일반적인 소규모 실험실 단위의 실험에서는, 도장의 두께를 세밀하게 조정하기 어렵고, 그 분포도 제어하기 어려우며, 다결정 물질을 센서로 사용하여 비일관적인 응력 전달이 일어

난 것으로 판단된다.

또는, 파수 변화량이 매우 미소하여 본 연구에 활용된 포터블 분광 시스템으로는 그 피에조 분광 효과를 규명하기 어려운 것일 수도 있으나, 본 실험결과 만을 바탕으로 해당 결론을 내리기는 어렵다. 따라서, 높은 분광 해상도를 갖는 Benchtop 시스템을 이용한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 접착식 페인터블 센서

접착식 페인터블 센서의 경우, 압축응력이 시편에 인가된 경우에 매우 일관적인 파수 이동결과를 보이는 것을 실험적으로 확인하였다. 또한, 그 경사값인 피에조분광계수 또한 일관적으로 계산되는 것을 확인할 수 있다. 피에조 분광계수란, 아래 식과 같이 인가된 응력과 파수 변화의 관계를 나타내는 상수이며, 해당 값은 하중-파수 변화 그래프를 linear curve fitting 함을 통하여 계산할 수 있다.

$$\Delta v = \Pi_{ij} \sigma_{ij}$$

여기서, Δv 는 파수 변화 (cm^{-1}) Π_{ij} 는 피에조분광 계수(압분광 계수), σ_{ij} 는 인가된 응력(GPa)을 나타낸다. 본 연구를 통하여 도출된 피에조분광 계수는 전체 데이터에 대한 평균값인 $2.1680 \text{ cm}^{-1}/\text{GPa}$ 이며, 이는 1 GPa의 응력이 대상 구조물에 인가될 경우 라만 스펙트럼이 2.1680 cm^{-1} 만큼 양의 방향으로 이동함을 의미한다. 따라서, 피에조분광 계수값을 미리 알고 있다면, 구조물에 레이저를 조사하여 수집된 스펙트럼의 파수의 이동량을 통하여 간단한 산술식 만으로 현재 구조물에 인가된 하중(센서 설치 이후에 대해)의 크기와 방향(압축/인장)을 계산할 수 있다.

다만, 본 연구에서 사용된 포터블 분광기의 해상도로 제한으로 인하여, 매우 정밀한 응력크기의 변화를 확인할 수는 없었으나, 해상도가 높은 분광기를 구매하는 것을 통하여 본 문제는 해결될 것으로 판단된다.

[평균 응력 계측방법 및 원거리 응력 계측방법 개발]

입방체 시편에 일축 압축응력(또는 단축응력, uniaxial stress)이 작용할 경우, 해당 시편에는 푸아송 비(poisson ratio)만큼 가로 변형(또는 부품)도 발생하게 된다. 하지만 푸아송 비는 재료가 균질(homogeneous)하고, 등방성(isotropic) 또는 직교등방성(orthotropic) 할 경우에만 일정하므로, 본 연구에서 사용된 시멘트 모르타와 같은 경우에는 그 값 또한 일정하지 않다. 즉, 미소 면적에 작용하는 응력은 그 방향과 크기가 일정하지 않다. 따라서, 미소 면적에서 발생하는 응력을 압축응력이라고 단정하기 어렵다.

또한, 레이저기반 피에조분광법을 이용한 응력 측정의 경우, 폰 미세스 응력(Von Mises stress)계산 방법과 유사하게, 시편의 임의의 지점에서 유발되는 각 응력 성분들의 조합을 의미한다. 따라서, 0.085 mm 의 조사(irradiation) 직경을 갖는 레이저를 이용하여 측정된 응력은 미소 국부지점에 대한 응력이고, 이를 전역적 응력(global)으로 변환하기 위해서는 적절한 응력 평균화 방법의 개발이 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 줌렌즈(Zoom lens)를 이용한 응력 평균화 방법을 제안하고, 휨하중실험을 수행하여 하중-파수변화 관계가 선형임을 실험적으로 검증하였다. 즉, 조사 직경을 확장할 수 있는 줌렌즈를 기존 분광시스템에 도입하는 것을 통하여, 스펙트럼이 계측되는 면적을 물리적으로 확장한 것이다(기존직경 $85\mu\text{m}$ → 확장직경 2.3 mm).

응력측정에 줌렌즈를 활용하여 평균 응력을 계측할 수 있을 뿐만아니라, 측정거리 또한 향상시켰다. 본 연구에서는 응력측정 실험체로부터 최대 60 mm 까지의 거리에서 응력을 측정할 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 이와 함께, 분광시스템 제조사에 따르면, 상용 줌렌즈를 활용하여 최대 6m (6,000 mm) 의 거리에서도 라만 스펙트럼을 계측할 수 있다고 보고하고 있다. 6 m의 거리에서 계측할 경우, 레이저 조사 직경이 8.5 mm 까지 확장된다. 따라서, 접근이 어려운 해상교량의 교각부, 케이블교량(사장교, 현수교 등)의 주탑 등의 응력측정에 본 제안 기술을 사용한다면 매우 효율적일 것으로 판단된다.

2.6. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	레이저 기반 콘크리트 평균 응력 측정 시스템 및 방법	세종대	주관	국내특허	-	2019.12.26	단독 사사	출원
2	특허	라만분광을 이용한 부착형 응력 측정 시스템	세종대	주관	국내특허	-	2020.12.15	단독 사사	출원
3	논문	Time dependent numerical simulation of MFL coil sensor for metal damage detection	세종대	주관	국제 논문	-	(제출일) 2019.11.08.	단독 사사	SCI (심사중)
4	논문	Experimental and numerical investigation on effects of lift-off variation on hall sensor	세종대	주관	국제 논문	-	2021년 상반기 제출 예정	단독 사사	SCI
5	논문	미정	세종대	주관	국제 논문	-	2021년 상반기 제출 예정	단독 사사	SCI
6	SW	SpectroMapper	세종대	주관	국내 저작권	-	2021년 상반기 제출 예정	단독 사사	-

관 인 생 략
출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2019.12.26
특 기 사 항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(SP190169)
출 원 번 호 10-2019-0174672 (접수번호 1-1-2019-1339056-90)
출 원 인 명 칭 세종대학교산학협력단(2-2005-011470-2)
대 리 인 성 명 유병욱(9-2007-000605-1)
발 명 자 성 명 이종재 김남규
발 명 의 명 칭 레이저 기반 콘크리트 평균 응력 측정 시스템 및 방법

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드)+ 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정 신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-00000000, 상표등록출원 40-2010-00000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

관 인 생 략

출원번호통지서

출원일자 2020.12.15
특기사항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(SP200115)
출원번호 10-2020-0175037 (접수번호 1-1-2020-1359013-19)
(DAS접근코드 E112)
출원인명칭 세종대학교산학협력단(2-2005-011470-2)
대리인성명 유병욱(9-2007-000605-1)
발명자성명 이종재 알리 아자드
발명의명칭 라만 분광을 이용한 부착형 응력 측정 시스템

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.
2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호
3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [특허고객번호 정보변경(경정), 정정 신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식
4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.
5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : <http://www.kipo.go.kr>-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.
6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000
7. 종업원이 직무수행과정에서 개발한 발명을 사용자(기업)가 명확하게 승계하지 않은 경우, 특허법 제62조에 따라 심사단계에서 특허거절결정되거나 특허법 제133조에 따라 등록이후에 특허무효사유가 될 수 있습니다.

Time Dependent Numerical Simulation of MFL Coil Sensor for Metal Damage Detection

Ali Azad^{1a}, Jong-Jae Lee^{1b}, Namgyu Kim^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 209, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 05006, Republic of Korea

(Received , Revised , Accepted)

Abstract. Recently, non-destructive health monitoring methods such as magnetic flux leakage (MFL) method, have become popular due to their advantages over destructive methods. Currently, numerical study on this field has been limited to simplified studies by only obtaining MFL instead of induced voltage inside coil sensor. In this study, it was proposed to perform a novel numerical simulation of MFL's coil sensor by considering vital parameters including specimen's motion with constant velocity and saturation status of specimen in time domain. A steel-rod specimen with two stepwise cross-sectional changes (i.e., 21% and 16%) was fabricated using low carbon steel. In order to evaluate the results of numerical simulation, an experimental test was also conducted using a magnetic probe, with same size specimen and test parameters, exclusively. According to comparative results of numerical simulation and experimental test, similar signal amplitude and signal pattern were observed. Thus, proposed numerical simulation method can be used as a reliable source to check efficiency of sensor probe when different size specimens with different defects should be inspected.

Keywords: magnetic flux leakage method; finite element analysis; time dependent simulation; nondestructive testing, coil sensor

1. Introduction

In order to assess structural element's integrity, regular structural health monitoring must be performed, especially in some particular cases such as suspension bridge structures, cable-stayed bridge structures, oil and gas industries and etc., regular inspection is mandatory and essential (Feng, Li et al. 2017; Iqbal, Tesfamariam et al. 2017; Kim and Park 2018). For instance, in cable-stayed infrastructures, almost entire load is carried by steel cables. Thus, any flaws such as cross-sectional loss, corrosion and internal breakage in cables may lead to catastrophic structural failure. Various nondestructive testing methods have, therefore, become popular on cable defect assessment due to their main advantage, which is being nondestructive test. Moreover, cable inspecting robots with mounted nondestructive testing (NDT) sensors are developed and considered as one the useful sensor setup for detecting damage in

^a Ph.D. student, email: aliazad052@gmail.com

^b Associate professor, email: jongjae@sejong.ac.kr

* Corresponding author, Assistant professor, email: namgyu.kim@outlook.com

Experimental and numerical investigation on effects of lift-off variation on hall sensor

Ali Azad, Jong-Jae Lee, Namgyu Kim

Abstract

Conventionally, a hall-effect sensor is used to detect metal surface defects such as breakage, crack and notch. To understand the performance of hall-effect sensors as a damage detector, both experimental and numerical analyses are currently carried out under various conditions. However, the condition of gap between specimen and sensor called lift-off is generally considered as ideal status in current studies although it may differ due to slightly misplacement of steel specimen inside a magnetic sensor apparatus. Furthermore, this issue can occur mismeasurement in hall-effect sensing. In this study, the lift-off issue is particularly addressed using a proposed numerical simulation method and experimentally verified in a small-scale laboratory test. Due to the complexity of conducting a precise finite element analysis (FEA), in current numerical research trend, instead of obtaining induced current in hall sensor, magnetic flux leakage (MFL) is simply obtained. Thus, to achieve a method with better approximation, a numerical method capable of obtaining induced circumferential current density was applied. Next, signals of the conventional and proposed approximate numerical methods affected by variation of sensor lift-off were obtained and compared accordingly. It was observed that, in case of small lift-offs, the conventional and proposed numerical method could identify notch defect, while by increasing lift-off, no defect could be identified with the conventional numerical method. Further on, experiments with variety of lift-offs configurations were conducted. According to the results, in greater lift-offs compare to the conventional numerical method, defects were detected, and no misdetection was observed.

Keywords: MFL, Hall sensor, lift-off, numerical analysis, experimental analysis.

1. Introduction

All structures have a service life which during that period, they must withstand certain loads and weather conditions. Consequently, a damaged structure might not be able to fulfill the anticipated load capacity and may cause partial or total failure of the structure. In order to prevent structural failure, the structure must undergo inspection regularly. Initially, non-destructive testing (NDT) started with basic visual inspection [1] and gradually improved through time. Nowadays, there are much more advanced defect detection techniques. Conventional health monitoring methods that take advantage of propagating waves phenomenon can be divided into following categories; Mechanical wave-based techniques such as ultrasonic guided waves [2,3] and acoustic emission [4,5], and electromagnetic wave-based techniques such as magnetic flux leakage (MFL) [6,7] and eddy current testing [8,9]. Among different types of NDT health

1. Introduction

Stress measurement using conventional methods surrender relative stress measurement and require post-processing to evaluate the absolute stress. Consequently, conducting field test using conventional methods requires additional time for precise installation and post-processing data to extract absolute stress. Therefore, in this study, Raman piezo-spectroscopy (RPS) and photoluminescence piezo-spectroscopy (PLPS) which are non-contact and NDT, were applied to obtain absolute stress in the target specimen.

To measure stress in the target sample, two techniques are proposed; stress measurement using spectroscopic active paintable materials, and attachable spectroscopic sensitive materials embedded in epoxy resin matrix. In the first approach, commercial white paint is chosen as the adhesive agent for alpha alumina which is both fluorescence and Raman active material. It should be indicated that, commercial white paint consists of abundant portion of TiO_2 that is a Raman active material. Thus, for the purpose of stress measurement using RPS, commercial white paint, and for stress measurement using PLPS, a mixture of commercial white paint and alpha alumina, were chosen as the candidate materials.

In the second approach, it proposed to attach a Raman active material to the surface of target sample and measure the stress. For this purpose, silicon wafer with high Raman active characteristic was considered and used. In order to protect polished surface of silicon, and minimize negative effect of thermal stress caused by laser, silicon wafer was embedded in resin matrix and then it was attached to the surface of target sample.

컴퓨터 프로그램 등록 신청서

프로그램 창작 신고서						
프로그램의명칭				SpectroMapper (스펙트럼 매퍼)		
창작자		성명	지분(%)	소속	전화번호(핸드폰)	주민등록번호
	1	이종재	(인) 100	건설환경공학과	010-4412-8648	740722-1110319
		주소 :서울시 광진구 능동로 209 세종대학교 총무관 710				
	2	(인)		주소 :		
	3	(인)		주소 :		
	4	(인)		주소 :		
	5	(인)		주소 :		
관련 연구과제	과제고유번호			1615011221		
	세부과제번호			151927		
	부처명			국토교통부		
	과제관리전문기관			국토교통과학기술진흥원		
	연구사업명			국토교통기술촉진연구(R&D)		
	연구과제명			콘크리트 구조물에 적합한 페인터블 응력 측정센서 개발		
	연구기관	주관기관		세종대학교 산학협력단		
		참여(위탁)기관		-		
	연구 책임자			정상엽		
	당해년도연구기간			2020.01.01.~2020.12.31		
상기의 프로그램 창작물을 직무발명규정에 따라 등록의뢰(양도)하오니 승계하여 주시기 바랍니다. 2020년 11월 5일 신고자 : 이 종 재 (인) 세종대학교 산학협력단장 귀하						
첨 부 1. 세종대학교 산학협력단의 개인정보 및 고유식별번호 수집 및 이용 안내 2. 프로그램등록신청서 및 프로그램의 개요 등 관련 서류						

제3장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3.1. 목표 및 달성도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준								양적성과 현황			
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	응력센싱용 도로 제작	A-1	응력센싱용 도로 제작	①	응력센싱용 도로 개발	최소 1종	7종	분광검출율 측정	개발 여부	30	세종대학교 산학협력단	50	특허: 출원 <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u>	15
	B	피에조분광현 상 규명	B-1	피에조분광현 상 규명	①	응력센싱용 도로의 피에조 분광현상 규명	최소 1종	1종 이상	응력변화측정	규명 여부	10	세종대학교 산학협력단	20	실계서: <u>1 건</u>	실계서: <u>0 건</u> (12월 중 작성 예정)	15
					②	응력 측정 거리 (비접촉식 측정 기술 관련)	10 mm 이상	10 mm 이상	거리 측정	실내시험	10	세종대학교 산학협력단	20	논문(SO): <u>1 건</u>	논문(SO): <u>1 건</u> (리뷰중)	15
					③	계측 정확도	±10 MPa	±10 MPa	에러 측정	실내시험	10	세종대학교 산학협력단	20	특허: 출원 <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u>	15
					④	응력 측정 속도 (급속 응력 측정 기술 관 련)	30초 이하	30초 이하	시간 측정	실내시험	10	세종대학교 산학협력단	20	논문(SO): <u>1 건</u>	논문(SO): <u>1 건</u> (작성완료)	15
					⑤	CNT 기반 기술 대비 원가 절감 (경제적 기술 관련)	최소 50%	50% 이상	매립비용비교	실내시험	10	세종대학교 산학협력단	20	SW: <u>1 건</u>	SW: <u>1 건</u> (심사중)	15
	C	응력전달관계 규명	C-1	응력전달관계 규명	①	배합비별 응력 전달 관계 규명	최소 1종	1종 이상	실내실험결과 비교	규명 여부	20	세종대학교 산학협력단	50	논문(SO): <u>1 건</u>	논문(SO): <u>0 건</u> (1월 중 제출 예정)	10
계										100		200	특허: 출원 <u>2 건</u> 논문(SO): <u>3 건</u> SW: <u>1 건</u> 실계서: <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>2 건</u> 논문(SO): <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u> 실계서: <u>0 건</u>	100	

3.2. 핵심 연구성과

3.2.1. 핵심 연구성과 개요

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	응력센싱용 도료 제작	비접촉식 콘크리트 응력센싱용 페인터블 센서 제작을 위하여, 피에조분광현상을 갖고있는 페인트 혼합용 센싱물질을 선정하고, 응력측정을 위해 필요한 혼합비율에 대한 연구를 수행하는 단계임. 주로 실내실험을 수행하고, 응력센싱물질이 도포된 시멘트 모르타르 시편에대한 분광검출을 측정시험이 수행될 예정임	재료	세종대	1	4
2	피에조분광현상 규명	콘크리트에 도포된 응력센싱물질이 일정 수준 이상의 피에조분광효과(또는 피에조분광계수)를 보여야 응력센싱이 가능함. 따라서, 콘크리트 시편에 대한 압축(또는 인장) 시험을 수행하여, 배합비에 따른 피에조분광현상을 규명하고, 최종적으로 최적 배합비를 선정함	기타	세종대	2	4
3	응력전달관계 규명	모재에 가해지는 응력을 페인트 층에서 정확하게 측정하기 위해서는, 모재인 콘크리트와 응력센서 페인트 층간의 응력전달 관계를 규명해야함. 따라서, 유한요소해석을 이용하여 응력전달 관계를 규명하고, 이를 응력센싱용 도료 제작 디자인에 반영함	기타	세종대	1	4

3.2.2. 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	응력센싱용 도료 제작	
정의	비접촉 콘크리트 응력 측정이 가능한 페인트 개발	
목적	응력 센싱 페인트에 들어가는 미립자를 선정하는 단계로, 비접촉 응력 센싱에 적합한 고분광 물질을 문헌연구를 통해 가선평가하고, 형광/라만 분광법을 이용한 재료시험 수행, 분광검출을 측정 등을 통하여, 최종적인 페인트 첨가제 및 그 비율을 선정함. 본 과정을 통하여 선정된 페인트 첨가제는 콘크리트 내부에서 응력 센서로 사용되어, 비접촉식 응력 측정을 가능케 함	
성능목표	(기존기술 수준) 고분광 물질이 포함된 응력센싱용 페인트 관련 기존기술 전무 (개발기술 수준) 응력센싱용 도료 최종 1종 이상 제시	
성과달성 확인방법	페인트 및 첨가제 배합비율에 따른 스펙트럼의 침투값 위치 및 그 Intensity를 확인. 즉, 분광검출율을 측정함	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI : 1건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	보고서 : 1건

핵심성과 2	피에조분광현상 규명	
정의	콘크리트 배합비별 압분광 상수 분석 및 실구조물 적용 방안 제안	
목적	비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트는 콘크리트의 압분광 효과를 기반으로 비접촉식으로 응력을 측정하게 됨. 따라서, 비접촉식 응력 측정기술로서의 질적 성과를 만족해야함. 즉, 계측시간/대상물로부터의 응력 측정 거리/계측 정확도를 확인하는 과정이 필요함. 또한, 제안 기술의 현장 적용 및 실구조물의 응력 측정을 위하여, 구체적인 설계가 요구됨.	
성능목표	(기존기술 수준) 압분광법 및 페인트 기반 콘크리트 응력 측정관련 기술 전무 (개발기술 수준) 계측시간 30초 이내, 응력 측정 이격거리 10mm 이상, 계측 정확도 $\pm 10\text{MPa}$ 이하의 기술 개발, 기존 CNT기반 자가센싱 기술 대비 센싱미립자 매립비용 50% 절감	
성과달성 확인방법	- 최소 1종 이상의 페인트 시편에 압축하중(압축강도의 70%)을 가하고, 하중단계(최소 4단계)에서 선형성을 갖는지 확인함. 또한, 이때의 한 지점에서의 계측시간을 확인하고, 시편으로부터 프로브의 직선거리(레이저 조사거리)를 확인하며, 하중단계별 응력 측정 오차를 확인함. - 기존 Carbon nanotube(CNT)기반 자가센싱 기술 대비, 센싱미립자 매립비용 50%절감	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	SCI : 2건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	보고서 : 1건, 설계서 : 1건

핵심성과 3	응력전달관계 규명	
정의	응력센싱 페인트와 모재간의 응력전달관계를 규명함	
목적	본 기술에서는 모재의 응력을 페인트층을 통하여 비접촉식으로 측정하게 됨. 따라서 페인트와 모재간에 응력전달 관계를 규명하는 과정이 반드시 필요함. 따라서, 단계별 하중을 인가하였을 때, 페인트 표면과 모재 표면에 발생하는 변형률의 관계를 분석함	
성능목표	(기존기술 수준) 응력센싱용 페인트와 모재간의 응력전달관계 규명관련 기술 전무 (개발기술 수준) 배합비별 응력 전달 관계 규명	
성과달성 확인방법	최소 1종 이상의 배합비를 갖는 페인트에 대하여 압축하중(압축강도의 70%)을 가하고, 페인트 표면과 모재의 변형률을 측정하여 비교함	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

3.3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책 (후속연구 필요성 등)

[목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책]

- 초기 제안한 모든 질적성과지표를 달성하였으나, 주요 연구결과가 2차년도 연구 후반에 도출됨에 따라 일부 양적달성지표(SCI 논문, SW)의 달성이 요구됨
- SCIE 논문 2건 달성 계획 : 본 최종보고서(P132, P133)에 나타난 바와 같이, 두편의 SCIE 논문 초안이 영문으로 이미 작성되었음. 따라서, 해당 논문들의 영어 교정이 완료 되는대로 논문을 제출하겠음(2021년 상반기 이내)
- S/W 1건 달성 계획 : 최종보고서 P26에 나타난 바와 같이, SpectroMapper라는 소프트웨어를 개발하여 1~2차년도 연구에 사용하였음. 따라서, 해당 프로그램을 2021년 상반기 내 등록할 예정임

[후속연구 필요성]

- 본 연구에서는 비접촉식으로 구조물에 인가된 응력을 측정할 수 있는 레이저를 기반으로한 “페인터블 센서”라는 기술을 최초로 제안하고, 그 실현 가능성을 실험적으로 규명하였음. 즉, 레이저를 기반으로한 응력 측정기술을 콘크리트 분야에 적용하기위한 프레임워크를 제안하고 검증하였음.
- 본 연구 수행 이전에는 응력 센싱물질을 직접 콘크리트에 배합하는 연구가 수행되었으나, 실제 현장 타설시 첨가물량을 조절하기 어렵고, 국부적으로 센싱물질을 배합/타설할 경우 응력 집중현상이 일어날 수 있는 등의 단점이 발견됨
- 이와 같은 단점을 보완하기 위하여, 상대적으로 센싱물질 첨가물량 조절이 용이한 페인터블 센싱기술을 본 연구에서 제안하고, 그 기술 실현 가능성을 실험적으로 검토함
- 본 연구를 통하여, 최초 제안방법인 “일반도료(Paint)를 기반으로한 페인터블 센서 (제안방법 1)”의 응력-파수이동의 선형관계가 일부 규명되었으나, 하중 제거(또는 재인가)과정에서의 응력 측정 재현성은 검증되지 않음. 또한, 해당 방법은 재도장 등의 문제가 있는 것으로 판단됨
- 이를 보완하기 위하여 “접착식 페인터블 센서(제안방법 2)”가 추가로 제안되었고, 응력-파수이동의 선형관계 및 재현성이 본 연구를 통하여 실험적으로 규명됨. 즉, 본 연구에서는 페인터블 센서의 피에조분광효과를 규명하고, 그 피에조분광계수를 도출하였으나, 도료의 두께가 모든 실험에서 동일하게 유지됨. 따라서, 향후 실용화 가능성 제고를 위하여 도료의 두께관련 추가 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 또한, 제안방법 2인 Silicon wafer를 사용한 접착식 페인터블 센서의 경우, 센서부가 공장에서 제작되므로 첨가물량 및 분산도 등에 대한 추가적인 고려사항이 적음. 하지만, 제안방법 1인 일반 도료를 이용한 페인터블 센서의 경우 ①고해상도 장비를 이용하여 피에조분광효과 검증 및 피에조분광계수 도출을 위한 실험이 필요할 것으로 예상되며(본 연구에서는 포토블 장비를 사용하여, 해상도 낮음), ②도료의 두께, 첨가물량(volume fraction)등도 반드시 고려하여 후속 연구를 진행해야 할 것으로 판단됨
- 이와함께, 다양한 환경(온도, 습도 등)에 노출된 센서의 특성을 고려할 수 있도록, 온도영향 및 시간에 따른 접착식 센서의 응력전달 변화 등을 고려할 수 있는 추가 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 최종적으로, 위와 같은 재료단위의 검증이 종료된 후에는, 부재단위의 실험을 통하여 실제 적용가능성을 반드시 판단하여야 함

제4장. 연구개발성과의 활용 계획

4.1. 최종성과물의 활용방안

○ 미래 원천기술 확보

- 전세계적으로 많은 비접촉식 응력 측정기술이 연구되어지고 있으나, 피에조분광법을 이용하여 페인터블 응력센서를 개발한 연구는 매우 적음. 특히, 단가가 저렴한 재료를 응력센싱에 사용한 경우가 극히 적음. 따라서, 본 연구를 통하여 비접촉식 콘크리트 응력 측정기술의 원천기술을 확보하고, 해당 시장을 선점할 수 있을 것으로 판단됨

○ 실용화, 제품화 추진

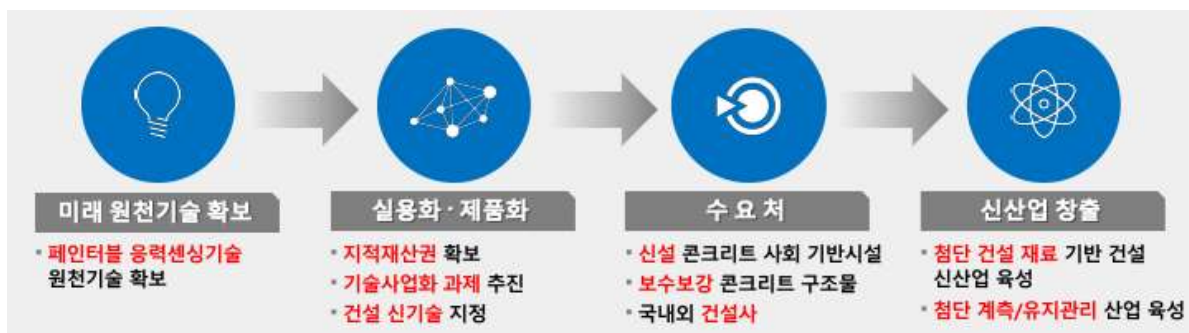
- 지적재산권 확보
 - 피에조분광현상을 이용한 페인터블 응력센싱 기법에 대한 지적재산권 확보
- 기술사업화 과제 추진
 - 신설되는 토목/건축 구조물에 시범적용하고, 지속적인 응력 측정을 수행하여 적용성 검증
 - 계측 장비 및 분석프로그램 패키징 등 사업화 추진
 - 기술 이전 및 실시 계약 체결
- 건설 신기술 지정
 - 개발된 페인터블 응력 센서를 이용한 시험시공 및 현장 검증
 - 개발된 페인터블 응력 센서에 대한 경제성 분석
 - 건설 신기술 지정·신청

○ 수요처

- 교량, 댐, 발전시설 등 신설 콘크리트 구조물 (신설구조물의 경우 절대응력 모니터링)
- 보수보강이 필요한 콘크리트 구조물 (보수보강 시에는 추가하중 모니터링)
- 지속적인 유지관리가 필요한 중요 구조 부재에 1차적으로 적용하고, 경제성에 대한 상세 분석이 이루어진 후, 일반 부재에 확대 적용
- 콘크리트 도장 및 유지관리관련 업체에서 활용 → 大 시장

○ 신산업 창출

- 새로운 미래 첨단 도장 재료 (비접촉식 응력 측정이 가능한 도장(또는 페인트) 신산업 육성
- 분광기술을 건설/유지관리 분야에 적용하는 첨단 계측산업 육성



<연구성과 활용방안>

4.2. 기대성과 및 파급효과

○ 기술적 효과

- 피에조분광효과를 기반으로한 페인터블 응력 센싱기술은 전세계적으로 극소수의 기관만이 보유한 독보적인 기술이므로, 지식재산권을 확보함으로써 세계 최초의 원천 기술 개발 가능
- 페인터블 센서의 개발과 함께, 분광기의 분해능을 개선하여 정밀도를 개선하기 위한 하드웨어 분야의 발전 촉진
- 재료, 광학, 건설, 기계 등 융합학문 발전의 벤치마킹 모델

○ 경제적 효과 (시장성/파급효과)

- 토목 시설물 유지관리분야
 - 국토교통과학기술진흥원에서 발표한 국토교통R&D동향조사(시설물분야, 2015)에 따르면, '18년 해외 시설물분야 시장은 약 3조 3,682억 달러규모, 국내 시설물분야 시장은 26조원 규모로 추정됨. 특히, 선진국 중심으로 교량/항만 등 주요 기반 시설물 유지관리 시장이 활성화됨
 - 미국의 경우 '14년 투자비용 총 4,160억 달러 중 유지보수가 차지하는 비용이 56.65%에 육박함
 - '13년 EU 주요국들의 인프라 투자비 대비 유지관리 비용 비중은 40%를 상회하는 것으로 조사됨
 - 콘크리트는 강재와 함께 토목/건축 구조물의 대표적인 재료이며, 큰 하중을 담당하는 주요 부재로 사용되므로 응력 모니터링이 필수적임. 본 연구에서 개발될 페인터블 응력센서는 일반적인 도장 작업이외에 별도의 센서 설치, 전선 매립, 전원 공급 등이 요구되지 않으므로, 한해 47,725백만원 (2012년 기준)에 이르는 시설물 정밀안전진단 비용을 현저히 낮출 수 있을 것으로 기대됨
 - 따라서, 토목 구조물 유지관리분야의 핵심기술 중 하나인, 구조물 응력측정의 원천 기술을 확보함으로써, 시설물 유지관리 분야 세계 시장을 선점할 수 있을 것으로 판단됨
- 페인트산업분야
 - 국내 페인트 시장은 약 3-5조원 규모이며, 건축용 페인트는 약 38%를 차지함
 - 따라서, 스마트센싱이 가능한 페인트(도료)개발을 통하여 해당 분야에 대한 시장 활성화 가능성 높음
- 광계측 및 센서분야
 - Global Markets and Technologies for sensors (BBC Research, 2016)에 따르면, '21년까지 광계측 및 센서 분야가 1조 9천억 달러 규모로 성장할 것으로 전망됨
 - 국내의 경우도, 산업통상자원부(이하 산업부)의 보도에 따르면, 국내 센서 내수시장은 '16년 약 69,609억 규모에서 '21년 125,100억 규모로 연평균 10.09% 성장할 것으로 전망됨
 - 따라서, 광계측 기반 응력센싱기법 개발을 통하여 해당 분야에 대한 시장 활성화 가능성 높음

○ 사회적 효과

- 토목 구조물 유지관리 기술의 발전을 통한 구조물 안전성 확보 및 인명피해 예방
- 안전하고 지능적인 구조물 건설을 통한 신성장 동력 마련
- 전문엔지니어의 부족, 인구 노령화 등을 극복 가능한 미래형 건설 재료 산업 육성

붙임. 참고문헌

1. Namgyu Kim and Hae-Bum Yun, “Noncontact mobile sensing for absolute stress in rail using photoluminescence piezospectroscopy”, *Structural Health Monitoring*, 2018
2. Namgyu Kim et al., “Passive stress sensing using Raman piezo-spectroscopy”, *Sensors and Instrumentation*, 2015
3. K.G. Dassios and C. Galiotis, “Fluorescence studies of polycrystalline Al_2O_3 composite constituents: piezo-spectroscopic calibration and application”, *Applied Physics*, 2004
4. S.-H. Shim and T. Duffy, “Raman spectroscopy of Fe_2O_3 to 62 GPa”, *American Mineralogist*, 2001
5. C. Schmidt and I-M. Chou, “The hydrothermal diamond anvil cell for Raman spectroscopic studies of geologic fluids at high pressures and temperatures”, Presentation Material
6. S.-H. Shim, “Raman spectroscopy and x-ray diffraction of phase transitions in Cr_2O_3 to 61 GPa”, *Physical Review*, 2004
7. John E. Proctor et al., “High-pressure Raman spectroscopy of graphene”, *Physical Review*, 2009,
8. T. M. G. Mohiuddin et al., “Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation”, *Physical Review*, 2009
9. Meiling Hong et al., “Structural Phase Transition and Metallization of Nanocrystalline Rutile Investigated by High-Pressure Raman Spectroscopy and Electrical Conductivity”, *Minerals*, 2019
10. 김보석, 신준호, 이한승, “화상 이미지 기반 FEM 해석을 이용한 기포제 혼입 시멘트 페이스트의 역학 성능 평가.”, *한국건축시공학회지* 16.1, 2016
11. Zhu, W. C., and C. A. Tang, “Numerical simulation on shear fracture process of concrete using mesoscopic mechanical model.”, *Construction and Building Materials* 16.8, 2002
12. Álava, Hugo Egüez, et al., “Chloride interaction with concretes subjected to a permanent splitting tensile stress level of 65%.”, *Construction and Building Materials* 127, 2016
13. Baoguo Han et al. “Sensing properties of CNT-filled cement-based stress sensors”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2011

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.