

교량시설물 안전관리를 위한 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 앵커 응력 측정 시스템 개발 최종보고서

2019. 01. 18.

주관연구기관 / (주)유디엔에스
참 여 기 업 / (주)에이티맥스

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

‘교량시설물 안전관리를 위한 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 앵커 응력 측정 시스템 개발’(연구개발 기간 : 2017. 04. 01. ~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019. 1. 18.

주관연구기관명 : (주)유디엔에스 (대표자) 김 성 일
참여기관명 : (주)에이티맥스 (대표자) 김 정 훈



주관연구기관책임자: (주)유디엔에스 조운범
참여기관 책임자 : (주)에이티맥스 김정훈

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호		해당 단계 연구 기간		단계구분	2 / 2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	사회적이슈해결			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	교량시설물 안전관리를 위한 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 앵커 응력 측정 시스템 개발			
연구책임자	조운범	해당단계 참여연구원 수	총: 8명 내부: 8명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:206,000천원 민간: 71,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:277,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 14명 내부: 14명 외부: 명	총 연구비	정부:450,000천원 민간:152,400천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:602,400천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)유디엔에스 기술연구소			참여기업명	(주)에이티맥스
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·기 탁 번호	논문2건	10-2019 -000414 7				R001039336 R001098306					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

보고서 면수 : 100쪽

■ 연구목표

교량시설물 케이블 응력 안전관리를 위한 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 응력 측정 시스템 개발

■ 세부목표

1. 응력측정용 Passive 센서 제작 기술
2. 라만 파장 이동과 응력의 관계 규명 알고리즘 개발
3. 케이블 강재 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발
4. 비접촉식 케이블 앵커 응력측정 시스템 현장적용 기술 개발

< 요약 문 >

연구의 목적 및 내용	본 연구의 목표는 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 응력 측정 시스템 개발을 위해서 ① 응력측정용 Passive 센서 제작 기술, ② 라만 파장 이동과 응력의 관계 규명 알고리즘 개발, ③ 케이블 강재 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발, ④ 비접촉식 케이블 앵커 응력측정 시스템 현장적용 기술 개발이라는 네 가지 핵심기술요소(Core Technical Element, CTE)를 개발을 목표로 함				
연구개발성과	① 응력측정용 Passive 센서 제작 기술 ② 라만 파장 이동과 응력의 관계 규명 알고리즘 개발 ③ 케이블 강재 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발 ④ 비접촉식 케이블 앵커 응력측정 시스템 현장적용 기술 개발				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	최종성과물 : PSC교량의 케이블 긴장력을 측정할 수 있는 비접촉식 응력센서 시스템 기대효과 : 본 연구를 통하여 개발한 최종 성과물인 강재의 응력 측정시스템은 내구성이 좋은 센서 개발을 통해 유지관리비 예산 절감효과를 기대하며, 신뢰도 높은 응력값을 얻을 수 있을 것으로 예상됨.				
핵심어 (5개 이내)	응력 측정	라만 분광법	형광 분광법	패시브 센서	케이블앵커

◁ SUMMARY ▷

Purpose & Contents	The objective of this study is to develop four CTE ① Passive Stress sensor technique ② Development of shift-stress Algorithm for the Raman spectroscopy in steel Structures ③ Development of a dedicated Raman system for measuring cable stresses. ④ Measurement of cables' stresses applied to contactless cable anchor stress measurement systems.				
Results	① Passive Stress sensor technique ② Development of shift-stress Algorithm for the Raman spectroscopy in steel Structures ③ Development of a dedicated Raman system for measuring cable stresses. ④ Measurement of cables' stresses applied to contactless cable anchor stress measurement systems.				
Expected Contribution	The stress measurement system, which is the ultimate result of the development of the steel, is expected to be improved by the durability of the durable sensors, anticipating a high level of stress.				
Keywords	Stress Measurement	Raman Spectroscopy	Fluorescence Spectroscopy	Passive Sensor	Cable Anchor

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	
2. 국내외 기술 개발 현황	
3. 연구수행내용 및 성과	
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	
5. 연구개발성과의 활용 계획	
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	
7. 연구개발성과의 보안등급	
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	
11. 기타 사항	
12. 참고 문헌	

제1장 연구개발과제의 개요

1. 연구개발의 목적

[최종 목표]

- 교량시설물 안전관리를 위한 라만/형광분광법 및 산화알루미늄 증착기법을 이용한 비접촉식 케이블 앵커 응력 측정 시스템 개발
 - 응력측정용 Passive 센서 제작 기술
 - 라만 파장 이동과 응력의 관계 규명 알고리즘 개발
 - 케이블 강재 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발
 - 비접촉식 케이블 앵커 응력측정 시스템 현장적용 기술 개발

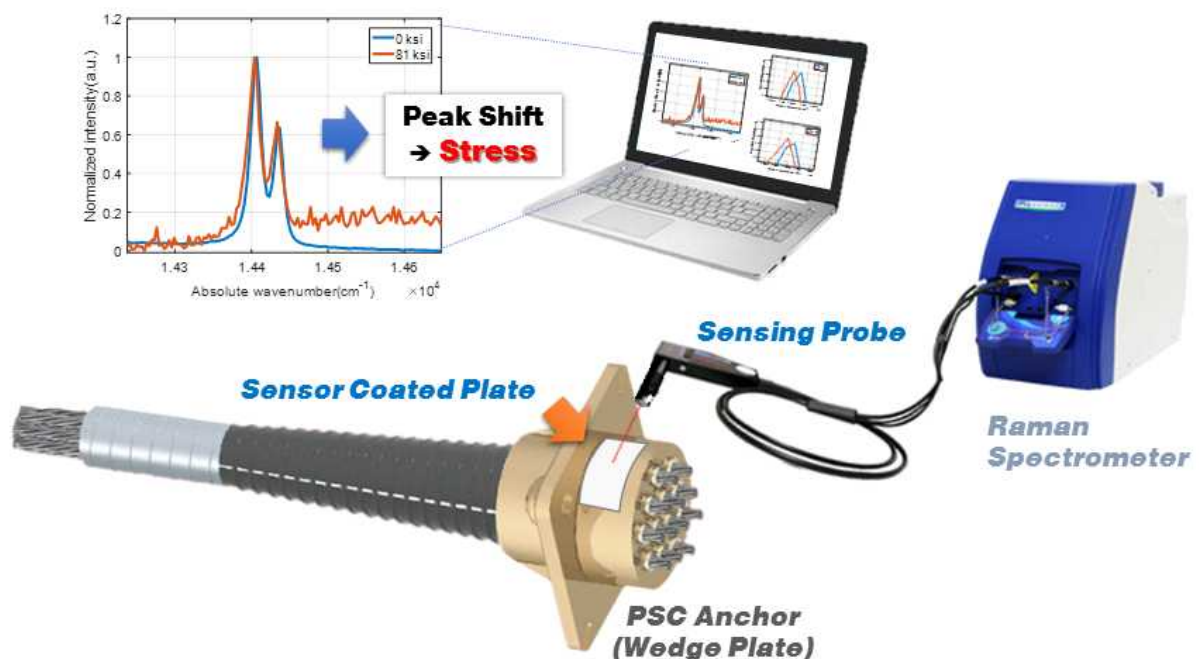


그림 2. 최종목표 성과물 개념도

○ 핵심성과 구성

- <핵심성과1> Passive 센서 제작 기술 : 케이블 앵커 부 진공 박막증착 기법을 통한 Passive 센서 기술 개발 및 분해능 향상 방안 도출
- <핵심성과2> 라만파장이동과 응력의 관계 규명 : 강재에 가해지는 응력과 라만분광법에 의해 측정되는 라만 파장 이동값의 상관관계를 도출하여 장력 측정 알고리즘에 적용
- <핵심성과3> 케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발 : CTE1의 케이블 앵커부 Passive 센서의 응력 측정에 최적화 설계한 전용 프로브 개발과 응력 측정용 라만분광시스템 구축. CTE2의 알고리즘 탑재한 소프트웨어 및 실시간 모니터링용 계측프로그램 개발
- <핵심성과4> 현장적용 기술 개발 : 현장 수시점검용 시스템과 상시 모니터링용 시스템으로 구분하여 현장 적용 기술 개발하고, 향후 케이블지지교량에 확대적용할 수 있는 방안 연구

2. 연구개발의 필요성

○ 기반 시설물 첨단 진단기술 확보 중장기 계획

- 최근 고강도 재료와 새로운 공법들의 개발을 통해서 초고층 대형 복합 건축물과 섬과 육지 사이를 이을 정도로 거대한 초장대교량들의 시공이 많아지고 있으며, 이에 따른 시설물 안전과 유지 관리의 중요성이 함께 부각됨.
- 국토교통부 기술정책과에서는 국민의 삶의 질 향상 및 행복한 사회의 전제 조건으로 국민 안전으로 보고 특히 시설물 안전은 복지·안전사회 구현을 위한 필수적 수단으로 인식하였으며, 한국사회 15대 메가 트렌드(Mega-Trend) 중 하나가 ‘국민의 삶의 질이 중시되는 복지사회’와 ‘중대되는 안전 위험성으로부터 국민이 적극 보호되는 안전사회’를 위해서 3S(Safe, Sustainable, Smart) 시설물로의 전환을 통한 종합적인 시설안전을 구현을 위한 ‘제3차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(안) (2013~2017년)’을 작성함.
- 특히, 시설물 안전 및 유지관리 발전을 위한 추진전략의 하나로 기술된 ‘기반시설물 첨단 진단 기술 확보’에서는 시설물 점검 및 진단 업무의 비효율성과 시설물 점검 및 진단과 ICT기술의 접목 미흡, 진단장비 개발 및 효율적 활용 부족 등의 배경을 언급하였으며, 모바일 점검·진단 시스템의 고도화, IT 등 기술 융복합화를 통한 첨단 진단기술 개발, 진단장비의 개발 및 효율적 활용방안 마련의 방향으로 개발을 추진하도록 제시하고 있음.

○ 교량 안전관리의 필요성과 케이블 긴장력 측정

- SOC시설물의 안전관리에서 교량이 차지하는 부분이 매우 중요하며, 도로의 증가와 함께 교량의 숫자는 점점 증가하고 있음. 2016년 도로 교량 및 터널 현황조서를 살펴보면, 2015년 말 기준으로 우리나라 도로에 가설된 교량은 총 30,983개소, 3,077km에 이르고 있음. 교량은 국가 기간 교통망이 제대로 기능을 발휘하는데 있어 매우 중요한 시설물이며, 1994년 발생한 성수대교 사고에서도 보았듯 교량의 유지관리 소홀로 인한 교량의 붕괴 또는 교량 기능의 상실은 귀중한 인명과 재산피해 뿐만 아니라 도시의 기능을 마비시킬 수도 있기 때문에 교량의 안전을 확보하고 교량이 제 기능을 다할 수 있도록 유지관리 하는 것은 국가적 차원에서 최우선순위의 과제임.



그림 3. 케이블지지교량 및 프리스트레스트 콘크리트 교량

- 최근의 교량 시공에 있어서 일반적인 중소 규모 교량에서는 예전의 라멘교 등 시공방식보다 최대 경간을 크게 가져갈 수 있는 프리스트레스트 콘크리트 교량의 수요가 많아지고 있으며, 초장대교량에서는 당연히 사장교 및 현수교 같은 케이블지지교량 형식이 설계에 사용되고 있음.
- 프리스트레스트 구조 및 케이블지지교량 구조 모두에서 가장 중요한 구조적 부재의 하나가 바로 케이블이며, 이 케이블의 긴장력 측정 및 모니터링이 시설물의 안전관리에 매우 중요한 핵심 기술임.
- 교량 케이블에 도입된 장력의 평가는 교량의 유지관리측면에서 중요한 항목으로 고려되며, 프리스트레스트 콘크리트 제작시 케이블 초기 긴장력의 측정 및 공용중 긴장력 관리, 긴장력 부족시 재긴장 등 케이블 장력 측정은 프리스트레스트 교량 라이프사이클 전주기에 걸쳐 가장 중요한 요소임. 케이블지지교량의 경우

에서도 케이블의 장력의 평가는 구조체의 전반적인 현황을 파악하는데 필수적인 요소이기 때문에, 교량 건설시에 케이블 장력의 초기치를 파악하고 이후 공용 중에 케이블 장력에 대한 추정값을 정확하게 예측하여 비교하는 것은 교량 시설물 유지관리업무에서 매우 중요한 업무임.

○ 케이블 장력 관리 기법의 현황 및 한계

- 공용 중 케이블의 장력관리를 효율적으로 추진하기 위해서는 정확한 케이블 장력 추정기법이 필요하며 관련된 많은 연구가 수행되어 왔으며, 현재 케이블의 장력의 추정기법은 직접법과 간접법으로 구분할 수 있음.
- 직접법은 케이블 끝단에 로드셀을 부착하여 케이블에 가해지는 장력을 바로 확인할 수 있는 방법으로 사장교 케이블 가설시 또는 프리스트레스트 콘크리트 텐던 긴장시 주로 사용하는 방법임. 그러나 사장교의 유지관리단계에서 이러한 직접법을 적용하기는 비용적인 측면에서 효율적인지 못하기 때문에, 최근 활발한 연구가 진행되고 있는 직접법 중 EM(Electro Magnetic)센서를 활용한 방법이 있음. 이 방법은 전자기유도에 의해 발생하는 웨이브의 속도를 측정해 장력을 추정하는 방법이나 대기 중에 노출된 계측관리시스템을 이용한 사장교의 경우는 추정이 가능하나 그라우팅 또는 그리스가 충전된 경우 추정이 거의 불가능한 것으로 알려져 있음.
- 장력추정을 위한 간접법으로는 케이블의 진동으로 인한 가속도로부터 고유진동수의 변화를 이용하는 방법이 사용되고 있으며, 현재 국내에서는 사장교의 케이블의 장력을 관리하기 위해서 케이블에 가속도계를 설치한 후 현 이론에 근거한 간접법을 활용하여 실시간으로 장력을 추정하여 모니터링을 실시하고 있는 추세임.



그림 4. 케이블 장력 관리 기법 현황

○ 프리스트레스트 콘크리트 교량의 안전 및 유지관리

- 현재까지 다양한 교량 구조 및 공법이 개발되어 사용되고 있지만 국내외적으로 가장 널리 사용되는 교량은 콘크리트 교량이며, 그중에서 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC) 교량이 가장 큰 비율을 차지하고 있음. PSC 기술은 1900년대 초부터 많은 기술자들이 PSC 구조물의 원리, 고강도 강선의 개발, 긴장력 손실 등에 대한 기술개발을 위한 노력을 하였으며, 1930년대 중후반부터 교량에 적용됨 (Hewson, 2003)
- PSC 구조물은 콘크리트 구조물에 개별(single) 강선 또는 다발(multiple) 강선들로 구성된 텐던(tendon)을 긴장시켜 구조물에 압축력을 부가함으로써 균열 및 처짐의 감소를 통해 콘크리트 구조물의 성능을 크게 향상시킬 수 있으며, 이를 통해 철근 콘크리트 구조물이 구현할 수 없는 고품질 장기간 구조물의 건설을

가능하게 함으로써 콘크리트 구조물에 혁신을 가져온 기술임. 기존의 전통적인 철근 콘크리트 교량은 길이 30 m 이상을 넘을 수 없지만 프리스트레스트 콘크리트 기술을 통해 콘크리트 교량의 한계 지간장이 크게 확장되었고, 원자력발전소 격납구조물, 건축구조물 등에도 널리 사용되고 있음. (한국건설기술연구원, ‘PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 기술 개발’, 2015



그림 5. 프리스트레스트 콘크리트 구조의 다양한 시설물들

- 국토교통부에서 제공하는 ‘도로 교량 및 터널 현황 조서(2016년)’을 분석해보면, 2015년 말 기준 전국 도로교의 분포는 개소 수 기준으로는 철근콘크리트(RC) 교량이 전체 교량 30,983교 중 54.2%(16,784교), PSC 교량은 24.2%(7,484교), 강교량은 15.2%(4,697교) 순으로 분포. 특히 2010년 이후 건설된 교량 4,325교를 기준으로 PSC 교량이 41.6%(1,800교), 강 교량이 17.2% (746교), RC교량이 16.9%(1,12교)로 PSC 교량이 가장 높은 비율을 차지하고 있음. 교량 연장길이 기준으로는 PSC 교량이 39.2%, 강 교량이 33.7%, RC 교량이 18.5%를 차지하고 있어 PSC 교량이 가장 높은 비율을 보임.

○ 라만/형광분광법을 케이블부 강재의 응력 측정 기술 개발

- 토목구조물에서 사용되고 있는 강재는 압연, 냉각, 험가공 등이 이루어진 후 설치되므로 각각의 강구조물의 경우 잔류응력이 포함되어있으며, 또한 일부 구조물(철도, PSC 강선 등)의 경우, 축력, 긴장력 등의 추가적인 외부응력이 가해짐. 이러한 강재는 일반적으로 토목구조물의 주 부재이므로, 지속적인 응력이력의 측정이 요구되며, 특히 PSC교량 강선의 긴장력은 구조물의 건전도와 직접적인 연관이 있음
- 토목 구조물 케이블부 강재의 건전도 평가를 위한 응력측정 방법은 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법, 센서기반 계측 방법으로 나뉨. 파괴적인 방법(절단법, 홀 드릴링 등)은 기계적인 시험방법으로 정량적인 결과 값을 도출할 수 있지만, 대상물을 파괴해야하는 단점으로 현장적용이 제한되며, 비파괴적인 방법으로는 X-선, 중성자 회절법, 초음파, 자기변형효과 등을 활용한 방법이 있으나, 이와 같은 방법들은 실험결과 해석에 숙련자를 요구하며, 평가자에 따라 결과해석의 차이가 발생하고, 계측시간이 길고, 경우에 따라 표면 처리를 요구하는 등의 단점이 있음.

- 센서기반 응력 계측의 경우(e.g. 스트레인게이지, 로드셀 등), 정밀도가 높은 반면, 내구성이 약하고, 케이블 및 외부 전력을 필요로 하며, 센서와 계측장비의 유지관리가 어렵다. 이와 함께, 구조물의 설계 수명 주기에 대비하여, 센서의 수명이 현저히 짧은 한계를 갖고 있음

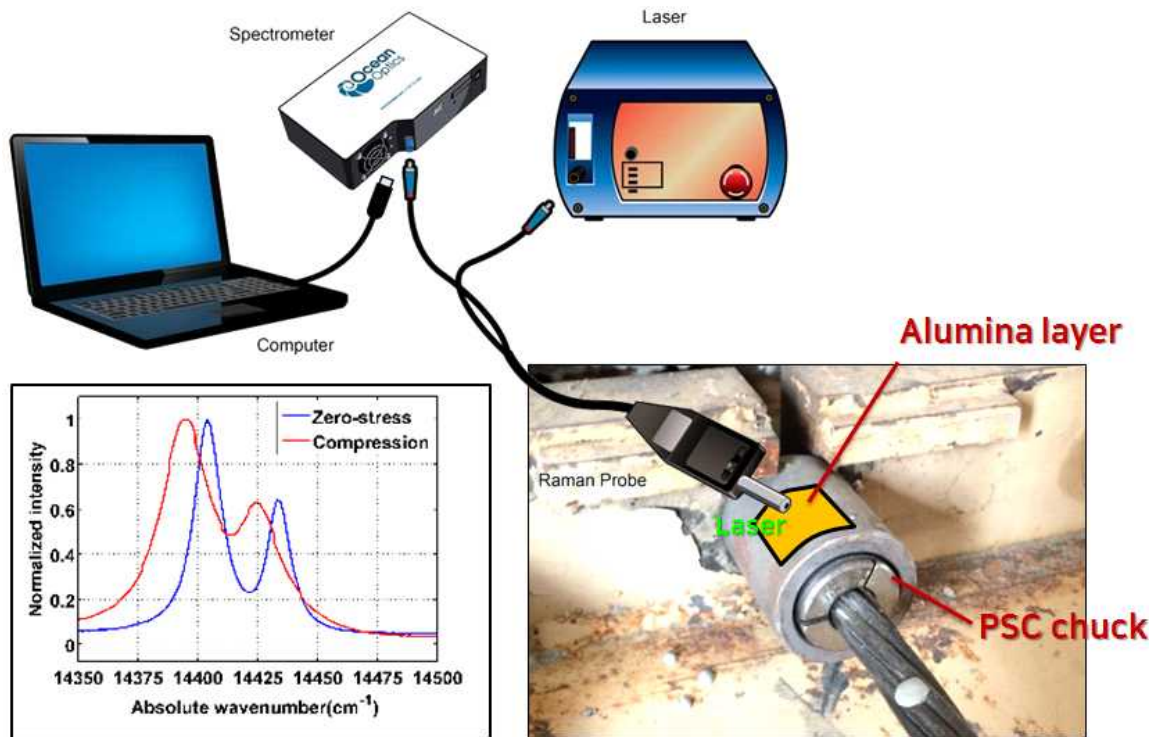


그림 6. 라만/형광분광법을 이용한 응력측정시스템 개요

- 따라서 본 연구에서는 위와 같은 기존 계측방법의 단점을 보완할 수 있는, ‘라만/형광 분광법을 이용한 강 구조물의 응력 측정 기술’을 개발하고자 함. 본 연구진은 기 수행한 자체 연구를 통해서 라만/형광분광법을 이용한 강재의 응력 및 부식측정 방법의 적용성을 이미 검증하였으며, 본 연구에서는 응력분해능을 향상시킬 수 있는 산화알루미늄 증착기법을 후속연구하여 이를 활용한 비접촉식 케이블 앵커 응력 측정 시스템 개발을 수행하고자 함. (그림 6. 참조)

WHY?

강구조물 응력 측정의 중요성

- 강재는 일반적으로 토목 구조물의 주 부재이므로, 지속적인 응력 이력 측정이 요구됨.
- **PSC 교량 강선의 긴장력**은 구조물 건전도와 직접적인 연관이 있음.
- **철도의 축력으로 인한 궤도 좌굴**은 열차의 탈선과 직접적인 연관이 있다고 보고됨.
- 따라서 강구조물에 대한 지속적인 응력 검토가 요구됨.

기존 비파괴기반 응력 계측 시스템의 문제점



예) 초음파를 이용한 측정 장비

- 실험결과해석에 **숙련자**를 요구하며, 평가자에 따라 결과해석의 차이 발생
- **장시간의 계측**이 요구됨
- 일부 계측방법에서 **표면처리**를 요구함

기존 센서기반 응력 계측 시스템의 문제점



예) 스트레인 게이지를 이용한 측정

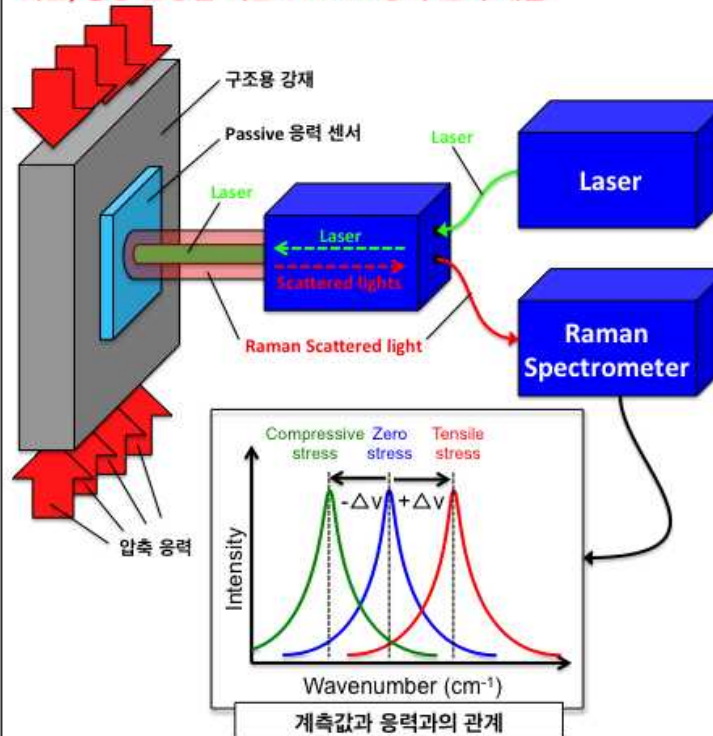
- **내구성이 약함**
- 케이블 및 **외부 전력**을 필요로함
- 구조물의 설계 수명 주기에 대비하여, 센서의 수명이 **현저히 짧음**
- 센서와 계측장비의 **유지관리가 어려움**

연구 목표

- 분광법 기반 강구조물 응력 측정 원천기술 개발
 - 응력 측정 Passive 센서 개발
 - 레이저 기반 응력 측정 기술 도입
 - 계측값과 응력 관계 규명
 - 센서층-강재 사이의 응력 전달 관계 규명

HOW?

라만/형광 분광법 기반 Passive 응력 센서 개발



APPLICATIONS

본 연구에서 개발된 기술은 다양한 구조물의 계측, 해석, 기초연구에 적용될 수 있음.

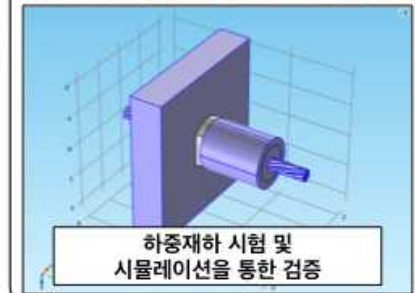
예) PSC 구조물



PSC 강선의 긴장력 측정



Anchorage Chuck 을 이용한 PSC 강선의 긴장력 측정



하중재하 시험 및 시뮬레이션을 통한 검증

본 기술의 장점

- 계측데이터 처리가 간단하고, 장시간의 계측이 요구되지 않음
- 계측을 위한 표면처리가 요구되지 않음
- 내구성이 좋고, 센서/계측장비의 유지관리가 간단함
- 케이블 및 외부 전력을 필요하지 않음(Passive 센서)
- 따라서, 구조물의 설계 수명 주기에 대비하여, **오랜기간동안 사용 가능함**

그림 7. 연구개발 개요 및 필요성

3. 연구개발 범위

구분	핵심성과	단위성과	연구개발 수행 내용
1차년도 (2017.04~ 2017.12)	Passive 센서 제작 기술	박막증착기술 연구	• 응력 분해능과 내구성을 향상시킬수 있는 진공 박막증착 조합을 연구 • 진공 박막증착법 이외의 코팅방법 조사 연구
		박막 소재 최적 조합 연구	• 코팅센서 물질을 선정 및 시험 샘플 제작 • 하중 시험을 통한 최적조합 연구
	라만파장이동과 응력의 관계 규명	PS계수 도출	• Passive센서층과 베이스재료로 이루어진 복합재료에 대한 응력환산계수 PS coefficient 도출 실험
		박막재료별 / 두께별 PS계수 분석	• 박막의 응력 생성 메커니즘 이해를 위한 문헌연구 • 박막재료별 두께별 응력 시편의 실내실험을 통한 PS계수 분석
	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템	• 레이저 광원, 라만분광기, 프로브 3가지 모듈의 최적제품을 선정하여 시스템을 구성. • PSC교량의 케이블 측정을 위해서는 광학스위치를 이용하여 멀티채널을 구성 • 전용 프로브 설계 및 개발 : 라만분광법을 이용한 강재의 응력측정을 위해 전용 프로브를 설계 개발. • 축소 모형 제작을 통한 시스템 검증

구분	핵심성과	단위성과	연구개발 수행 내용
2차년도 (2018.01~ 2018.12)	Passive 센서 제작 기술	박막증착 Passive Sensor 최종시편	• 응력 분해능과 내구성을 향상시킬수 있는 진공 박막증착 조합을 연구 개발 • 케이블 정착 앵커부 형상별 박막증착 기법 향상 • 기설치 앵커부에 Passive sensor target 형성방안 도출
	라만파장이동과 응력의 관계 규명	박막재료별 두께별 PS계수 분석	• 각종 시편 추가시험 진행 • 신규제작 Passive 센서의 박막별, 구조별 가력 시험을 통해서 PS계수(응력변환계수)의 최적화
	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템	• 최적화 설계 전용 프로브 개발 • 응력 측정용 라만분광시스템 구축
		케이블 응력 측정 전용 프로그램	• 알고리즘 탑재 전용 소프트웨어 개발
		실시간 계측시스템 DB	• 실시간 모니터링용 계측프로그램 개발 • 계측데이터용 DB설계
	현장적용기술개발	Hand-held 시스템	• 수시점검용 시스템 구축 방안 연구
		상시모니터링 서버시스템	• 상시모니터링용 서버시스템 구축 방안 연구
		케이블지교량 설계적용 방안	• 케이블지교량의 앵커헤드 정착부 계측설계 적용 방안
		현장적용시험결과	• 실교량 구조물 제작을 통한 현장적용시험 실시

제2장 국내외 기술 개발 현황

○ 케이블긴장력 측정방법에 대한 국내외 현황

- PSC 교량의 강선 또는 텐던의 긴장력은 잭을 통해 긴장력이 구조물에 도입될 때 다양한 요인에 의해 긴장력 손실이 발생하게 되며, 긴장력 손실은 PSC 교량의 대표적인 공법인 프리텐션 공법과 포스트텐션 공법에 따라 다소 차이가 있지만 크게 구분하면 즉시 손실(탄성변형, 마찰 손실, 정착장치손실)과 장기 손실(콘크리트 건조수축, 콘크리트 크리프, 긴장재 릴랙세이션)로 나뉜다. 실제 PSC 교량에서 긴장력이 어떻게 변화되는가는 미지의 영역이어서 많은 연구자와 기술자들이 이를 파악하려는 노력을 해왔음.
- 간접법에 의한 긴장력 측정
 - 진동법 : 구조물의 고유진동수는 구조물의 강성과 축력에 의해 변화된다는 점에 착안하여 PSC 구조물의 진동수 측정하여 이를 통해 강선 또는 텐던의 긴장력 측정하는 방법. Saiidi 등(1994)이 PSC 교량에 대해 현장 실험 및 실내 실험을 통해 이 방법에 대해 연구를 수행. 이외에도 많은 연구자들이 고유진동수와 System Identification 에 기반하여 PSC 구조물의 긴장력을 산정하려는 연구를 수행(Kim 등, 2003; Kim 등, 2009; Kim 등, 2010; Xu 등, 2011). 그러나 이 방법은 긴장력 영향이 비교적 큰 실험실 부재에 대해서는 적용 가능하지만 실제 교량에 대해서는 적용이 곤란한 것으로 알려짐.
 - Stress Wave (impact echo, acoustic emission)를 이용한 방법 : 강선에 가해진 종방향 응력파의 속도가 강선의 응력상태에 따라 달라지는 성질을 이용한 방법으로 비부착 강선에 대한 대표적인 연구로는 Kwun 등(1998), Chen 등(2001), Chaki 등(2009)의 연구가 있음. 김병화 등(2010; 2012)은 충격파를 이용하여 부착된 강선의 긴장력을 측정하는 연구를 실시하였는데 강선에 작용하는 긴장력이 커질수록(극한하중의 40% 이상) 비선형성 역시 커지는 것을 알 수 있음. 실제 PSC 교량의 경우 초기 긴장력이 극한하중의 80% 수준에 이르고, 사용 중 긴장력의 크기가 극한하중의 60% 수준임을 고려하면 이 방법을 실제 PSC 교량에 적용하는 것은 쉽지 않을 것이라고 판단.
 - Guided Ultrasonic Wave를 이용한 방법 : 유도초음파(Guided Ultrasonic Wave)는 일반 응력파와 달리 길이 방향으로 전파하는 초음파로서 파이프 등 긴 부재의 결함 탐지에 많이 이용되어 왔던 것으로 길이 방향으로 긴 PS 긴장재의 상태 평가에 적합하여 PS 긴장재의 긴장력과 파손 등을 동시에 측정하려는 목적으로 많은 연구자들이 연구를 수행(Chen 등, 2002; Chaki 등, 2009; Lanza 등, 2003; Rizzo 등, 2004; Bartoli 등, 2009; Bartoli 등, 2011). 비부착 강선인 경우 긴장력 측정이 어느 정도 가능하다는 보고가 있으나, 부착 강선의 경우 유도초음파의 급격한 에너지 감소로 긴장력 측정이 쉽지 않은 것으로 알려져 있으며, Kleitsa 등(2010)은 다발 강연선으로 구성된 텐던의 정착부(anchor head)에 대해 초음파법을 적용하여 텐던의 긴장력 크기를 측정하려는 연구를 수행하였음.
 - Magnet Circuit를 이용한 방법 : 강자성체인 강선의 응력구간에 폐자기회로(closed magnetic circuit)를 구성하고 자기력이 일정한 조건하에서 PS 강선의 자속투과율을 모니터링하는 방법. 김병화 등(2013)의 연구에 의하면 가변길이 응력 재하조건에서는 작용 긴장력과 자속투과율이 선형 반비례 하였으며 양호한 선형적 관계를 보여주고 있으나. 실제 PSC 교량에서 폐자기회로를 구성하는 것은 쉽지 않은 일이며, 텐던은 다수의 강선들로 구성되어 있고 철근의 영향 등으로 자속투과율 측정 및 분석이 쉽지 않아 이 방법이 실제 교량에 적용되는 것은 어려울 것으로 판단됨.
- 직접법에 의한 긴장력 측정
 - 변형률 게이지 부착 : 전기저항식 변형률 게이지를 강 측선에 접착제로 부착하고 변형률을 측정한 후 이로부터 긴장력을 산정. 이 방법은 비교적 적은 비용으로 긴장력을 측정할 수 있는 장점이 있어서 주로 실험실 등에서 사용. 그러나 이 방법은 긴장력 도입 시 측선이 회전하면서 게이지가 탈락되거나 파손되는 문제가 있으며, 또한 측선이 꼬여 있어서 측선의 회전 방향에 맞추어 정밀하게 게이지가 설치되

지 않으면 게이지 변형률로부터 긴장력을 산정하는 데 오차가 발생. 그리고 교량과 같이 텐던 길이가 길어질 경우에는 변형률 게이지의 리드 선을 설치하고 처리하는 것이 어렵기 때문에 실제 현장에 적용하는 것은 쉽지 않으며, 이 외에도 접착제로 변형률 게이지를 부착시키므로 접착제의 내구성에 영향을 받아 수년에 걸친 장기 계측은 원천적으로 불가능함.

- 로드셀 이용 : 로드셀(Load Cell)을 정착장치 하단에 설치하여 강선을 긴장한 후 긴장력을 측정하는 방법. 이 방법의 문제점으로는 로드셀이 고가이고, 로드셀이 정착장치의 하단에 설치되면 탈착할 수 없으므로 특수한 경우를 제외하고는 적용이 곤란하며, 또한 로드셀이 외부에 노출되어 있어서 온도 및 습도의 영향을 크게 받게 되므로 내구성 측면에서 이에 대한 특별한 조치가 필요함. 또한 로드셀 내부에도 전기저항식 변형률 게이지가 부착되어 있으므로 장기간 사용 시 측정값의 신뢰도가 저하될 우려.
- 강 측선의 굴곡부에 선형 센서 매립 : 측선과 측선 사이의 굴곡부에 수지를 이용하여 선형 센서를 부착시킨 것으로서 사용되는 선형 센서로는 광섬유(FBG) 센서(Li 등, 2005), 고저항도선(지광습 등, 2006) 등이 있으며, 강연선의 측선들은 심선 주위로 꼬여 있으므로 인장력이 작용하면 측선들이 심선 주위로 더 꼬이면서 비틀림이 발생하게 됨. 따라서 측선과 측선 사이의 굴곡부에 부착된 선형 센서는 부착파괴되거나 심한 경우 파단될 수 있으며, 특히 강연선이 정착부에서 켜기로 정착되는 과정에서 켜기의 강한 압축력에 의해 외부 측선들이 찌그러지면서 센서가 파손될 가능성이 매우 높음. 광섬유 센서를 강연선 측선 굴곡부에 부착시켜 인장시험을 실시한 Li 등(2005)의 시험결과에 따르면 6,260수준의 변형률까지 측정되었으나 일반적으로 PSC 교량의 초기 긴장 변형률이 약 7,000 ~ 8,000수준임을 감안하면 이 방법은 실용적으로 사용될 수 없음.
- Tensmeg : 일정한 길이를 가진 양쪽의 딱딱한 rubber 블록 사이로 Teflon-sheathed 저항선을 측 선과 측선 사이의 골을 따라 나선 방향으로 부착시킨 TENSion MEasuring Gauge(Tensmeg)는 Roctest사가 개발한 강연선에 대한 인장력 측정 게이지임(RST Instruments, 2015). 단일 강연선에 적용되며 주로 지반 보강용 앵커(earth anchor)의 하중 계측에 사용가능. 그러나 이 게이지는 rubber end block 및 게이지 리드선 때문에 PSC 교량에 주로 사용되고 있는 다발 강연선(mutli-strand)에 적용 하는 것이 곤란.
- EM센서 : 자속밀도(B)는 자기장의 세기(H)와 투자율(permeability)로 표현된다. 강연선과 같은 강자성체에 응력이 작용할 때 상대투자율(relative permeability)은 온도와 응력의 함수로 표현할 수 있음(Jarosevic, 1999; Wang 등, 2000; Wichmann 등, 2009). 즉 자기장의 세기와 자속밀도를 측정하여 투자율이 측정되면 응력과 온도의 함수로 표현되는 상대투자율 식을 이용하여 응력을 산정할 수 있게 됨. Elasto-Magnetic(EM)센서의 주 구성요소는 1, 2차코일이다. 1차 코일(primary coil)를 이용해 자기장을 형성하고 이를 통해 생성된 전압을 2차 코일(secondary coil)를 이용하여 전압을 측정하고 상대투자율을 측정. EM 센서는 비접촉식으로 사용할 수 있고 내구성도 뛰어나 강연선, 텐던 및 사장교 케이블의 장력을 측정할 수 있는 센서로 사용 사례가 증가하고 있으나, 가격이 비교적 고가이고 EM 센서의 크기 및 게이지 리드선 때문에 내부 부착 PSC 구조물용 다발 강연선(mutli-strand)에 범용으로 적용하는 것이 어렵고 정착부 근처가 아닌 다른 위치에 센서를 매립하는 것이 쉽지 않음.
- 상기와 같이 PSC 구조물에 사용되는 강연선 및 텐던의 긴장력을 측정하기 위한 다양한 기술들이 제안되고 연구되고 있으며, 강연선 및 텐던이 노출되어 있는 경우에는 진동법, EM 센서 등을 통해 상당 수준의 정확도로 현재 긴장력을 측정할 수 있는 것으로 파악되었으나, 노출되어 있지 않거나 부착 방식을 시공된 실제 PSC 교량의 PS 긴장재의 긴장력을 추정하거나 측정할 수 있는 실용적인 기술이 현재까지 개발되어 있지 않은 상태임.

	Lift-Off Method	Vibration Method	EM sensor
영상			
센서	로드셀 및 변위계	가속도센서	자기장 센서
측정	유압잭에 의한 케이블 인장력	케이블 고유진동수	케이블 재료의 자기특성
장점	직접법으로 가장 정확	비파괴, 장기계측, 저비용	비파괴, 장기계측, 저비용 비파괴법 중 가장 정확 오차 2% 콘크리트 매립 가능 (PC 텐던)
단점	장기계측 불가, 고비용, 비효율	구속조건, 길이영향 따라 오차가 큼 (15%) 매립 불가	초기 교정 비용
비용	1000만원/개소	200만원/개소	200만원/개소

그림 8. 대표적인 케이블 긴장력 측정법 현황 비교표

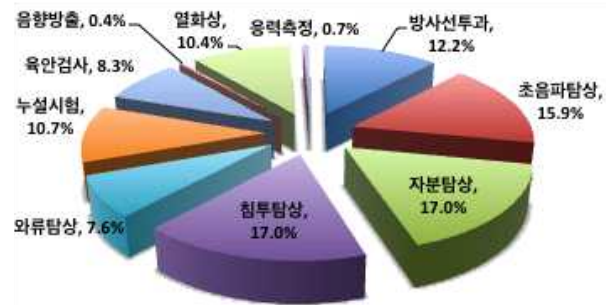
- 국내외 기술현황 검토 결과에서 도출된 케이블 긴장력 측정을 위한 새로운 기술(직접법 또는 간접법)의 요구조건은 다음과 같이 정리됨.

- ☞ 오랜 기간 동안 사용해도 문제가 없는 내구성이 우수한 센서일 것
- ☞ 외기 영향이 최소화되어야 함
- ☞ 잭킹 시 센서 파괴가 일어나지 않도록 충분한 강성을 보유해야 함.
- ☞ PS 긴장재는 릴렉сей션 특성이 우수해야 하므로 센서가 매립된 심선은 릴렉сей션 특성이 우수해야 하며, 높은 지속하중 하에서 크리프 특성 또한 우수해야 함
- ☞ 재현성이 높고 신뢰성이 좋으면서 간편한 센서 기술이 필요함
- ☞ 경제성이 탁월할 것

○ 강재의 비파괴검사 현황

- 국내 시설물/구조물의 비파괴 검사 기술 수준은 최고 기술보유국 대비 76.2%에 불과하며, 비파괴검사 장비를 개발하거나 생산하는 기업이 거의 없어, 검사장비의 90% 이상은 수입에 의존. 비파괴 검사 방법 중, 응력측정 기술은 용접부와 박막의 잔류응력 측정에 주로 활용되며, 레일의 축력, PSC 강선의 긴장력 측정에 관한 연구가 일부 수행다. 하지만, 구조물의 축력/긴장력 등을 비파괴적인 방법으로 평가할 수 있는 기술은 아직까지 실용화 단계에 이르지 못함. 이와 함께, 『제2차 비파괴검사기술 진흥계획 수립을 위한 연구』에 따르면, 시설물/구조물의 응력 측정기술을 갖고 있는 국내 전문업체는 전체 비파괴 전문업체의 0.7%에 불과하기 때문에, 시설물/구조물의 응력 측정을 위한 새로운 기술의 연구 개발이 반드시 필요함.

NDT방법	업체수
방사선투과검사법	56
초음파탐상검사법	73
자분탐상검사법	78
침투탐상검사법	78
와류탐상검사법	35
누설시험	49
육안검사	38
음향방출검사법	2
열화상검사법	48
응력측정검사법	3



※ 제2차 비파괴검사기술 진흥계획 수립을 위한 연구에서 발췌(11년)

그림 9. 국내 비파괴 전문업체 검사방법 분포

○ 기술개발 성숙도

- 본 과제에서는 기존 자체연구에서 TRL4의 ‘실험실 환경에서 구성 시스템의 성능평가 및 신뢰성 시험 단계’를 완료하여 개념 증명 또는 타당성 확인을 위해 구성 시스템을 시험하여 성능 검증을 수행한 상태.
- 과제 시작 1차년도에는 기존 연구결과 노하우를 바탕으로 새로이 접목한 기술의 연구 및 최종 환경과 유사한 상태의 시스템의 기술 구성요소가 통합된 시스템 구성을 완료하여 기본적인 성능을 시험할 예정이며, 실험실 규모의 케이블 장력 시험 시편 제작을 통해서 성능 검증을 실시 (TRL5)
- 과제 종료인 2차년도에서는 1차년도에서 구성한 시스템의 기능 향상 및 현장적용 업그레이드를 실시 함으로써 수요자 또는 고객의 실제사용 환경과 유사한 환경에서 검증을 진행할 계획임 (TRL6)

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

제3장 연구 수행 내용 및 성과

1. CTE1 : Passive 센서 제작 기술

가. 박막 증착 기술 연구 (단위성과 1-1)

▶ [증빙 1-1] 증착공법 매뉴얼 별첨

- 증착은 금속 증기를 만드는 원리에 따라 화학적 증기 증착(Chemical Vapor Deposition, CVD)과 물리적 증기 증착(Physical Vapor Deposition, PVD)으로 분류
- 화학적 증기 증착은 공정압력과 주입원의 상태, 에너지원 등에 따라 나뉨
- 물리적 증기 증착은 금속 증기의 형성방법에 따른 구분

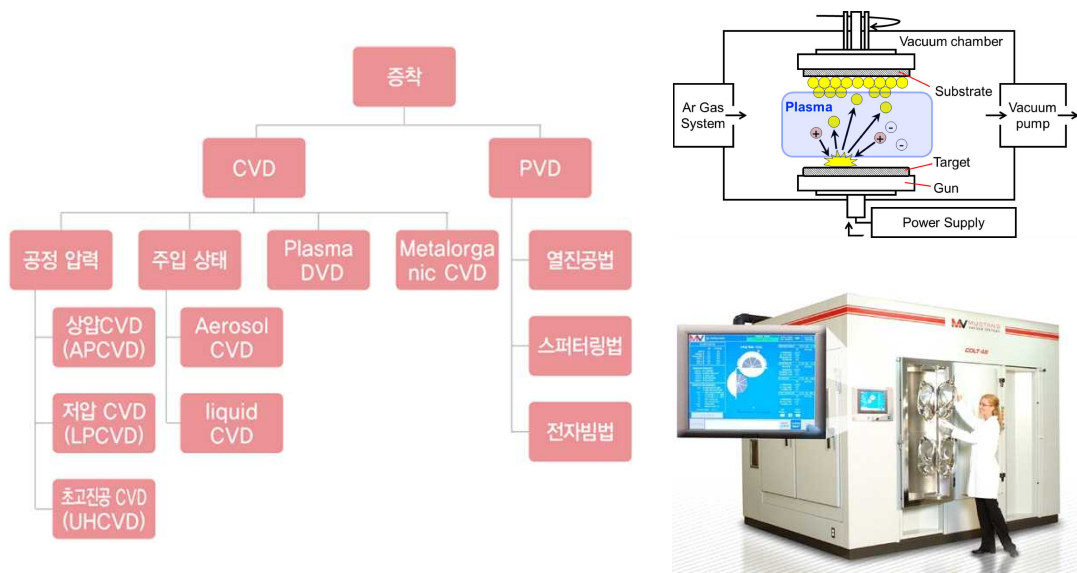


그림 10. 증착 방법의 분류

	장점	단점
화학적 증기 증착	상압 공정 가능 고순도/고정밀 박막 형성 선택적 증착 우수한 step coverage	높은 반응 온도 다양한 반응 변수 유해물질 사용 복잡한 장치
물리적 증기 증착	낮은 반응 온도 다양한 물질	고진공 단순한 표면 낮은 증착 밀도 낮은 step coverage

- 용사 (Thermal Spray) : 코팅소재를 고온의 열원을 이용하여 용융시킨 후, 이를 고속으로 분사하여 코팅하고자하는 모재의 표면에 용착시키는 특수코팅기술
 - 용사 코팅방법은 열원에 따라 Combustion Method와 Electric Method로 분류
 - 용사 코팅은 모재 재질에 제한 없이 코팅이 가능
 - 적용 가능한 코팅 재료가 다양 : 금속, 세라믹, 플라스틱 등
 - 코팅 재료에 따라 다양한 특성 부여 : 내마모, 내부식, 내산화, 열차폐, 전기 전도, 전기 절연 등

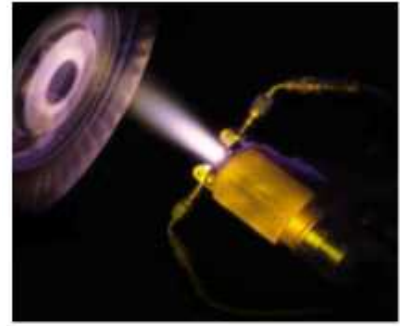
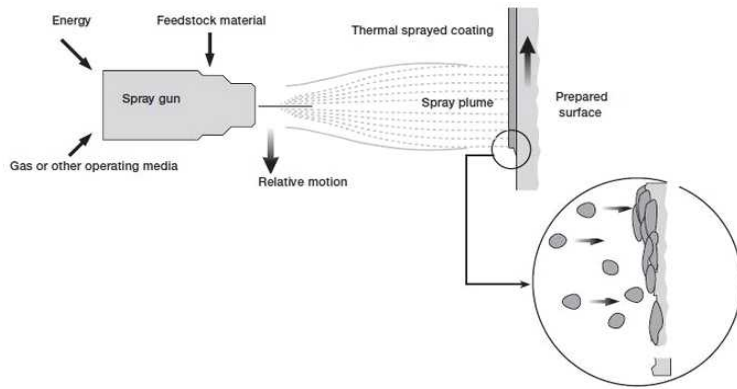


그림 11. 용사코팅 (Thermal Spray)

○ 소결 : Passive 센서 제작을 위한 박막증착기법으로 용사코팅(Plasma Thermal Spray) 선정



그림 12. 용사코팅 (Thermal Spray)을 이용한 Passive 센서 제작 과정

나. 박막 소재 최적 조합 연구 (단위성과 1-2)

▶ [중빙 1-2] 박막소재 조합별 연구보고서 별첨

(1) 박막 소재 조합별 시험

○ 구조용 강재와 실리콘웨이퍼 모재 비교 실험

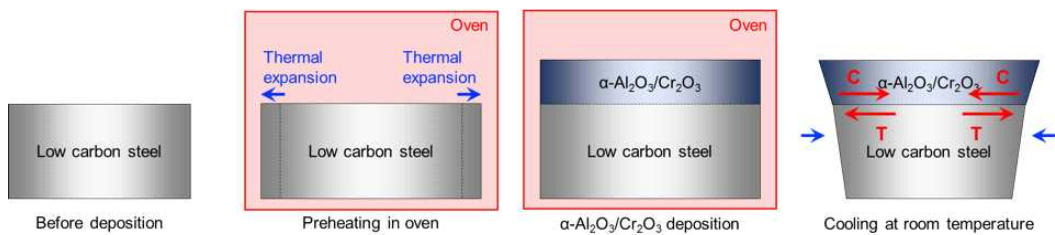


그림 13. 모재의 종류에 따른 증착 박막의 영향 (구조용 강)

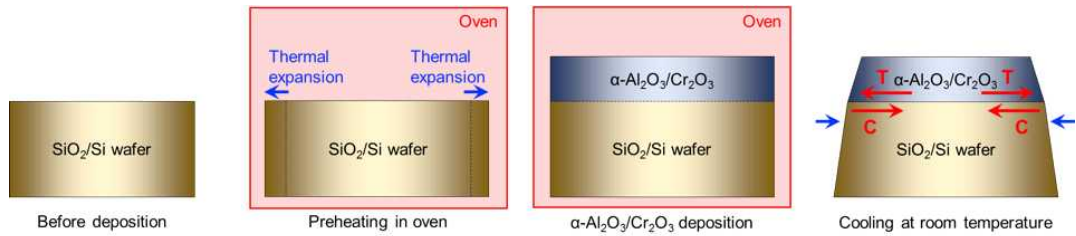
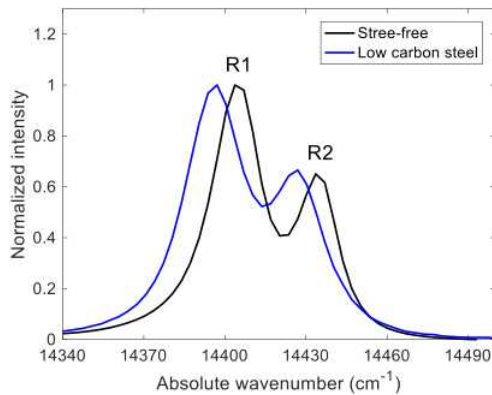


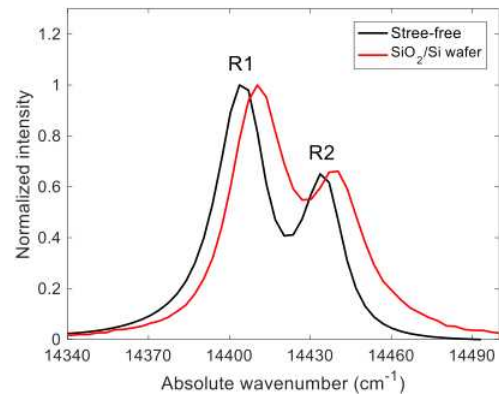
그림 14. 모재의 종류에 따른 증착 박막의 영향 (실리콘웨이퍼)

○ 증착/폴립과정에서 발생한 잔류응력의 크기 및 방향을 패시브 센서를 이용하여 측정하기 위하여, 잔류응력이 없는 알루미늄 가루(powder)의 형광스펙트럼을 패시브 센서로 부터 수집된 형광스펙의 결과와 비교

- 구조용 강재 증착 알루미늄 : 기준 스펙트럼(일반 알루미늄)의 좌측에 위치, 압축잔류응력 발생
- 실리콘웨이퍼 증착 알루미늄 : 기준 스펙트럼(일반 알루미늄)의 우측에 위치, 인장잔류응력 발생



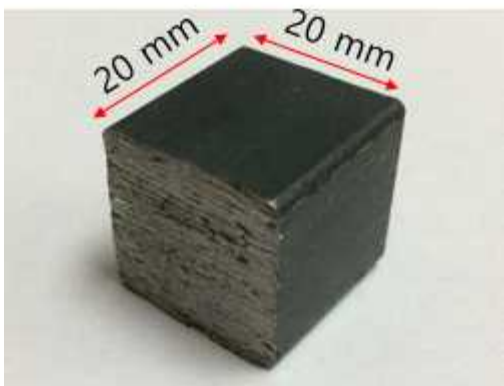
(a) Sample #1: 구조용강



(b) Sample #2: 실리콘웨이퍼

그림 15. 패시브 센서 및 알루미늄 가루의 형광 스펙트럼

- 흑색산화피막 실험 결과, 형광스펙트럼에서 응력에 따른 피크 이동 확인 가능.
- 자연 생성된 흑색산화피막의 경우, 응력변화에 의해 피막의 탈락이 쉽게 발생.



(a) 실험 시편 크기



(b) 압축 실험 구성

그림 16. 압축 실험 구성 및 실험 시편

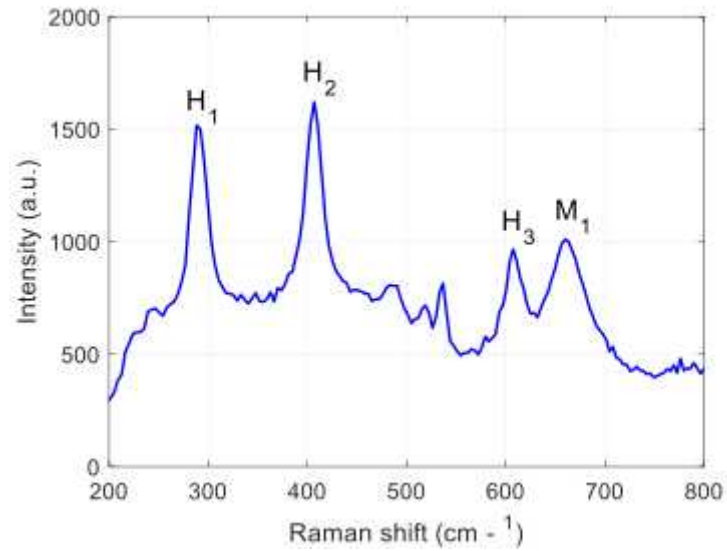


그림 17. 흑색산화피막의 라만 스펙트럼

- 박막 증착 결과 검증

- 모재에 용착된 알루미늄을 응력 센서로 사용하기 위해서는, 알루미늄의 형광 스펙트럼이 두 개의 피크 값(peak)을 가져야 하며, 일정 수준이상의 선명도(intensity)를 가져야 함.
- 플라즈마 스프레이 방식을 사용하여 알루미늄을 코팅한 시편의 형광스펙트럼 측정 분석

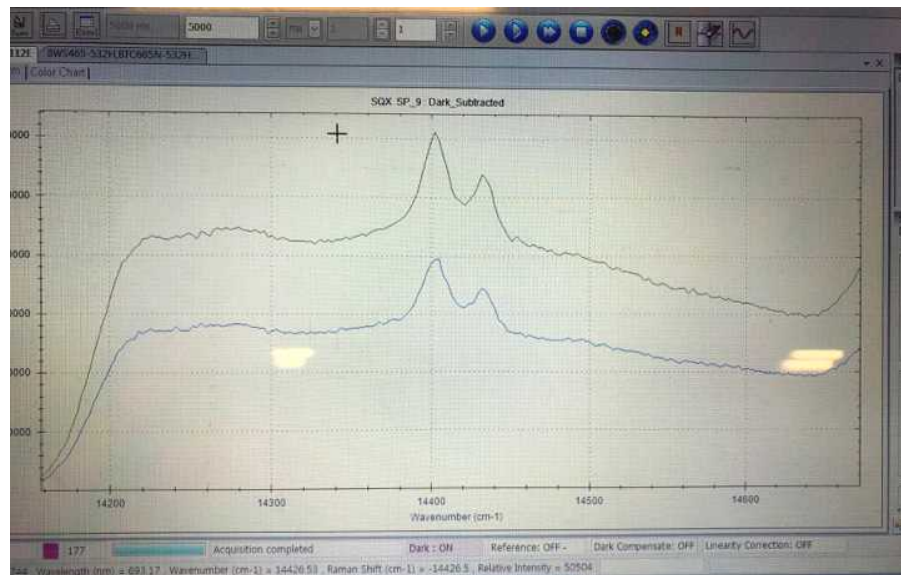


그림 18. Passive 센서의 형광 스펙트럼

- 두가지 다른 위치에서 수집된 스펙트럼이 14,402cm⁻¹, 14,432cm⁻¹ 주변에 피크 값을 갖는 것을 확인 함.
- 정확한 피크의 위치를 확인하기 위하여, 스펙트럼을 두 개의 Lorentzian curve를 이용하여 분해하여 알루미늄 증착을 확인함

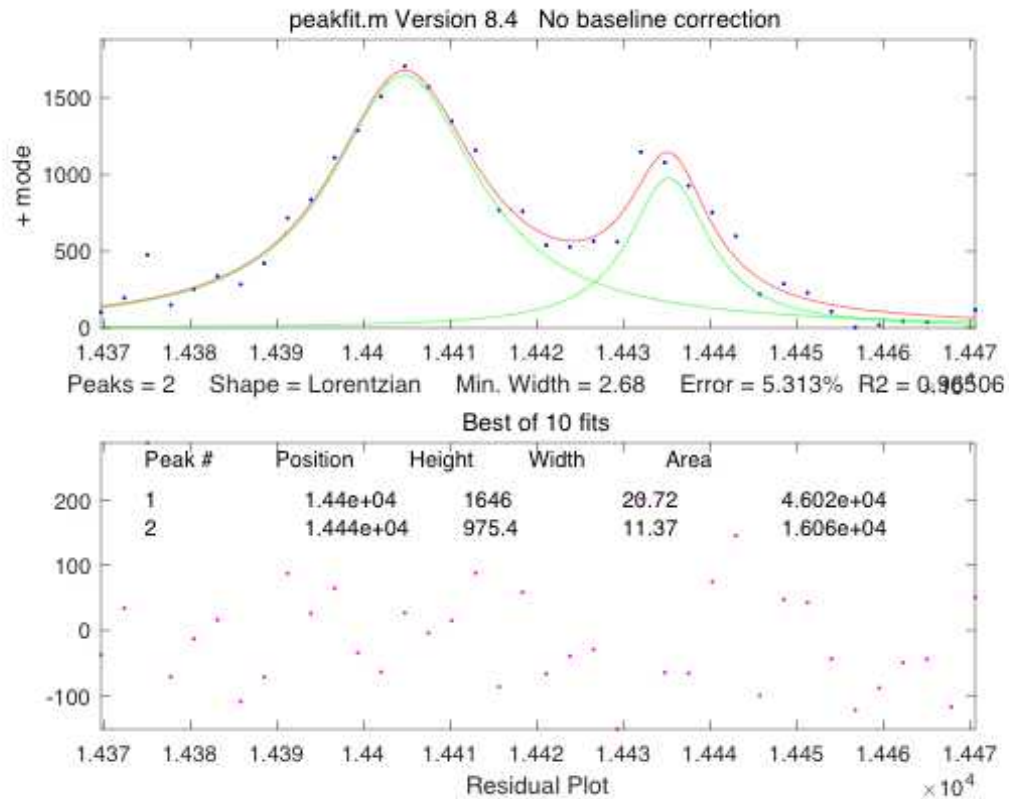


그림 19. Peak Deconvolution 과정

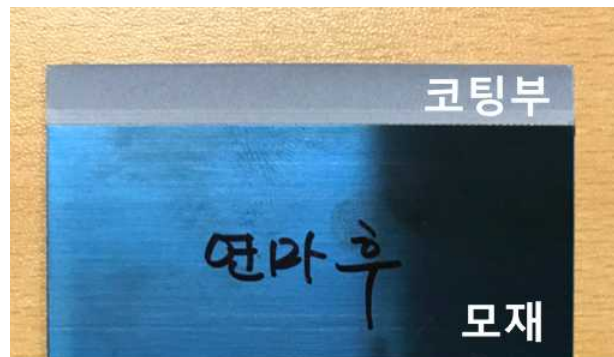
(2) 응력측정용 Passive 시편 개발

○ Plasma Spray를 이용한 알루미나(Alumina, Al₂O₃) 코팅 방식 적용

- 이온화된 플라즈마가 재결합되어 16,500°C 의 고열을 발생시키고, 650 m/sec의 비산속도를 이용하여 알루미나를 용융하여 코팅층을 형성
- 실제 모재에 닿는 온도는 100°C 미만으로, 모재의 변형을 거의 일으키지 않음
- 알루미나와 모재와의 접착력을 증가시키기 위하여, 모재의 표면에 연마 및 본딩 작업이 수행.
- 본딩작업은 80%Ni 20%Cr 파우더를 두께 편측 0.05~0.1mm로 플라즈마 스프레이 방식으로 코팅
- 알루미나 용착 후, 코팅부 표면 연마



(a) 연마처리 전 샘플



(b) 연마처리 후 샘플

그림 20. 용사 코팅 방법을 통하여 제작된 Passive 센서

- PSC 교량 단부용 앵커 헤드 시편 제작
 - 약 150 μm 이상으로 알루미나 용착후 연마 실시



(a) 코팅 전 앵커 헤드 샘플



(b) 코팅 후 연마중인 앵커 헤드

그림 21. Passive 센서 제작과정 중의 앵커 헤드



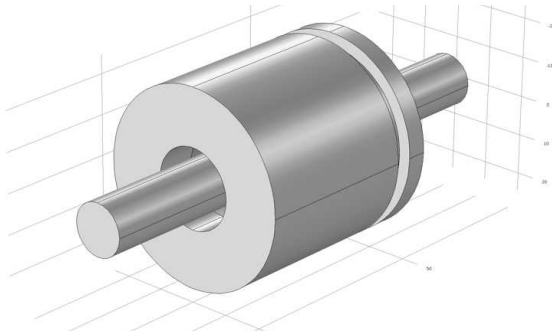
(a) 코팅 후 앵커 헤드 Passive 센서



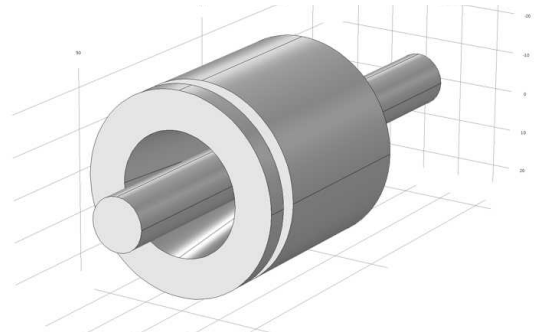
(b) 코팅 후 앵커 헤드 Passive 센서 (측면)

그림 22. 코팅 및 연마가 완료된 앵커 헤드 Passive 센서 시편

- 앵커헤드 Passive 센서 시편 모델링 및 구조 해석



(a) 앵커 헤드 하단부



(b) 앵커 헤드 상단부

그림 23. 앵커 헤드 Passive 센서 유한요소모델

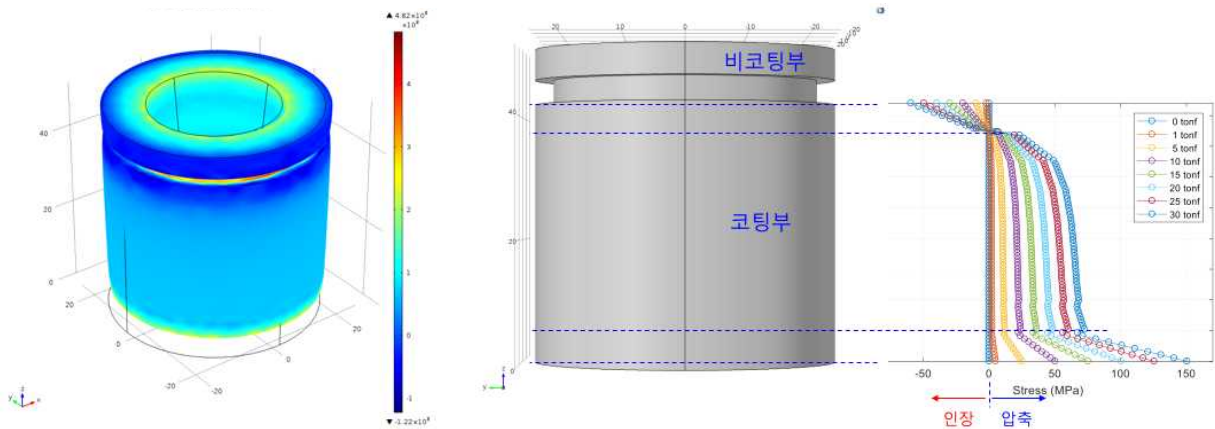


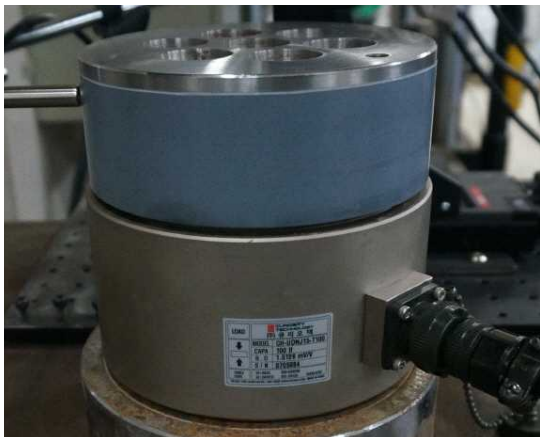
그림 24. 앵커 헤드 Passive 센서 유한요소모델 해석 결과 (0~30 tonf)

다. Passive sensor 최종 시편 (단위성과 1-3)

▶ [중빙 1-3] 시험성적서 별첨

(1) Passive sensor 개발 (앵커헤드형, 압축로드셀형)

- 라만형광/분광법을 이용한 비접촉식 응력측정을 위한 최종 센서형태로 다음과 같이 2가지 종류의 최종 센서 시편을 개발하여 시험검증함
 - PSC 교량 단부용 멀티 스트랜드 앵커헤드 시편: 앵커헤드 측면에 직접 라만산란물질 증착하여 센서화
 - 압축로드셀형 센서: 로드셀형 구조 가공하여 변형을 측정 위치에 라만산란물질 증착하여 전기식 센서를 비접촉식 센서로 변형 (용량 100 tonf)



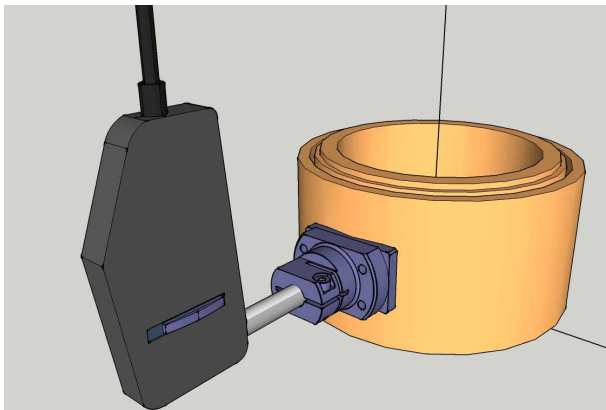
(a) 멀티 스트랜드 앵커헤드형



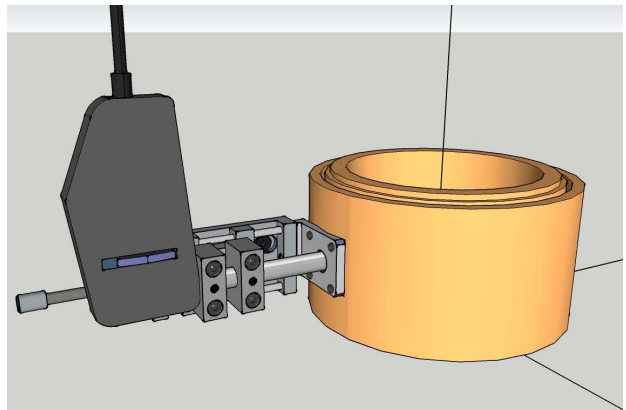
(b) 압축로드셀형

그림 25. Passive 센서 최종시편

- PSC 교량 단부용 멀티 스트랜드 앵커헤드 시편의 경우, PSC교 실대형 시험체의 양 끝단에 정착되는 방식으로 실제 시공단계에서 적용하는 방식과 동일하게 현장시험을 진행하였음. 단, 한 번 인장력이 가해져서 정착되면 시험체 파괴 전까지는 재시험할 수 없음.
- 압축로드셀형 센서의 경우, 실내시험에서 동일한 형태의 전기식 센서 로드셀과 1:1 비교 분석이 가능하여 응력변환알고리즘을 정밀하게 평가할 수 있음. 단, 박막증착부의 위치에 따른 측정 편차가 존재하기 때문에 위치별 편차를 줄이기 위한 고정지그 추가 설계 개발.



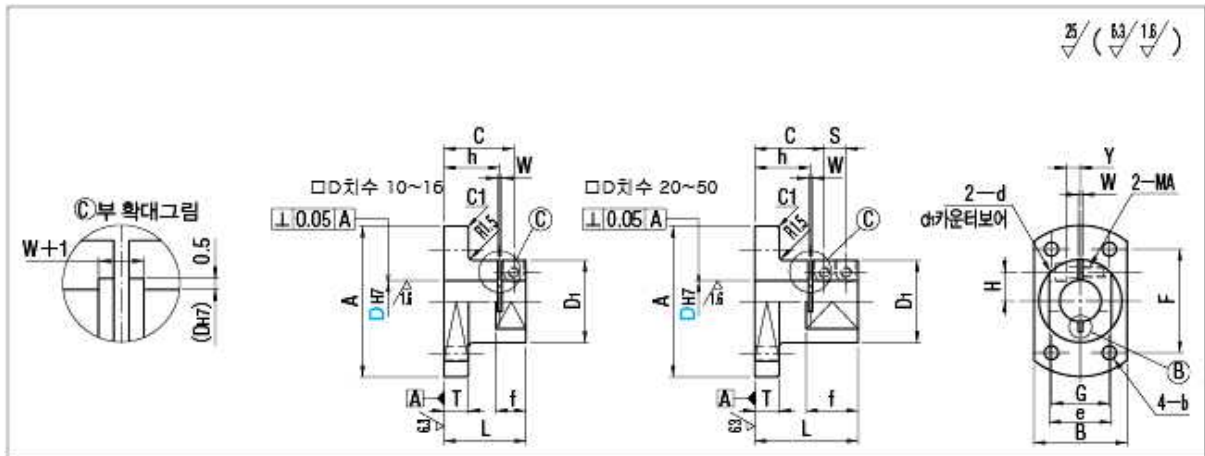
(a) 압축로드셀형 센서 (고정형)



(b) 압축로드셀형 센서 (정밀조정형)

그림 26. 압축로드셀형 Passive 센서 종류

- 프로브고정형 홀더 스펙



- 정밀조정형 센서 : 프로브홀더 + 정밀스테이지

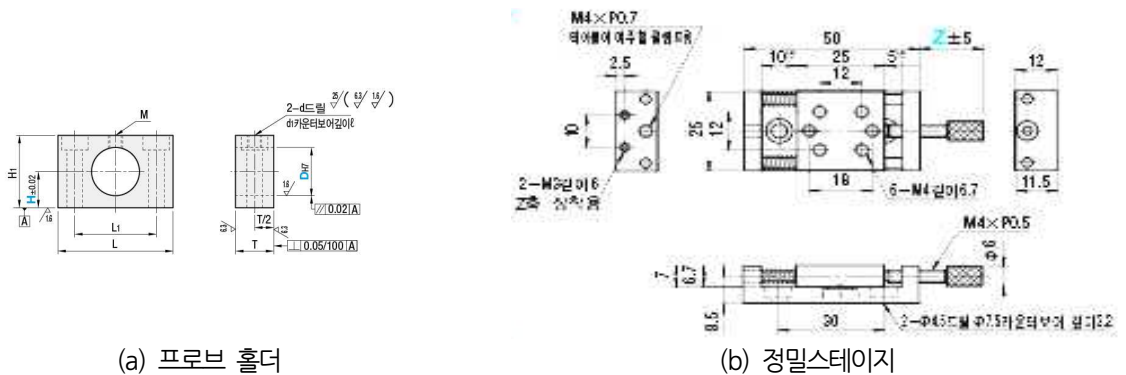


그림 27. 압축로드셀형 Passive 센서 구성품 설계 - 정밀조정형

프로브 홀더 사양	형상	블록형	샤프트 체결 방법	고정 나사
	홀 직경 D(φ)	10	재질	S45C
	표면 처리	사삼산화철 피막	타입	기계 가공품
	블록형 장착 방법	상면 카운터보어	두께	스탠다드
	맞춤핀 홀	없음	클램프 레버	없음
	높이 H(mm)	10	RoHS	6

정밀 스테이지 사양	내하중(범위)(N)	5~30	조정 방식	누름 나사
	테이블 사이즈 L(mm)	40	테이블 사이즈 W(mm)	40
	테이블 재질	알루미늄 합금	테이블 표면 처리	흑색 알루미늄
	이동 가이드	샤프트 슬라이드	테이블 사이즈 H(mm)	14
	이동량(X거리)(mm)	±7.5	조정 방식	핸들 조작
	조정 방식(조정 피치)(mm)	0.5	클램프 볼트	표준
	Z(mm)	60	RoHS	6

(2) Passive sensor 시험 (앵커헤드형)

- 멀티 스트랜드 앵커헤드 시편의 시험은 25m PSC 박스고 실대형 시험체의 현장시험에 사용되는 것과 동일한 앵커헤드를 사용하여 압축시험을 실시하였음. (최대 70톤까지 가력
 - 앵커헤드의 프로브 측정 위치에 따라 R2가 0.7230에서 0.8814까지 상이한 결과 발생, 압축로드셀형 시편 제작을 통해서 응력편차 큰 부분에 라만측정을 할 수 있도록 개선함.



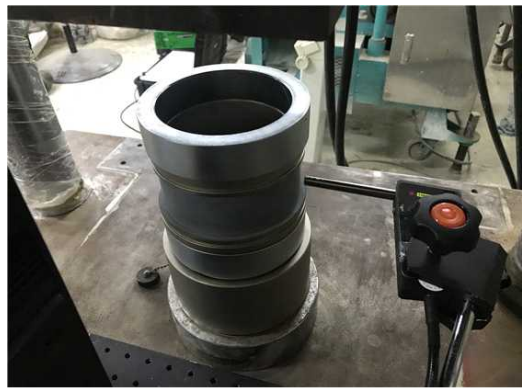
(a) 시스템 전경



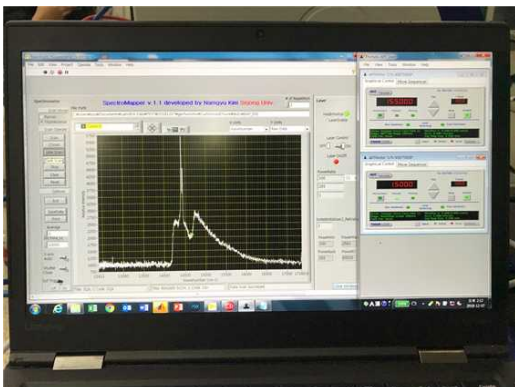
(b) 분광기 및 레이저 시스템



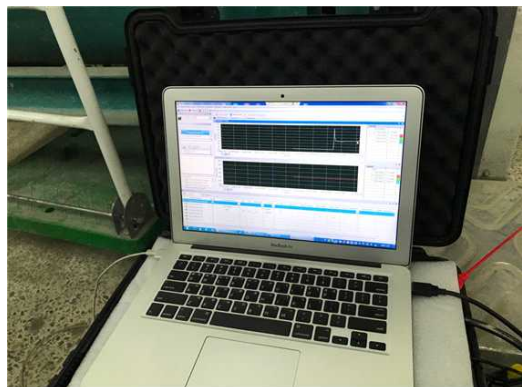
(c) 시편에 대한 레이저 조사



(d) 실험을 위한 로드셀 및 시편 배치



(e) 분광기/레이저/모터 구동화면



(f) 로드셀 데이터 계측화면

그림 30. 압축력에 따른 알루미나 파수의 변화 측정을 위한 시스템 구성

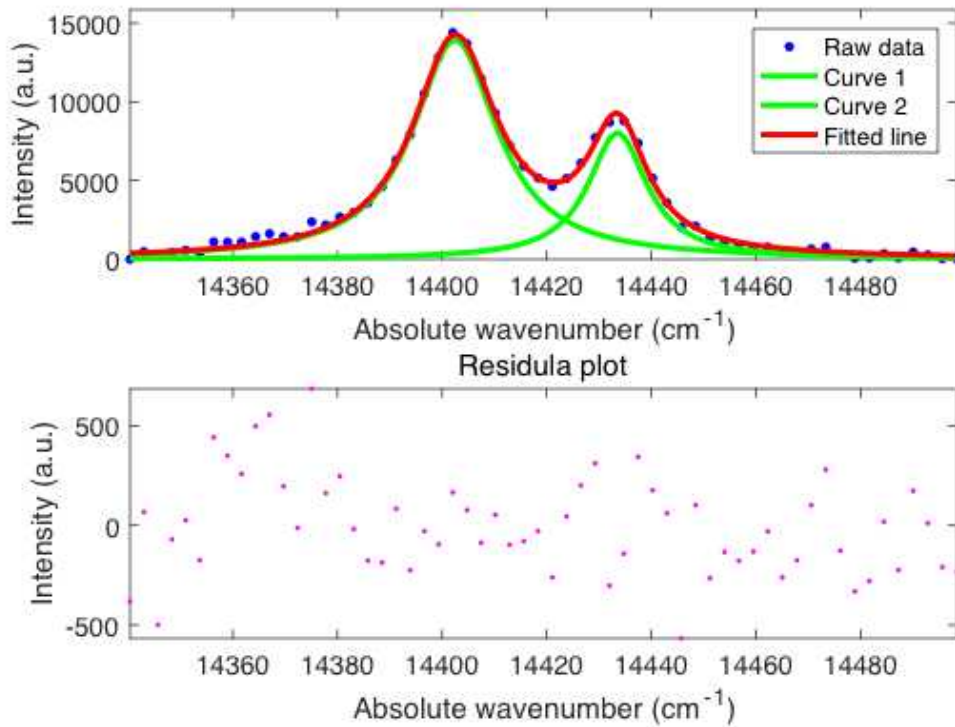
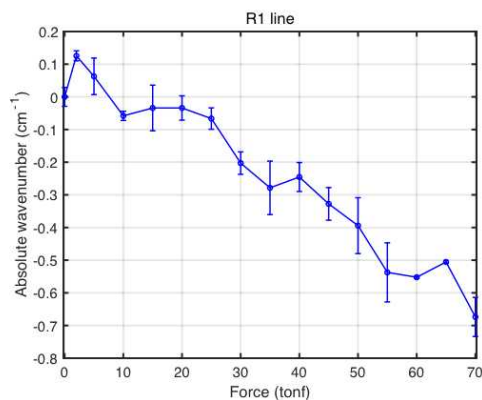
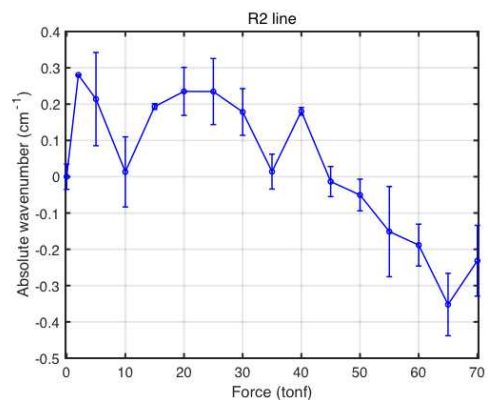


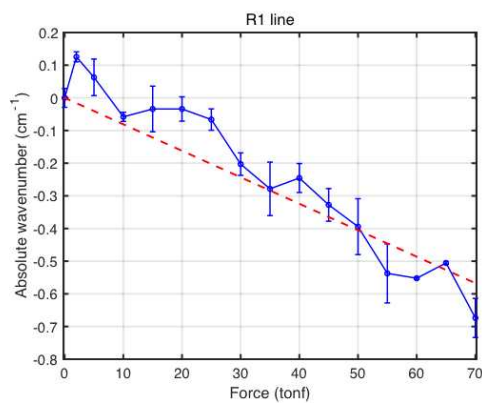
그림 37. 세밀한 파수변화 확인을 위한 Curve Fitting 과정 (70 tonf)



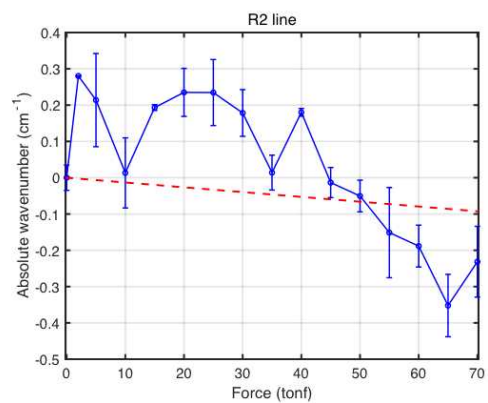
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)

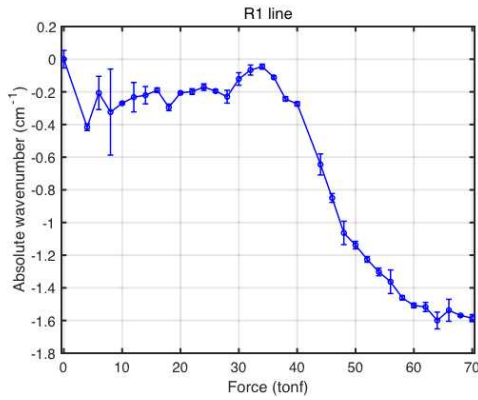


(c) Raw data and linear fitting of R1 line
($R^2:0.8814$)

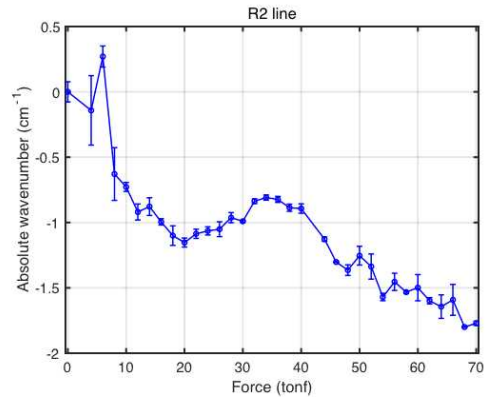


(d) Raw data and linear fitting of R2 line
($R^2:0.0451$)

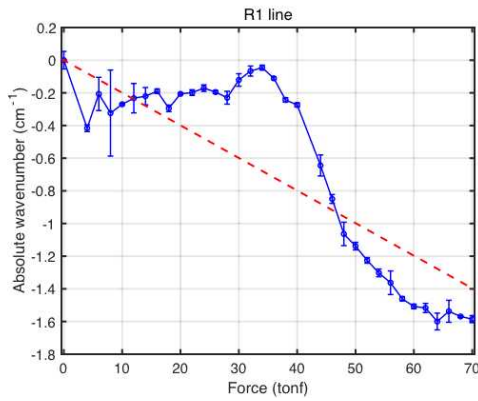
그림 38. 압축력에 따른 알루미늄 파수의 변화



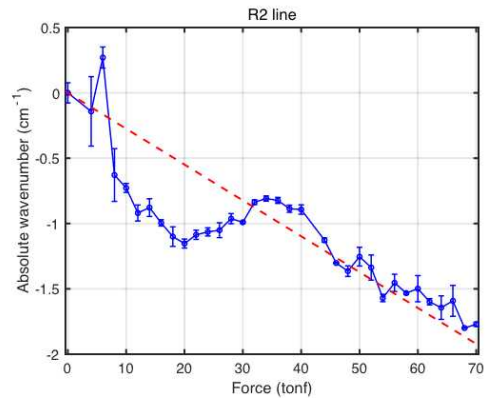
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
($R^2:0.7230$)



(d) Raw data and linear fitting of R2 line
($R^2:0.5872$)

그림 39. 압축력에 따른 알루미늄 파수의 변화

(3) Passive sensor 시험 (압축로드셀형)

- 앞서 진행한 앵커헤드형 시편의 실험결과와 비교해 볼 때, 개선된 압축로드셀형 센서 시편은 높은 정도의 R^2 값을 보여주는 우수한 결과를 나타내었음.



그림 40. 압축로드셀형 Passive 센서 시험

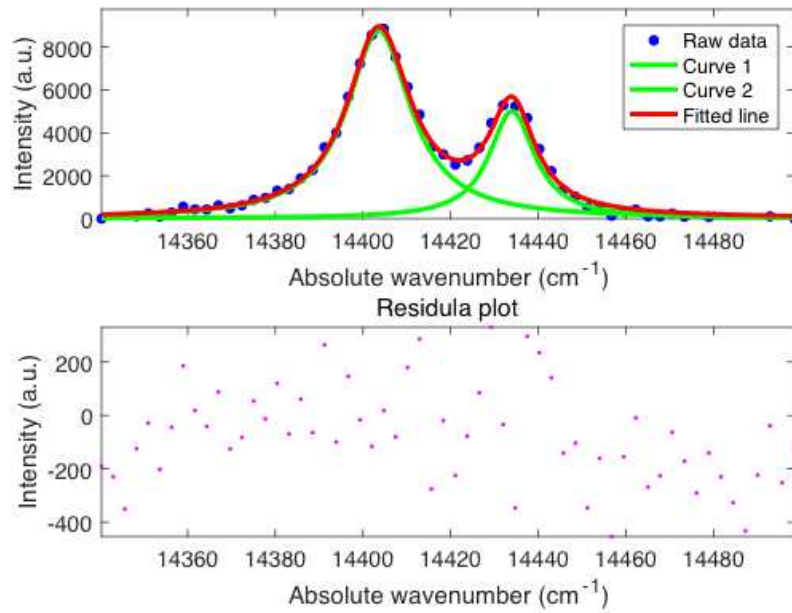
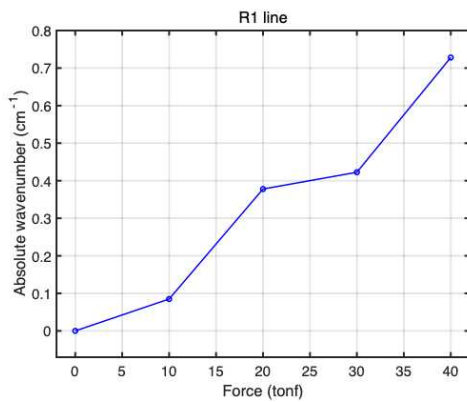
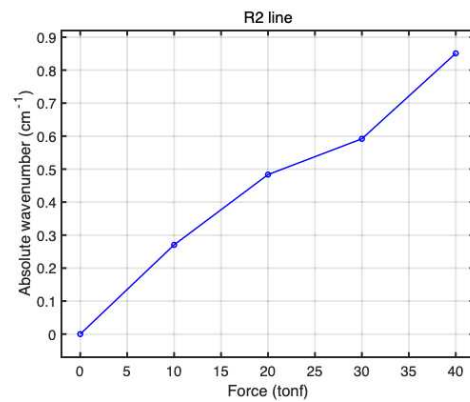


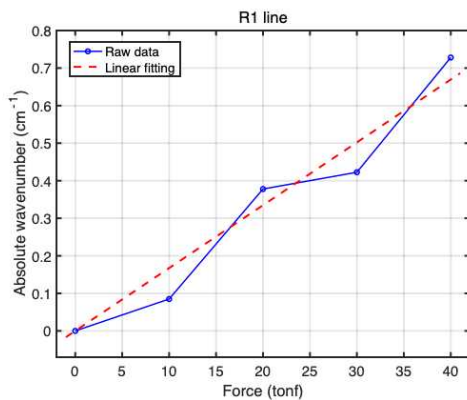
그림 41. 세밀한 파수변화 확인을 위한 Curve Fitting 과정 (40 tonf)



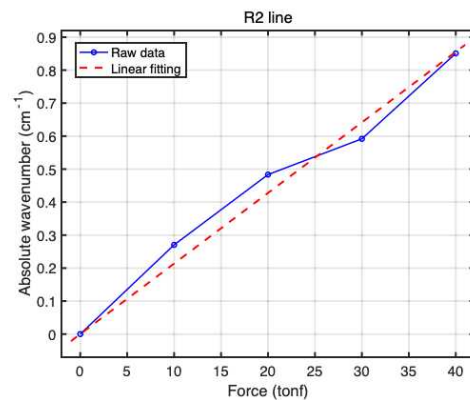
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
($R^2:0.9455$)



(d) Raw data and linear fitting of R2 line
($R^2:0.9788$)

그림 42. 압축력에 따른 알루미늄 파수의 변화

- 최대 40톤의 압축력(5단계)을 10톤의 간격으로 시편에 가한 경우, R1, R2 첨두값들이 선형적으로 증가하는 것을 확인함.
- 아래 표는 R1, R2의 선형회귀결과와 압분광상수를 분석한 것임. (압분광상수는 선형회귀결과의 역수를 취한값)

〈 선형회귀 경사 및 압분광상수〉

	R1 line	R2 line
선형회귀 경사 (파수변화/압축력)	0.01674	0.02139
압분광상수 (압축력/파수변화)	59.7372	46.7508

- 위와 같이 실험적으로 도출된 압분광상수를 이용하여 시편에 가해지는 압축력을 계산할 경우, 다음의 일차함수를 적용

$$\rightarrow \text{압축력 (tonf)} = \text{압분광상수 (tonf/cm}^{-1}\text{)} \times \text{파수이동 (cm}^{-1}\text{)}$$

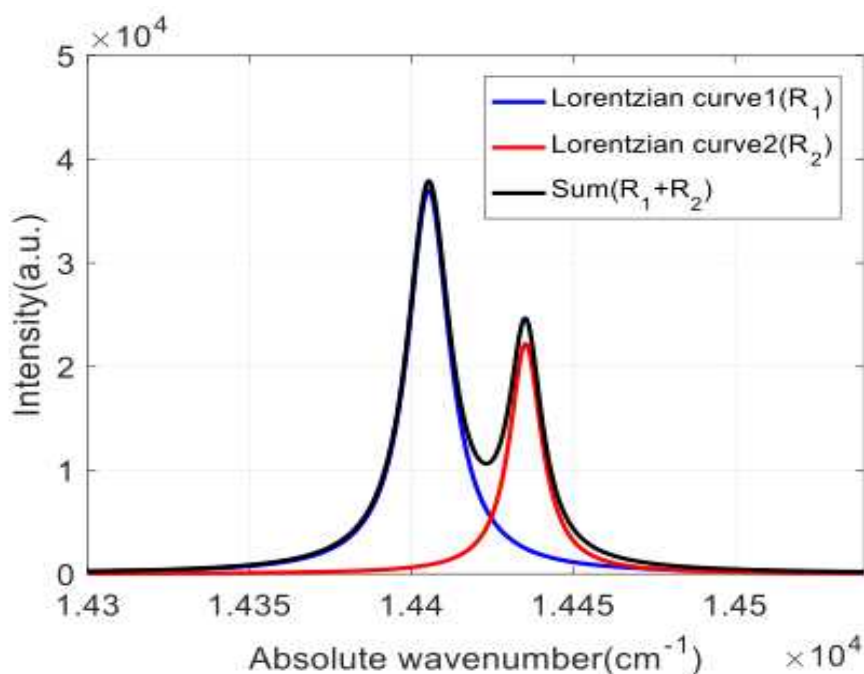


그림 43. 로렌츠함수에서 추출한 R1, R2 곡선

- 일차함수와 압분광상수를 이용하여 시편에 가해지는 압축력 계산 예
 - ① R1 압분광상수를 이용하여 압축력을 계산할 경우, 59.7372 적용
 - ② R1 line이 0.3 cm⁻¹의 파수이동이 있을 경우,
 $\rightarrow \text{압축력 (tonf)} = 59.7372 \text{ tonf/cm}^{-1} \times 0.3 \text{ cm}^{-1} = 17.9212 \text{ tonf}$
 - ③ R2 압분광상수를 이용하여 압축력을 계산할 경우, 46.7508 적용
 - ④ R2 line이 0.5 cm⁻¹의 파수이동이 있을 경우,
 $\rightarrow \text{압축력 (tonf)} = 46.7508 \text{ tonf/cm}^{-1} \times 0.5 \text{ cm}^{-1} = 23.3754 \text{ tonf}$

라. Passive sensor 제작 공법 (안) 및 알고리즘

▶ [중빙 3-3] 특허 출원 명세서

- 라만산란 물질의 코팅과 이를 이용한 응력센서 시스템의 경우, 라만 파장 이동을 측정하여 응력을 측정하는 방법은 지름 약 0.065mm 원 안의 라만 산란 물질의 변화를 측정

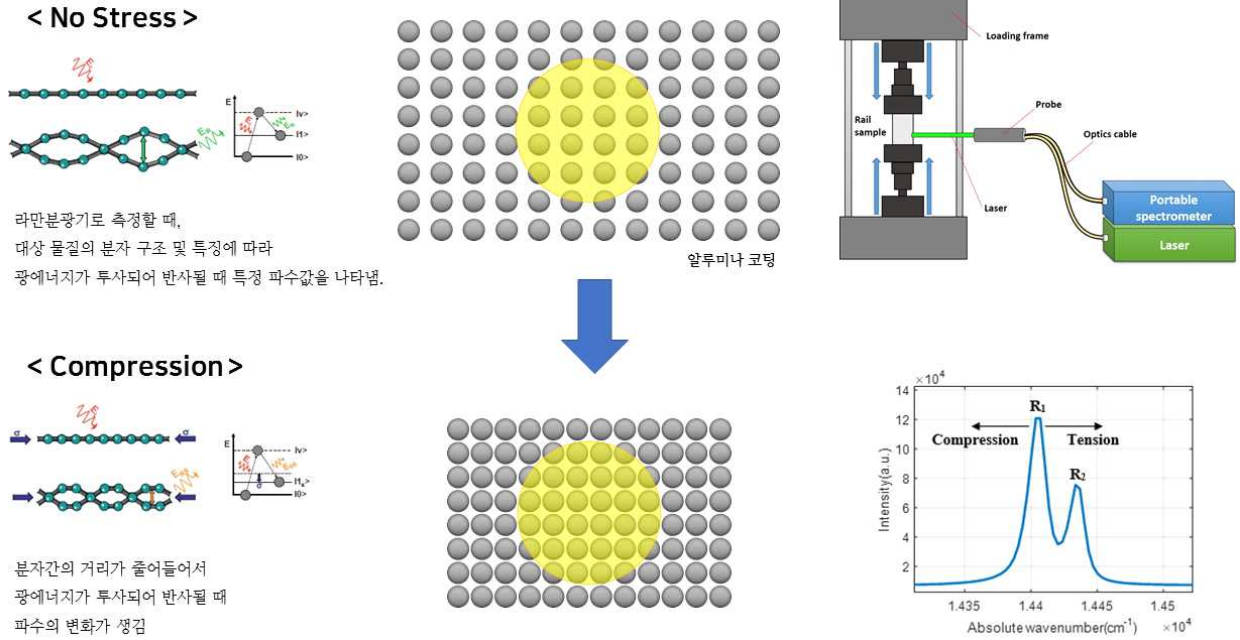


그림 44. 라만 산란 물질 측정 원리

- 단일물질 코팅의 경우, 같은 응력 크기 상태에서 분자간의 거리 평균이 수평방향 인장과 수직방향 인장이 동일하게 나타나는 상황에서는 주 응력 방향을 확인하기 어려움.

※ 응력 크기 표지자 : 가운데 분자 기준으로 주변 분자 간의 거리의 평균

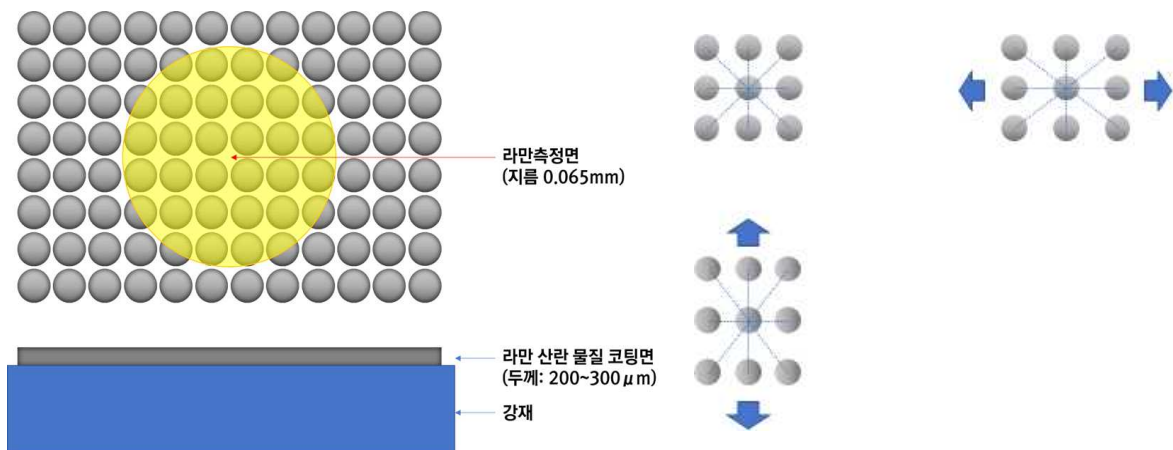


그림 45. 단일 라만산란물질 코팅과 분자간 거리변화에 따른 파장이동 개념

- 두 가지 물질 코팅의 경우, 같은 응력크기 상태에서 방향표지자(주황색) 분자 간의 거리 평균이 수평방향 인장시 거리변화가 수직방향 인장시 거리변화보다 더 크게 나타남.

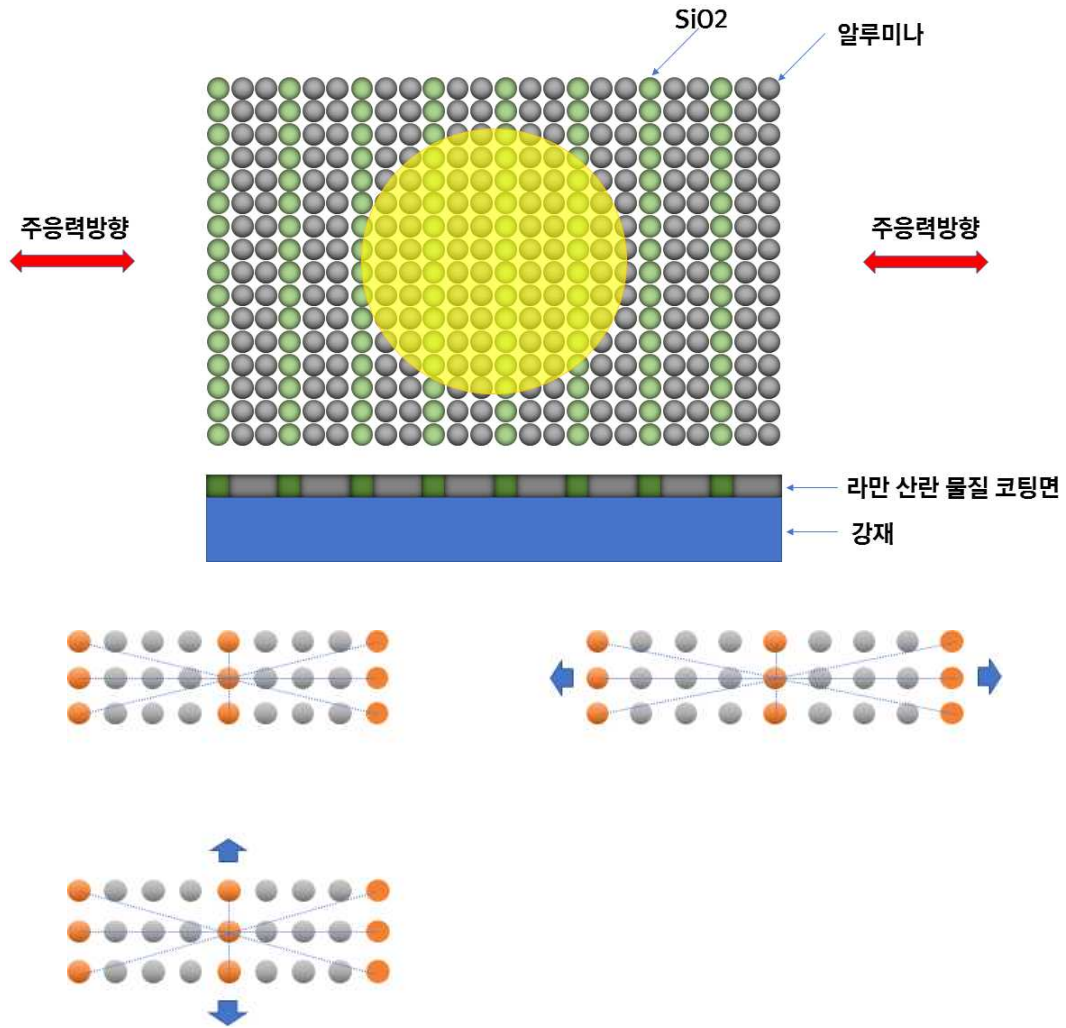


그림 46. 두가지 라만산란물질 코팅과 분자간 거리변화에 따른 파장이동 개념

○ 두 가지 물질 코팅의 경우의 개념을 증명하기 위해서 시뮬레이션한 결과, 아래 표와 같이 방향표지자와 응력표지자의 거리변화 및 면적변화 데이터를 추정할 수 있음.

주방향 인장 크기	단일 코팅시 면적	방향표지자 면적 (파형크기)	응력표지자 면적 (파형크기)	방향표지자 거리평균 (파장이동)		응력표지자 거리평균 (파장이동)	
0	1761.7674	426.4912	1335.2762	9.9	-	3.6	-
1mm	1313.2604	308.6803	1004.5801	12.9	30.3%	4.3	19.4%
2mm	1049.8365	275.5114	774.3251	15.9	60.6%	4.9	36.1%
3mm	874.9879	231.1008	643.8871	18.8	89.9%	5.6	55.6%
4mm	752.2096	157.0796	595.1300	21.8	120.2%	6.3	75.0%
5mm	647.7410	155.3026	492.4384	24.8	150.5%	7.0	94.4%
6mm	592.9549	148.7934	444.1615	27.8	180.8%	7.7	113.9%

직교방향 인장 크기	단일 코팅시 면적	방향표지자 면적 (파형크기)	응력표지자 면적 (파형크기)	방향표지자 거리평균 (파장이동)		응력표지자 거리평균 (파장이동)	
0	1761.7674	426.4912	1335.2762	9.9	-	3.6	-
1mm	1313.2604	314.9591	998.3013	10.3	4.0%	4.3	19.4%
2mm	1049.8365	258.7886	791.0479	10.8	9.1%	4.9	36.1%
3mm	874.9879	211.6252	663.3627	11.2	13.1%	5.6	55.6%
4mm	752.2096	180.6754	571.5342	11.7	18.2%	6.3	75.0%
5mm	647.7410	159.8826	487.8584	12.2	23.2%	7.0	94.4%
6mm	592.9549	139.6603	453.2946	12.8	29.3%	7.7	113.9%

○ 방향표지자와 응력표지자의 거리변화 및 면적변화 데이터를 그래프로 표현하면 다음과 같으며, 같은 응력크기로 주방향으로 변할 때와 직교방향으로 변할 때의 방향표지자 그래프의 변화를 통해서 차이를 확인할 수 있음.

- 응력표지자의 파장이동 거리평균의 증가 비율보다 방향표지자의 증가 비율이 큰 경우를 주방향 인장응력으로 예측할 수 있음.

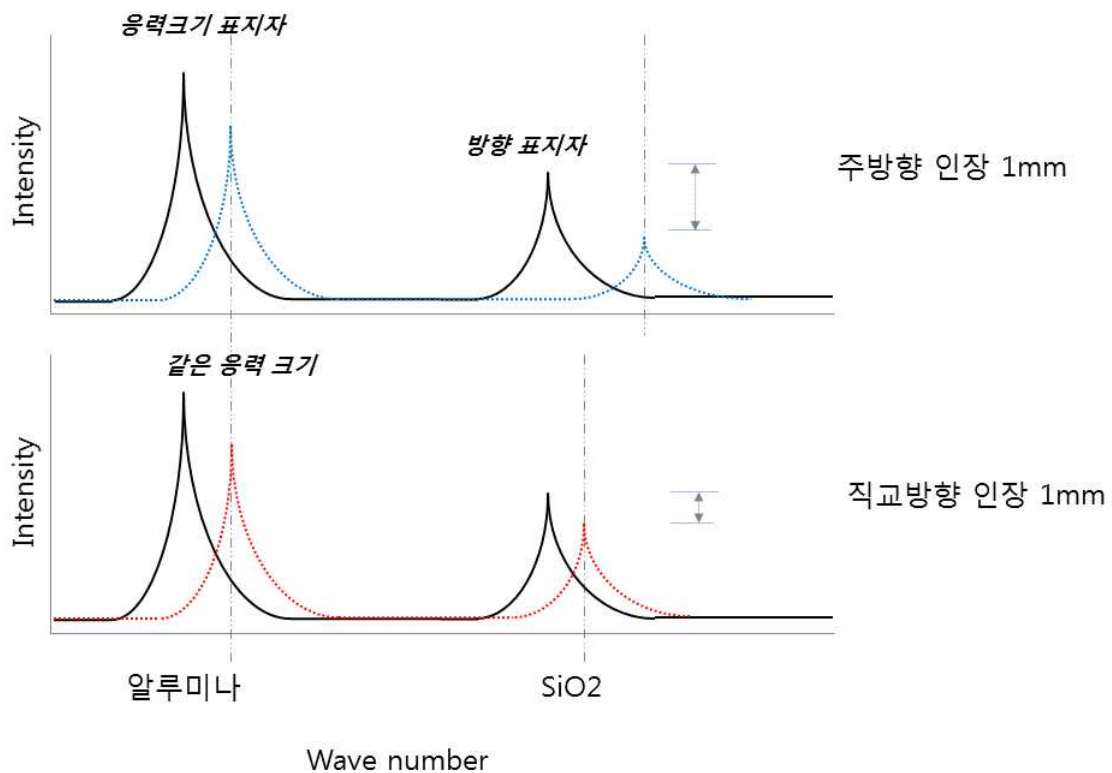


그림 47. 주방향 변화와 직교방향 변화의 파형 이동 추정

○ 주방향 인장을 받을 경우 응력표지자 면적 감소 추세와 방향표지자 면적 감소 추세를 그래프로 그려보면, 아래 그림과 같이 4mm 변화지점에서의 특이점(변곡점)을 보인다.

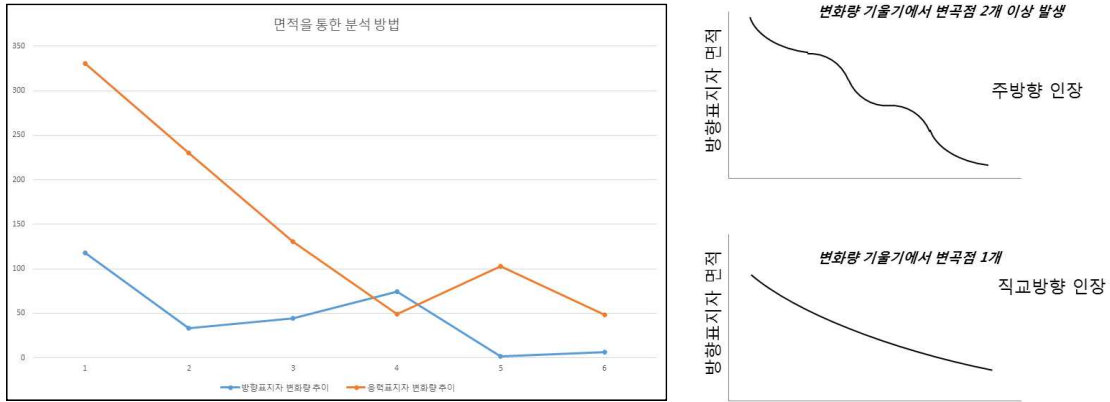


그림 48. 주응력방향을 확인할 수 있는 특이점

$$y=f(x)$$

(x:인장량 y:방향표지자 면적)

- 면적을 이용하는 방법을 정리해보면, 인장력 x 와 방향표지자 면적 y 의 함수가 라만시편이 주방향으로 변할 때 변곡점이 여러 개 발생하며, 이를 이용하여 $f''(x) = 0$ 의 해가 2개 이상이면 주방향 응력임을 확인하게 됨.
- 라만 산란 물질을 코팅함에 있어서 주응력방향을 판단할 수 있도록 패턴을 갖는 코팅면을 형성하고, 분광기를 통해서 라만 이동을 측정함으로써 주응력방향을 확인하고 보다 정확하게 원하는 방향의 응력을 측정할 수 있는 효과
- 주응력방향을 알 수 있는 비접촉식 응력측정 방식은 기존에 개발되어 사용되는 다양한 변형율계 및 하중계(인장,압축,전단,3축로드셀 등)의 스트레인게이지를 그대로 대체함으로써 로드셀 구조 해석 설계 및 제작방법을 손쉽게 적용하여 비접촉식 변형율계 및 하중계를 구성할 수 있는 장점이 있음.
-

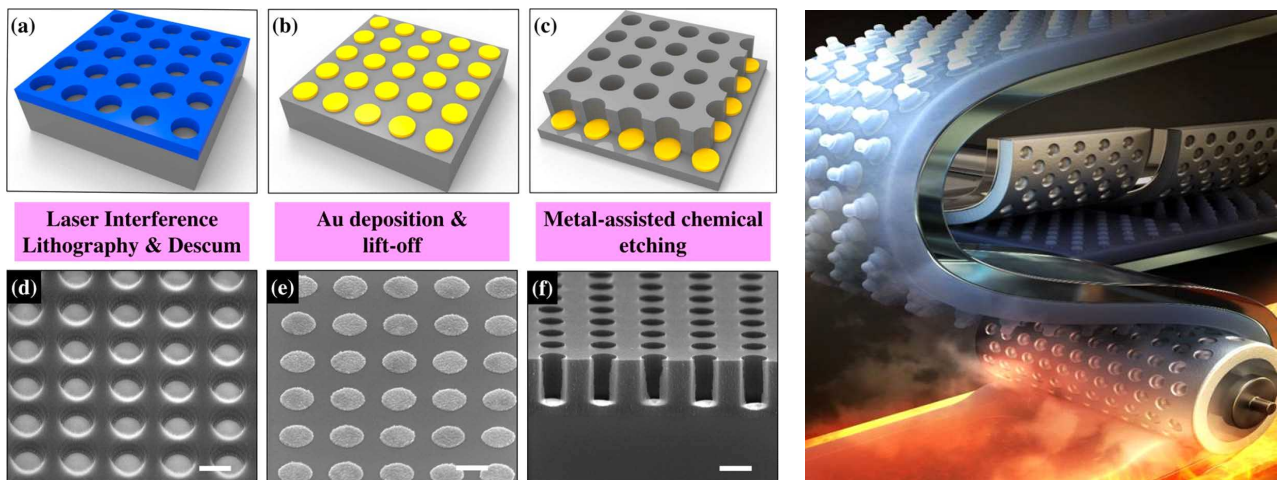


그림 49. 화학적 에칭 및 임프린팅 방법을 이용한 패턴생성 개념도

2. CTE2 : 라만 파장 이동과 응력의 관계 규명

가. 라만분광법 이용 응력측정 기술조사

- 축방향의 그래핀 시료를 당길 경우, 대칭성이 깨지며 단일피크가 갈라져서 측정되며 이를 이용하여 당김 방향 및 크기를 예측

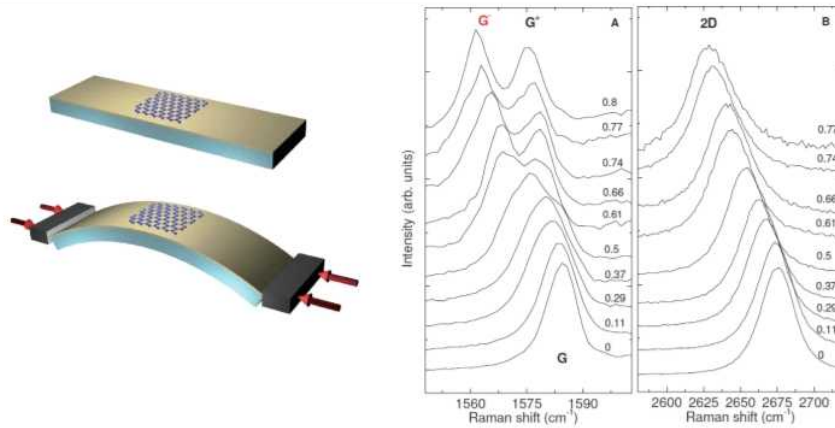
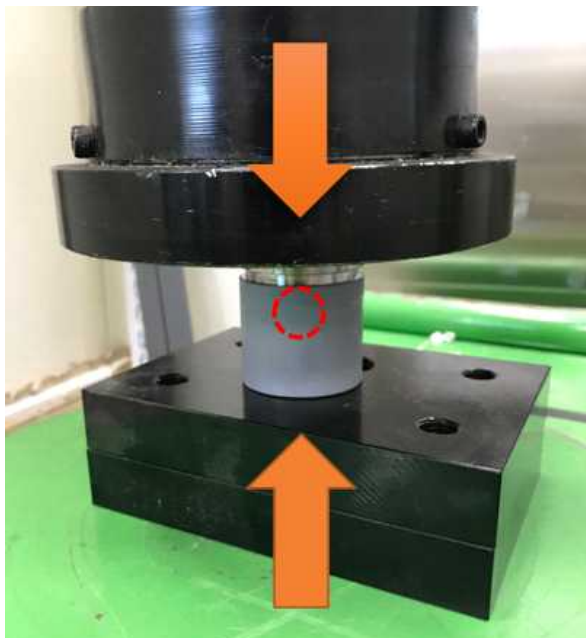


그림 50. 그래핀 변형에 따른 라만 시프트 측정

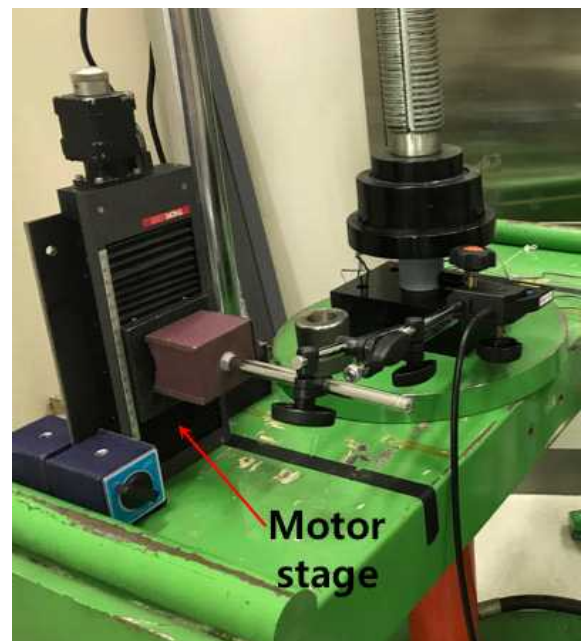
나. PS 계수 도출 (단위성과 2-1)

▶ [중빙 2-1] PS계수 알고리즘 보고서 별첨

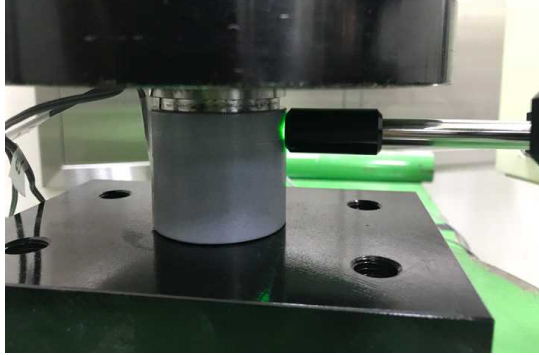
- 압축시험기를 통한 압축응력시험을 통한 PS 계수 도출



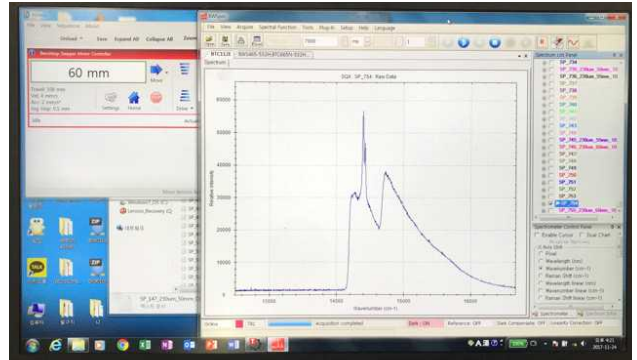
(a) 압축 응력 실험 구성



(b) 압축 응력 실험 전경



(c) 응력 측정 위치



(d) 데이터 계측 화면

그림 51. 압축 응력 실험 구성 및 전경

다. 박막재료별 두께별 PS계수 분석 (단위성과 2-2)

▶ [증빙 2-2] 박막재료별 두께별 PS계수 분석보고서 별첨

(1) 1차년도 두께별 응력시편 제작

○ 박막소재 조합별 PS계수 분석 : 모재와 박막재료와의 관계 분석

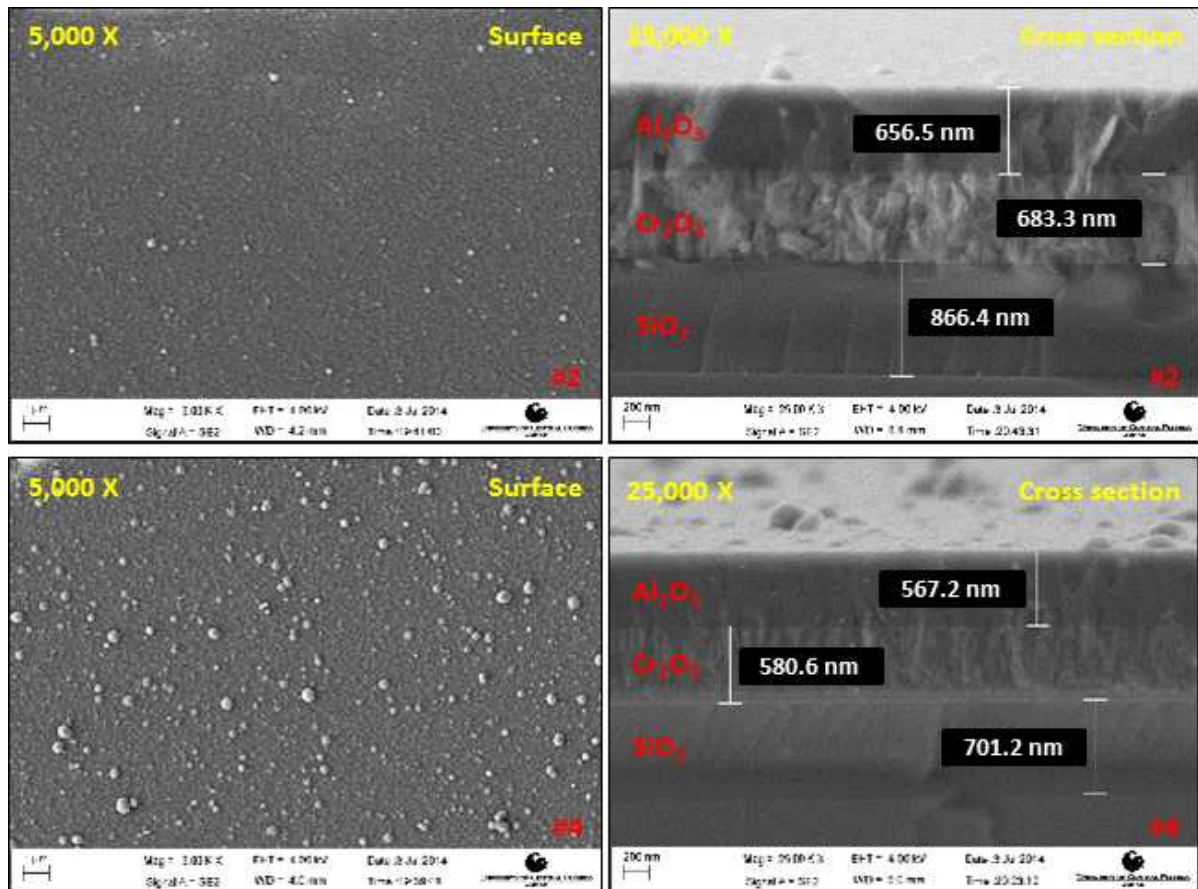


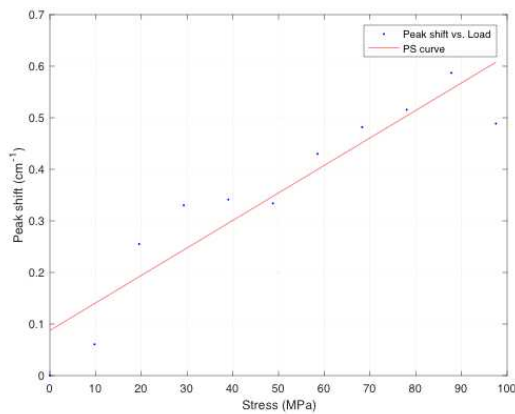
그림 52. Passive stress sensor의 표면/절단면 SEM(주사현미경) 이미지

(2) 1차년도 시편 박막두께별 PS계수 분석

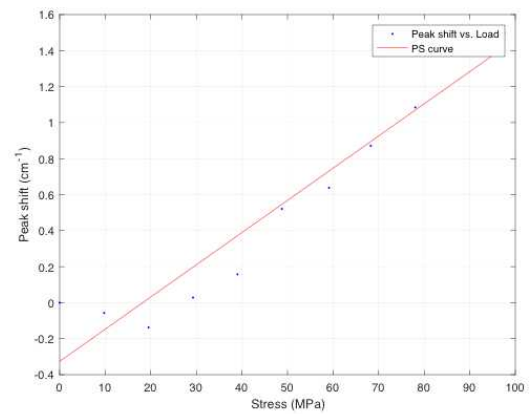
- 앵커 헤드 Passive 센서의 코팅두께별 PS 계수 변화 분석

< 코팅 두께별 PS coefficient >

코팅 두께	R1 line의 PS coefficient
220 μm	3.05 $\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$
230 μm	5.33 $\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$
330 μm	17.88 $\text{cm}^{-1}/\text{GPa}$



< 응력-파수 변화 그래프 (코팅 두께:230 μm) >



< 응력-파수 변화 그래프 (코팅 두께:330 μm) >

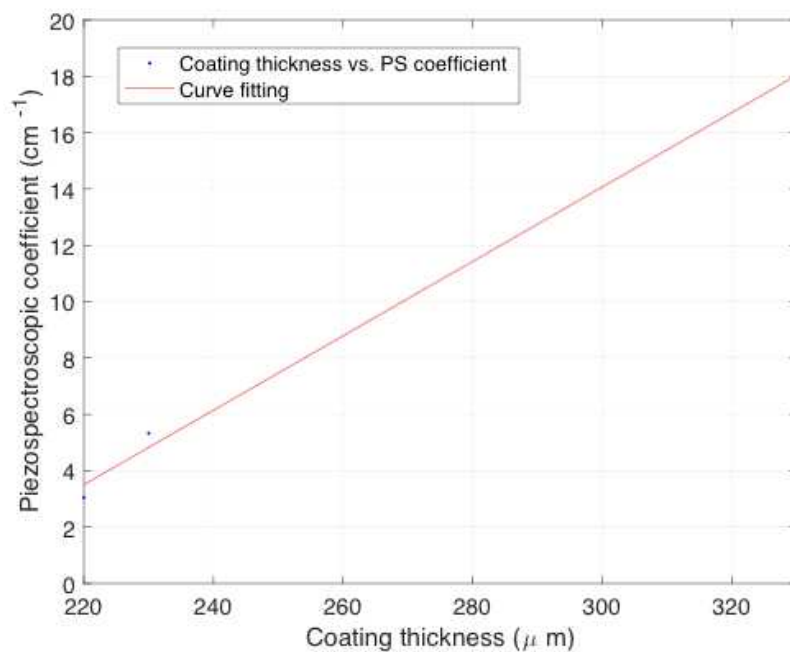


그림 55. 코팅 두께-PS 계수 그래프

(3) 2차년도 두께별 응력시편 제작 및 시험 결과

○ 박막 두께별 PS계수 분석

- 박막두께 211 μm , 416 μm 두 가지 종류로 추가시험 진행



(a) 코팅시편 (직경 3cm)



(b) 코팅시편에 대한 압축시험 전경



(c) 시험에 사용된 UTM



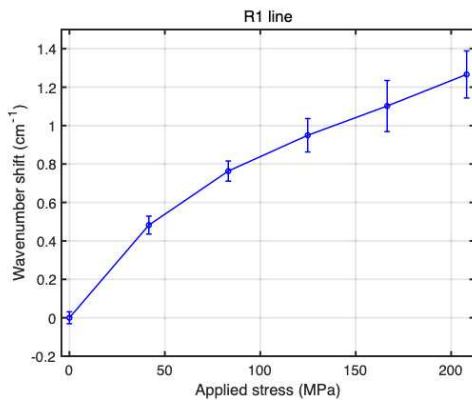
(d) 시험에 사용된 분광 시스템

그림 56. 코팅 두께에 대한 센싱효과 변화 규명을 위한 코팅 시편 및 실험 전경

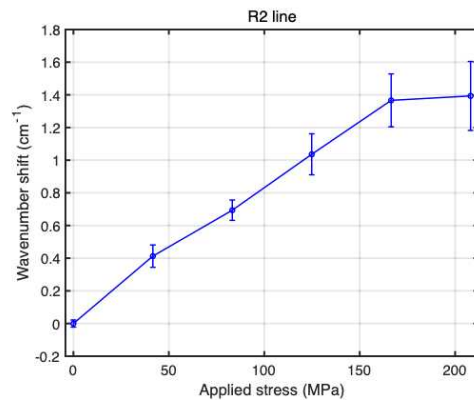
○ 박막 두께(Coating thickness) : 211 μm 시편 시험 및 결과



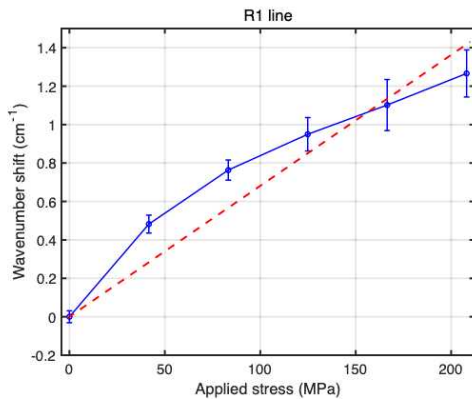
그림 57. 코팅 두께 측정 결과 (Coating thickness: 211 μm)



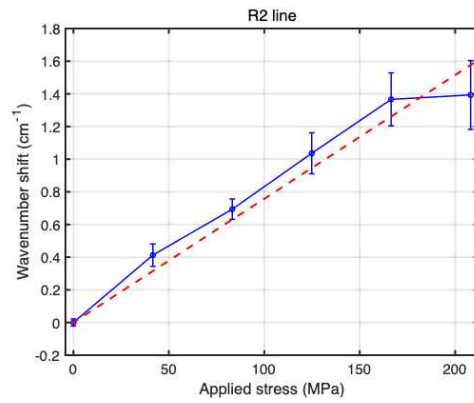
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
(R2:0.8949)



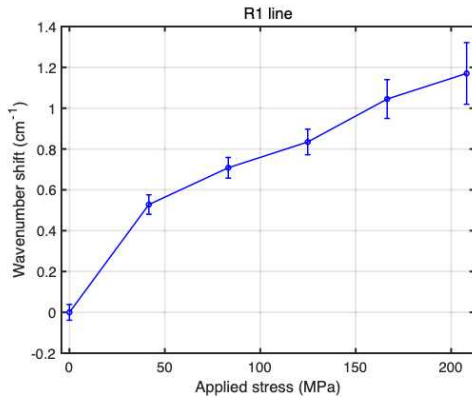
(d) Raw data and linear fitting of R2 line
(R2:0.9567)

그림 58. 압축력에 따른 알루미늄 파수의 변화 (Coating thickness: 211 μm)

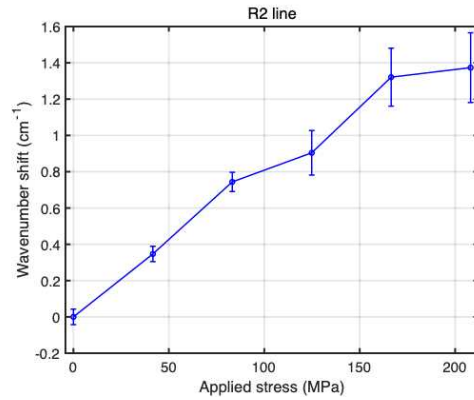
○ 박막 두께(Coating thickness) : 416 μm 시편 시험 및 결과



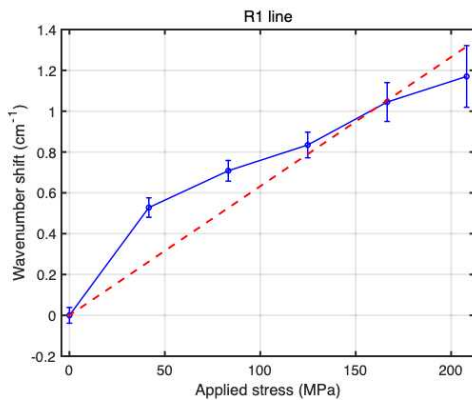
그림 59. 코팅 두께 측정 결과 (Coating thickness: 416 μm)



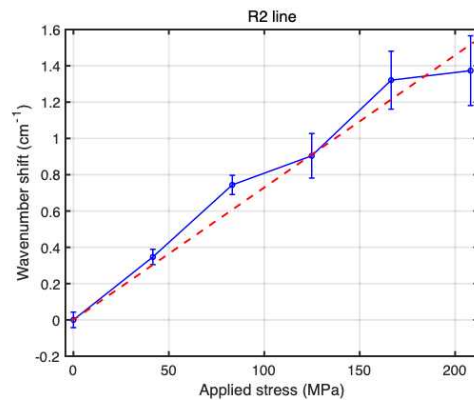
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
(R2:0.8557)



(d) Raw data and linear fitting of R2 line
(R2:0.9638)

그림 60. 압축력에 따른 알루미늄 파수의 변화 (Coating thickness: 416 μm)

- 앞의 그림과 같이, 시편에 가해지는 압축응력 증가에 따른 알루미늄 형광스펙트럼의 파수변화를 실험적으로 검증
 - 최대 15톤의 압축력(6단계)을 3톤의 간격으로 시편에 가한 경우, R1, R2 침투값들이 선형적으로 증가하는 것을 확인
 - 박막두께별 시편의 R1 line의 선형회귀결과와 압분광상수는 다음과 같음 (여기서, 압분광상수 : 선형회귀 결과 역수)

< R1 line 선형회귀 경사 및 압분광상수 >

	Thickness: 211 μm	Thickness: 416 μm
선형회귀 경사 (파수변화/압축응력)	0.006813	0.006325
압분광상수 (압축응력/파수변화)	146.7782	158.1028

- 실험적으로 도출된 압분광상수를 이용하여 시편에 가해지는 압축응력을 계산할 경우, 다음의 일차함수를 이용

$$\rightarrow \text{압축응력 (MPa)} = \text{압분광상수 (MPa/cm}^{-1}\text{)} \times \text{파수이동 (cm}^{-1}\text{)}$$

○ 압축응력 측정 프로세스

① R1 line의 압분광상수를 이용하여 압축응력을 계산할 경우, 각각 211 μm , 416 μm 의 코팅두께를 갖는 시편들이 각각 146.7782 와 158.1028 MPa/cm⁻¹를 압분광상수로 사용한다.

② 즉, 0.5 cm⁻¹ 의 파수이동이 있을 경우, 각각의 시편에 작용하는 압축응력은 다음과 같다.

$$\rightarrow 211 \mu\text{m} \text{ 코팅시편 압축력} = 146.7782 \text{ MPa/cm}^{-1} \times 0.5 \text{ cm}^{-1} = 73.3891 \text{ MPa}$$

$$\rightarrow 416 \mu\text{m} \text{ 코팅시편 압축력} = 158.1028 \text{ MPa/cm}^{-1} \times 0.5 \text{ cm}^{-1} = 79.0514 \text{ MPa}$$

○ 실험결과, 0.5 cm⁻¹ 의 파수이동이 있을 경우, 코팅두께가 211 μm 과 416 μm 일 경우, 약 5 MPa의 계측오차가 있음을 확인할 수 있음. 5 MPa의 오차는, 실험오차에 의하여 발생하거나 신호처리과정에서도 발생할 수 있는 크기의 오차이므로, 추가 현장시험의 경우 두께 편차에 따른 오차는 크게 영향을 주진 않을 것으로 판단함

3. CTE3 : 케이블 응력 측정 전용 라만/형광 분광시스템 개발

가. 케이블 응력 측정 전용 라만/형광 분광시스템 개발 (단위성과 3-1)

▶ [증빙 3-1] 시스템 시제품 자료 별첨

(1) 케이블 응력 측정 전용 라만/형광 분광시스템 개발

○ 라만 분광기 시스템 현황 기술조사

- 상용 라만 스펙트로미터 제조업체 조사 분석 : Renishaw, BWTEK, Thermo Fishers Scientific, HORIBA, Ocean Optics, StellarNet 등

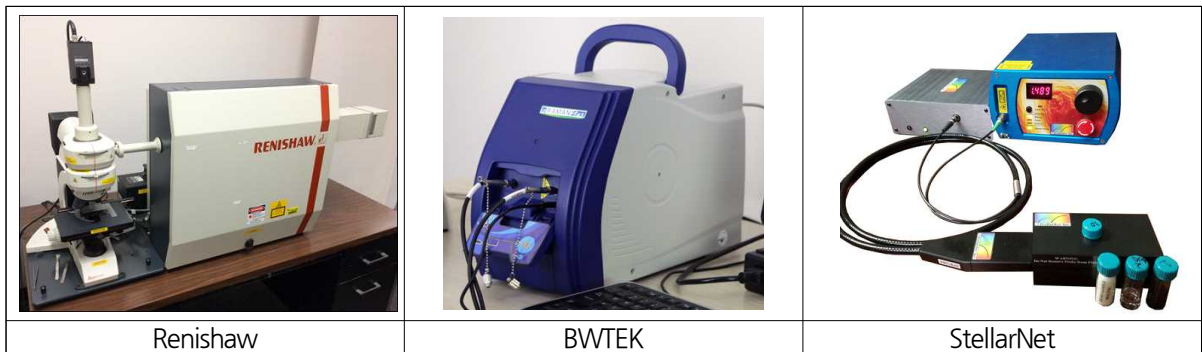


그림 61. 라만 스펙트로미터

○ 라만 형광/분광 시스템 구성

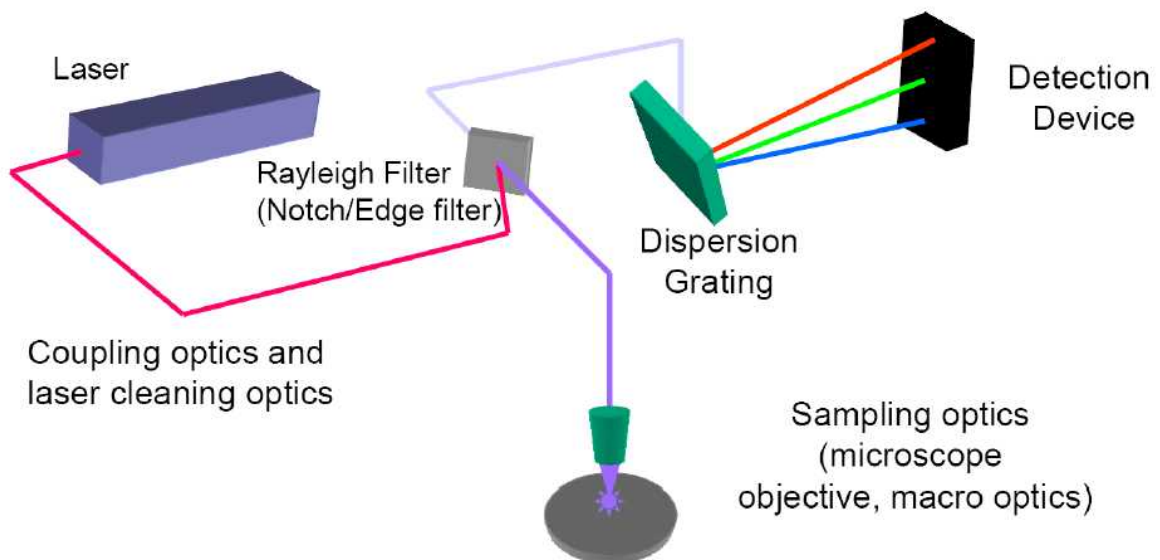


그림 62. 라만 시스템 기본 구성 개요도

모듈 구분	설계 스펙	모듈 사진
레이저소스 (Laser Source)	532 nm laser (α-Al₂O₃의 형광 측정) - 레이저 파워 조절 가능 모델 - Wavelength : Cleanlaze 532 nm (> 40mW)	
분광기 (Spectrometer)	- 스펙트럴 해상도: 4 cm⁻¹ 이하 - 스펙트럴 범위: 200~2000 cm⁻¹을 포함 - Spectral Coverage : 150 ~ 3400 cm⁻¹ - Spectral Resolution : ~ 3.5 @ 614nm	
주문제작 필터 (OEM filter)	- 응력 시험용 fiber optic probe 연결 가능 - Fiber optic 길이: 최소1.5 미터 - Range : 600 ~ 800 nm (Grating : 1714/650) - Resolution : 0.4 nm (Slit-10)	



그림 63. 라만 스펙트로미터 시스템 구성

(2) 전용프로브 설계 및 제작

- 1x3 커플러를 이용한 전용프로브 초기 프로토타입 시작품

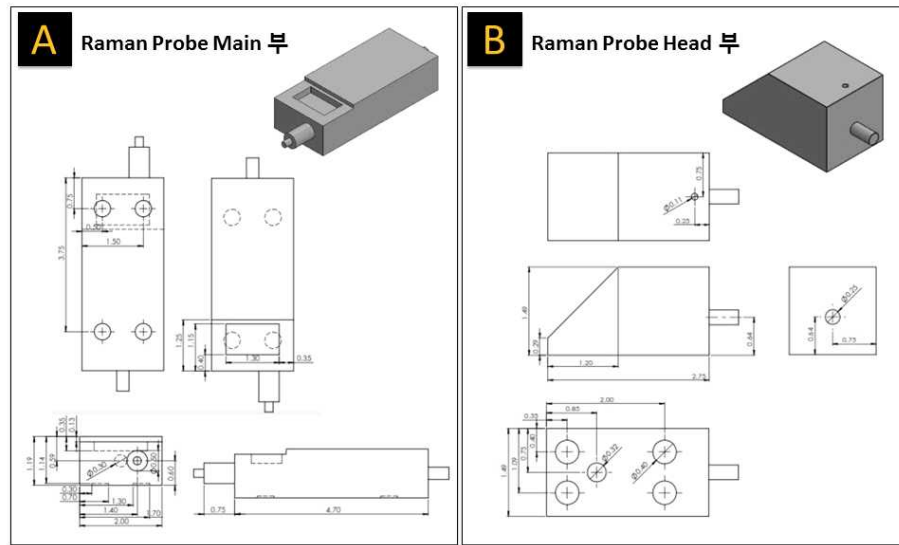


그림 64. 전용프로브 초기 프로토타입 설계 및 제작

- 라만 시스템 광학계 분석 및 프로브 주문 제작
 - Fiber for Excitation : 105 μ m Core with FC/PC Connector
 - Fiber for Collection : 200 μ m Core with SMA 905 Male Connector
 - Fiber Length : 1.5m
 - Excitation Wavelength : 532nm for BAC102-532
 - Shaft Diameter : 0.371" (9.42 mm)
 - Shaft Material : 304 Stainless Steel; Hastelloy C276
 - Shaft Length 3": (76.2 mm)
 - Window Material : Flat Quartz
 - Working Distance : 5.4 mm
 - Spot Size at Sample Surface : 85 μ m

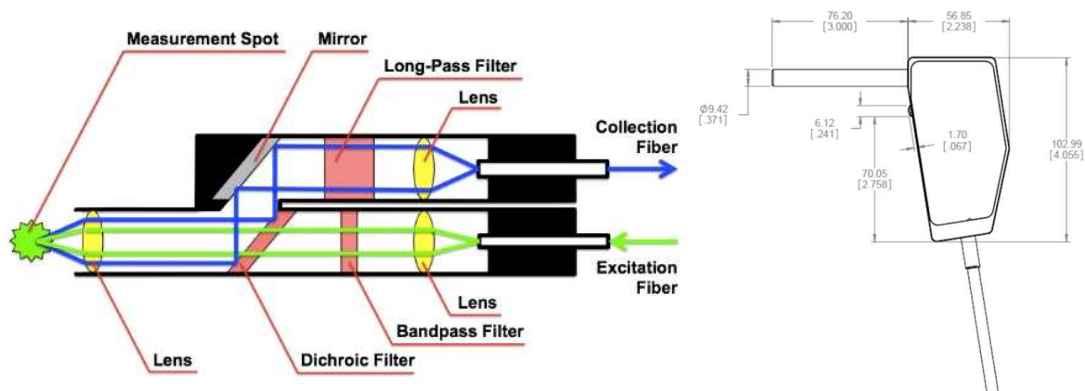


그림 65. 라만 프로브 광학계 분석 및 설계도면

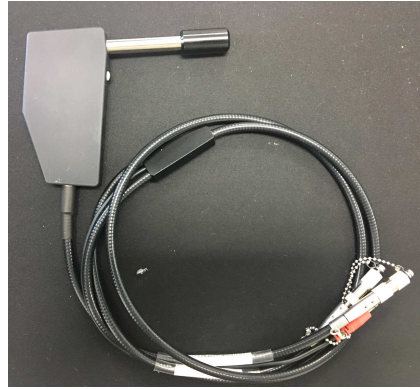
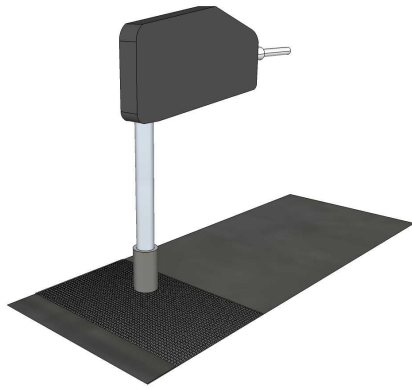


그림 66. 라만 프로브 제작

(3) 멀티채널 구축

- FBG센서 및 데이터로거 제조사인 Micron Optics 사의 sm041 Multiplexer 제품 이용 멀티 채널 측정 가능성 검증 실시

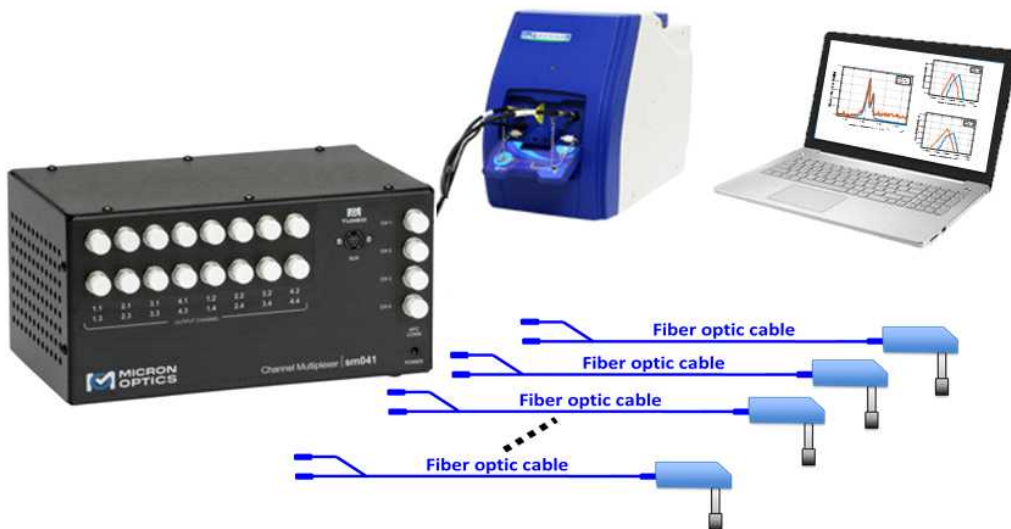


그림 67. sm041 Multiplexer 를 이용한 멀티 채널 측정

- sm041은 4 parallel 입력과 8채널, 16채널 출력이 가능한 멀티플렉서이며, 라만 시스템의 경우 하나의 측정 포인트, 하나의 프로브에 레이저 소스 광섬유 라인과, 라만 수광부 라인이 병렬로 구성되기 때문에 입력단이 복수로 구성되는 것이 필요함
- 라만시스템용 전용 Fiber Optic Switch 설계 제작 (24채널 : 2 switch mol 1x12 in 1 housing)
 - 1 switch with 105um core fiber
 - 1 switch with 200um core fiber
 - 레이저 소스라인과 라만수광부 라인 동시에 스위칭 측정 가능함

operation wavelength	: 450-1750nm
fiber	: S105um for first mol 1x12, S200um for second mol 1x12
insertion loss(without connector)	: 1.4dB(typ), 2dB(max)
crosstalk adjacent channel	: ≤ -50 dB
switching time	: ≤ 10 ms
repeatability	: ≤ 0.03 dB
guaranteed lifetime	: > 100 Mio cycles
operating temp.	: 0 to 60degC
storage temp.	: -40 to 80degC
Electrical interface	: RS-232(D-sub connector)
operating voltage	: 100-240V (input power supply)
power consumption max	: 500mW
housing dimension	: 440 x 340 x 88mm
connector	: 26pcs F-SMA (Adapter in front)



그림 68. 멀티채널 광스위치

(4) 케이블 응력측정용 전용시스템 구축 및 축소모형실험

○ PSC구조 케이블 응력측정용 전용시스템(하드웨어 및 운용프로그램) 구축

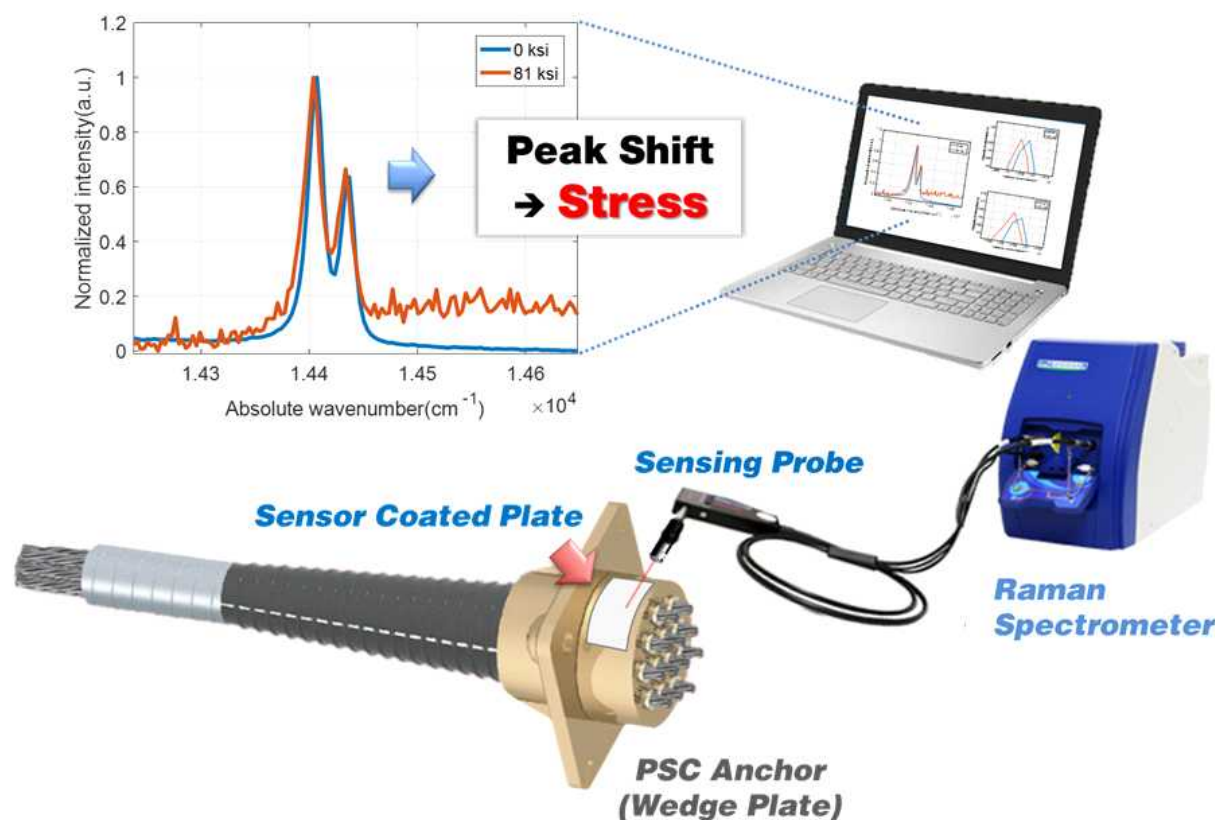


그림 69. PSC구조 케이블 응력측정용 전용시스템

○ 축소모형 제작, 성능 검증 실시

- 케이블 응력측정 전용 라만 시스템의 성능 검증을 위한 2가지 형태의 시편 제작 (1차년도)
- 케이블 인장력 측정 시험용 강재 시편 제작 : 적용성 검증 시험 실시

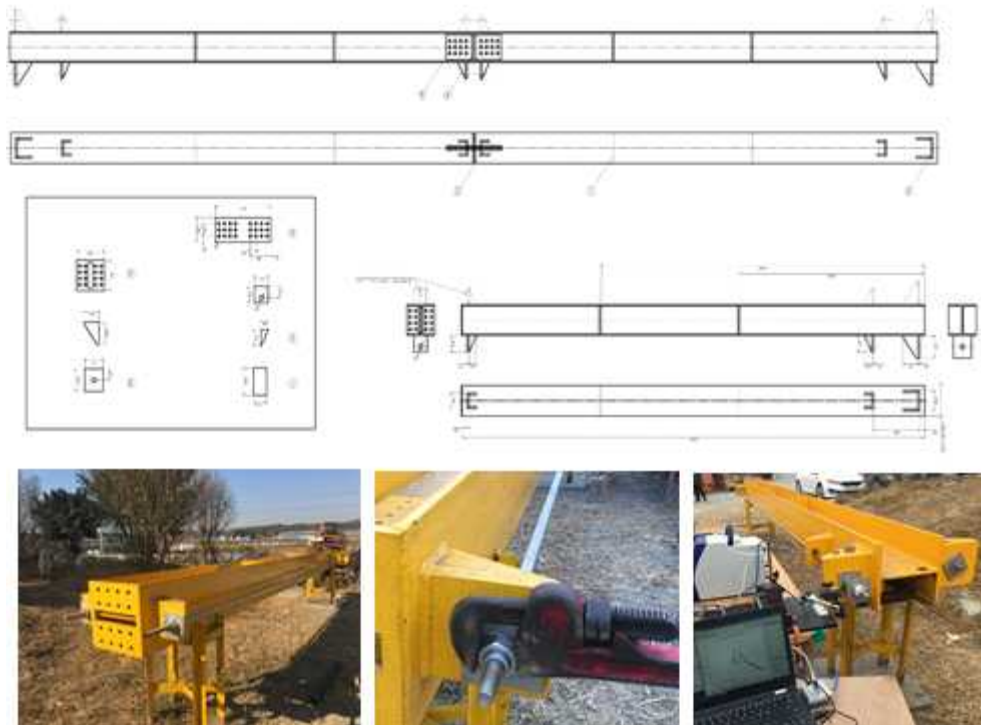


그림 70. 케이블 인장력 측정 시험용 강재 시편

- PSC교 슬라브 축소 모형 제작 : 모노스트랜드 앵커헤드 응력측정 비교 실험 (로드셀 및 스트레인게이지)

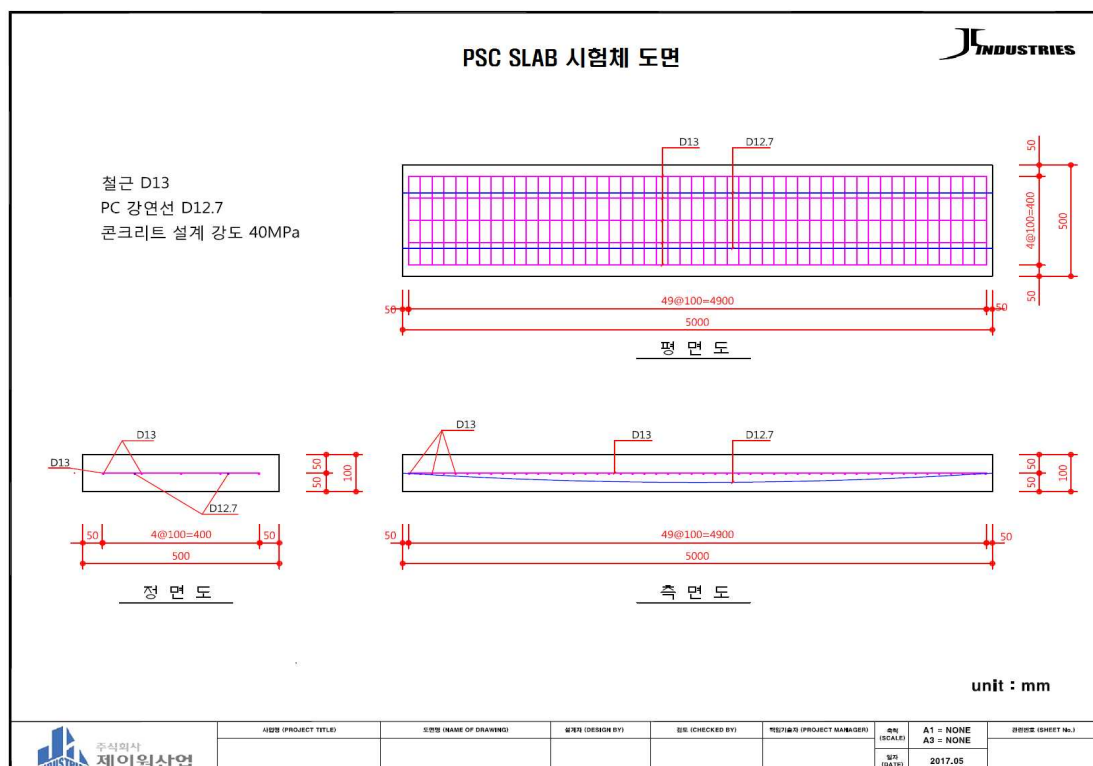


그림 71. PSC 슬라브 축소모형 설계도

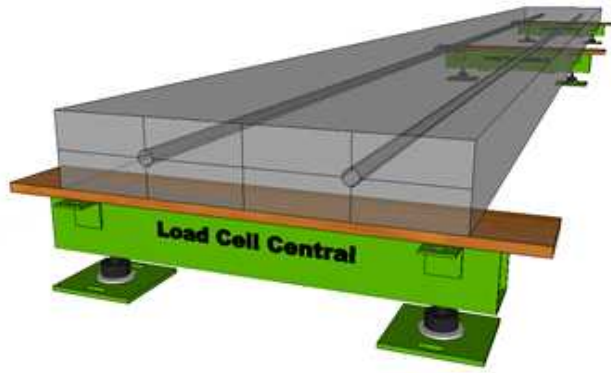


그림 72. PSC 강연선 실험 세트

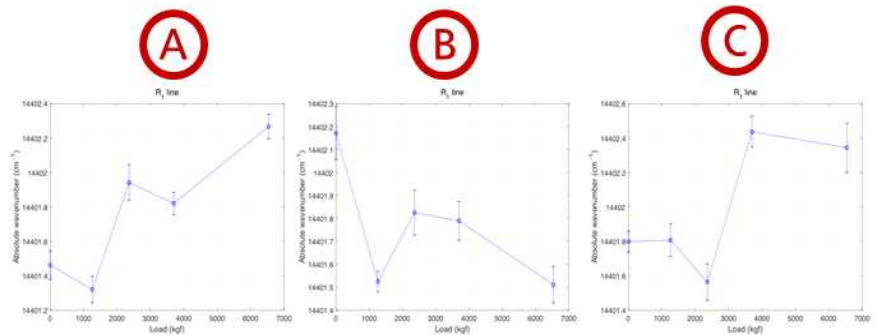


그림 73. 앵커헤드 위치별 측정 결과

- 앵커헤드 높이별 응력분포 해석 : 순 압축응력 측정을 위해 베어링 10mm 추가한 케이스에 대해 구조해석 실시하여 2차년도 추가 실험 진행방향 수립

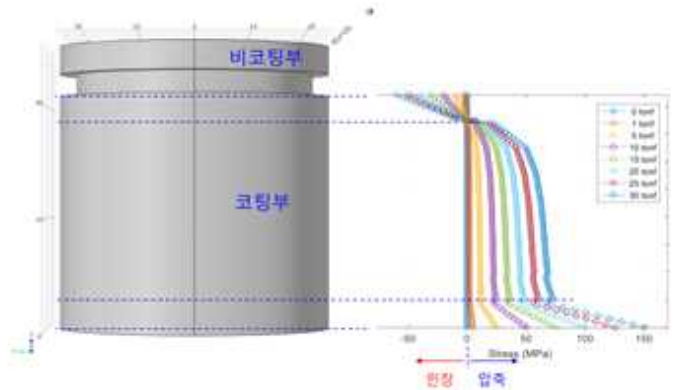
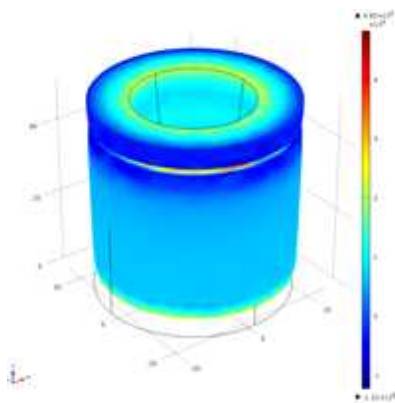


그림 74. 앵커헤드 및 베어링 패드 구조해석

○ 2차년도 케이블 응력측정시험용 시편 제작 및 시험

- 1차년도 제작한 축소모형시험체의 경우 1회 인장시험 후에는 앵커헤드 웨지에 강하게 정착되어서 재시험을 위해서는 케이블을 산소 절단해야 함. 응력시편 재활용 불가.
- 인장력을 단계별로 가력하고 뺄 수 있도록 유압계를 이용하여 시편을 추가로 설계 제작하였음.

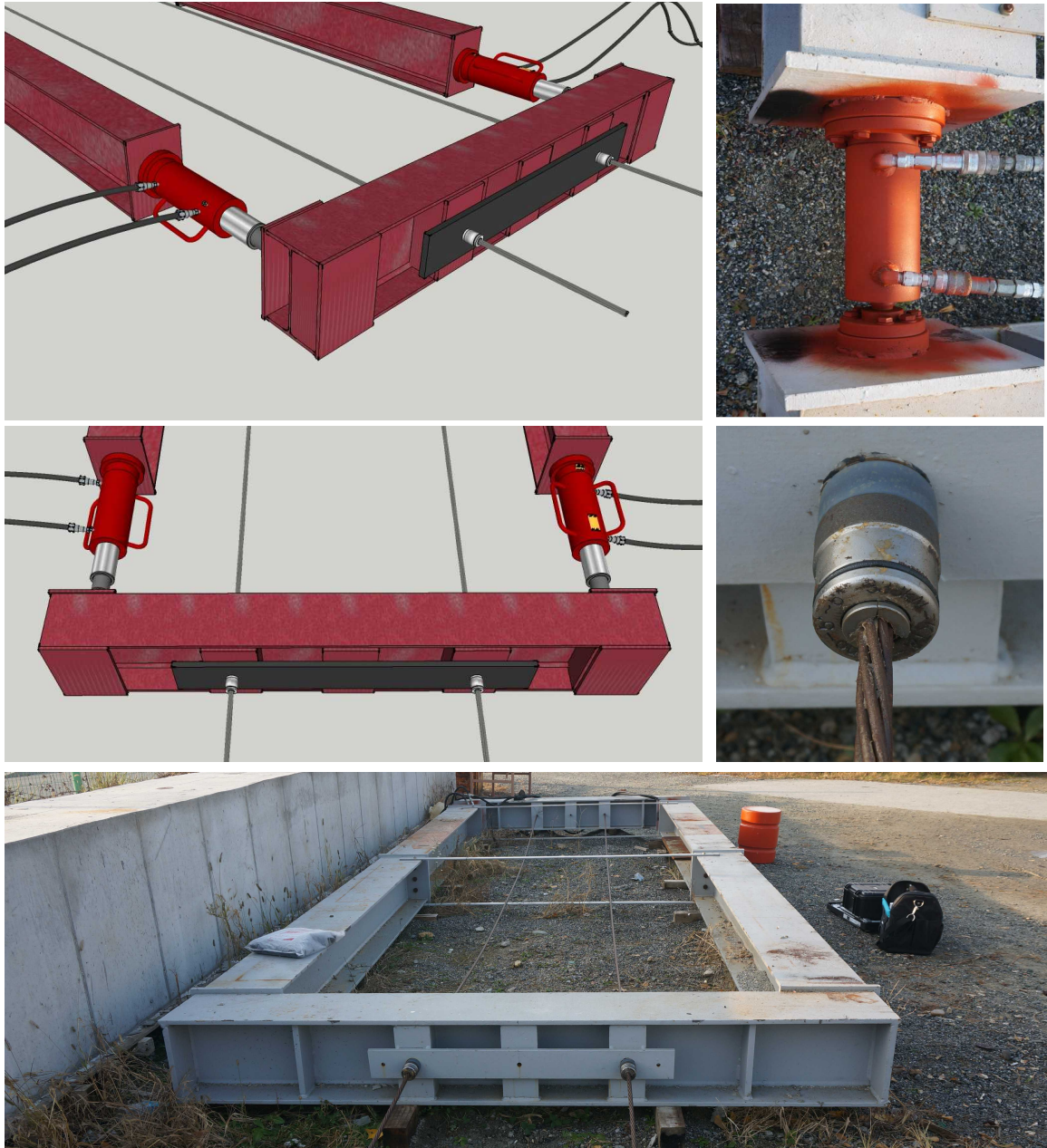


그림 75. 2차년도 케이블 인장시험체 제작

- 베어링 10mm 추가한 모노 스트랜드 앵커헤드 인장력 측정 시험 실시

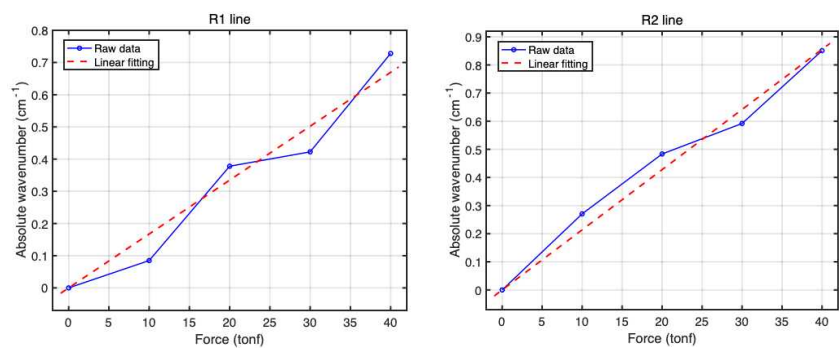
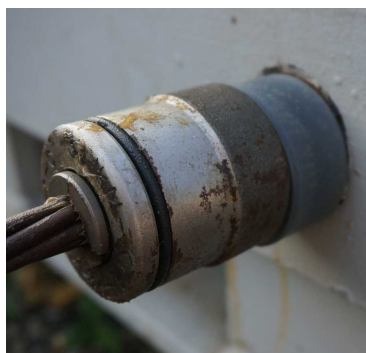


그림 77. 2차년도 케이블 인장시험체 시험결과

나. 케이블 응력 측정 전용 프로그램 (단위성과 3-2)

▶ [중빙 3-2] 소프트웨어 등록중 2건 별첨

(1) 응력변환 알고리즘 코딩

- 압분광 효과: 물질이 응력을 받으면, 그 응력의 크기에 따라서 라만 스펙트럼의 피크값이 응력이 없는 상태의 스펙트럼을 기준으로 그 좌측(또는 우측)으로 이동하는 현상
 - Piezo-spectroscopic (PS) coefficient를 계산함으로써, 해당 물질에 유도된 응력의 크기와 방향을 계산

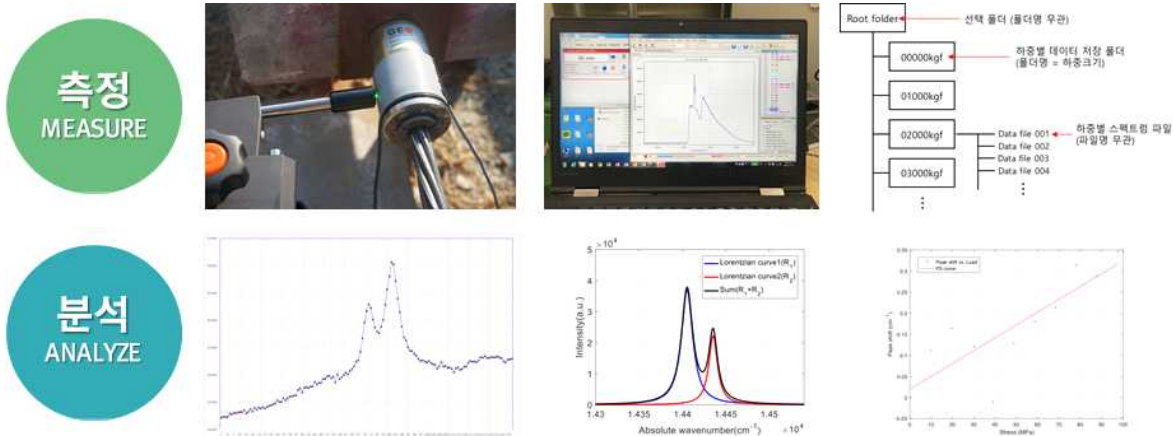
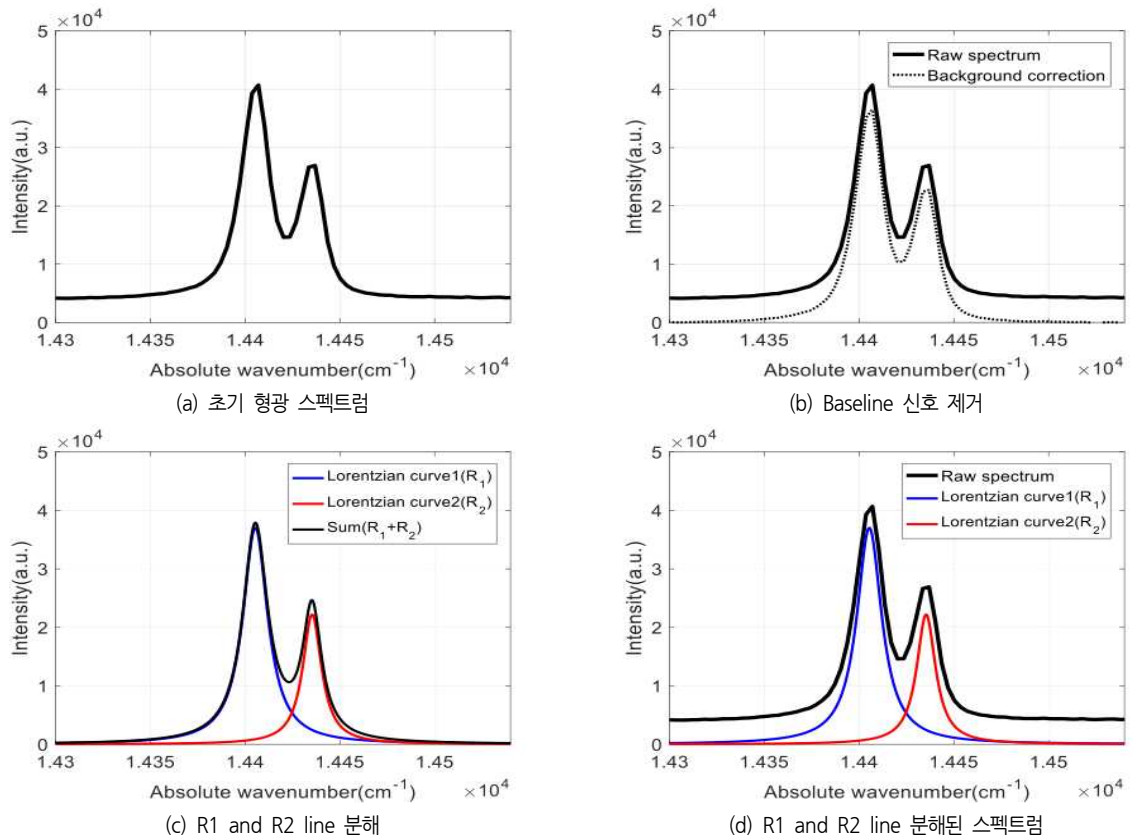
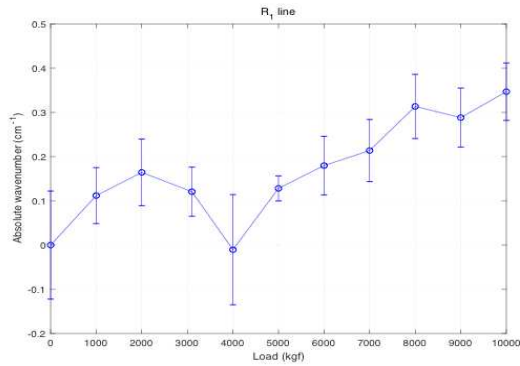


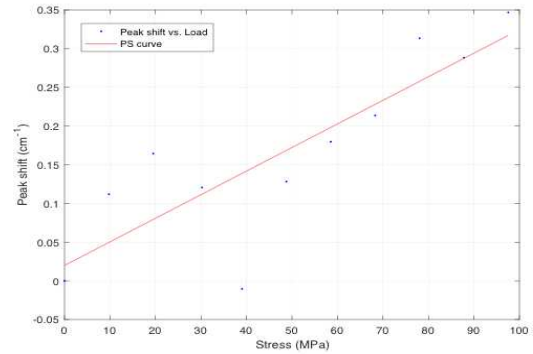
그림 78. 라만응력측정 분석 알고리즘

- 분석 프로세스 : 두 개의 Lorentzian curve를 이용하여 신호를 분해하고, 하중단계별로 얻어진 형광 스펙트럼을 분석하여 각각의 R1 line에 대한 침투값을 얻으며, 이를 선형화 하여 PS 계수를 얻는 과정





(e) 하중단계별 R1 line 침들값 연결



(f) PS 계수 산출 (기울기 값)

그림 79. PS 계수 산출 프로세스

- 라만분광기 측정데이터 변환 및 PS계수 도출 알고리즘 코딩화
- : Matlab 2017b 사용,
- : PS계수 및 응력변화그래프 출력, Lorentzian curve 정확도 값, PS curve R square 값



- Matlab 2017b 기준 PS계수 자동계산 코드
- BWSpec 기본 데이터 구조 (재하 하중별 폴더 저장 필요)
- 결과 출력물 : PS 계수 및 Stress vs Peak shift Graph

```
Curve fitting results.....
    sse: 0.0400
    rsquare: 0.7078
    dfe: 9
    adjrsquare: 0.6753
    rmse: 0.0667

PS coefficient.....
Linear model Poly1:
fitresult2(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.003048 (0.001571, 0.004525)
p2 = 0.01984 (-0.06547, 0.1052)

PS coefficient = 3.0484 cm⁻¹/GPa
```

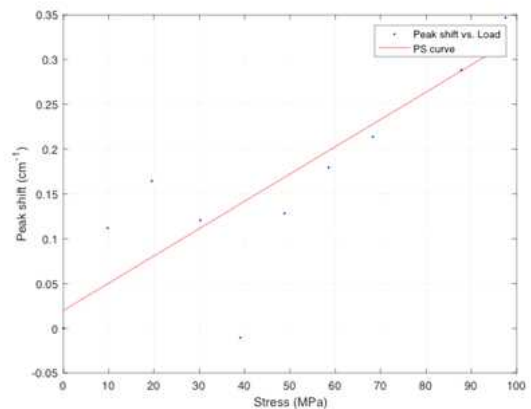


그림 80. Matlab 프로그램 코딩 및 결과출력

(2) 케이블 응력 측정 전용 프로그램 개발

○ 프로그램 설계 정의

- 히든 파라미터 (레이저소스 구동)

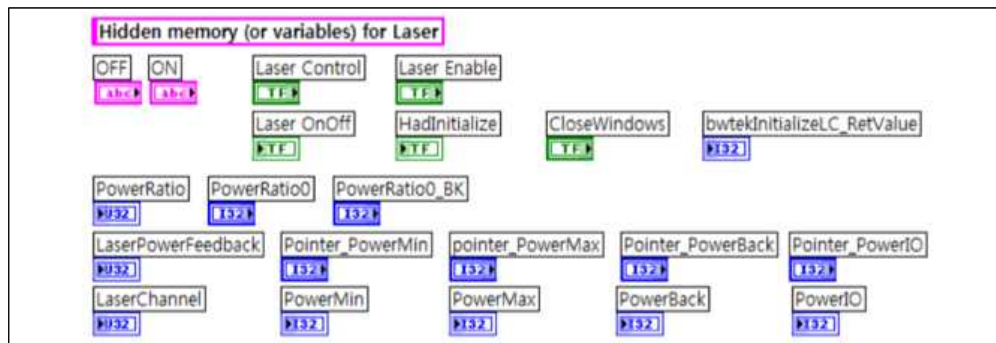


그림 81. 레이저소스 히든파라미터

- 히든 파라미터 (라만분광기 BTC112 및 BWS465-532H 구동)

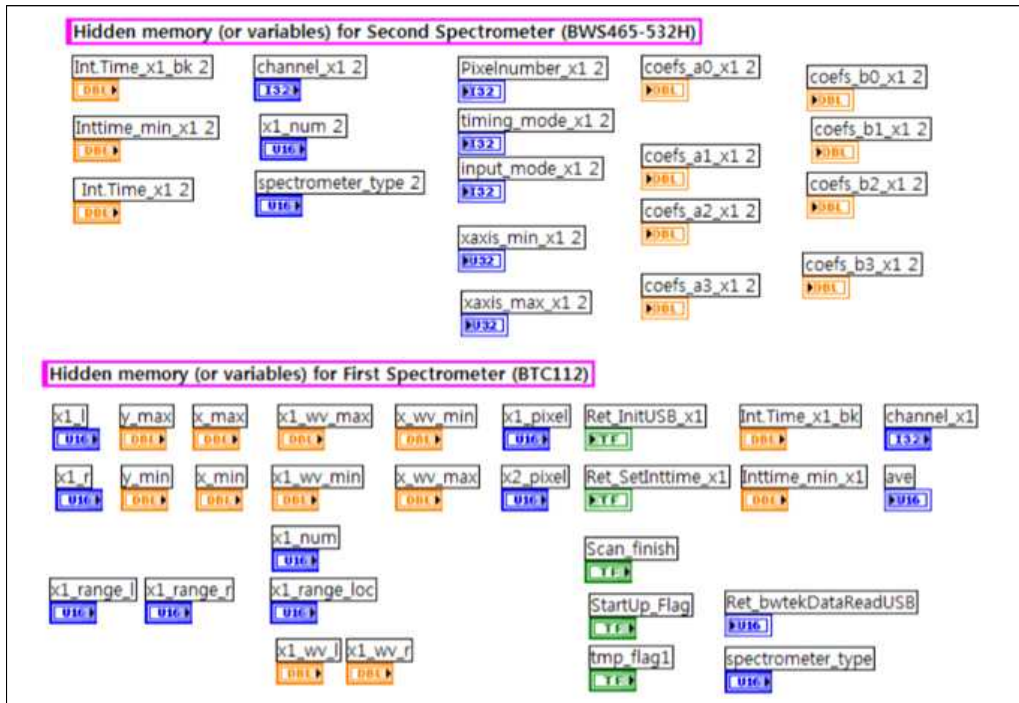


그림 83. 분광기 히든 파라미터

- 파라미터 초기값 설정

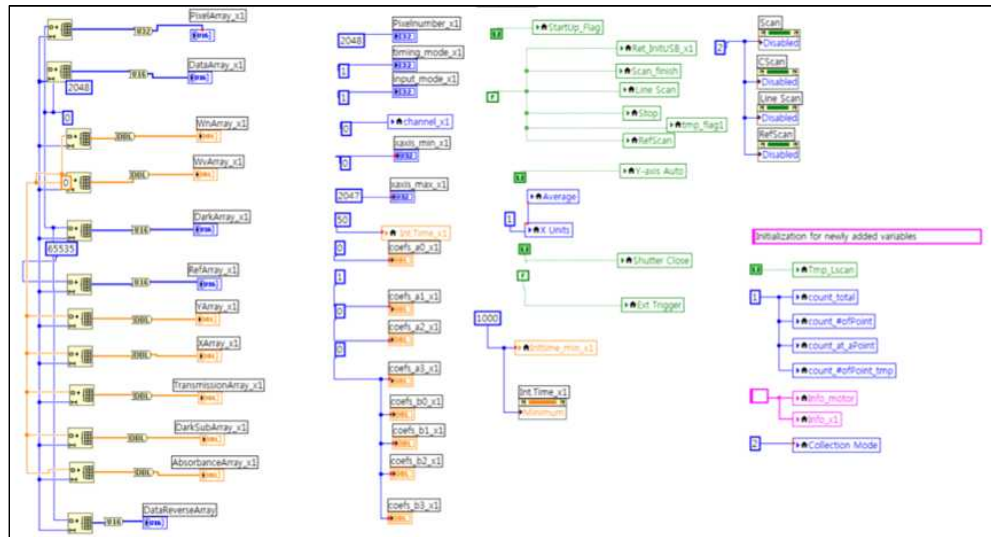


그림 85. 초기값

- 하드웨어 실행

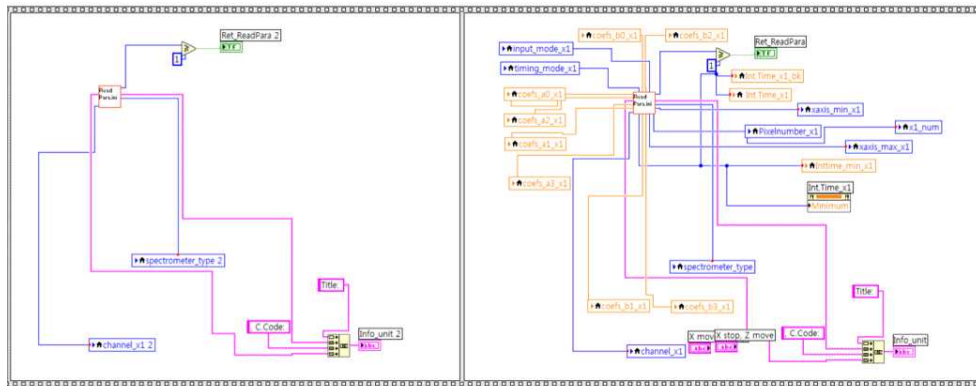


그림 86. 하드웨어 초기 구동

- 레이저 컨트롤 및 스펙트럼 계측/저장

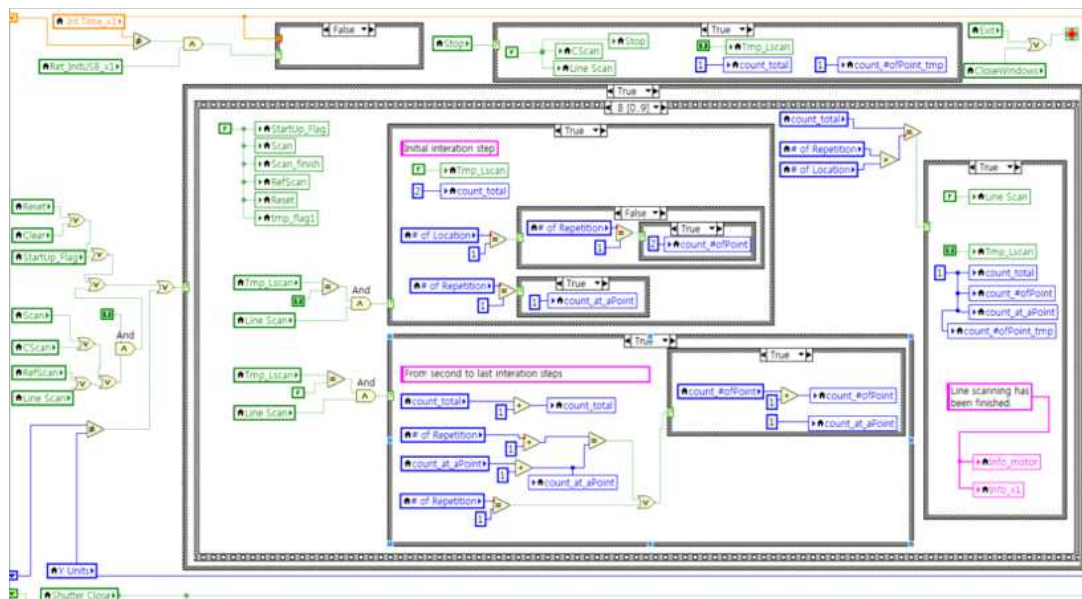


그림 87. 레이저 컨트롤

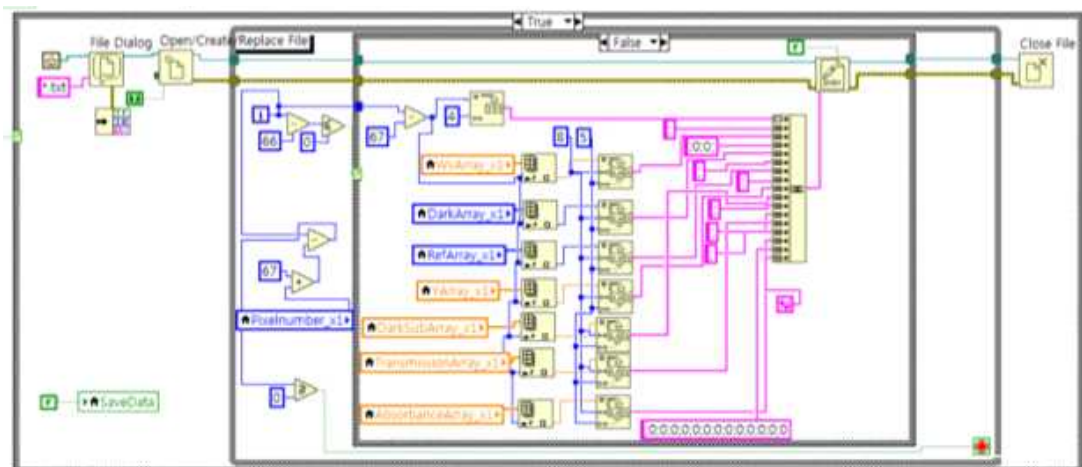


그림 88. 스펙트럼 계측 저장

- 모터스테이지 컨트롤 (3축+1축)

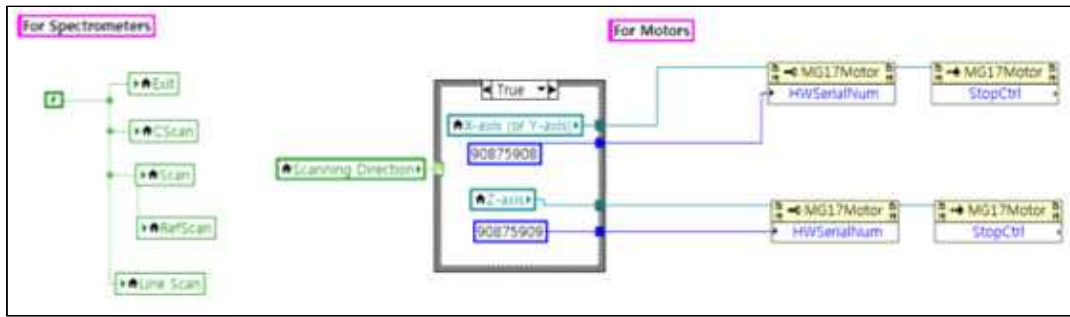


그림 89. 모터스테이지 컨트롤

○ 라만 실시간 케이블 응력측정 시스템 소프트웨어 개발

- NI사 Labview 이용 전용프로그램 개발
- 레이저 소스 컨트롤 기능 (레이저 온 시간 조절, 수광부 측정 시간조절)
- Motorized 리니어 스테이지 3차원 제어 기능 추가 (ThorLabs사 컨트롤 명령)
- 측정 데이터 자동 분석

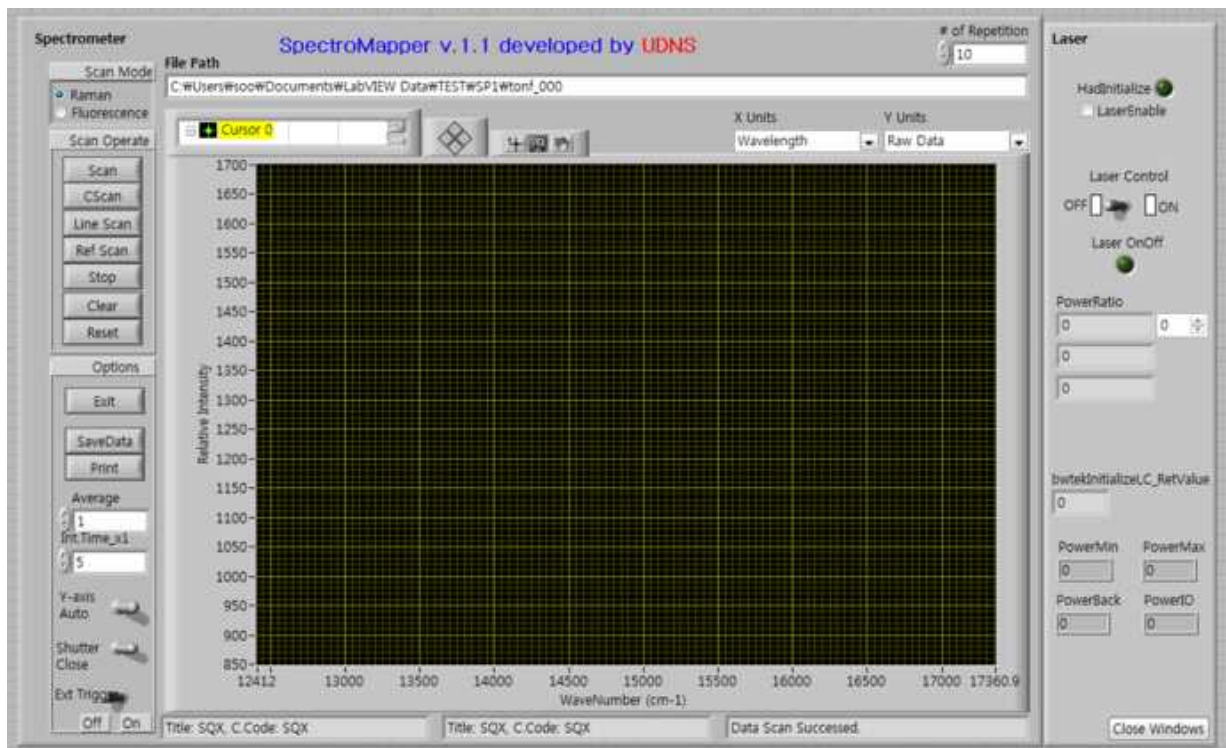


그림 90. 라만 실시간 케이블 응력측정 시스템 소프트웨어

- Scan mode: 계측 방법 설정 (Raman 또는 형광 분광법)
- Scan option: 측정 방법 설정 (단일 스캔, 연속 스캔, 다중 스캔 w/ 위치 이동 등)
- Options: 계측 파라미터 설정 (Integration 시간, averaging 등)
- File Path: 데이터 저장 위치 설정
- Laser control: 레이저 on/off 및 출력파워 설정

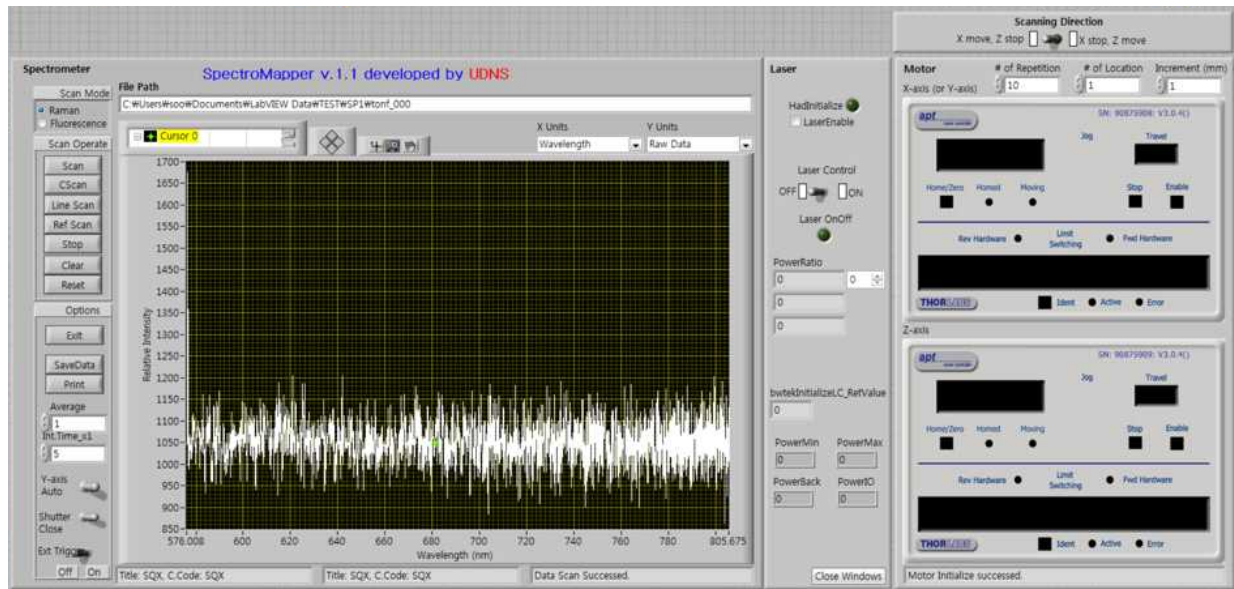


그림 91. 라만 실시간 케이블 응력측정 시스템 소프트웨어(모터제어기능 포함)

다. 실시간 계측시스템 DB (단위성과 3-3)

▶ [중빙 3-3] DB 설계 보고서 별첨

- 실시간 계측시스템 Data Sequence Diagram (LTE MtoM Modem 적용)
 - 프로토콜 코드 정의 완료 (별첨 보고서 세부내용 참조)

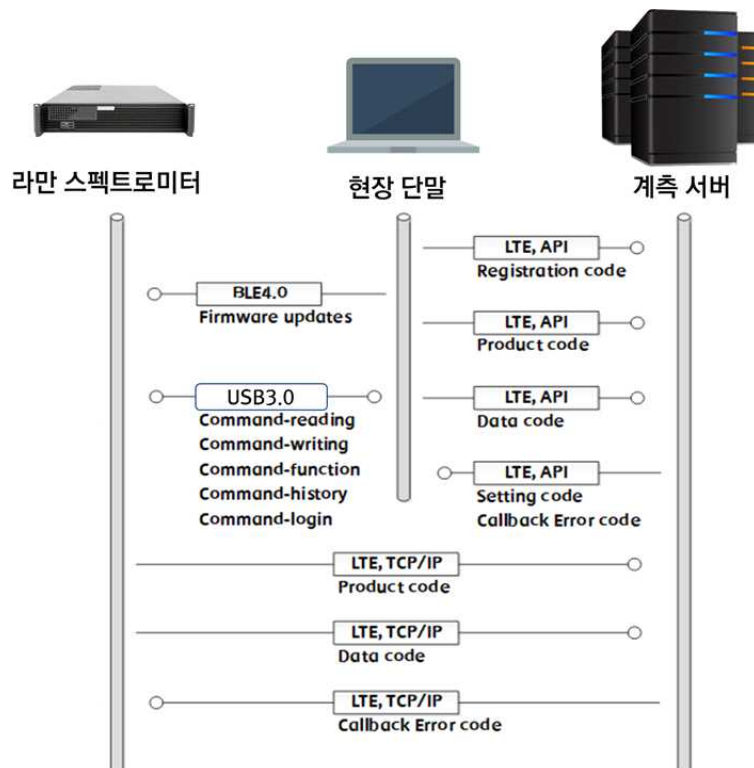


그림 92. 데이터 시퀀스 다이어그램

○ 데이터 서버 연계 방법

- 라만시스템에서 측정된 정보 (응력, 위치 등)의 정보는 모델을 이용하여 서버 또는 AWS의 아미들웨어로 통신, 암호화 형식은 미정, 포맷은 json 타입으로 송신
- 서버에서는 관계형 DB인 PostgreSQL로 변환하고 백그라운드 소프트웨어를 구동시켜 상태 판정 및 결과 데이터를 웹 플랫폼 형태로 고객 제공

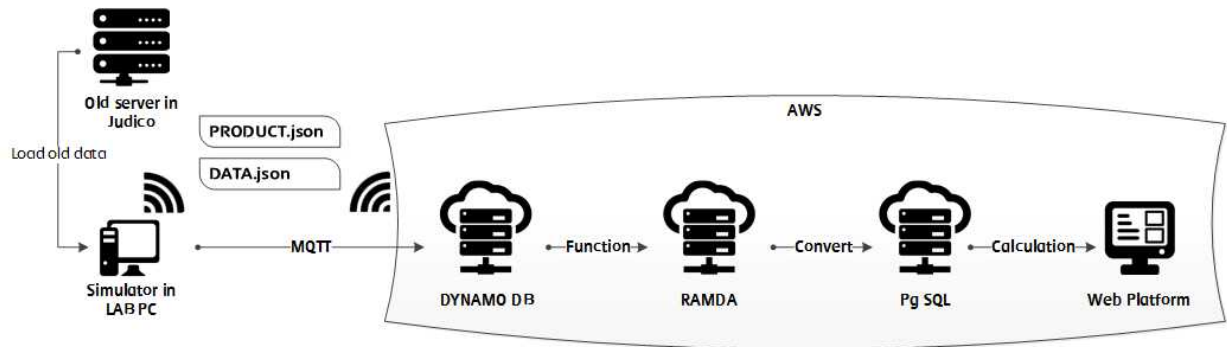


그림 93. 관제시스템 연계방법

○ 라만 실시간 계측시스템 데이터베이스 Entity Relation Diagram (프로젝트 정보 설정)

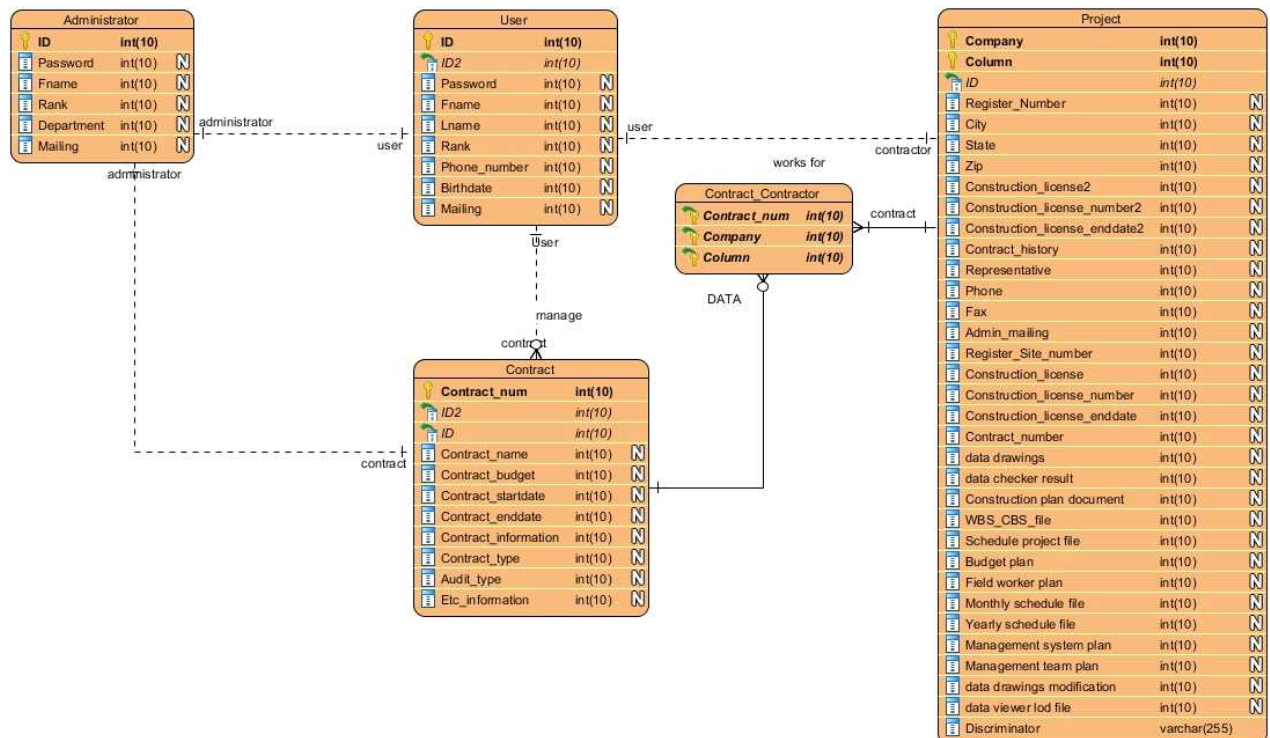
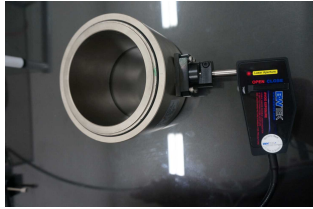


그림 94. ERD

○ 데이터 기초등록 정보

- 설치 센서 기초데이터 및 측정 파라미터 DB등록

기초 등록 정보				
구분		항목	계측 용역 A	계측 용역 B
센서 기초 등록 정보	사업	사업명	울산대교	거제교
		소속	현대건설	현대엔지니어링
	센서	사진		
		센서ID	RamnSS-1235	RamnSS-1331
		제조사	유디엔에스	유디엔에스
		모델명	Raman Stress Sensor	Raman Stress Sensor
		하중 구조	압축인장	1축 압축
		설치 위치	앵커헤드	교량받침
		초기 응력	18.5톤	18.5톤
		최대 허용응력	100톤	100톤
	담당자	이름	정영우	정영1우
		연락처	010-7484-0492	010-7484-0492
	관리자	이름	-	-
		연락처	010-5369-4357	-
	제품	시리얼번호	2016_03_21_0001 /G3-170307-00001	2016_03_21_0002
		모뎀번호	010-8894-8133 /012-2473-3020	012-1234-1234
		설치일자	2017-03-08	-
		AS일자	-	-
		AS내용	-	-
		CAL일자	2017-03-08	-
조건 기초 등록 정보	상하차	응력 관리치 임계값	40 톤	45 톤
	측정	측정주기	6분	6분
		분석주기	30분	30분
		백업주기	3일	3일
	위험	관리기준치	35톤	40톤
		위험기준	80톤	85톤

○ 실시간 계측시스템 AWS 구성용 미들웨어 개발 (Python, django)

- 실제 건설현장에서 안전관리를 위해 계측시스템을 도입하는 경우, 모니터링을 위해서 데이터 통신시스템을 구성하는 방법은 크게 두가지로 구분됨
 - ① 현장계측사무실에서 TCP/IP 인터넷라인이 안정적으로 구축되어 있는 경우 : Lan 연결 데이터 전송
 - ② 인터넷 설치가 어렵거나 장기간 계측이 아닌 경우 : MtoM Modem 이용한 데이터 전송
- MtoM Modem을 사용할 경우, 기본적으로는 TCP/IP로 구성된 SW를 동일하게 사용하며, 모뎀의 통신 간격 또는 통신이 안될 경우 에러 처리 방안들이 좀더 추가적으로 고려될 필요가 있음.

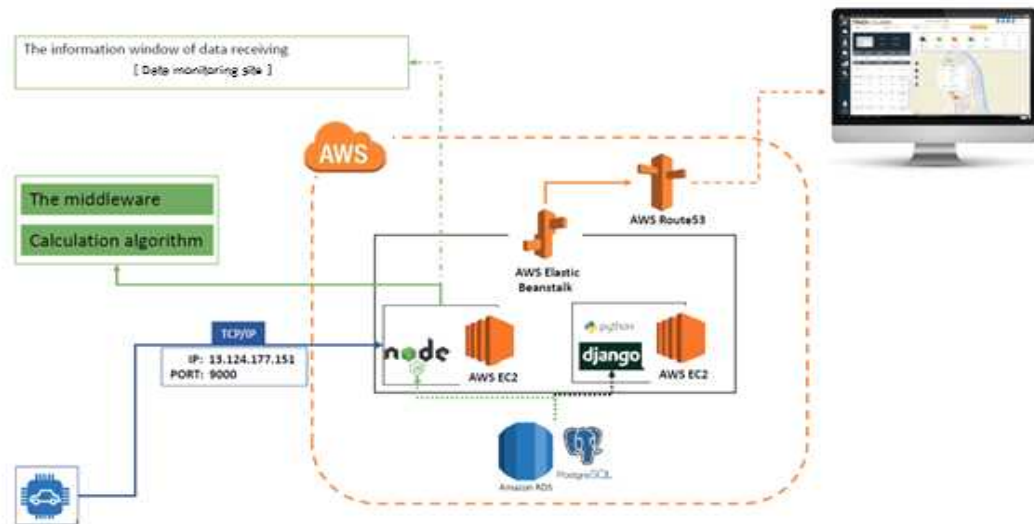


그림 95. ,미들웨어 구성

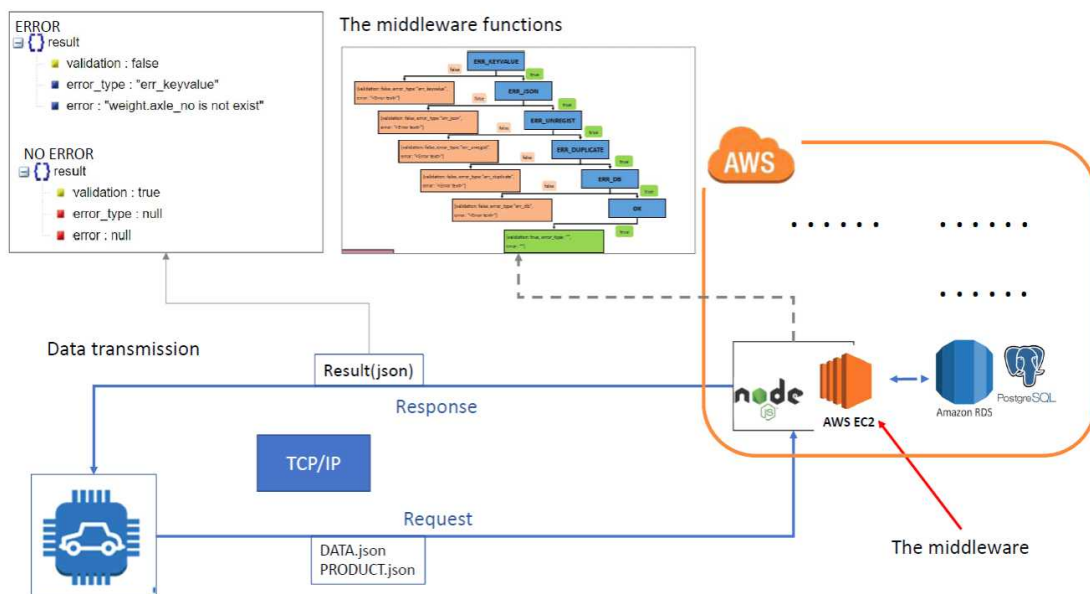


그림 96. 미들웨어 구성도

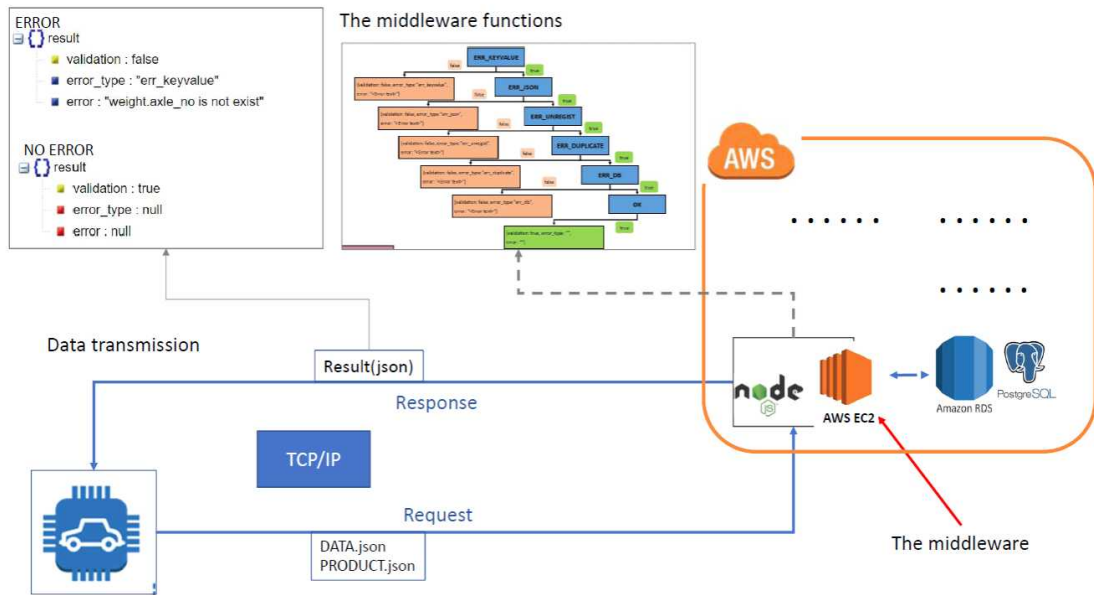


그림 97. 미들웨어 구성도

- 미들웨어 에러코드 설계 : Checksum, Time, value error

Error code	Comments
ok	no error
err_login	If an error occurs while logging in
err_db	If an error occurred while saving to database
err_json	If an error occurs in the json format
err_checksum	If an error occurs in checksum of data
err_unregist	If the received data is not the serial and modem number registered in the basic registration
err_keyvalue	If data of important key value is missing from received data
err_duplicate	If data with the same serial and date time values are received in duplicate
err_time	If data (past or future) that is more than one day's difference from the current time is received
err_range	If the data value exceeds the allowable range or has a different plus or minus sign
err_digit	If an error occurs in the number of digits of the received data value

packet	checksum
105, 220, 5, 30, 21, 110	91
bytes sum to 491	

Data Item In Binary	Checksum Value	Data Item In Binary	Checksum Value
0001	1	0011	3
0010	2	0000	0
0011	3	0001	1
0001	1	0011	3
totals	7		7

그림 98. 미들웨어 에러코드

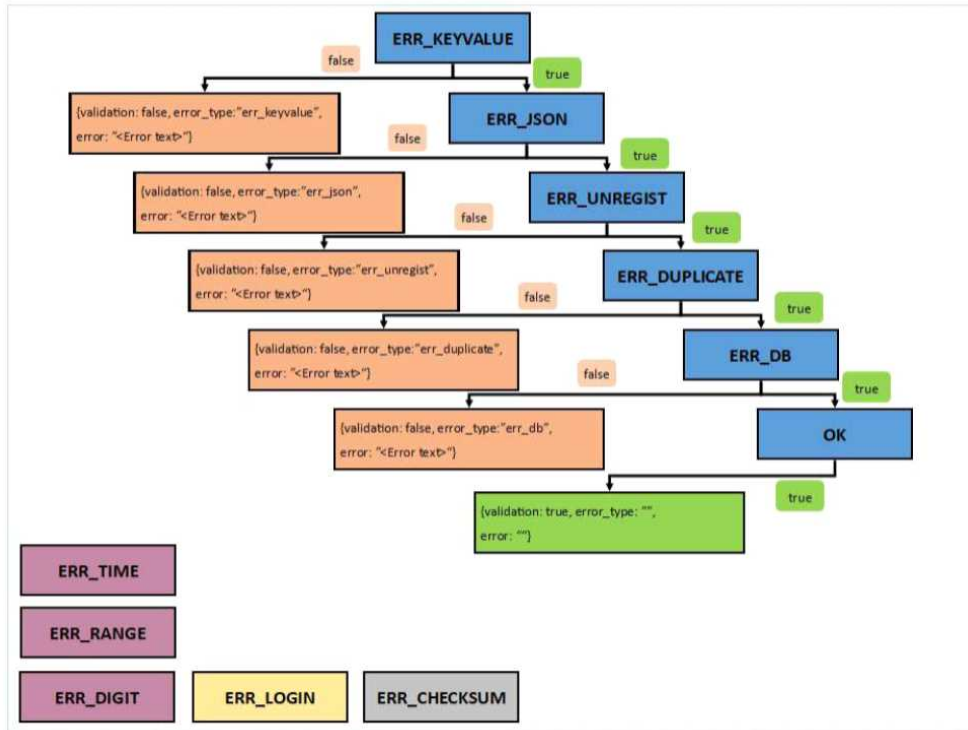


그림 99. 미들웨어 에러코드 알고리즘

○ 실시간 계측시스템 웹페이지 화면 구성

- 메인페이지 : 센서 관리 대시보드 (관리정보, 프로젝트 정보 등 대시보드형태 표출)

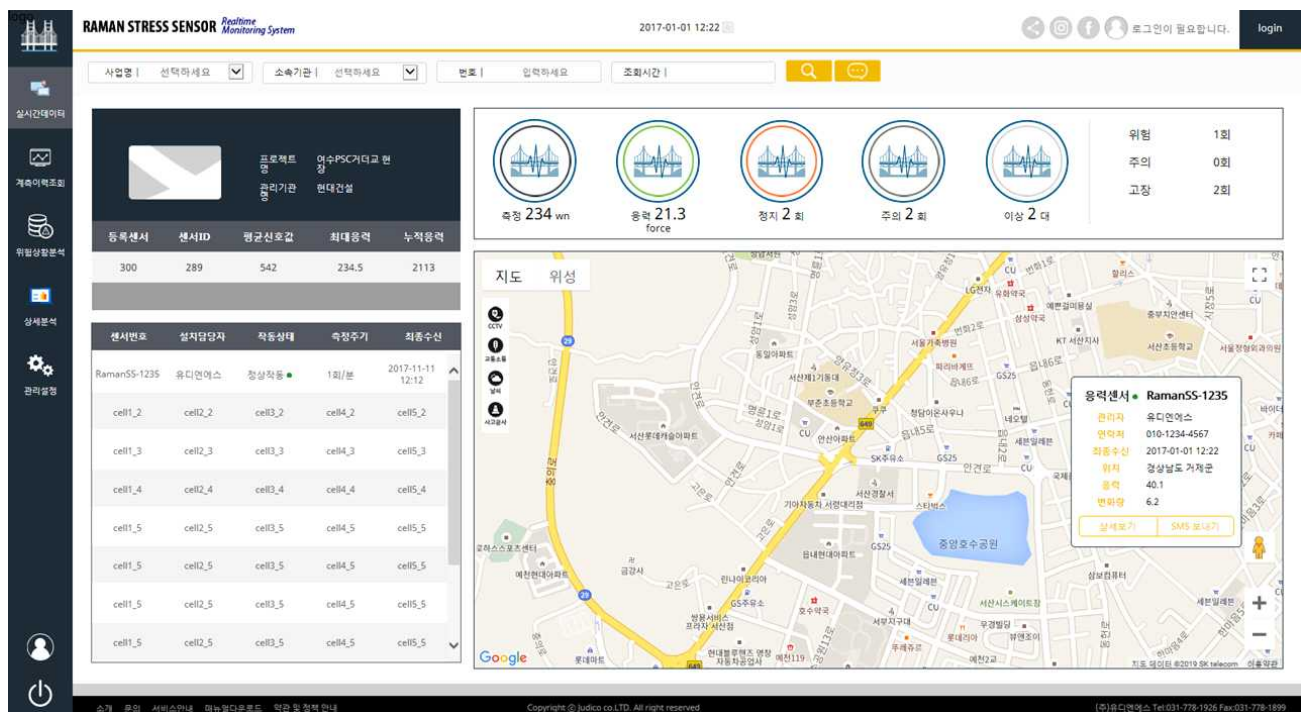


그림 100. 실시간 계측시스템 메인

- 계측이력조회페이지 : 센서데이터베이스 조회 분석 (관리기준 분석, 그래프)

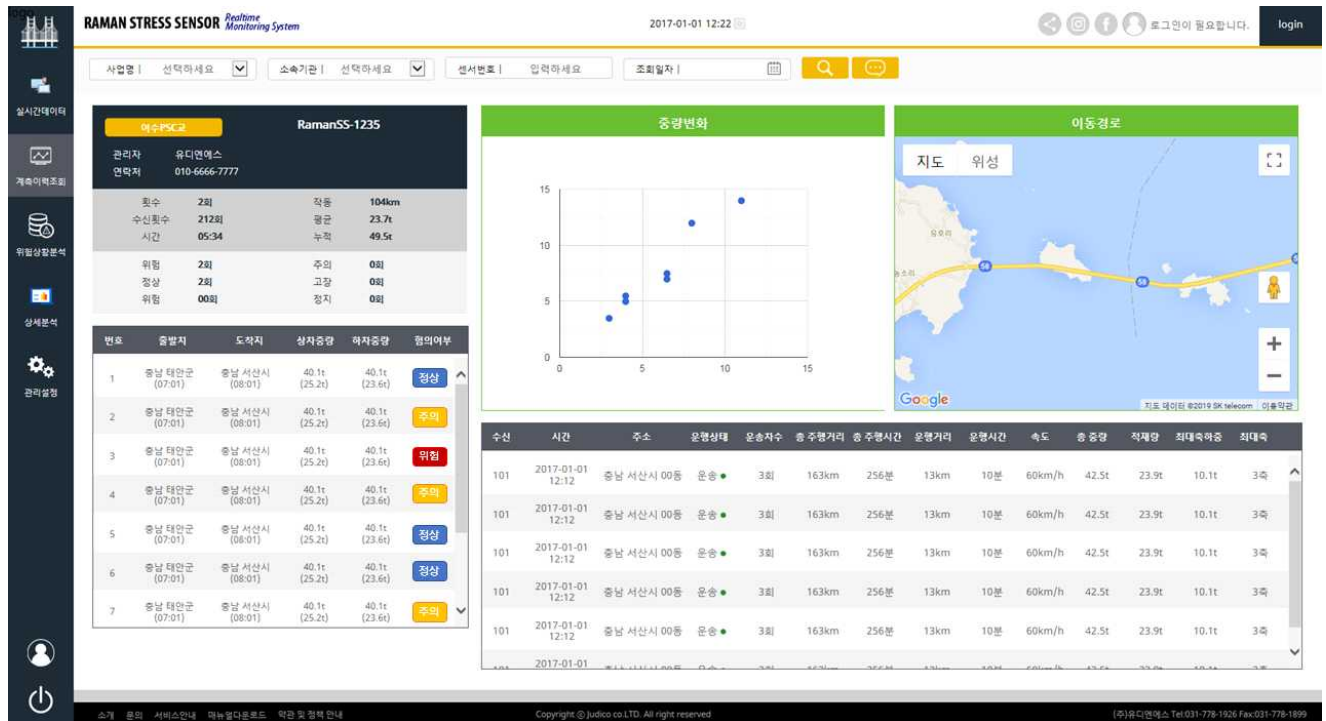


그림 101. 계측이력조회페이지

4. CTE4 : 현장적용기술개발

가. Hand-Held 시스템 개발 (단위성과 4-1)

▶ [증빙 4-1] 시스템 시제품 자료 별첨

○ 단기계측용 Hand-held 시스템 구성

- 라만 형광분광시스템 + Optical Switch + 노트북(전용소프트웨어 탑재)
- SKB Injection-Molded 2 RU Studio Flyer Rack Case
 - : 방수, 방진 이동형 케이스
 - : 2 RU Studio Rack and Laptop Combo Case

Material	Injection-molded shell
Rack Unit Space	2
Rack Depth Rail to Rail	11.46" (29.11 cm)
Carrying/Transport Options	Quiet-glide wheels and pull handle
Exterior Dimensions (H × W × D)	9.5 x 14.0 x 22.3" (24.1 x 35.6 x 56.6 cm)
Weight	15.2 lb (6.9 kg)



그림 102. 단기계측용 Hand-held 시스템

나. 상시모니터링 서버시스템 개발 (단위성과 4-2)

▶ [증빙 4-2] 시스템 시제품 자료 별첨

○ 장기계측용 현장 서버시스템 구성

- 라만 형광분광시스템 + Optical Switch + 1U Rack Mount PC + 1U 17" LCD 모니터와 Keyboard, 마우스 일체형 Rackmount Server Console Control Rack)
- SKB 4U Roto Rolling Rack Case
: 방수, 방진 이동형 4U 케이스 (Low-Profile Carry Handles)

Rack Space	4 RU
Material	Steel rails, Rubber gasket
Type of Closure	Butterfly latches
Interior Dimensions	W x H: 19 x 7" / 48.3 x 17.8 cm Depth (Rail to Rail): 17.8" / 45.1 cm Depth (Front Rail to Back Lid): 20.5" / 52.1 cm Lid Depth: 1.5" / 3.8 cm
Exterior Dimensions (H × W × D)	11.5 x 22.5 x 26.5" / 29.2 x 57.2 x 67.3 cm
Shock Absorbent	No
Rails	Threaded
Carrying/Transport Options	One-touch pull handle Side-mounted carry handles Rolling wheels
Weight	23 lb / 10.4 kg



그림 103. 장기계측용 현장 서버시스템

다. 케이블지지교량 설계 적용 방안 (단위성과 4-3)

▶ [중빙 4-3] 설계서 별첨

○ 케이블지지교량용 압축 로드셀형 비접촉응력센서 설계

- 케이블 정착부 장착 가능한 압축로드셀 형태의 라만 비접촉 응력센서 기구부 설계 완료
- 시공전, 시공중, 공용중 등 생애전주기 필요한 상황에서 프로브 연결을 통해서 응력변화량 측정 가능
- 상시 계측 모니터링 구축시, 라만시스템과 멀티채널 프로브 연결하여 데이터 계측 진행

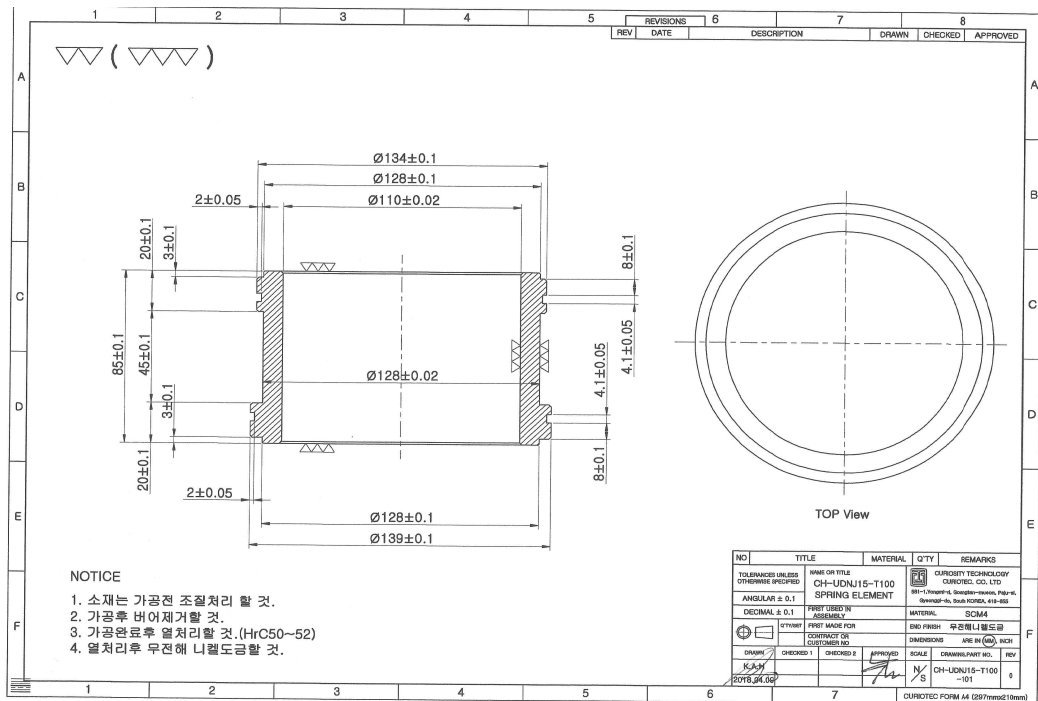


그림 104. 압축 로드셀형 비접촉응력센서 설계

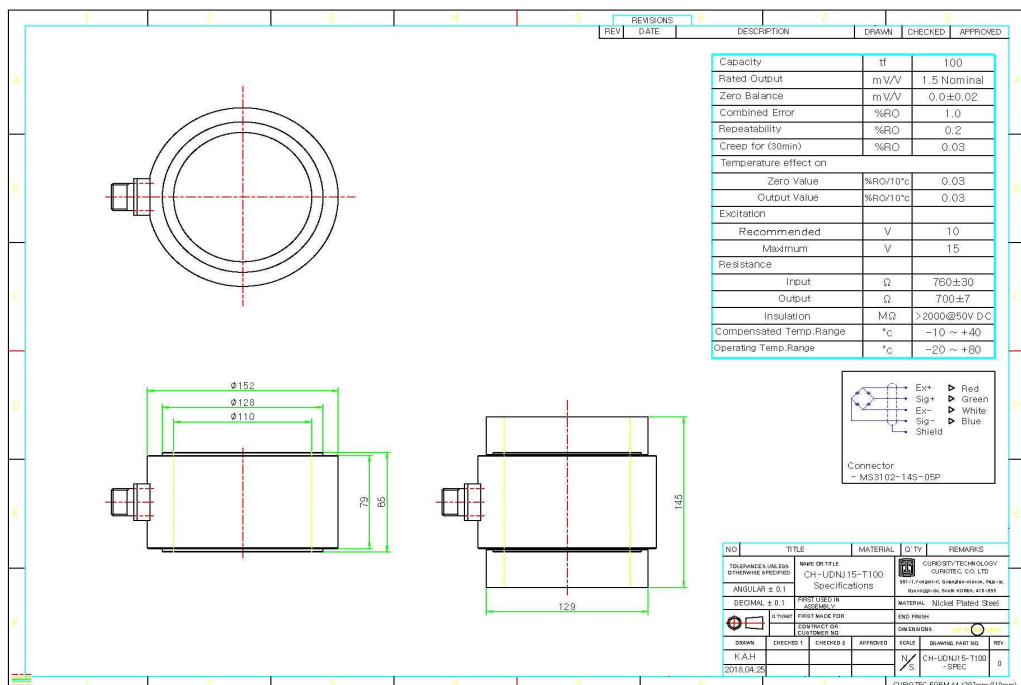


그림 105. 압축 로드셀형 비접촉응력센서 설계

○ 압축로드셀 형태의 라만산란물질 코팅 및 프로브 고정부 설계

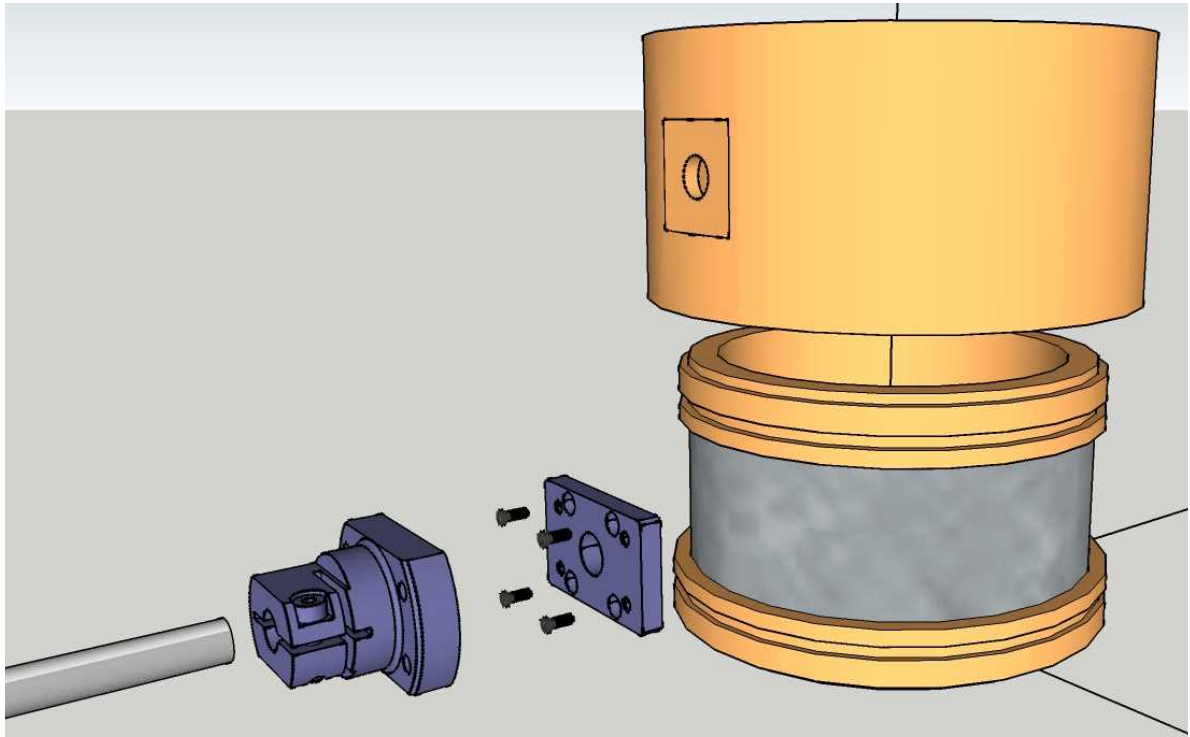


그림 106. 압축 로드셀형 비접촉응력센서 구성도

○ 케이블교량용 라만 비접촉 응력센서

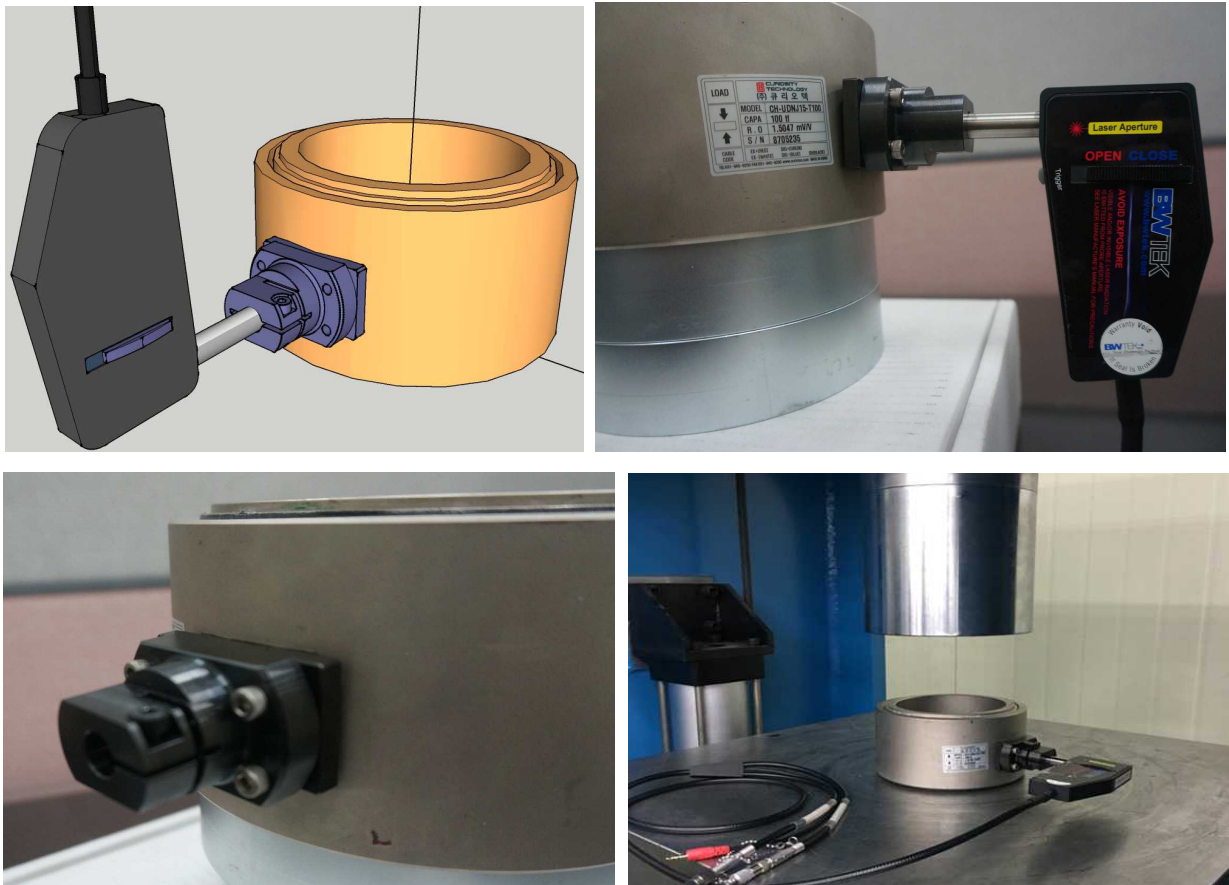


그림 107. 압축로드셀형 비접촉응력센서 및 실험전경

라. 현작적용시험결과 (단위성과 4-4)

▶ [중빙 4-4] 논문 별첨

○ PSC Box 거더교량 25m 실험형 시험체의 제작

- 설계도서 및 구조해석서 별첨

설 계 조 건

1.1 거더 형식 : PSC Box 거더

1.2 경 간 : 1 @ mm = mm

1.3 교량 등급 : DB-24(1등급)

1.4 거더 길이 : 25,000 mm

1.5 단위 중량 : 콘크리트(철근) $2,500 \text{ kgf/m}^3 = 25.0 \text{ KN/m}^3$

콘크리트(무근) $2,350 \text{ kgf/m}^3 = 23.5 \text{ KN/m}^3$

- 포스트텐션 긴장재 배치를 위한 쉬스 규격

구 분	단 위	1차 긴장용
쉬스과의 외경	mm	64
수용가능 면적비	%	4.636
적용한 강선개수	EA	5
쉬스관의 두께	mm	4
쉬스관의 개수	EA	4
파상 마찰 계수 K	K/m	0.005
곡률 마찰 계수 μ	m/rad	0.25

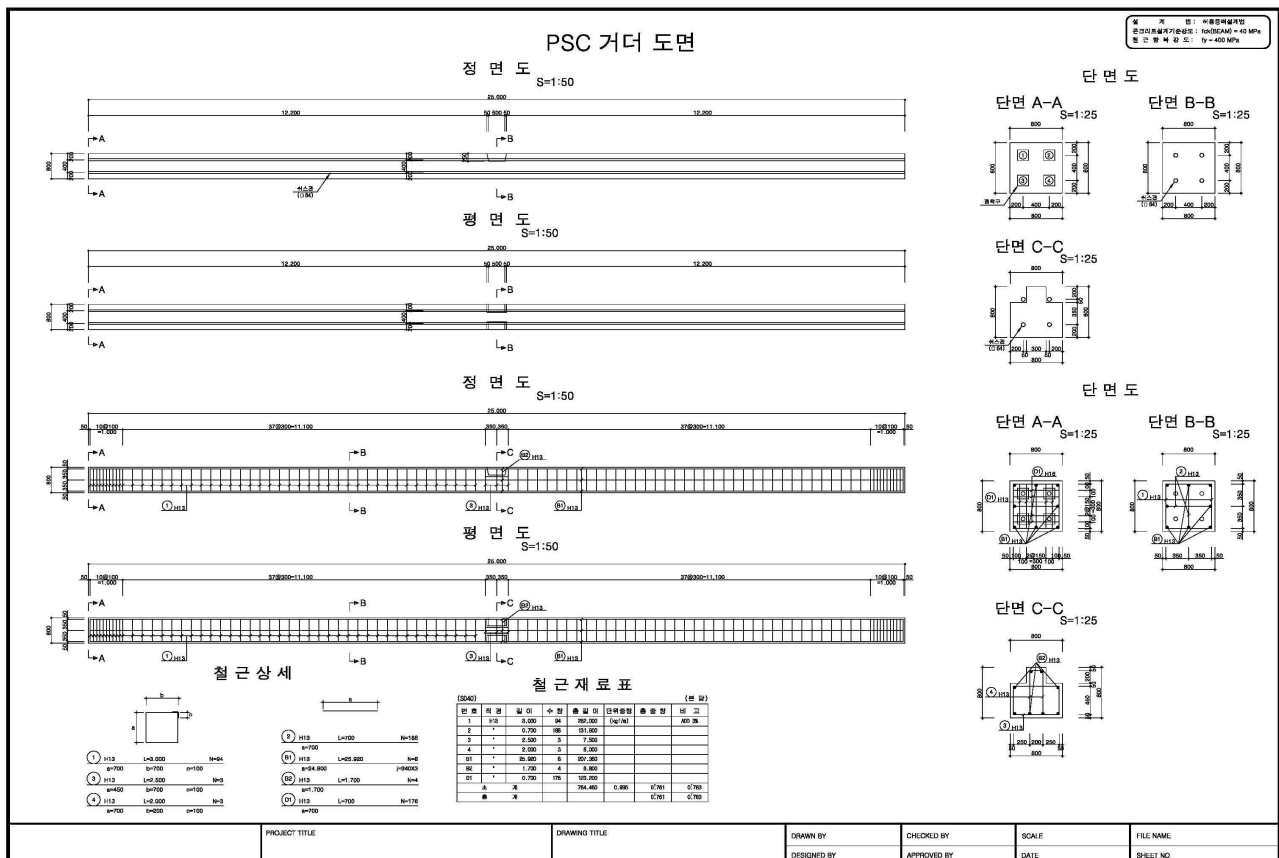


그림 108. PSC 박스 거더교 25m 실험형 시험체 도면



(a) 철근 조립



(b) 스위관 인입부



(c) 거푸집 조립 및 타설



(d) 1차 타설완료



(e) 2차 타설후 컷아웃부



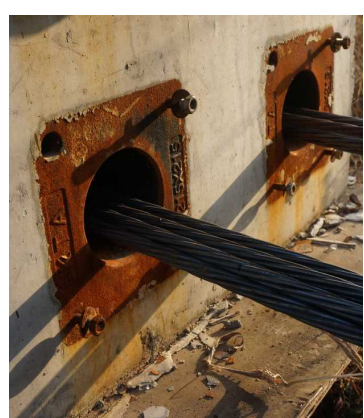
(f) 거푸집 탈형



(g) 시험체



(h) 스위관 입구



(i) 인장케이블

그림 109. PSC 박스 거더교 25m 실대형 시험체 제작 과정

- 중앙부 컷아웃 설계 : 인장케이블 변형율계 부착하여 비교 계측 실시



그림 110. PSC 박스교 25m 실대형 시험체 전경

○ PSC Box 거더교량 25m 실대형 시험체 현장시험

- 4개의 인장케이블 가력 가능
- 대각선으로 엇갈려서 인장 실시 (최대 70톤)
- 멀티스트랜드 앵커헤드 코팅시편 4개, 압축로드셀형 센서 시편 2개 적용
- 100톤 압축로드셀 실시간 측정하여 비교분석 실시
- Ni compaq DAQ 9178 chassis + Ni 9219 사용 전기식 로드셀 데이터 측정



그림 111. PSC 박스교 25m 실대형 시험체 시험 구성 전경



그림 112. 압축로드셀형 응력센서(중간)와 앵커헤드 응력센서 (우측끝)



그림 113. 실험에 사용된 형광 분광 시스템 (좌측부터 컴퓨터, 형광분광기, 레이저, 광분배기)



그림 114. 실험에 사용된 장력기



그림 115. 장력기 세팅

○ 응력측정용 물질로 코팅된 멀티스트랜드 앵커헤드 코팅시편 시험 결과

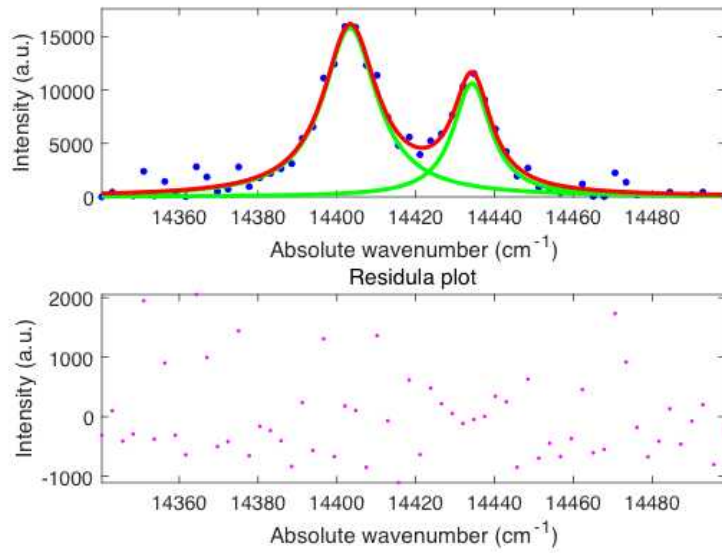
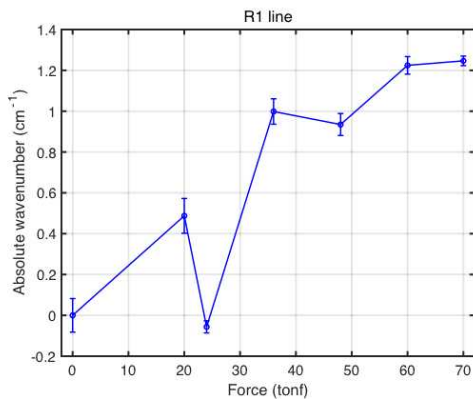
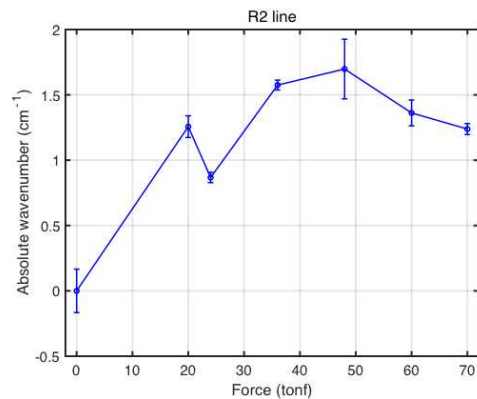


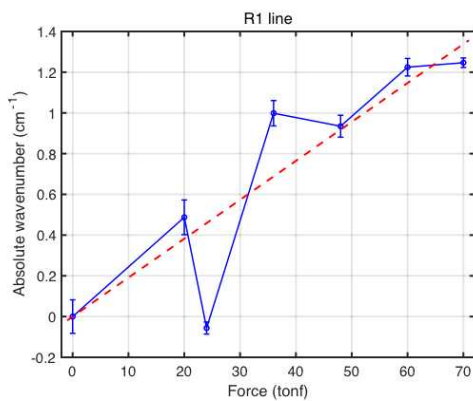
그림 116. 세밀한 파수변화 확인을 위한 Curve Fitting 과정 (70 tonf)



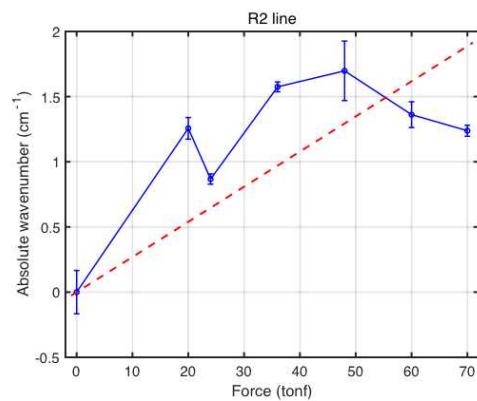
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
($R^2:0.7877$)



(d) Raw data and linear fitting of R2 line
($R^2:0.1892$)

그림 117. 응력측정용 물질로 코팅된 로드셀 몸체에 대한 실험결과

○ 압축로드셀형 센서 시편 시험 결과

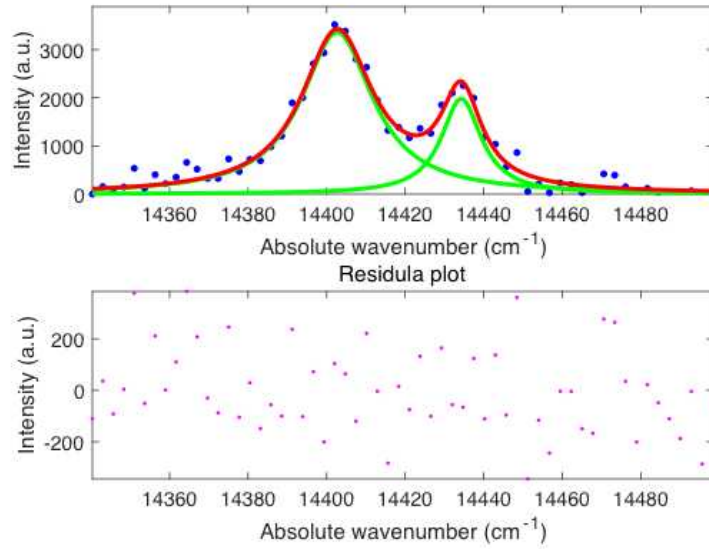
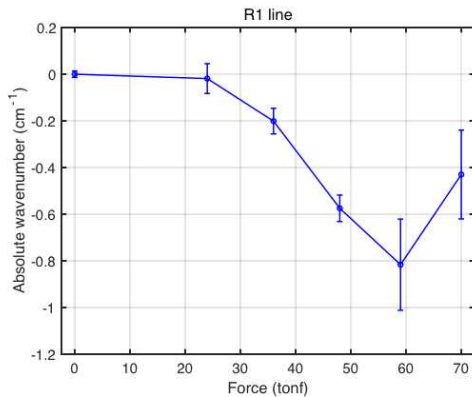
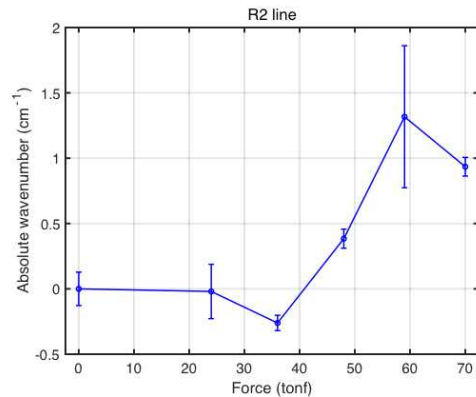


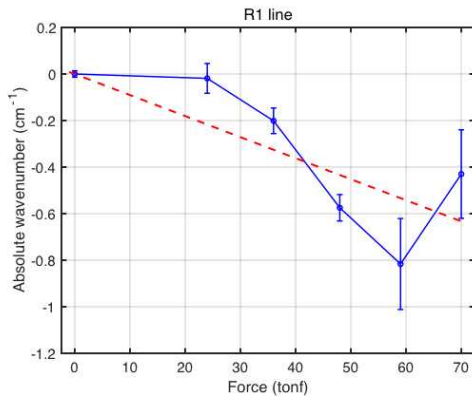
그림 118. 세밀한 파수변화 확인을 위한 Curve Fitting 과정 (70 tonf)



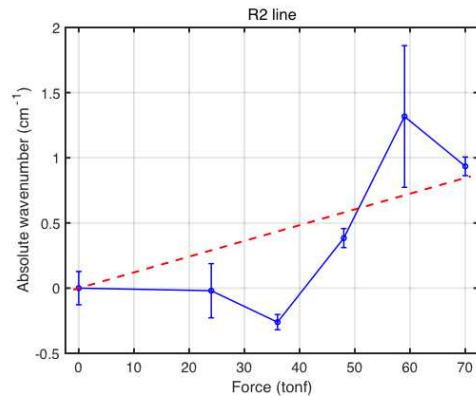
(a) R1 line (Raw data)



(b) R2 line (Raw data)



(c) Raw data and linear fitting of R1 line
($R^2:0.6294$)



(d) Raw data and linear fitting of R2 line
($R^2:0.4780$)

그림 119. 응력측정용 물질로 코팅된 로드셀 몸체에 대한 실험결과

○ 현장적용시험 결과, 멀티스트랜드 앵커헤드 센서 시편과 압축로드셀형 센서 시편 모두 실내테스트에 비해 경향성이 좋지 않게 나타났음. 압축로드셀형 센서의 하우징 및 프로브 고정홀더의 설계 제작 전에 진행한 시험이기 때문에 측정위치 및 현장 여건 등에 따라 오차요인이 많았던 것으로 판단됨.

- 시험종료 후, 시험체 파괴 및 폐기물 처리 완료: 시험체 파괴시 인장케이블 절단시 앵커헤드부가 튕겨 나가기 때문에 안전사고 예방을 위해 계측을 실시하지 않음



(a) 중앙부 파괴



(b) 중앙부 파괴



(c) 인장케이블 절단



(d) 종단 앵커헤드 부



(e) 인장케이블 절단 및 센서 시편 회수



(h) 시험체 완전 철거

그림 120. PSC 박스 거더교 25m 실대형 시험체 철거 과정

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준				
					질적 성과지표	목표치	달성치 (측정방법)		
주관	1	Passive 센서 제작 기술	1-1	박막증착 기술 연구	①	증착공법 메뉴얼	1권	1권	매뉴얼 1건
			1-2	박막 소재 최적 조합 연구	①	박막소재 조합별 연구보고서	1권	1권	보고서 1건
			1-3	박막증착 Passive Sensor 최종시편	①	응력측정 분해능	±5%	±5%	시험성적서 1건
	2	라만파장이동과 응력의 관계 규명	2-1	PS계수 도출	①	PS 계수 알고리즘 보고서	1권	1권	보고서 1건
			2-2	박막재료별 두께별 PS계수 분석	①	분석 보고서1,2차	2권	2권	보고서 2건
			2-3	라만피크이동과 응력 간의 관계 관련 논문	①	국내논문	1건	1건	1건
	3	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광 시스템 개발	3-1	케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템	①	시스템 구성	1	1	시스템 구성여부 특허출원 1건
					②	멀티 채널수	8	12	시스템 측정 채널 확인
					③	오차	5%이내	5%이내	시험성적서 1건
			3-2	케이블 응력 측정 전용 프로그램	①	전용 프로그램	1	2	소프트웨어 등록 2건
			3-3	실시간 계측시스템 DB	①	DB설계 보고서	1권	1권	보고서 1건
	4	현장적용기술개발	4-1	Hand-held 시스템	①	시스템 구성	1	1	시스템 구성여부
			4-2	상시모니터링 서버시스템	①	시스템 구성	1	1	시스템 구성여부
			4-3	케이블지지교량 설계 적용 방안	①	적용안 설계서	1권	1권	설계서 1건
			4-4	현장적용시험 결과 관련 논문	①	국내논문	1건	1건	1건

■ 본 과제 주요달성 목표인 ‘Passive 센서 제작 기술’에 대한 구체적인 성과결과는 다음과 같다.

- 라만분광법을 이용한 강재응력측정기술의 핵심요소로서 라만산란물질의 코팅방법 및 소재별, 두께별 시험연구를 진행하여, 플라즈마 용사 코팅방식의 센서 제작기술을 확보함.
- 앵커헤드부 코팅시편과 로드셀 형태의 시편 등을 제작하여 실내시험 및 축소모형 시험체 시험 등을 실시하여 다양한 결과를 분석

■ 본 과제 주요달성 목표인 ‘라만파장이동과 응력의 관계 규명’에 대한 구체적인 성과결과는 다음과 같다.

- 앵커헤드부 코팅시편과 로드셀 형태의 시편 등을 제작하여 실내시험 및 축소모형 시험체 시험 등을 실시하여 다양한 결과를 분석
- 박막두께별, 코팅 소재간의 조합별 라만파장이동과 응력과의 관계를 실험을 통해서 분석하고 PS계수 도출 알고리즘을 확립함.

■ 본 과제 주요달성 목표인 ‘케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템 개발’에 대한 구체적인 성과결과는 다음과 같다.

- 라만분광법을 이용한 강재응력측정기술을 구현하기 위한 레이저 광원, 분광기, 필터, 프로브 등의 핵심 모듈들을 최적화 설계하여 제작함으로써 응력측정전용시스템을 구축 완료함
- 실험결과 분석 및 실시간 모니터링을 위한 전용프로그램 개발을 완료하여 소프트웨어 저작권 2건을 등록함.
- 개발완료한 케이블 응력측정 전용 라만/형광분광시스템은 축소모형 시험 및 실험형 PSC교 시험을 통해서 적용성을 검증함.
- 공인기관시험을 통해서 Passive 응력 센서 및 라만시스템의 측정분해능을 5% 이내로 확인함.

■ 본 과제 주요달성 목표인 ‘현장적용기술개발’에 대한 구체적인 성과결과는 다음과 같다.

- 다양한 현장상황에 대응하기 위한 단기계측용 Hand-held 시스템과 장기계측용 상시모니터링 서비스 시스템을 구축하여 적용기술개발을 완료함.
- 케이블교 계측에 적합한 Passive응력센서 구조 설계 및 개발을 완료함.
- 실험형 PSC교 시험을 통해서 현장적용성 등을 확인함.

2. 관련 분야 기여도

제5장 연구개발성과의 활용계획

1. 개발 기술의 활용방안

○ 후속연구에 활용

- 적용 대상 구조물에 따른 Passive 응력 센서의 부착방법, 현장 적용을 위한 시스템의 구성, 응력 측정 자동화를 위한 알고리즘 개발 등을 위한 기초연구로 활용.

○ 현장적용

- 다양한 강구조물의 응력 측정에 활용
- 본 연구를 통하여 개발될 응력 측정용 Passive 센서는 1)내구성이 좋고, 유지관리가 용이하여, 구조물 설계주기와 비교하여 장기간 사용할 수 있고, 2)케이블 및 외부전력을 필요로 하지 않는 장점이 있음. 따라서, 철도, 원전, 강교량, PSC 교량, 케이블 교량에 부착되어, 구조물의 설계주기 동안 지속적으로 활용될 수 있을 것으로 기대됨.
- 철도구조물 : 철도 표면에 Passive 응력센서를 부착하여, 주기적인 축력 확인이 가능할 것으로 기대됨.
- 원전 구조물 : 점검자의 접근이 어려운 원전 구조물 내부 시설물에 대한 응력 측정이 가능할 것으로 기대되며, 본 기술을 강선에 적용하기 위한 일부 추가적인 연구를 통하여, 원전 격납구조물 프리스트레스트 강선에 대한 긴장력 측정을 할 수 있을 것으로 기대됨.
- 강교량 : 응력이 집중될 것으로 예상되는 강교량 표면에 Passive 응력 센서를 부착하여, 주기적인 응력 검토가 가능할 것으로 기대됨.
- PSC 교량/케이블 교량 : 본 기술을 케이블에 적용하기 위한 일부 추가연구를 통하여, 프리스트레스트 교량/케이블 교량의 텐던/강선의 긴장력 측정을 할 수 있을 것으로 기대됨.



그림 127. 개발기술 활용방안

○ 현장적용 한계점 극복 방안

- 일반 PSC 교량의 양단 지점에 라만센서 시스템을 적용할 경우, 시공중 모니터링은 가능하나 시공후 앵커헤드 정착구를 모르타르로 마감하게 되면 상시모니터링이 어려운 한계가 있음.
- 압축로드셀형 비접촉식 라만응력센서를 보완하여, 지압판과 연결하여 탈착할 수 있는 앵커헤드 정착구 보호커버를 일체형 시스템으로 설계 개발.

○ 긴장재 작용 인장력 추정 방안 연구 활용

- 앵커헤드에 적용하는 라만센서로 측정한 응력은 실제로는 케이블 인장응력이라기 보다는 앵커헤드가

받는 압축응력임.

- 실제 현장에서 긴장재(인장케이블)의 인장력과 앵커헤드 응력을 비교하여 검증하는 과정이 필요.
- 계측전문기업 (주)에이티맥스와 기술이전실시계약을 체결하였으며, 테스트베드를 선정하여 추가적인 현장실험을 진행할 계획임.

○ 원격 장비와의 접목

- 원격 장비와의 접목을 통하여, 원전 구조물과 같이 관리자의 접근이 어려운 곳에서 응력을 측정할 수 있을 것으로 기대됨.

○ 미래 원전 기술 확보

- 원전 기술개발에 따른 산업재산권 확보.
- 토목 구조물의 장기적인 응력 측정에 대한 직접적인 점검 솔루션을 확보함으로써 구조물 응력 측정 시스템의 선진 기술 확보.

2. 기대효과

○ 기술적 측면

- 강구조물 응력 측정 핵심요소 기술개발에 따른 기술 선도.
- 내구성이 좋고, 장기간 사용이 가능하며, 유지관리가 용이한 응력 센서 개발을 통해 신뢰도 높은 응력 측정 가능.
- 케이블과 전력이 필요 없는 응력 계측센서의 개발을 통해, 주기적인 강구조물 응력 측정 및 유지관리 가능.

○ 사회·경제적 측면

- 계측기술의 확장으로 토목 구조물의 안정성 확보 및 인명피해 예방.
- 해외 계측 장비의 국산화에 따른 수입대체효과 발생.
- 장기적으로 동일한 응력 계측 센서 사용을 통하여, 유지관리비 예산 절감 .
- 토목 구조물의 수명증가 및 이에 따른 효율적인 유지관리비 집행에 따른 예산 절감 효과 발생.

○ 전략적 측면

- 토목 구조물 유지 보수 관련 전문 인력 양성에 기여.
- 계측 기술분야의 표준화 연계체계 구축 기틀마련.

3. 사업화 전략

- 국토교통부에서 제공하는 ‘도로 교량 및 터널 현황 조서(2016년)’을 분석해보면, 2010년 이후 건설된 교량 4,325교를 기준으로는 PSC 교량이 41.6%(1,800교), 강 교량이 17.2% (746교), RC교량이 16.9%(1,12교)로 PSC 교량이 가장 높은 비율을 차지하고 있음. 교량 연장길이 기준으로는 PSC 교량이 39.2%, 강 교량이 33.7%, RC 교량이 18.5%를 차지하고 있어 PSC 교량이 가장 높은 비율을 보임.

- 본 과제의 최종성과물은 1차적으로 PSC교량의 케이블 긴장력 측정을 타겟으로 개발을 진행하여 개발 진행과정 2차년도에서 우선적으로 중소규모 교량에 시범적용을 실시하여 효율성 및 장기 내구성을 검증

- 개발 완료 후, 추가적으로 테스트베드를 확산시켜 우수한 현장결과를 누적하여 향후 건설신기술 신청 준비를 진행할 예정임. 또한, 본 성과물을 국내 건설업계의 기술 집약 중점분야 중 하나인 장대교량(사장교 등)의 안전관리에 접목할 수 있도록 초장대교량 사업단과 협의를 진행하여 적용분야 확장을 도모함.

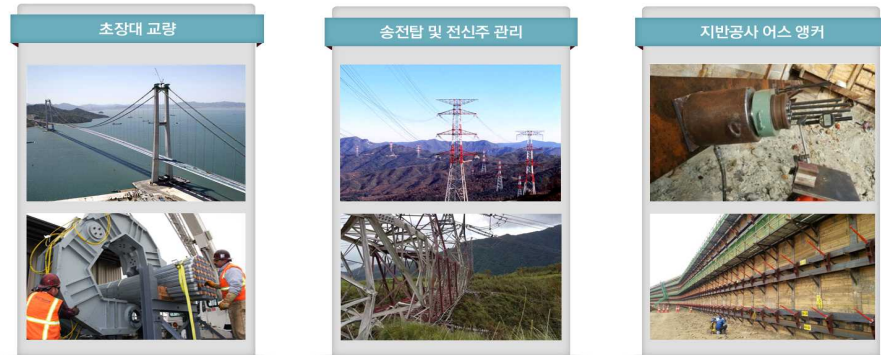


그림 128. 사업화 분야

- 앵커헤드에서 케이블 응력을 측정할 수 있는 기술이기 때문에, 지반공사에 사용하는 어스앵커의 응력 측정에도 적용 가능할 것으로 보임. 어스앵커공법(Earth-Anchor Method)은 흙막이벽에 구멍을 뚫어 철근이나 PC 강선을 집어넣은 다음, 모르타르를 그라우팅(Grouting)하여 채우고 뒷면에 앵커를 만들어 흙막이벽을 잡아매는 공법으로 타이백 앵커 공법(Tie-Back Anchor Method)이라고도 함. 버팀대 대신 흙막이벽을 어스드릴(Earth Drill)로 구멍 뚫은 뒤 그 속에 철근이나 PC 강선 등의 인장재를 넣고, 그 주위를 모르타르로 그라우팅하여 굳힌 다음 외부에서 PC강선이나 철근 등에 인장력을 가해 정착시키는 흙막이 공법임. 대한전문건설협회 2016년 통계를 보면, 토공사업 기성실적은 29788건, 11.7조원으로 PSC교량의 시장규모 2조원보다 약 5배 이상의 큰 시장규모를 가지고 있음.

구분	구체적인 내용
형태/규모	Passive 센서 앵커 헤드 제품 판매, 교량 제작 / 시공 / 공용 / 유지보수 각 단계별 응력측정 용역 수행
상용화 능력 및 자원 보유	앵커헤드 제작 업체 확보, 응력 측정 시스템 및 인력 보유
상용화 계획 및 일정	2차년도 중 테스트 베드 확보, 과제 종료후 1년 이내 상용화

- 사업화를 위한 라만 센서의 장기적인 성능 검증 필요함. 공인시험기관과 협의하여 라만코팅물질에 대한 표면경도 시험 및 내구성, 내환경시험을 진행하여 검증 진행. 외부환경 특히 자외선에 장기 노출될 경우, 라만특성 변화가 있을 수 있기 때문에 자외선 노출 환경 복합사이클링 시험을 기획하여 진행.

4. 사업화 모형 제시

가. 사업화 모형 수립(BM) 배경 : 참여기업으로 참여한 (주)에이티맥스의 과제 종료후 실시 계약 및 향후 사업화를 위한 모형을 수립하여 사업화 속도를 높이고, 상용화 가능 제품개발로 연구개발을 유도하기 위해 사업화 모형을 수립함

나. 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인: 사업화 모형의 1차 목표는 PSC교량을 대상으로 유지관리 업무를 편리하게 하기 위한 신뢰성을 갖춘 센서 시스템 공급이며, 핵심 경쟁요인은 현재 시장에 적용되고 있는 EM센서와의 성능 및 가격 비교로 볼 수 있음

다. 목표 시장 구조

(1) 경쟁 기업 현황 : 국내의 특수교량계측관련 경쟁기업은 이제이텍, 바이텍코리아, 에이솔루션 등의 업체가 있음.

(2) 시장 진입 장벽 : 현재 정부과제에 의해 개발이 진행된 EM 센서가 현장에 적용이 시작되고 있는 시점으로써 EM센서 개발에 관여된 기존 업계의 수익과 충돌이 생길 수 있는 상황임.

라. 수익 확보 전략

(1) 주요 고객군 : 현재 에이티맥스에서 수주하고 계측을 진행하고 있는 특수교 계측시스템 대상 교량 중 1개를 선택하여 1차 테스트베드로 확보 후 성능 검증을 진행하고 , 그 후 다른 대상 교량 들에게 확대 적용이 가능함.

(2) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

국내 시설물 유지관리 시장은 잠정적으로 3조원이 넘으며 정부가 SOC 예산을 4% 이상 증액하면서 공공 공사로 인한 시설물 보수업은 동반 성장 할 것으로 보여짐.

국내 장대교량 유지 관리를 위해 14조원 이상의 시장이 열리는 이 시점에서 시설물 유지관리 분야의 추후 발전 가능성은 무궁무진함

5. 사전원가분석서

- 계측전문업체 Atech Solution에 의뢰하여 연구개발결과물 라만응력측정시스템을 이용한 PSC 인장 계측용역 수행시 견적 및 사전원가분석을 실시함
- PSC교 인장계측용역, 용역수행기간3일, 인장 케이블 4개, 계측 및 보고서 제출 기준

품 명	규 격	단위	수량	단 가	공급가액
A. 센서 및 계측장비					
1) 센서구매					
- 라만 비접촉식 응력센서	로드셀형	EA	4	700,000	2,800,000
- 라만 프로브 지그		EA	4	57,060	228,240
- 라만 프로브 지그 플레이트		EA	4	50,390	201,560
2) 센서손료					
- 변위계		EA	1	400,000	400,000
3) 장비손료					
- 라만분광기시스템	BWTEK	Day	3	100,000	300,000
- 계측데이터수집용 PC		Day	1	100,000	100,000
소 계					4,029,800
B. 계측소모자재					
- 신호케이블	RS485	M	10	10,000	100,000
- 통신모듈		EA	1	50,000	50,000
- 장비 보호 합체		SET	1		-
- 센서 설치용 소모자재		SET	1	100,000	100,000
소 계					250,000
C. 경비					
- 출장경비	3인	Day	3	120,000	360,000
- 숙박비	2인	Day	3	70,000	210,000
소 계					570,000
D. 인건비					
- 설치인건비	특급 1인, 중급 2인	Day	3	550,000	1,650,000
- 해체인건비	중급 2인	Day	1	400,000	400,000
- 데이터 수집 및 정리	중급 1인	Day	1	200,000	200,000
- 데이터 분석 프로그램 개발		SET	1	200,000	200,000
- 보고서 작성비		SET	1	200,000	200,000
소 계					2,650,000
E. 제경비 및 기술료					
- 제경비	인건비의 70%	%	70	2,650,000	1,855,000
- 기술료	(인건비+제경비)의 10%	%	10	4,505,000	450,500
소 계					2,305,500
합 계					9,805,300

제6장 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

본 과제는 국토교통기술과학기술진흥원에서 국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구 공고시 게시한 보안등급에 따라 일반
과제로 분류되었으며, 이에 따라 본 연구 과제의 연구개발성과 또한 일반과제의 보안등급에 따름

제8장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

제9장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 실험실 및 현장실험에서의 유해·위험 예방조치

： 본 연구에서는 라만형광분광기를 사용함에 있어서 레이저소스를 광원으로 사용하기 때문에 안구와 시신경 등이 위험에 노출되어 있어 특히 유의할 필요가 있다. 이에 따라 참여 연구원의 안전을 확보하기 위해 다음과 같은 다양한 안전장비와 안전표시가 부착되어 있다. 이는 산업안전보건법 23조에서 명시한 바에 따른 것으로, 레이저 장비를 비롯한 실험기기에 경고, 안내, 비상시 조치사항 등을 게시·부착하여 참여연구원의 안전의식을 환기하고 사고발생시 신속하게 대응하기 위함이다.

- 라만형광분광기 및 라만프로브에 주의 표지 부착
- 라만형광분광기 동작 전 보안경 착용 확인
- 실험 중임을 용이하게 식별할 수 있도록 경고등 설치
- 안전지침 숙지를 위한 실험수칙(경고등, 보안경, 사고시 행동요령 등) 게시

○ 안전관리체계

： 연구기간 동안 연구실 내 안전관리 감독자와 안전관리자를 지정해 안전상 업무를 수행하고 과제 구성원의 안전사항을 점검·확인하였다. 안전관리 감독자 및 안전관리자의 책무는 다음과 같다.

- 실험 관련 기구 또는 설비의 안전점검 및 이상유무 확인
- 보호구 구입시 적격품 선정
- 연구실 정리정돈 및 통로확보의 확인 및 감독
- 관련 법령에 명시된 규정을 위반하는 연구참여자에 대한 조치 및 교육

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	소프트웨어 등록	라만 케이블 응력 측정 전 용 프로그램	(주)유디 엔에스	저작 권자	대한민국		2018.12.06	단독 사사	
2	소프트웨어 등록	라만 실시간 케이블 응력 측정 시스템 소프트웨어	(주)유디 엔에스	저작 권자	대한민국		2019.01.08	단독 사사	
3	특허 출원	응력 측정 시스템 및 이를 이용한 응력 측정 방법	(주)유디 엔에스	출원인 발명자	대한민국		2019.01.14	단독 사사	
4	논문	압분광법을 이용한 강재의 비접촉식 응력측정	(주)유디 엔에스	저자	구조물진단 학회/ 대한민국		2019.01.31	단독 사사	
5	논문	라만 형광 분광법을 이용 한 PSC교량 인장케이블 응력측정방법 연구	(주)유디 엔에스	저자	대한민국		2019.01.31	단독 사사	

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

- [1] 케이블 지지교량의 케이블 점검방법 및 손상사례, 한국시설안전공단, 2016.
- [2] 정 운, 서주원, 임진석, Yang Zhao, EM센서를 이용한 사장교 케이블의 장력 측정, 한국소음진동공학회, 춘계학술대회논문집, 2010.
- [3] 손현수, 오명석, 윤철균, 김익수, 김진우, 국내 프리스트레스트 콘크리트 교량 현황조사 및 분석, 한국콘크리트학회 2010년 봄 학술대회 논문집, 23~24, 2010.
- [4] 강민성, 김상영, 박수, 구재민, 석창성, 라만 분광법을 이용한 잔류응력 측정에 관한 연구, 한국정밀공학회지 제27권 1호 113~118, 2010.
- [5] 전동호, 사장교 케이블의 장력변화량 모니터링에 관한 연구, 박사학위논문, 2007.
- [6] 정현준, 김규선, 이상철, 계측관리시스템을 이용한 사장교의 케이블 종류별 장력평가 결과 비교·분석, KISTEK 시설안전 Summer, 35~49, 2010.
- [7] 김규선, 이상철, 김훈겸, 케이블지지교량의 손상 및 보수·보강 사례 분석, 시설안전 제31호, KISTEK 시설안전 Autumn, 2008.
- [8] 박영환, PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 기술 개발, 한국건설기술연구원, 1단계 보고서, 2015.
- [9] Benjamin Uhlig, High Precision Stress Measurements in Semiconductor Structures by Raman Microscopy, Dissertation of the TU Dresden, 2009.
- [10] 박주영, 김준경, 장오기, 이환우, 박승희, PS 긴장재 긴장력 측정을 위한 PSC 거더 내부 매립용 EM 센서, 한국전산구조공학회 논문집 제28권 제6호, 691~697, 2015.
- [11] 김성겸, 장판기, 장일영, 정적재하시험을 통한 장경간 중공 웹 PSC 거더교의 내하력 평가, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집 Volume 22 Issue 3, 97~102, 2018
- [12] George Turrell, Jacques Corset, Raman Microscopy Developments and Applications, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 1996
- [13] Xin Zhang, Kui Xiao, Chaofang Dong, Junsheng Wu, Xiaogang Li, Yizhong Huang, In situ Raman spectroscopy study of corrosion products on the surface of carbon steel in solution containing Cl⁻ and SO₄²⁻, Engineering Failure Analysis, 18, 1981~1989, 2011.
- [14] Ludwig Grabner, Spectroscopic technique for the measurement of residual stress in sintered Al₂O₃, Journal of Applied Physics, 49(2), 580~583, 1978
- [15] Qing Ma, David R. Clarke, Stress Measurement in Single-Crystal and Polycrystalline Ceramics Using Their Optical Fluorescence, Journal of American Ceramic Society, 76(6), 1433~1440, 1993
- [16] D.M. Lipkin, D.R. Clarke, Measurement of the stress in oxide scales formed by oxidation of alumina-forming alloys, Oxidation of Metals, 45, 267~280, 1996
- [17] Namgyu Kim, Hae-Bum Yun, Noncontact mobile sensing for absolute stress in rail using photoluminescence piezospectroscopy, Structural Health Monitoring, 17(5) 1213~1224, 2018
- [18] Alemdar Bayraktar and Ahmet Can, Finite element model updating of Kömürhan highway bridge based on experimental measurements, Smart Structures and Systems, 6(4), 373~388, 2010
- [19] James Mark William Brownjohn, Pilate Moyo, Piotr Omenzetter, and Yong Lu, Assessment of Highway Bridge Upgrading by Dynamic Testing and Finite- Element Model Updating, Journal of Bridge Engineering, ASCE, 8(3), 162~172, ISSN 1084-0702, 2003
- [20] Lei Zhen-Kun, Kang Ki-Lann, Hu Ming, Qiu Yu, Xu Han, Niu Hong-Pan, An Experimental Analysis of Residual Stress Measurements in Porous Silicon Using Micro Raman Spectroscopy, Chinese Physics Society, Vol.21, no.2, 403~405, 2004.

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.