

비접촉식
절대응력
측정이
가능한
스마트
콘크리트
개발

최
종
보
고
서

2020

국
토
교
통
과
학
기
술
진
흥
원

비접촉식절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발 최종보고서

2020. 2. 17.

주관연구기관 / 세종대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

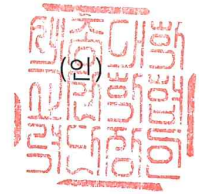
국토교통부장관(국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발’(연구개발 기간 : 2018. 4. 17 ~ 2019. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 02. 17

주관연구기관명 : 세종대학교 산학협력단

(대표자) 백 성 욱



주관연구기관책임자: 이 종 재

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C 143291-02	해당 단계 연구 기간	2019.1.1. - 2019.12.31	단계구분	2단계/ 총 2단계
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발			
연구책임자	이종재	해당단계 참여연구원 수	총: 12 명 내부: 12 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:220,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:220,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 13 명 내부: 13 명 외부: 명	총 연구비	정부:370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:370,000천원
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	1(계재) 1(제출)	2(출원)				1					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 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
136

<국문 요약문>

연구의 목적 및 내용	연구 개발 목표 - 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발 연구 개발 내용 - 본 연구의 최종 목표는 광물의 산란특성을 활용하여 “無센서(Sensorless) 非접촉(non-contact)식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발” 및 그 측정기술 개발임. - 이를 위해, 재료분석 시험을 통하여 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 최적 시멘트를 선정하고, 압축/인장하중 시험을 통하여 시멘트 및 결합재의 압분광 효과를 규명하며, 최종적으로 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발함				
연구개발성과	- 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 스마트 콘크리트용 최적 시멘트 선정 - 시멘트 및 결합재의 압분광 효과 규명 - 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	활용계획 - 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 사용한 구조물 건설을 통하여, 토목 구조물 응력 측정 및 SOC 유지관리 기술 고도화 기대효과 - 세계 최초, 핵심 원천 기술의 확보 - 절대응력 측정이 가능한 콘크리트 건설 재료 개발로 세계 건설시장 선점 - 신재료, 신장비 개발로 연구성과 확대 및 실용화 추진 가능 - 콘크리트 구조물 유지관리 기술 첨단화로 시설물 안전에 기여				
핵심어 (5개 이내)	스마트 콘크리트	절대응력 측정	압분광법	라만 분광법	비접촉식 센싱

< SUMMARY >

Purpose & Contents	Research purpose - Development of Smart Concrete capable of non-contact stress measurement Contents - Development of piezo-spectroscopic sensitive cement - Experimental validation of piezo-spectroscopic effect - Development of sensor-less, non-contact, absolute stress measurable smart concrete				
Results	- Piezo-spectroscopic sensitive cement - Piezo-spectroscopic effect of smart cement/concrete - Sensor-less, non-contact, absolute stress measurable smart concrete				
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	Smart concrete	Absolute stress measurement	Piezo spectroscopy	Raman spectroscopy	Non-contact sensing

< 목 차 >

제 1 장. 연구개발과제의 개요	1
1.1. 연구개발의 개요	1
1.2. 연구개발의 필요성	4
1.3. 연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토	5
1.4. 연구개발 범위	6
1.4.1. 연구개발의 최종목표 및 최종성과물	6
1.4.2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거	8
1.4.3. 연구개발 핵심성과 및 연구내용	8
제 2 장. 국내외 기술 개발 현황	12
2.1. 국내외 관련 기술 현황	12
2.2. 선행 연구 내용 및 결과	14
제 3 장. 연구수행내용 및 성과	17
3.1. 연구개발 추진 일정	17
3.1.1. 스마트 시멘트 개발	17
3.1.2. 스마트 콘크리트 개발	18
3.1.3. 연차별 연구 접근방법	18
3.2. 비접촉식 응력센싱용 시멘트 첨가제 가선택	19
3.2.1. 시멘트에 포함된 고분광·압분광 물질 문헌연구	19
3.2.2. 산화알루미늄	19
3.2.3. 삼산화철	20
3.2.4. 이산화규소	21
3.2.5. 산화크롬	22
3.2.6. 그래핀	23
3.2.7. 소결	25
3.3. 시멘트 응력측정을 위한 압분광 시스템 (H/W, S/W) 구축	26
3.3.1. 분광(Spectroscopy) 시스템 구축	26

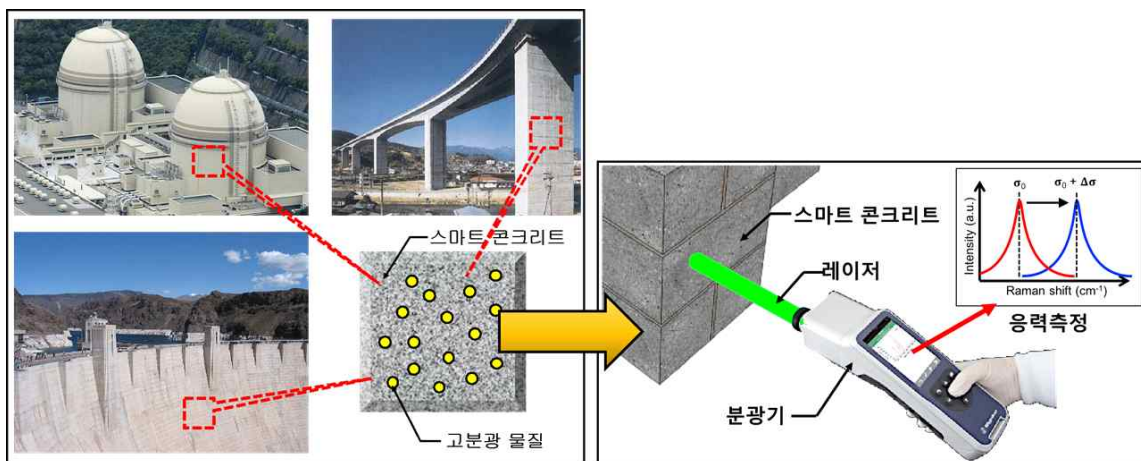
3.3.2. 맵핑(Mapping) 시스템 구축	30
3.3.3. 계측/분석 프로그램 개발	31
3.4. 비접촉식 스마트 시멘트 제작 및 재료시험	33
3.4.1. 시멘트 및 첨가제 재료시험(분광법기반)	33
3.4.2. 센싱물질이 포함된 시멘트 모르터 시편제작	36
3.4.3. 측정 파라미터 선정 실험	40
3.4.4. 비접촉식 스마트 시멘트 모르터 시편 재료시험	42
3.4.5. 소결	49
3.5. 비접촉식 스마트 시멘트의 압분광 효과 규명	50
3.5.1. 압분광 효과 규명을 위한 시험 셋업	50
3.5.2. 시멘트 모르터 압축강도 실험	53
3.5.3. 시멘트 모르터 압분광 효과 검증 실험	55
3.5.4. 시멘트 모르터 압분광 계수 도출	66
3.5.5. 압분광 계수를 이용한 시멘트 모르터 응력 측정	68
3.5.6. CNT(Carbon nanotube)기반 자가센싱 대비 경제성 분석	69
3.5.7. 소결	69
3.6. 비접촉식 스마트 콘크리트의 재료시험	71
3.6.1. 스마트 콘크리트 시편제작	71
3.6.2. 스마트 콘크리트 분광검출을 위한 시험 셋업	73
3.6.3. 스마트 콘크리트 분광검출을 위한 시험	75
3.7. 콘크리트에 적합한 평균응력측정 기술 개발	78
3.7.1. 축방향 스캐닝을 이용한 평균응력 계측방법	78
3.7.2. 렌즈를 이용한 평균응력 계측방법	79
3.8. 비접촉식 스마트 콘크리트의 압분광 효과 규명	81
3.8.1. 압분광 효과 규명을 위한 시험 셋업	81
3.8.2. 축방향 스캐닝을 이용한 평균응력 계측방법	86
3.8.3. 렌즈를 이용한 평균응력 계측방법	90
3.8.4. 소결	94
3.9. 토의	95
3.9.1. 콘크리트 표면 응력 측정방법에 대한 고찰	95
3.9.2. 다축응력상태에서의 응력 측정방법에 대한 고찰	98
3.10. 결론	100
3.11. 기술 적용 문제점 및 해결 방안	103
3.12. 연구 개발 성과	104
3.12.1. 특허	104
3.12.2. 논문	106

3.12.3. 소프트웨어	109
제 4 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	110
4.1. 목표 달성도	110
4.1.1. 총괄	110
4.1.2. 1차연도	111
4.1.3. 2차연도	111
4.1.4. 핵심 연구성과	112
4.1.5. 핵심 연구성과별 설명	112
제 5 장. 연구개발성과의 활용 계획	114
5.1. 최종성과물의 활용방안	114
5.2. 기대성과 및 파급효과	115
제 6 장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	117
제 7 장. 연구개발성과의 보안등급	117
제 8 장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 ...	117
제 9 장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	118
제 10 장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	120
제 11 장. 참고문헌	120
부록. 압분광법을 이용한 응력 측정방법에 대한 고찰	128

제1장. 연구개발과제의 개요

1.1. 연구개발의 개요

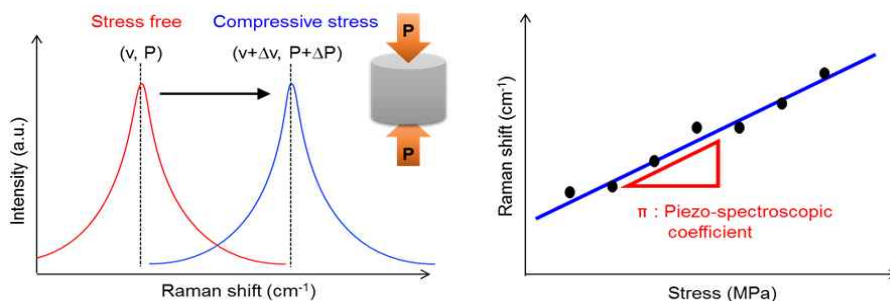
- 無센서(Sensor less) 非접촉(Non-contact)식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발
- 본 연구에서 제안하는 無센서 非접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트는, 콘크리트 표면의 모든 부분에 대해 **압분광 효과***를 이용한 비접촉 응력 측정기술을 이용하여 콘크리트의 절대응력이 계측 가능한 콘크리트 재료임
 - **無센서** : 콘크리트 표면에 존재하는 고분광물질을 이용한 응력 측정기술로써, 응력측정을 위한 추가적인 센서 설치 없음
 - **非접촉** : 레이저를 이용한 비접촉, 비파괴 응력 측정기술로써, 센서에 전원을 공급하거나 배선을 필요로 하지 않고, 응력 측정을 위하여 평균 1분 미만의 짧은 계측시간만을 요구함
 - **절대응력** 측정 : 조사된 레이저에 대한 라만 스펙트럼은 분자구조 레벨에서 대상물질의 화학적 성분 및 응력 상태에 따라 반응하므로 stress-free 상태의 물질에 대한 값을 기준으로 절대응력 측정 가능



<無센서 非접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 기술개발 개략도>

※ 압분광 효과(Piezospectroscopic effect)란?

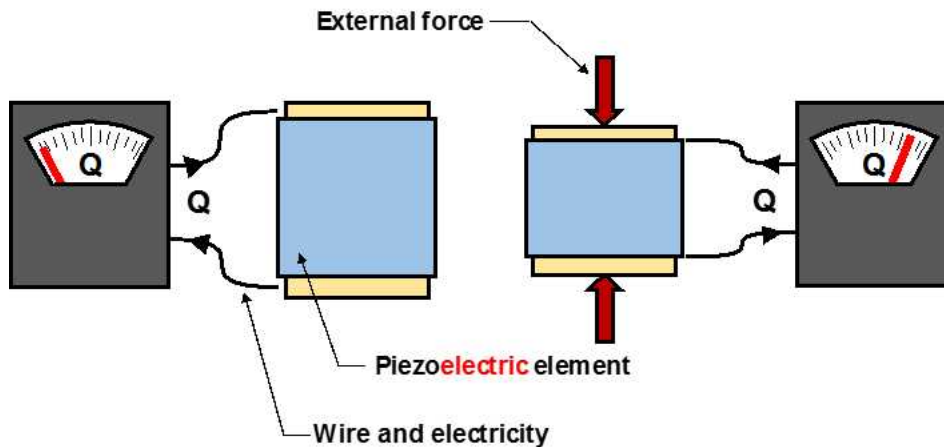
라만 분광법은 대상물질에 레이저를 조사하고, 산란되는 레이저로부터 대상물질의 분자구조를 분석하는 방법인데, 대상물이 압축 또는 인장 응력을 받으면, 라만 스펙트럼의 이동(Peak shift)이 발생하고 이 이동량이 응력의 크기와 비례하는 현상.



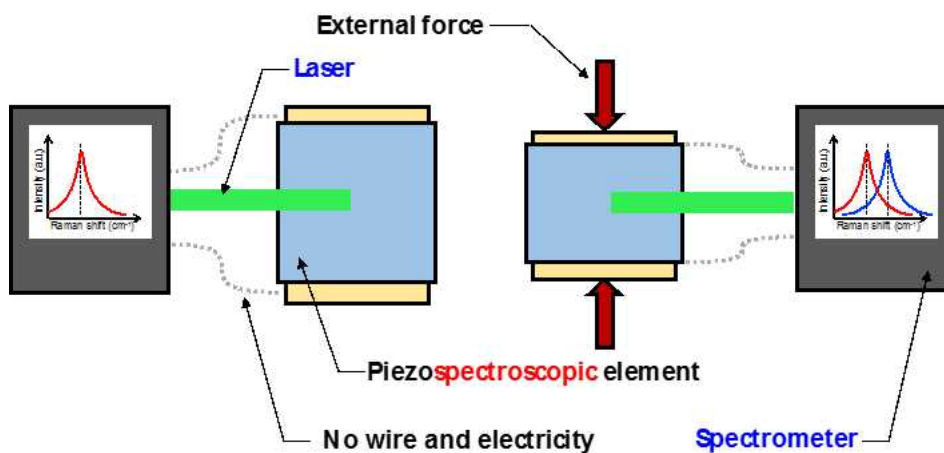
<압분광 효과>

○ 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)로 부터 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>

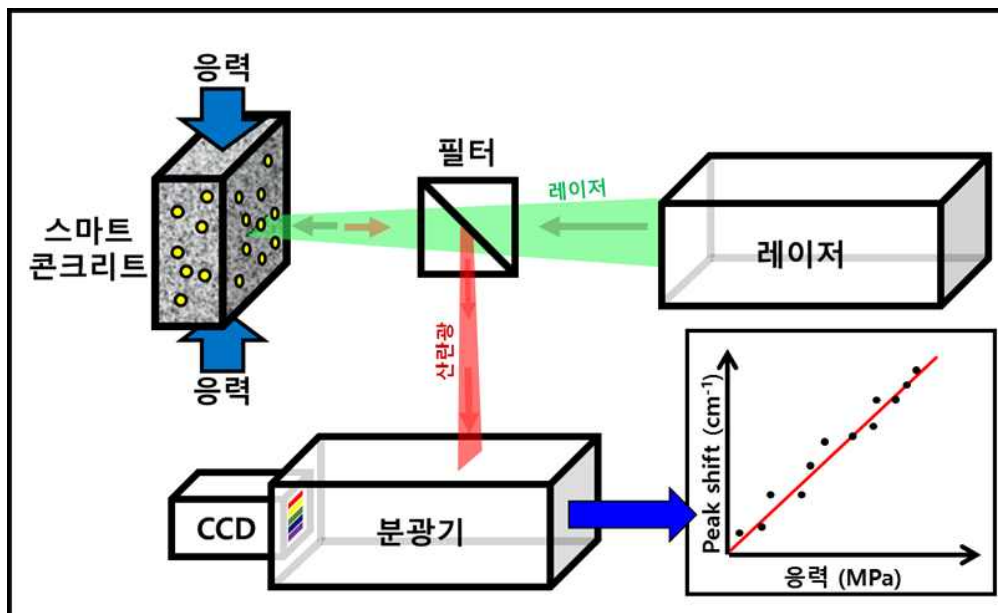
- 분광기와 레이저를 필요로 하는 본 기술의 특성상, 장비의 고도화는 응력측정의 해상도에 직접적인 영향을 미침. 최근 고해상도 CCD와 레이저 기술의 발달로 응력측정의 해상도가 높아짐과 동시에, 장비가 소규모화되어 실제 현장 적용에도 매우 높은 가능성을 지님 (아래 그림은 일반적으로 구매가 가능한 휴대용 라만 분광 시스템)



<상용 휴대용 라만 분광 시스템>

○ 압분광 효과를 이용한 콘크리트 절대응력 측정의 가능성

- 콘크리트 수화반응 이전의 화학성분은 CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_2 등을 포함하고, 해당 성분들은 일반적으로 높은 산란특성을 보임. 따라서, 압분광법을 콘크리트에 적용할 수 있는 높은 가능성이 있음
- 이와 같은 압분광법 기술의 장점 및 시멘트 산란 특성에도 불구하고, 전세계적으로 압분광법을 콘크리트의 응력 측정에 적용한 사례는 전무함. 따라서, 본 연구에서는 압분광법을 기반으로 한 콘크리트 응력 측정의 원천기술 개발하고, 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 및 측정방법을 개발 하고자 함



<압분광 효과를 이용한 콘크리트의 응력 측정 방법>

연구개발 개요 요약

- 최종목표: 無센서(Sensorless) 非접촉(non-contact)식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발
- 적용기술: 라만 분광법 및 압분광 효과를 이용한 응력 측정
- 연구개발의 필요성
 - ✓ 정책적 필요성: 콘크리트 시설물의 안전을 위한 핵심 유지관리 기술
 - ✓ 기술적 필요성: 콘크리트 절대응력 측정을 위한 원천 기술
 - ✓ 전략적 필요성: 압분광 효과를 이용한 콘크리트 응력측정에 관한 세계 최초 연구

1.2. 연구개발의 필요성

○ 콘크리트 구조물 유지관리의 중요성 및 절대응력 측정기술 부재

- 콘크리트는 강재와 함께 토목, 건축분야의 주요 자재이며, 원자력 발전소, 댐, 터널, 교량 등의 국가 주요자산인 대부분의 SOC 건설에 구조부재로 사용되어, 큰 압축응력의 지지를 담당함. 특히, 원자력 격납 구조물의 내압 측정, 댐에 가해지는 자중 및 수압, 터널 콘크리트 라이닝에 가해지는 수압, 지반압, 상재 하중, 교량에 가해지는 사하중 및 활하중 등은 대규모 인명 피해로 이어질 수 있는 SOC 사고를 피하기 위하여 반드시 지속적으로 잔존응력 및 응력변화량 측정이 되어야 함



<지속적인 유지관리가 필요한 대표적인 콘크리트 구조물>

- 이를 측정하기 위하여, 일반적으로 매립형 변형률계가 설치되며, 적용 구조물에 따라서 로드셀, 토압계, 수압계 등의 형태로 설치됨. 또한 시공전 유한요소 해석 등을 통하여 응력 집중부위를 예측하고, 해당 위치에 변형률계를 매립하지만, 시공오차, 환경적인 요인 등으로 인하여 기존 예측했던 위치 이외의 다른 위치에서도 응력을 측정해야할 필요성이 있음. 이를 위하여, 콘크리트 표면에 변형률계를 추가적으로 설치하지만 센서의 부착표면 열화, 시간적인 변화 등으로 인하여 계측결과의 신뢰도가 크지 않으며, 센서 부착 이전의 응력 이력에 대해서는 확인할 수 없음
 - 콘크리트 구조물의 다양한 접촉, 비접촉 센싱기법의 적용이 시도되고 있으나, 이는 주로 콘크리트 내부 철근배근상태, 철근부식, 중성화 깊이, 콘크리트 내부 공극 및 표면 균열 측정을 통한 내구성 평가방법임. 즉, 콘크리트가 받고 있는 절대응력을 직접적으로 측정할 수 있는 기술에 대한 연구는 아직 부족함
- 본 연구에서 제안하는 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트는, 레이저를 이용한 계측 방법으로, 전원의 공급 및 배선이 필요 없는 비접촉식 응력 측정기술임. 또한, 콘크리트 자체를 센서로 사용하기 때문에, 센서의 설치, 유지보수 비용을 절약할 수 있으며, 개발될 스마트 콘크리트를 쏫크리트 등 다양한 형태로 변형함을 통하여 적용성을 확대할 수 있을 것으로 기대됨
- 한국의 지능형 시설물 안전 및 유지관리 기술수준은 국가가 보유한 원천기술의 부족으로 인하여, 최고 기술보유국과 4.3년의 기술격차를 갖고 있음. 본 연구에서 제안하는 압분광법 기반 스마트 콘크리트는 세계적으로 보고된 바가 없기 때문에, 핵심 원천기술의 확보가 가능할 것으로 판단됨

1.3. 연구개발과제의 차별성 및 중복성 검토

- 콘크리트 구조물이 자체적으로 위험을 인식할 수 있는 자기진단에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있음.
 - ✓ 압전 저항 소자의 역압전 효과를 이용한 콘크리트의 자기진단 방법
 - ✓ 강섬유가 포함된 콘크리트에 전기장을 발생시켜 자기임피던스 효과에 의하여 콘크리트 내부에 발생한 응력을 측정하는 비접촉식 방법
 - ⇒ 기존 콘크리트 자기진단에 대한 연구는 「절대응력」 측정이 불가능 함.
 - ⇒ 본 제안 연구는 “압분광 효과”를 기반으로 응력을 측정하기 때문에, 절대응력의 측정이 가능하고, 전극의 매설이나 전원의 공급이 필요하지 않으며, 대상 시편의 크기도 제한이 없다는 점에서, 기존 자기진단 콘크리트 기술과는 차별화 됨.
- 압분광 기법을 이용한 응력측정에 대한 연구는 타 분야에서 시도하는 단계
 - ✓ 압분광법을 이용한 전투기날개의 압력측정기술 (2015) : 고분광 물질인 alumina 미립자가 포함된 에폭시 코팅을 응력 센서로 활용
 - ✓ 압분광법을 이용한 엔진 차열피막의 응력측정 (2012) : 엔진 표면에 생성된 차열피막에 분포된 alumina를 이용한 차열피막의 잔류응력 측정
 - ⇒ 고분광 물질인 alumina를 주로 활용함으로써 금속 재료에 대한 연구가 주를 이루고 있으나, 본 연구에서와 같이 콘크리트 재료에 대한 연구는 전무함.
 - ⇒ 세계 최초의 연구 : 유사연구 중복성 없음
- 압분광 효과를 이용한 콘크리트 절대응력 측정의 가능성
 - 콘크리트 수화반응 이전의 화학성분은 CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , SO_2 등을 포함하고, 해당 성분들은 일반적으로 높은 산란특성을 보임. 따라서, 압분광법을 콘크리트에 적용할 수 있는 높은 가능성이 있음
 - 이와 같은 압분광법 기술의 장점 및 시멘트 산란 특성에도 불구하고, 전세계적으로 압분광법을 콘크리트의 응력 측정에 적용한 사례는 전무함. 따라서, 본 연구를 통해 압분광법을 기반으로 한 콘크리트 절대응력 측정의 원천기술 개발을 개발하고, 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 재료를 개발 하고자 함
 - 본 연구 제안기관에서는 기초 실험 연구를 통해 가능성을 입증 (연구개발계획서 1-4절 참고)



구조물의 효율적인 유지관리를 통한 대규모 인명피해 예방



無센서 응력 측정 기술 개발을 통한 유지관리 비용 절약



원천기술 확보를 통한 세계시장 선점

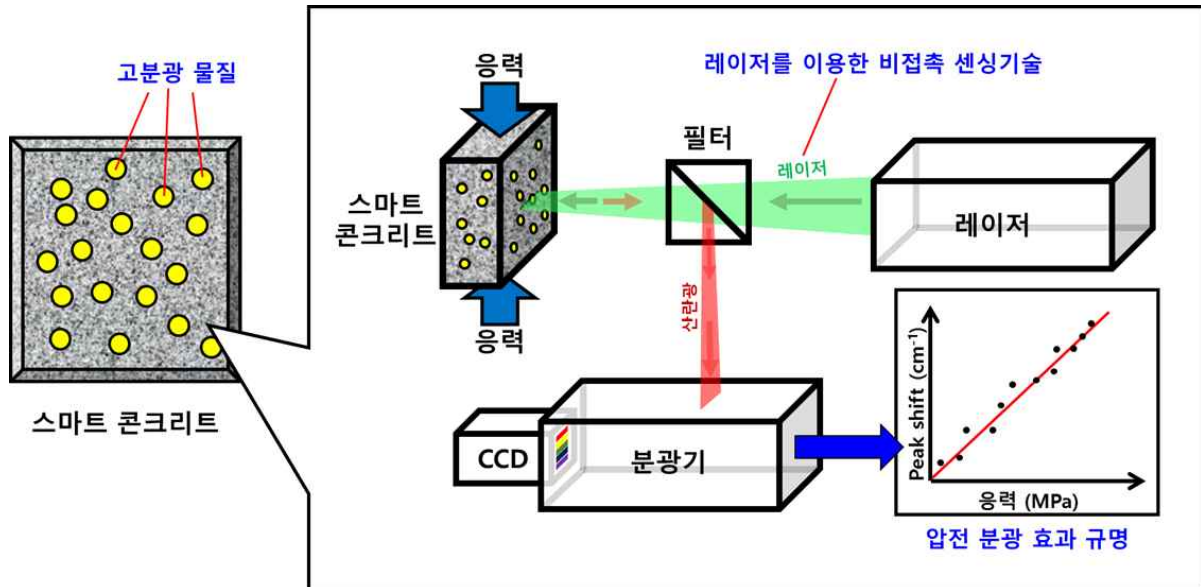
<절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발의 중요성>

1.4. 연구개발 범위

1.4.1. 연구개발 최종목표 및 최종성과물

① 최종목표 및 최종성과물

- 본 연구의 최종목표는 광물의 산란특성을 활용하여 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 고분광 물질이 포함된 스마트 콘크리트 및 그 측정기술 개발임. 이를 위해서 3가지 핵심요소기술(CTE)를 설정함



<고분광 물질을 포함한 비접촉 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발>

■ CTE 1 : 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 최적 시멘트 개발

비접촉 절대응력 측정에 적합한 시멘트 및 결합재의 광물 조성 분석을 위하여, 포틀랜드 시멘트와 대표적으로 사용되는 특수 시멘트 시편을 만들고, 수화반응 이후에 생성된 물질의 화학적 성분을 재료 분석시험을 통하여 규명함. 또한, 응력 측정용 분광 효과를 갖는 센싱 물질로 사용 가능한 미분말 결합재에 대한 문헌연구 수행 및 해당 미분말이 포함된 시편 제작 후 동일한 시험을 수행함

■ CTE 2 : 시멘트 및 결합재의 압분광 효과 규명

응력 측정용 미분말이 함유된 시멘트 시편에 대한 응력 측정 시험(압축 또는 인장)을 수행하고, 이를 변형률계의 결과와 비교함. 또한, 응력과 분광기를 통하여 계측된 결과의 관계를 규명하여, 이를 응력 측정 결과 분석에 활용함. 즉, 압분광 효과를 규명함

■ CTE 3 : 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발

CTE 1, CTE 2를 통하여 검증된 응력 측정용 분광 효과를 갖는 미분말이 함유된 시멘트 및 결합재를 이용하여, 대표적인 배합비를 가지는 콘크리트 시편을 제작하고, 화학적 분석을 수행함. 또한, 응력 측정 시험을 통하여, 스마트 콘크리트에 대한 압분광 효과를 규명함

- 본 연구의 최종 성과물은 절대응력이 측정이 가능한 스마트 콘크리트임. 즉, 일반 콘크리트에 첨가되어야 할 (또는 기존 재료 중 첨가 비율을 높여야 할) 고분광 물질의 종류 및 그 최적 배합비를 결정하고, 대표적인 콘크리트 배합비에서의 콘크리트 압분광 효과를 규명해서, 스펙트럼의 첨

두치 이동량과 응력사이의 관계를 환산하기 위한 압분광 상수 (Piezospectroscopic coefficient)를 최종적으로 제시할 예정임.

② 설정근거

- 최종 연구 성과물은 압분광 효과를 이용하여 콘크리트 구조물의 절대응력을 측정할 수 있는 **고분광물질이 포함된 스마트 콘크리트 재료**임.
- 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 확보**에 주력



<연구 목표의 설정 근거>

1.4.2. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

최종성과물	기술성숙도		설정근거
	유형	단계	
비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발	재료 · 자재	TRL 4	- 본 연구에서 제안하는 기술은 TRL 2 (기술적 응용개념 또는 아이디어 형성 단계) 수준에 해당하는 선행연구를 통해 타당성 입증 1차년도에는 본 기관에서 보유한 응력 측정기술을 스마트 콘크리트 개발에 적용하기 위하여, TRL 3 수준에 해당하는 실험적 연구를 통한 개별 요소의 기능 및 특성 정립이 이루어질 예정임 2차년도에는 1차년도에 수행된 개별 요소 기능 및 특성 정립을 기반으로, 실험실 환경에서 시멘트 및 콘크리트 테스트 시편을 제작하고, 재료 시험 및 압축/인장하중 시험이 수행될 예정이며, 이는 TRL 4에 해당하는 실험실 환경에서 테스트 용 샘플의 성능 및 신뢰성 평가에 이를 것으로 기대함

1.4.3. 연구개발 핵심성과 및 연구내용

연번	핵심성과물	성과유형*	핵심성과 개요
1	비접촉 절대응력 측정에 적합한 최적 시멘트 개발	재료·자재	스마트 시멘트 및 스마트 콘크리트에 들어가는 미립자를 선정하는 단계로, 비접촉 절대응력 측정에 적합한 고분광 물질을 문헌연구를 통해 가선평하고, 수화반응 전/후의 재료 시험, 분광검출율 측정 등을 통하여, 최종적인 시멘트첨가제를 선정함
2	시멘트 및 결합재의 압분광 효과 규명	기타 (현상규명)	CTE 1을 통하여 선정된 최적 시멘트를 이용하여 만들어진 시편으로부터 배합비별 압분광 현상을 규명하고, 분석 알고리즘을 개발하며, 특허 출원, 논문 제출 등으로 기술시장 선점
3	비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발	재료·자재	CTE 1과 CTE 2를 통하여 검증된 스마트 시멘트를 이용하여, 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발하고, 그 압분광효과를 규명하며, 현장적용 방안을 설계

① 비접촉 절대응력 측정에 적합한 최적 시멘트 개발

- 비접촉 절대응력 측정용 콘크리트에 첨가될 최적 시멘트 조성 및 미분말을 선정하기 위하여, 다른 물질과 명확히 구별되는 고분광 물질에 대한 기술조사 수행
- 분광검출율을 최대화 할 수 있는 시멘트를 결정하기 위하여, 광물조성이 다른 1-5종 시멘트 및 특수 시멘트에 대한 재료 시험을 수행하여 화학조성을 규명하고, 이를 이용한 모르터 시편을 제작하여 분광검출율을 측정함

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	고분광 물질관련 문헌연구	- 분광학적으로 다른 물질과 구별되는 고분광 물질에 대한 기술 조사를 수행 - 시멘트의 화학적 조성에 대한 기술 조사
	스마트 시멘트 최적 시멘트 선정	- 일반 시멘트 및 특수 시멘트의 수화반응 전/후의 화학적 조성을 규명하기 위한 모르터 시험 시편 제작 - 시멘트 조성비를 수정하여 (고분광 물질을 첨가하거나, 기존 시멘트 비율을 수정하여) 재료 시험용 모르터 시편 제작 - 재료시험 (SEM, XRD, 라만 분광법)을 수행하여, 시험 시편의 화학적 조성 규명
	스마트 시멘트 검증	최적화된 화학 조성비로 만들어진 스마트 시멘트의 모르터 시편을 제작하고, 분광검출율을 측정함

화학생분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	NaO+K ₂ O	SO ₃
성분비 (%)	60~67	17~25	3~8	0.5~6	0.1~4	0.2~1.3	1~5

<수화 반응 전 포틀랜드 시멘트의 화학 조성>



<보유중인 재료 시험기>

<고분광물질 라만 스펙트럼 (이산화철, 탄산칼슘)>

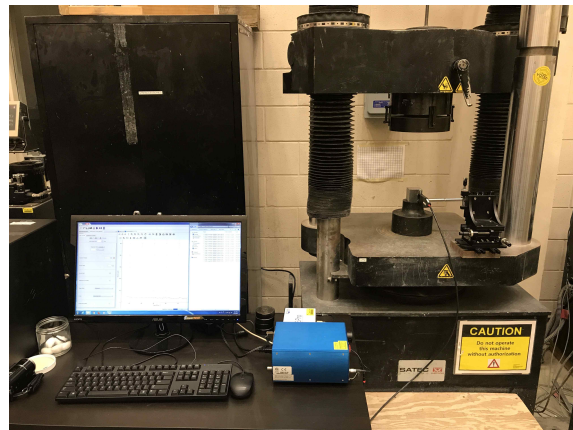
② 시멘트 및 결합재의 압분광 효과 규명

- 고분광 물질이 포함된 시멘트의 응력시험을 위하여 시편을 제작하고, 최대 항복강도까지의 응력시험을 수행하여, 응력과 파수와의 관계(압분광 효과)를 규명하고, 압분광 계수를 도출함
- 압분광 계수를 도출하기 위한, 분광신호처리 알고리즘 개발

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
1차년도	■ 압분광 물질 문헌연구	■ 시멘트 첨가제로 사용가능한 압분광 효과를 갖는 물질에 대한 기술 조사 및 문헌 연구
2차년도	■ 시멘트 압분광 효과 규명	■ 고분광 물질이 포함된 시멘트 모르타르 시편 제작 ■ 제작된 시편에 대하여, 항복강도 이하의 압축하중 시험 수행 ■ 응력과 파수와의 관계를 규명
	■ 시멘트 압분광계수 도출	■ 압분광계수를 도출할 수 있는 분석 신호처리 알고리즘 개발 ■ 미분발의 비율에 따른 계측 민감도 시험 수행 ■ 선형 혹은 비선형을 갖는 응력과 파수의 관계로부터, 압분광계수를 도출

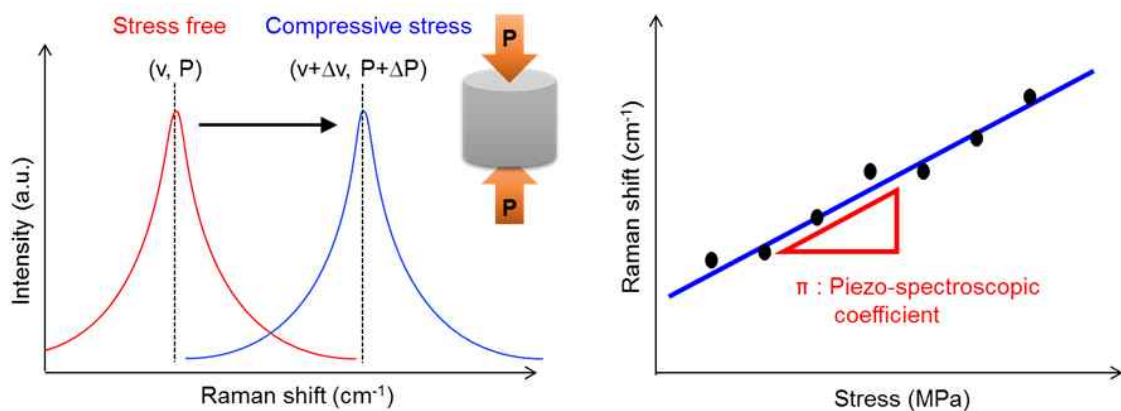


(a) 시멘트 모르타르



(b) 압축하중시험 전경

<압분광 효과 규명을 위한 시험시편 및 압축하중시험>



<압분광 효과 (응력과 파수와의 관계) 및 압분광 계수 도출>

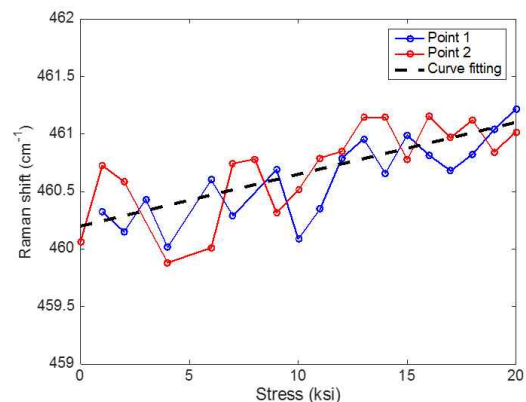
③ 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발

- 압분광 효과가 포함된 시멘트 및 결합재를 실제 현장에서 사용되는 배합비를 이용하여 콘크리트 시편을 제작하고, 비접촉식 응력 측정을 수행하여, 응력과 파수의 관계를 규명함. 이와 함께, 본 기술에 대한 향후 적용 방안을 연구함

연 차	주요 연구활동	세부 연구내용
2차년도	스마트 콘크리트의 재료 물성 시험	- 고분광 물질이 포함된 시멘트 및 결합재와 일반 골재 등을 이용하여, 대표적으로 사용되는 배합비가 적용된 콘크리트 시편을 제작 - 수화반응 이후 생성된 물질을 규명하기 위한 재료 시험 수행
	스마트 콘크리트의 압분광 효과 규명	- 상기에서 제작된 콘크리트 시편에 대하여, 항복강도 이하의 압축강도시험 수행 - 응력과 파수와의 관계를 규명
	스마트 콘크리트의 압분광 계수 도출	- 콘크리트 배합 비율에 따른 계측 민감도 시험 수행 - 선형 혹은 비선형을 갖는 응력과 파수의 관계로부터, 압분광계수를 도출
	향후 적용방안 연구	개발된 스마트 콘크리트의 실제 적용방안 설계



<골재가 포함된 콘크리트 시편>



(a) 일반 콘크리트 라만 스펙트럼

(b) 특수 콘크리트 압분광 효과 검증

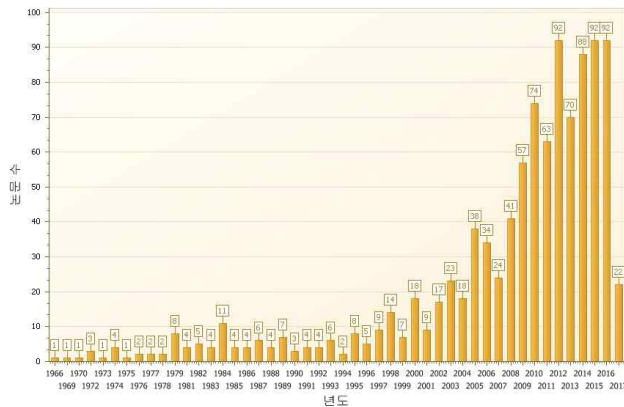
<일반 콘크리트 라만 스펙트럼 및 특수 콘크리트 압분광 효과 검증>

제2장. 국내외 기술 개발 현황

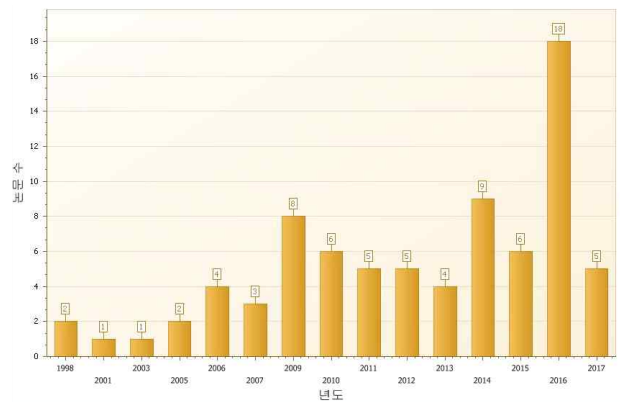
2.1. 국내외 관련 기술 현황

○ 스마트 콘크리트 개발 국내외 현황

- 콘크리트 비파괴검사 관련 연구는 아래 그래프와 같이 매년 증가하는 추세임
- 하지만, 국내외 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술에 대한 선행연구 사례는 보고된 바가 없음. 세계 최초, 원천 기술 확보 가능



(a) 연도별 콘크리트 비파괴 검사관련 논문 수

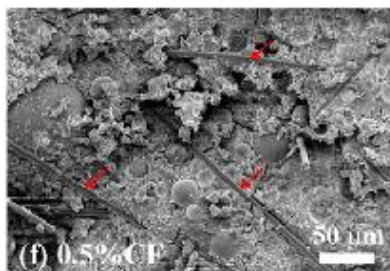


(b) 연도별 콘크리트 자기진단관련 논문 수

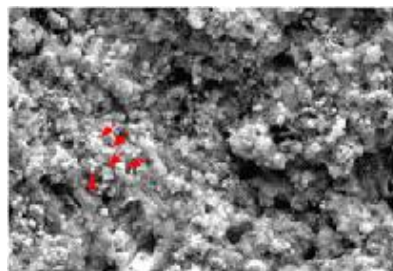
<콘크리트 비파괴 검사 및 자기진단관련 논문 연도별 발간 추이>

○ 기존 스마트 콘크리트 자기진단(Self Sensing) 기법 및 한계점

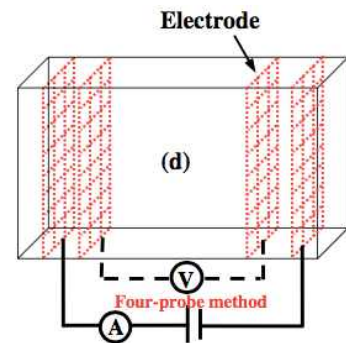
- 콘크리트 구조물이 자체적으로 위험을 인식할 수 있는 자기진단에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있음. 특히, 콘크리트 응력측정을 위하여, 압전 저항 소자의 역압전효과를 이용한 콘크리트의 자기진단 방법이 국내외에서 활발히 연구되고 있으며, 최근 나노 기술의 발달과 함께, 탄소섬유, 니켈 등이 포함된 콘크리트의 자기진단 기법에 대한 연구가 가속화 되고 있음. 하지만 기술의 특성상 필연적으로 전극에 대한 매설이 필수적이며, 응력 측정을 위해서는 추가적인 전선의 연결 및 전원의 공급이 필요함



(a) 탄소섬유



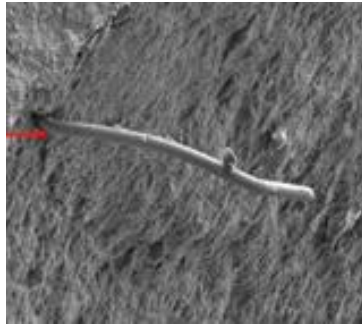
(b) 니켈분말



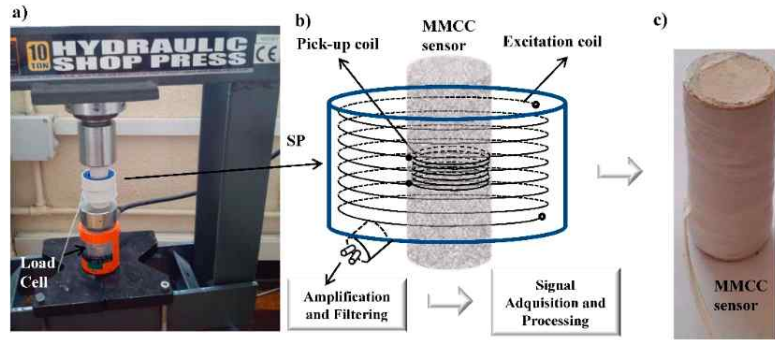
(c) 일반적인 레이아웃

<압전 저항 소자를 이용한 기존 자기진단 콘크리트 기법 (탄소섬유, 니켈)>

- 강섬유가 포함된 콘크리트에 전기장을 발생시켜 자기임피던스 효과에 의하여 콘크리트 내부에 발생한 응력을 측정하는 비접촉식 방법도 최근 연구되어지고 있음. 단, 응력 측정을 위해서는 대상 시편 주변에 전기장을 발생시켜야하기 때문에, 작은 크기의 시편에만 적용할 수 있다는 한계점이 있음. 따라서 현재까지는 해당기술에 대한 현장 적용에는 어려움이 있음



(a) Microwire



(b) 자기임피던스 효과를 이용한 응력 측정 기법

<자기임피던스 효과를 이용한 자기진단 콘크리트 기법>

○ 기술개발 성숙도

- 본 기관에서 내부적으로 기수행한 연구를 통하여, 타 분야에서 사용되는 분광법 및 압분광법의 원리 및 기술 개념을 이해하고, 기본적인 재료적 시험들을 통하여 제안 연구분야로의 적용성에 대한 가능성을 확인하였으며, 이는 기술숙성도 (TRL) 2단계에 해당함
- 본 연구를 통하여, 최종적으로는 실험실 환경에서 시편에 대한 재료 시험 및 하중재하 시험을 시행하고, 그 신뢰성을 평가 하는 단계까지 진행될 예정이며, 이는 기술숙성도 (TRL) 4단계에 해당함
- 1차년도 종료 시점에는 압분광법이라는 개념을 콘크리트 응력 측정에 적용하기 위하여, 콘크리트의 하위 단계인 시멘트에 대한 재료 시험이 종료될 예정이며, 주로 수화 반응 후에 생성되는 물질의 산란 특성 유무, 압분광 효과 유무에 대한 시험이 진행될 예정임 (TRL 3)
- 과제 종료 시점인 2차년도에는 다양한 배합비의 콘크리트에 대한 압축하중시험을 통하여, 콘크리트의 압분광 현상을 규명하고, 이를 기반으로 스마트 콘크리트가 개발될 예정임 (TRL 4)

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	☐	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☒	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	☒	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 데모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

연구개발 대상의 국내외 현황 요약

- 콘크리트 비파괴 검사 기법, 자기진단 콘크리트에 대한 연구는 매년 증가하는 추세임
- 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술에 대한 선행연구 사례는 보고된 바가 없음
- 압전저항 효과, 자기임피던스 효과를 기반으로 한 자기진단 콘크리트 기법이 개발되고 있으나, 전원 공급이 필요하거나 전기장 발생을 요구하기 때문에, 아직 현장 적용이 어려움
- 본 기관에서 기수행한 연구로 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술의 가능성을 확인하였으며 (TRL 2 단계), 본 과제를 통하여 TRL 3, 4 단계에 해당하는 연구가 진행될 예정임

2.2. 선행 연구 내용 및 결과

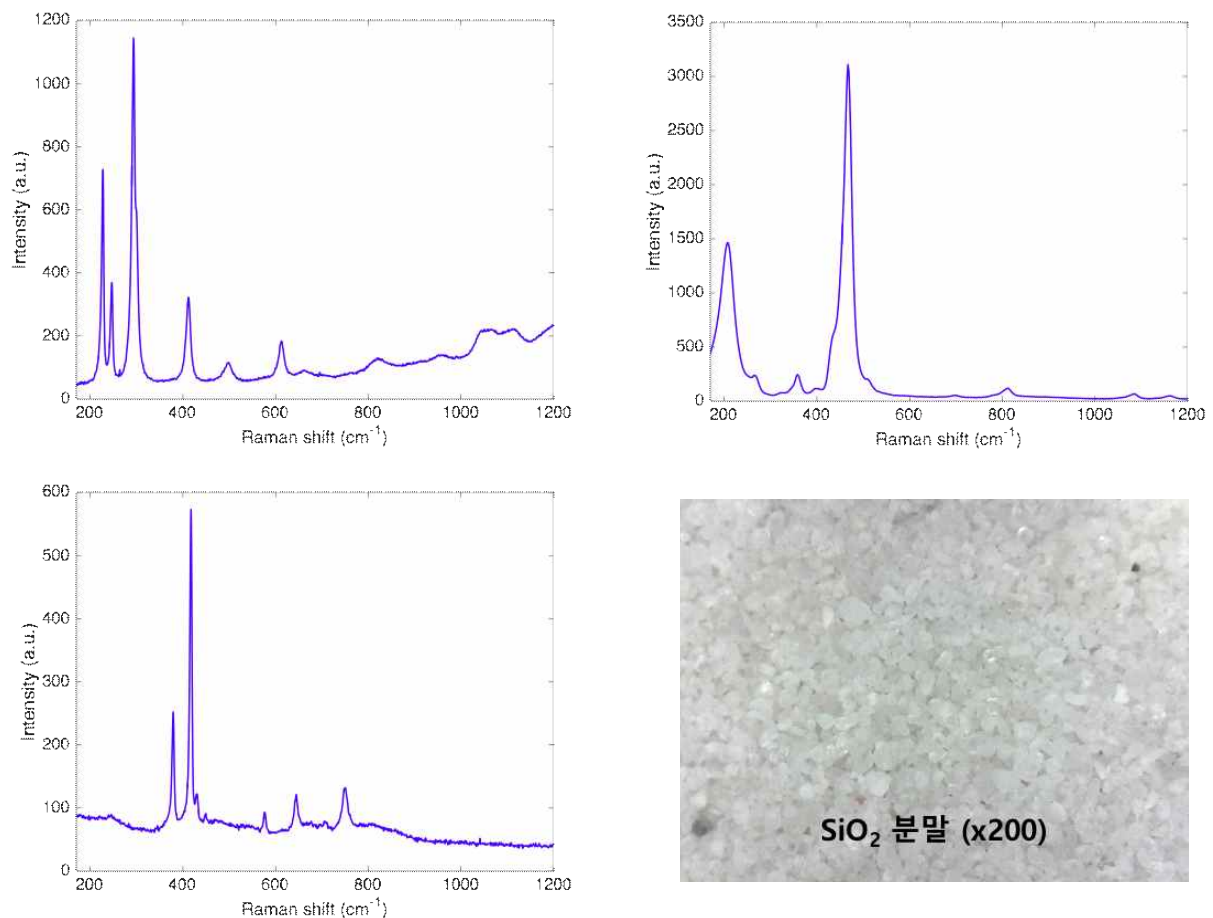
(유사 연구 없음. 제안 기관에서 수행한 기초실험 결과 요약)

○ 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술

- 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술은 세계적으로 보고된 바가 없으나, 본 연구 제안기관에서 수행한 문헌연구 및 화학적/물리적 실험 등을 통하여, 압분광법 기반 콘크리트 응력 측정기술에 대한 높은 가능성을 확인함

○ 시멘트 수화반응 이전 산란 특성 검증

- 본 기관에서 기수행한 재료 분석 시험을 통하여, 수화반응 이전의 시멘트 및 결합재의 주요 성분들이 강한 산란 특성을 갖고 있는 것을 확인함
- 따라서, 수화반응 이후의 시멘트 및 결합재의 산란 특성을 확인하고, 각각의 성분들에 대한 압분광효과를 검증하는 추가 연구를 통하여, 응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발할 수 있을 것으로 기대함



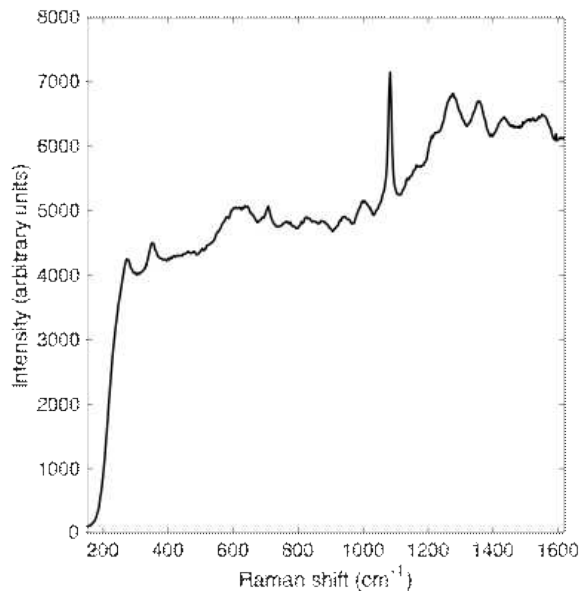
<수화반응 이전의 시멘트 및 결합재 분말 및 라만 스펙트럼>

○ 일반 콘크리트 수화반응 이후의 산란 특성 및 압분광 효과 검증

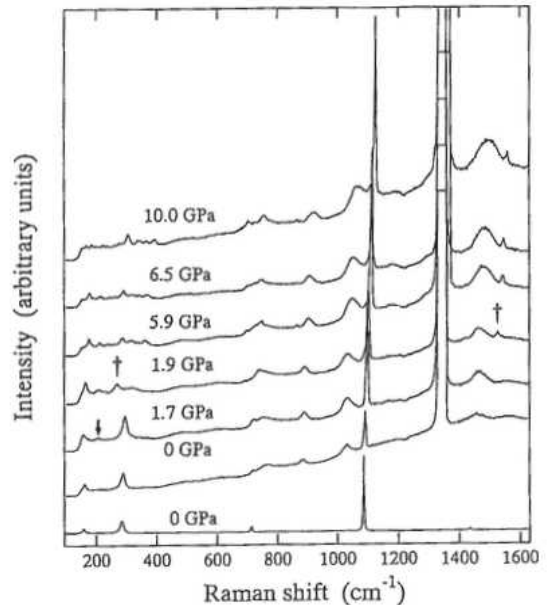
- 본 기관에서 기수행한 일반 콘크리트 공시체에 대한 레이저 조사시험으로부터 콘크리트 표면에 강한 산란 특성을 갖는 물질의 존재를 확인하였으며, 해당 결과로부터 표면에 탄산칼슘이 다량 존재함을 확인하였음. 콘크리트 표면에 탄산칼슘이 존재한다는 것은 이미 알려진 사실이며, 콘크리트 표면에 전반적으로 분포되어 있음을 재료 실험을 통하여 확인함
- 또한, 문헌연구를 통하여, 탄산칼슘이 압분광효과를 갖고 있음을 확인함. 따라서, 배합 비가 다른 다양한 콘크리트 시편을 제작하고, 압축하중 또는 인장하중 응력시험을 수행

하며, 해당 압분광효과를 검증하는 과정을 통하여, 응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발할 수 있을 것으로 기대함

- 최근 활발히 연구되는 자기치유 콘크리트 개발의 핵심목표는 탄산칼슘의 석출임. 따라서, 자기치유 콘크리트 개발연구와 함께, 자기진단 콘크리트 개발을 동시에 진행할 수 있을 것으로 기대함



(a) 콘크리트 공시체 표면에서 측정된 라만 스펙트럼

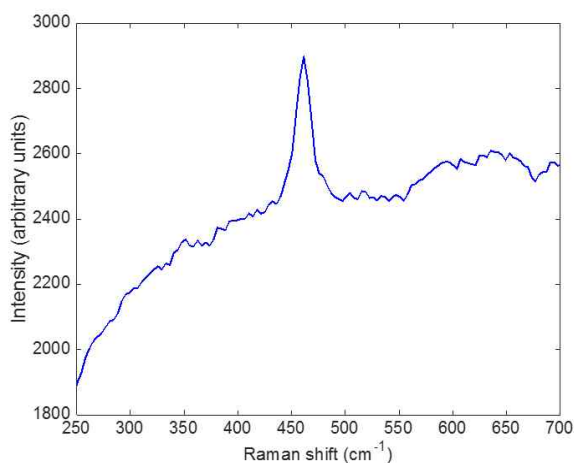


(b) 탄산칼슘의 압분광 효과

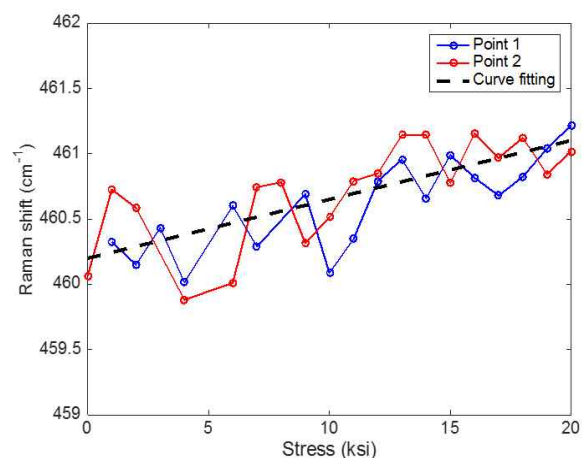
<일반 콘크리트 공시체의 라만 스펙트럼 및 압분광 효과>

○ 특수 콘크리트 수화반응 이후의 산란 특성 및 압분광 효과 검증

- 특수 콘크리트 중에 하나인 초고성능 콘크리트 (UHPC: Ultra High Performance Concrete)에 대한 재료 분석시험 및 압축하중재하시험을 수행하여, 고분광 물질의 존재를 확인함과 동시에, 압분광 효과를 규명함
- 초고성능 콘크리트의 배합 및 타설시 다량의 이산화규소가 포함되며, 이는 압분광 효과를 갖고 있음. 본 기관에서 수행한 재료시험을 통하여, 수화 반응 이후에도 이산화규소가 관찰되는 것을 확인함
- 또한, 5cm x 5cm 규격의 초고성능 콘크리트 시편에 대한 압축하중시험을 수행하여, 압분광 효과를 규명함. 즉, 특수 콘크리트 표면을 이용한 응력측정 방법에 대한 가능성을 검증함

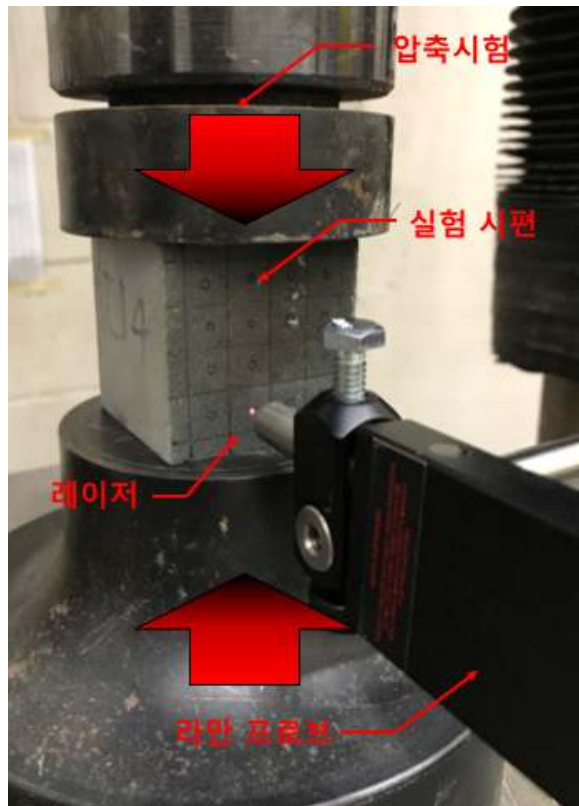


(a) 라만 스펙트럼



(b) 압분광 효과 검증 결과

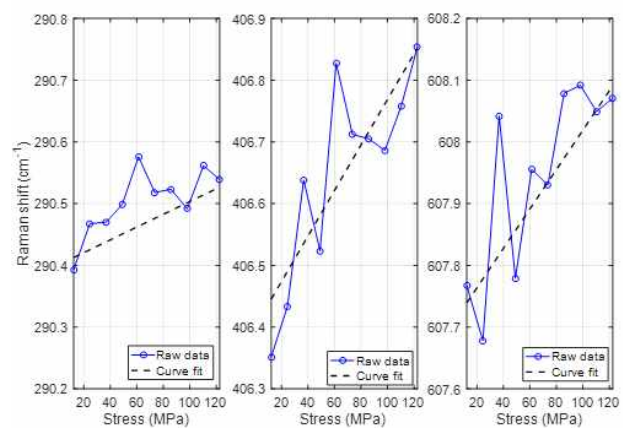
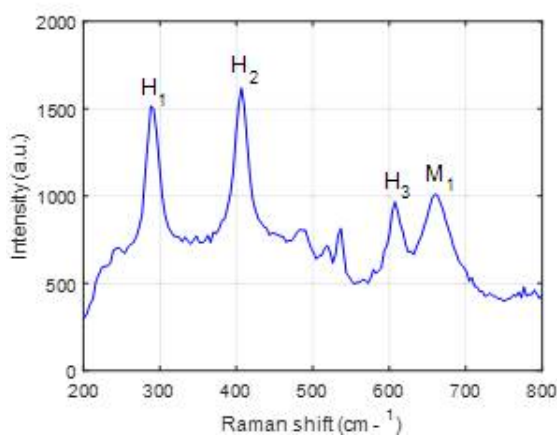
<특수 콘크리트 공시체의 라만 스펙트럼 및 압축하중시험을 통해 검증된 압분광 효과>



<특수 콘크리트 공시체의 압축하중시험>

○ 시멘트 구성물질에 대한 압분광 효과 검증

- 시멘트 구성물질 중 하나인 삼산화철(III)에 대한 압분광 효과 및 응력 센서로 사용하는 것을 검증하기 위하여, 본 기관에서 보유한 장비 및 기술을 기반으로 삼산화철(III)이 포함된 강재 시편에 대한 재료시험 및 압축응력시험을 수행하고, 그 효과를 검증하였음
- 강재 표면에 일부 포함된 삼산화철(III)을 이용한 압분광효과 시험을 효과적으로 수행함. 따라서, 이와 유사한 시험과정을 통하여, 콘크리트에 분산되어있는 고분광 물질의 압분광효과를 검증하고, 스마트 콘크리트를 개발할 수 있을 것으로 판단됨



<강재에 포함된 삼산화철(III)에 대한 압분광효과 규명 시험>

선행 연구결과 요약

- 압분광 효과를 이용한 콘크리트 응력 측정기술은 세계적으로 보고된 바 없음
- 수화반응 이전의 시멘트 및 첨가제는 고분광 물질임을 확인함
- 수화반응 이후의 일반 콘크리트 및 특수 콘크리트의 압분광 효과를 검증함
- 시멘트 첨가제(삼산화철)에 대한 압분광 효과를 검증함

제3장. 연구수행내용 및 성과

3.1. 연구개발 추진 일정

본 연구에서는 (1) 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 스마트 콘크리트용 최적 시멘트를 선정하고, (2) 시멘트 및 결합재의 압분광 효과를 규명하며, 이를 바탕으로 (3) 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발하는데 그 목적이 있다. 이와 같은 연구목표를 달성하기 위한 연구개발 추진 일정 및 핵심 연구 접근 방법은 아래와 같음

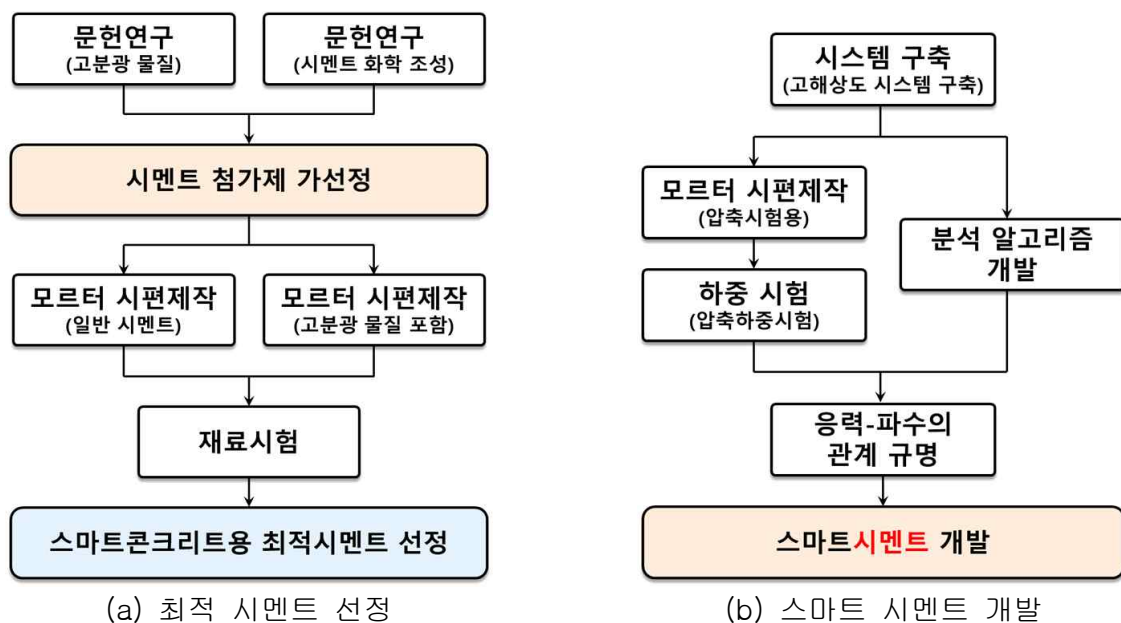
3.1.1. 스마트 시멘트 개발

○ 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 스마트 콘크리트용 최적시멘트 선정

- 비접촉 절대응력 측정용 콘크리트에 첨가될 최적 시멘트 조성 및 미분말을 선정하기 위하여, 분광학적으로 다른 물질과 명확히 구별되는 고분광 물질에 대한 기술 조사를 수행
- 분광검출율을 최대화 할 수 있는 시멘트를 결정하기 위하여, 광물조성이 다른 시멘트에 대한 재료 시험을 수행하여 화학 조성을 규명하고, 이를 이용한 모르터 시편을 제작하여 분광검출율을 측정함

○ 응력측정이 가능한 스마트 시멘트 개발

- 압분광 효과 규명을 위한 시스템 구성
- 고분광 물질이 포함된 압분광 효과 규명을 위한 시멘트 모르터 시편 제작
- 고분광 물질이 포함된 시멘트 모르터 시편에 대해, 최대 항복강도까지의 응력시험을 수행하여, 응력과 파수와의 관계를 규명하고 (압분광 효과 규명), 압분광 계수를 도출함



<스마트 시멘트 개발 계획 흐름도>

3.1.2. 스마트 콘크리트 개발

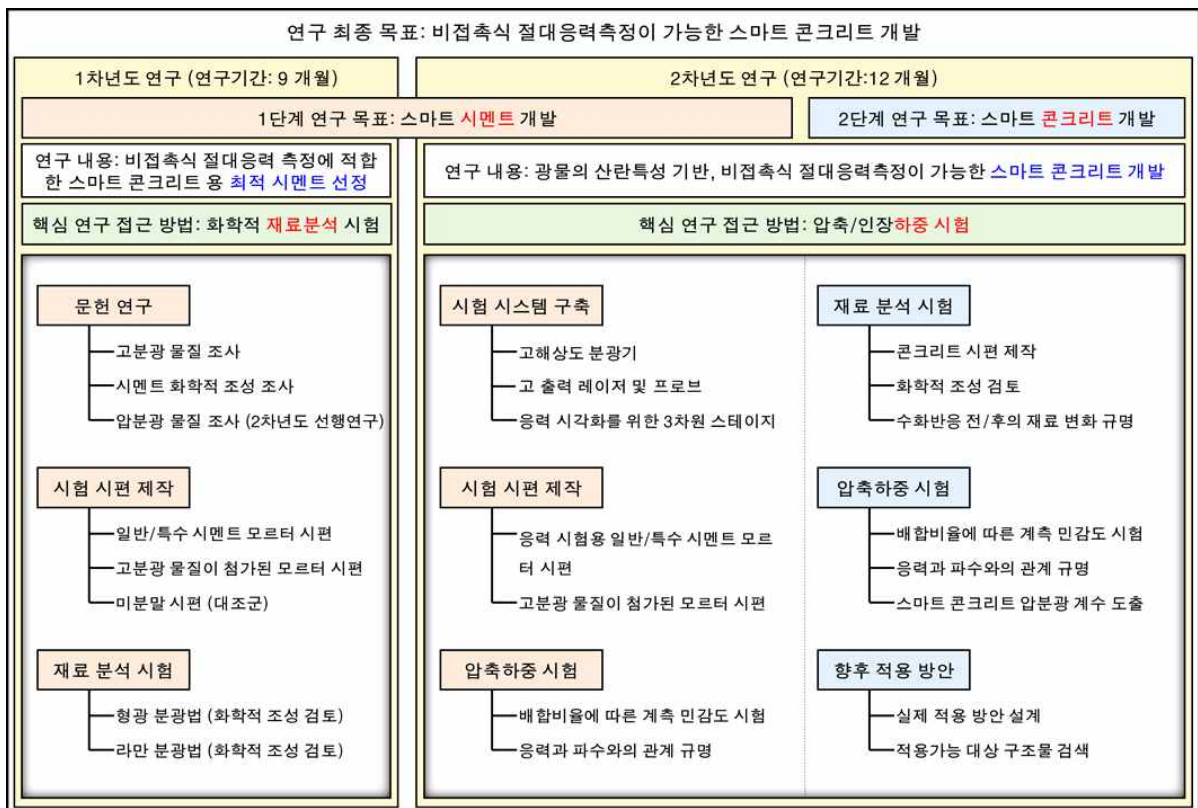
- 광물의 산란특성 기반 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발
 - 압분광 효과가 포함된 시멘트 및 결합재를 현장에서 사용되는 배합비를 이용하여 콘크리트 시편을 제작하고, 비접촉식 응력 측정을 수행하여, 응력과 파수의 관계를 규명함.
 - 이와 함께, 본 기술에 대한 향후 적용방안을 연구함



<스마트 콘크리트 개발 계획 흐름도>

3.1.3. 연차별 연구 접근방법

연구 최종 목표 및 연차별 연구 연관도는 아래와 같다.



<비접촉 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발을 위한 연구 접근 방법 및 연차별 연구 내용>

3.2. 비접촉식 응력센싱용 시멘트 첨가제 가선택

3.2.1. 시멘트에 포함된 고분광·압분광 물질 문헌연구

본 장에서는 레이저를 기반으로한 압분광법(Piez spectroscopy)을 이용하여, 비접촉식으로 콘크리트의 응력을 측정하기 위해 필요한 시멘트 첨가제 관련 문헌연구를 수행한다. 포틀랜드 시멘트에 일반적으로 포함된 물질 중, 고분광·압분광 현상을 갖는 물질에 대한 문헌연구를 수행하였다.

구조물에 인가된 응력을 압분광법(Piez spectroscopy)을 이용하여 측정하기 위해서는 대상 구조물에 고분광 물질이 포함되어있어야 하며, 그 물질이 1) 라만 (또는 형광) 스펙트럼을 가지며, 선명도(intensity)가 높고, 쉽게 구별할 수 있는 단일(또는 여러 개의) 첨두값을 가져야 한다. 또한, 2) 그 소재의 압분광 효과(Piez spectroscopic effect)가 규명되어있어야 한다. 압분광 효과가 기구명되지 않은 소재는 다이아몬드 앤빌 셀(Diamond anvil cell)등을 이용하여 그 압분광 효과를 규명할 수 있으나, 본 연구의 과업에는 포함하지 않는다.

일반적인 포틀랜드 시멘트의 화학적 구성은 아래 표와 같이 CaO, SiO₂가 대부분(약 80% 이상)을 차지하며, Al₂O₃, Fe₂O₃가 10% 미만 포함되어있다. 그 외, 아주 적은양의 MgO, SO₃, Na₂O+K₂O가 포틀랜드 시멘트 조성에 포함된다. 시멘트의 구조적 성질을 유지하면서, 동시에 응력을 측정할 수 있는 센서로 사용하기 위해서는, 일반적으로 사용되는 건설재료 이거나, 혹은 이와 유사한 성질을 가진 물질을 첨가제로 선정하는 것이 안전하다. 따라서, 본 연구에서는 압분광 효과가 규명된 물질 중에서, 콘크리트 구조용 재료로 사용 가능성이 높은 소재 5가지(산화알루미늄, 산화철, 이산화규소, 산화크롬, 그래핀(혹은 흑연)) 물질에 대하여 조사하고, 최종적으로 2종을 비접촉식 응력센싱용 시멘트 첨가제로 가선택하였다.

<수화 반응 전 포틀랜드 시멘트의 화학 조성>

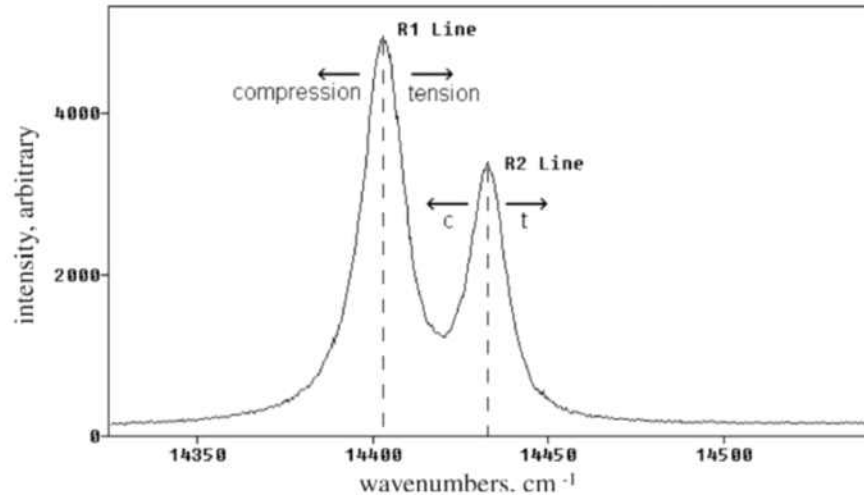
산화물 성분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	(Na ₂ O+K ₂ O)
조성범위(%)	60~67	17~25	3~8	0.5~6	0.1~4	1~3	0.5~1.3

3.2.2. 산화알루미늄 (Al₂O₃, Aluminum oxide, Alumina)

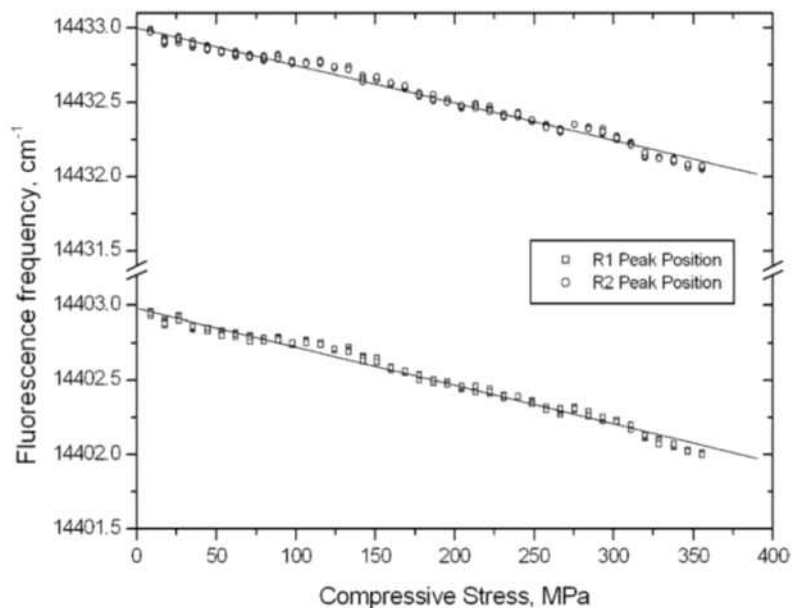
산화알루미늄은 포틀랜드 시멘트에 약 3~8% 포함된 물질로써, 전기 절연이 우수하고, 기계강도 및 압축강도가 높다. 또한 높은 내부식성 및 내마모성 특징으로 코팅재료로 널리 사용된다. 알루미늄이 많이 함유된 알루미늄시멘트의 경우, 유럽에서 속경성 시멘트로서 개발되어 건축물에 많이 사용되었고 세계1, 2차 대전 때에는 진지구축 등 긴급공사용도로 널리 사용되었다. 또한, 고온에서도 경화체가 파괴되지 않는 특성을 이용하여 내화재료인 캐스타블 용도로 사용되며 긴급공사나 몰탈의 조강성을 위한 혼합용도로 사용된다.

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 첨두값을 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). 아래 그림은 압축응력 상태에서 R1 line, R2 line이 이동하는 것을 보인다. 즉, 산화알루미늄이 압축응력을 받을 경우, 두 첨두값은 응력을 받지 않는 상태의 형광 스펙트

럼의 좌측으로 이동(Shift)하고, 반대(인장)의 경우에는 우측으로 이동하는 특성을 갖으며, 그 이동량은 인가된 응력과 선형적인 관계를 갖는다.



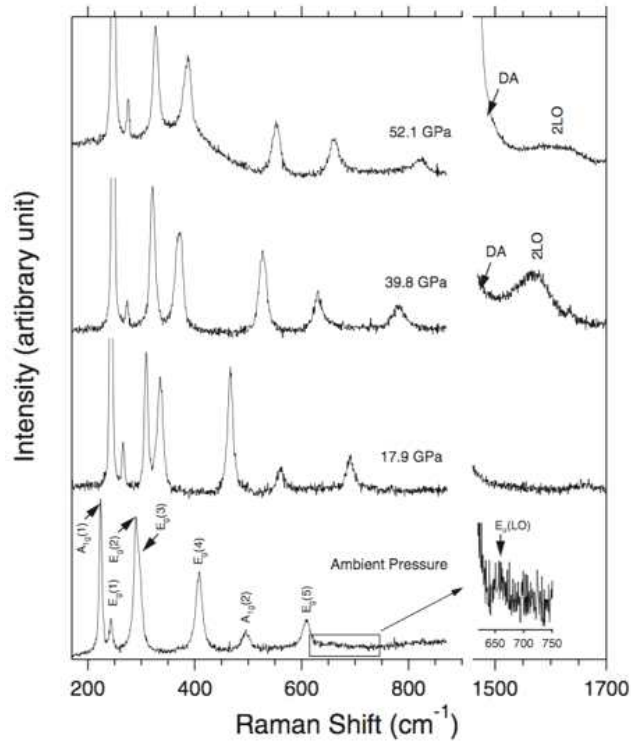
<응력이 없는 상태의 산화알루미늄 형광 스펙트럼>



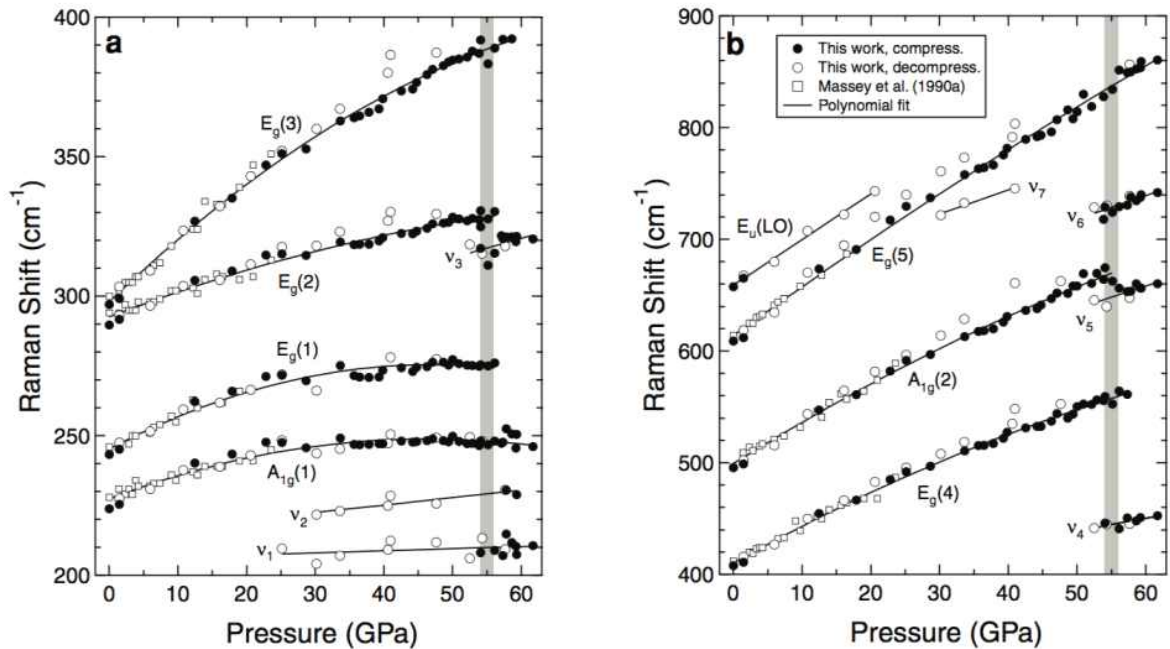
<응력상태(0 MPa-400 MPa)에서의 산화알루미늄 R1, R2 band 의 파수 이동>

3.2.3. 삼산화철 (Fe₂O₃, Iron(III) oxide, Hematite)

삼산화철은 가장 안정한 산화철이며, 포틀랜드 시멘트에 약 0.5~6% 포함된 물질이다. 전자기적 특성과 낮은 가격, 낮은 독성 및 열적/화학적 안정으로 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 Fe₂O₃ to 62 GPa", American Mineralogist, 2001). 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>

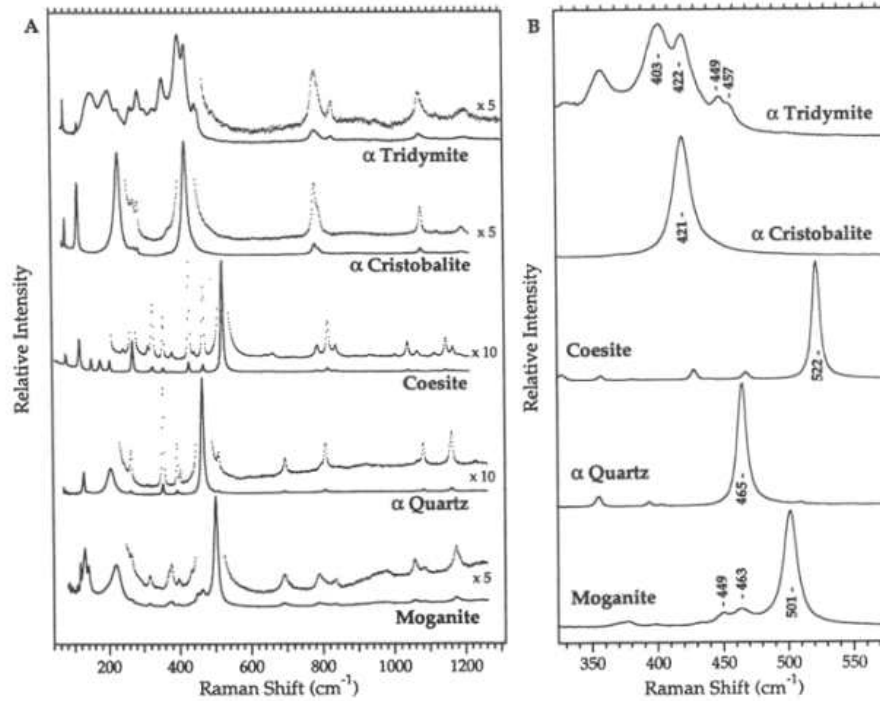


<응력상태(0 GPa-62 GPa)에서의 Fe₂O₃ 주요 라만 밴드의 파수 이동>

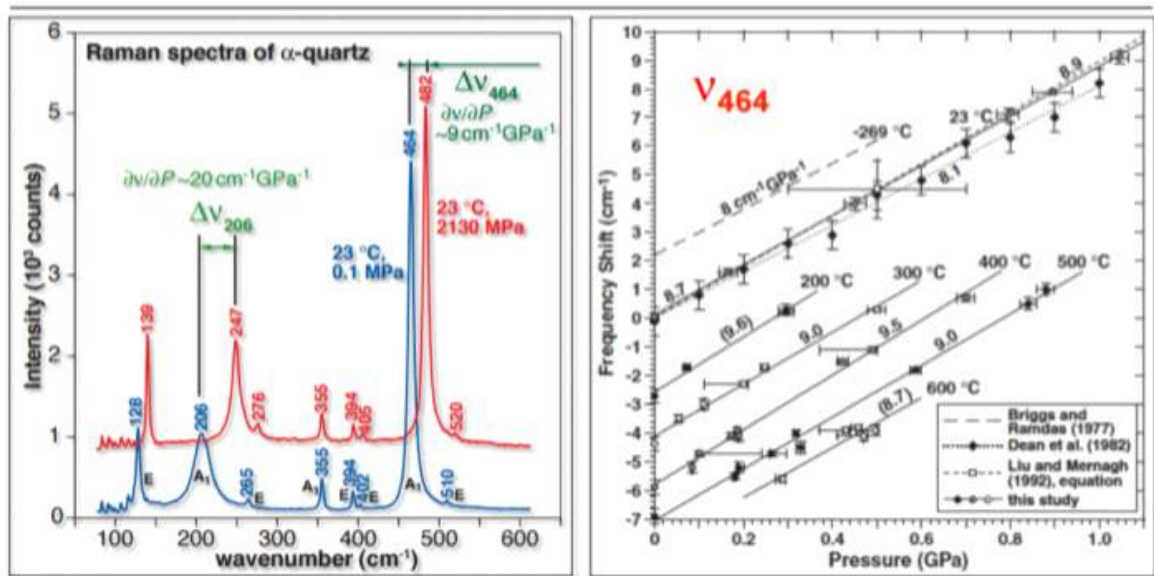
3.2.4. 이산화규소 (SiO₂, Silicon dioxide, Silica)

이산화규소는 실리카라고도 알려진 규소의 산화물로, 포틀랜드 시멘트에 약 17~25% 포함된 물질이다. 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, 2012). 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>



V_{206} : <2.5 GPa at RT, but high resolution
 V_{464} : to ~600 °C, to ~3 GPa (10 GPa at RT)

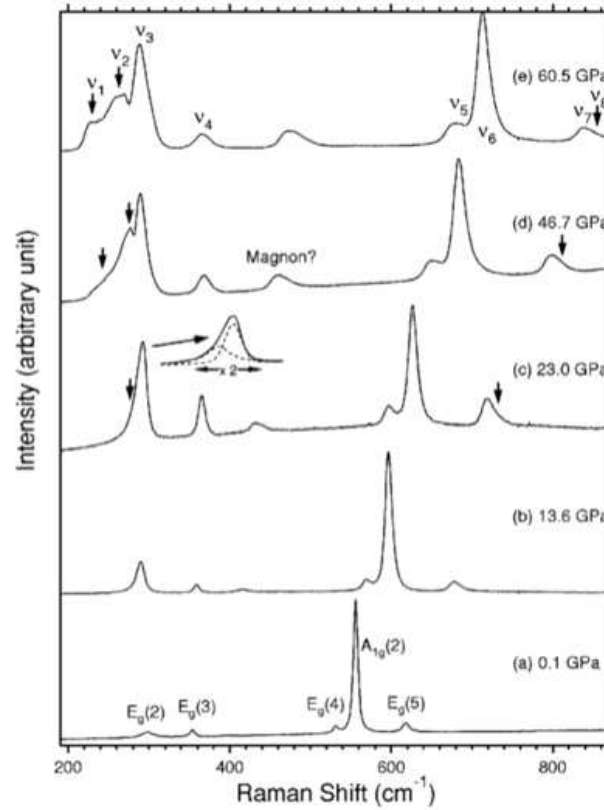
Schmidt and Ziemann (2000)

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

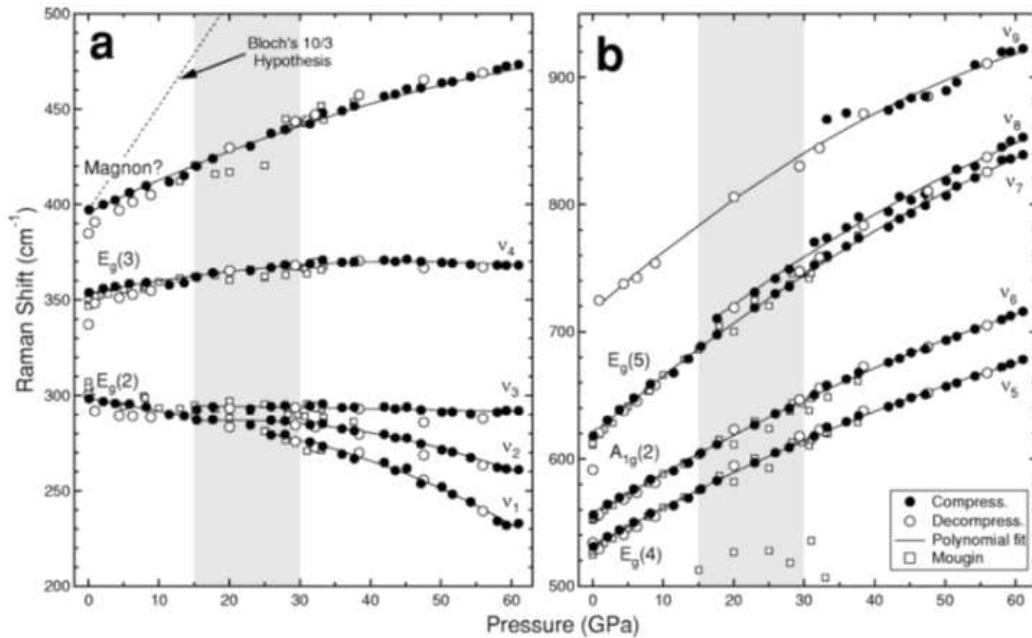
3.2.5. 산화크롬 (Cr_2O_3 , Chromium oxide, Chromia)

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). 아래 그림은 응력에 따라 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보이며, 산화크롬이 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상

태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동함을 알 수 있다.



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

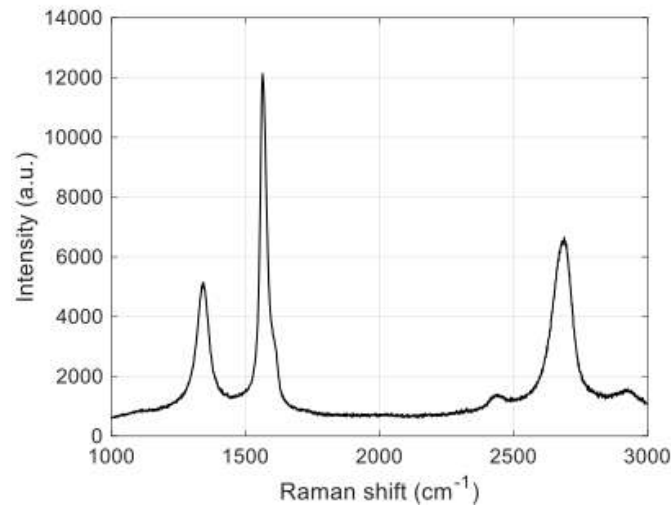


<응력상태(0.1 GPa-60.5 GPa)에서의 산화크롬 주요 라만 밴드의 파수 이동>

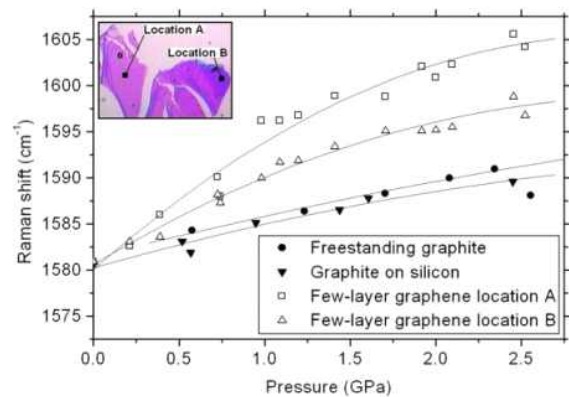
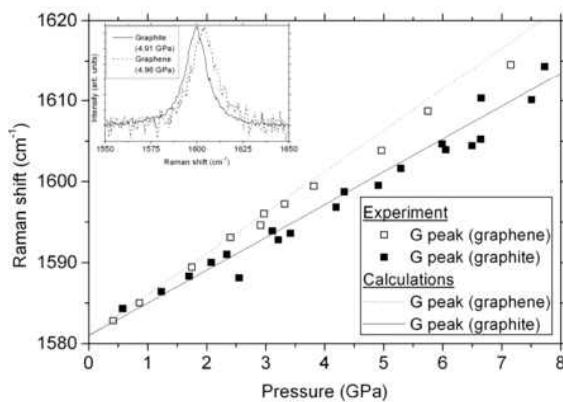
3.2.6. 그래핀 (Graphene)

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⁽¹⁾ John E. Proctor et al., “High-pressure Raman spectroscopy of graphene”, Physical Review, 2009, ⁽²⁾T. M. G. Mohiuddin et al., “Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen

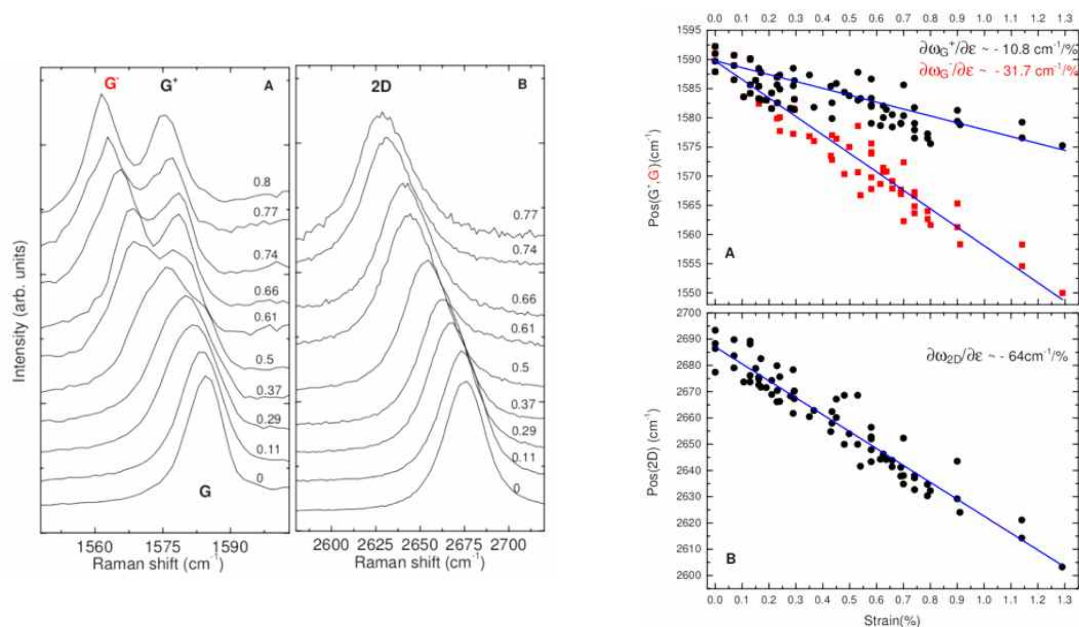
parameters, parand sample orientation”, Physical Review, 2009). 아래 그림들은 압축/인장 응력 하에서 각각의 라만 밴드가 이동하는 것을 보이며, 그래핀이 압축응력을 받을 경우, 그 라만 스펙트럼은 응력을 받지 않는 상태의 라만 스펙트럼의 우측으로 이동하고, 반대의 경우 좌측으로 이동함을 확인할 수 있다.



<응력이 없는 상태의 그래핀 라만 스펙트럼>



<압축응력 하에서 그래핀 주요 라만 밴드의 파수 이동>



<인장응력 하에서 그래핀 주요 라만 밴드의 파수 이동>

3.2.7. 소결

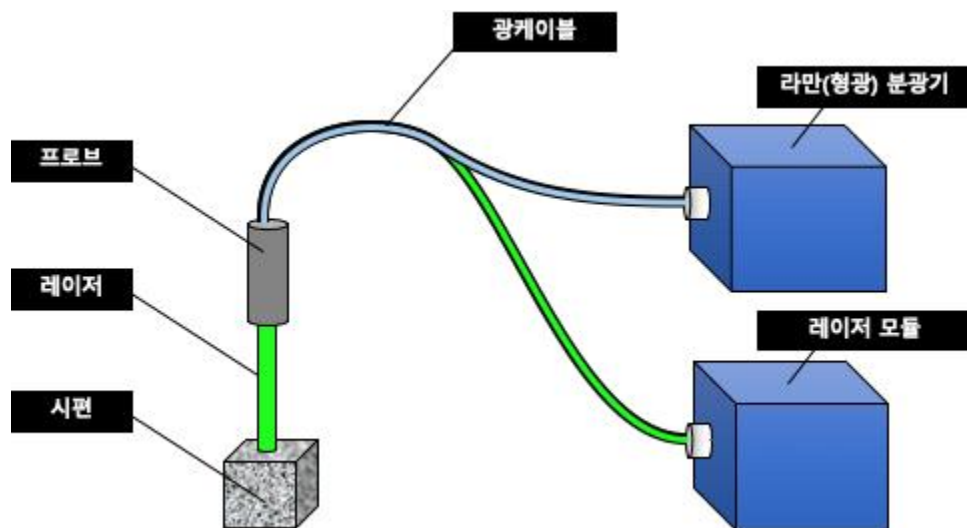
본 장에서는 시멘트에 일반적으로 포함되는 산화알루미늄, 삼산화철, 이산화규소, 산화크롬, 그래핀 등 총 다섯 종류의 물질에 대한 압분광 현상에 대하여 알아보았다. 본 연구에서는, 서두에서 언급한 것처럼, 쉽게 구별할 수 있는 단일(또는 여러 개의) 첨가량을 가지며, 그 첨가량의 선명도(intensity)가 높은 특성을 가진 산화알루미늄과 포틀랜드 시멘트의 구성물질 중에서 산화칼슘을 제외하고 가장 많은 구성비를 갖는 이산화규소를 최종적인 첨가제 후보군으로 선정하였다. 다음 장에서는 본 장에서 가선평된 첨가제를 이용한 시멘트 모르타 및 콘크리트 시편을 제작하고, 그 압분광현상을 규명하고자 한다.

3.3. 콘크리트 응력측정을 위한 압분광 시스템 (H/W, S/W) 구축

3.3.1. 분광(Spectroscopy) 시스템 구축

3.2장에서 최종적으로 선정된 두가지 물질인 이산화규소와 산화알루미늄은 모두 압분광 특성을 보이지만, 이산화규소의 경우에는 라만 분광법(Raman spectroscopy)을, 산화알루미늄의 경우에는 형광 분광법(Fluorescence spectroscopy)을 기반으로 그 특성을 보인다. 따라서, 본 연구에서는 두가지 실험을 모두 수행할 수 있도록, 라만 분광 시스템과 형광 분광 시스템을 각각 구성하였다. 단, 연구비를 절감하기 위하여, 두 시스템이 하나의 광원을 공유하도록 시스템을 구성하였다. 따라서, 레이저 장치와 프로브는 두 시스템에서 공유하도록 한다.

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

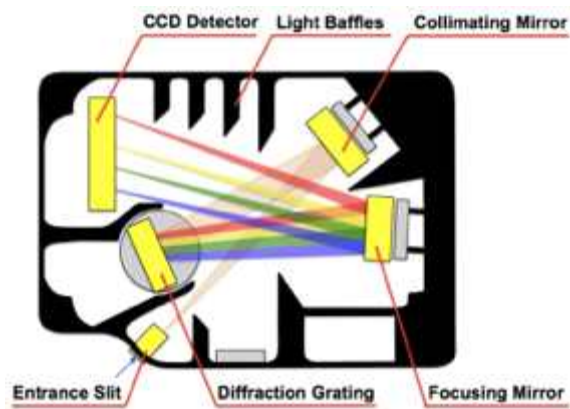


(a) 형광 분광기 전면부 (프로브 연결부)



(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 것 처럼, 조사하는 레이저와 동일한 주파수의 파장을 상쇄하기 위한 필터와 다수의 렌즈로 구성됨

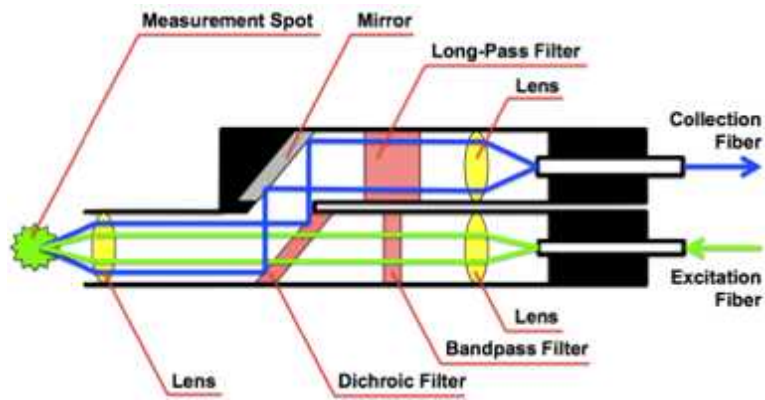


(a) 프로브, 광섬유 및 레이저 트리거



(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>

3.3.2. 맵핑(Mapping) 시스템 구축

위에서 설명한 라만/형광 분광 시스템은 기본적으로 한 점에 대한 화학적 스펙트럼 계측시스템이다. 따라서, 콘크리트 표면 여러 점에서 발생하는 응력을 측정하기 위해서는 부적합하다. 따라서, 본 연구에서는 해당 라만/형광 분석 시스템을 2차원 모터 스테이지 및 컨트롤러와 결합하여, 세밀하고 장비를 제어 하였다.



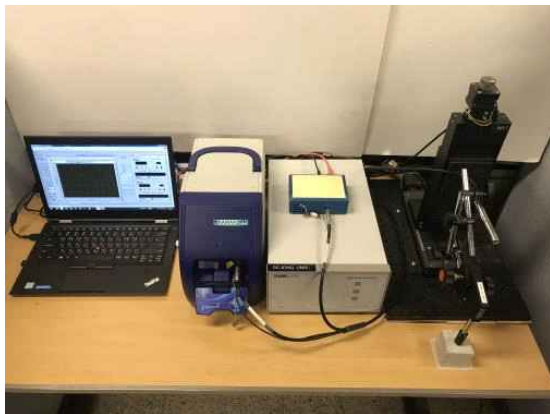
(a) 2차원 모터 스테이지



(b) 2ch 모터 스테이지 컨트롤러

<2차원 모터 스테이지 및 컨트롤러>

라만/형광 분석시스템과 2차원 모터 스테이지를 이용하여 최종적으로 구성된 라만/형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템은 아래 그림과 같다. 해당 장비를 이용하여 최소 0.1 μm , 최대 100 mm만큼 라만 프로브를 정밀하게 움직일 수 있기 때문에, 응력측정위치와 레이저 초점거리를 정밀하게 조절 가능하다. 해당 시스템 구동 프로그램도 본 연구에서 자체적으로 개발되으나, 자세한 사항은 다음 절에서 언급하도록 한다. 본 보고서에서 언급되는 모든 라만/형광 스펙트럼은 해당 시스템을 이용하여 계측된 자료이다.



(a) 라만/형광 분광법 기반 응력 측정 시스템



(b) 시스템 구동 화면

<라만/형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템>

3.3.3. 계측/분석 프로그램 개발

3.3.3.1. 계측 프로그램 개발

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 v1.1 라는 계측 프로그램을 독자적으로 개발하여 사용한다.

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

① 분광기 구동 파트

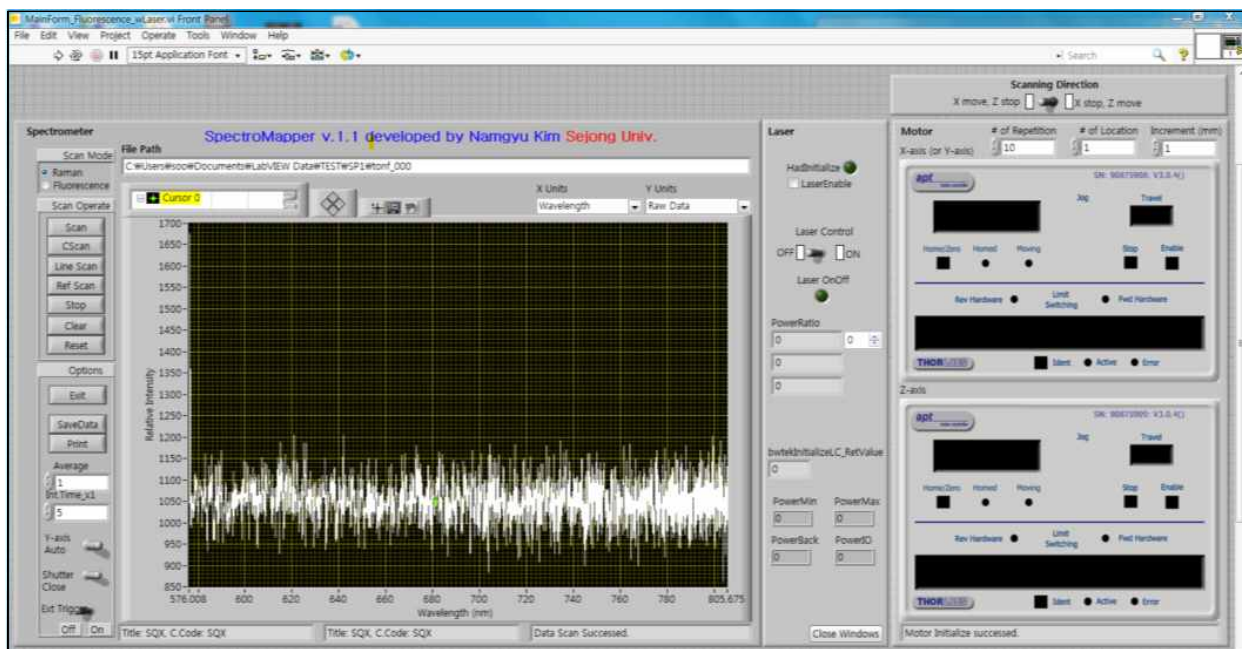
- 계측할 신호 결정가능 (라만 스펙트럼 또는 형광 스펙트럼)
- 일회계측, 다회계측, 선형 맵핑계측 기능 선택가능
- 계측 시간 조정 및 데이터 평균화 기능 탑재

② 레이저 구동 파트

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

③ 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.1.1 (라만/형광 분광법 기반 응력 계측 프로그램)>

3.3.3.2. 분석 프로그램 개발

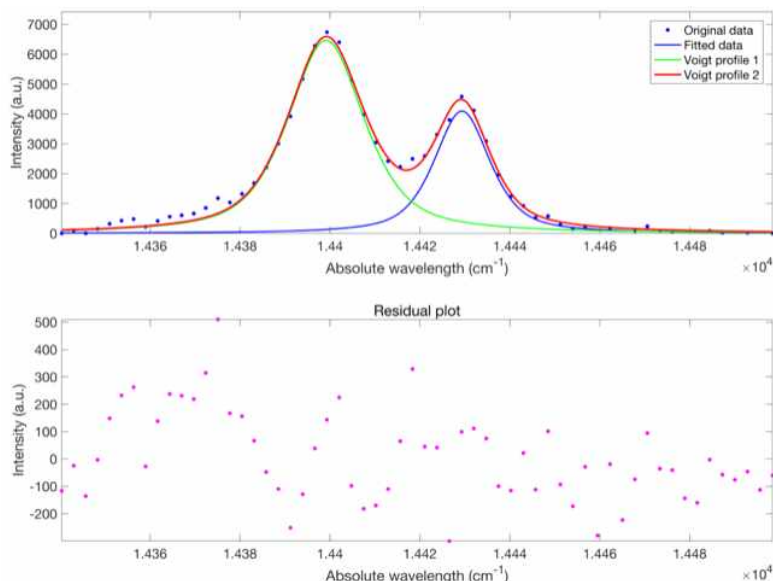
시멘트 모르타르 시편에 대한 하중 시험으로부터 수집된 다수의 라만/형광 스펙트럼들로부터 압분과 효과(하중-파수 변화)를 확인하기 위해서는, 1) ASCII code reader, 2) Background elimination, 3) Curve fitting with Voigt profile(s), 4) spectral averaging, 5) Piezo-spectroscopic (PS) coefficient calculation 의 과정이 필요하다. 본 연구에서는 많은 데이터를 효율적으로 처리하기 위하여, CPU병렬 연산기능을 이용한 데이터 처리 프로그램을 MATLAB을 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
101 102
103 104
105 106
107 108
109 110
111 112
113 114
115 116
117 118
119 120
121 122
123 124
125 126
127 128
129 130
131 132
133 134
135 136
137 138
139 140
141 142
143 144
145 146
147 148
149 150
151 152
153 154
155 156
157 158
159 160
161 162
163 164
165 166
167 168
169 170
171 172
173 174
175 176
177 178
179 180
181 182
183 184
185 186
187 188
189 190
191 192
193 194
195 196
197 198
199 200
201 202
203 204
205 206
207 208
209 210
211 212
213 214
215 216
217 218
219 220
221 222
223 224
225 226
227 228
229 230
231 232
233 234
235 236
237 238
239 240
241 242
243 244
245 246
247 248
249 250
251 252
253 254
255 256
257 258
259 260
261 262
263 264
265 266
267 268
269 270
271 272
273 274
275 276
277 278
279 280
281 282
283 284
285 286
287 288
289 290
291 292
293 294
295 296
297 298
299 300
301 302
303 304
305 306
307 308
309 310
311 312
313 314
315 316
317 318
319 320
321 322
323 324
325 326
327 328
329 330
331 332
333 334
335 336
337 338
339 340
341 342
343 344
345 346
347 348
349 350
351 352
353 354
355 356
357 358
359 360
361 362
363 364
365 366
367 368
369 370
371 372
373 374
375 376
377 378
379 380
381 382
383 384
385 386
387 388
389 390
391 392
393 394
395 396
397 398
399 400
401 402
403 404
405 406
407 408
409 410
411 412
413 414
415 416
417 418
419 420
421 422
423 424
425 426
427 428
429 430
431 432
433 434
435 436
437 438
439 440
441 442
443 444
445 446
447 448
449 450
451 452
453 454
455 456
457 458
459 460
461 462
463 464
465 466
467 468
469 470
471 472
473 474
475 476
477 478
479 480
481 482
483 484
485 486
487 488
489 490
491 492
493 494
495 496
497 498
499 500
501 502
503 504
505 506
507 508
509 510
511 512
513 514
515 516
517 518
519 520
521 522
523 524
525 526
527 528
529 530
531 532
533 534
535 536
537 538
539 540
541 542
543 544
545 546
547 548
549 550
551 552
553 554
555 556
557 558
559 560
561 562
563 564
565 566
567 568
569 570
571 572
573 574
575 576
577 578
579 580
581 582
583 584
585 586
587 588
589 590
591 592
593 594
595 596
597 598
599 600
601 602
603 604
605 606
607 608
609 610
611 612
613 614
615 616
617 618
619 620
621 622
623 624
625 626
627 628
629 630
631 632
633 634
635 636
637 638
639 640
641 642
643 644
645 646
647 648
649 650
651 652
653 654
655 656
657 658
659 660
661 662
663 664
665 666
667 668
669 670
671 672
673 674
675 676
677 678
679 680
681 682
683 684
685 686
687 688
689 690
691 692
693 694
695 696
697 698
699 700
701 702
703 704
705 706
707 708
709 710
711 712
713 714
715 716
717 718
719 720
721 722
723 724
725 726
727 728
729 730
731 732
733 734
735 736
737 738
739 740
741 742
743 744
745 746
747 748
749 750
751 752
753 754
755 756
757 758
759 760
761 762
763 764
765 766
767 768
769 770
771 772
773 774
775 776
777 778
779 780
781 782
783 784
785 786
787 788
789 790
791 792
793 794
795 796
797 798
799 800
801 802
803 804
805 806
807 808
809 810
811 812
813 814
815 816
817 818
819 820
821 822
823 824
825 826
827 828
829 830
831 832
833 834
835 836
837 838
839 840
841 842
843 844
845 846
847 848
849 850
851 852
853 854
855 856
857 858
859 860
861 862
863 864
865 866
867 868
869 870
871 872
873 874
875 876
877 878
879 880
881 882
883 884
885 886
887 888
889 890
891 892
893 894
895 896
897 898
899 899
900 900
901 901
902 902
903 903
904 904
905 905
906 906
907 907
908 908
909 909
910 910
911 911
912 912
913 913
914 914
915 915
916 916
917 917
918 918
919 919
920 920
921 921
922 922
923 923
924 924
925 925
926 926
927 927
928 928
929 929
930 930
931 931
932 932
933 933
934 934
935 935
936 936
937 937
938 938
939 939
940 940
941 941
942 942
943 943
944 944
945 945
946 946
947 947
948 948
949 949
950 950
951 951
952 952
953 953
954 954
955 955
956 956
957 957
958 958
959 959
960 960
961 961
962 962
963 963
964 964
965 965
966 966
967 967
968 968
969 969
970 970
971 971
972 972
973 973
974 974
975 975
976 976
977 977
978 978
979 979
980 980
981 981
982 982
983 983
984 984
985 985
986 986
987 987
988 988
989 989
990 990
991 991
992 992
993 993
994 994
995 995
996 996
997 997
998 998
999 999
1000 1000

```

<MATLAB기반 라만/형광 데이터 처리 프로그램>



<Voigt profile를 이용한 curve fitting>

3.4. 비접촉식 스마트 시멘트 제작 및 재료시험

3.2장에서 선택된 두가지 물질(산화알루미늄, 이산화규소)에 대하여, 시멘트 모르타 시편을 제작하고, 라만/형광 분광법을 이용한 재료시험을 수행하였다. 이와 함께, 시멘트 모르타 시편을 만들기 위해 사용된 포틀랜드 시멘트, 산화알루미늄 파우더, 규사 등에 대한 재료 시험도 같이 수행하였다.

3.4.1. 시멘트 및 첨가제 재료시험(분광법기반)

3.4.1.1. 일반 포틀랜드 시멘트

일반 포틀랜드 시멘트는 산화알루미늄과 이산화규소를 상당수 포함한다. 따라서, 본 연구를 통해 구축된 포터블 라만/형광 분광 시스템으로 해당 첨두값을 확인할 수 있다면, 추가적인 산화알루미늄, 이산화규소 분말을 넣지 않고도 압분광 효과 검증이 가능하다. 이를 확인하기 위하여, 시편 제작에 사용될 포틀랜드 시멘트를 대상으로 라만/형광 분광실험을 수행하고, 그 스펙트럼을 분석하였다.

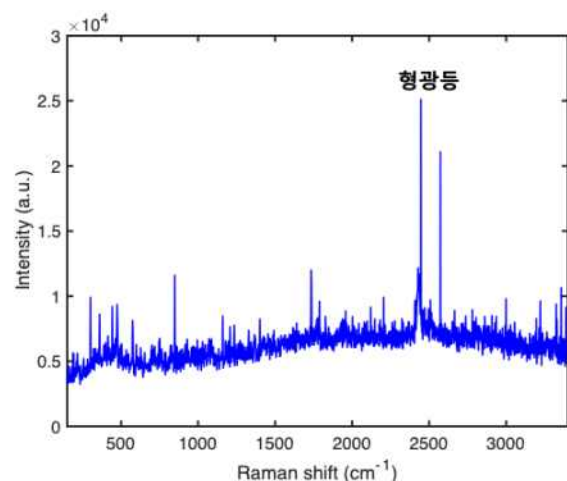
<수화 반응 전 포틀랜드 시멘트의 화학 조성>

산화물 성분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	(Na ₂ O+K ₂ O)
조성범위(%)	60~67	17~25	3~8	0.5~6	0.1~4	1~3	0.5~1.3

아래 그림은 재료 시험에 사용된 일반 포틀랜드 시멘트(좌)와 해당 시멘트로부터 측정된 대표적인 라만 스펙트럼(우)을 보인다. 해당 라만스펙트럼은 한 곳에서 300초(5분) 동안 계측된 스펙트럼 10개를 평균화(총 50분 계측)한 스펙트럼이다. 긴 계측 시간에도 불구하고, 해당 라만 스펙트럼에서 표적 첨두값 (이산화규소: 464 cm⁻¹)을 확인할 수 없었다. 즉, 시멘트에 포함된 이산화규소를 응력센서로 사용하기에는 시멘트에 포함된 그 절대량이 부족하다. 여기서, 2,400 cm⁻¹ 주변에 보이는 높은 첨두값은 실험실 형광등에 의한 것이다.



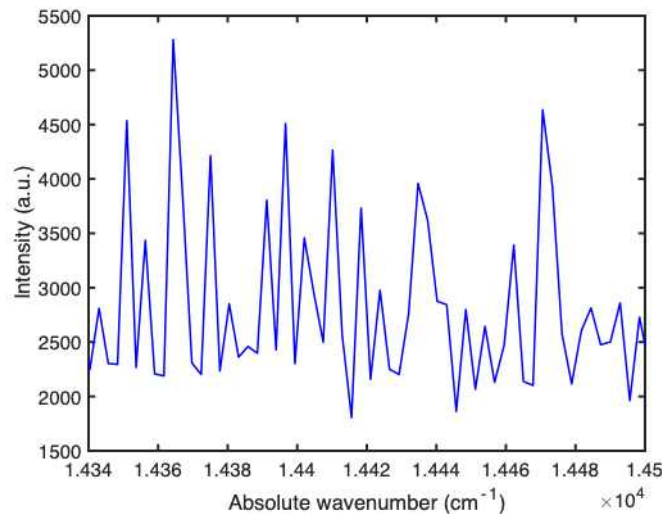
(a) 시편 제작에 사용된 포틀랜드 시멘트



(b) 포틀랜드 시멘트의 라만 스펙트럼

<일반 포틀랜드 시멘트 및 라만 스펙트럼>

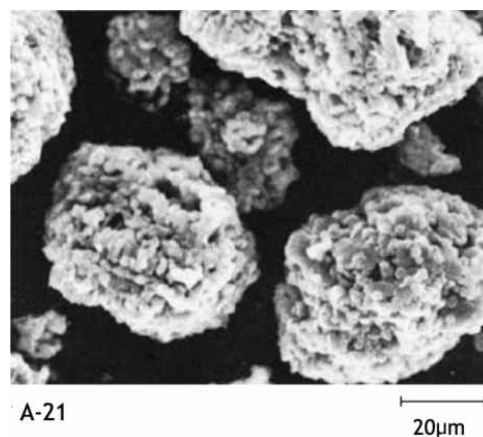
동일한 포틀랜드 시멘트에 대하여 65초 동안 형광 스펙트럼을 계측하여, 포틀랜드 시멘트 내의 산화알루미늄의 존재를 확인하였다. 아래 그림은 일반 포틀랜드 시멘트의 형광 스펙트럼을 보인다. 이 경우에도, 해당 형광 스펙트럼에서 표적 침투값 (산화알루미늄: $14,402\text{ cm}^{-1}$, $14,432\text{ cm}^{-1}$)을 확인할 수 없었다. 즉, 응력 센서로 사용하기에, 시멘트에 포함된 산화알루미늄의 절대량이 부족하다. 따라서, 본 연구에서는 산화알루미늄과 이산화규소를 시멘트에 추가적으로 첨가하여 그 분광검출율(Intensity)을 확인하고, 분광검출율이 높은 배합비를 갖는 시멘트 모르타르 시편에 대하여 압분광 효과를 규명하였다.



<일반 포틀랜드 시멘트의 형광 스펙트럼>

3.4.1.2. 산화알루미늄 분말

본 연구에서 사용된 산화알루미늄은 SUMITOMO CHEMICAL 에서 생산된 제품이며, 아래 SEM 이미지와 같이 입자 크기는 약 2~4 μm 이며, 약 99.7%의 α -산화알루미늄으로 구성되어있다. 자세한 구성성분비는 아래 표와 같다. 산화알루미늄은 라만 스펙트럼과 형광 스펙트럼을 모두 갖고 있으나, 형광 스펙트럼의 침투값이 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

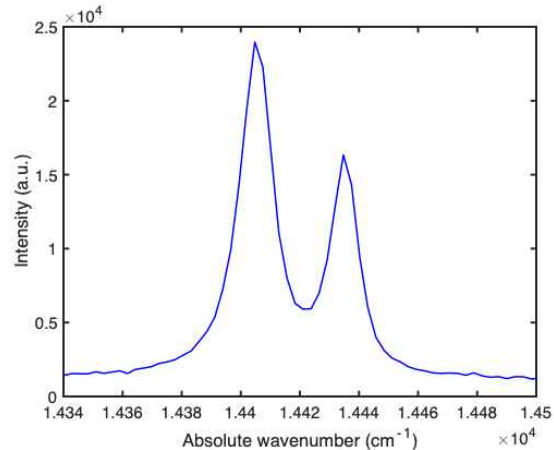
*L.O.I: Loss of ignition

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 첨두값을 갖는다.

본 연구에서는 시멘트의 일부를 산화알루미늄 분말로 치환하는 시편을 제작하도록 한다.



(a) 시편 제작에 사용된 산화알루미늄 분말



(b) 산화알루미늄 형광 스펙트럼

<산화알루미늄(Al_2O_3 , Alumina) 분말 및 형광 스펙트럼>

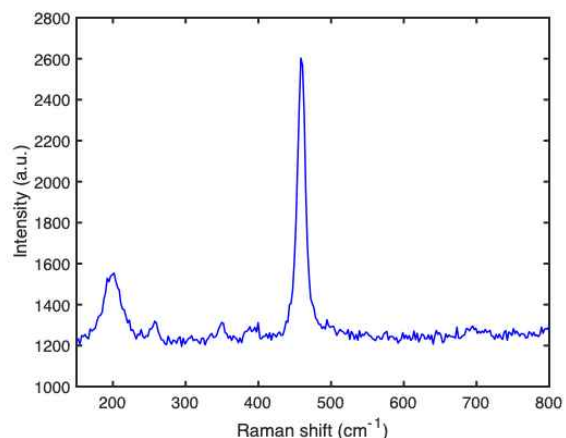
3.4.1.3. 규사 (이산화규소)

본 연구에서 사용된 이산화규소는 (주)하마산업에서 생산된 제품이며, 입자 크기는 6호 ($0.35\sim 0.7\text{ mm}$)이고, 약 97%의 α -quartz 산화알루미늄으로 구성되어있다. 이산화규소는 산화알루미늄과 다르게 규사의 형태로 일반 구조물 건설에 널리 사용되는 재료이다. 따라서, 본 연구에서는 이산화규소 분말 형태가 아닌 규사(이산화규소 모래)의 형태로 시멘트 모르터에 첨가하여, 일반 모래를 규사로 치환한 시편을 제작하도록 한다.

아래 그림은 실험에 사용된 규사의 일부와, 해당 시편으로부터 3초 동안 수집된 라만 스펙트럼을 보인다. 그림(b)에서 보이는 것처럼, 202 cm^{-1} , 258 cm^{-1} , 350 cm^{-1} , 400 cm^{-1} , 459 cm^{-1} 에 발생한 첨두값들을 통하여 해당 규사 시편이 일반적인 이산화규소와 동일함을 확인하였다.



(a) 시편 제작에 사용된 이산화규소 분말



(b) 이산화규소 라만 스펙트럼

<이산화규소(SiO_2 , Silica) 분말 및 형광 스펙트럼>

3.4.2. 센싱물질이 포함된 시멘트 모르터 시편제작

3.4.2.1. 시편 배합비 및 첨가제 함량비

재료시험, 압분광 효과 규명시험에 사용된 시멘트 모르터 시편은, 시멘트 모르터 압축강도 시험 방법(KS L 5105)에 준하여 그 배합비와 모르터 크기 등을 결정하였다. 따라서, 그 모르터 몰트의 형태는 입방체이며, 크기는 50.8 mm × 50.8 mm이다. 모든 경우에 대하여 시멘트:모래:물의 비율은 1:2.45:0.485로 일정하게 유지하였다. 여기서 모래는 표준사가 아닌 일반 바다 모래를 사용하였다.

압분광 효과의 경우, 시편에 들어가는 산화알루미늄(혹은 이산화규소)의 함량비의 영향을 받는다. 따라서, 그 배합비 검토가 필요하지만, 현재까지 시멘트에 들어있는 산화알루미늄(혹은 이산화규소)의 함량비를 고려하여 압분광 효과를 검토한 연구는 세계적으로 전무하다. 따라서, 본 연구에서는 시멘트 첨가제(산화알루미늄 또는 이산화규소)가 구조적 역할도 하면서 센서의 역할도 할 수 있는 적절한 함량비를 찾고자 한다.

아래 표는 최종적으로 선택 및 검증된 산화알루미늄 첨가 시편(시편 2~5)과 규사 첨가 시편(시편 6~9)의 함량비를 보인다. 또한, 비교군으로 어떠한 첨가제도 들어 있지 않은 시편(시편 1)도 함께 제작되었다. 시편 1을 제외한 모든 시편에 대하여 시멘트 총량대비 1%의 폴리카본산계 고성능 감수제가 첨가 되었다.

<시멘트 모르터 시편 배합비>

시편 종류	시편 번호	시멘트 총량		모래 총량		물
		시멘트	산화알루미늄	일반모래	규사	
비교군	시편 1	1		2.45		0.485
산화알루미늄 시편	시편 2	1	0.2	2.94		0.582
	시편 3	1	0.4	3.43		0.679
	시편 4	1	0.6	3.92		0.776
	시편 5	1	0.8	4.41		0.873
규사 시편	시편 6	1		2	0.45	0.485
	시편 7	1		1.45	1	0.485
	시편 8	1		1	1.45	0.485
	시편 9	1		0	2.45	0.485

※ 여기서 모든 숫자는 시멘트 중량 1을 기준으로한 상대적 비율을 의미함

<첨가제 함량비>

시편종류	일반 시편	산화알루미늄 분말 첨가 시편				규사 첨가 시편			
시편번호	시편 1	시편 2	시편 3	시편 4	시편 5	시편 6	시편 7	시편 8	시편 9
첨가제 비율 (알루미나/시멘트) (규사/모래총량)	-	17 %	29 %	38 %	44 %	18 %	41 %	59 %	100 %
첨가제 비율 (전체중량대비 첨가제 비율)	-	4 %	7 %	10 %	11 %	11 %	25 %	37 %	62 %
첨가제 비율 (전체대비(물제외) 첨가제 비율)	-	5 %	8 %	11 %	13 %	13 %	29 %	42 %	71 %

아래는 시편 1부터 시편 9의 흐름시험을 보인다. 모든 시편에 대하여 습윤양생은 진행되지 않았다. 완성된 시편 1부터 시편 9번은 아래 그림과 같다.



<시편 1-첨가제가 없는 경우의 흐름시험>



시편 2 (5 %)



시편 3 (8 %)



시편 4 (11 %)



시편 5 (13 %)

<산화알루미늄이 배합에 포함된 경우 흐름시험>



시편 6 (13 %)



시편 7 (29 %)



시편 8 (42 %)



시편 9 (71 %)

<규사가 배합에 포함된 경우 흐름시험>



<시편 양생 과정>



<완성된 시편(대표 시편)>

3.4.2.2. 첨가제가 포함된 시편 제작시 주의사항

초기에 시편을 제작할 때, 산화알루미늄을 시멘트의 일부로 치환하거나 규사를 전체 모래의 일부로 치환하는 것이 아니라, 기존 시멘트:모래:물 (1:2.45:0.485)의 비율은 그대로 유지하고, 산화알루미늄과 규사를 추가적인 첨가제로써 배합하였다. 이때, 고성능 감수제는 사용하지 않았다. 이 경우, 첨가제가 없는 경우의 흐름시험결과는 이상이 없었으나, 산화알루미늄을 조금이라도 넣는 경우에는 아래 그림처럼 배합자체가 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 산화알루미늄 또는 규사가 들어간 시편을 배합할 경우에는 반드시 폴리카르본산계 등의 고성능 감수제를 사용해야 한다.



<첨가제가 없는 경우의 흐름시험>



(a) 고성능 감수제가 비포함된 경우



(b) 고성능 감수제가 포함된 경우

<폴리카르본산계 고성능 감수제가 포함/비포함된 시편의 배합>

3.4.3. 측정 파라미터 선정 실험

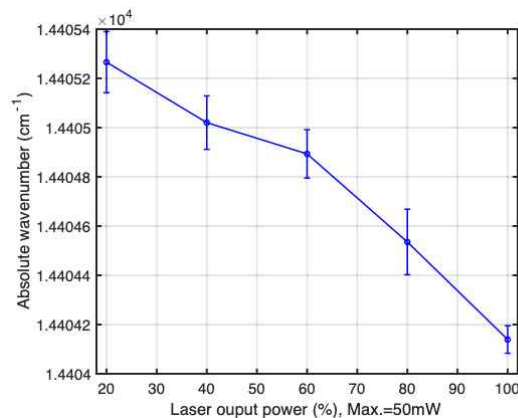
레이저를 시편에 조사하여 스펙트럼을 수집하는 경우, 레이저 출력, 레이저에 의한 표면 온도 변화 등이 결과값에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 절에서는 파라메트릭 스터디를 통하여, 재료시험 및 압분광 효과 규명에 일관적으로 사용할 파라미터를 결정하였다. 앞 장에서 소개된 라만/형광 분광법 기반 2차원 맵핑 시스템(아래 그림)과 분석 프로그램을 이용하여 각각 라만/형광 스펙트럼을 수집하고 분석하였다.



<측정 파라미터 선정 실험에 사용된 실험 셋업>

3.4.3.1. 레이저 출력 (Laser output power)

레이저의 출력은 라만/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.



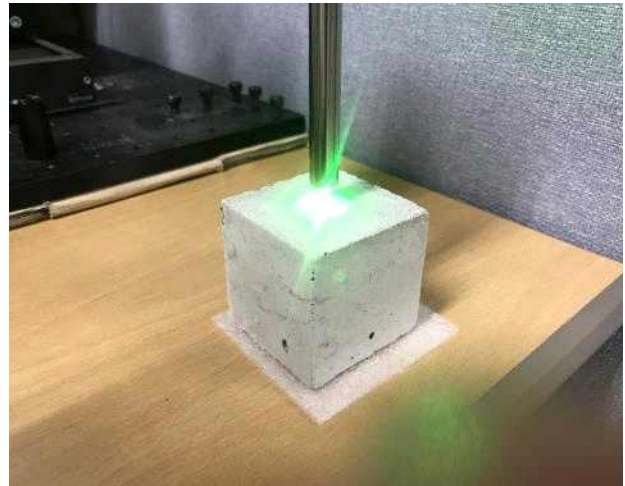
<레이저 output power에 따른 파수값 변화>

3.4.3.2. 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 시멘트 모르터 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 이로 인해 발생하는 파수 변화는 무시하도록 한다.



(a) 레이저 조사에 의한 시멘트 발열 측정



(b) 532nm 레이저가 조사되고 있는 모르터 시편

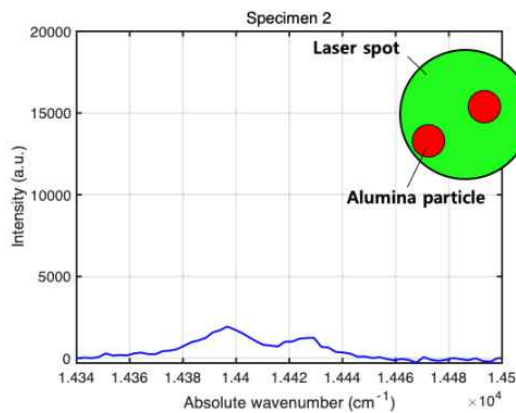
<레이저 조사에 의한 시멘트 모르터 시편의 발열 측정시험>

3.4.4. 비접촉식 스마트 시멘트 모르터 시편 재료시험

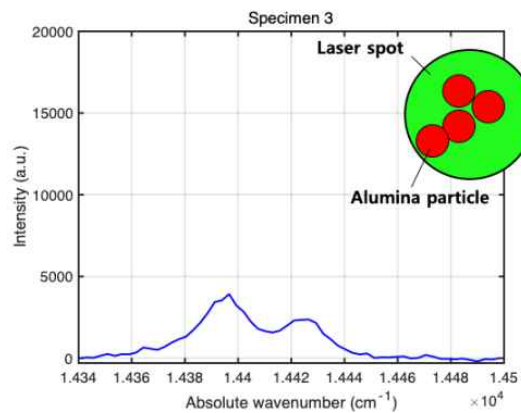
3.4.4.1. 산화알루미늄이 첨가된 시멘트 모르터

산화알루미늄이 첨가된 시멘트 모르터 시편으로부터 형광 스펙트럼을 수집하는 것을 통하여, 시편 내부의 산화알루미늄의 존재에 대하여 확인하였다. 형광 스펙트럼에서 두 첨두값 (R1, R2 lines)이 발견되는 것을 통하여, 시멘트의 수화반응 이후에도 시편에 포함된 산화알루미늄은 동일한 화학적 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 다만, 시멘트 모르터 시편에 포함된 산화알루미늄의 함량비에 따라서, 첨두값의 선명도(intensity)가 다를 수 있었다.

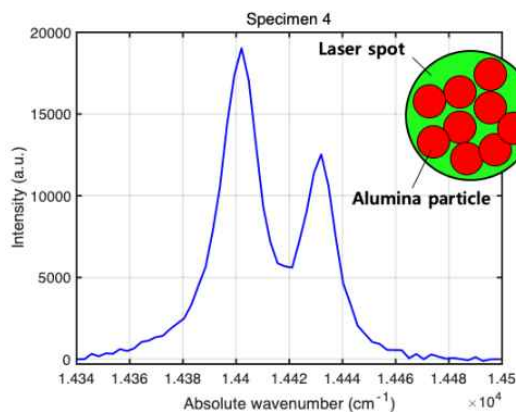
아래 그림은 산화알루미늄의 함량비에 따른 대표적인 형광 스펙트럼을 보인다. 시편 2와 3은 각각 5%, 8%의 산화알루미늄을 포함하는 시편이고, 시편 4와 5는 각각 11%, 13%의 산화알루미늄을 포함한다. 여기서 intensity의 높이는 레이저가 조사된 지역의 산화알루미늄의 양을 의미하는데, 시편 2와 3의 경우 intensity가 낮은 것을 확인할 수 있다. 각각의 모르터 시편당 약 350지점에 대한 intensity를 확인하고, 이를 평균하여 비교한 결과, 시편 2와 3은 intensity가 평균 4,000정도 였으나, 시편 4와 5의 경우에는 10,000이상임을 확인할 수 있었다. 이를 통하여, 높은 산화알루미늄 함량비를 가질 경우에 형광 스펙트럼의 검출률(Detectability)이 높아짐을 확인할 수 있었다.



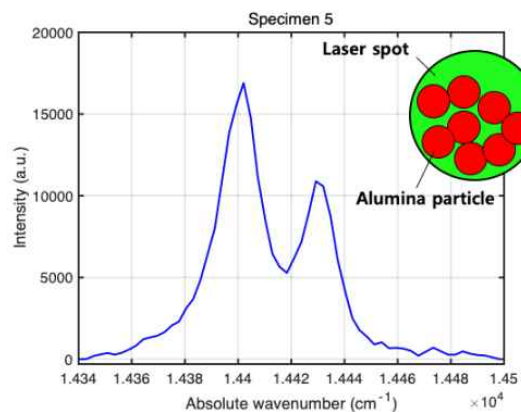
(a) 시편 2



(b) 시편 3



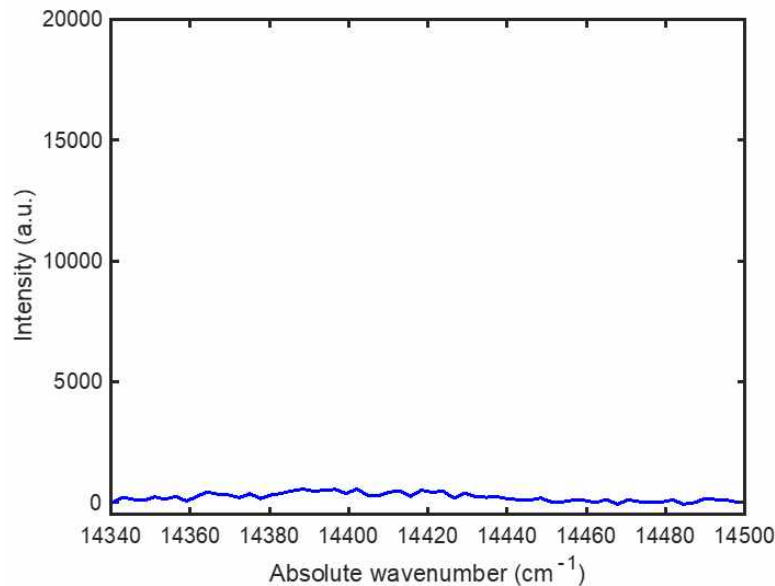
(c) 시편 4



(d) 시편 5

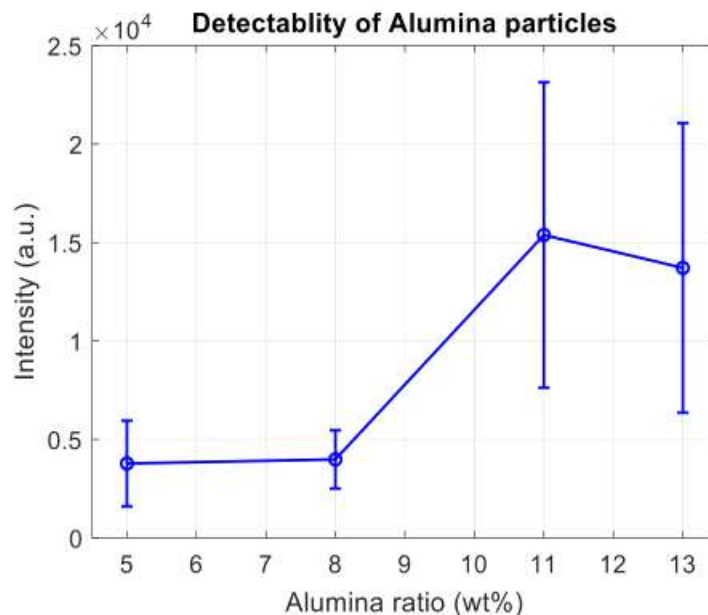
<산화알루미늄 함량비에 따른 형광 스펙트럼(대표 스펙트럼)>

아래 그림은 시편 2~5와 달리 시편에 추가 산화알루미늄이 없는 시편 1의 형광 스펙트럼을 보인다. 이와 같이 시편에 산화알루미늄이 추가되지 않은 경우에는, 비록 포틀랜드 시멘트에 일부 산화알루미늄이 포함되어 있으나, 그 양이 매우 미량이기 때문에, 포터블 형광 분광 시스템을 이용해서 주요 첨가값들을 확인할 수 없음을 확인할 수 있다.



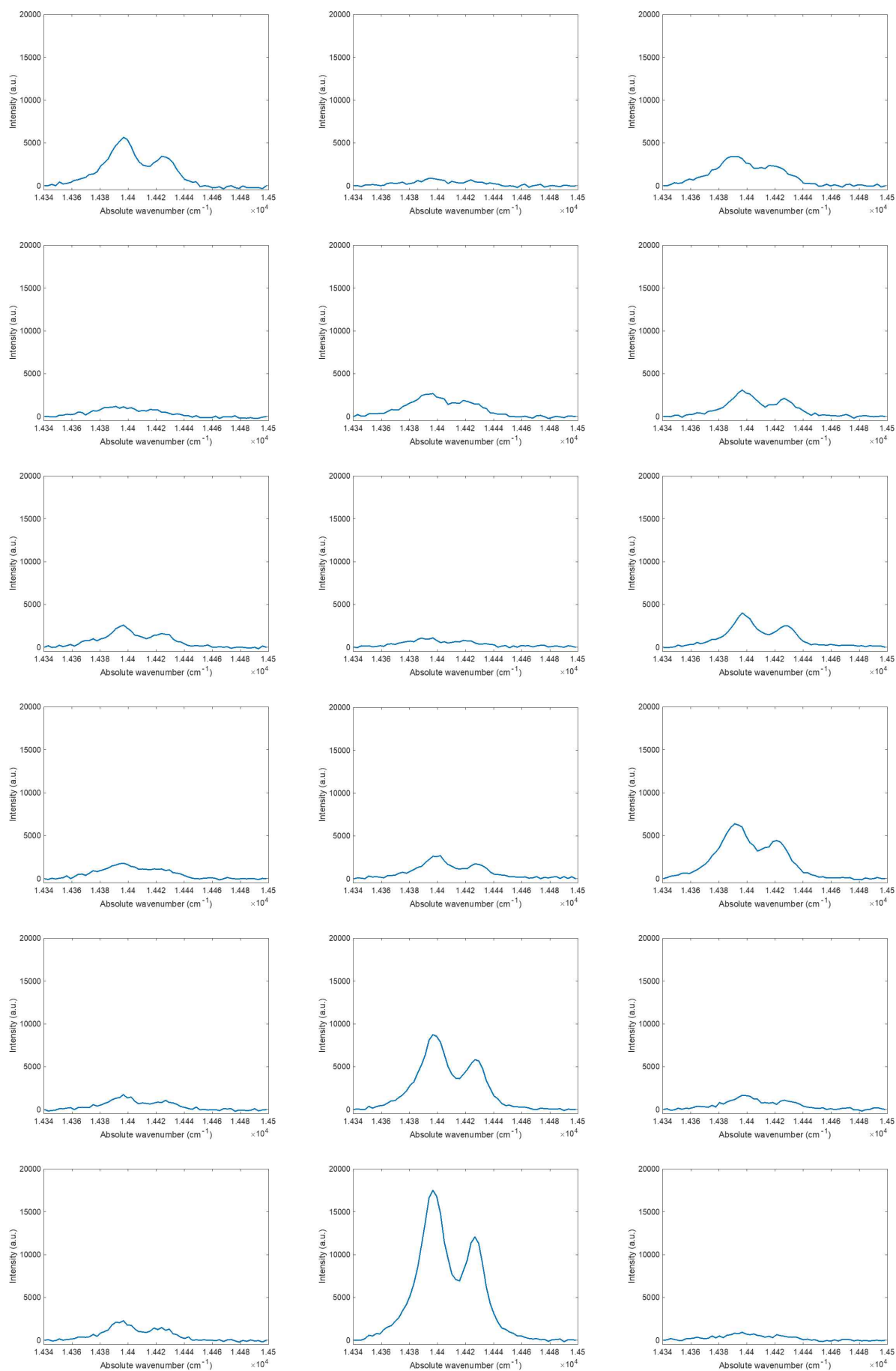
<추가 산화알루미늄이 없는 시편 1의 형광 스펙트럼(대표 스펙트럼)>

아래 그림은 산화알루미늄의 함량비에 따른 대표적인 형광 스펙트럼의 분광검출을 비교를 보인다.

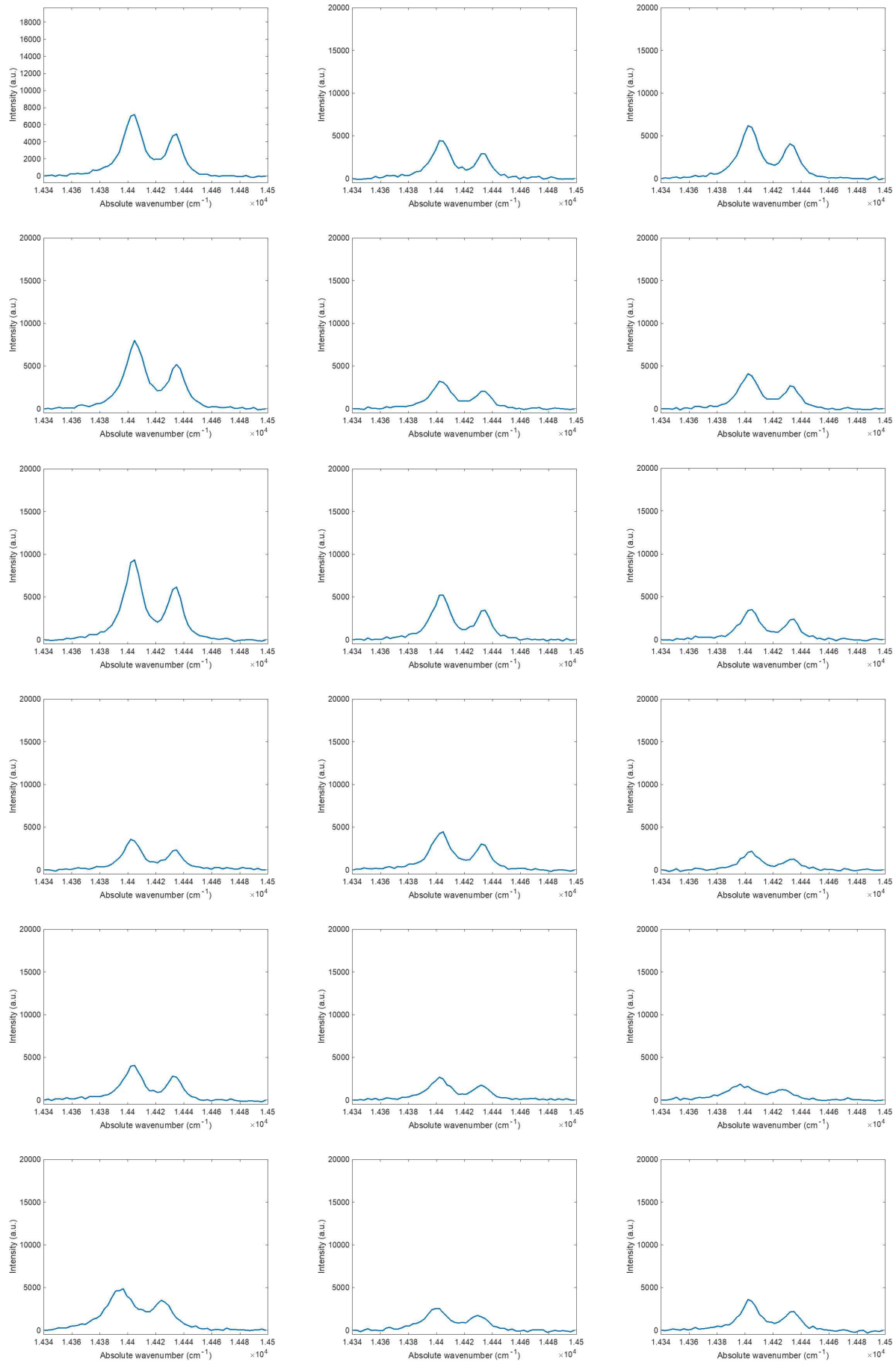


<산화알루미늄 함량비에 따른 스펙트럼 선명도(Intensity) 비교>

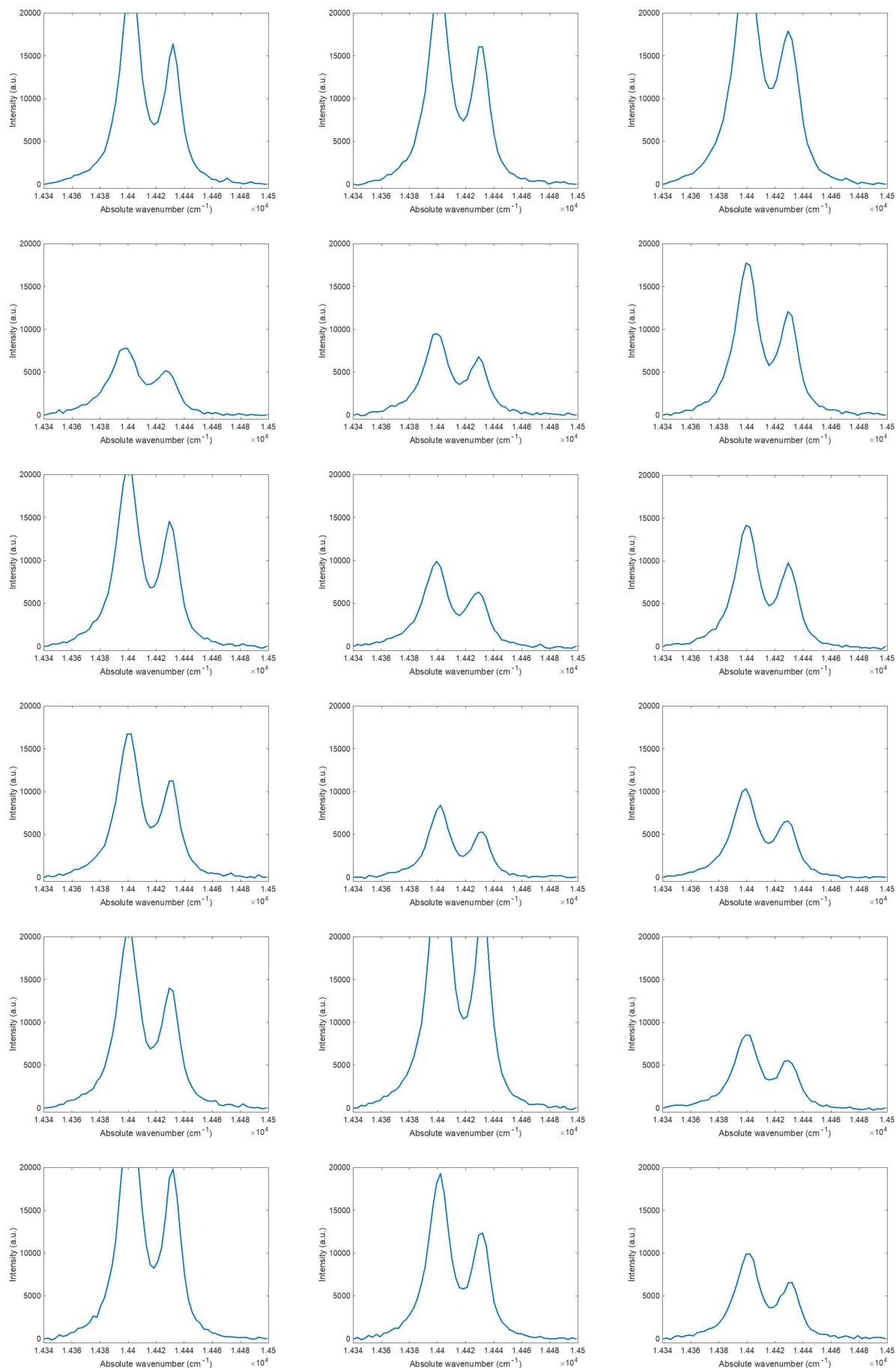
아래 그림은, 산화알루미늄 함량비별 스펙트럼 선명도(분광검출율) 비교를 위하여 수집된 대표 형광 스펙트럼들을 보인다. 일관적인 스펙트럼의 선명도 비교를 위하여, y축은 0~20,000 으로 고정되었다. 따라서, 시멘트에 포함된 산화알루미늄의 양이 많아서 스펙트럼의 intensity가 20,000을 넘은 경우(saturation)에도 동일한 y축 범위 내에서 나타내었다.



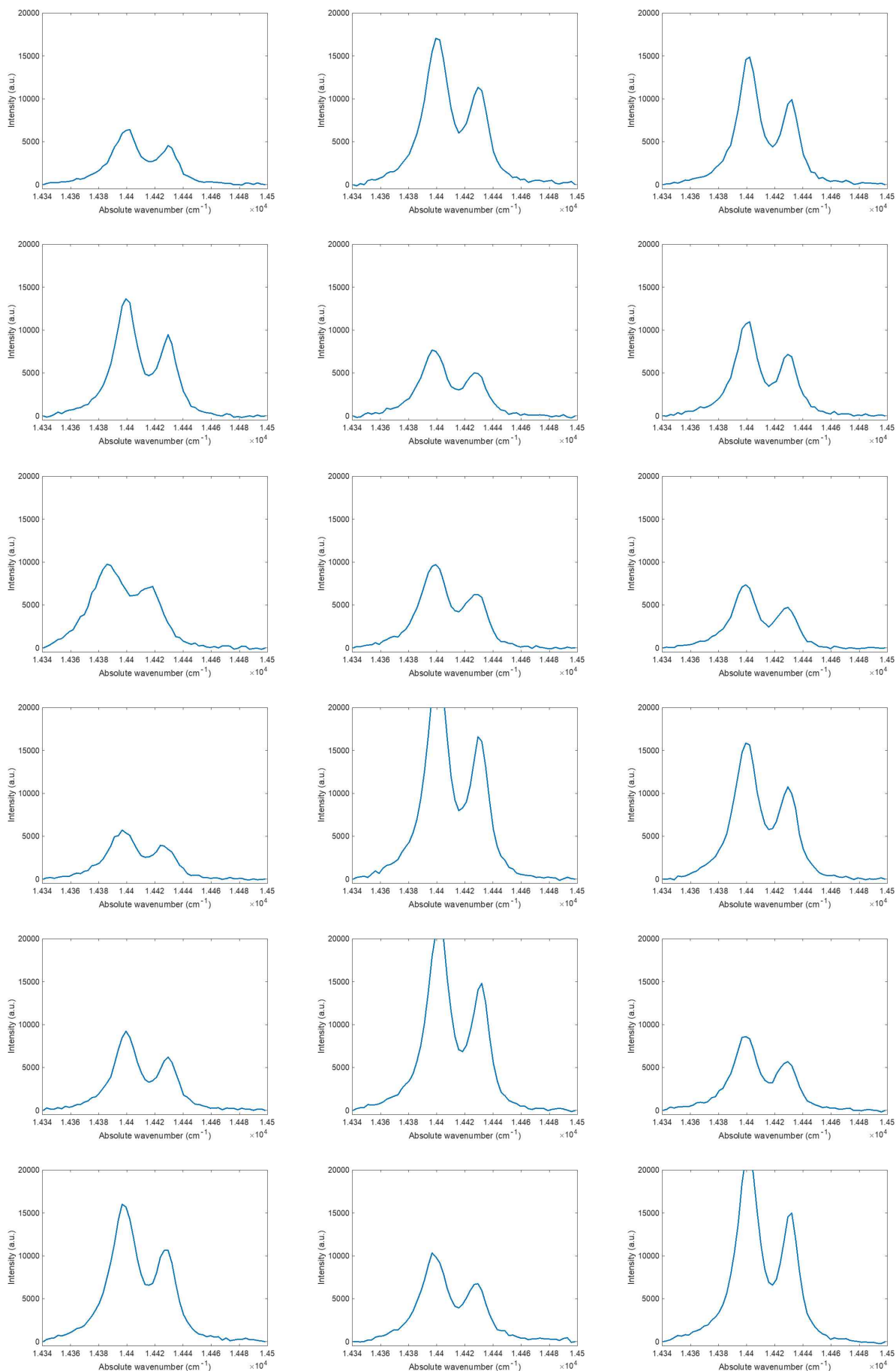
<시편 2 형광 스펙트럼>



<시편 3 형광 스펙트럼>



<시편 4 형광 스펙트럼>

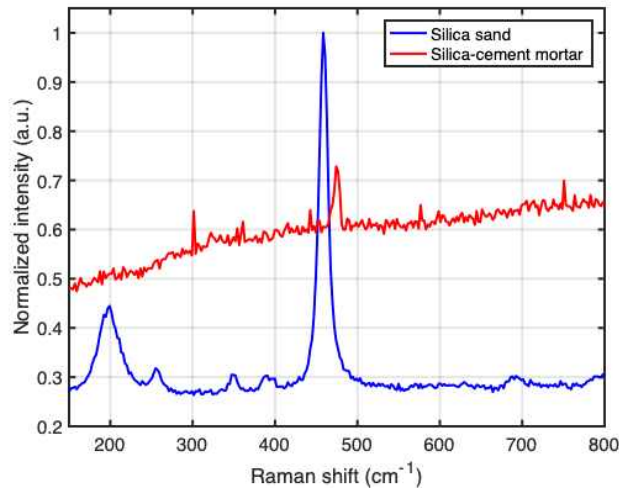


<시편 5 형광 스펙트럼>

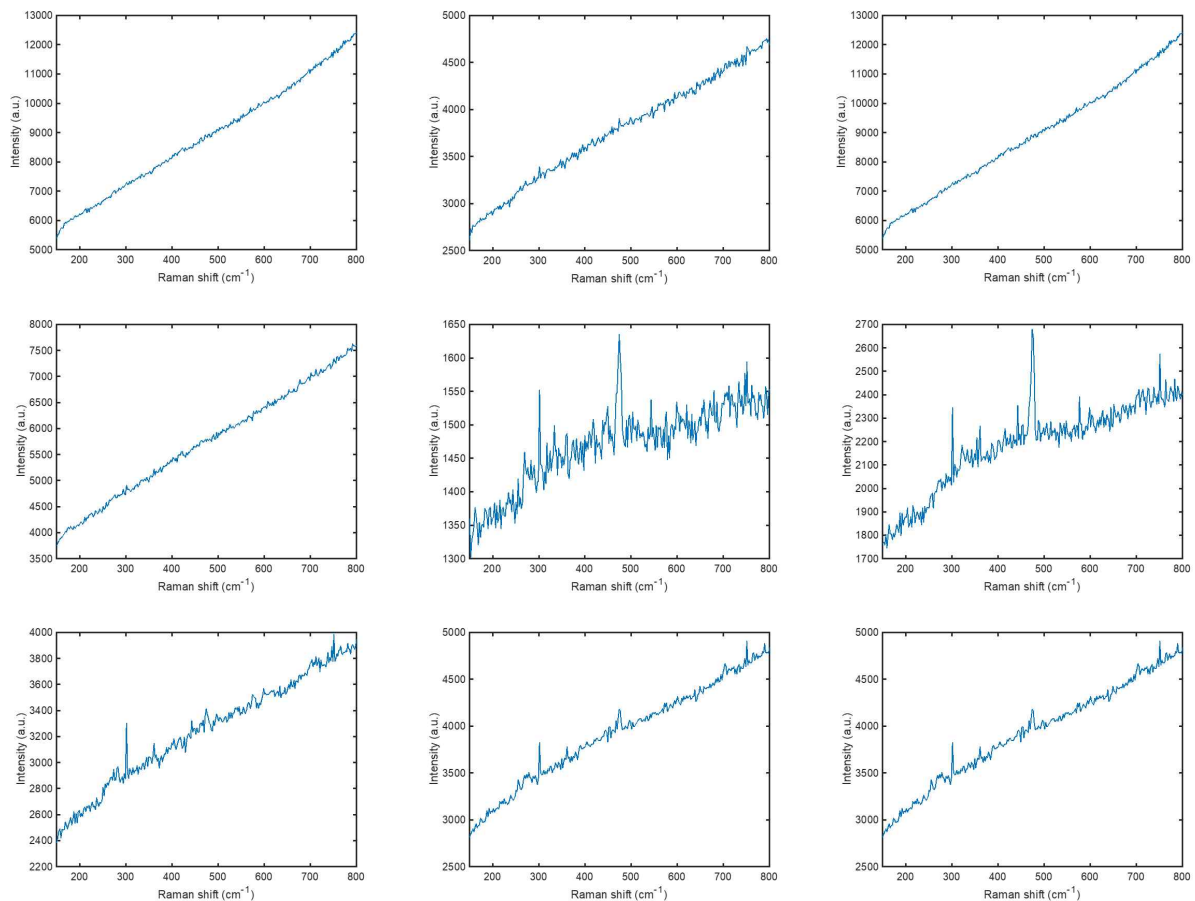
3.4.4.2. 규사가 첨가된 시멘트 모르터

규사가 첨가된 시멘트 모르터 시편으로부터 라만 스펙트럼을 수집하는 것을 통하여, 시편 내부의 이산화규소의 존재에 대하여 확인하고자 하였다. 규사(분말)의 라만 스펙트럼(아래 그림의 파란색 실선)의 경우, 202 cm^{-1} , 258 cm^{-1} , 350 cm^{-1} , 400 cm^{-1} , 459 cm^{-1} 등에서 주요 라만 첨뒳값을 확인할 수 있었던 반면, 규사가 들어간 모르터 시편에서는 이산화규소의 라만 스펙트럼(아래 그림의 빨간색 실선)의 경우 주요 첨뒳값을 확인할 수 없었다. 여기서, 474 cm^{-1} 에서 발생하는 첨뒳값은 형광등에 의해 발생한 노이즈 신호이다.

따라서, 본 연구에서는 최종적으로 산화알루미늄을 응력 센싱을 위한 스마트 시멘트의 첨가제로 선정하고, 산화알루미늄이 첨가된 시멘트 모르터에 대하여 압분광 효과를 규명하였다.



<규사(분말)와 규사가 포함된 시멘트 모르터의 라만스펙트럼 비교>



<규사가 포함된 시멘트 모르터의 라만스펙트럼>

3.4.5. 소결

본 장에서는 일반 포틀랜드 시멘트, 산화알루미늄 분말, 규사에 대한 재료 실험을 수행하고, 여러 가지 배합비를 가지는 시멘트 모르타 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 통하여, 모든 재료 실험과 하중실험에 사용될 파라미터를 선정하였다. 제작된 시편에 대한 재료 실험을 통하여, 첨가제의 함량비가 높아질 경우, 그만큼 분광검출률이 좋아지지만, 일정 함량을 초과하면 더 이상 분광검출률이 증가하지 않음을 확인하였다.

최종적으로, 산화알루미늄이 포함된 시편(시편2~5)과 규사가 포함된 시편(시편6~9), 그리고 비교군으로 어떠한 첨가제도 포함되지 않은 시멘트 모르타 시편(시편 1)이 제작되었다. 해당 시편들에 대한 재료실험(라만/형광 분광법)을 통하여, 산화알루미늄이 포함된 시편의 경우에는 하중실험을 하기에 충분한 크기의 침뚫값들이 스펙트럼이 계측됨을 확인하였으나, 규사가 포함된 시편의 경우에는 그 분광검출률이 낮아서, 하중실험으로 유의미한 결과를 얻기 어렵다고 판단하였다. 따라서, 압분광 효과를 위한 하중실험은 산화알루미늄이 포함된 시편만을 대상으로 수행한다.

규사가 포함된 시편에 대한 압분광 효과를 규명하고자 할 경우, 신호의 SNR(signal-to-noise ratio)이 좋아질 수 있도록, 785nm 레이저를 이용하여 실험할 것이 추천된다. 또는, 고가의 레이저와 분광기로 구성된 Bench-top 분광시스템을 사용할 경우, 규사의 분광검출률을 측정가능할 것으로 예상된다. 다만, 시스템의 진동에 민감한 Bench-top 분광시스템을 토목 현장에서 적용하는 것은 현재로써는 불가능하기에, 본 연구에서는 포터블 형광 분광 시스템을 이용하여, 산화알루미늄이 포함된 시편에 대해서만 압분광 효과를 규명하도록 한다.

3.5. 비접촉식 스마트 시멘트의 압분광 효과 규명

3.5.1. 압분광 효과 규명을 위한 시험 셋업

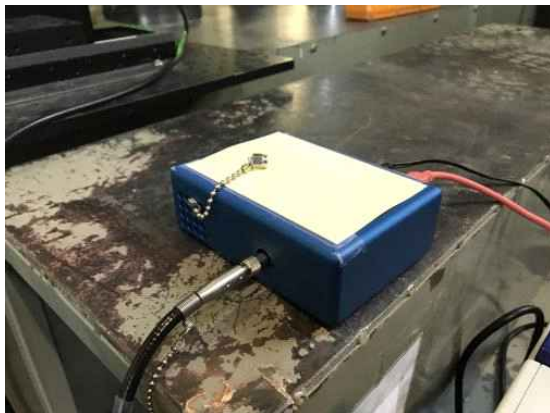
산화알루미늄이 포함된 시편에 대한 압분광 효과를 규명하기 위하여, 총 2가지 실험 셋업(300톤급 장비, 20톤급 장비)에서 동일한 실험을 진행하였다. 아래 장비는 300톤급 규모의 UTM 장비와 형광 분광 시스템을 보인다. 해당 장비를 이용하여 스마트 시멘트 모르타르 시편에 압축 하중을 인가하고, 형광 분광 시스템을 이용하여 하중이 인가된 시편의 형광 스펙트럼을 수집하고, 그 데이터를 분석하여 압분광 효과를 규명하였다.



(a) 실험 셋업 전경



(b) 532nm 레이저



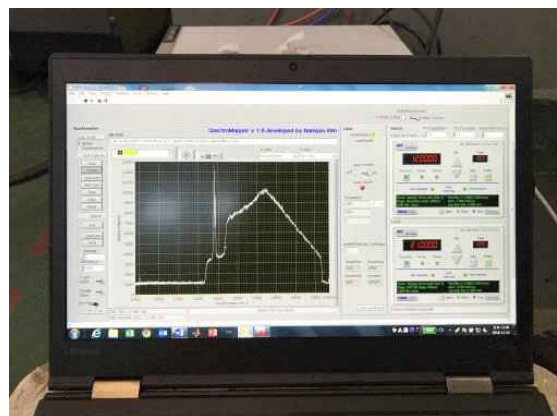
(c) 분광기



(d) 모터스테이지 컨트롤러



(e) 2차원 모터스테이지 및 프로브

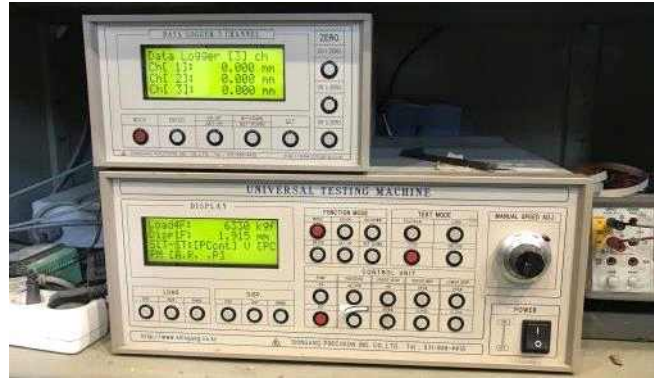


(f) 시스템 구동 프로그램

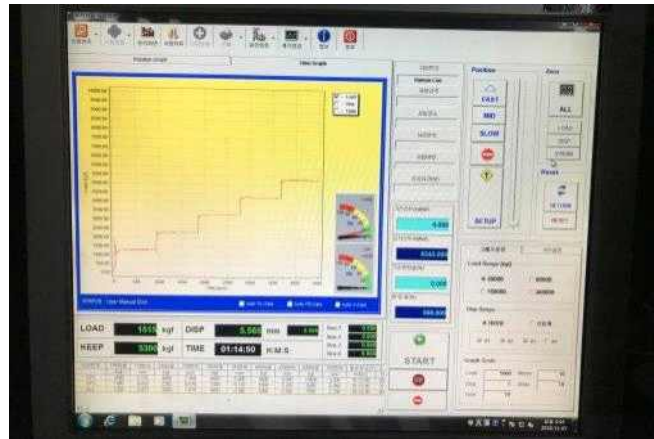
<시멘트 압분광 효과 규명을 위한 분광기 시스템 셋업 1 (300tonf 급)>



(a) Universal testing machine



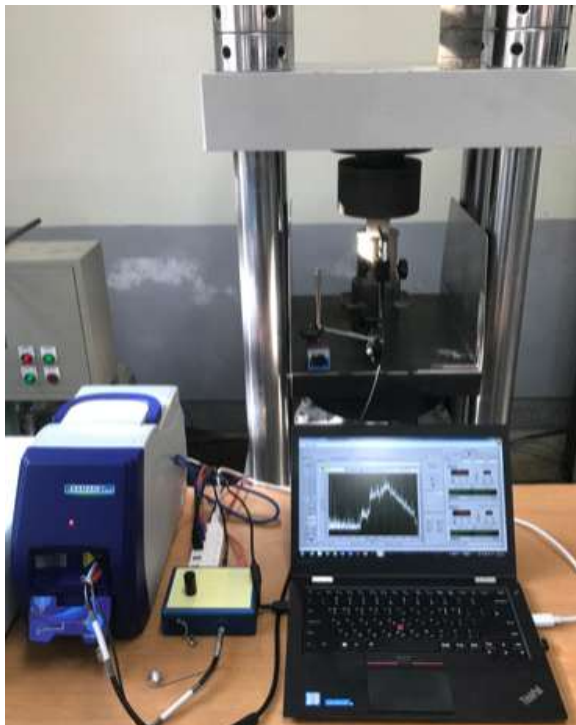
(b) UTM 컨트롤러



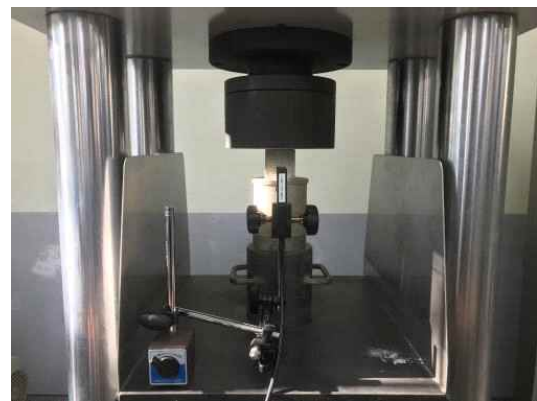
(c) UTM 구동 프로그램

<시멘트 압분광 효과 규명을 위한 UTM 셋업 1 (300tonf 급)>

아래 장비는 20톤급 규모의 UTM 장비와 형광 스펙트럼을 수집하기 위한 분광 시스템을 보인다. 300톤급 규모의 장비와 동일한 압축하중시험을 수행하였다.



(a) 실험전경



(b) 압축시험기



(c) 실험을 위한 레이저 조사

<시멘트 압분광 효과 규명을 위한 UTM 셋업 2 (20tonf 급)>



(a) Universal testing machine



(b) UTM 컨트롤러

<시멘트 압분광 효과 규명을 위한 UTM 셋업 2 (20tonf 급)>

양생과정, 디몰딩 과정, 시편 이동과정에서 시편 표면에 이물질이 부착되었을 가능성이 있다. 따라서, 모든 압축하중실험을 수행하기 직전에 아래와 같이 알콜솜을 이용하여 시료의 표면을 세척하고, 1분간 건조시킨 후 실험을 진행하였다.



<알콜을 이용한 시편 표면 세척(예)>

3.5.2. 시멘트 모르터 압축강도 실험

압축 하중실험 시 사용될 최대 하중의 크기를 선정하기 위하여, 시편 2~5에 대한 압축강도 실험을 수행하였다. 아래 그림은 시멘트 모르터 압축강도 실험 및 압축강도 실험 후 파괴된 시편 2를 보인다.



(a) 시멘트 모르터 압축강도 실험



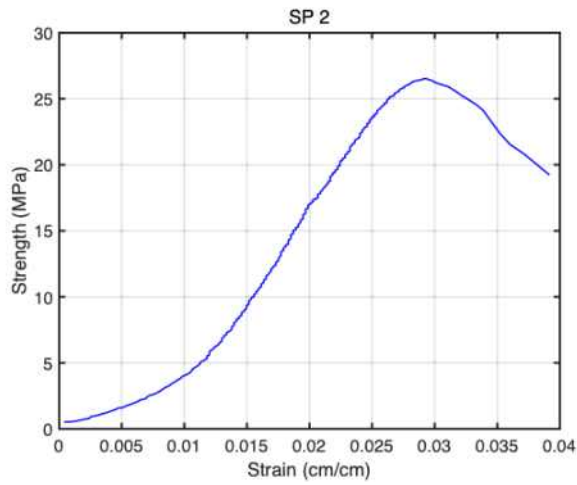
(b) 압축강도 실험 후 파괴된 시편

<시멘트 모르터 시편 파괴 실험>

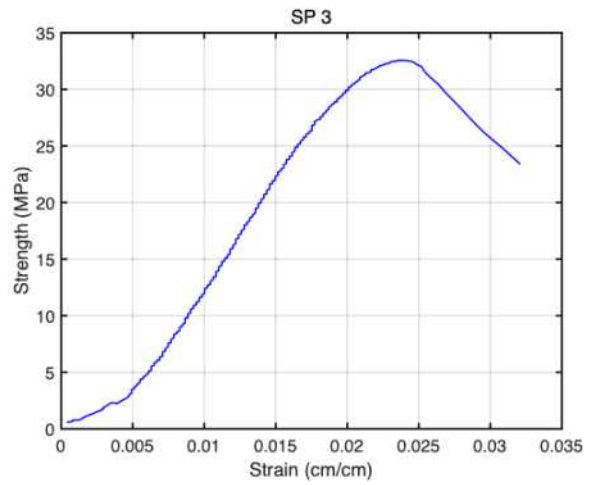
산화알루미늄이 첨가된 시편 2~5의 경우의, 아래 그림과 표와 같이 평균적으로 25.7 MPa 이후에 시편이 파괴됨을 확인하였다. 따라서, 산화알루미늄이 포함된 시편에 대한 압분광 효과를 규명하기 위해서 최대 20 MPa 이하의 하중을 시편에 인가하여, 선형구간에 대한 압분광 효과를 확인하였다. 단, 상기 시험은 실내 상온에서 재령 18일에 수행되었으며, 시편 표면에는 다수의 공극이 존재하였다.

<산화알루미늄의 포함된 시멘트 모르터 시편의 압축강도실험 결과 (18일 강도)>

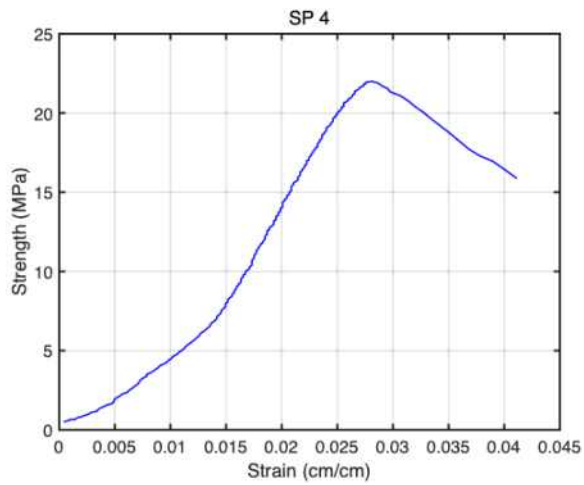
시편종류	산화알루미늄 분말 첨가 시편			
시편번호	시편 2	시편 3	시편 4	시편 5
첨가제 비율 (알루미나/시멘트)	17 %	29 %	38 %	44 %
첨가제 비율 (전체중량대비 첨가제 비율)	4 %	7 %	10 %	11 %
첨가제 비율 (전체대비(물제외) 첨가제 비율)	5 %	8 %	11 %	13 %
압축강도 (MPa)	26.5	32.6	22.0	21.9
평균	25.75 MPa (std. = 5.05 MPa)			



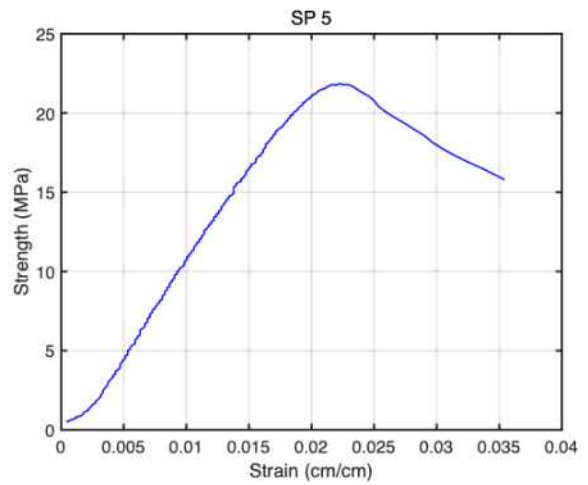
(a) 시편 2



(b) 시편 3



(c) 시편 4



(d) 시편 5

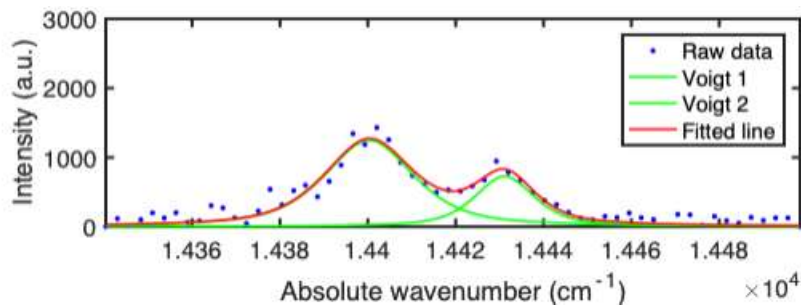
<산화알루미늄 분말이 포함된 시멘트 모르타르 시편 압축응력 곡선>

3.5.3. 시멘트 모르터 압분광 효과 검증 실험

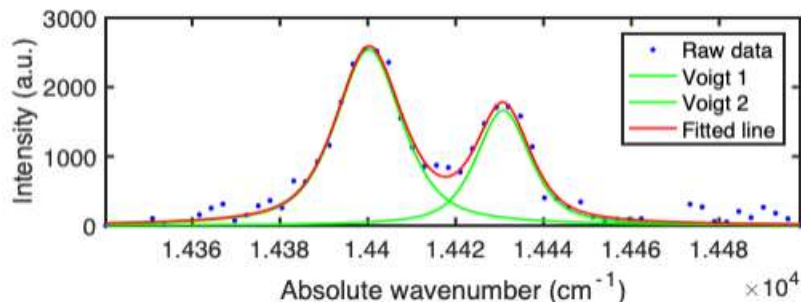
20MPa 이하의 압축응력 하에서는 모든 시편에서 일관적으로 선형구간(변형률-응력 관계)이 있음을 확인하였다. 따라서 압분광 효과 규명 시험을 위하여, 20 MPa 이하의 응력 구간에 대한 압축하중시험을 수행하였다. 시멘트 모르터 시편에 인가된 하중의 크기는 0, 4, 8, 12, 16 MPa 으로 약 4 MPa 의 증분값을 갖는다.

① 시편 2 (산화알루미늄 5%)

아래 그림은 시편 2로부터 계측된 대표적인 형광 스펙트럼 두 경우를 보인다. 아래 그림 (a)의 경우에는 intensity 가 $1,245 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우를, (b)의 경우는 intensity가 $2,540 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우를 보인다. 그림에서 파란색 점들이 본 데이터(raw data)에 해당하고, 초록색 선은 각각 Voigt profile을 보인다. 붉은색 선은 최종적으로 Fitting된 선을 보인다. 여기서, intensity가 낮은 경우 (intensity가 $1,245 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우)에는 낮은 intensity로 인하여 Voigt profile에 의한 Fitting이 정확하게 이루어지지 않았음을 확인할 수 있다. 이로 인하여, Fitting을 통하여 얻어진 $14,402 \text{ cm}^{-1}$ 주변에 위치하는 첨두값의 파수가 부정확 할 가능성이 크다. 하지만 intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 보다 큰 경우(intensity가 $2,540 \text{ cm}^{-1}$ 인 경우)에는 두 Voigt profile을 이용하여 안정적으로 Curve fitting이 수행됨을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 R1 band(왼쪽 첨두값) 스펙트럼의 Intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이하인 경우에 대해서는 그 값을 무시하도록 한다.



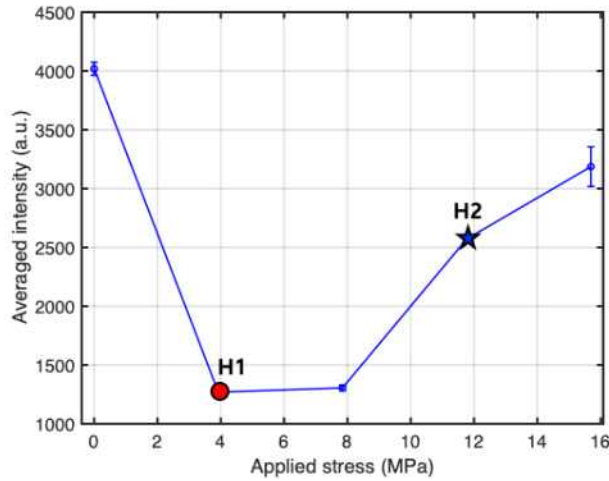
(a) Intensity가 $1,245 \text{ cm}^{-1}$ 일 경우(상단 그림의 H1위치)의 curve fitting 결과



(b) Intensity가 $2,540 \text{ cm}^{-1}$ 일 경우(상단 그림의 H2위치)의 curve fitting 결과

<H1, H2점에 대한 curve fitting 결과 비교>

아래 그림에서 하중이 단계적으로 가해졌을 경우에 나타나는 형광 스펙트럼의 intensity 변화를 보인다. 하중을 4, 8 MPa 인가하였을 경우에는 Intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이하인 것을 확인할 수 있다. 따라서, 압분광 효과 검증 시에는 두 단계(4MPa, 8MPa 이 가해진 경우)를 무시한다.

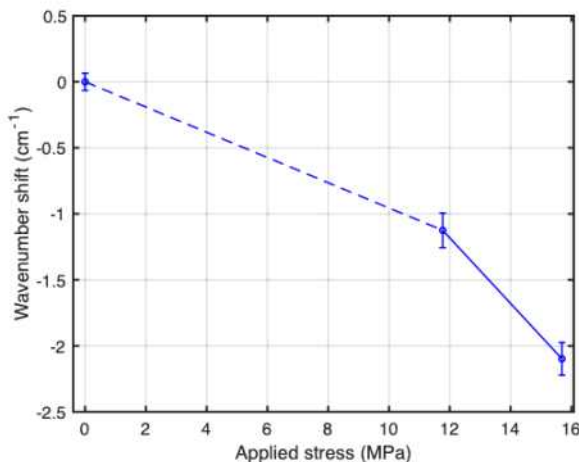


<계측위치 1의 형광스펙트럼 intensity 변화 (시편 2)>

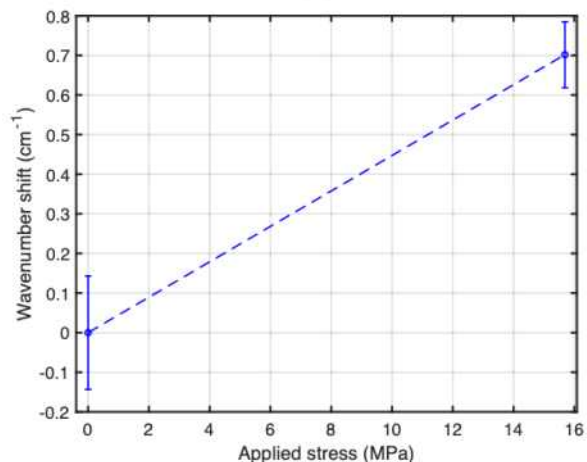
이와 같은 intensity의 변화는 관측 지점의 변화(혹은 관측 산화알루미늄 미립자의 이동) 때문으로 추정된다. 즉, 하중이 0 MPa이 가해진 경우에는 산화알루미늄 미립자가 비교적 많이 분포한 지역에서 데이터를 계측하였다면, 하중이 4 MPa 가해진 경우에는 시편이 압축하중에 의하여 미소변위가 발생하였을 것이다. 여기서, 레이저가 시편을 조사하는 크기가 직경 약 0.085 mm이기 때문에, 이와 같은 미소변위에 대해서도 관측 지점이 일부 변화함을 알 수 있다. 만약 해당 시편 표면에 충분한 양의 산화알루미늄 미립자가 분포해 있을 경우에는 이와 같은 문제를 갖지 않을 것으로 추정된다.

아래 그림은 임의의 두 지점에서 측정된 하중변화에 따른 형광스펙트럼의 파수변화를 보인다. 점선 구간은 intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이하인 구간이며, 실선 구간은 intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이상인 구간의 결과이다. 하중이 0 MPa 인 지점을 기준으로 상대적인 파수값의 변화량을 나타내었다. 따라서, 파수가 양의 방향(그래프 위쪽 방향)으로 변화하는 것은 시편에 인장응력이 발생함을 나타내고, 파수가 음의 방향(그래프 아래쪽 방향)으로 이동함은 해당 시편에 압축응력이 작용함을 나타낸다.

이에 근거하여, 시편 2-계측위치 1 (그림(a))의 경우에는 하중이 약 16 MPa가해진 경우, 파수가 음의 방향으로 약 2.1 cm^{-1} 만큼 이동한 것을 알 수 있다. 하지만 이와 달리, 시편 2-계측위치 2 (그림(b))의 경우에는 16 MPa의 하중이 가해진 경우 파수가 양의 방향으로 약 0.7 cm^{-1} 만큼 이동한 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 경우에는 해당 미소관측 지점이 약간의 인장응력을 받고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 시편 2 - 계측위치 1

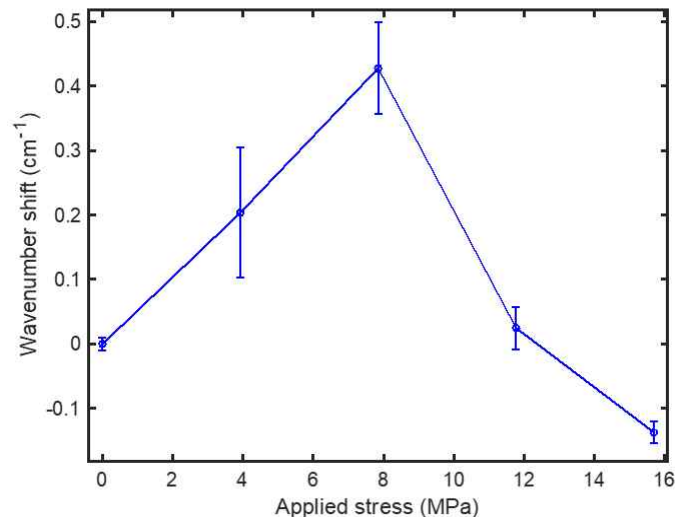


(b) 시편 2 - 계측위치 2

<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계(시편 2)>

시편 2-계측위치 3 (아래 그림)의 경우에는 위 두 계측위치에서의 발견된 양상과 달리, 압축하중을 시편에 인가한 경우, 초기에는 미소지점에 인장응력이 발생하고, 압축하중 8 MPa 이후에는 해당 미소지점에 압축응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 경우에는 해당 관측지점이 약간의 인장응력을 받다가, 발생 응력방향이 압축응력으로 전환된 것을 확인할 있다. 그 외의 지점들에서도 해당 계측위치들(계측위치 1~3)의 데이터와 유사하게, 일관성 있는 결과를 얻기 어려웠다.

이와 같이, 산화알루미늄의 양이 약 5%에 해당하는 경우에는, 재료시험을 통해서 산화알루미늄의 존재가 적음을 확인하였고, 본 압분광현상 규명 시험에서도 그 응력센싱의 가능성이 적음을 확인하였다. 따라서 본 보고서에서는 이 외의 관측지점들에서 획득한 결과들은 표기하지 않는다. (여기서, 각 관측 지점의 레이저 조사(irradiation) 직경은 약 0.085 mm에 해당한다.)



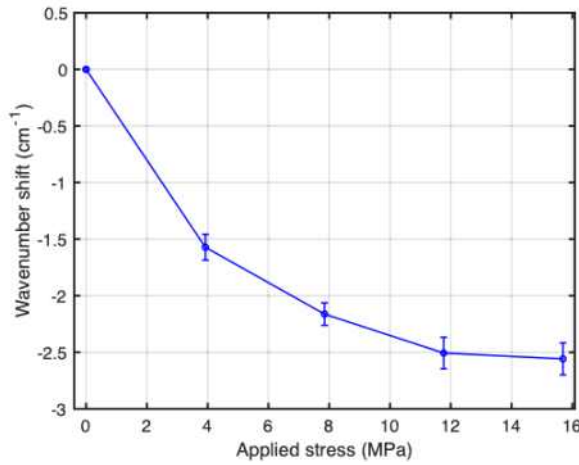
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계(시편 2 - 계측위치 3)>

② 시편 3 (산화알루미늄 8%)

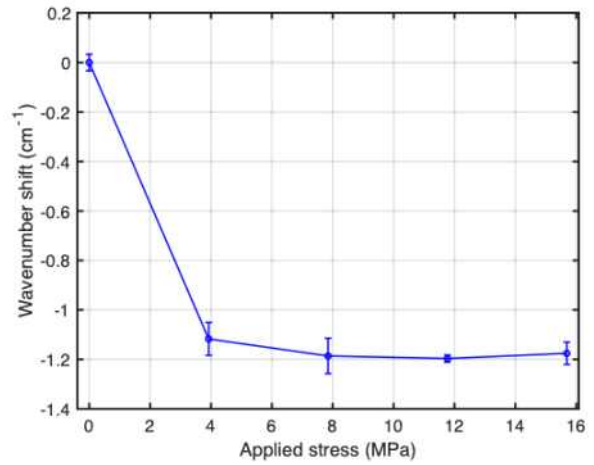
시편 3의 경우에는, 시편 2와 비교하여 상대적으로 산화알루미늄 관측(또는 발견) 빈도가 높았으며, 관측되는 대부분의 경우에서 산화알루미늄 형광스펙트럼의 intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이상이었다. 즉, 시편 2 보다는 시료 표면에 분포하는 산화알루미늄의 양이 상대적으로 많았다. 따라서, 각 하중 단계에서 유의미한 데이터를 획득할 수 있는 시험 케이스가 상대적으로 많았다. 하지만, 시편 3에 대한 재료시험에서도 확인할 수 있었듯이, 산화알루미늄의 분포가 응력센싱을 수행할 만큼 표면에 균일하게 분포되어 있지는 않았다. 따라서, 아래에는 압축하중시험을 통하여 획득한 대표적인 데이터만을 보인다.

시편 3의 경우에도, 시편 2의 실험과 동일하게 4 MPa의 증분으로 16 MPa까지 하중을 인가하였을 경우, 시편 3-계측위치 1에서 볼 수 있듯이, 각 하중 단계에서 하중-파수 관계가 선형관계에 가깝고, 16 MPa를 인가할 경우 음의 방향으로 약 2.5 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 계측위치 2의 경우에도 16 MPa의 압축하중을 인가할 경우, 스펙트럼이 음의 방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있으나, 파수 변화량이 계측위치 1과는 같지 않음을 확인할 수 있다. 계측위치 3의 경우에는, 8 MPa까지는 시편에 인장응력이 발생하고, 그 이후 하중에 대해서는 압축응력을 받는 것을 확인할 수 있다. 초기의 인장응력의 발생은 초기 시편 상부/하부면이 평평하지 못하여 발생하는 것으로 판단된다. 그 이동량은 계측위치 1보다 작음을 확인할 수 있다. 계측위치 4의 경우에는, 양의 방향으로 약 1.2 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 이는 해당 미소 계측지점에 인장응력이 작용한다는 것을 의미한다. 따라서, 이와 같이, 본 연구에서 제안하는 방법은 미소 지점에 대한 응력을 측정하는 방법이기 때문에, 콘크리트 구조물

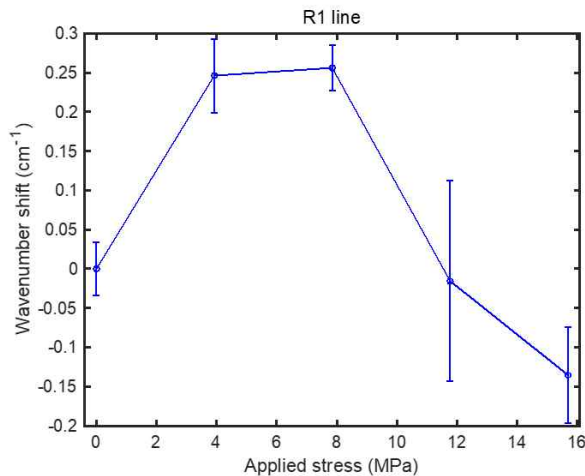
의 전역적(global) 응력 측정을 위해서는 반드시 평균응력 계측 방법의 도입이 필요하다.



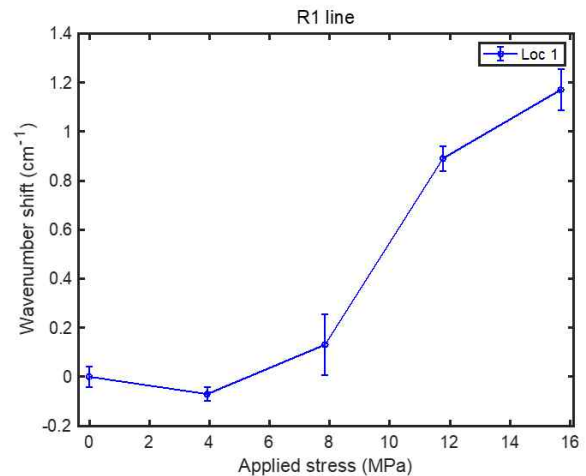
(a) 시편 3 - 계측위치 1



(b) 시편 3 - 계측위치 2



(c) 시편 3 - 계측위치 3

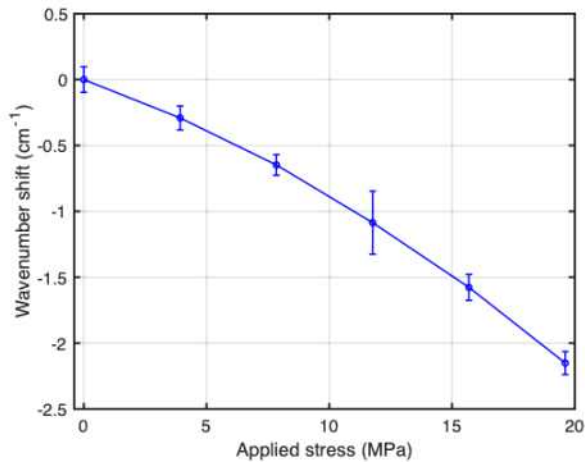


(d) 시편 3 - 계측위치 4

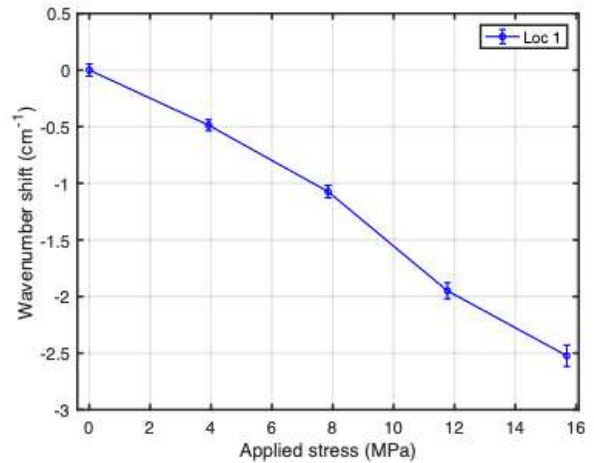
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계 (시편 3)>

③ 시편 4 (산화알루미늄 11%)

시편 4의 경우, 대부분의 경우에서 산화알루미늄 형광스펙트럼의 intensity가 $2,000 \text{ cm}^{-1}$ 이상 이었고, 시편 표면에 분포하는 산화알루미늄의 양이 시편 2와 3보다 상대적으로 많음을 실험적으로 확인하였다. 따라서, 모든 하중 단계에서 유의미한 데이터를 획득할 수 있었다. 시편 4에 대해서도 동일하게 4 MPa의 증분으로 16 MPa까지 하중을 인가하였을 경우, 시편 4-계측위치 1(그림(a))에서 볼 수 있듯이, 하중-파수 관계가 선형관계에 가깝고, 최종적으로 16 MPa의 압축하중을 시편에 인가할 경우, 음의 방향으로 약 1.6 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다 (해당 실험의 경우 20 MPa까지 압축하중 실험을 수행함). 다른 계측위치(계측위치 2)에 대한 실험에서도, 하중-파수 관계가 선형관계에 있으며, 16 MPa를 인가할 경우 음의 방향으로 약 2.5 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 시편 4-계측위치 3에서 수집된 형광스펙트럼을 분석하여 하중-파수관계를 분석한 경우, 아래 그림과 같이 0~12 MPa까지는 음의 방향으로 약 2 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인할 수 있다. 하지만, 12 MPa~16 MPa의 압축하중 구간에서는 스펙트럼이 양의 방향으로 약 0.5 cm^{-1} 만큼 이동함을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은, 12 MPa의 압축하중이 시편에 가해진 직후, 시료 표면에 발생한 균열에 의하여, 해당 응력 계측 지점의 응력이 일부 소산되었기 때문이다.

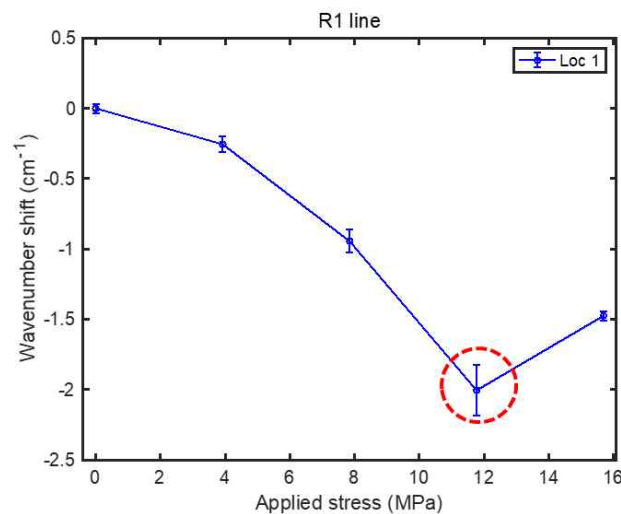


(a) 시편 4 - 계측위치 1



(b) 시편 4 - 계측위치 2

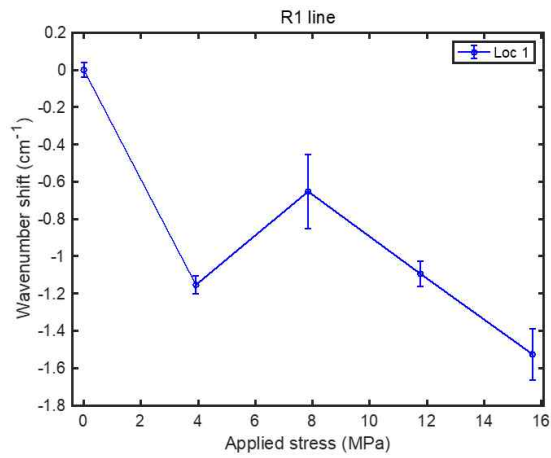
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계(시편 4)>



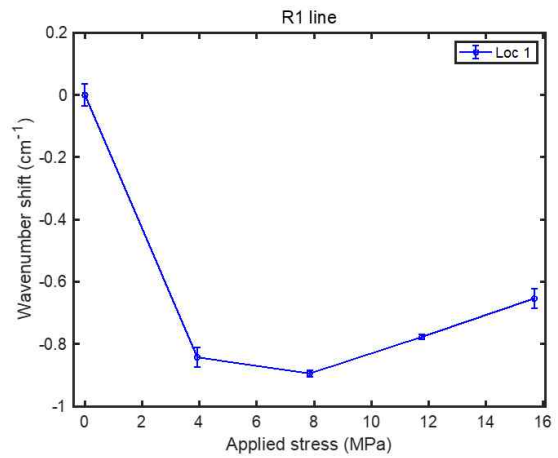
<계측 위치3 (시편 4) 에서의 하중-파수 변화 관계 및 균열발생 후 하중-파수 변화 양상>

위에서 나타난 계측위치 1~3 결과 이외에도, 동일한 배합비를 갖도록 제작한 시편 4 들의 임의의 지점들에서 계측한 스펙트럼을 분석하여 하중-파수 변화 관계를 분석하고, 아래 표에 일괄적으로 나타내었다.

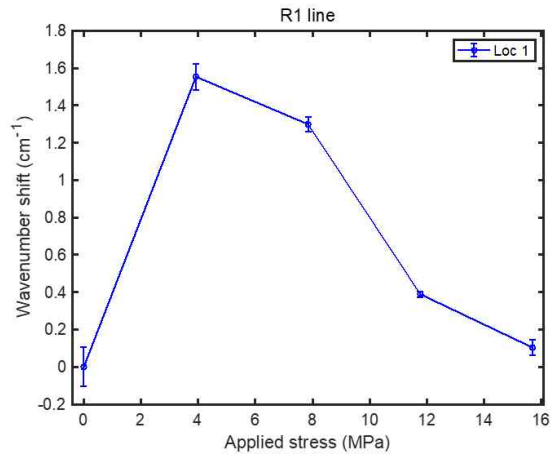
계측위치 4의 경우에는 4 MPa 의 압축하중 구간을 제외하고는, 스펙트럼이 일관적으로 음의 방향으로 이동함을 확인할 수 있고, 그 이동량도 약 1.5 cm^{-1} 에 해당한다. 계측위치 5의 경우에도 스펙트럼이 음의 방향으로 이동하였으나, 8 MPa 구간이후 부터는, 표면 균열로 인하여 일부 인장응력을 받는 것을 확인할 수 있다. 계측위치 6~9의 경우에는 조사(irradiation) 미소 지점에 초기에는 인장응력이 발생하지만, 해당 시점 이후에는 압축하중을 받음을 확인할 수 있다. 계측위치 10, 14, 17의 경우처럼 인장응력이 주로 발생하는 미소지점도 존재함을 실험적으로 확인할 수 있으나, 대부분의 경우에는 계측위치 16, 19와 같이 스펙트럼의 양/음의 방향 이동이 확인되지만 그 크기가 대부분 크지 않은 것으로 관찰되었다.



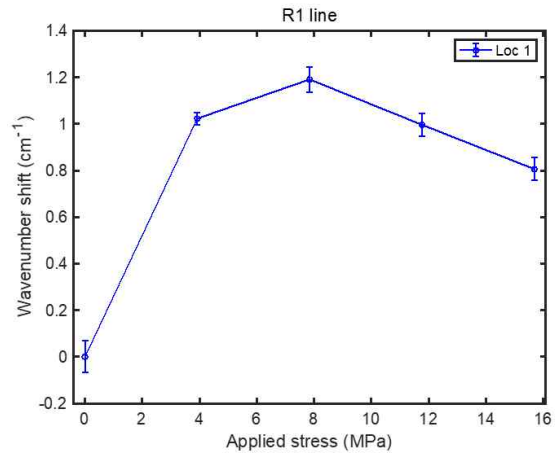
(a) 시편 4 - 계측위치 4



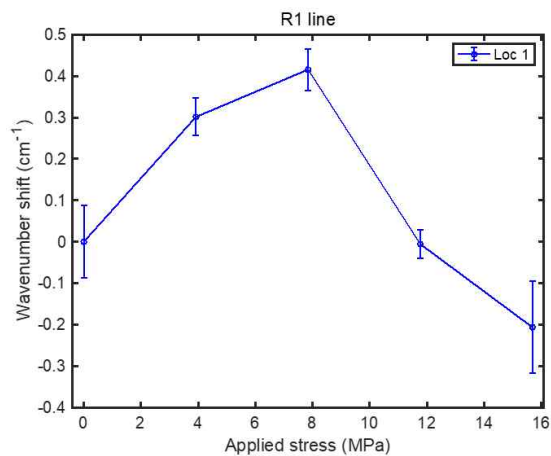
(b) 시편 4 - 계측위치 5



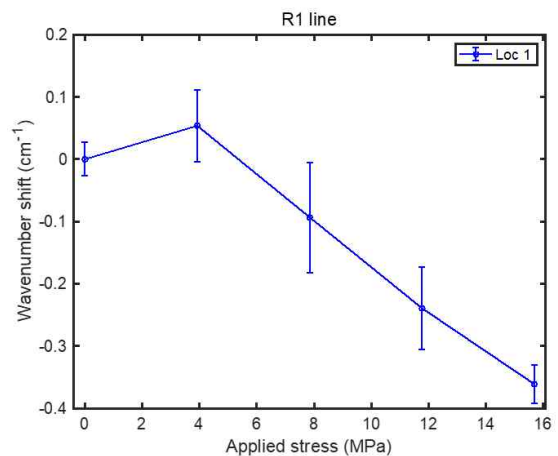
(c) 시편 4 - 계측위치 6



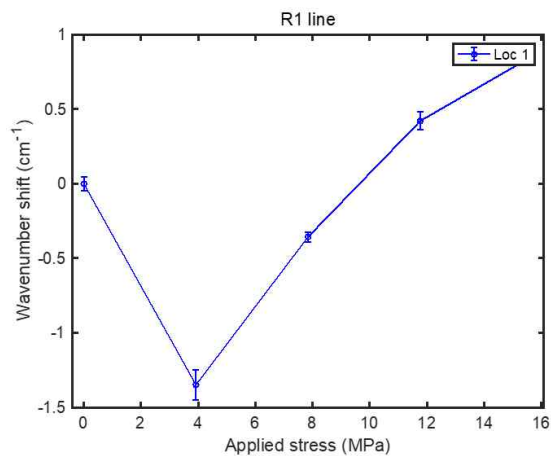
(d) 시편 4 - 계측위치 7



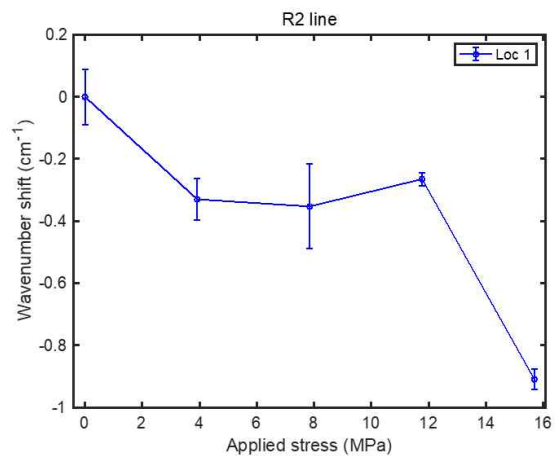
(e) 시편 4 - 계측위치 8



(f) 시편 4 - 계측위치 9

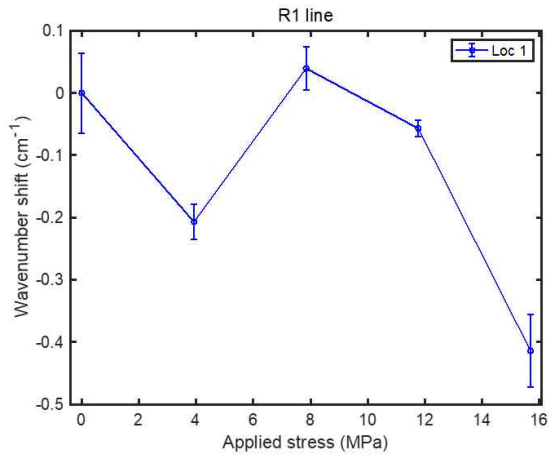


(g) 시편 4 - 계측위치 10

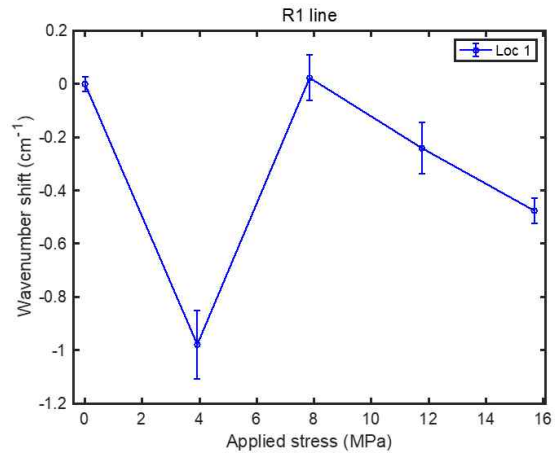


(h) 시편 4 - 계측위치 11

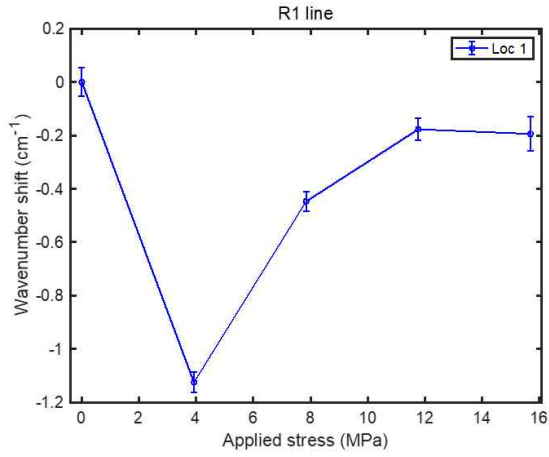
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 (계측위치 4~11)>



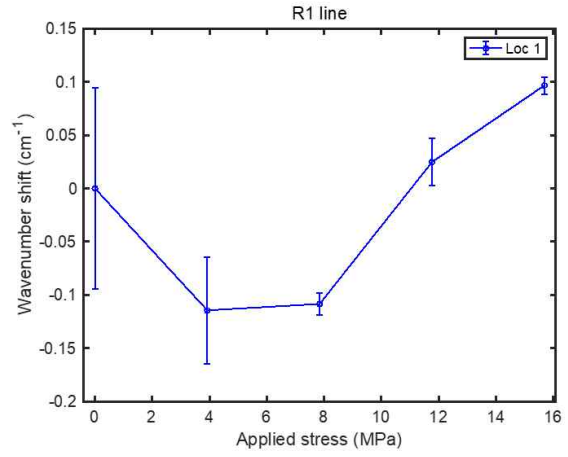
(a) 시편 4 - 계측위치 12



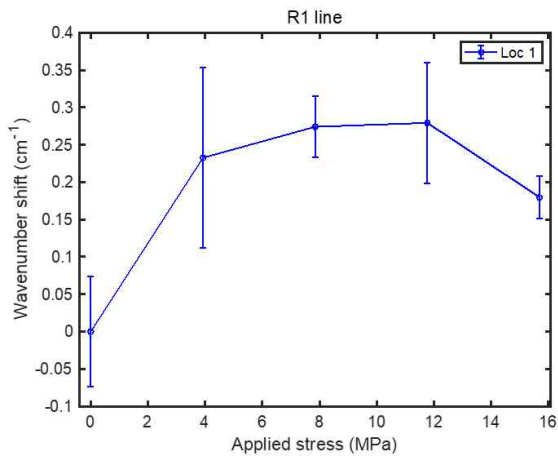
(b) 시편 4 - 계측위치 13



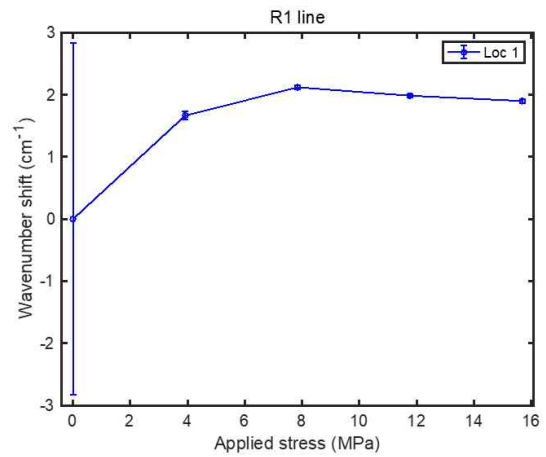
(c) 시편 4 - 계측위치 14



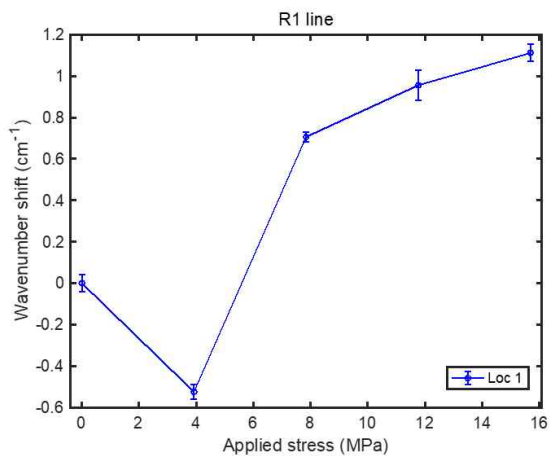
(d) 시편 4 - 계측위치 15



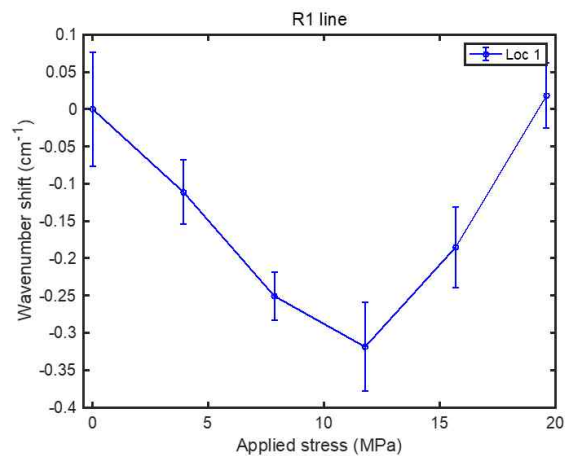
(e) 시편 4 - 계측위치 16



(f) 시편 4 - 계측위치 17



(g) 시편 4 - 계측위치 18

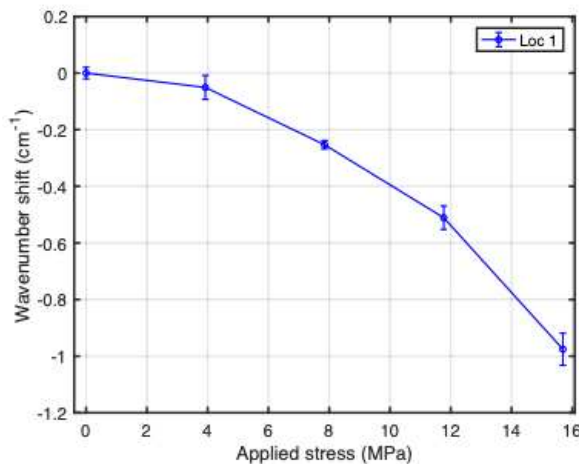


(h) 시편 4 - 계측위치 19

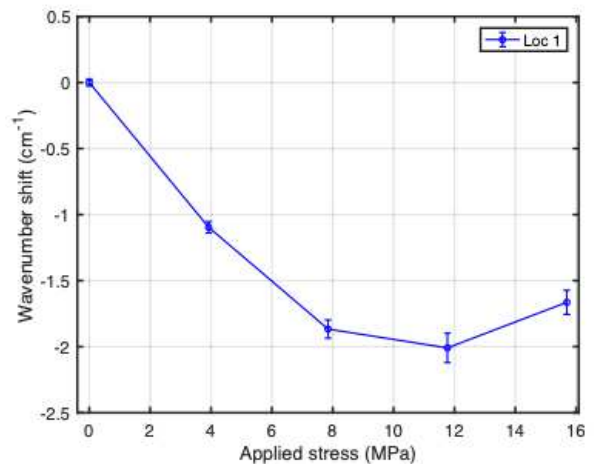
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 (계측위치 12~19)>

④ 시편 5 (산화알루미늄 13%)

시편 5의 경우에도 시편 4와 유사하게, 대부분의 경우에서 산화알루미늄 형광스펙트럼의 intensity가 $2,000\text{ cm}^{-1}$ 이상이었고, 그 intensity가 시편 2, 3보다 월등히 많음을 실험적으로 확인하였다. 시편 5에 대해서도 동일하게 4 MPa의 증분으로 16 MPa까지 하중을 인가하였을 경우, 시편 5-계측위치 1에서 볼 수 있듯이, 하중-파수 관계가 선형관계에 가깝고, 16 MPa를 인가할 경우 음의 방향으로 약 1 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다른 계측위치(계측 위치 2(아래그림 (b)))에 대한 실험에서는 12 MPa를 인가할 때까지는 하중-파수 관계가 선형 관계에 있으며, 16 MPa를 인가할 경우 시편이 일부 파괴되며, 일부 인장응력을 받는 것을 확인하였다.



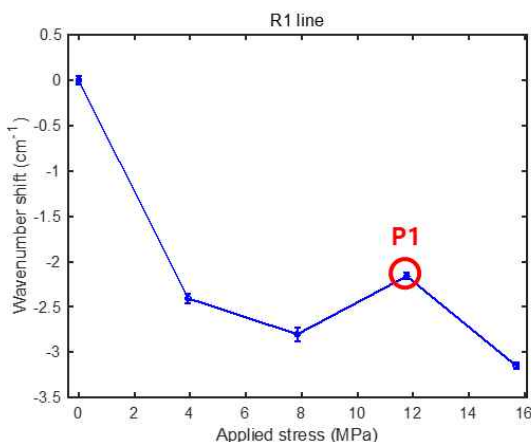
(a) 시편 5 - 계측위치 1



(b) 시편 5 - 계측위치 2

<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계(시편 5)>

시편 5-계측 위치 3의 경우에는 이와 같은 파괴 양상을 조금 더 정확하게 확인할 수 있다. 아래 그림은 시편에 12 MPa의 압축하중을 인가할 때 발생하는 스펙트럼을 분석하여 얻은 하중-파수 관계 그래프 이다. 본 그림을 통하여, 하중-파수 변화 관계가 선형관계에 있음을 확인할 수 있고, 12 MPa를 인가(아래그림 P1지점)할 경우 시편이 일부 파괴되어, 일부 인장응력을 받는 것을 확인하였다. 우측 그림(아래그림 b)의 경우에는 압축하중 시험에서 사용된 시험시편의 파괴후 모습을 보인다. 그림에 보이는 수평방향 균열은 압축하중이 약 11~12 MPa 인가된 시점에서 발생한 균열이다.

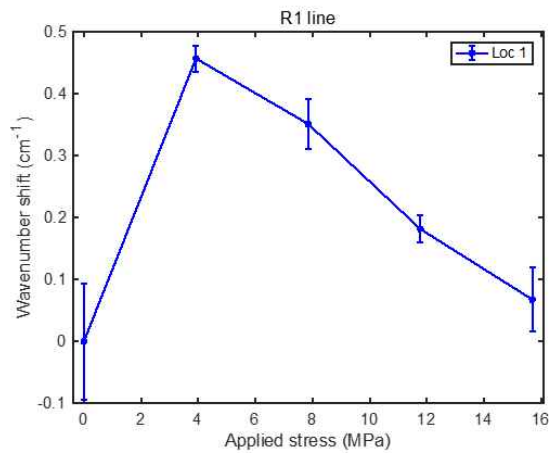


(a) 시편 5 - 계측위치 3

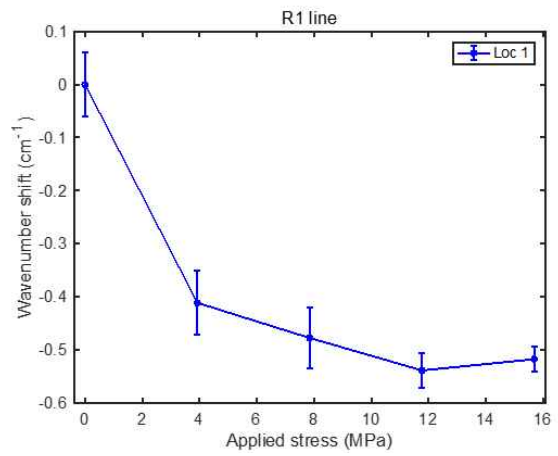


(b) P1 (12 MPa) 시점에 발생 시작된 균열

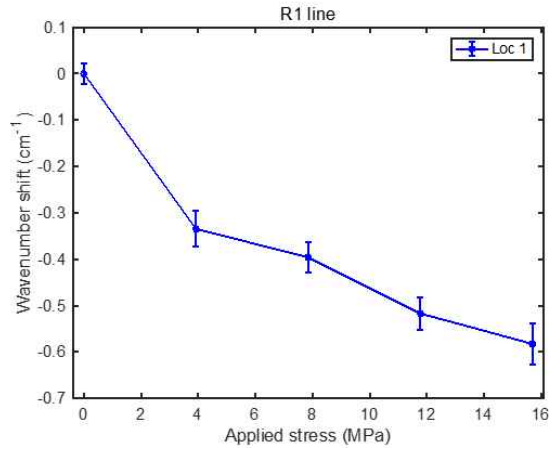
<계측 위치3 (시편 5) 에서의 하중-파수 변화 관계 및 균열발생 시편>



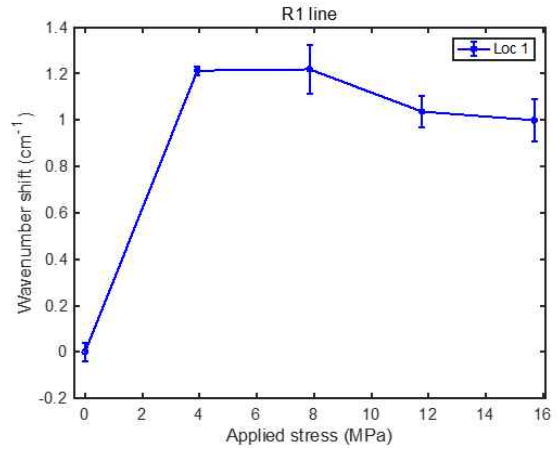
(a) 시편 5 - 계측위치 4



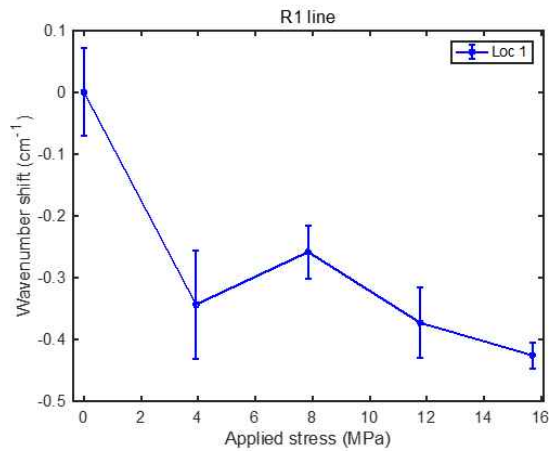
(b) 시편 5 - 계측위치 5



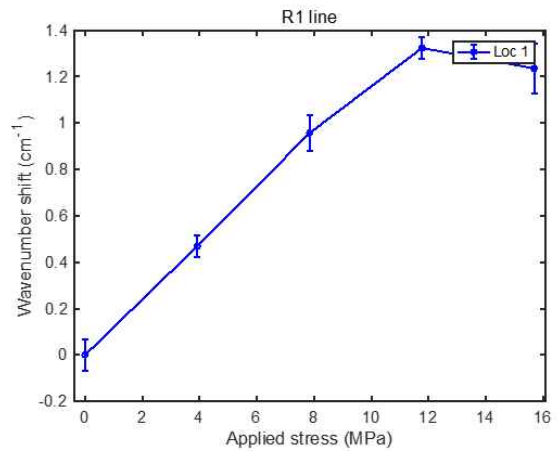
(c) 시편 5 - 계측위치 6



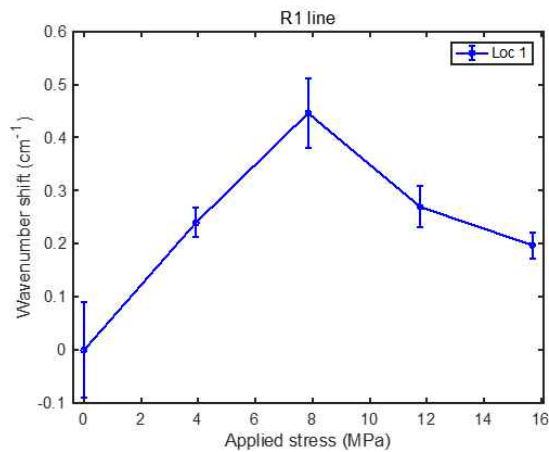
(d) 시편 5 - 계측위치 7



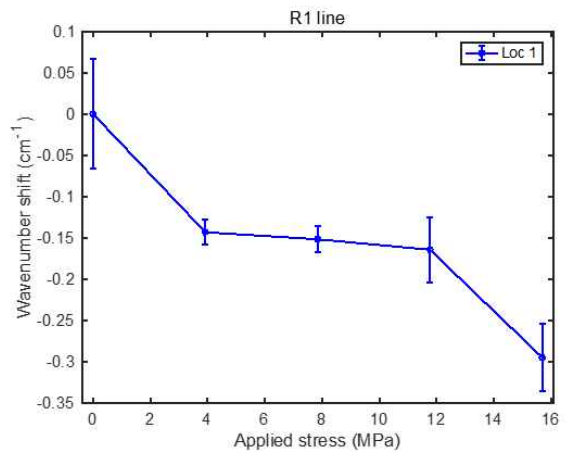
(e) 시편 5 - 계측위치 8



(f) 시편 5 - 계측위치 9

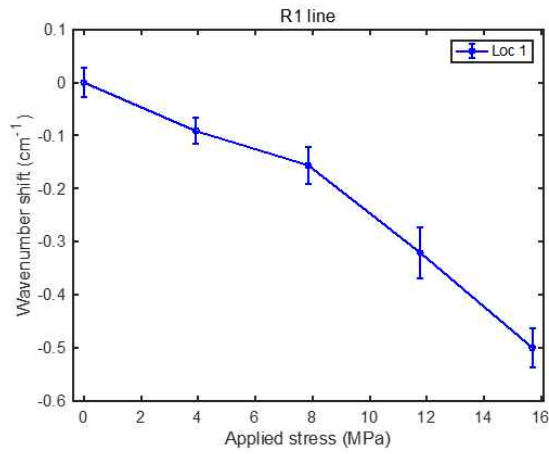


(g) 시편 5 - 계측위치 10

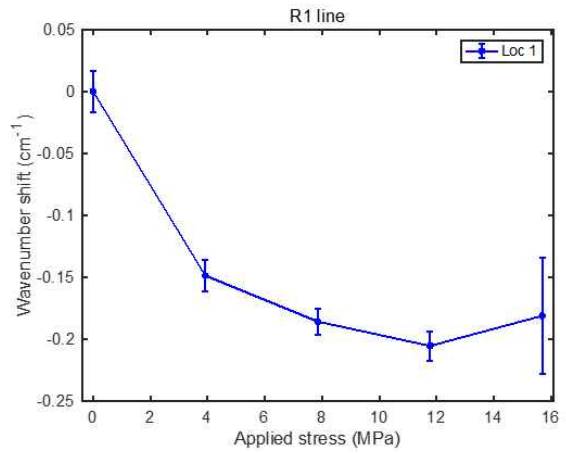


(h) 시편 5 - 계측위치 11

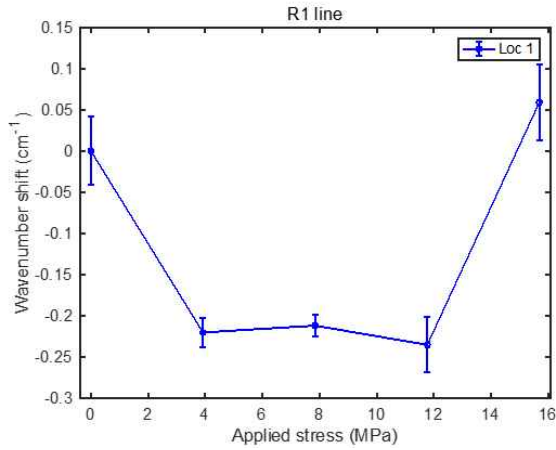
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 (계측위치 4~11)>



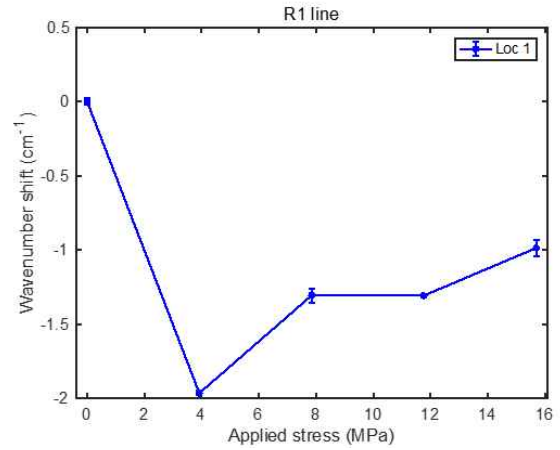
(a) 시편 5 - 계측위치 12



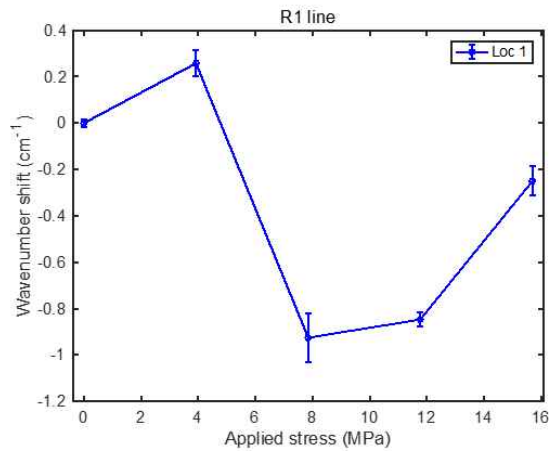
(b) 시편 5 - 계측위치 13



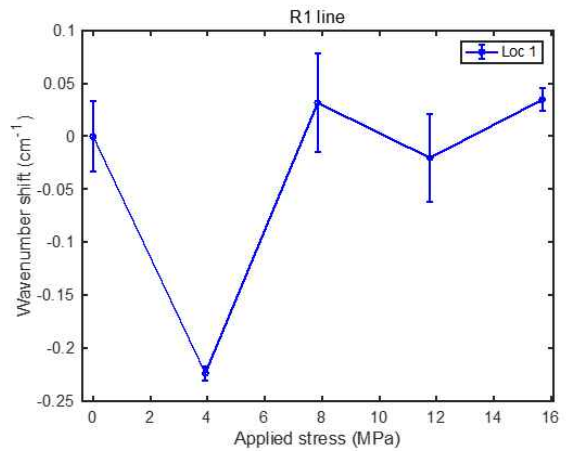
(c) 시편 5 - 계측위치 14



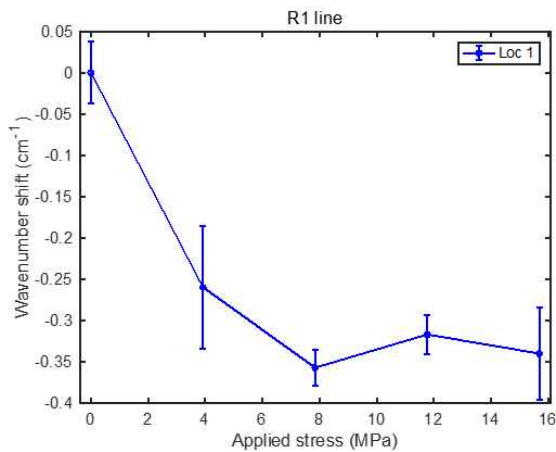
(d) 시편 5 - 계측위치 15



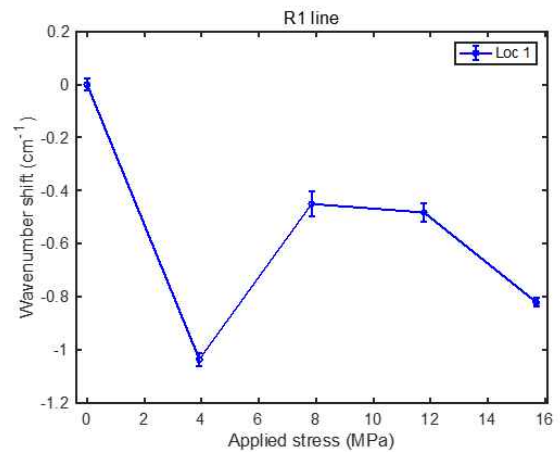
(e) 시편 5 - 계측위치 16



(f) 시편 5 - 계측위치 17

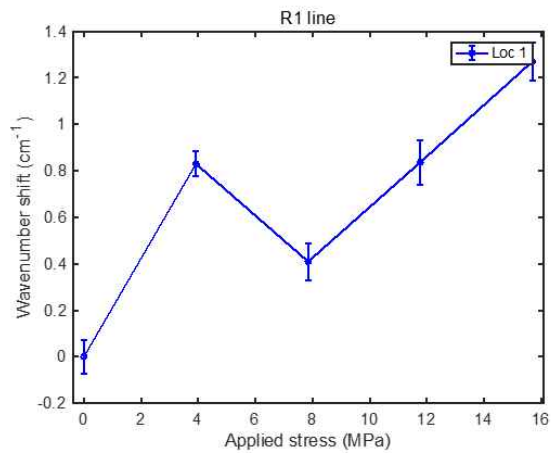


(g) 시편 5 - 계측위치 18

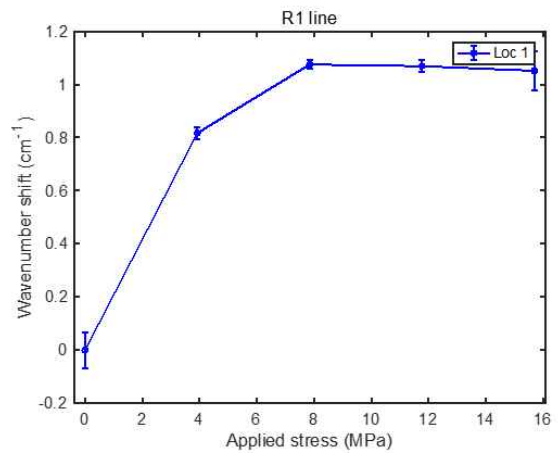


(h) 시편 5 - 계측위치 19

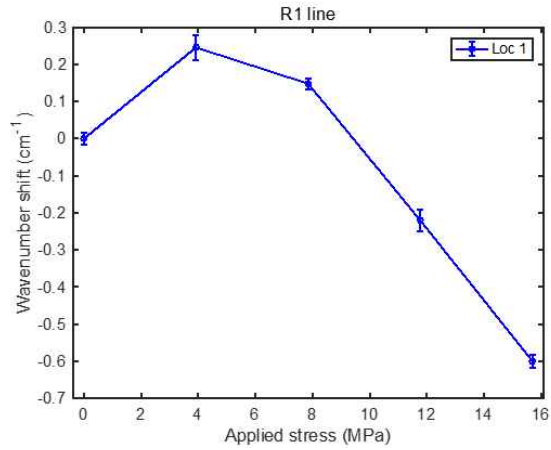
<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 (계측위치 12~19)>



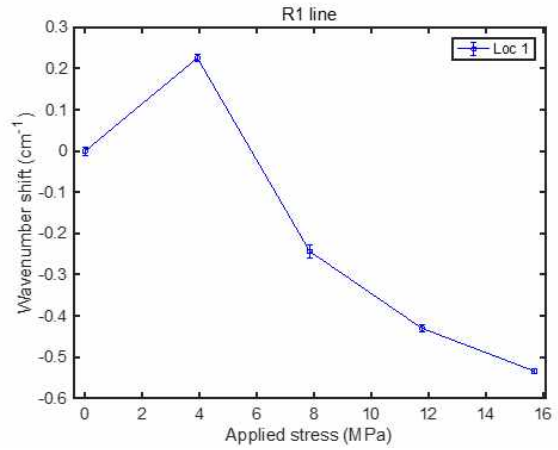
(a) 시편 5 - 계측위치 20



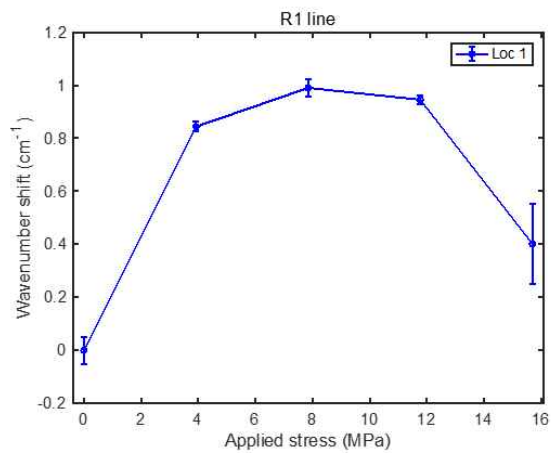
(b) 시편 5 - 계측위치 21



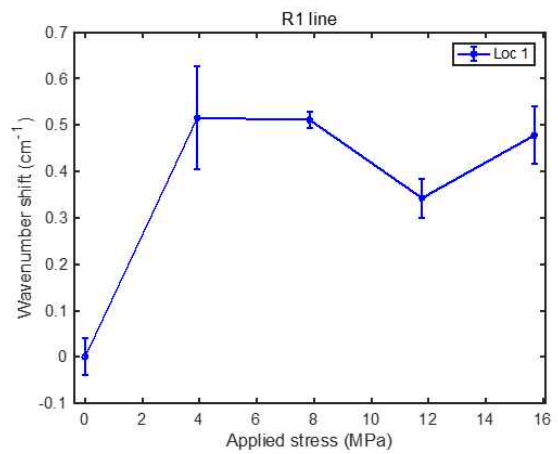
(c) 시편 5 - 계측위치 22



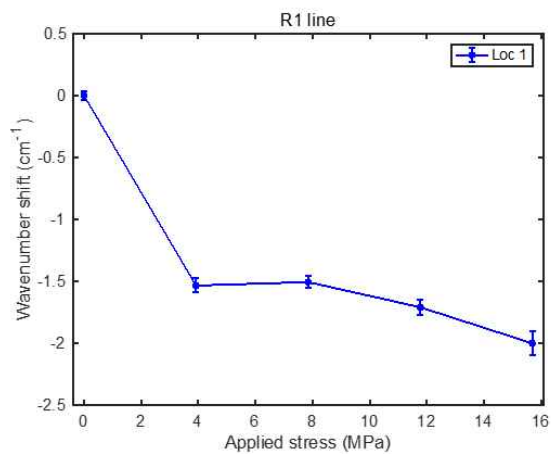
(d) 시편 5 - 계측위치 23



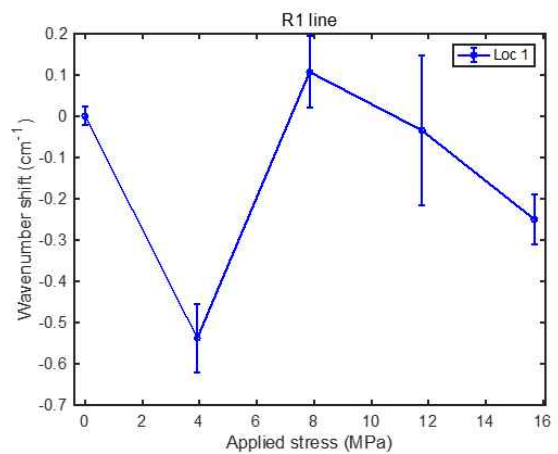
(e) 시편 5 - 계측위치 24



(f) 시편 5 - 계측위치 25



(g) 시편 5 - 계측위치 26



(h) 시편 5 - 계측위치 27

<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 (계측위치 20~27)>

계측위치 1~3 결과 이외에도, 동일한 배합비를 같도록 제작한 시편 5 들의 임의의 지점들에서 계측한 스펙트럼을 분석하여 하중-파수 변화 관계를 분석하고, 위 표(계측위치 4~27)에 일괄적으로 나타내었다.

시편 5의 경우에도 시편 4와 유사하게, 미소 조사 지점마다 각기 다른 스펙트럼 이동량을 보이지만, 그 크기가 대부분 작은 것으로 관찰되었다. 계측위치 7, 9, 15, 20, 21, 26의 경우에는 그 스펙트럼 이동량이 크기 때문에, 해당 계측 위치를 포함한 넓은 면적에 대한 콘크리트 응력을 측정한다면, 대상 시편에 인가된 전역적(global) 응력의 크기를 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

3.5.4. 시멘트 모르터 압분광 계수 도출

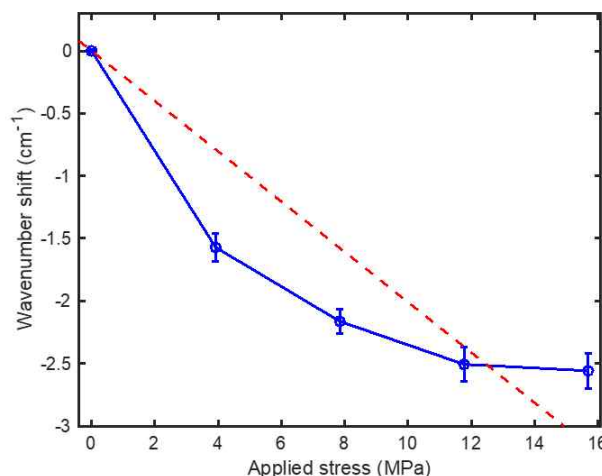
응력 평균화 방법이 개발되었다고 가정한다면, 위에서 측정된 하중-파수 변화 관계로부터, 압분광계수(piezospectroscopic coefficient)를 계산할 수 있다. 여기서 압분광계수란, 아래 식과 같이 인가된 응력값과 파수 변화의 관계를 나타내는 상수이며, 해당 값은 하중-파수 변화 그래프를 linear curve fitting 함을 통하여 계산할 수 있다.

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

여기서, $\Delta\nu$ 는 파수 변화 (cm^{-1}) Π_{ij} 는 압분광 계수, σ_{ij} 는 인가된 응력 (MPa)을 나타낸다. 본 연구에서는, 시편 3, 4, 5에서 계측된 대표적인 하중-파수 변화 그래프들로부터 각각의 압분광 계수를 도출하도록 한다. 여기서, 대표적인 하중-파수 변화 그래프는 각 하중에 대하여 파수 변화가 큰 그래프를 의미한다. (시편 2 의 경우에는 낮은 분광 검출률로 인하여, 본 연구에서는 압분광 계수를 도출하지 않는다.)

① 시편 3

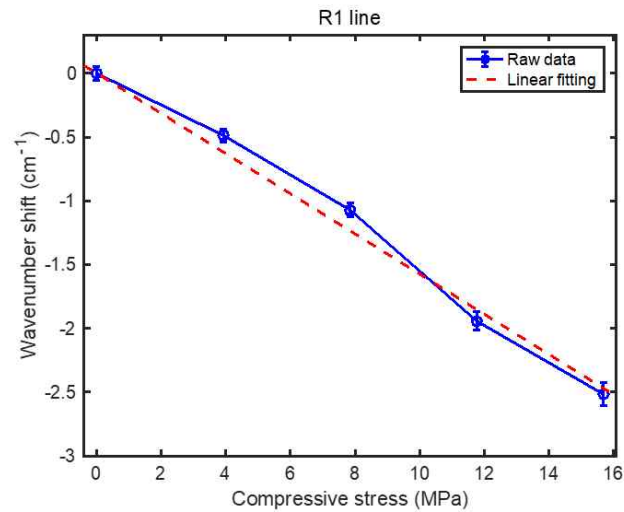
시편 3 - 계측위치 1에서는 아래와 같은 하중-파수 변화가 관찰된다. 따라서 하중-파수 변화를 선형으로 가정하고, linear curve fitting을 수행하여, 압분광 계수를 도출할 수 있다. 본 경우에는, $\Pi_{ij} = -4.975 \text{ MPa}/\text{cm}^{-1}$ ($R^2 = 0.7$)로 계산될 수 있다.



<하중-파수 변화 관계로부터 압분광 계수 도출 (시편 3 - 계측위치 1)>

② 시편 4

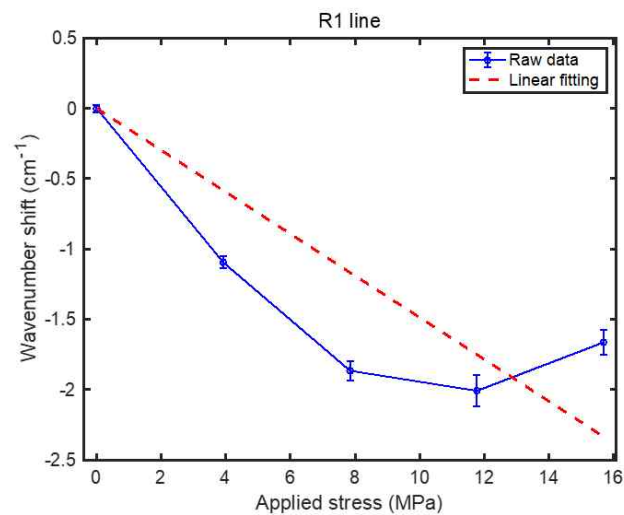
시편 4 - 계측위치 2에서는 아래와 같은 하중-파수 변화가 관찰된다. 따라서 하중-파수 변화를 선형으로 가정하고, linear curve fitting을 수행하여, 압분광 계수를 도출할 수 있다. 본 경우에는, $\Pi_{ij} = -6.353 \text{ MPa/cm}^{-1}$ ($R^2 = 0.9$)로 계산될 수 있다.



<하중-파수 변화 관계로부터 압분광 계수 도출 (시편 4 - 계측위치 2)>

③ 시편 5

시편 5 - 계측위치 2에서는 아래와 같은 하중-파수 변화가 관찰된다. 따라서 하중-파수 변화를 선형으로 가정하고, linear curve fitting을 수행하여, 압분광 계수를 도출할 수 있다. 본 경우에는, $\Pi_{ij} = -6.72 \text{ MPa/cm}^{-1}$ ($R^2 = 0.5$)로 계산될 수 있다.

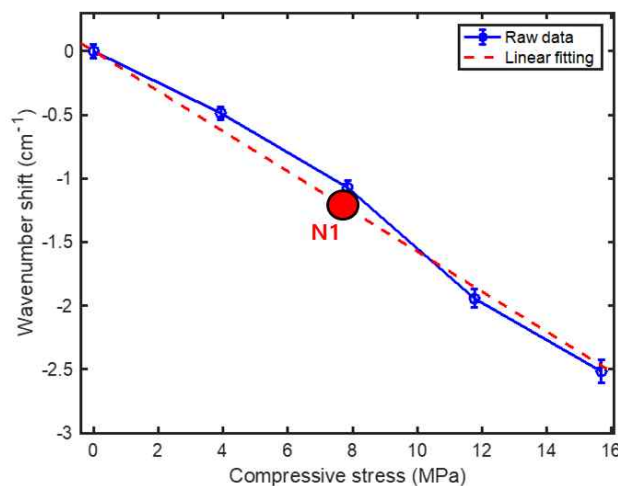


<하중-파수 변화 관계로부터 압분광 계수 도출 (시편 5 - 계측위치 2)>

3.5.5. 압분광 계수를 이용한 시멘트 모르터 응력 측정

위 장에서 대표 시편 3개(시편 3~5)에 대한 압분광 계수를 도출하였다. 그 중에서 가장 R^2 값이 높은 시편 4의 압분광 계수를 이용하여, 동일 시편에 대한 응력 측정을 수행하였다. 이를 통하여, 본 방법에 대한 반복가능성을 검토하고자 하였다.

이를 위하여, 시편 4에 약 20 kN (7.8 MPa)의 압축력을 단번에 인가하고, 레이저를 표면에 조사하여, 형광스펙트럼을 수집하였다. 이때 사용된 레이저는 532 nm이고, 50 mW을 출력을 이용하였으며, 3 초 동안 형광스펙트럼을 수집하였다. 단, 데이터 평균화는 수행하지 않았다. 수집된 스펙트럼의 배경스펙트럼을 제거하고, peak deconvolution을 수행한 결과, 파수 변화(spectral shift)는 -1.2186 cm^{-1} (std.=0.0373) 이었다. 이를 압분광 계수 ($-6.353 \text{ MPa/cm}^{-1}$)와 곱할 경우, 최종적인 값으로 7.74 MPa을 얻게 되며, 이를 인가된 하중 이론값과 비교하면 약 1.3 %의 오차를 갖는다.



<하중-파수 변화 관계로부터 압분광 계수 도출 (시편 4 - 계측위치 2)>

질적 성과지표 ③

[질적 성과지표③] 계측 정확도 $\pm 5 \text{ MPa}$ 이하

→ 본 연구에서는 하중-파수 변화 관계로부터 도출된 압분광 계수를 이용하여, 콘크리트 시편에 대한 현재 응력을 측정하려고 한다.

- 시편의 면적 ($50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} = 2,500 \text{ mm}^2$)
- 시편에 인가된 압축력 20 kN
- 시편에 인가된 응력(이론값) = $20,000 / 2,500 = 8 \text{ MPa}$
- 발생한 파수 변화 = -1.2186 cm^{-1}
- 도출된 압분광 계수 = $-6.353 \text{ MPa/cm}^{-1}$
- 압분광 계수로부터 계산된 응력(실험값) = $6.353 \times 1.2186 = 7.7418 \text{ MPa}$

→ 따라서, 레이저를 이용하여 시편에 인가된 응력을 측정하는 경우, 도출된 압분광 계수로부터 실험적으로 현재 응력을 측정할 수 있음을 확인하였다. 즉, [질적 성과지표③]에 해당하는 '계측 정확도 $\pm 5 \text{ MPa}$ 이하'를 달성할 수 있음을 확인하였다.

3.5.6. CNT(Carbon nanotube)기반 자가센싱 대비 경제성 분석

본 연구(압분광법을 이용한 콘크리트 응력측정기술개발)에 앞서, 많은 연구자를 통하여 CNT를 이용한 자가센싱용 스마트시멘트(혹은 스마트콘크리트)개발과 관련된 연구가 진행된 사례가 있다. 하지만, 시멘트에 첨가된 CNT의 비율이 각 연구마다 상이하기 때문에, 두 기술의 경제성 비교를 위하여 특정 비율만을 선택하여 분석하는 것에는 다소 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는, 시멘트(혹은 콘크리트)에 포함된 첨가제 비율이 동일하다는 조건하에 두 기술에 대한 경제성을 비교하고자 한다. 즉, 동일한 양의 알루미늄이 포함된 시멘트와 CNT가 포함된 시멘트의 가격을 비교하고자 한다.

동일한 가격분석을 위하여, 화학제품 전문 생산업체인 sigma aldrich에 공개된 단가를 동일 무게에 대하여 비교한다. 단, 제품의 입도 및 순도에 따라 가격에 차이가 있으므로, 6종의 제품의 환산단가를 평균한 값을 비교하도록 한다. 첨가제별 기준무게 및 1kg 기준 환산단가는 아래 표와 같다.

<알루미늄의 기준무게별 단가 및 환산단가>

	제품 1	제품 2	제품 3	제품 4	제품 5	제품 6
기준무게 (g)	100 g	500 g	100 g	500 g	1,000 g	1,000 g
단가 (원)	214,200 원	711,800 원	99,400 원	297,100 원	477,800 원	99,500 원
환산단가 (원/1kg)	2,142,000 원	1,423,600 원	994,000 원	594,200 원	477,800 원	99,500 원
평균환산단가 (원/1kg)						955,183 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

위 표와 같이, 알루미늄 분말의 평균단가가 CNT 보다 약 1000배 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 양의 분말을 콘크리트에 배합(또는 센싱용 미분말 매립)한다고 할 때, 알루미늄이 포함된 스마트콘크리트의 가격이 CNT가 포함된 스마트콘크리트의 가격보다 1000배 이상 저렴한 것으로 판단된다.

3.5.7. 소결

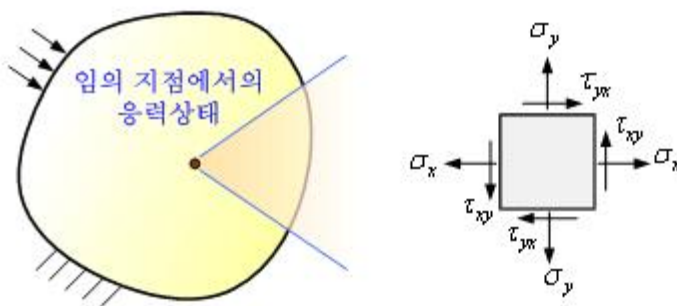
본 장에서는, 산화알루미늄이 포함된 시편에 대한 압분광 효과를 규명하기 위하여, UTM(300톤, 20톤급) 장비와 형광 분광 시스템을 이용하여 스마트 시멘트 모르타르 시편에 압축하중을 인가하고, 형광 분광 시스템을 이용하여 하중이 인가된 시편의 형광 스펙트럼을 수집하며, 그 데이터를 분석하여 압분광 효과를 규명하였다. 압분광 효과를 압축하중-변위가 선형인 구간에 대하여 규명하기 위하여, 산화알루미늄이 첨가된 시멘트 모르타르(시편 2~5) 최대강도 실험을 수행하였다. 실험결과 약 20 MPa 이하의 압축하중 구간에서 압축하중-변위가 선형임을 확인하였고, 이로부터 80%의 안전축인 16 MPa를 최대 압축하중으로 선정하여 압분광 효과 규명을 위한 압축하중시험을 수행하였다.

시편 2, 3의 경우에는, 비록 압축하중을 인가한 경우의 하중-파수 변화 관계를 확인할 수 있었으나, 시편 표면에 존재하는 산화알루미늄의 절대량이 레이저로 측정할 수 있을 만큼 충분하지 않았기 때문에, 하중 변화에 따른 파수 변화를 많은 지점에서 확인하기 어려웠다.

시편 4, 5의 경우에는 시편 2, 3에 비하여 많은 산화알루미늄이 시편 표면에 존재함을 분광검출을 시험을 통하여 확인하였고, 이를 통하여, 각 하중단계별로 시편에 인가된 하중으로 인하여 스펙트럼이 이동하는 양(spectral shift)을 레이저를 이용하여 비접촉식으로 측정할 수 있었다. 또한, 하중-파수 변화의 선형적인 관계를 이용하여, 그 압분광 계수를 도출하고, 시편 4에 대해서는 반복성에 대한 시험도 수행하였다. 따라서, 산화알루미늄을 시멘트의 응력측정 센서로 넣고자 할 경우, 배합과정에서 물의 제외한 전체중량 대비 최소 10% 이상의 산화알루미늄을 첨가제로 사용해야한다.

하지만, 이때 측정되는 스펙트럼의 이동량은, UTM을 이용하여 시편에 압축하중을 인가한 경우에 발생하는 여러 가지 응력성분의 조합에 의한 것으로, 이를 이용하여 하중-파수 변화의 관계를 정립하기는 매우 어렵다. 다시 말해서, 입방체 시편에 일축 압축응력(또는 단축응력, uniaxial stress)이 작용할 경우, 해당 시편에는 푸아송 비(poisson ratio)만큼 가로 변형(또는 부풀)도 발생하게 된다. 하지만 푸아송 비는 재료가 균질(homogeneous)하고, 등방성(isotropic) 또는 직교등방성(orthotropic) 할 경우에만 일정하므로, 본 연구에서 사용된 콘크리트와 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 압분광법을 이용한 응력 측정의 경우, 폰 미세스 응력(Von Mises stress)계산 방법(아래 그림)과 유사하게, 시편의 임의의 지점에서 유발되는 각 응력 성분들의 조합을 의미한다. 따라서, 0.085 mm의 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, 3.6 장에서는 전역적 응력의 크기를 측정할 수 있도록, 응력을 평균화 하는 방법을 제안하고, 이를 검토하였다.



$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

<Von Mises stress 계산 방법>

여기서, 평균응력을 계산할 때의 주요 응력 성분은 spectral intensity가 높은(산화알루미늄이 많은) 지점으로부터 측정된 값이 될 것이며, 기타 spectral intensity와 파수 이동이 작은 값들은 평균화 과정에서 상쇄될 것으로 기대된다.

3.6. 비접촉식 스마트 콘크리트의 재료시험

3.6.1. 스마트 콘크리트 시편제작

재료시험, 압분광 효과 규명시험에 사용된 스마트 콘크리트 시편은, KS F 2403 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법에 준하여 그 배합비와 시편 크기 등을 결정하였다. 따라서, 그 스마트 콘크리트 시편의 형태는 원기둥이며, 크기는 직경 100 mm, 높이 200 mm이다. 모든 경우에 대하여, 시멘트는 제 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 물-시멘트비는 40-50%를 유지하였다. 또한 굵은 골재의 최대크기는 25 mm로 제한하였으며, 몰드를 제거한 후 상온에서 습윤양생을 진행하였다. 콘크리트 제작에 추가된 알루미나의 비율은 전체 중량대비 0%, 5%, 10%, 15%이다. 다만, 시편 제작과정을 수월하게 하도록 약간의 알루미나를 기본적으로 모든 시편에 첨가하였으므로, 편의상 알루미나의 비율을 5%, 10%, 15%, 20%로 칭하도록 한다. 압분광 효과의 경우, 시편에 들어가는 산화알루미늄의 함량비의 영향을 받는다. 따라서, 그 배합비 검토가 필요하지만, 현재까지 콘크리트에 들어있는 산화알루미늄의 함량비를 고려하여 압분광 효과를 검토한 연구는 세계적으로 전무하다. 따라서, 본 연구에서는 콘크리트 첨가제가 구조적 역할도 하면서 센서 역할도 할 수 있는 적절한 함량비를 찾고자 한다. 아래 표는 최종적으로 선택 및 검증된 산화알루미늄 첨가 시편의 함량비를 보인다. 모든 시편에 대하여 시멘트 총량대비 1% 미만의 폴리카르본산계 고성능 감수제가 첨가 되었다.

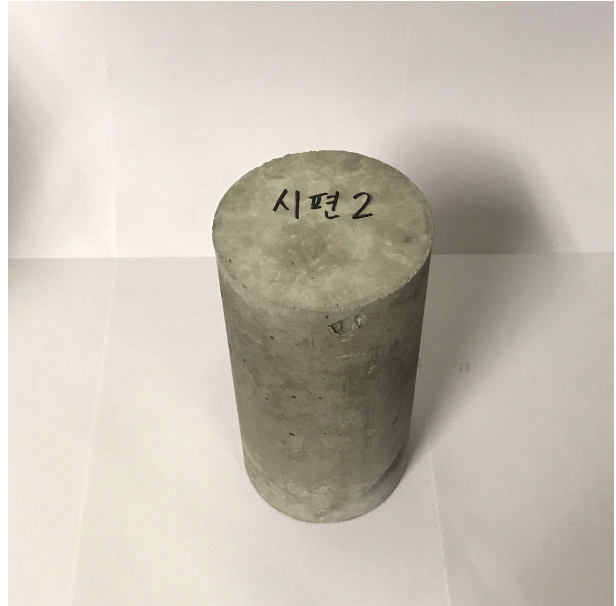
<첨가제 함량비>

시편종류	산화알루미늄 분말 첨가 시편			
시편번호	시편 1	시편 2	시편 3	시편 4
첨가제 비율	5 %	10 %	15 %	20 %

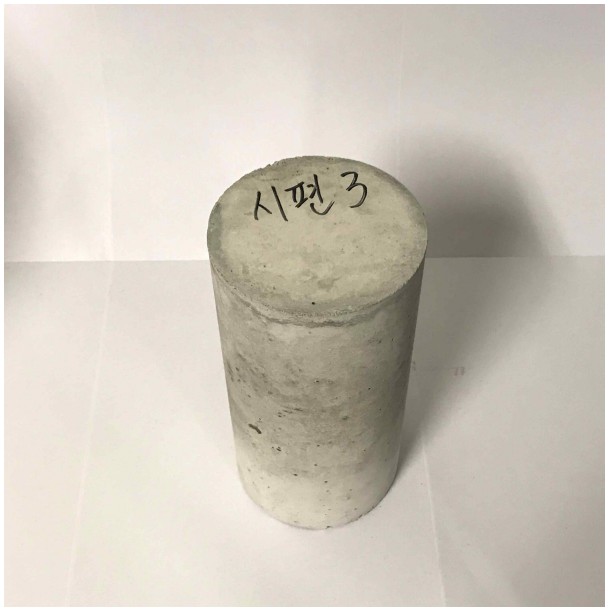
스마트 콘크리트의 산화알루미늄 첨가비율에 대한 (1) 분광 검출율을 측정하고, (2) 스마트 콘크리트의 압분광 효과를 검증하기 위하여, 아래와 같이 4 종류의 시편을 제작하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 KS F 2403에 따라서 시편을 제작하였으며, 각각 알루미나의 양이 5%, 10%, 15%, 20%에 해당한다. 시편 1, 2 의 경우에는 일반적인 회색이지만, 알루미나의 첨가량이 많은 시편 3, 4 의 경우에는 육안으로 보기에 흰색을 띄는 것을 확인할 수 있다.



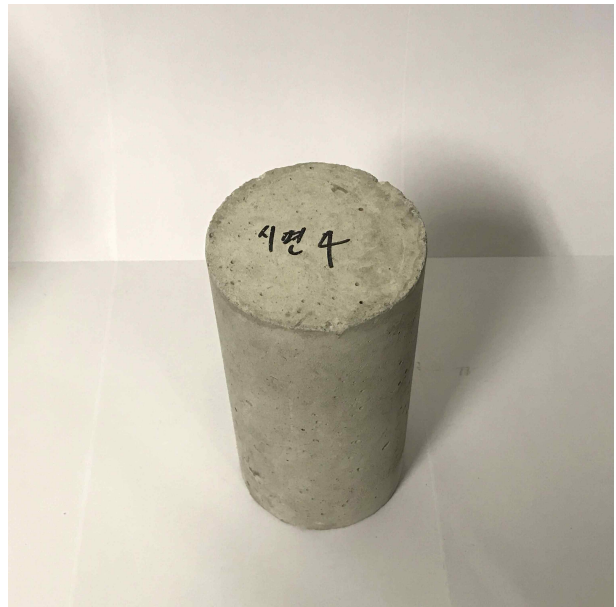
(a) Specimen 1 (SP #1)
알루미나 함유량: 5 %



(b) Specimen 2 (SP #2)
알루미나 함유량: 10 %



(c) Specimen 3 (SP #3)
알루미나 함유량: 15 %

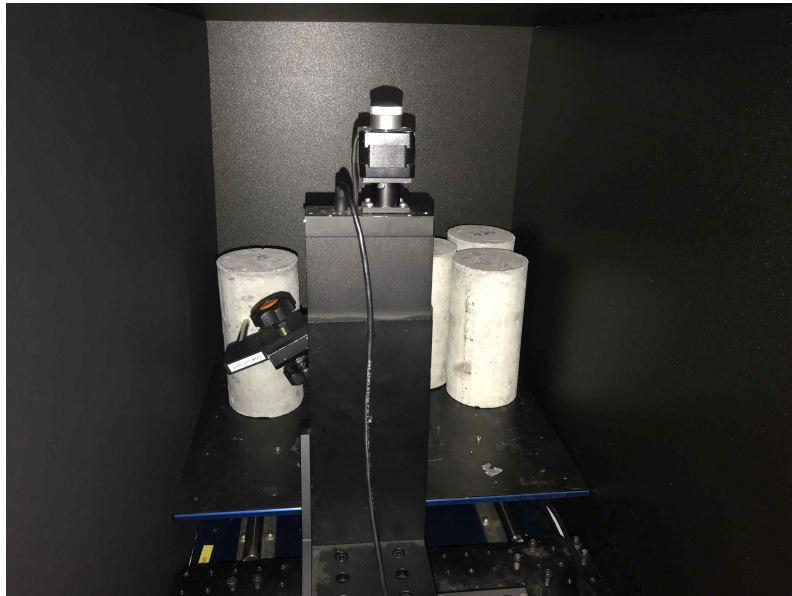


(d) Specimen 4 (SP #4)
알루미나 함유량: 20 %

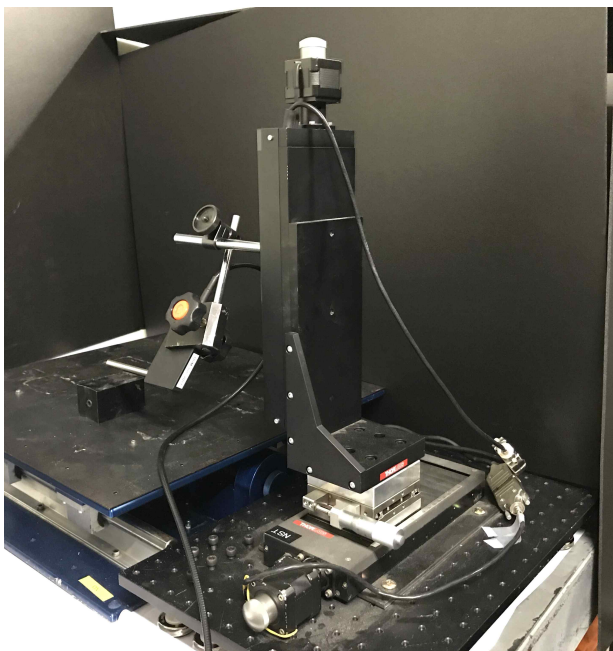
<알루미나가 첨가된 압축시험용 콘크리트 시편 (5%, 10%, 15%, 20%)>

3.6.2. 스마트 콘크리트 시편 분광검출을 시험 셋업

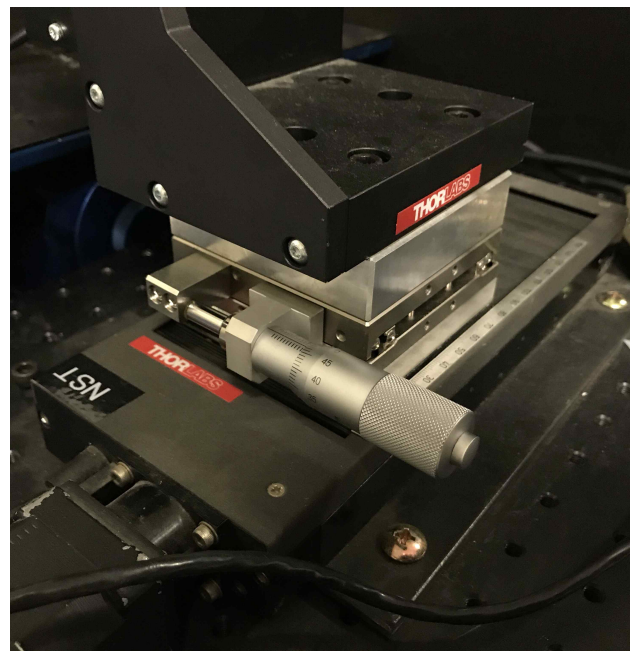
스마트 콘크리트에 배합된 알루미늄의 함유량에 따른 분광검출을 정밀하게 측정하기 위해, 실내 암실을 구축하여 분광검출을 시험을 수행하였다. 아래 그림은 본 연구를 통하여 구축된 실내 암실을 보인다. 또한, 초점 거리를 정밀하게 조절할 수 있도록, 3차원 스테이지 지그부에 수동 미세이동 장치를 부착하여, 초기 초점 거리 오류에서 오는 오차를 줄이도록 하였다. 아래 그림은 구축된 시스템을 보인다.



<분광검출을 계속 실험을 위한 실내 암실 구축>



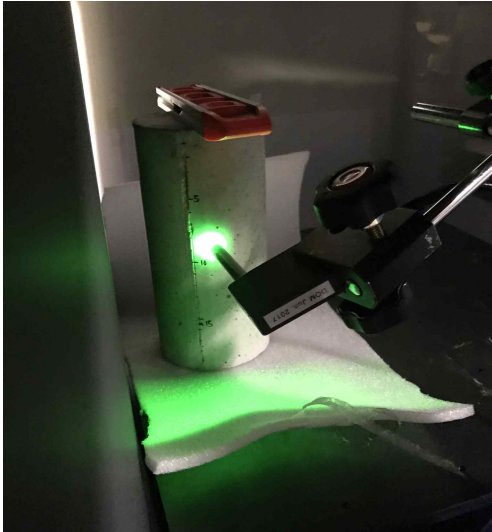
(a) 맵핑용 2차원 맵핑 스테이지



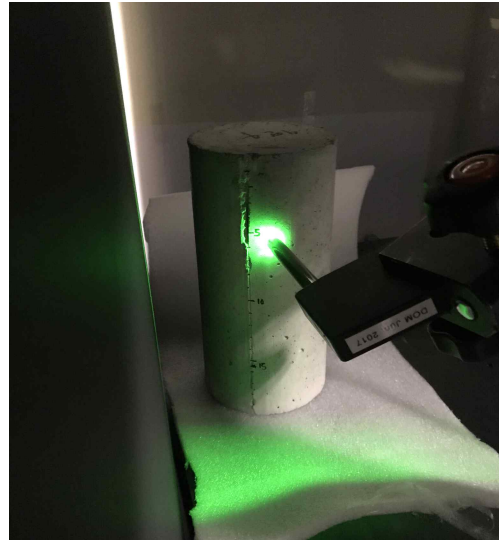
(b) 초점거리 미세조절 장치

<분광검출을 계속 실험을 위한 실내 암실 구축>

콘크리트 시편 제작과정에서 발생한 시편하부의 고르지 못한 면에 의하여, 맵핑(Mapping) 과정에서 초점거리가 변화할 수 있다. 즉, 위치별로 달라진 초점거리로 인하여, 분광검출율 결과가 정확하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 시편하부에 약 5 mm 두께의 스폰지를 배치하여, 시편의 흔들림을 방지하고, 모터스테이지 하부의 수평 조절 나사를 조절하여, 초점거리가 최대한 같을 수 있도록, 시편과 장비를 수평화 하였다.



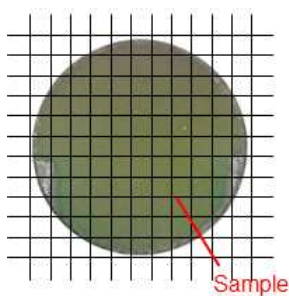
(a) 시편 수평화



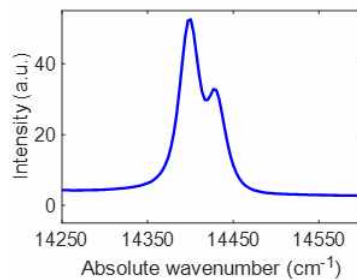
(b) 분광검출율 계측 실험

<알루미나 함유율별 분광검출율 계측실험>

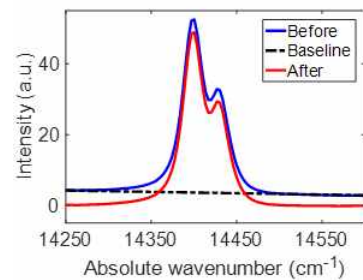
정밀한 분광검출율 측정 및 비교를 위하여, 분광시스템을 이용하여 일부지역에 대한 맵핑(mapping) 시험을 수행하고, 해당 지역에서 수집한 스펙트럼을 분석하여 분광검출율을 비교하였다. 이를 위하여, 자동으로 맵핑을 통해 계측된 데이터를 분석하고, 이를 2차원화 하여 도시화 하는 알고리즘을 개발하여 본 연구에 사용하였다.



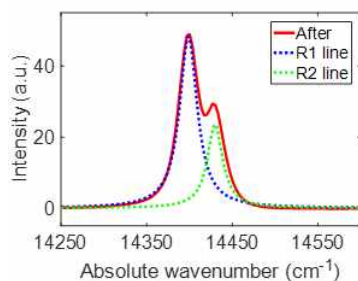
(a) Grid design



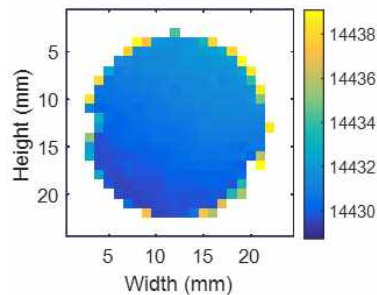
(b) Spectrum collection



(c) Baseline elimination



(d) R1, R2 line
deconvolution



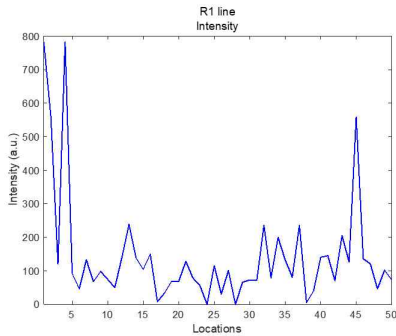
(e) Intensity map

<알루미나 분광검출율 계산을 위한 맵핑 방법>

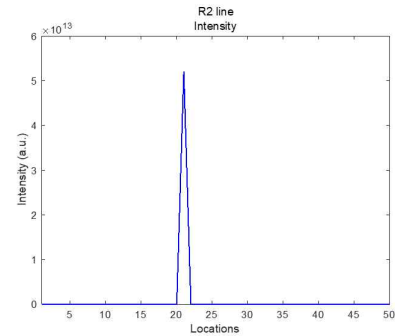
3.6.3. 스마트 콘크리트 시편 분광검출을 시험

3.6.3.1. 스펙트럼별 Intensity 확인

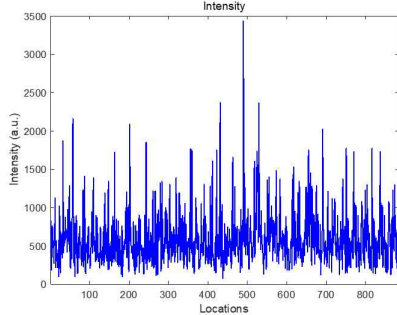
알루미나 함유량이 각기 다른 콘크리트 시편들로부터 계측된 intensity 값들을 아래에 나열하였다. 동일한 조건하에서 분광검출율을 계산할 수 있도록, 중앙부 961 지점 (31×31 pixels)에서 각 1초 동안 스펙트럼을 계측하였다. 마치 진폭처럼 보이는 값이 각 시편별 평균 intensity 범위를 나타낸다. 알루미나가 5% 함유된 시편의 경우, 그 최대 intensity가 800 이하였고, 데이터에 대한 신뢰도가 매우 떨어진다. 그 외, 결과값에 대한 정리는 3.6.3.1. 절에서 통합적으로 하도록 한다.



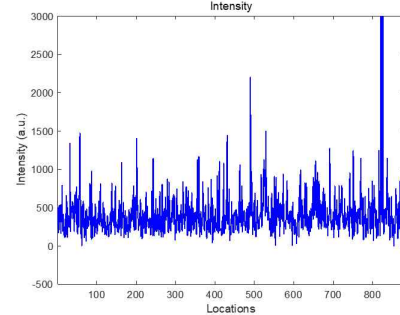
(a) R1 line (알루미나 함유량: 5 %)



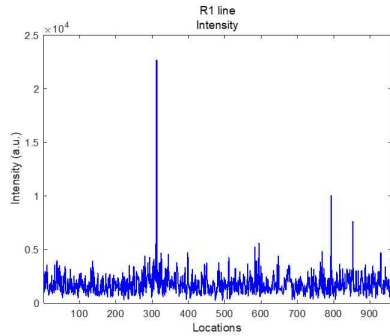
(b) R2 line (알루미나 함유량: 5 %)



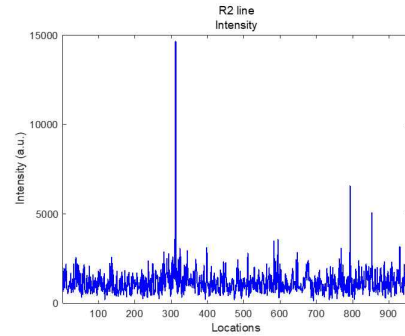
(c) R1 line (알루미나 함유량: 10 %)



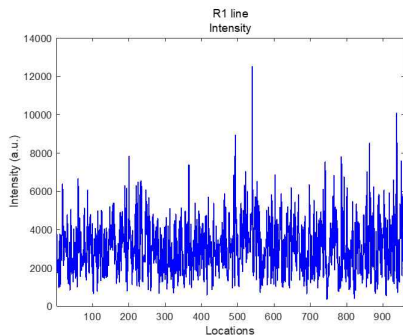
(d) R2 line (알루미나 함유량: 10 %)



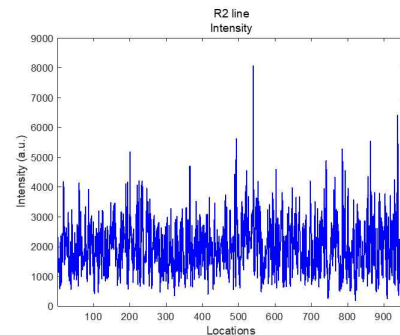
(e) R1 line (알루미나 함유량: 15 %)



(f) R2 line (알루미나 함유량: 15 %)



(g) R1 line (알루미나 함유량: 20 %)

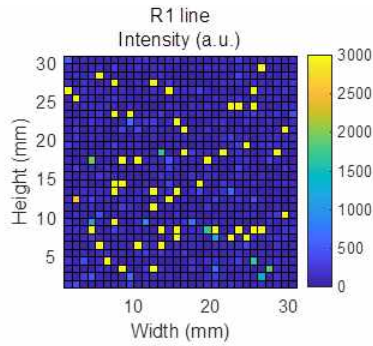


(h) R2 line (알루미나 함유량: 20 %)

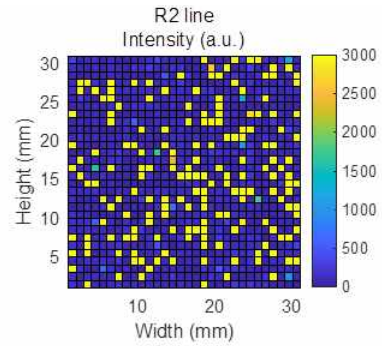
<알루미나 함유량에 따른 스펙트럼 intensity>

3.6.3.2. Intensity mapping

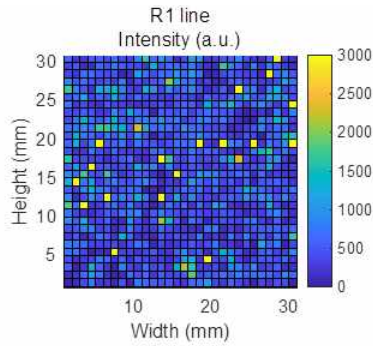
알루미나 함유량에 따른 Spectral intensity map은 아래와 같다. 각 시편에 대한 상대적인 비교를 위하여, 시각화 범위를 0~3,000으로 설정하고 아래에 그 결과를 나타내었다. 그 결과 알루미나 함유량이 높을수록, 노란색(intensity 3,000 이상) 부분이 많음을 확인할 수 있었다.



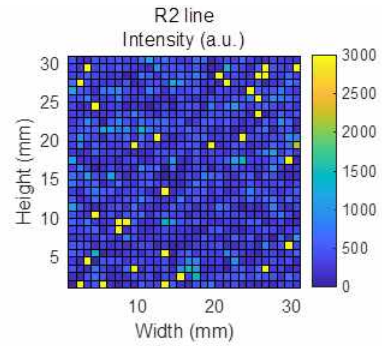
(a) R1 line (알루미나 함유량: 5 %)



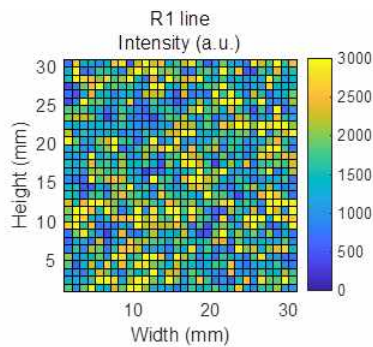
(b) R2 line (알루미나 함유량: 5 %)



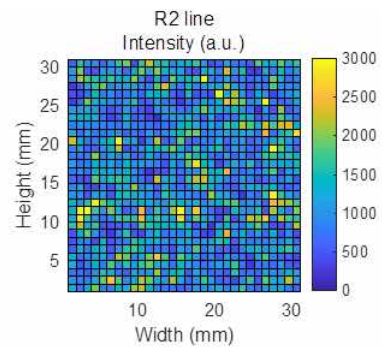
(c) R1 line (알루미나 함유량: 10 %)



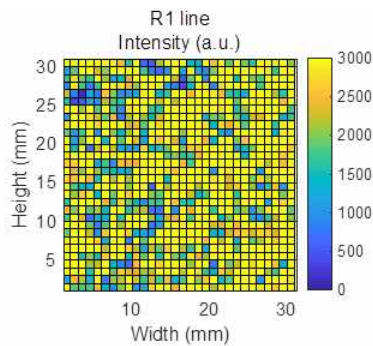
(d) R2 line (알루미나 함유량: 10 %)



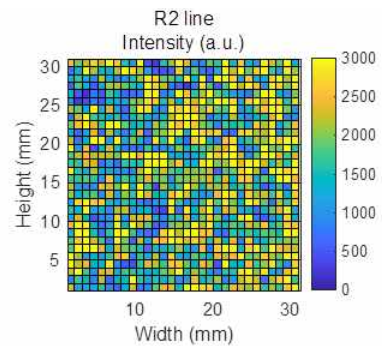
(e) R1 line (알루미나 함유량: 15 %)



(f) R2 line (알루미나 함유량: 15 %)



(g) R1 line (알루미나 함유량: 20 %)



(h) R2 line (알루미나 함유량: 20 %)

<알루미나 함유량에 따른 스펙트럼 intensity map>

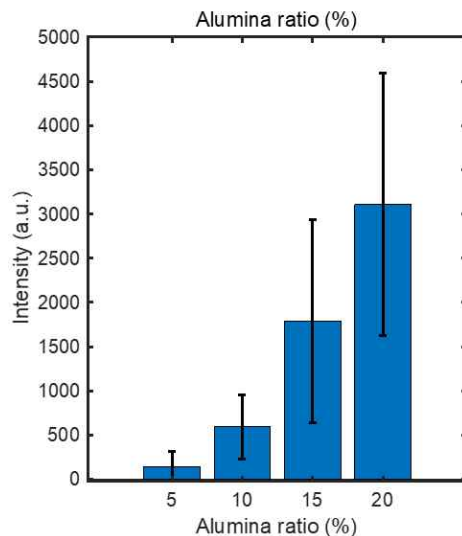
3.6.3.3. 첨가제 함량비에 따른 분광검출율 비교

아래 표와 그림에 알루미나 함유량에 따른 분광검출율의 변화를 보인다. 아래에서 알 수 있는 것처럼, 시편에 포함된 알루미나의 비율이 늘어날수록, 그 분광검출율도 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 압분광법을 이용한 응력측정의 정확성을 높이기 위해서는, 알루미나가 콘크리트에 최대한 많이 포함되어 있어야 한다. 최대 범위는 콘크리트의 물리적 거동특성을 고려해서 결정되어야 하므로, 본 연구에서는 제시하지 않는다.

과제 본 연구 제안시에는 콘크리트에 포함된 배합비에 따른 압분광상수를 규명하려고 하였다. 하지만, 알루미나가 5%, 10% 들어간 경우에는 포터블 분광기로 계측된 분광 검출율(즉, intensity)의 평균값이 아래와 같이 약 600 이하였다. 따라서, 본 기관에서 보유중인 시스템의 spectral resolution을 고려하면, R1 line의 intensity가 최소 3,000 이상 되어야 curve fitting 후의 결과 값을 보증할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서는, 평균 intensity가 3,000이상인 알루미나 함유율 20%인 시편에 대해서만 압축하중 시험을 진행하도록 하도록 한다.

<알루미나 함유량에 따른 분광검출율(intensity)와 파수(absolute wavenumber)>

Specimen	Intensity (a.u.)		Absolute wavenumber (cm ⁻¹)	
	R1 (std.)	R2 (std.)	R1 (std.)	R2 (std.)
SP #1	144.11 (168.38)	1.04×10 ¹² (7.28×10 ¹²)	14401.397 (4.435)	1.80×10 ¹⁴ (7.02×10 ¹⁴)
SP #2	593.42 (363.34)	2691.14 (67702.28)	14403.604 (1.074)	1.96×10 ¹⁰ (5.80×10 ¹¹)
SP #3	1786.93 (1149.21)	1160.31 (742.92)	14404.534 (0.327)	14434.663 (0.411)
SP #4	3108.65 (1480.59)	2009.87 (953.91)	14404.168 (0.323)	14434.219 (0.315)



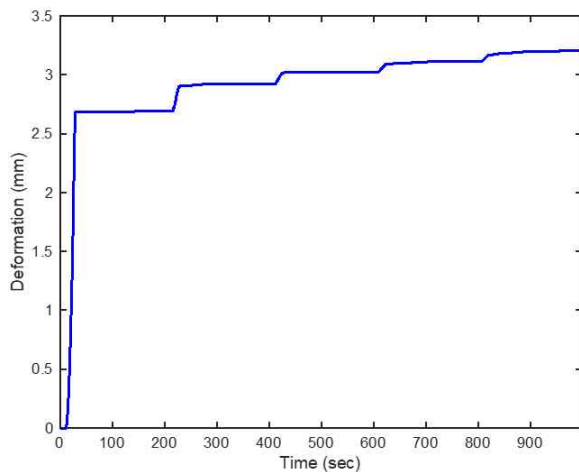
<알루미나 함유량에 따른 분광검출율 변화 (R1 line 기준)>

3.7. 콘크리트에 적합한 평균응력측정 기술 개발

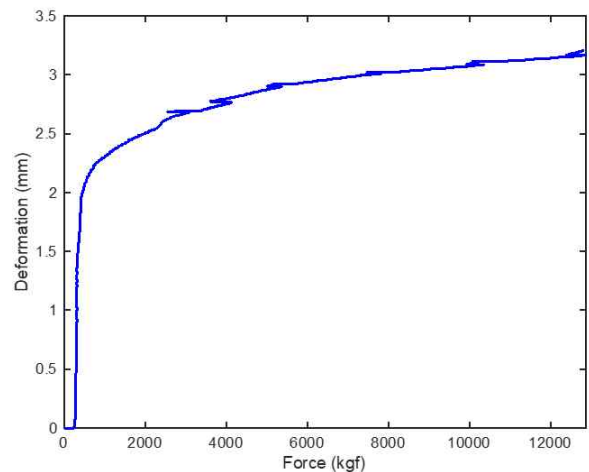
약 13톤의 압축력을 콘크리트 시편에 재하 할 경우, 아래그림과 같이 재하 당시의 초기 큰 변위를 제외하고도, 약 0.5~1.0 mm 수직방향 변위가 추가적으로 발생한다. 따라서, 0.085 mm의 레이저 조사면적을 갖는 일반 프로브를 사용하였을 경우, 초기에 레이저가 조사된 위치와, 최종하중이 가해졌을 때의 위치는 달라지는 경우가 발생한다.

또한, 만약, 콘크리트 재령 과정에서 콘크리트 내부에 응력이 발생할 경우, 콘크리트 내부 산화알루미늄에도 잔류 응력이 발생하여, 초기 파수 값에 일부 차이가 발생할 수 있다. 즉, 한 지점(레이저 조사부 직경: 0.085mm)에 대한 하중-변위 관계를 실험적으로 검증하기에 어려움이 있다.

따라서, 콘크리트의 변위를 고려하여, 약 1.5 mm 이상에 해당하는 지점에 대한 평균 응력을 예측할 수 있는 방법에 대한 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 두 가지 평균응력 예측 방법을 제안하고, 두 결과의 비교 및 검증을 수행하였다.



(a) 시간-변위 관계



(b) 하중-변위 관계

<계측 위치에 따른 하중-파수 변화 관계>

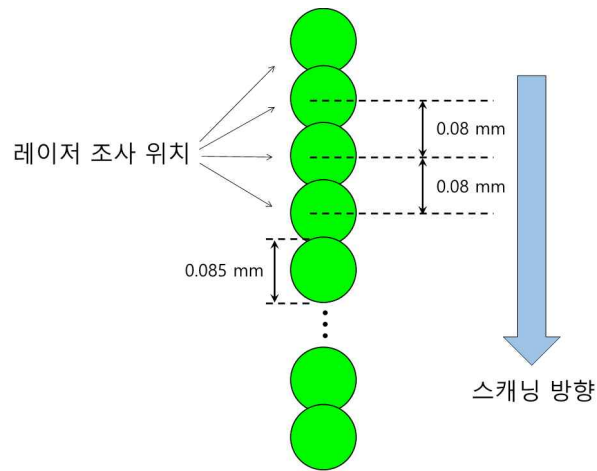
3.7.1. 평균 응력 예측 방법 1 : 축방향 스캐닝을 이용한 평균응력 예측방법

일반 프로브를 사용할 경우, 레이저 조사부의 직경이 0.085 mm 이다. 따라서, 본 연구를 통하여 구축된 맵핑 시스템을 이용하여, 예상 변위만큼 스캐닝을 할 수 있고, 이를 통하여 평균적인 응력을 예측할 수 있다. 단, 직경이 0.085 mm 이기 때문에, 예측 불확실성을 고려하여 0.08 mm 의 간격(0.005mm 겹침)으로 스캐닝을 수행한다.

본 연구에서는 0.08 mm 의 간격으로 21지점에서 스펙트럼을 수집하였다. 즉 전체 축방향 길이 1.6 mm 에 대한 예측값의 평균을 사용하게 된다.

해당 방법은, 스캐닝 수행시 각 예측 지점에 대한 파수 값을 개별적으로 계산하여, 그 평균값을 이용하는 것이 아니라, 스캐닝 동안에 발생하는 모든 스펙트럼을 누적하고, 하나의 큰 스펙트럼을 만들어, 한번의 peak deconvolution을 거쳐서 파수 값을 계산한다. 따라서, 그 안에서 “주로” 작용하는 응력에 의하여 해당 지역의 응력값이 결정되며, Spectral intensity가 낮은 경우에도 해당 방법을 사용할 수 있다는 장점이 있고, 이와 함께 데이터 분석 시간이 현저히 짧아진다는 장점이 있다.

아래 그림은 이와 같은 평균 응력 예측 방법의 개략도를 보인다.



<축방향 스캐닝을 통한 평균 응력 측정 방법 개략도>

3.7.2. 평균 응력 계측 방법 2 : 렌즈를 이용한 평균응력 계측방법

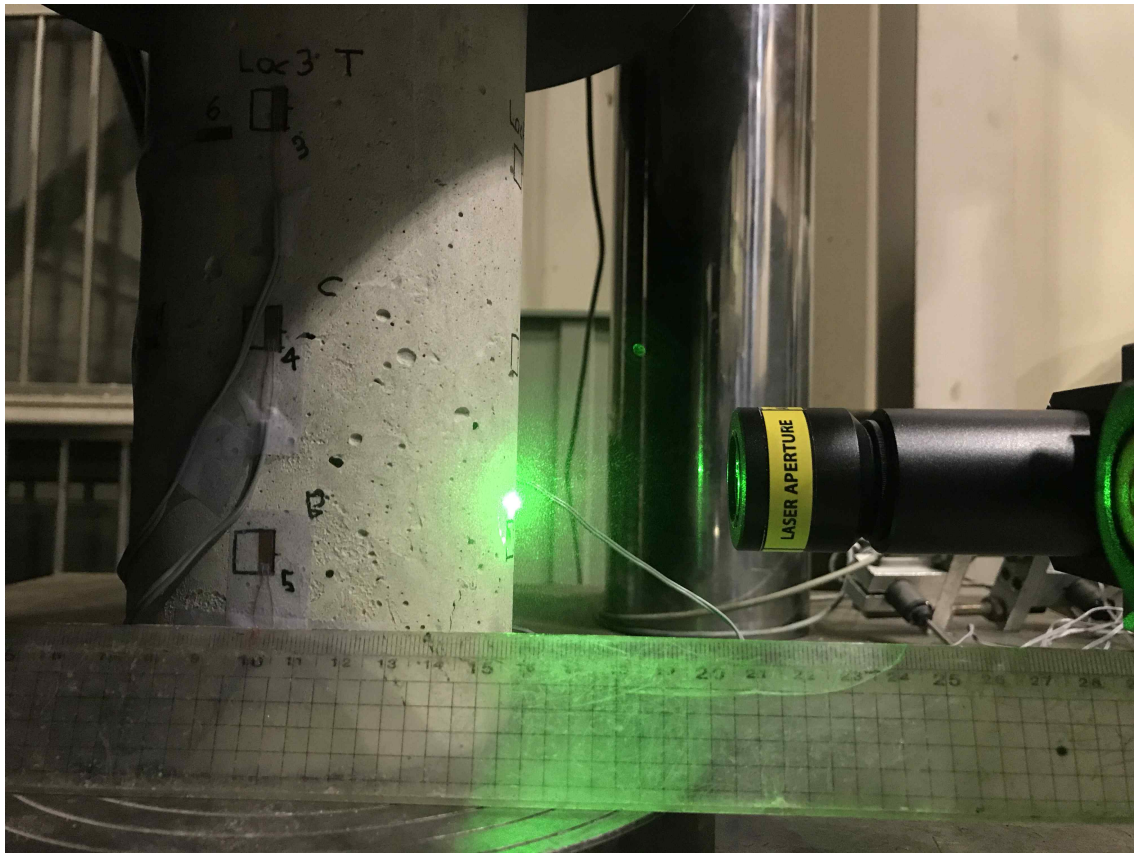
아래 그림과 같은 레이저를 이용하여 대상 시료의 표면으로부터 60 mm 거리에서 레이저를 조사할 경우, 레이저 조사부의 직경 약 2.3 mm 가 된다. 즉, 직경 2.3 mm 에 해당하는 원에서 얻어진 스펙트럼의 평균값을 계측하게 된다. 따라서, 본 방법을 이용하게 되면, 한 지점에서만 스펙트럼을 계측하면 되기 때문에, 축방향 스캐닝 방법보다 데이터 계측 시간을 짧게 할 수 있다.



<본 연구에서 사용된 프로브에 설치 가능한 줌 렌즈>

<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



<프로브를 이용한 레이저 조사 및 데이터 계측>

질적 성과지표 ②

[질적 성과지표②] 계측 이격거리 5 mm 이상

- 본 연구에서는 렌즈를 이용하여 한 지역에 대한 평균 스펙트럼을 얻고자 한다. 이로 인하여, 렌즈를 이용하여 60 mm 이격거리를 두고 대상물에 레이저를 조사할 경우, 레이저 조사면적의 직경이 약 2.3 mm에 이른다. (위 그림 참고)
- 그러므로, 렌즈를 사용하는 것을 통하여, [질적 성과지표②]에 해당하는 ‘계측 이격거리 5 mm 이상’ 를 달성할 수 있음을 확인하였다.

3.8. 비접촉식 스마트 콘크리트의 압분광 효과 규명

3.8.1. 압분광 효과 규명을 위한 시험 셋업

① UTM 장비 1

본 연구에서는 스마트 콘크리트 압분광 효과 규명을 위하여 두가지 UTM을 사용하였다. 사용된 첫 번째 UTM 장비의 전경은 아래와 같다. 해당 시스템은 하중유지시험을 수행할 수 없고, 시편이 파괴되어야만 실험을 종료할 수 있는 장비이다. 따라서, 압분광 효과 규명을 위하여 시험에 사용된 모든 시편은 파괴되었다. 즉, 동일시편에 대한 반복 시험을 수행할 수 없었다. 하지만, 본 기관에서는 1기의 분광 시스템만을 보유하고 있기 때문에, 시편 1개당 1개의 데이터만 얻을 수 없었다. 따라서, 해당 시스템으로부터 계측된 데이터는 본 보고서에는 소개하지 않도록 한다.



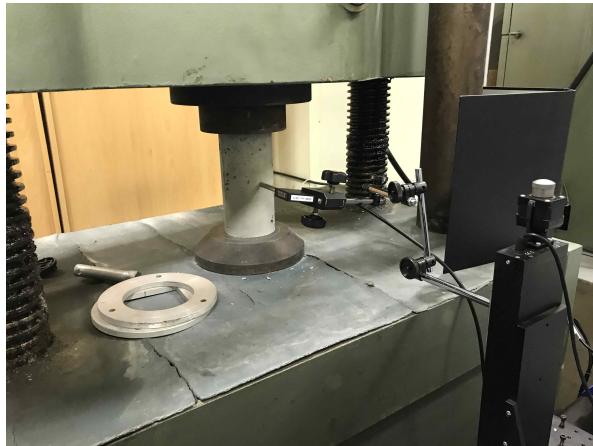
(a) UTM 장비 하중 재하부



(b) 제어부

<본 연구에서 사용된 UTM 장비 1>

또한, 사용된 UTM 장비 1 의 경우, 장비가 노후 되어, 기계에서 발생한 진동의 일부가 장비가 설치된 책상 하부로부터 분광 시스템까지 전달되었다. 따라서 이와 같은 진동이 실제 데이터에 일부 노이즈로 작용했을 것으로 예상된다. 또한, 해당 진동은 레이저 조사 직경(0.085mm)을 유지하는 것에도 일부 악영향을 끼쳤을 것으로 예상된다.



<UTM 장비1에 설치된 시편 및 레이저 조사 전경>



<압축하중 유지시험 수행을 위한 UTM 장비(1) 및 유지시험 후 파괴된 시험체>

② UTM 장비 2

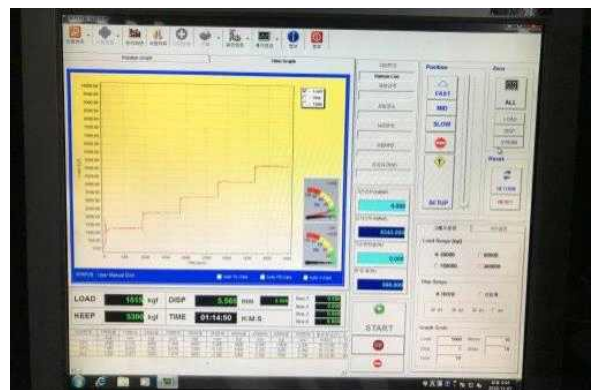
UTM 장비 2 의 경우, 300톤급 장비로써, 5단계의 하중유지시험이 가능하다. 해당 UTM 장비는 제작된 소프트웨어(그림)를 이용하여 구동된다. 본 연구에서 나타내는 모든 스펙트럼 데이터는 해당 장비를 통하여 인가된 하중상태에서 수집된 스펙트럼을 나타낸다.



<시멘트 압분광 효과 규명을 위한 300 톤급 UTM 셋업 2>



(b) UTM 컨트롤러



(c) UTM 구동 프로그램

<UTM 컨트롤러 및 구동 프로그램>

③ 분광기 시스템

형광 분광 시스템을 이용하여 하중이 인가된 시편의 형광 스펙트럼을 수집하고, 그 데이터를 분석하여 압분광 효과를 규명하였다.



(a) 실험 셋업 전경



(b) 532nm 레이저



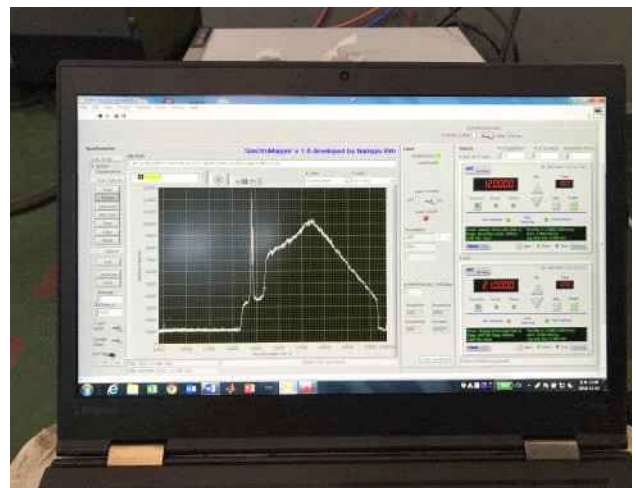
(c) 분광기



(d) 모터스테이지 컨트롤러



(e) 2차원 모터스테이지 및 프로브

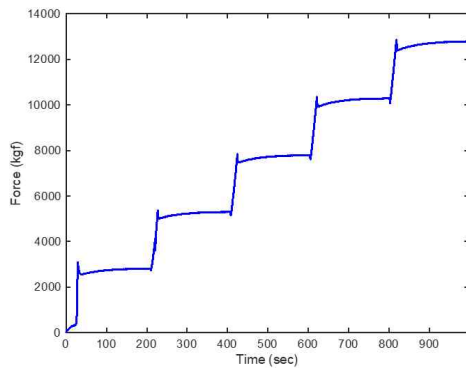


(f) 시스템 구동 프로그램

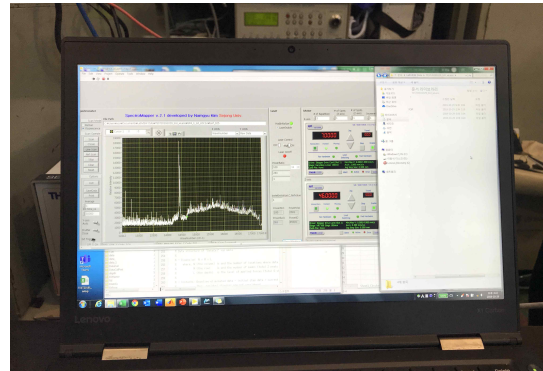
<콘크리트 압분광 효과 규명을 위한 분광기 시스템 셋업>

④ 실험 파라미터 선정

콘크리트가 선형적 거동을 하는 구간에 대해 압분광 현상을 구명하기 위하여, 최대 약 20 MPa의 압축응력을 5단계로 나눠 콘크리트 시편(알루미나 20%)에 인가하고, 각 응력단계에서의 스펙트럼을 계측하였다. 아래 그림(a)은 압축하중 유지시험에서 사용된 하중을 보이며, (b)는 스펙트럼 계측 화면(예)을 보인다.



(a) 압축하중 유지시험

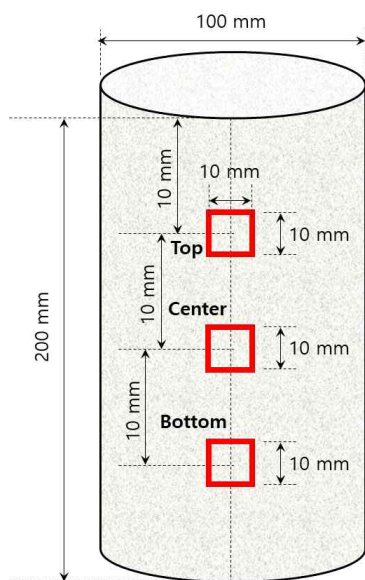


(b) 계측 화면

<하중 스텝 및 본 연구에서 개발된 시스템을 이용한 스펙트럼 계측 화면>

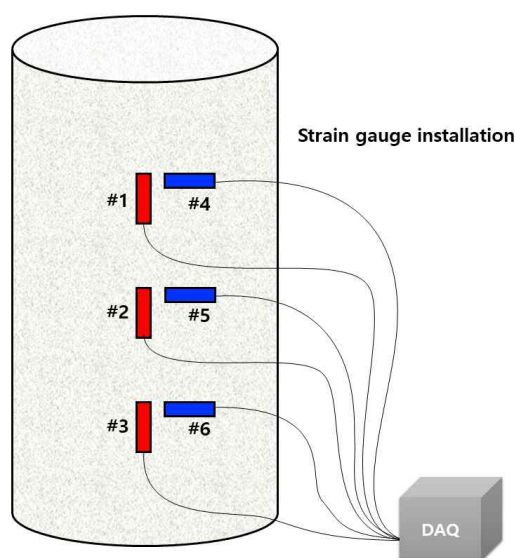
압분광 효과 규명을 위하여, 스펙트럼 계측 위치를 정하고 (1/4, 2/4, 3/4 지점) 시편 표면에 아래 그림(a)와 같이 사각형으로 표시하였다. 해당 사각형은 가로, 세로 10 mm이다. 또한, 이때의 거동을 규명하기 위하여, 아래 그림(b)와 같이 z방향(빨간색), x방향(파란색) 변형률계를 시편 표면에 설치하고, 압축하중 시험을 수행하였다. 여기서, 미소 면적에 대한 변형률을 측정하기 위하여, 강재용 변형률계를 부착하여 사용하였다.

추가적으로, 양생과정, 디몰딩 과정, 시편 이동과정에서 시편 표면에 이물질이 부착될 가능성이 있다. 따라서, 변형률계를 설치하기 이전에 알콜솜을 이용하여 시료의 표면을 세척하고, 10분 이상 건조시킨 후 실험을 진행하였다.



□ 레이저 조사 (irradiation) 위치

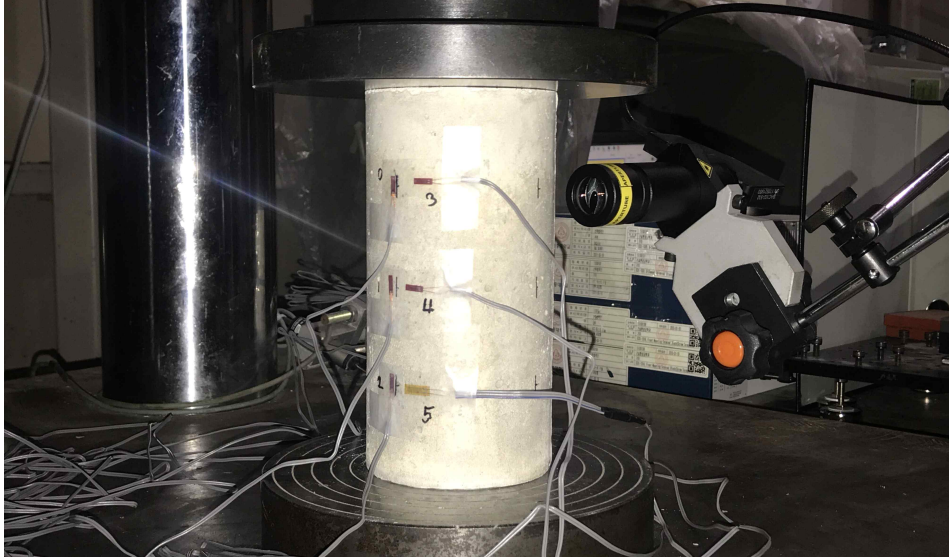
(a) 시편 치수 및 레이저 조사 위치



(b) 변형률계 설치 위치 및 방향성

<레이저 조사 위치 및 변형률계 설치 위치>

아래 그림은 실제 압축하중유지시험을 위해 UTM에 배치된 시편을 보인다. 변형률계 좌측(또는 우측)에 표기된 번호는 실험당시 사용한 센서 번호로써 #0~#5로 표기 되어 있으며, 본 보고서에서는 #1~#6에 해당한다.



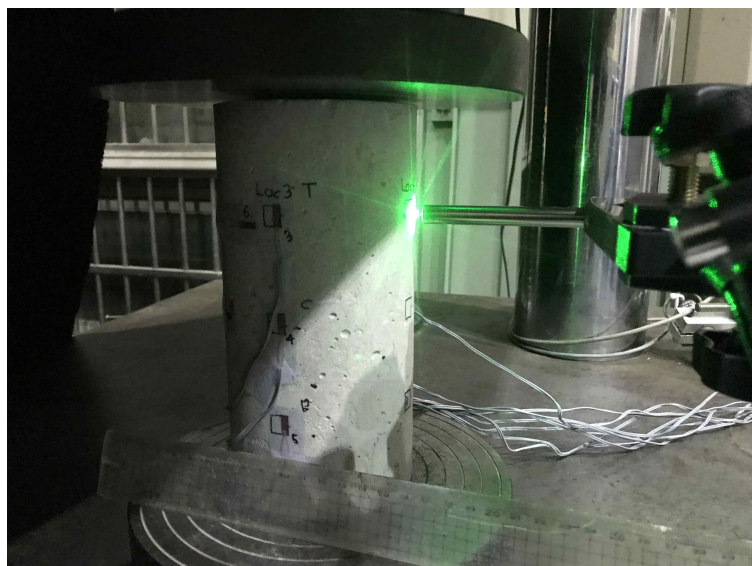
<스마트 콘크리트 시편 및 변형률계 설치 위치>

3.8.2. 압분광 효과 검증 실험 결과 1

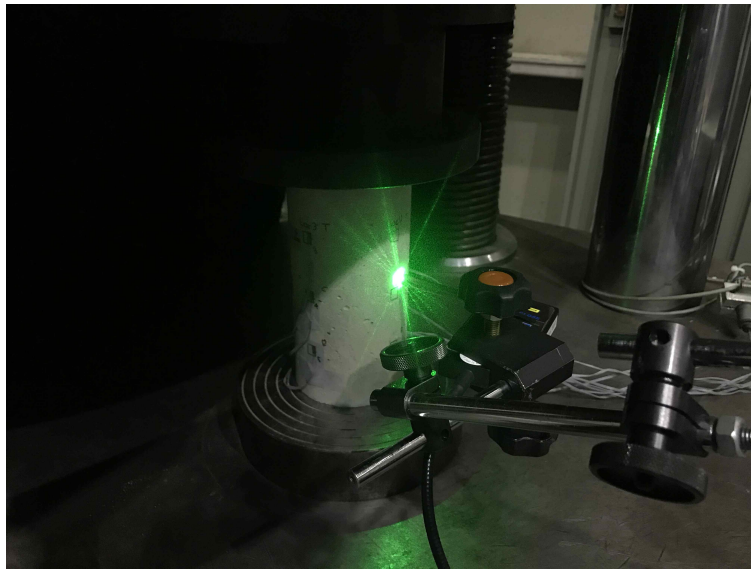
(방법 1 : 축방향 스캐닝을 이용한 평균응력 계측방법)

스마트 콘크리트의 압분광 효과 검증을 위하여, 동일한 하중조건 하에서, 시편의 상단(1/4), 중단(2/4), 하단(3/4) 지점에서 스펙트럼을 수집하였다. 본 경우에는 축방향 스캐닝을 이용한 평균응력 계측방법을 사용하였기 때문에, 계측거리는 65 mm 이고, 한 점당 계측 시간은 3초를 사용하였다. 축방향 스캐닝은 0.08 mm 의 간격으로 20지점에 대하여 수행되어, 총 스캐닝 길이는 1.52 mm 이다.

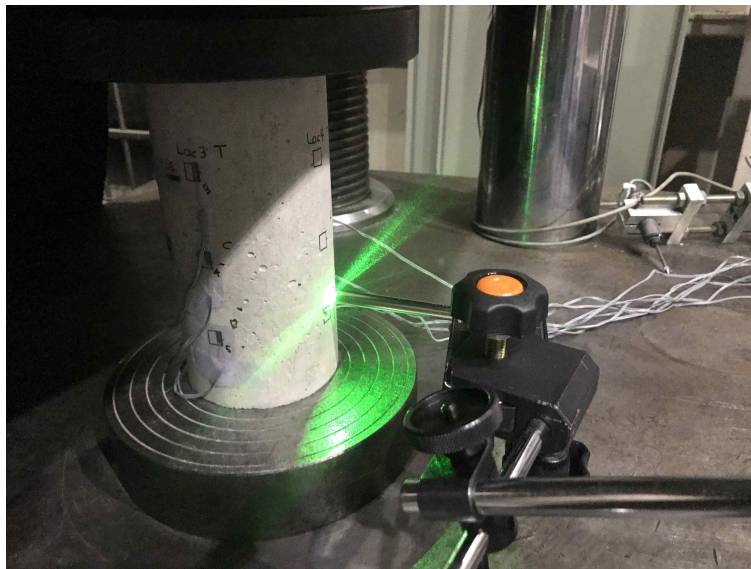
여기서, 상단과 하단의 결과값은 대칭이기에, 본 보고서에서는 상단과 중단에 대한 결과만을 나타내도록 한다.



<상단 계측 위치>



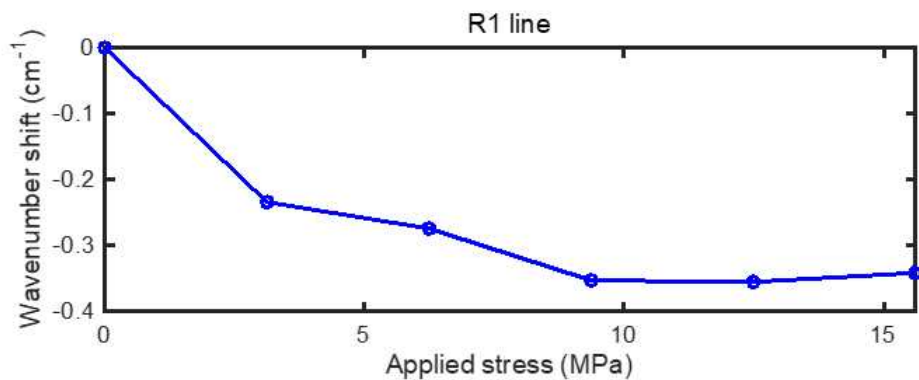
<중단 계측 위치>



<하단 계측 위치>

① 실험결과 - 시편 상단 (1/4 지점)

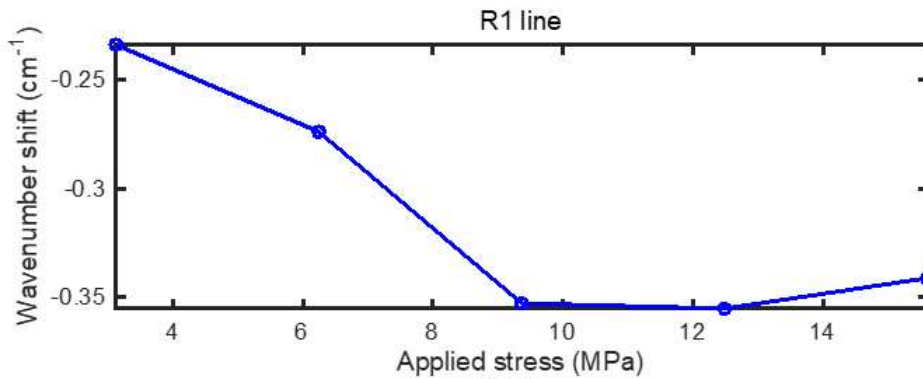
아래 그림은 시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 보인다. 하중이 가해질 경우, 최대 약 0.35 cm^{-1} 의 파수변화(R1 기준)가 음의 방향으로 발생함을 확인할 수 있다.



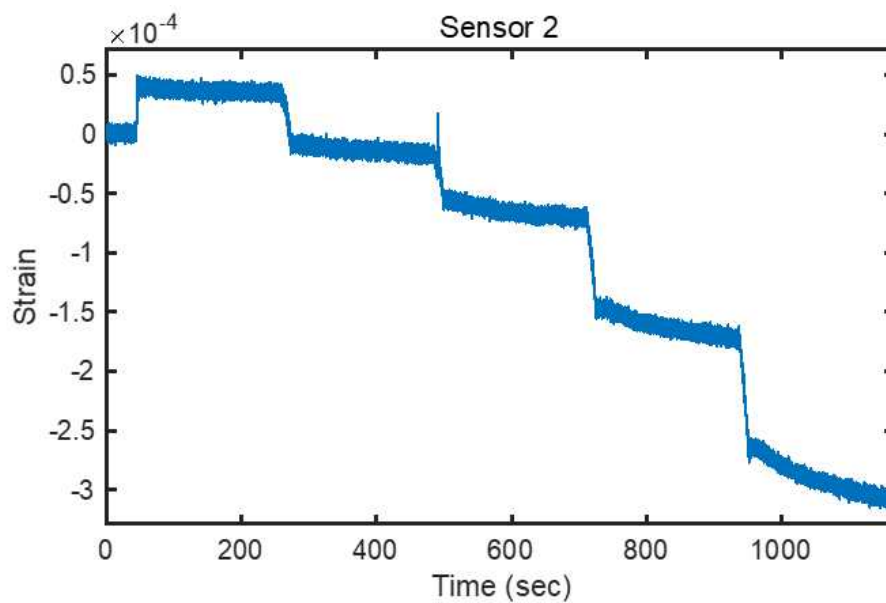
<시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화 (범위 0~16 MPa)>

아래 그림은 시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 3~16 MPa의 범위에 대해서만 나타낸 것이다. 이는 초기 하중이 가해질 당시에 시편 상/하단의 수평이 맞지 않아서 발생하는

시편 안정화 과정이 필요하기 때문에, 해당 구간에 대한 데이터를 신뢰할 수 없기 때문이다. 따라서, 본 연구에서는 해당 범위(3~16MPa)에 대한 데이터만을 비교 분석하기로 한다. 압축하중이 약 12.3 MPa 까지 인가된 경우에는, 스펙트럼이 Stress-free spectrum의 우측(음의 방향)으로 이동(약 0.11 cm^{-1})함을 확인하였다. 즉, 콘크리트 내부의 알루미나에도 압축하중이 인가되어, 스펙트럼이 좌측으로 이동함을 나타낸다. 따라서 이와 같은 현상을 이용하여, 모재에 가해지는 응력을 측정할 수 있을 것을 기대됨



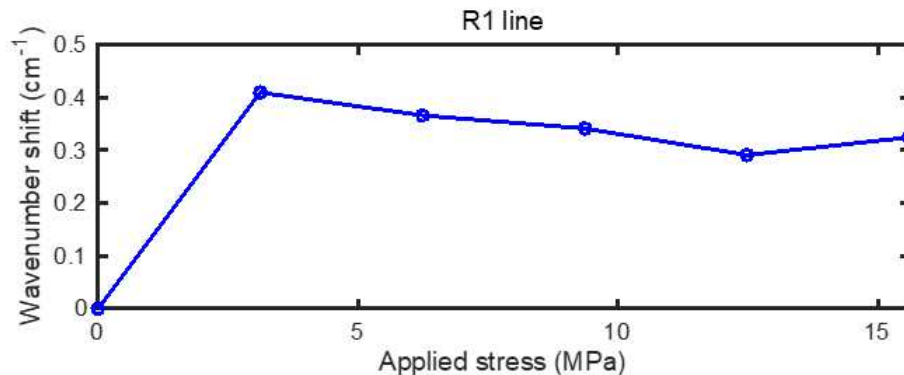
<하중단계별 파수 변화 (범위 3~16 MPa)>



<콘크리트 시편에 설치된 z 방향 변형률(초기에 인장방향 변형 발생)>

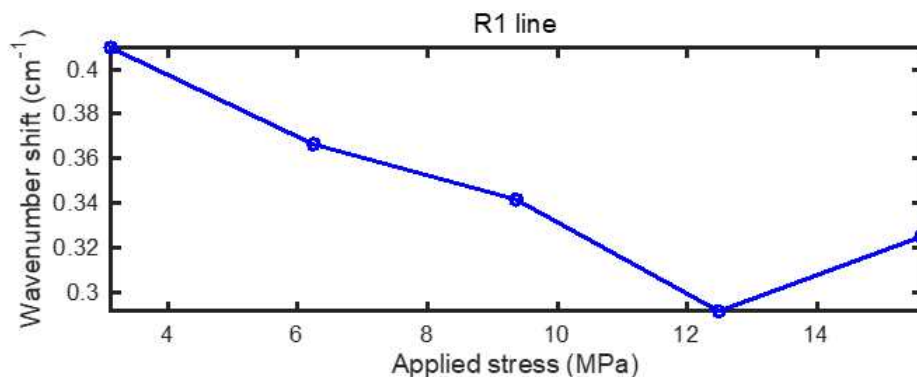
② 실험결과 - 시편 중단 (1/2 지점)

아래 그림은 시편 중단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 전구간에 대하여 나타낸 것이다. 상기에서 설명한 바와 같이, 초기 하중구간에서는 큰 인장력(양의 방향 변화)이 계측됨을 확인할 수 있다. 따라서, 자세한 데이터 분석을 위하여, 3~16 MPa 의 응력 범위에 대해서만 추가적으로 나타내었다.



<하중단계별 파수 변화 (범위 0~16 MPa)>

아래 그림은 시편 중단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 3~16 MPa 의 범위에 대해서만 나타낸 것이다. 이를 통하여, 12.5 MPa 압축하중이 가해질 경우, 최대 약 0.11 cm⁻¹의 파수 변화가 있음을 확인할 수 있다. 압축하중이 12.5 MPa 이상 시편에 인가된 경우, 시편에 일부 인장응력이 유도됨을 아래 그림을 통하여 확인할 수 있다. 이는 시편 표면에 발생한 균열에 의한 응력 이완현상 때문인 것으로 추정된다.



<하중단계별 파수 변화 (범위 3~16 MPa)>

아래 그림은 압축유지시험에 사용된 시편 표면에 나타난 균열을 보인다. 이와 같은 균열로 인하여, 압축응력 시험시 시편 표면에서 인장응력이 계측된 것으로 추정된다.

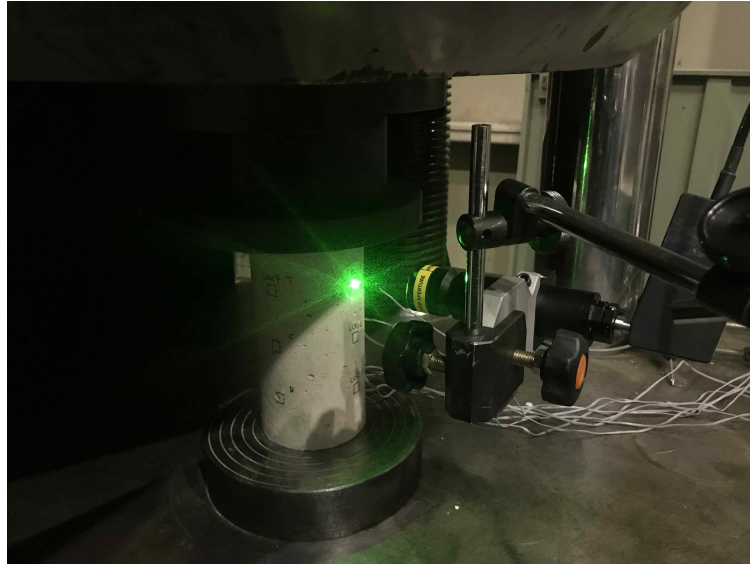


<시료에 발생한 표면 균열>

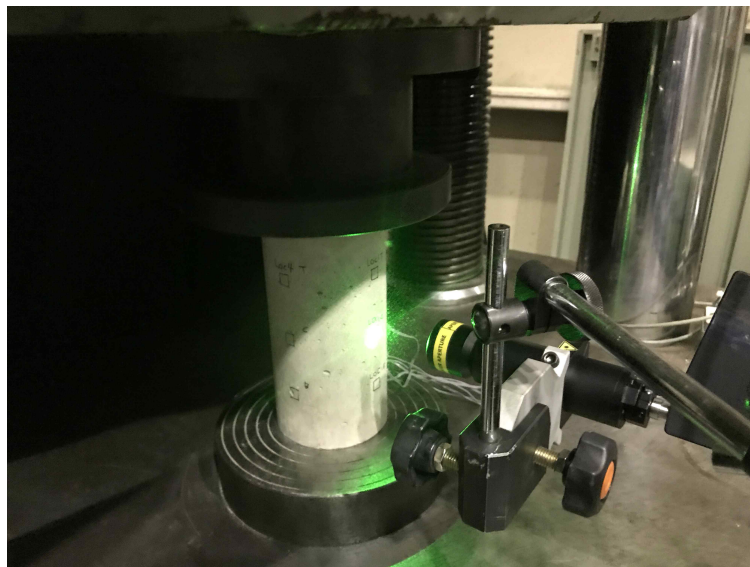
3.8.3. 압분광 효과 검증 실험 결과 2

(방법 2 : 렌즈를 이용한 평균응력 계측방법)

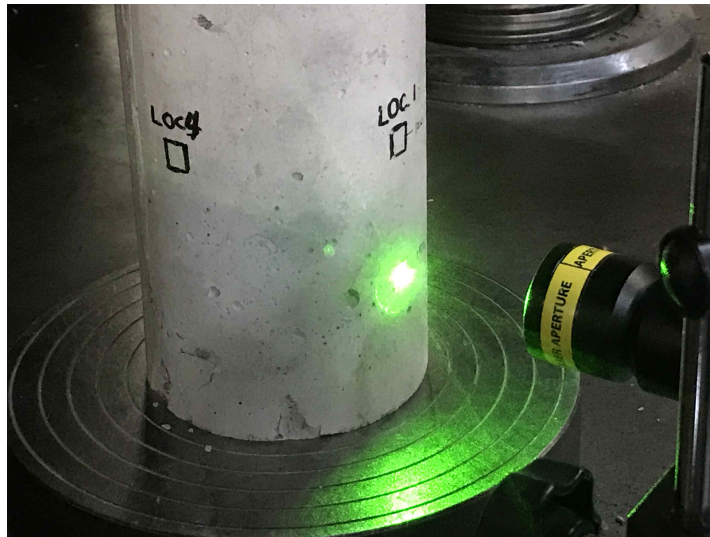
스마트 콘크리트의 압분광 효과 검증을 위하여, 동일한 하중조건 하에서, 시편의 상단(1/4), 중단(2/4), 하단(3/4) 지점에서 스펙트럼을 수집하였다. 본 경우에는 렌즈를 이용한 평균응력 계측방법을 사용하였기 때문에, 계측거리는 약 600 mm 이고, 한 점당 계측 시간은 30초를 사용하였다. 단, 축방향으로 1.5 mm 의 간격으로, 2지점에 대한 스펙트럼을 계측하고, 합산한 데이터를 결과값으로 사용하였다. 즉, 계측 시간은 총 60초이다. 여기서도, 상단과 하단의 결과값은 대칭이기에, 본 보고서에서는 상단과 중단에 대한 결과만을 나타내도록 한다.



<상단 계측 위치>



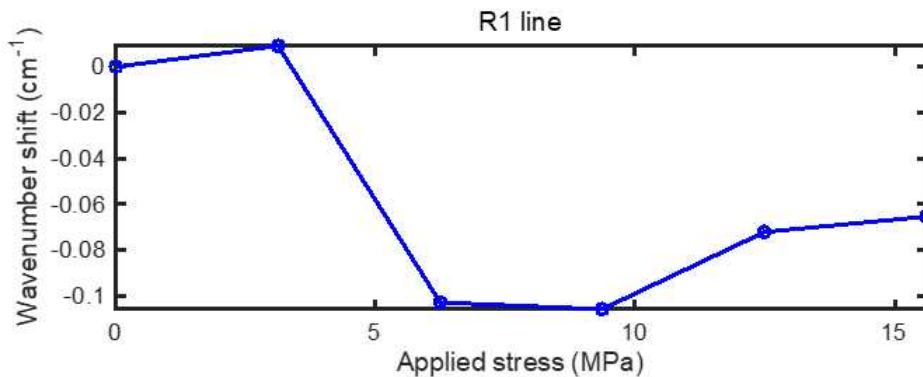
<중단 계측 위치>



<하단 계측 위치>

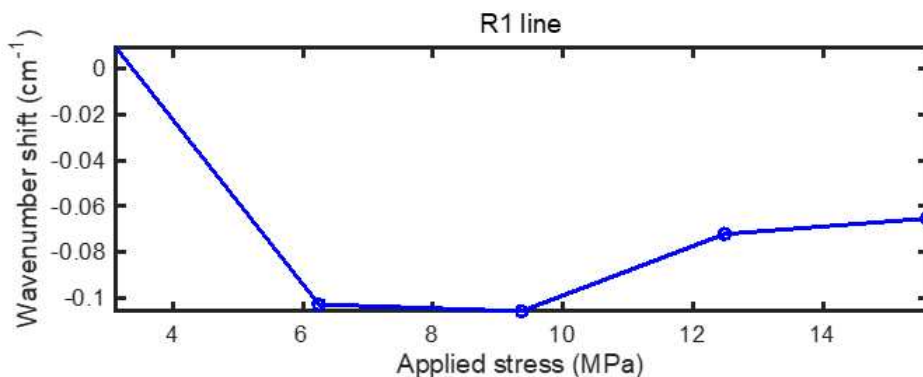
① 실험결과 - 시편 상단 (1/4 지점)

아래 그림은 시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 보인다. 하중이 가해질 경우, 최대 약 0.11 cm^{-1} 의 파수변화가 음의 방향으로 발생함을 확인하였다. 이는, 축방향 평균 응력 측정 방법(제안방법 1)과 비교하면 1/3 정도에 해당하는 파수변화 결과로 확인된다. 하지만, 초기하중에 의해 발생하는 값을 제외하면 그 결과는 매우 유사하다는 것을 확인할 수 있다.



<시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화 (범위 0~16 MPa)>

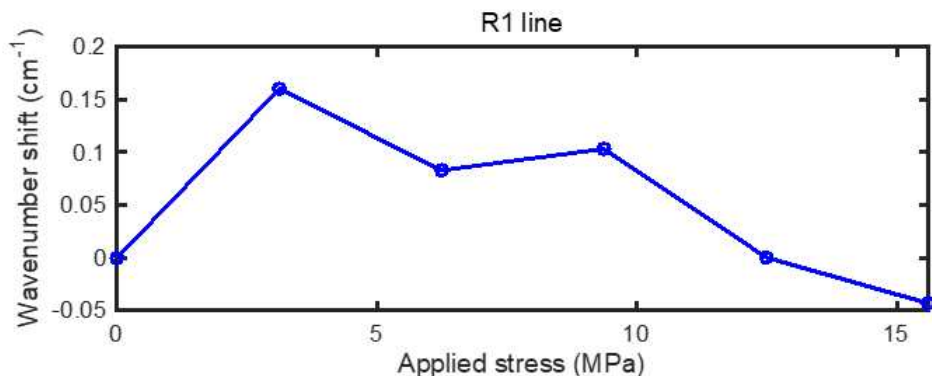
아래 그림은 시편 상단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 3~16 MPa의 범위에 대해서만 나타낸다. 초기 하중 이후의 파수 변화는 약 -0.11 cm^{-1} 에 해당하며, 이는 축방향 스캐닝에 의한 평균 응력 측정방법의 결과와 매우 유사하다. 또한, 12.5 MPa 이상의 압축하중에서 약간의 인장력이 발생하는 양상 또한 유사하게 관측됨을 확인할 수 있다.



<하중단계별 파수 변화 (범위 3~16 MPa)>

② 실험결과 - 시편 중단 (1/2 지점)

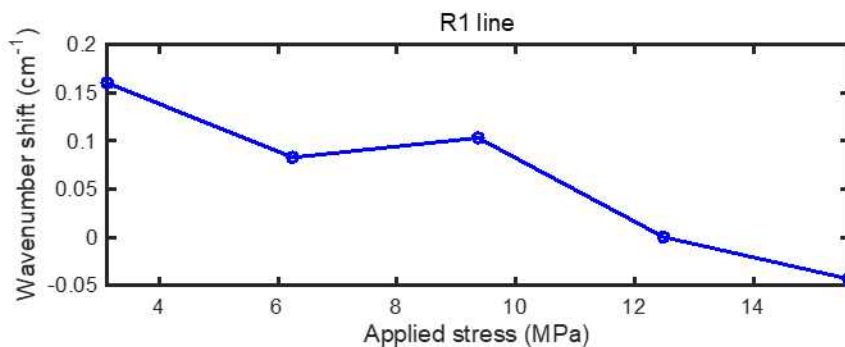
아래 그림은 시편 중단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 전구간에 대하여 나타낸 것이다. 축방향 스캐닝 방법에 의해 분석된 바와 같이, 초기 하중 구간에서는 큰 인장력(양의 방향 변화)이 계측되었다. 따라서, 자세한 데이터 분석을 위하여, 3~16 MPa의 응력 범위에 대해서만 추가적으로 나타내었다.



<하중단계별 파수 변화 (범위 0~16 MPa)>

아래 그림은 시편 중단에서 계측된 하중단계별 파수 변화를 3~16 MPa의 범위에 대해서만 나타낸 것이다. 이를 통하여, 12.5 MPa 압축하중이 가해질 경우, 최대 약 0.14 cm⁻¹의 파수 변화가 있음을 확인할 수 있다. 해당 결과의 경향성은 축방향 스캐닝 방법의 경향성과 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

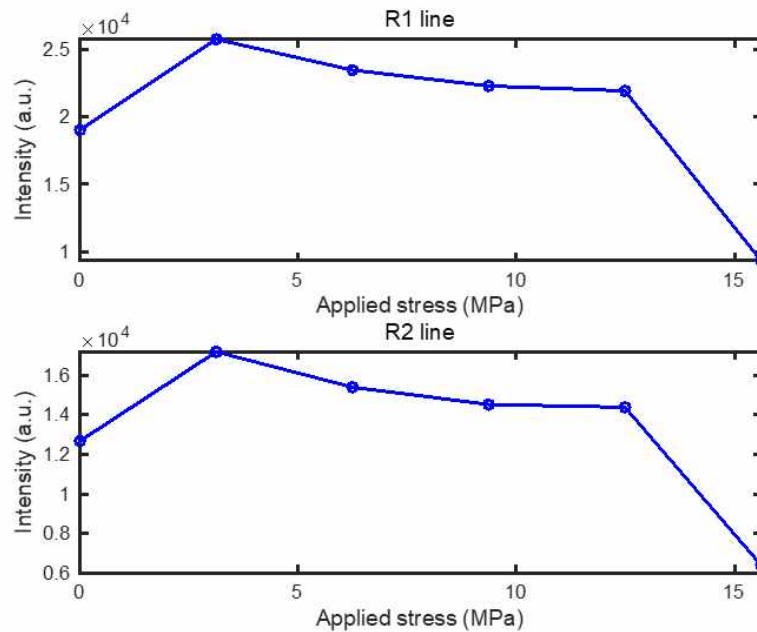
렌즈를 이용하여 인가된 파수 변화를 관측한 결과, 압축하중이 12.5 MPa 이상 시편에 인가된 경우, 추가적인 압축하중이 발생한다고 계산되었다.



<하중단계별 파수 변화 (범위 3~16 MPa)>

[질적 성과지표①] 계측 시간 1 분 이하

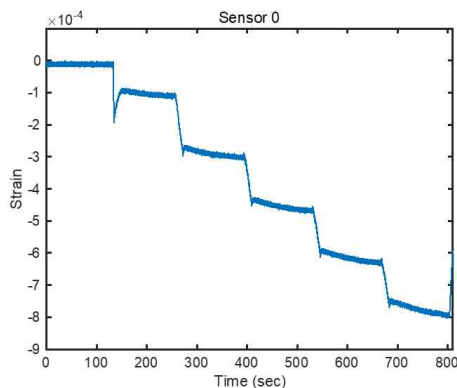
- 본 연구에서는 렌즈를 이용하여 한 지역에 대한 평균 스펙트럼을 얻고자 한다. 따라서, 일반적인 프로브를 사용할 경우보다 충분히 오랜시간동안 스펙트럼의 계측이 이뤄져야한다. 본 연구에서는 30초 데이터를 2번 계측하여, 총 60초(1분)의 데이터를 계측하였고, 그 때 스펙트럼의 intensity 값이 $10,000\text{ cm}^{-1}$ 으로 충분히 높음을 알 수 있다.
- 그러므로, 렌즈를 사용하여 적은 지점의 데이터를 계측 하는 것을 통하여, [질적 성과지표①]에 해당하는 ‘계측 시간 1 분이하’ 를 달성할 수 있음을 확인하였다.



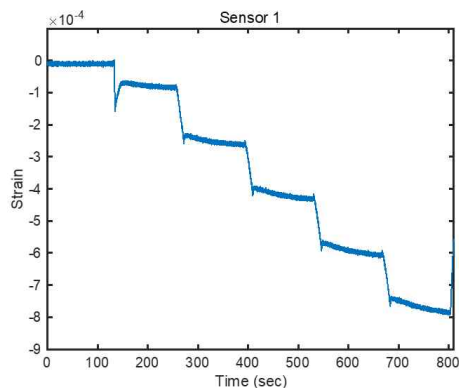
3.8.4. 소결

압분광 효과를 규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하고, 압분광 효과를 압축하중-변위가 선형인 구간에 대하여 규명하기 위하여, 산화알루미늄이 첨가된 스마트 콘크리트 시편에 대하여 최대강도 실험을 수행하였다. 실험결과 매우 보수적으로, 약 20 MPa 이하의 압축하중 구간에서 압축하중-변위가 선형임을 확인하였고, 이로부터 80%의 안전축인 16 MPa를 최대 압축하중으로 선정하여 압분광 효과 규명을 위한 압축하중시험을 수행하였다. 실험결과 대부분의 경우, 16MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 음의 방향으로 최대 0.1 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다.

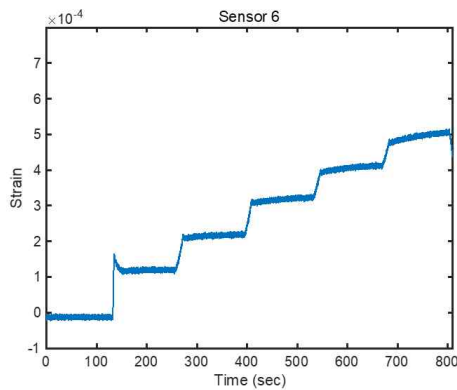
본 보고서에 사용된 데이터 이외에도, 많은 데이터가 계측이 되었으나, 많은 경우에서 스펙트럼으로부터 계측된 결과가 선형 적이지 않거나, 일관적이지 않았다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는, 아래 그림과 같이 z방향의 음의 방향 변형과 함께, 시편 팽창에 의한 x방향의 양의 방향 변형에 기인한 것으로 추정된다. 즉, 일반적으로는 응력이 계측되는 작은 알루미늄 파티클은, z 방향으로 압축응력을 받고 있지만, x방향으로는 인장을 받는 경우가 있기 때문에, 그 때 평균 응력 값은 일관적이지 않을 가능성이 있다. 따라서, 콘크리트 표면에 발생하는 응력의 크기를 유한요소모델을 통하여 새로이 검증해야 할 것이다.



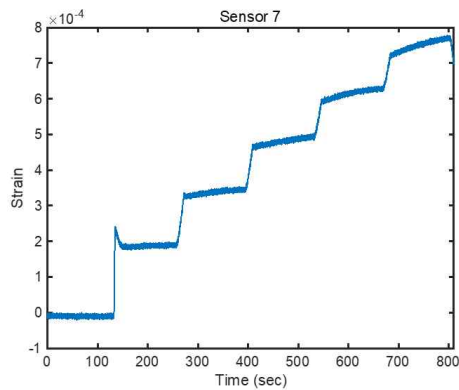
(a) 상단 z방향 변형률



(b) 중단 z방향 변형률



(c) 상단 x방향 변형률



(d) 중단 x방향 변형률

<압축유지시험시 발생하는 시편 상단/중단에서의 x, z방향 변형률>

3.9. 토의

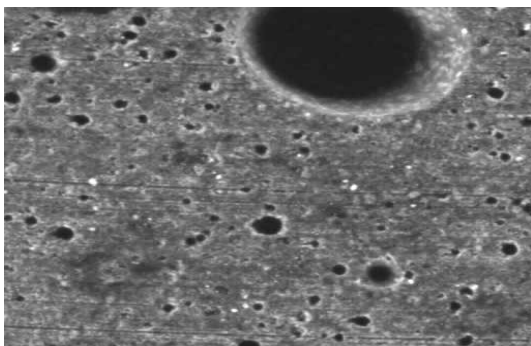
3.9.1. 콘크리트 표면 응력 측정방법에 대한 고찰

이론적으로, 콘크리트 시편에 힘을 가하였을 때, 응력분포는 대상 시편 내에서 고르게 발생하여야한다. 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 분석하고자 한다.

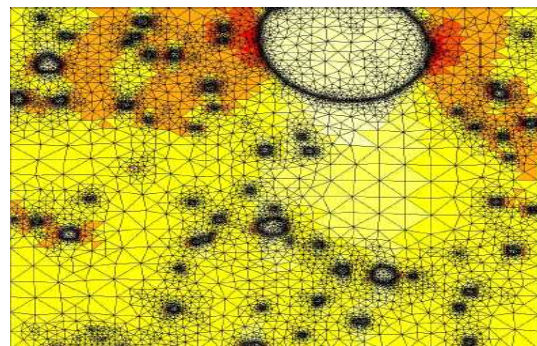
① 프로그램을 통한 시뮬레이션

1) FEM을 이용한 공극의 분포에 따른 응력분포 해석

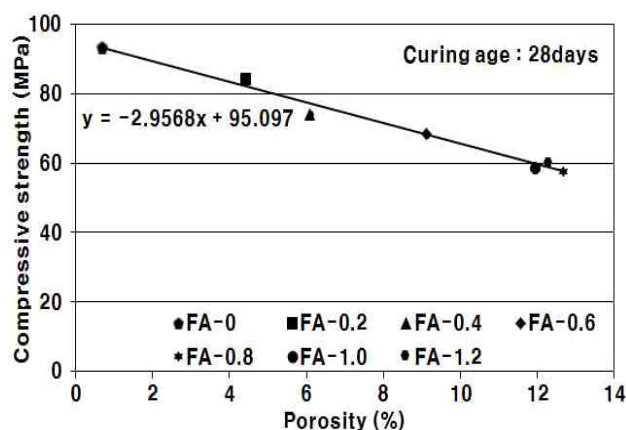
본 논문에서는 구조용 경량 기포 콘크리트의 역학적 성능을 평가하기 위하여, 기포제 혼입률에 따른 시멘트 페이스트를 제작하고 OOF(Object-Oriented Finite elements)라는 화상 이미지를 통한 재료의 미세구조 FEM 해석을 할 수 있는 프로그램을 이용하여 결과값을 확인하였다.



<화상 분석기를 활용한 콘크리트 표면>



<OOF를 활용한 콘크리트 표면 응력 분포>

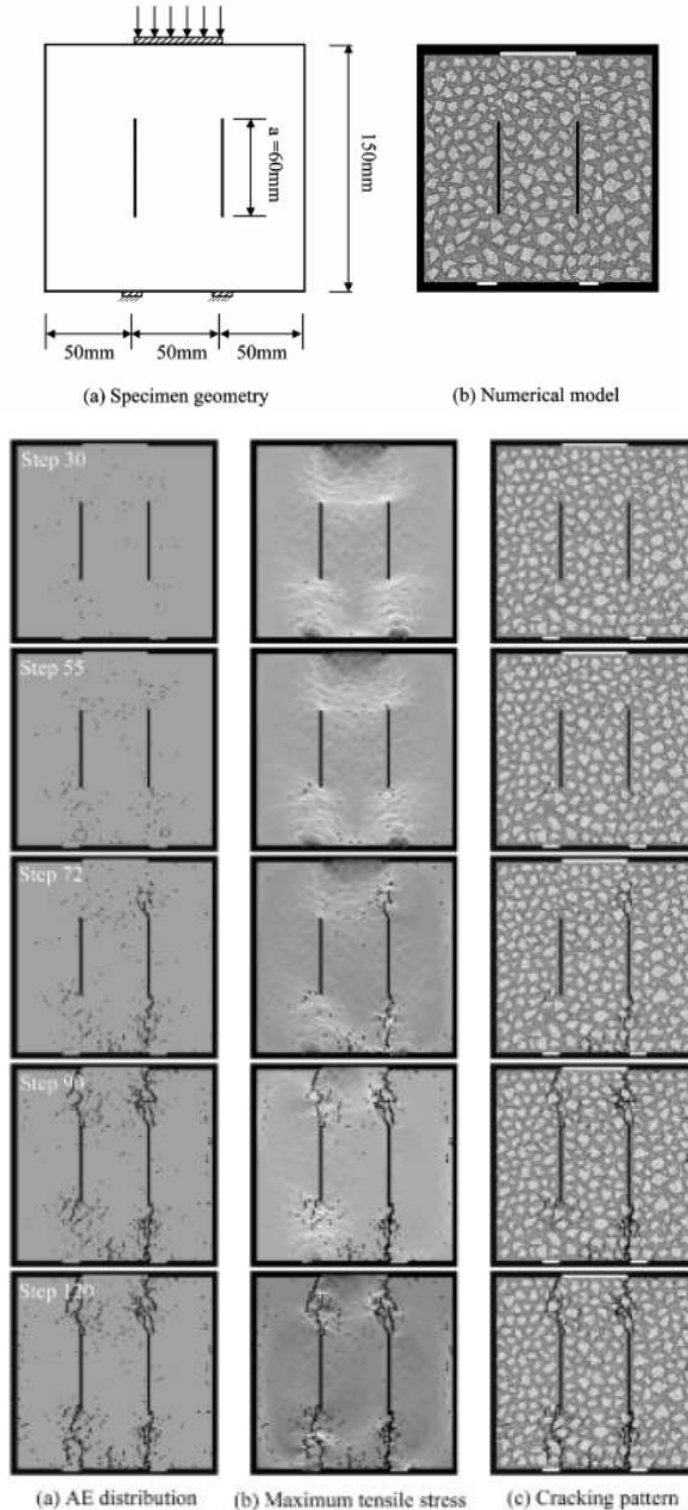


<공극률에 의한 압축 강도 감소>

콘크리트 표면 응력 분포를 확인해보면 큰 공극주변에서 응력집중현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 같은 시편 내에서도 다양한 크기의 공극의 위치는 랜덤하게 분포해있기에 실제 실험을 하였을 때, 공극 환경에 따라 응력 분포가 다르게 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구를 확장시키기 위해서는 0.085 mm 직경에서 측정되는 응력값을 평균화 하는 방법이 반드시 필요하다.

2) Mesoscopic mechanical model

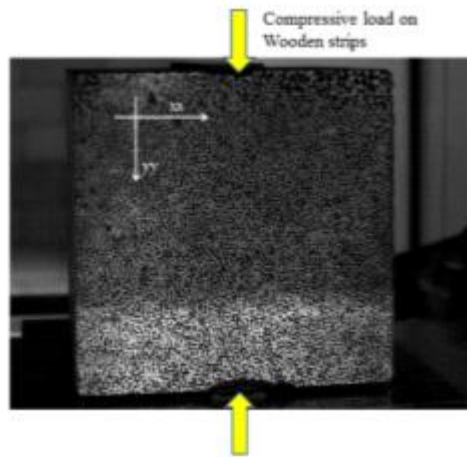
본 논문에서는, 외부 힘에 의한 콘크리트 파단 과정을 시뮬레이션 하기 위해, Meso-level 에서 유사취성(콘크리트) 물질의 불균질성을 반영하기 위하여, 탄성계수/강도를 포함한 재료의 역학적 매개변수를 통계 밀도 함수에 의해 정의된 Weibull 분포를 따라 가정하고, 수치모델의 해석을 진행하였다. 시편을 구성하는 엘리먼트 사이의 연속적인 관계에서, 손상이 점차적으로 증가할 때 탄성계수의 감소를 고려하여 모델을 구성하였다.



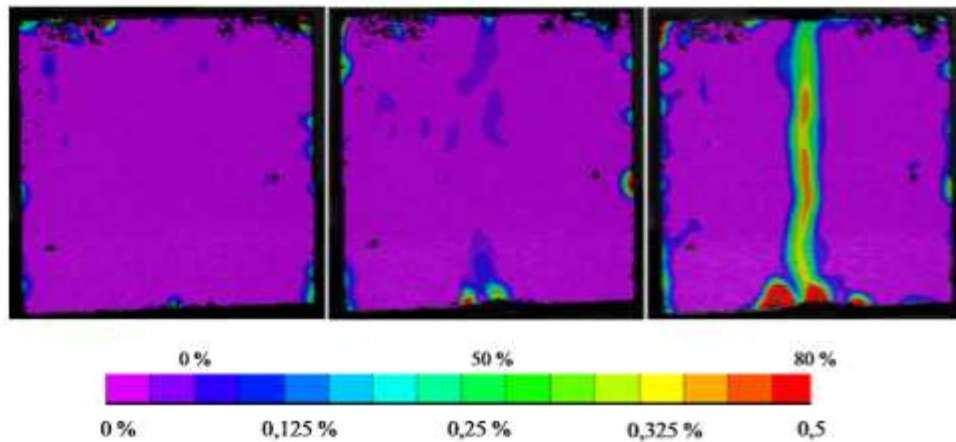
위 테스트 결과 같은 사이즈를 갖는 노치가 시편에 있는 환경에서 상단에 힘을 가하였을 때 똑같은 부분에서 크랙이 발생하는 것이 아니라 다른 한쪽에서 먼저 결함이 발생한 후 반대편에 결함이 발생하였다. 이는 하중 근처의 다양한 골재 크기를 갖고 있는 콘크리트 재료의 불균질한 특성 때문에 더 많은 혹은 적은 하중 편심이 시편에 유발되기 때문이다.

② 실험적인 연구 (압축 시험)

본 연구에서는, 정방형 시편 상단에 압축력을 가하였을 때, 이에 따른 주 변형(e_1)을 DIC 기법을 통하여 확인하였다. 주 변형(e_1)는 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.

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. 즉, 단일 레이저를 이용하여, 한 점(직경 0.085 mm^2)에서만 응력을 측정하기에는 어려움이 있다. 따라서, 이와 같은 재료의 불균질성에 따른 응력 분포의 불확실성을 해결하기 위해서는 한 포인트가 아니라 시편의 다지점에서 스펙트럼을 수집하고, 이를 평균화 하는 것이 반드시 필요하다.

3.9.2. 다축응력상태에서의 응력 측정방법에 대한 고찰

○ 해외문헌연구

- 추가 사항은 부록 1 참고

Stress measurement

Investigation of the Photo Stimulated Luminescence Spectroscopy Technique for Measuring 3-D Stresses, 2005 Purdue Univ.

PS coefficient (single crystal):

- Kaplyanskii

$$\Delta v = A(\sigma_1 + \sigma_2) + B\sigma_3$$

Where $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ are stresses along the crystallographic axes, and A and B are PS coefficients.

- Forman (hydrostatic stress)

$$\Delta v = \pi\sigma_H$$

Where σ_H is hydrostatic stress

- Grabner (tensor form of the equation)

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

By assuming (He & Clarke found this assumption incorrect) point symmetry of Al_2O_3 (averaging the principle components of stress), $\sigma_{ij} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ and $\pi_{ij}=0$ where $i \neq j$ and $\pi_{11} = \pi_{22}$

- He & Clarke (coordinate transformation for a single crystal in global coordinate)

$$\Delta v = \pi_{ij}a_{ik}a_{jl}\sigma_{kl}$$

PS coefficient (Polycrystalline):

- He & Clarke (by averaging above equation over many randomly oriented grains, corresponding model to polycrystalline is obtained as below:

$$\overline{\Delta v} = \frac{1}{3}(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{33})(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$$

- He & Clarke (by assuming plane stress condition($\sigma_{33}=0$, $\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$))

$$\overline{\Delta v} = \frac{2}{3}(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{33})\sigma$$

Stress measurement

Photoluminescence Piezospectroscopy: A multi-purpose quality control and NDI technique for thermal barrier coating, 2004

Main focus of the article:

- NDI using PLPS on thermal barrier coating (TBC).

PLPS:

- In case of air plasma sprayed coating (APS), there is a thickness limitation due to the pores and defects (75 micrometer).
- In case of electron beam physical vapor-deposited (EB-PVD) technique, there is no thickness limitation.

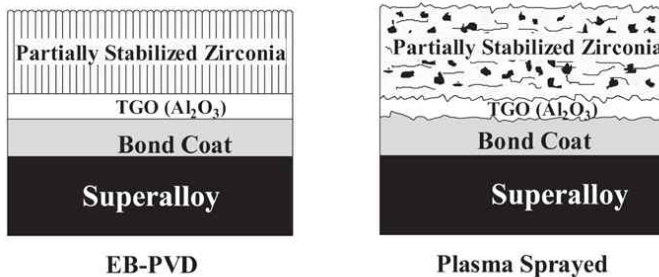


Fig. 2. Schematic of EB-PVD and APS TBCs.

Stress measurement:

- Impurity in the TGO layer (chromium) is responsible of the excited R lines.
- Spalled sections of the TGO causes stress-free detections in PL spectra.

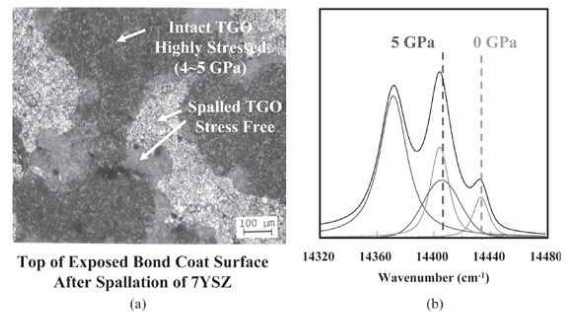


Fig. 10. Bimodal stress state associated with spallation of TBC. (a) Micrograph showing the top of the bond coat surface after TBC spallation. (b) Typical bimodal luminescence spectra showing two R_2 - R_2 doublets from intact and locally damaged regions of the TBC.

Stress measurement

Photoluminescence Piezospectroscopy: A multi-purpose quality control and NDI technique for thermal barrier coating, 2004

Stress measurement:

- Impurity in the TGO layer (chromium) is responsible of the excited R lines.
- Spalled sections of the TGO causes stress-free detections in PL spectra.

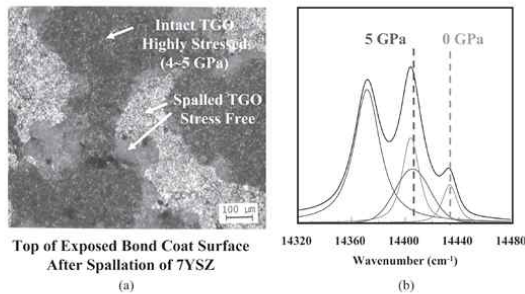


Fig. 10. Rimodal stress state associated with spallation of TBC: (a) Micrograph showing the top of the bond coat surface after TBC spallation. (b) Typical bimodal luminescence spectra showing two R_1 - R_2 doublets from intact and locally damaged regions of the TBC.

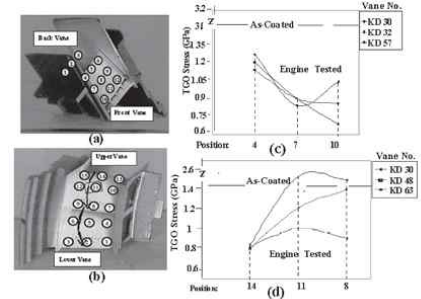


Fig. 13. (a) Pressure side and (b) suction side of a paired vane used for making PLDS measurements; stress profiles across the engine sector vane from the leading edge to trailing edge on the (c) pressure side and (d) suction side.

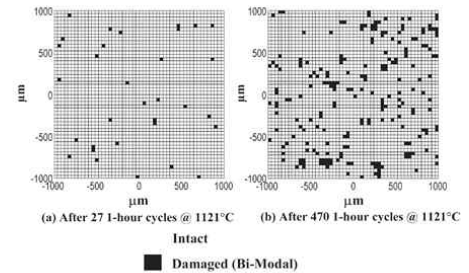


Fig. 11. TGO Mapping Distribution on Type III TBC after (a) 27 cycles and (b) 470 cycles at 1121°C.

Stress measurement

Investigation of the Photo Stimulated Luminescence Spectroscopy Technique for Measuring 3-D Stresses, 2005 Purdue Univ.

R lines:

- R-doublet is a combination of two Voigt functions

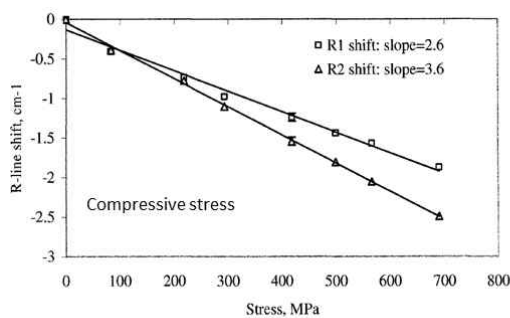


Figure 8: Shifts of R-lines with applied stresses

Linewidths of R lines:

- Broadening or linewidth of spectral line changes with the presence of stress.

Linewidths of R lines:

- There are 3 types of line broadening:

1. Natural broadening (no external influence) → is determined by the lifetime of transition state due to the Heisenberg uncertainty principle → produce Lorentzian shape
2. Strain broadening → due to the changes in interionic distances caused by strain, energy level is affected → Gaussian shape
3. Doppler broadening → thermal effects on excited electrons produces Doppler broadening → Gaussian shape

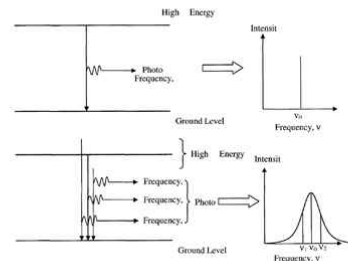


Figure 9: Spread of energy level that causes line broadening

3.10. 결론

본 연구에서는 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발을 위하여, 비접촉식 절대응력 측정에 적합한 스마트 콘크리트용 최적 시멘트 선정 및 배합비를 선정하고, 그 압분광 효과를 규명하는 연구를 수행하였다.

[시멘트 첨가제 가선택]

포틀랜드 시멘트에 일반적으로 들어가는 물질과 이와 기계적/화학적으로 유사한 다섯 가지 물질(산화알루미늄, 삼산화철, 이산화규소, 산화크로, 그래핀)에 대한 문헌 연구를 통하여, 해당 물질들에 대한 라만/형광 스펙트럼 및 압분광 효과가 밝혀짐을 확인하였다. 그 물질들 중에서, 스펙트럼의 선명도(intensity)가 가장 우수한 산화알루미늄과, 시멘트 구성물질 중 산화칼슘을 제외하고 가장 많은 구성비를 갖는 이산화규소를 최종적인 첨가제 후보군으로 선정하였다.

[시멘트 응력측정을 위한 압분광 시스템 구축]

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

[스마트 시멘트 제작 및 재료 실험]

일반 포틀랜드 시멘트, 산화알루미늄 분말, 규사에 대한 재료 실험을 수행하고, 여러 가지 배합비를 가지는 시멘트 모르타 시편을 제작하였다. 즉, 산화알루미늄이 포함된 시편(시편2~5)과 규사가 포함된 시편(시편6~9), 그리고 비교군으로 어떠한 첨가제가 포함되지 않은 시멘트 모르타 시편(시편 1)이 제작되었다. 해당 시편들에 대한 재료시험을 통하여, 산화알루미늄이 포함된 시편의 경우에는 하중실험을 하기에 충분한 크기의 침투깊들이 스펙트럼이 계측됨을 확인하였으나, 규사가 포함된 시편의 경우에는 그 분광검출률이 낮아서, 하중시험으로 유의미한 결과를 얻기 어렵다고 판단하였다. 따라서, 압분광 효과를 위한 하중실험은 산화알루미늄이 포함된 시편만을 대상으로 수행하였다.

규사가 포함된 시편에 대한 압분광 효과를 규명하고자 할 경우, 신호의 SNR(signal-to-noise ratio)이 좋아질 수 있도록, 785nm 레이저를 이용하여 실험할 것이 추천된다. 다만, 본 연구에서는 형광 분광법과 라만 분광법을 모두 사용하기 위하여 532nm 레이저를 구축하여 사용하기 때문에, 본 차년도(1차년도)에는 산화알루미늄이 포함된 시편에 대해서만 실험하도록 한다.

[스마트 시멘트 압분광 효과 규명]

압분광 효과를 규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하고, 압분광 효과를 압축하중-변위가 선형인 구간에 대하여 규명하기 위하여, 산화알루미늄이 첨가된 시멘트 모르타(시편 2~5) 최대강도 실험을 수행하였다. 실험결과 약 20 MPa 이하의 압축하중 구간에서 압축하중-변위가 선형임을 확인하였고, 이로부터 80%의 안전축인 16 MPa를 최대 압축하중으로 선정하여 압분광 효과 규명을 위한 압축하중시험을 수행하였다.

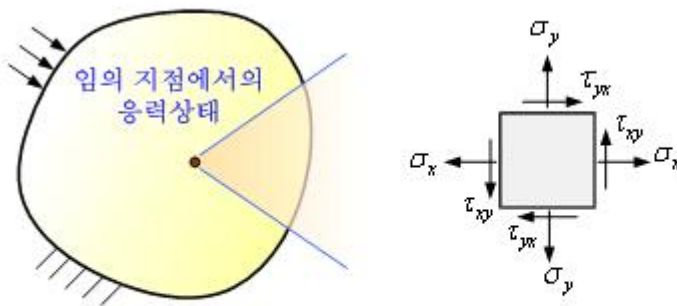
실험결과 대부분의 경우, 16MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 음의 방향으로 최대 2.5 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다만, 시편 2, 3의 경우에는, 비록 압축하중을 인가한 경우의 하중-파수 변화 관계를 확인할 수 있었으나, 시편 표면에 존재하는 산화알루미늄의 절대량이 레이저로 측정할 수 있을 만큼 충분하지 않았기 때문에, 하중 변화에 따른 파수 변화를 많은 지점에서 확인하기 어려웠다. 시편 4, 5의 경우에는 시편 2, 3에 비하여 많은 산화알루미늄이 시편 표면에 존재함을 분광검출률 시험을 통하여 확인하였고, 이를 통하여, 각 하중단계별로 시편에 인가된 하중으로 인하여 스펙트럼이 이동하는

양(spectral shift)을 레이저를 이용하여 비접촉식으로 측정할 수 있었다. 또한, 하중-파수 변화의 선형적인 관계를 이용하여, 그 압분광 계수를 도출하고, 시편 4에 대해서는 반복성에 대한 시험도 수행하였다. 따라서, 산화알루미늄을 시멘트의 응력측정 센서로 넣고자 할 경우, 배합 과정에서 물의 제외한 전체중량 대비 최소 10% 이상의 산화알루미늄을 첨가제로 사용해야 한다.

[평균응력 측정방법의 필요성 제고]

하지만, 이때 측정되는 스펙트럼의 이동량은, UTM을 이용하여 시편에 압축하중을 인가한 경우에 발생하는 여러 가지 응력성분의 조합에 의한 것으로, 이를 이용하여 하중-파수 변화의 관계를 정립하기는 매우 어렵다. 다시 말해서, 입방체 시편에 일축 압축응력(또는 단축응력, uniaxial stress)이 작용할 경우, 해당 시편에는 푸아송 비(poisson ratio)만큼 가로 변형(또는 부풀)도 발생하게 된다. 하지만 푸아송 비는 재료가 균질(homogeneous)하고, 등방성(isotropic) 또는 직교등방성(orthotropic) 할 경우에만 일정하므로, 본 연구에서 사용된 콘크리트와 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 압분광법을 이용한 응력 측정의 경우, 폰 미세스 응력(Von Mises stress)계산 방법(아래 그림)과 유사하게, 시편의 임의의 지점에서 유발되는 각 응력 성분들의 조합을 의미한다. 따라서, 0.085 mm의 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, 3.6 장에서는 전역적 응력의 크기를 측정할 수 있도록, 응력을 평균화 하는 방법을 제안하고, 이를 검토하였다.



$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

<Von Mises stress 계산 방법>

여기서, 평균응력을 계산할 때의 주요 응력 성분은 spectral intensity가 높은(산화알루미늄이 많은) 지점으로부터 측정된 값이 될 것이며, 기타 spectral intensity와 파수 이동이 작은 값들은 평균화 과정에서 상쇄될 것으로 기대된다.

[평균 응력 계측법 개발]

콘크리트의 응력 측정의 경우, 콘크리트 표면 거동이 일정하지 않기 때문에, 일반적인 프로브를 이용한 아주 작은 면적(직경 0.085mm)에 대한 응력 측정방법의 경우 실제 현장 적용에 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 (1) 축방향 스캐닝을 통한 평균 응력 측정 방법과 (2) 렌즈를 이용한 평균 응력 측정 방법을 개발하였다.

[스마트 콘크리트 제작 및 분광검출률 계측]

알루미나 함유율 4종(5%, 10%, 15%, 20%)에 대한 콘크리트 시편을 제작하고, 분광검출률 측정 시험을 수행하였다. 분광검출률 계측을 위하여, 맵핑 알고리즘을 새로 개발하였으며, 실내 암실도 제작되어, 정밀한 분광검출률 측정에 사용되었다. 본 연구에서는 알루미나 함유율이 20%인 경우에만 평균 분광검출률이 3,000을 초과하고, 나머지는 모두 3,000 이하였다. 여기서 intensity 가 3,000이하인 경우에는 peak deconvolution에 대한 결과를 보증 할 수 없다.

[스마트 콘크리트 압분광 효과 규명]

압분광 효과를 규명하기 위하여, 형광 분광 시스템을 UTM(300톤, 20톤급) 장비에 설치하고, 압분광 효과를 압축하중-변위가 선형인 구간에 대하여 규명하기 위하여, 산화알루미늄이 첨가된 스마트 콘크리트 시편에 대하여 최대강도 실험을 수행하였다. 실험결과 매우 보수적으로, 약 20 MPa 이하의 압축하중 구간에서 압축하중-변위가 선형임을 확인하였고, 이로부터 80%의 안전축인 16 MPa를 최대 압축하중으로 선정하여 압분광 효과 규명을 위한 압축하중시험을 수행하였다. 실험결과 대부분의 경우, 16MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 음의 방향으로 최대 0.1 cm^{-1} 의 파수변화가 있음을 확인하였다. 다만, 산화알루미늄의 비율이 적은 시편(시편 1, 시편 2, 시편 3)의 경우, 그 형광 스펙트럼 첨두값의 intensity가 낮아서, curve fitting이 제대로 수행되지 않기 때문에, 본 연구에서는 압분광 효과 규명을 수행하지 않았다. 따라서, 산화알루미늄을 시멘트의 응력측정 센서로 넣고자 할 경우, 배합과정에서 물의 제외한 전체중량 대비 최소 20% 이상의 산화알루미늄을 첨가제로 사용해야한다.

[단결정 산화알루미늄을 이용한 콘크리트 응력 측정 기술 가능성 제고] (3.9.2절, 부록1 참고)

본 연구에서는 다결정(polycrystalline) 산화알루미늄을 콘크리트에 배합하고, 이것으로부터 측정되는 응력을 측정하고자 하였다. 하지만, 본질적으로 다결정 물질을 사용하였기 때문에, 측정하고자 하는 하중의 방향 제어가 불가능하다. 즉, 시편의 임의의 지점에서 유발되는 각 응력 성분들의 조합한 값만을 확인할 수 있었다. 하지만 방향성을 확인할 수 있는 단결정(single crystalline) 산화알루미늄 패드를 콘크리트에 선택적으로 배합(응력 측정 원하는 위치)하거나, 혹은 표면에 부착하여 그 응력을 계측한다면, 다축응력상태에서 발생하는 응력들도 방향에 따라 선택적으로 측정할 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 본 분야에 대한 연구가 추가적으로 필요한 실정이다.

[고사양 시스템에 대한 구축 필요성 제고]

콘크리트 표면에 발생하는 산란에 의하여, 분광검출률(intensity)이 3,000이하인 경우에는 peak deconvolution에 대한 결과를 보증 할 수 없다. 즉, 5~15%의 알루미나가 첨가제로 포함된 경우에는 응력센싱 능력을 기대하기 어렵다. 또한, 시멘트 모르타르 시편과는 달리, 실제 건설에 사용되는 콘크리트 제작에는 굵은 골재가 들어가기 때문에, 같은 양의 산화알루미늄을 첨가제로 사용하여도, 같은 기울기를 갖는 압분광현상을 기대할 수 없다. 본 연구에서는 최대 0.1 cm^{-1} 의 파수변화를 관측할 수 있었다.

따라서, 현장적용을 위하여 분광검출률을 높이고, 응력측정 해상도를 높이기 위해서는, 고해상도 분광기 및 순수 단색광에 가까운 레이저 시스템의 구축이 필요한 것으로 판단된다. 즉, 고해상도 CCD (응력측정 해상도 향상)와 냉각기능 (SNR 향상)이 포함된 분광기와 순수 단색광에 가까운 레이저를 이용할 경우, 분광검출률 및 응력 측정 정확도를 높일 수 있다. 하지만, 토목시설물 응력측정을 목적으로 개발된 상용 분광시스템은 현재 없으며, 다른 분야에 사용되는 상용 시스템을 구축한다고 하더라도, 장비 가격이 매우 비싸거나, 하부로부터 전달되는 진동을 상쇄하기 위한 장비가 추가로 구비되어야 한다. 따라서, 그 경제성에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

3.11. 기술 적용 문제점 및 해결 방안

구분	실험결과	문제점	해결방안
분말 상태	- 산화알루미늄(Al_2O_3)과 이산화규소(SiO_2)에 대한 압분광 효과는 Diamond Anvil Cell (DAC)을 통하여 기 검증됨 - 포틀랜드 시멘트에는 압분광 물질인 산화알루미늄(Al_2O_3)과 이산화규소(SiO_2)가 기본적으로 포함되어 있음 - 산화알루미늄은 고분광·압분광 물질로 반도체 및 차열피막, 기계 구조물 응력 측정에 다양하게 사용됨	- 일반 포틀랜드 시멘트에 포함된 산화알루미늄 및 이산화규소를 비접촉식 응력센싱 물질로 사용하기 위해서는 그 양이 충분히 많아야 하지만, 일반적으로 포터블 분광 시스템을 이용하여 측정될 만큼 다량이 포함되어 있지 않음 - 일반적으로 라만분광법에 의한 intensity가 형광분광법에 의한 intensity 보다 낮음	- 포틀랜드 시멘트에 산화알루미늄 분말을 더 첨가하여 분광검출율(intensity)을 높임 - 산화알루미늄을 레이저를 이용한 형광분광법을 이용하여 계측할 경우, 태양 또는 실내 조명시설로부터 발생하는 빛에 의한 데이터 손실 및 왜곡이 적음
시멘트 모르타르	- 전체중량 대비 5, 8, 11, 13%에 해당하는 산화알루미늄이 첨가된 입방체 시편을 제작하고, 분광검출율 및 압분광 현상을 규명함 - 모든 시편에 대하여, 약 16 MPa의 압축하중에서 음의 방향으로 최대 2.5 cm^{-1}의 파수변화(스펙트럼 이동) 계측됨	- (분광검출율) 8% 이하의 산화알루미늄이 첨가된 시편의 경우에는 그 분광검출율(intensity)이 너무 낮아서, 응력센싱을 하기에는 부적합함 - (압분광현상) 각 하중단계에서, 임의의 지점에서 다량의 스펙트럼을 계속하고, 그 스펙트럼의 이동(파수 변화)을 조사하였으나, (1) 음의 방향으로 spectral shift가 이루어졌으나, 그 이동량이 서로 다르거나, (2) 양의 방향으로 spectral shift가 발생한 경우가 다수 발견됨	- (분광검출율) 시멘트 모르타르의 경우, 배합과정에서 물을 제외한 전체중량 대비 최소 10% 이상의 산화알루미늄을 첨가제로 사용하면, 일정 수준이상의 분광검출율을 기대할 수 있음 - (압분광현상) 직경이 0.085 mm 인 레이저를 이용한 응력 측정 특성상, 계측된 응력값이 해당 시편 전체의 응력을 대표한다고 볼 수 없음. 따라서, 맵핑, 중첩을 기본으로 한 스캐닝 또는 망원렌즈를 이용한 응력평균화 방법에 대한 개발이 필수적임
콘크리트	- 알루미나 첨가율 4종(5%, 10%, 15%, 20%)에 대한 콘크리트 시편을 제작하고, 분광검출율 측정 시험을 수행함 - 알루미나 함유율이 20%인 경우에만 평균 intensity (분광검출율)이 3,000을 초과함 (나머지는 모두 그 이하) - 대부분의 시편에서, 16MPa 이하의 구간에서는 압축하중-파수 변화가 선형임을 확인하였고, 음의 방향으로 최대 0.1 cm^{-1}의 파수변화가 있음을 확인함. 단, 콘크리트에는 제안한 평균응력 측정방법을 사용함	- (분광검출율) 콘크리트 표면에 발생하는 산란에 의하여, intensity가 3,000이하인 경우에는 peak deconvolution에 대한 결과를 보증할 수 없음. 즉, 5~15%의 알루미나가 첨가제로 포함된 경우에는 응력센싱 능력을 기대하기 어려움 - (압분광현상) 시멘트 모르타르 시편과는 달리, 굵은 골재가 시편제작에 사용되어, 같은 양의 산화알루미늄을 첨가제로 사용하여도, 같은 기울기를 갖는 압분광현상을 기대할 수 없음. (최대 0.1 cm^{-1}의 파수변화 발견)	- (분광검출율) 콘크리트의 경우, 굵은 골재의 첨가로 인하여 배합과정에서 물을 제외한 전체중량 대비 최소 20% 이상의 산화알루미늄을 첨가제로 사용해야함 - (분광검출율/압분광현상) 고해상도 CCD (응력측정 해상도 향상)와 냉각기능 (SNR 향상)이 포함된 분광기와 순수 단색광에 가까운 레이저를 이용할 경우, 분광검출율 및 응력 측정 정밀도를 높일 수 있음. 하지만, 장비 가격이 비싸지거나, 진동저감 장치를 추가로 구비하여 설치해야함 - 단결정 산화알루미늄을 이용한 선택적 콘크리트 응력 측정 기술관련 연구 필요함

3.12. 연구 개발 성과

3.12.1. 특허

① 특허 1

- 발명의 명칭 : 자가 응력 측정이 가능한 콘크리트 조성물 및 응력 측정 방법
- 출원번호 : 10-2018-0165750 (출원완료)

출원번호통지서

1의 3페이지

관 인 생 략 출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2018.12.20
특 기 사 항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(SP180140)
출 원 번 호 10-2018-0165750 (접수번호 1-1-2018-1281894-06)
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 자가 응력 측정이 가능한 콘크리트 조성물 및 응력 측정 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), 정정신고서]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

② 특허 2

- 발명의 명칭 : 레이저 기반 콘크리트 평균 응력 측정 시스템 및 방법
- 출원번호 : 10-2019-0174672

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 10-2010-0000000, 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.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

3.12.2. 논문

① 논문 1

- 논문명 : A Feasibility Study of Laser-based Concrete Stress Measurement Technique
- 구분 : 국제학술발표 논문집 (SMAR 2019)
- 상태 : 출간완료

SMAR 2019 – Fifth Conference on Smart Monitoring,
Assessment and Rehabilitation of Civil Structures



A Feasibility Study of Laser-based Concrete Stress Measurement Technique

Namgyu KIM¹, Jong-Jae LEE¹

¹ Sejong University, Seoul, South Korea

Contact e-mail: namgyu.kim@sejong.ac.kr

ABSTRACT: In this paper, a feasibility study for a laser-based concrete stress measurement technique has been conducted and experimentally validated with uniaxial compression tests. Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) method is widely used for measuring residual stresses in thermal barrier coating, and the technique is being researched in civil engineering field recently thanks to its laser-based non-contact and non-destructive features. In this paper, non-contact and non-destructive PLPS technique is firstly applied to a concrete material for measuring stress induced by external force. To do that, a piezospectroscopic material has been mixed with cement powder, and a cubic specimen has been fabricated for uniaxial compression tests. Based on the results of uniaxial compression tests, it has been experimentally proved that the applied compressive stresses into the specimen and its spectral peak shifts have a linear relationship.

1 INTRODUCTION

There are various studies looking for practically applicable nondestructive and noncontact techniques for the concrete stress measurement, but the techniques are still unproved to be practically applied in the field. Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) is a potential nondestructive testing technique that can measure the concrete stress induced by external force. Here, photoluminescence (PL) is a result of light emission process from any form of matter after the absorption of photons, and it can be generated when a sample is irradiated by a laser. Using the spectrum, the molecular structure of a material can be identified. In addition, the stress state of the material can be also determined particularly for $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (alumina). It is known as PLPS technique and widely used to determine the residual stress in thermal barrier coating (D.M. Lipkin et al. (1996)). As shown in Figure 1, a typical PL spectrum has two distinguishable peaks of R1 and R2 lines at the wavenumbers of $14,403\text{ cm}^{-1}$ and $14,433\text{ cm}^{-1}$, and the R1 and R2 lines are shifted to the left or right side from the stress-free spectrum when compressive or tensile stress is applied into the sample, respectively. Based on the phenomena, the current stress level in a parent material can be calculated.

In this study, a feasibility study has been therefore performed to use the alumina particles in cement cubes as an in-situ passive stress sensor using PLPS technique. Uniaxial compression tests have been conducted to a cement cube specimen to investigate the piezospectroscopic effect of alumina in cement structure.



License: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

② 논문 2

- 논문명 : Design and Optimization of an MFL Coil Sensor Apparatus Based on Numerical Survey
- 구분 : SCIE
- 상태 : 출간완료



sensors



Article

Design and Optimization of an MFL Coil Sensor Apparatus Based on Numerical Survey

Ali Azad and Namgyu Kim *

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea; g2016sfd008@sju.ac.kr

* Correspondence: namgyu.kim@sejong.ac.kr; Tel.: +82-2-6935-2682

Received: 14 October 2019; Accepted: 6 November 2019; Published: 8 November 2019



Abstract: In this study, we aimed to design a coil sensor prototype capable of detecting metallic area loss based on numerical simulations using the magnetic flux leakage (MFL) method. Unlike previous numerical simulation-based studies, which are only conducted to obtain the MFL itself, the main objectives of this study were (1) to acquire the induced current in the coil sensor and (2) to optimize the apparatus based on a time-dependent numerical analysis. As a result, the optimum values of parameters in magnetizing and sensing units were obtained numerically. A magnetic sensor prototype was then fabricated using the optimum parameters obtained by numerical parametric study. Finally, experimental validation tests were conducted on a solid steel rod specimen with a stepwise cross-sectional reduction flaw. It was observed that numerical simulation had approximately 91% precision compared to the experimental test. The results reveal that application of a realistic numerical simulation of an MFL coil sensor can probably provide essential information for MFL-sensor fabrication and allows for preventive measures to be taken before manufacturing failure or defect misdetection.

Keywords: magnetic flux leakage; coil sensor; numerical analysis; parametric study; non-destructive test

1. Introduction

To assess the integrity of structures, structural health monitoring (SHM) for metal members, such as pipelines in the oil and gas industry, load carrying cables in bridges, lifts, cranes, etc., is an essential task and must be done regularly to eliminate any chance of structural failure and economic loss [1]. For instance, the current transport system for oil-gas products is a pipeline which requires routine inspections due to the presence of humidity and underground pressure, because any metal losses, cracks, and corruptions may cause an accident. Therefore, pipelines must always be functional while being completely sound and intact [2,3]. Steel cables are the main load-carrying elements in an enormous number of machines and structures. Although steel cables and ropes are designed to have high strength, cross-sectional damage and internal breakage and cracks can still occur during their service life and may compromise the entire structural integrity [4]. However, these types of damages are not easily detected by the naked eye and visual inspections (e.g., internal breakage of cable in cable-stayed bridges) [5]. Hence, demand for SHM using non-destructive testing (NDT) methods has increased significantly. Currently, there are a variety of conventional methods which are being applied based on non-destructive SHM principles such as visual inspection [6], magnetic flux leakage (MFL) [7,8], eddy current sensing [9,10], acoustic emission [11–15], and guided wave [16–18], among other techniques.

Traditionally, in the MFL method, the axial component of the magnetic flux density is used, which causes misdetection in the case of axial cracks. Liu et al. [19] proposed a circumferential excitation method to detect axial defects in pipelines. Also, they investigated the influence of a crack's geometry

③ 논문 3

- 논문명 : Noncontact Stress Measurement Technique for Concrete Structure using Photoluminescence Piezospectroscopy
- 구분 : SCIE
- 상태 : 리뷰중

Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring

Noncontact Stress Measurement Technique for Concrete Structure using Photoluminescence Piezospectroscopy

Journal:	Structural Health Monitoring
Manuscript ID	SHM-19-0370
Manuscript Type:	Original Manuscript
Date Submitted by the Author:	10-Oct-2019
Complete List of Authors:	Kim, Namgyu; Sejong University, Civil and Environmental Engineering Lee, Jong-Jae; Sejong University, Seoul, 143-747, South Korea, Department of Civil and Environmental Engineering
Keywords:	photoluminescence, piezospectroscopy, laser, stress measurement, concrete structure
Abstract:	Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) is a laser-based noncontact and nondestructive stress measurement technique but has not been studied extensively in the field of civil structural health monitoring. Using the PLPS technique, the stress level can be measured by emitting a laser source onto a target's surface. In this study, PLPS was attempted for noncontact stress measurement of concrete. Alumina is one of the chemical components of Portland cement, and is a highly sensitive material for PLPS. Therefore, alumina in concrete can be used as a passive stress sensor by PLPS. To investigate the spectral detectability at different alumina rates, cement mortar specimens were prepared with increasing concentrations of additional alumina. It was determined that spectral detectability increases with increasing alumina concentration. Then, uniaxial compression tests were conducted to investigate the relationship between stress level and spectral shifts. It was ascertained that compressive stress and spectral shifts have a negative linear relationship. Then, the effective piezospectroscopic coefficients were calculated to be $-0.1574 \text{ cm}^{-1}/\text{MPa}$ and $-0.1468 \text{ cm}^{-1}/\text{MPa}$ for the R1 and R2 bands. Finally, the repeatability test revealed that the test results can be reproduced with an error of 2.2%. The experimental results reveal that application of PLPS to concrete can provide essential information for structural health monitoring and allow for preventive measures to be taken before collapse of cement structures.

SCHOLARONE™
Manuscripts

<http://mc.manuscriptcentral.com/shmij>

3.12.3. 소프트웨어

- 소프트웨어 명 : SpectroScanner (스펙트럼 라인스캐너)
- 상태 : 등록완료

국가연구개발사업 과제정보기재 신청서					
① 저작권등록번호(등록연월일)			2018년 11월 29일		
② 제 호 (명 칭)			SpectroScanner (스펙트럼 라인스캐너)		
과제정보 기재사항	③ 국가과제 고유번호	1615010282		④ 부처과제 고유번호	18CTAP -C143291-01
	⑤ 주관부처명	국토교통과학기술진흥원			
	⑥ 과제명	비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발			
신 청 인	⑦ 성 명 (법인명)	한글) 세종대학교 산학협력단 영문) Industry-University Cooperation Foundation of Sejong University			
	⑧생년월일 (법인등록번호)	240171-0007766		⑨과학기술인 등록번호	
	⑩ 주 소	서울 광진구 능동로 209 광개토관 1002호			
	⑪ 전 화 번 호	자택(사무소)	휴대전화	⑫ 전자우편 주소	patent@sejong.a c.kr
대 리 인	⑬ 성 명 (법인명)	이종재		⑭ 주민등록번호 (법인등록번호)	
	⑮ 주 소	서울 광진구 능동로 209 충무관 710호		⑯ 전 화 번 호	02-3408-3290
「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제25조에 따라 위와 같이 과제정보 추가 기재를 신청합니다. 2018 년 12 월 27 일 신청인 이 종 재 (서명인) 한 국 저 작 권 위 원 회 귀 중					
<주요항목의 작성방법> ③ “과제정보”의 “국가과제고유번호”란에는 「국가과학기술종합정보시스템(NTIS)」을 통해 부여된 표준 화된 고유번호를 기재합니다. ④ “과제정보”의 “부처과제고유번호”란에는 연구관리 전문기관이 부여하는 과제고유번호를 기재합니다. (「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제9조제4항에 따른 연구개발과제별 고유번호) ⑨ “과학기술인등록번호”는 국가과학기술종합정보시스템(NTIS)을 통해 발급받습니다. ※ 첨부서류 1. 신청인의 신분을 증명하는 서류(사업자등록증, 신분증 사본 등) 2. 대리인임을 증명하는 서류(대리인이 신청하는 경우에 한정합니다) 3. 목록지(2건 이상 신청시 작성합니다.)					

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4.1. 목표 달성도

4.1.1. 총괄

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	비접촉 절대응력 측정에 적합한 최적시멘트 선정	A-1	배합비별 수화반응후 시멘트 조성	①	스마트 시멘트 배합비	1종 이상	1종 이상 제시	분광검출을 측정	보고서	20	세종대학교 산학협력단	75	논문: 1 건	논문: 투고 1 건	10
	B	시멘트 압분광 효과 규명	B-1	압분광 효과를 이용한 시멘트 응력 측정기술	①	압분광 효과 규명	1종 이상	1종 이상 규명	응력변화 측정	보고서	20	세종대학교 산학협력단	75	특허: 출원 1 건	특허: 출원 1 건	20
														보고서: 1 건	보고서: 1 건 SW: 1 건	10
	C	스마트 콘크리트 개발	C-1	콘크리트 배합비별 압분광 상수 분석	①	계측시간	1분 이하	1분 이하	시간측정	보고서	15	세종대학교 산학협력단	55	보고서: 1 건	보고서: 1 건	10
					②	측정 거리	이격거리 5mm이상	이격거리 5mm이상	거리측정	보고서	15	세종대학교 산학협력단	55	특허: 출원 1 건	특허: 출원 1 건	20
					③	계측 정확도	±5MPa	±5MPa	에러측정	보고서	15	세종대학교 산학협력단	55	논문: 2 건	논문: 1 건 학술발표논문 4 건 1건 12월 투고 예정	20
			C-2	실구조물 적용 방안	④	기존 CNT 기반 자가센싱 기술 대비 매립 원가 절감	50% 이상 절감	50% 이상 절감	원가비교	보고서	15	세종대학교 산학협력단	55	설계서: 1 건	설계서: 0 건 1건 12월 완료 예정	10
	계											100	370	특허: 출원 2 건 논문: 3 건 보고서: 2 건 설계서: 1 건	특허: 출원 2 건 논문: 투고 1 건 논문: 출간 1 건 학술발표논문 4 건 보고서: 2 건 SW: 1 건	100

4.1.2. 1차연도

구 분	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	비접촉 절대응력 측정에 적합한 최적시멘트 선정	A-1	배 합비별 수화반응 후 시멘트 조성	①	스마트 시멘트 배 합비	1종 이상	1종 이상 제시	분광검출을 측정	보고서	50	세종대학교 산학협력단	75	논문: <u>1 건</u>	논문: 투고 <u>1 건</u>	25
	B	시멘트 압분광 효과 규명	B-1	압분광 효과를 이용한 시멘트 응력 측정기술	①	압분광 효과 규명	1종 이상	1종 이상 규명	응력변화측정	보고서	50	세종대학교 산학협력단	75	특허: 출원 <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u>	50
														보고서: <u>1 건</u>	보고서: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u>	25
계											100		150	특허: 출원 <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 보고서: <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u> 논문: 투고 <u>1 건</u> 보고서: <u>1 건</u> SW: <u>1 건</u>	100

4.1.3. 2차연도

구 분	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	C	스마트 콘크리트 개발	C-1	콘크리트 배합비별 압분광 상수 분석	①	계측시간	1분 이하	1분 이하	시간측정	보고서	25	세종대학교 산학협력단	55	보고서: <u>1 건</u>	보고서: <u>1 건</u>	16.7
					②	측정 거리	이격거리 5mm이상	이격거리 5mm이상	거리측정	보고서	25	세종대학교 산학협력단	55	특허: 출원 <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u>	33.3
					③	계측 정확도	±5MPa	±5MPa	에러측정	보고서	25	세종대학교 산학협력단	55	논문: <u>2 건</u>	논문: <u>1 건</u> 학술발표논문 4 건	33.3
			C-2	실구조물 적용 방안	④	기존 CNT 기반 자기센싱 기술 대비 매립 원가 절감	50% 이상 절감	50% 이상 절감	원가비교	보고서	25	세종대학교 산학협력단	55	설계서: <u>1 건</u>	설계서: <u>0 건</u> 1건 12월 완료 예정	16.7
계										100		220	특허: 출원 <u>1 건</u> 논문: <u>2 건</u> 보고서: <u>1 건</u> 설계서: <u>1 건</u>	특허: 출원 <u>1 건</u> 논문: <u>1 건</u> 학술발표논문 4 건 보고서: <u>1 건</u>	100	

4.1.4. 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형1)	연구기관	해당 연차	TRL
1	최적 시멘트 선정	스마트 시멘트 및 스마트 콘크리트에 들어가는 미립자를 선정하는 단계로, 비접촉 절대응력 측정에 적합한 고분광 물질을 문헌연구를 통해 가선택하고, 수화반응 전/후의 재료 시험, 분광검출을 측정 등을 통하여, 최종적인 시멘트첨가제를 선정함	재료	세종대	1	3
2	시멘트 압분광 효과 규명	CTE 1을 통하여 선정된 최적 시멘트를 이용하여 만들어진 시편으로부터 배합비별 압분광 현상을 규명하고, 분석 알고리즘을 개발하며, 특허 출원, 논문 제출 등으로 기술시장 선점	기타 (알고리즘)	세종대	1, 2	3
3	스마트 콘크리트 개발	CTE 1과 CTE 2를 통하여 검증된 스마트 시멘트를 이용하여, 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트를 개발하고, 그 압분광효과를 규명하며, 현작적용 방안을 설계	재료	세종대	2	4

4.1.5. 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	비접촉 절대응력 측정에 적합한 최적 시멘트 선정	
정의	비접촉 절대 응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발에 사용될 최적 시멘트 선정	
목적	스마트 시멘트 및 스마트 콘크리트에 들어가는 미립자를 선정하는 단계로, 비접촉 응력 센싱에 적합한 고분광 물질을 문헌연구를 통해 가선택하고, 수화반응 전/후의 재료시험, 분광검출을 측정 등을 통하여, 최종적인 시멘트 첨가제를 선정함. 본 과정을 통하여 선정된 시멘트 첨가제는 콘크리트 내부에서 응력 센서로 사용되어, 비접촉식 응력 측정을 가능케 함	
성능목표	(기존기술 수준) 고분광 물질이 포함된 스마트 시멘트 관련 기존기술 전무 (개발기술 수준) 스마트 시멘트 최적 배합비 1종 이상 제시	
성과달성 확인방법	시멘트 및 첨가제 배합비율에 따른 스펙트럼의 첨두값 위치 및 그 Intensity를 확인. 즉, 분광검출율을 측정함	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI : 1건 (심사중)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2	시멘트 압분광 효과 규명	
정의	시멘트 모르타 시편에 대한 압분광 효과 규명	
목적	비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트는 시멘트의 압분광 효과를 기반으로 응력을 측정하게 됨. 따라서, 시멘트 압분광 효과를 규명하는 것은 스마트 콘크리트 개발을 위해 반드시 필요함	
성능목표	(기존기술 수준) 일부 시멘트 미분말에 대한 압분광 효과 규명됨 (개발기술 수준) 스마트 시멘트 모르타 압분광 효과 1종 이상 제시	
성과달성 확인방법	최소 1종 이상의 스마트 시멘트 모르타에 압축하중(압축강도의 70%)을 가하고, 하중단계(최소 4단계)에서 선형성을 갖는지 확인함	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	등록 : 1건 (초과달성)
	신기술	0건
	기타	보고서 : 1건

핵심성과 3	스마트 콘크리트 개발	
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 기반 비접촉식 콘크리트 응력 측정관련 기술 전무 (개발기술 수준) 계측시간 1분 이내, 응력 측정 이격거리 5mm 이상, 계측 정확도 $\pm 5\text{MPa}$ 이하의 기술 개발	
성과달성 확인방법	- 최소 1종 이상의 스마트 콘크리트 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% 이상 절감	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 1건
	논문	SCI : 1건, 학술발표논문 4건 (초과달성) (비고) 미달성 성과인 SCI 1건의 경우, 상기 출원특허 “레이저 기반 콘크리트 평균 응력 측정 시스템 및 방법”의 내용을 일부 보완하여, 2020년 5월 중 투고 예정
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	보고서 : 1건 (비고) 미달성 성과인 설계서 1건의 경우, “기존 CNT기반 자가센싱 기술 대비, 센싱미립자 매립비용 50% 이상 절감”과 관련된 내용을 포함하며, 해당 내용은 본 보고서의 69페이지에 기수록되어있음. 따라서, 상기 미달성 SCI(E) 투고시 본 내용을 수록하여 투고하도록 함

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

5.1. 최종성과물의 활용방안

○ 미래 원천기술 확보

- 전 세계적으로 압분광 효과를 갖는 센싱 물질이 포함된 콘크리트에 대한 비접촉식 절대응력 측정기술은 보고된 사례가 없음. 따라서, 본 연구를 통하여 **비접촉식 콘크리트 절대응력 측정기술의 원천기술**을 확보하고, 해당 시장을 선점할 수 있을 것으로 판단됨

○ 실용화, 제품화 추진

- 지적재산권 확보
 - 비접촉식 응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트의 첨가제 종류 및 배합 비율에 대한 특허 출원/등록
 - 압분광 효과를 이용한 콘크리트 절대응력 측정 기법 및 장비에 대한 지적재산권 확보
- 기술사업화 과제 추진
 - 신설되는 토목/건축 구조물에 시범적용하고, 지속적인 응력 측정을 수행하여 적용성을 검증
 - 계측 장비 및 분석프로그램 패키징 등 사업화 추진
 - 기술 이전 및 실시 계약 체결
- 건설 신기술 지정
 - 개발된 스마트 콘크리트를 이용한 시험시공 및 현장 검증
 - 개발된 절대응력 자기진단 스마트 콘크리트에 대한 경제성 분석
 - 건설 신기술 지정 신청



<연구성과 실용화 계획>

○ 수요처

- 교량, 댐, 발전시설 등 신설 콘크리트 구조물 : 신설구조물의 경우에는 절대응력 모니터링 가능
- 보수보강이 필요한 콘크리트 구조물 : 보수보강 시에는 추가하중에 의한 응력 모니터링
- 지속적인 유지관리가 필요한 중요 구조 부재에 1차적으로 적용하고, 경제성에 대한 상세 분석 이후, 일반 콘크리트 구조물에 확대 적용
- 콘크리트를 사용하는 국내외 건설사 활용 → 大 시장

○ 신산업 창출

- 새로운 미래 첨단 건설 재료 : 자가감지(Self-sensing)가 가능한 스마트 콘크리트 신산업 육성
- 분광기술을 건설/유지관리 분야에 적용하는 첨단 계측산업 육성

5.2. 기대성과 및 파급효과

○ 기술적 효과

- 압분광 효과를 갖는 센싱 물질이 포함된 콘크리트를 이용한 응력 측정기술은 전세계적으로 독보적인 기술이므로, 지적재산권을 확보함으로써 **세계 최초의 원천 기술** 개발 가능
- 절대응력 측정의 난제를 해결하여 세계적인 연구성과 도출 → 최고 저명한 국제학술지에 논문발표
- 압분광 효과에 민감하게 반응하는 콘크리트 재료 개발과 함께 분광기의 분해능을 개선하여 정밀도를 개선하기 위한 하드웨어 분야의 발전 촉진
- 재료, 광학, 건설, 기계 등 융합학문 발전의 벤치마킹 모델

비접촉식 절대응력 측정 가능 스마트 콘크리트 개발



<연구의 파급효과>

○ 경제적 효과

- 콘크리트는 강재와 함께 토목/건축 구조물의 대표적인 재료이며, 큰 하중을 담당하는 주요 부재로 사용되므로 응력 모니터링이 필수적임. 본 연구에서 개발될 스마트 콘크리트는 건전도 평가를 위해서 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

- 절대응력 자기진단형 스마트 콘크리트의 경제성을 확보할 경우, 막대한 건설 시장 개척 가능
- 콘크리트 건설재료와 함께 분광기에 대한 장비 분야의 발전

○ 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

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

- 비접촉식 절대응력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발은 국내/외에서 최초로 시도되는 연구과제 이기 때문에, 관련 연구정보를 찾을 수 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유	일반 보안등급 연구과제	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호
	해당 없음							

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전조치 이행계획

- 본 연구는 레이저 장비와 유압가력장비를 이용한 실내 실험을 수행하므로 이에 대한 실험실 안전수칙을 따름

<기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책>

위험요소		레이저	유압가력장비
기술적 위험 요소		유해광선 발생	협착 사고
안전 관리 대책	공통	• 산업안전보건기준에 관한 규칙 제451조 보호복 등의 비치 • 개인보호구의 사용 및 관리에 관한 기술지침(KOSHA GUIDE G-12-2013)	
	개별	• 레이저를 취급할 때에는 반드시 적절한 광학밀도를 갖춘 차광용 보안경을 착용 • 예기치 못한 반사광을 대비하기 위하여 광선의 방출방향에 대해 주의하고 반사하는 벽 등이 없음을 확인 • 경고 및 표시등은 보호필터를 통하여 볼 수 있도록 함 • 모든 레이저 사용영역과 출입구에 레이저 위험등급을 분류하고, 경고표지를 부착 • 고전압 장비가 접지되어 있는지 확인 • 실험대 및 작업대를 별도로 분리하여 배치 • 의자의 높이를 레이저가 인체의 눈에 직접적으로 영향을 주지 않도록 설치	• 기계 안전장치 설치(방호덮개, 비상정지 장치 등) • 장비 사용 시 개인보호구 착용 • 가력장치의 헤드 하단에서 작업 시 전기나 유압이 연결되지 않은 상황에서 가력장치의 액추에이터 헤드가 하강할 경우를 대비하여 안전블록 사용 • 여러 사람이 실험하는 경우, 총괄 지휘자의 지시에 의해서만 수행 • 연구활동종사자에게 가력장치의 안전한 사용에 대한 교육 실시

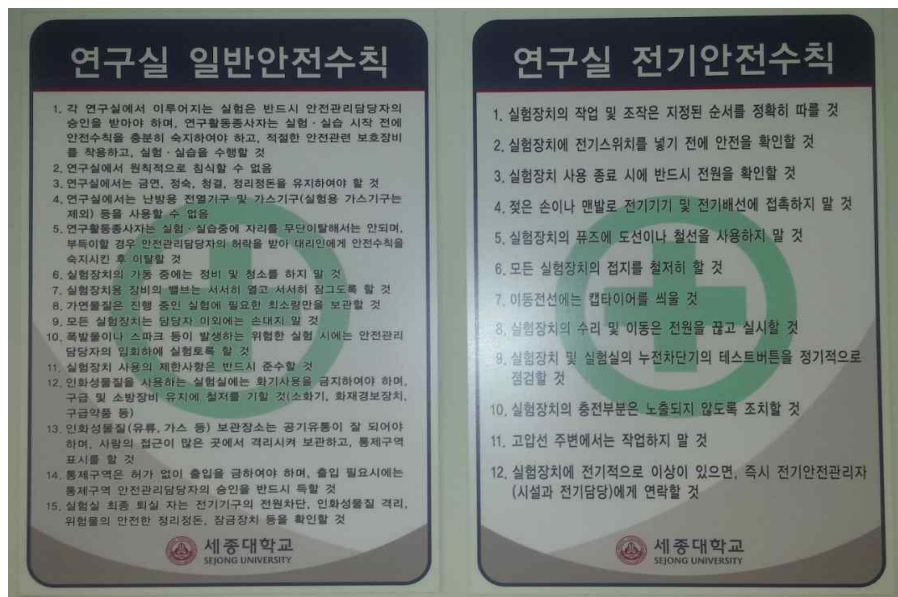


<레이저 경고표지 예>



<레이저 보안경 예>

- 각 연구기관별 『연구실 안전조치 이행계획』에 따라 안전사고를 예방하고 대응함



<연구실 안전조치 이행계획에 따른 연구실내 안전수칙 부착>



<비상기구함 비치>

- 『연구실 안전환경 조성에 관한 법률』에 의거하여 안전교육을 정기적으로 실시

Sejong University Safety Education System Interface

김세훈 님 환영합니다. 로그인 | 로그아웃 | 대역용

안전관리소개 | 안전관리법규 | 비상시대응요령 | 알림판 | MSDS | 안전교육

실험실 안전의씨앗
함께 가꿀수록 큰 열매를 맺습니다

안전교육
Safety education

- 교육안내
- 안전강의실
- 수료증 조회
- 이용방법

안전강의실

안전교육과정 안내

과정명 : 2016년 1학기 안전교육
교육기간 : 2016년 03월 01일 ~ 2016년 09월 30일
과정구성 : 총 6시간으로 구성 (필수 2시간, 선택 4시간)

연구활동종사자 정보

학과정보 : 대학원 > 구조공학
연구활동종사자 : 김세훈

안전교육과정

현재 교육과정을 설정하지 않으셨습니다.
아래의 설정 버튼을 눌러 교육과정을 선택하시기 바랍니다.
(최초 한번만 설정하시면 되며, 설정하신 교육과정으로 교육이 진행됩니다.)

교육과정 선택하기

과정선택	교육수강	평가	수료증
0%			

강의를 모두 수강하였다면, 평가를 통하여 안전교육을 수료할 수 있습니다. (수료를 위한 기준점수는 60점입니다.)

교육이 진행이 안되거나, 정상적으로 보이지 않는다면, 최신 플러그인 플레이어를 설치해주세요.

<주관연구기관의 정기적 온라인 안전교육 시스템>

○ 유전자변형생물체(LMO) 연구시설 및 수입 신고 현황

해당사항 없음

제10장. 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	자가 응력 측정이 가능한 시멘트 콘크리트 재료 및 그 측정 방법	세종대	주관	국내특허	-	2018.12.20.	단독 사사	출원
2	소프트 웨어	스펙트럼 라인스캐너	세종대	주관	소프트웨어	-	2018.12.27.	단독 사사	등록
3	학술발 표논문	A Feasibility Study of Laser-based Concrete Stress Measurement Technique	세종대	주관	학술발표 논문	-	2019.08.28.	단독 사사	출간
4	국제 논문	Design and optimization of MFL coil sensor apparatus based on numerical survey	세종대	주관	국제논문	-	2019.11.08.	단독 사사	출간
5	국제 논문	Noncontact Stress Measurement Technique for Concrete Structure using Photoluminesc ence Piezospectrosc opy	세종대	주관	국제논문	-	-	단독 사사	리뷰중
6	특허	레이저 기반 콘크리트 평균 응력 측정 시스템 및 방법	세종대	주관	국내특허	-	2019.12.26.	단독 사사	출원

관 인 생 략
출 원 번 호 통 지 서

출 원 일 자 2018.12.20
특 기 사 항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(SP180140)
출 원 번 호 10-2018-0165750 (접수번호 1-1-2018-1281894-06)
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 자가 응력 측정이 가능한 콘크리트 조성물 및 응력 측정 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), 정정신고서]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

국가연구개발사업 과제정보기재 신청서					
① 저작권등록번호(등록연월일)			2018년 11월 29일		
② 제 호 (명 칭)			SpectroScanner (스펙트럼 라인스캐너)		
과제정보 기재사항	③ 국가과제 고유번호	1615010282		④ 부처과제 고유번호	18CTAP -C143291-01
	⑤ 주관부처명	국토교통과학기술진흥원			
	⑥ 과제명	비접촉식 절대용력 측정이 가능한 스마트 콘크리트 개발			
신 청 인	⑦ 성 명 (법인명)	한글) 세종대학교 산학협력단 영문) Industry-University Cooperation Foundation of Sejong University			
	⑧ 생년월일 (법인등록번호)	240171-0007766		⑨ 과학기술인 등록번호	
	⑩ 주 소	서울 광진구 능동로 209 광개토관 1002호			
	⑪ 전 화 번 호	자택(사무소) 02-3408-4097	휴대전화	⑫ 전자우편 주소	patent@sejong.a c.kr
대 리 인	⑬ 성 명 (법인명)	이종재		⑭ 주민등록번호 (법인등록번호)	
	⑮ 주 소	서울 광진구 능동로 209 충무관 710호		⑯ 전 화 번 호	02-3408-3290
「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제25조에 따라 위와 같이 과제정보 추가 기재를 신청합니다. 2018 년 12 월 27 일 신청인 이 종 재 (서명  인) 한 국 저 작 권 위 원 회 귀 중					
<주요항목의 작성방법> ③ “과제정보”의 “국가과제고유번호”란에는 「국가과학기술종합정보시스템(NTIS)」을 통해 부여된 표준 화된 고유번호를 기재합니다. ④ “과제정보”의 “부처과제고유번호”란에는 연구관리 전문기관이 부여하는 과제고유번호를 기재합니다. (「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제9조제4항에 따른 연구개발과제별 고유번호) ⑨ “과학기술인등록번호”는 국가과학기술종합정보시스템(NTIS)」을 통해 발급받습니다. ※ 첨부서류 1. 신청인의 신분을 증명하는 서류(사업자등록증, 신분증 사본 등) 2. 대리인임을 증명하는 서류(대리인이 신청하는 경우에 한정합니다) 3. 목록지(2건 이상 신청시 작성합니다.)					



A Feasibility Study of Laser-based Concrete Stress Measurement Technique

Namgyu KIM¹, Jong-Jae LEE¹

¹ Sejong University, Seoul, South Korea

Contact e-mail: namgyu.kim@sejong.ac.kr

ABSTRACT: In this paper, a feasibility study for a laser-based concrete stress measurement technique has been conducted and experimentally validated with uniaxial compression tests. Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) method is widely used for measuring residual stresses in thermal barrier coating, and the technique is being researched in civil engineering field recently thanks to its laser-based non-contact and non-destructive features. In this paper, non-contact and non-destructive PLPS technique is firstly applied to a concrete material for measuring stress induced by external force. To do that, a piezospectroscopic material has been mixed with cement powder, and a cubic specimen has been fabricated for uniaxial compression tests. Based on the results of uniaxial compression tests, it has been experimentally proved that the applied compressive stresses into the specimen and its spectral peak shifts have a linear relationship.

1 INTRODUCTION

There are various studies looking for practically applicable nondestructive and noncontact techniques for the concrete stress measurement, but the techniques are still unproved to be practically applied in the field. Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) is a potential nondestructive testing technique that can measure the concrete stress induced by external force. Here, photoluminescence (PL) is a result of light emission process from any form of matter after the absorption of photons, and it can be generated when a sample is irradiated by a laser. Using the spectrum, the molecular structure of a material can be identified. In addition, the stress state of the material can be also determined particularly for $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (alumina). It is known as PLPS technique and widely used to determine the residual stress in thermal barrier coating (D.M. Lipkin et al. (1996)). As shown in Figure 1, a typical PL spectrum has two distinguishable peaks of R1 and R2 lines at the wavenumbers of $14,403\text{ cm}^{-1}$ and $14,433\text{ cm}^{-1}$, and the R1 and R2 lines are shifted to the left or right side from the stress-free spectrum when compressive or tensile stress is applied into the sample, respectively. Based on the phenomena, the current stress level in a parent material can be calculated.

In this study, a feasibility study has been therefore performed to use the alumina particles in cement cubes as an in-situ passive stress sensor using PLPS technique. Uniaxial compression tests have been conducted to a cement cube specimen to investigate the piezospectroscopic effect of alumina in cement structure.



License: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Article

Design and Optimization of an MFL Coil Sensor Apparatus Based on Numerical Survey

Ali Azad and Namgyu Kim *

Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea; g2016sfd008@sju.ac.kr

* Correspondence: namgyu.kim@sejong.ac.kr; Tel.: +82-2-6935-2682

Received: 14 October 2019; Accepted: 6 November 2019; Published: 8 November 2019



Abstract: In this study, we aimed to design a coil sensor prototype capable of detecting metallic area loss based on numerical simulations using the magnetic flux leakage (MFL) method. Unlike previous numerical simulation-based studies, which are only conducted to obtain the MFL itself, the main objectives of this study were (1) to acquire the induced current in the coil sensor and (2) to optimize the apparatus based on a time-dependent numerical analysis. As a result, the optimum values of parameters in magnetizing and sensing units were obtained numerically. A magnetic sensor prototype was then fabricated using the optimum parameters obtained by numerical parametric study. Finally, experimental validation tests were conducted on a solid steel rod specimen with a stepwise cross-sectional reduction flaw. It was observed that numerical simulation had approximately 91% precision compared to the experimental test. The results reveal that application of a realistic numerical simulation of an MFL coil sensor can probably provide essential information for MFL-sensor fabrication and allows for preventive measures to be taken before manufacturing failure or defect misdetection.

Keywords: magnetic flux leakage; coil sensor; numerical analysis; parametric study; non-destructive test

1. Introduction

To assess the integrity of structures, structural health monitoring (SHM) for metal members, such as pipelines in the oil and gas industry, load carrying cables in bridges, lifts, cranes, etc., is an essential task and must be done regularly to eliminate any chance of structural failure and economic loss [1]. For instance, the current transport system for oil-gas products is a pipeline which requires routine inspections due to the presence of humidity and underground pressure, because any metal losses, cracks, and corruptions may cause an accident. Therefore, pipelines must always be functional while being completely sound and intact [2,3]. Steel cables are the main load-carrying elements in an enormous number of machines and structures. Although steel cables and ropes are designed to have high strength, cross-sectional damage and internal breakage and cracks can still occur during their service life and may compromise the entire structural integrity [4]. However, these types of damages are not easily detected by the naked eye and visual inspections (e.g., internal breakage of cable in cable-stayed bridges) [5]. Hence, demand for SHM using non-destructive testing (NDT) methods has increased significantly. Currently, there are a variety of conventional methods which are being applied based on non-destructive SHM principles such as visual inspection [6], magnetic flux leakage (MFL) [7,8], eddy current sensing [9,10], acoustic emission [11–15], and guided wave [16–18], among other techniques.

Traditionally, in the MFL method, the axial component of the magnetic flux density is used, which causes misdetection in the case of axial cracks. Liu et al. [19] proposed a circumferential excitation method to detect axial defects in pipelines. Also, they investigated the influence of a crack's geometry

Structural Health Monitoring

Noncontact Stress Measurement Technique for Concrete Structure using Photoluminescence Piezospectroscopy

Journal:	Structural Health Monitoring
Manuscript ID:	SHM-19-0370
Manuscript Type:	Original Manuscript
Date Submitted by the Author:	10-Oct-2019
Complete List of Authors:	Kim, Namgyu; Sejong University, Civil and Environmental Engineering Lee, Jong-Jae; Sejong University, Seoul, 143-747, South Korea, Department of Civil and Environmental Engineering
Keywords:	photoluminescence, piezospectroscopy, laser, stress measurement, concrete structure
Abstract:	Photoluminescence piezospectroscopy (PLPS) is a laser-based noncontact and nondestructive stress measurement technique but has not been studied extensively in the field of civil structural health monitoring. Using the PLPS technique, the stress level can be measured by emitting a laser source onto a target's surface. In this study, PLPS was attempted for noncontact stress measurement of concrete. Alumina is one of the chemical components of Portland cement, and is a highly sensitive material for PLPS. Therefore, alumina in concrete can be used as a passive stress sensor by PLPS. To investigate the spectral detectability at different alumina rates, cement mortar specimens were prepared with increasing concentrations of additional alumina. It was determined that spectral detectability increases with increasing alumina concentration. Then, uniaxial compression tests were conducted to investigate the relationship between stress level and spectral shifts. It was ascertained that compressive stress and spectral shifts have a negative linear relationship. Then, the effective piezospectroscopic coefficients were calculated to be $-0.1574 \text{ cm}^{-1}/\text{MPa}$ and $-0.1468 \text{ cm}^{-1}/\text{MPa}$ for the R1 and R2 bands. Finally, the repeatability test revealed that the test results can be reproduced with an error of 2.2%. The experimental results reveal that application of PLPS to concrete can provide essential information for structural health monitoring and allow for preventive measures to be taken before collapse of cement structures.

SCHOLARONE™
Manuscripts

<http://mc.manuscriptcentral.com/shmij>

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 10-2010-0000000, 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.
8. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

제11장. 참고문헌

1. K.G. Dassios and C. Galiotis, "Fluorescence studies of polycrystalline Al_2O_3 composite constituents: piezo-spectroscopic calibration and application", Applied Physics, 2004
2. S.-H. Shim and T. Duffy, "Raman spectroscopy of Fe_2O_3 to 62 GPa", American Mineralogist, 2001
3. 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, 2012
4. S.-H. Shim, "Raman spectroscopy and x-ray diffraction of phase transitions in Cr_2O_3 to 61 GPa", Physical Review, 2004
5. John E. Proctor et al., "High-pressure Raman spectroscopy of graphene", Physical Review, 2009
6. T. M. G. Mohiuddin et al., "Uniaxial strain in graphene by Raman spectroscopy: G peak splitting, Grüneisen parameters, and sample orientation", Physical Review, 2009
7. 김보석, 신준호, 이한승, "화상 이미지 기반 FEM 해석을 이용한 기포제 혼입 시멘트 페이스트의 역학 성능 평가.", 한국건축시공학회지 16.1, 2016
8. 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
9. Kim, Sun-Myung, and Rashid K. Abu Al-Rub, "Meso-scale computational modeling of the plastic-damage response of cementitious composites.", Cement and Concrete Research 41.3, 2011
10. 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
11. Rhee, In-Kyu, and Woo Kim, "Effects of Numerical Modeling on Concrete Heterogeneity.", Journal of the Korea Concrete Institute 18.2, 2006.

부록 1. 압분광법을 이용한 응력 측정방법에 대한 고찰

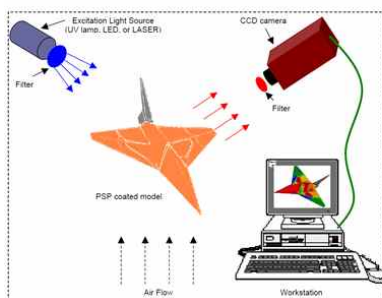
MULTI-LUMINOPHORE COATINGS FOR PRESSURE SENSITIVE PAINT APPLICATIONS, University of Florida 2005

Main focus of the research

- Application of data calibration based on principal component analysis (PCA) to PSP

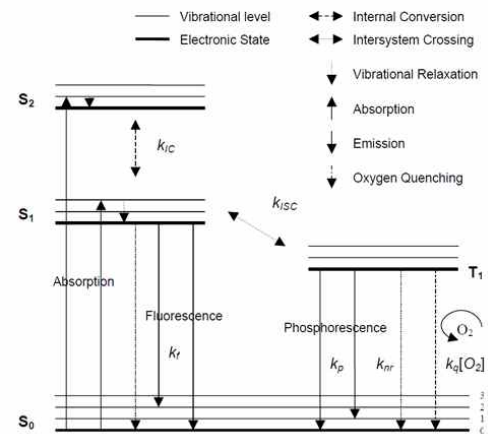
PSP

- Luminescence intensity is proportional to the oxygen concentration (i.e., surface pressure)



Problems of PSP

- Temperature effect
- Image registration and reference paint
- Photodeterioration
- Response time and induction effects



MULTI-LUMINOPHORE COATINGS FOR PRESSURE SENSITIVE PAINT APPLICATIONS, University of Florida 2005

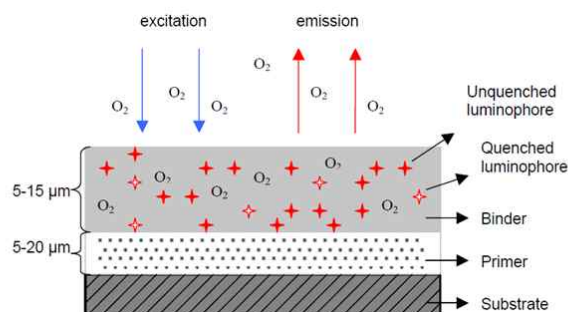
- Binder is high oxygen permeable matter
- Primer is a coat of high reflective layer
- PSP components are dispersed in a solvent and sprayed on the substrate.

PSP measurement methods

- ☐ Intensity-based imaging: imaging by CCD unit and pressure is determined from the ratio of wind-off to wind-on images.
- ☐ Lifetime imaging: imaging by differences in the exponential decay rate of the fluorescence.

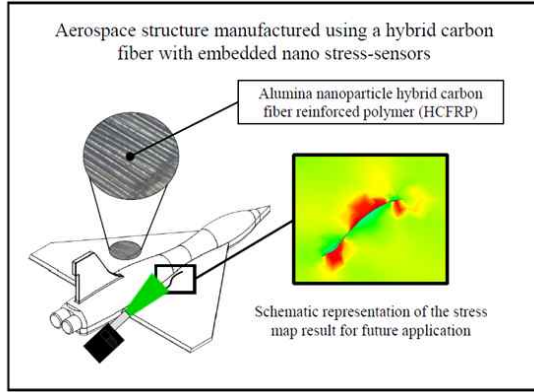
Photostability

- ☐ Singlet oxygen generated by excited luminophore (quenched by ground state oxygen) is very reactive and cause photodegradation.



Hybrid Carbon Fiber Alumina Nanocomposite for Non-contact Stress Sensing via Piezospectroscopy, UCF, 2017

- Nano particle of alumina was added to hybrid carbon fiber reinforced polymer (HCFRP)
- high resolution photo-luminescent maps was performed to determine particle dispersion with varying alumina content.
- Strain measurement using digital image correlation (DIC) was conducted as well.
- Aluminum oxide (alumina) is popular because of its high temperature capacity (thermal barrier coating). Also, it is used as non-contact stress and damage detection technique.



- Photoluminescent (PL): is light emission from any matter after the absorption of photons.

- Piezospectroscopy (PS): an emerging non-contact technique for monitoring spectral emissions as they change with stress.

- R lines: The intense fluorescence lines used in the piezospectroscopic stress analysis

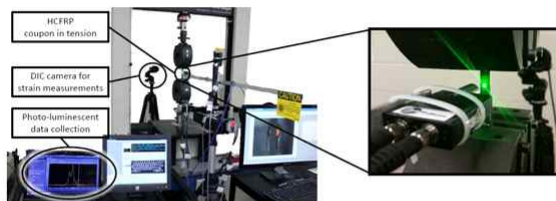
$$\Delta\nu = \Pi_{ij}\sigma_{ij}^*$$

Furthermore, by averaging over many grains at random orientation, a reduced polycrystalline model can be obtained as below

$$\Delta\nu = \frac{1}{3}\Pi_{ii}\sigma_{jj}$$

Hybrid Carbon Fiber Alumina Nanocomposite for Non-contact Stress Sensing via Piezospectroscopy, UCF, 2017

- DIC: is an optical measurement technique used to detect surface strains.

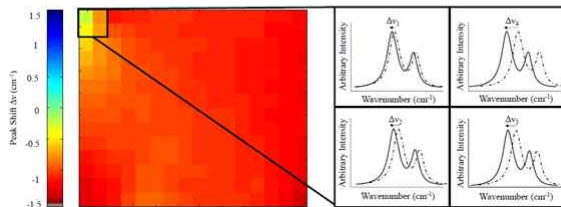


- Photo-Stimulated Luminescent Spectroscopy

1. Spectrum in stress-free state is accessed.
2. Load increment and hold for measurement (25 MPa)
3. Finally, Last data measurement is obtained when specimen is unloaded.

- Photo-Stimulated Luminescent Spectroscopy

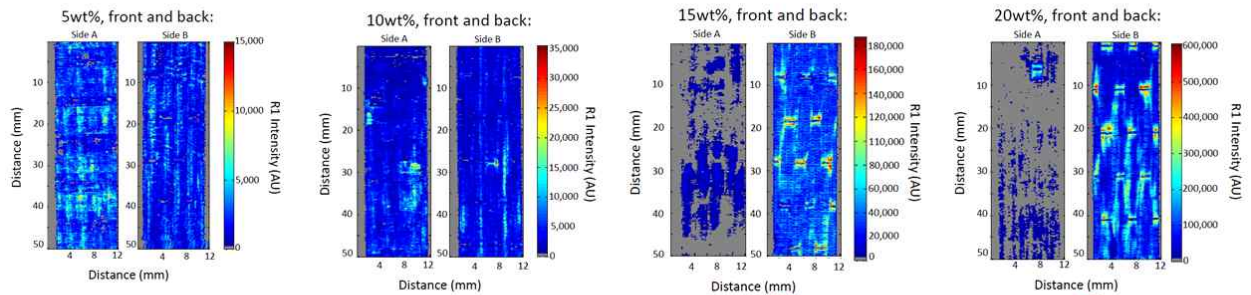
- In this study, photo Luminescent was obtained only in the static state, while DIC images were acquired during both static and ramp up.



Hybrid Carbon Fiber Alumina Nanocomposite for Non-contact Stress Sensing via Piezospectroscopy, UCF, 2017

- **High Resolution Photo-Luminescent Mapping**

- **Particulate dispersion analysis:**



An ideal and uniform sample with perfect dispersion would be portrayed as a tall peak with a very narrow full width at half maximum (FWHM). On the other hand, a non-uniform sample would have a short peak with a large FWHM.

- **Effective factor on piezospectroscopy**

- I. **Particle sedimentation**

- II. **Particle agglomeration** → causes fluctuation and non-uniform during measurement

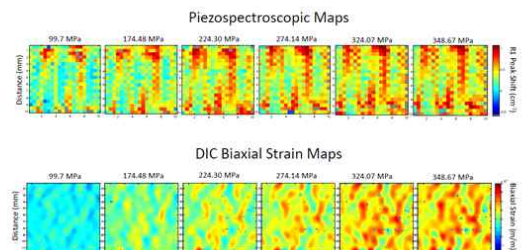
Particle sedimentation (due to excessive amount additive) and agglomeration.

Hybrid Carbon Fiber Alumina Nanocomposite for Non-contact Stress Sensing via Piezospectroscopy, UCF, 2017

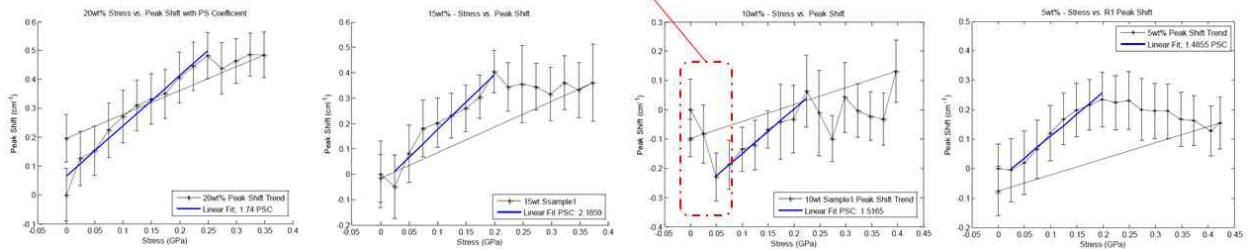
- **Photo-Luminescent Mapping**

- **Stress mapping**

- At **each static hold**, piezospectroscopic map was acquired.



Moisture ingress occurred during adding alumina nanopowder

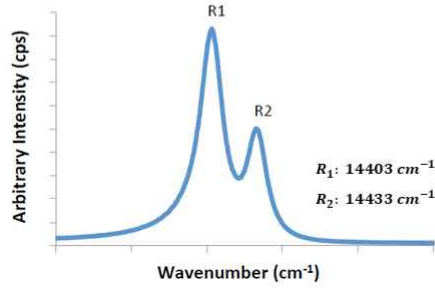


Piezospectroscopic Calibration of Alumina Nanocomposites for the Development of Stress-Sensing Structures, UCF 2012

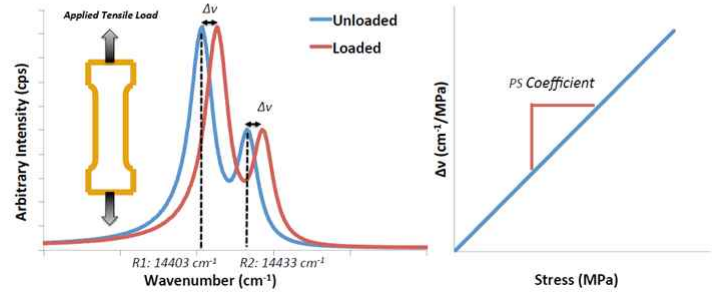
Objectives:

1. Photo Luminescence (PL) of alumina-epoxy under tensile stress.
2. PS coefficient under tension.

α -Alumina PL



Piezospectroscopy



Piezospectroscopic Calibration of Alumina Nanocomposites for the Development of Stress-Sensing Structures, UCF 2012

Objectives:

1. Photo Luminescence (PL) of alumina-epoxy under tensile stress.
2. PS coefficient under tension.

PS coefficient Polycrystalline Alumina:

Considering a large number of randomly oriented grains:

$$\overline{\Delta v} = \frac{1}{3}(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{33})(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$$

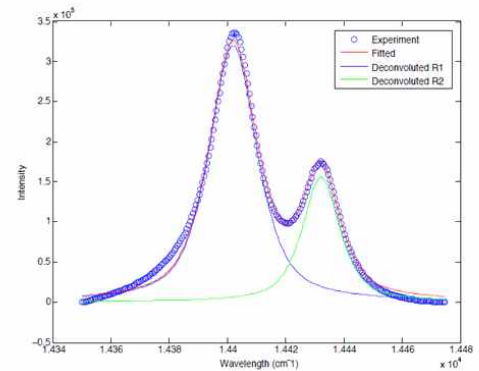
By neglecting transverse stress ($\sigma_{33} = 0$) and assuming equal plane stress ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma$),

the above equation can be expressed as follows:

$$\overline{\Delta v} = \frac{2}{3}(\pi_{11} + \pi_{22} + \pi_{33})\sigma$$

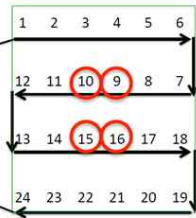
Deconvolution and Curve-fitting of Photo-luminescent Data

A genetic algorithm based procedure was used to deconvolute R-lines peaks

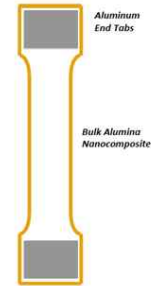


Piezospectroscopic Calibration of Alumina Nanocomposites for the Development of Stress-Sensing Structures, UCF 2012

• PL data collection:



• Strain measurement (Fiber Bragg Grating)



• PL data collection:

- Measurement was done by considering only the 4 points highlighted in the middle of the specimen. Then, averaged results were obtained.

Piezospectroscopic Calibration of Alumina Nanocomposites for the Development of Stress-Sensing Structures, UCF 2012

Figure 4.5, 4.6, and 4.7 show that within the R1 linear region for all volume fractions, the embedded particles exhibited positive peak shifts with increasing strain due to the applied tensile load. The end of the linear region was defined as the elastic limit or the **Not true**

• PL data collection:

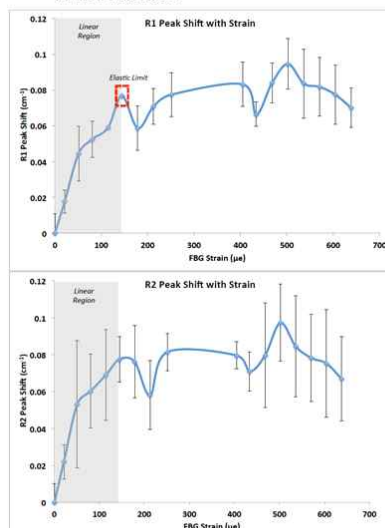


Figure 4.5: 21.0% R1 and R2 Peak Shift with Strain

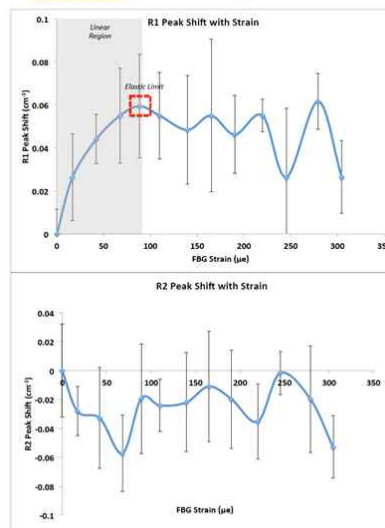


Figure 4.6: 31.2% R1 and R2 Peak Shift with Strain

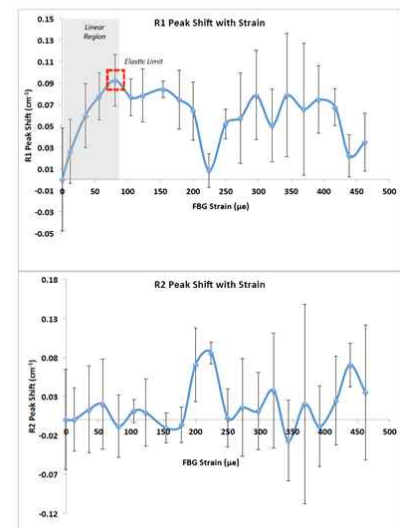


Figure 4.7: 34.5% R1 and R2 Peak Shift with Strain

Piezospectroscopic Calibration of Alumina Nanocomposites for the Development of Stress-Sensing Structures, UCF 2012

- **Reasons of non-linear behavior:**

- **Nanoparticle volume fracture**

By increasing volume fracture of the alumina particles, peak shift increment becomes more intense (alumina has higher modulus compare to epoxy).

- **Micromechanic effects in tension**

By increasing volume fracture of alumina (which causes several micro mechanics issues such as interfacial layer failure, microvoid formation and crack initiation), less ductile epoxy is obtained and therefore less elastic strain will be observed.

- **Peak separation:**

If by increasing strain, peak separation between R1 and R2 happens, it can be said that stress state has deviated from hydrostatic stress.

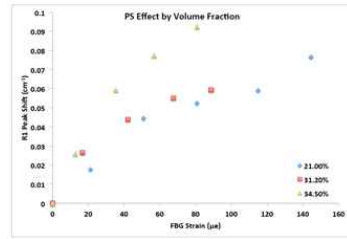


Figure 4.8: PS Results for Variable Volume Fractions

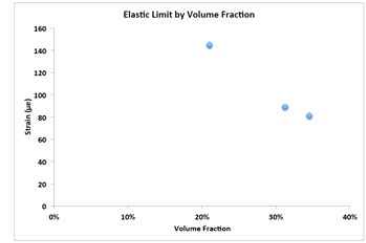


Figure 4.9: Elastic Limit by Volume Fraction

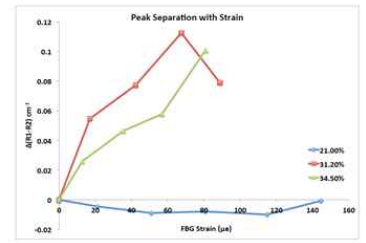


Figure 4.10: Peak Separation with Increasing Tensile Load

Nanocomposite Coating Mechanics via Piezospectroscopy, UCF 2014

- **Main focus of this study:**

- Elastic modulus of composite specimen with a whole
 - Performing complementary DIC and PS.

- **Alumina:**

- High hardness
 - High elastic modulus
 - strength retention at high temperatures
 - Thermal/electrical insulation
 - Wear/corrosion resistance

- **Alumina deposition:**

- Plasma spray reduces the alpha phase after deposition.
 - epoxy does not reduce alpha phase.

- **PS:**

- R1 and R2 lines have different sensitivities.
 - Peak broadening is a sign of non-hydrostatic stress

- **PS:**

- Damage is usually defined as reduction in stiffness (elastic degradation) through mechanical loading or by reduction in the effective stress carrying area.
 - PS coefficient increases by increasing alumina's volume fracture.

Table 2.1: Experimental PS coefficients (Π_p) for R1 and R2 peaks [92, 24]

Volume Fraction %	R1 PS Coefficient $\frac{cm^{-1}}{GPa}$	R2 PS Coefficient $\frac{cm^{-1}}{GPa}$
5	-3.16	-2.60
20	-3.34	-3.19
25	-3.65	-3.42
34	-4.10	-3.88
38	-5.63	-5.08

$$\Delta\nu = \frac{1}{3}\Pi_{ii}\sigma_{jj}$$

Hydrostatic stress condition *

(*) He and Clarke introduced a reduced polycrystalline model

$$\Delta\nu_c = \Pi_c\sigma_a$$

Under test condition

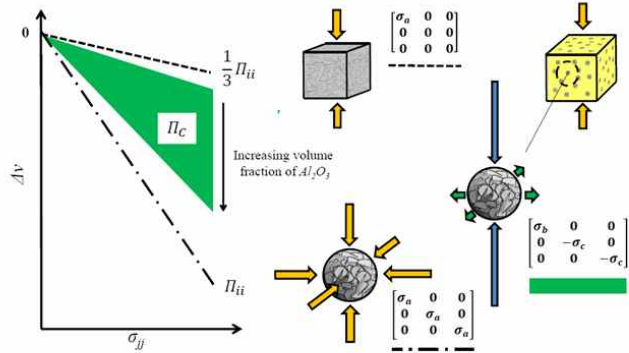
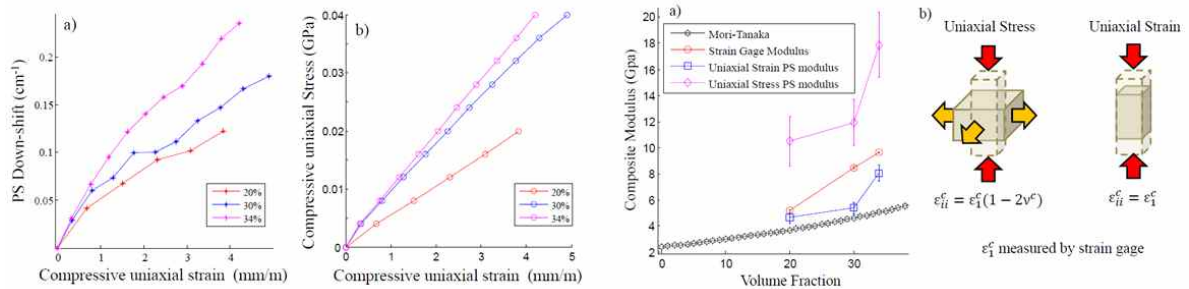


Figure 2.2: The Piezospectroscopic relationships for different loading conditions of a PS constituent.

PS and strain measurement:

- Coating alumina using epoxy

$$\Delta\nu = \frac{1}{3}\Pi_{ii}\sigma_{ii} = K^p\Pi_{ii}\epsilon_{ii}$$



DAMAGE MECHANICS FOR PIEZOSPECTROSCOPIC MATERIALS:

- Coating alumina using epoxy
- PS determination of plastic deformation

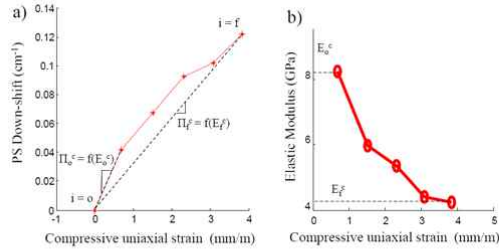


Figure 3.7: (a) The initial and final PS states marked on the PS response to be a function of the elastic states. (b) The elastic degradation computed from the PS states in (a) using Equation 3.21.

- Elastic degradation (caused by plastic deformation) of 3 different volume fracture of alumina

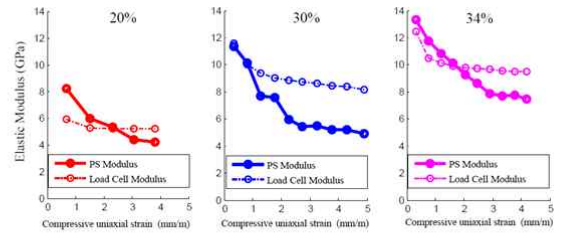


Figure 3.8: The degradation of the elastic modulus calculated from both the load cell/strain gage and PS response data for each volume fraction. The mechanics was applied to data obtained in previous work [24].

PIEZOSPECTROSCOPY OF PLASMA SPRAY COATINGS

- Obtaining elastic modulus under cyclic loading using snake scan pattern

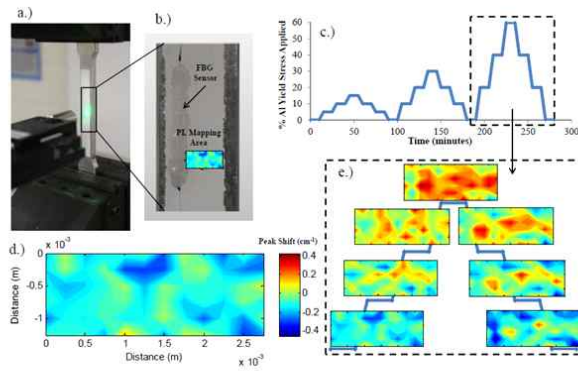


Figure 4.1: The coupled load frame and spectrometer probe setup (a), view of the gauge section (b), the tensile load cycle (c), peak shift distribution map before the third cycle begins (d), and a highlighted section of the load cycle with corresponding peak shift distribution maps (e). [29]

PIEZOSPECTROSCOPY OF PLASMA SPRAY COATINGS

- Plasma coating and rapid cooling can lead to partial bonding and may create inelastic (irreversible deformation) and anelastic (non-linear and reversible deformation) behavior.

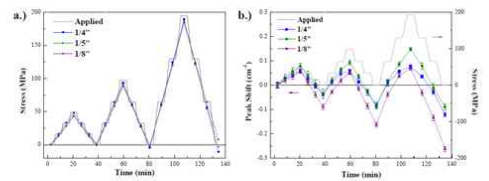


Figure 4.2: FBG sensor stress on the coating surface (a) and the PL peak shift for R1 (b) for all three substrate thicknesses. The error bars represent one standard deviation of the peak shift in the mapped area. [29]

Reason of this behavior

- Stress relaxation causes breaking of weak bonds in the brittle Al₂O₃.
- Opening and closing micro cracks.

Nanocomposite Coating Mechanics via Piezospectroscopy, UCF 2014

PIEZOSPECTROSCOPY OF PLASMA SPRAY COATINGS

- Anelastic behavior (c) and inelastic behavior (a & b)

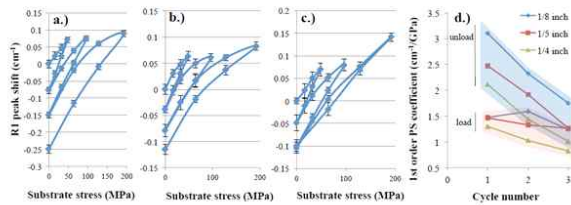


Figure 4.4: The cyclic response of the peak shift with respect to substrate stress for the 1/8 inch (a), 1/4 inch (b), and the precycled 1/5 inch substrate (c). The first order PS coefficients for each substrate thickness as a function of cycle number (d). The error bars represent one standard deviation of the peak shift in the mapped area. [29]

PIEZOSPECTROSCOPY OF PLASMA SPRAY COATINGS

- Non-linear behavior caused by microstructure damage

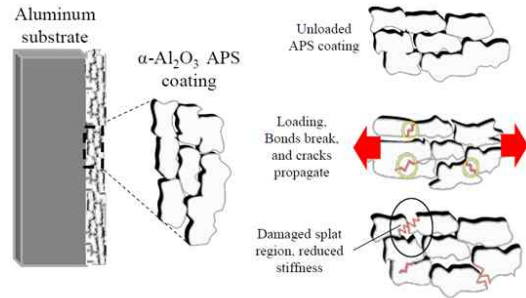
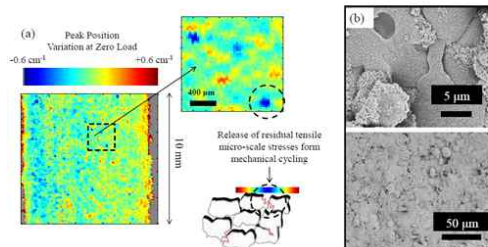
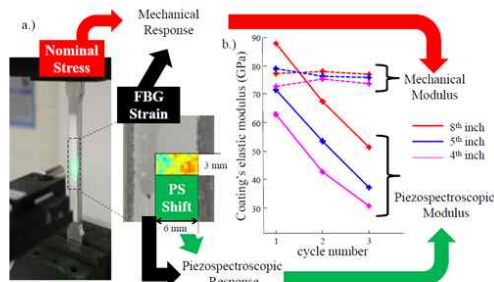
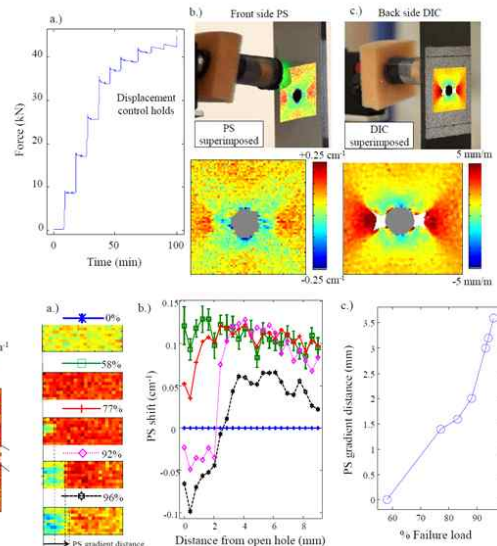


Figure 4.5: A schematic of the coating-substrate system and some insights into the micro-mechanical damage mechanisms suggested by the behavior of the PS response. [30]

Nanocomposite Coating Mechanics via Piezospectroscopy, UCF 2014



PS shift for damaged epoxy based composite (hole) under tension (til failure point)



주 의

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