

PSC 구조물의 다중 PS 강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술의 개발 및 활용 성능 검증 최종보고서

2020. 2. 21.

주관연구기관 / 부경대학교 산학협력단

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘PSC 구조물의 다중 PS 강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술의 개발 및 활용 성능 검증’(연구개발 기간 : 2018.04.17. ~ 2019.12.31.) 과제의 최종보고서 5부를 제출합니다.

2020. 2. 21.

주관연구기관명 : 부경대학교 산학협력단 서 용 철 (인)

협동연구기관명 :

참여기관명 :

주관연구기관책임자: 김 정 태

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18TAP-C1429 99-01	해당 단계 연구 기간	2018.04.17. -2019.12.31.	단계구분	1 / 1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창의도전연구분야			
연구과제명	대과제명	대 과제가 있을 경우 기재합니다(단위과제일 경우에는 아래에 기재합니다)			
	세부과제명	PSC 구조물의 다중 PS 강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술의 개발 및 활용 성능 검증			
연구책임자	김정태	해당단계 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 16 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:280,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:280,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16 명 내부: 16 명 외부: 명	총 연구비	정부:280,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:280,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	부경대학교 산학협력단			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

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											

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)

- 연구개발목적 : PSC 구조물의 다중 PS 강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술의 개발 및 활용 성능 검증
- 연구개발내용 : 기전 임피던스-동적변형률 기반 텐던-정착부 파손 감지 기법 개발
보강재-압전센서 복합체 제원 및 정착부 웨어러블 매커니즘 설계
웨어러블 압전센서 장치를 통한 강연선과 정착부 파손 감지 기법 정립
이중 기전응답 기반의 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 개발
실험실 환경에서 다중 PS 강연선과 정착부 파손감지 성능 평가
- 연구개발성과 : ① PS 강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술
② 웨어러블 압전센서 장치 및 파손감지 소프트웨어

보고서 면수

94

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	PSC 구조물의 다중 PS 강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술을 개발 및 활용 성능 검증 최종목표 달성을 위한 연차별 연구내용은 다음과 같음. ○ 1차년도 : PS 강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술 개발 - 기전 임피던스-동적변형을 기반 PS 강연선과 정착부의 파손 감지 기법 개발 - 보강재-압전센서 복합체 제원 및 정착부 웨어러블 매커니즘 설계 - 웨어러블 압전센서 장치를 통한 강연선과 정착부 파손 감지 기법 정립 ○ 2차년도 : 웨어러블 압전센서 장치를 활용하는 파손감지 소프트웨어 개발 및 PS 강연선과 정착부에 대한 파손감지 성능 평가 - 1차년도 연구수행 결과를 기반으로 웨어러블 압전센서 장치가 탑재된 정착부 설계 - 이중 기전응답 기반의 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 개발 - 실험실 환경에서 다중 PS 강연선과 정착부 파손감지 성능 평가 수행				
연구개발성과	○ PS 강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술 ○ 웨어러블 압전센서 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성과 성능평가				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 웨어러블 압전센서 장치 및 텐던 정착부 손상감지 기술은 교량, 원전 격납구조 등의 PSC 구조물의 유지관리 분야에서 활용이 가능함. ○ 본 성과물은 PSC 구조물 텐던 정착부의 손상이력 추적이 가능하여 유지관리의 신뢰성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대됨. ○ 기존의 고가 유지관리 시스템 기술 비용을 대체할 수 있는 저가의 고내구성, 첨단 기능의 유지관리 기술 개발의 원천기술이 될 것으로 예상됨.				
핵심어 (5개 이내)	다중 PS 강연선	정착부	웨어러블	압전센서 장치	파손감지

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	Development and Performance Verification of Wearable Piezoelectric Sensor Technology for Damage Detection in PSC Structures ○ The goal of the first year is to develop the wearable piezoelectric sensor technology for damage detection in PS strands and anchorages. - To develop damage detection method that uses EM impedance-dynamic strain - To design composite of stiffener-piezoelectric sensor and wearable mechanism for anchorage - To establish damage detection method which uses wearable piezoelectric sensor in PS strands and anchorage ○ The goal of the second year is to develop a failure detection software that uses an wearable piezo-electric response device and assess the failure detection performance for the PS Strands and anchorages. - To design anchorage with wearable piezoelectric sensor device based on 1st year research - To develop damage detection software, which employs dual piezoelectric response, for PS strands and anchorages - To evaluate the performance of damage detection for multiple PS strands and anchorages in a lab-scaled tests				
Results	○ Wearable piezoelectric device technology for damage detection in PS strands and anchorages ○ Damage detection software with wearable piezoelectric device and its performance evaluation				
Expected Contribution	○ The techniques including wearable piezoelectric device and damage detection for tendon-anchorage is useful for the maintenance of PSC structure such as bridges and nuclear containments. ○ The techniques are technically expected to increase the reliability in the maintenance through traceable damage history in tendon-anchorage of PSC structures. ○ The techniques are economically expected to replace existing maintenance systems by the high technology system with low-cost and high durability.				
Keywords	Multiple PS strands	Anchorage	Wearable	Piezoelectric sensor device	Damage detection

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	4
3. 연구수행내용 및 성과	8
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	85
5. 연구개발성과의 활용 계획	90
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	90
7. 연구개발성과의 보안등급	90
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	90
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	91
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	92
11. 기타 사항	92
12. 참고 문헌	93

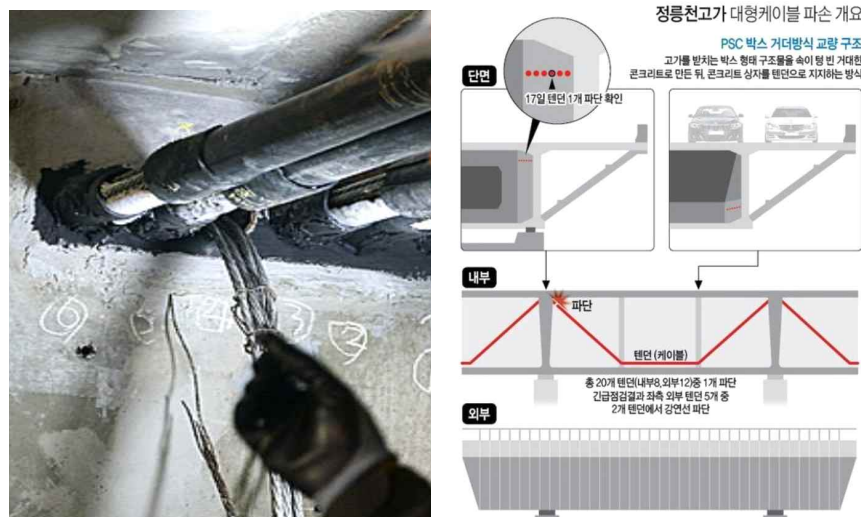
제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

- 시공 당시 반영하지 못한 과대 하중, 극한 환경조건, 점검기술의 부족 등으로 인해 PSC 교량의 안전성은 크게 위협 받고 있음. 따라서 교량 핵심연결부인 긴장재와 정착부의 손상을 능동적으로 감시할 수 있는 첨단기술 개발이 필요함. 긴장재와 정착부 손상감지 기술을 개발하기 위해서는 공용중인 PSC 교량의 현장 제약조건에 대한 엄밀한 검토와 함께 기술의 운영에 있어서도 최적 손상감지 기술 및 적용에 관한 연구가 중요함.
- 따라서, 본 연구개발에서는 다중 PS강연선과 정착부의 파손감지를 위한 웨어러블 압전센서 장치 기술을 개발하고자 함. 이를 위해 1차년도에는 PS 강연선과 정착부의 파손 감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술을 개발하고, 2차년도에는 웨어러블 압전센서 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성과 성능 평가를 수행하고자 함.

2. 연구개발의 필요성

- 프리스트레스 콘크리트(PSC) 교량은 PS강연선 다발로 구성된 텐던에 긴장력을 도입하여 고강도 콘크리트 거더로 외력하중에 저항하는 구조물로서 긴장재의 설계성능 유지는 교량의 안전성에 직결됨.
- 정릉천 고가도로 텐던 파손사고 <그림 1>는 이어진 교통통제와 시민생활의 불편으로 그 사고의 여파를 실감하는 계기가 됨. 교량 박스거더 내의 20개 텐던(15개 PS 강연선 다발)중 1개 텐던의 파단이 확인되었고 잔여 텐던의 판단 및 부식이 의심된다고 보고됨.
- 이러한 국내·외 프리스트레스 콘크리트(PSC) 교량의 파손사고를 통해 핵심 부재인 긴장재 및 정착부의 안전관리가 부각되고 있으며, PSC 교량의 안전성 확보를 위해 이들 부재의 파손을 조기에 감지할 수 있는 첨단 기술에 대한 필요성이 제기되고 있음.
- 현재 국내 시설안전기준인 정기적 육안검사 및 비파괴기법을 PSC 교량에 적용하는 경우, 공용중 발생하는 PS 강연선과 정착부의 파손을 조기에 탐지하기 어려운 문제가 있음. 따라서 긴장재 및 정착부의 손상이 구조물에 심각한 영향을 미치기 전에 이를 감지할 수 있는 첨단 손상감지 기술의 개발이 필요함.

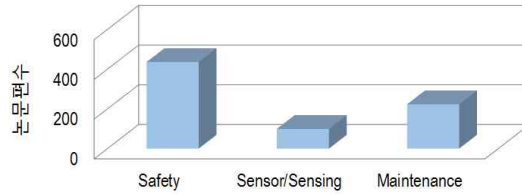
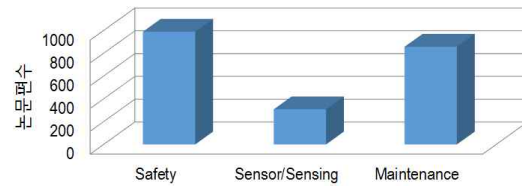


<그림 1> 정릉천 고가도로 박스거더 텐던 파손 사고 언론보도 자료

- 최근 10년간 본 연구의 주제와 관련하여 발표된 SCI 논문들의 Google Scholar 검색 결과는 <표 1>과 같음. 연구주제 ‘PSC 교량 - Safety, Sensing, Maintenance’ 의 경우 논문 수와 ‘Tendon Failure - Safety, Sensing, Maintenance’ 주제의 논문 수를 요약한 내용이며, 이 자료로부터 PSC 교량의 안전성 평가에 대한 연구가 주류를 이루고 있음을 짐작할 수 있음. 특히 이들 논문 중에서 텐던 파손으로 인한 안전성 문제를 다룬 연구들이 많았음을 파악하였음.

대분류	중분류	논문편수
PSC 교량	Safety	989
	Sensor/Sensing	308
	Maintenance	857

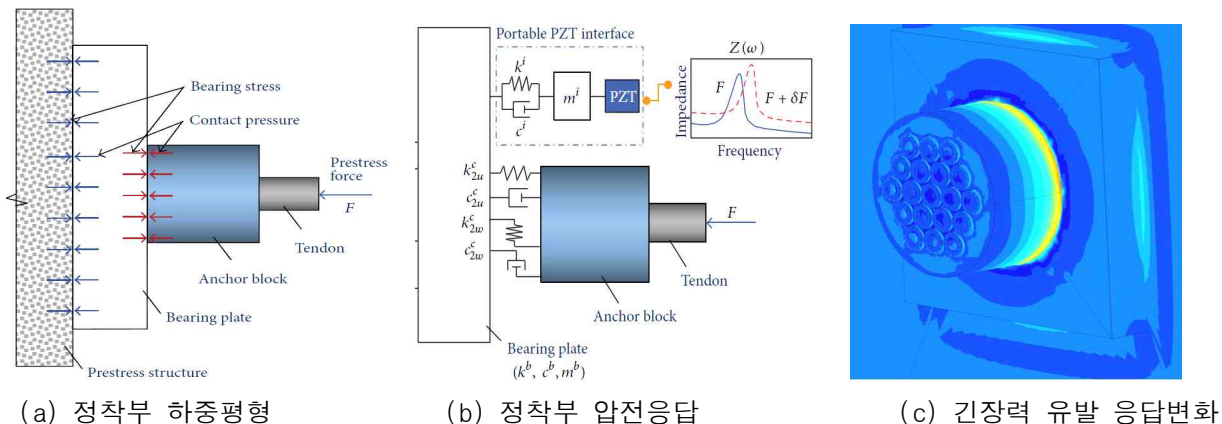
대분류	중분류	논문편수
Tendon Failure/ Prestress-loss	Safety	436
	Sensor/Sensing	99
	Maintenance	223



- 최근 PSC 교량의 안전도, 진단 및 계측, 유지관리에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으며, 이들 중 많은 연구가 텐던의 파손 관련 연구 주제에 대해 수행되고 있음. 현재까지 대부분의 연구결과는 시설 교량에 대한 적용상 제약과 소프트웨어적 구조건전성감시 기술의 문제점 등으로 미흡한 단계임. 국내·외 연구 동향 분석 및 본 연구진이 그동안 수행한 연구성과를 바탕으로 PSC 교량 텐던의 파손 감지에는 전 기저항 변형률과 기전 임피던스를 활용하는 기술이 우수하다고 판단하였음.
- 정착부에 대한 기술 적용 및 구조응답 감지와 상시계측 구현을 위해 이들 계측 기술을 신소재 인터페이스 기술과 융합하는 연구가 필요하다고 판단됨. 본 연구제안서의 주제로 선정된 웨어러블 인터페이스 기술 및 텐던 파손 감지 기술 개발은 건설 구조물을 대상으로 신소재 기술과 센서 기술을 결합하는 융합연구임. 기술적 측면과 사회적 측면에서 매우 필요한 연구라고 생각되며, 계획된 기간 내에 우수한 연구성과를 도출할 수 있다고 판단됨.

3. 연구개발 범위

- 본 연구의 첫 번째 핵심기술은 정착부 이중 기전응답 계측 기반의 손상감지 기술임. PS 강연선과 정착부의 파손으로 인한 응력거동의 변화를 이중 기전응답(기전(EM)임피던스와 동적변형률) 변화를 계측하여 감지하는 개념. 고주파(100kHz) 기전 임피던스 응답신호로 구조물 국부손상(긴장재 파손)을 민감하게 감지하고, 역압전 동적변형률 하중응답신호의 고유진동수 분석을 통해 구조물의 전역적 상태 변화를 감지. 하이브리드 기법으로서, 기전 임피던스 기반의 국부 손상감지와 압전 동적변형률 기반의 전역적 구조상태 변화를 감지를 동시에 수행하여 감지된 국부손상(긴장재 파손)이 전체 구조물에 유의미한 영향(예, 고유진동수의 현저한 감소)을 미치는 지를 평가하고자 함.

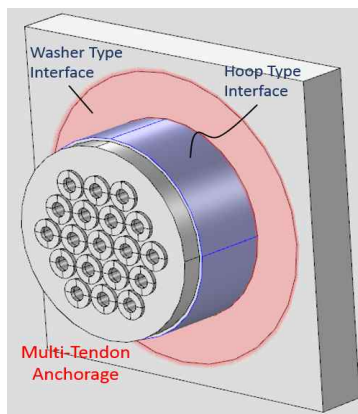


<그림 2> 긴장재 정착부 하중평형 및 이중 기전응답 계측 개념

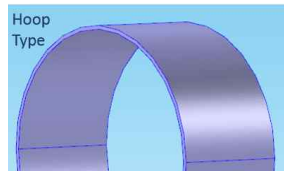
- 본 연구의 두 번째 핵심기술은 정착부 검진 주파수 조절용 압전응답 인터페이스 기법임. 이중 기전응답(EM임피던스와 동적변형률) 계측시 핵심은 대상 구조물의 강성에 맞게 압전센서의 검진 주파수 범위

를 결정하는 것임. 본 연구에서는 압전응답 주파수 범위를 미리 설정 가능한 인터페이스 기법(본 연구진 개발, 2010)을 적용하며, 이 기법의 적용으로 지압강도가 매우 큰 정착부의 압전 응답에 민감한 검진 주파수를 설정하여 기전 임피던스 신호를 계측하고자 함.

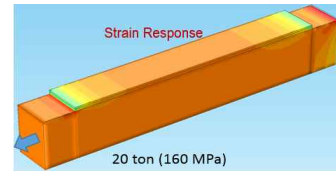
- 본 연구의 세 번째 핵심기술은 정착부 피복용 웨어러블 압전센서 장치 설계 기술임. 정착부에 피복되어 일체화된 압전센서는 외부 환경의 영향으로부터 안정적이며 국부 파손에 민감한 신호를 계측할 수 있음. 웨어러블 압전센서를 설계하기 위해서는 정착부의 거동특성과 형상/재질에 맞추어 웨어러블 피복 장치의 형상 및 재질을 설계해야 함. 본 연구에서는 정착부 앵커헤드의 주장응력거동(강연선의 파손 감지) 및 지압판의 지압응력거동(지압부, 콘크리트 파손)에 민감한 웨어러블 장치를 설계하려함. 또한, 압전 PZT-FRP 웨어러블 인터페이스 형태로 위치가 설계된 압전 PZT센서와 가공성과 강도 및 부착성능이 성능이 우수한 FRP 시트를 복층으로 결합하는 개념임.



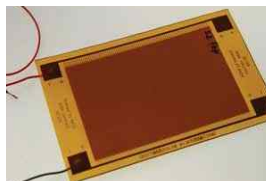
(a) EMI 전자기장 센서



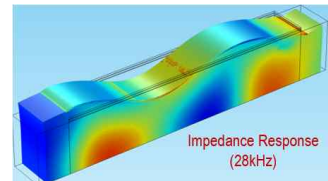
(b) 앵커블록 인터페이스



(c) 동적변형률 응답



(d) 압전 MRC 센서



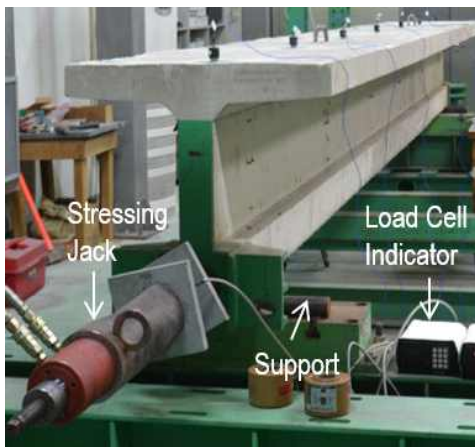
(e) 기전 임피던스 응답

<그림 3> 정착부 압전응답 계측용 웨어러블 압전센서 인터페이스의 개념

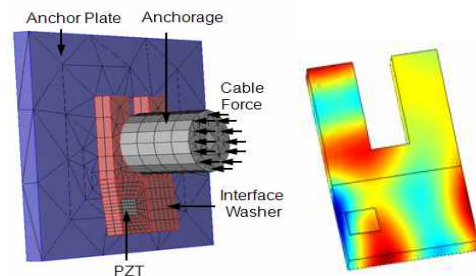
제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 현황

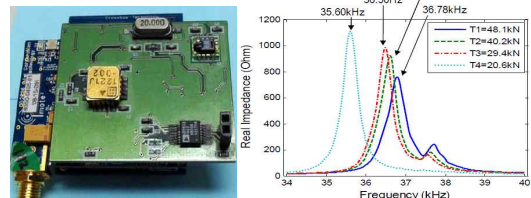
- 최근 국내에서는 광섬유센서 매립 스마트 긴장재 기술, 음향방출 센서를 활용한 긴장재 파단 감지기술, 전자기센서를 이용한 긴장력 추정, 전기저항 변형률과 기전 임피던스를 활용한 텐던 정착부 감지기술 등이 활발히 연구되고 있으며, 국외 선진연구진의 수준에 근접한 기초 연구를 수행중임.
- PSC 교량의 긴장재-정착부 유지관리 기술이 최고의 수준으로 발전하기 위해서는 첨단 센서를 활용한 신호감지 기술, 구조물의 거동과 일체화 하는 인터페이싱 기술 및 텐던-정착부의 거동응답의 변화를 정확하게 감지할 수 있는 신호감지-손상감시 융합 관점의 연구개발이 필요함.
- 부경대학교 연구진은 기전 임피던스 응답을 통한 비부착 텐던 앵커부의 긴장력을 탐지하는 실험적 기법을 연구하였으며, 주파수 대역 조절 가능한 임피던스 센서 노드 기술을 연구하였음. 또한, 하이브리드 가속도-임피던스 기법을 이용한 PSC 거더의 긴장력 감소 탐지 기법을 연구하였음. 온도영향의 보정과 다중 PS강연선의 국부파손 감지 알고리즘 개발이 연구현안으로 남아있음.



(a) PSC 거더 모형실험



(b) 정착부 임피던스 계측 인터페이스



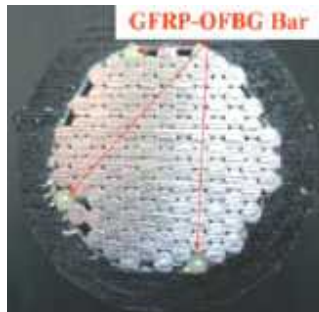
(c) 임피던스 센서노드 및 분석결과

<그림 4> 텐던 파손감지 기술 연구사례 (부경대학교)

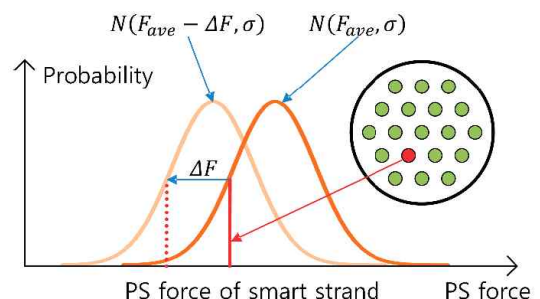
- 한국과학기술원과 한국건설기술연구원의 연구진은 기전 임피던스 응답 계측과 인공지능망 분석을 통해 다중 PS강연선의 국부 긴장력 변화를 탐지하는 실험적 연구를 수행하였으며, 광섬유매립 스마트 긴장재를 통해 비부착식 텐던의 긴장력 변화에 대응하는 변형률을 계측하는 기술을 개발하였음. 연구현안으로는 실제 구조물에 적용하기 위한 임피던스 계측 주파수 설정기술의 개발과 다중 PS강연선의 국부파손 감지 기법의 개발을 들 수 있음.



(a) KICT 스마트 텐던



(b) OFS 스마트 텐던



(c) 스마트 텐던 성능 검증

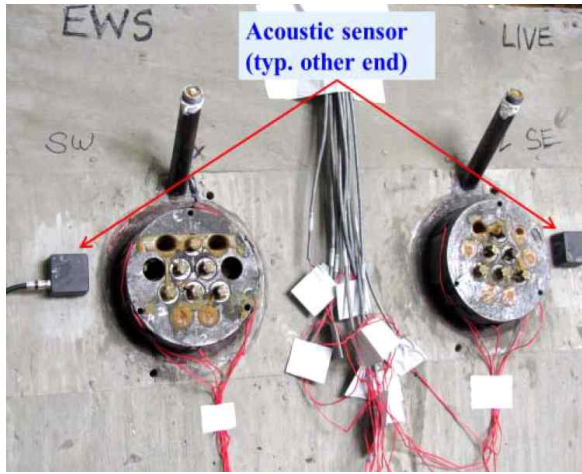
<그림 5> 텐던 파손감지 기술 연구사례 (한국과학기술원, 한국건설기술연구원)

□ 국내에서 수행된 PSC 교량 텐던 파손 감시 기술 중 대표적인 연구성과 및 연구현안을 간략하게 정리하면 다음과 같음.

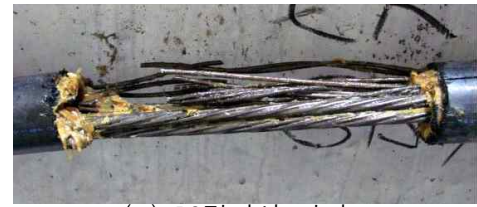
연구기관	연구내용 및 성과	연구현안
부경대학교 (김정태 교수)	- 기전 임피던스 응답을 통한 텐던 앵커부의 긴장력 기법 - 임피던스 주파수 대역조절가능 인터페이스 기술 - 무선 임피던스 센서노드(100KHz대역) 기술 - 하이브리드 가속도-임피던스 기법에 의한 국부 긴장력 감시와 교량의 전역적 건전성 감시	- 온도변화 유발 임피던스 보정 - 다중 PS강연선의 국부파손 감지 알고리즘 및 S/W - 긴장력 분석과정의 자동화 S/W 및 실 구조물 검증
한국과학기술원 (윤정방 교수, 민지영 박사)	- 기전 임피던스 응답을 통한 다중 PS강연선 긴장력 변화 탐지 기법 및 실험분석 - 인공신경망 기반 임피던스 응답 분석기법	- 온도변화에 따른 임피던스 신호의 보정 - 임피던스 계측 주파수 설정
한국과학기술원 (손훈 교수)	- 무기저 유도초음파에 의한 텐던 파단 계측 기술 - 유도 초음파에 의한 앵커부 국부손상 감지 - 무선 초음파 센서노드 기술	- 분산파 영향 최소화 및 장거리 텐던 파손감지 알고리즘 - 온도보정 및 긴장력 식별 S/W
한국건설기술연구원 (박영환 박사)	- 광섬유센서(FOS) 매립 긴장재를 통한 변형률 계측 기반의 긴장력 감지 기술 및 AE기법 기반의 검증 - 긴장재에 FOS센서를 매립하는 CFRP 응용기술	- 다중 PS강연선의 국부파손 감지 기법 - 기설 구조물 적용 기술화
전남대학교 (김재민 교수)	- 광섬유센서(FOS) 매립 긴장재를 통해 비부착식 텐던의 긴장력 변화를 변형률 계측 - FOS 매립 긴장재의 내구성 확보위한 정착장치	- FOS 매립방법에 따른 센서의 내구성 확보 - 기설 구조물 적용 기술화
서울과학기술대학교 (김은겸 교수)	- AE음향방출 기법에 통한 텐던파단 계측 기술 - 연속음향 모니터링에 의한 그라우팅된 부착식 텐던 부식파단 감지 기술	- 온도변화 및 차량유발 신호 변동 및 노이즈 보정 - 최적 AE센서위치 결정
성균관대학교 (박승희 교수)	- EMI 전자기장 센서 및 Magnetic flux leakage(MFL)기반의 텐던 긴장력 변화 및 부식손상 모니터링 기술 - MFL기법을 적용한 텐던용 EM 센서 기술	- 콘크리트 내부 매립된 텐던에 적용 기술 - 타부재의 간섭효과 최소화

2. 국외 현황

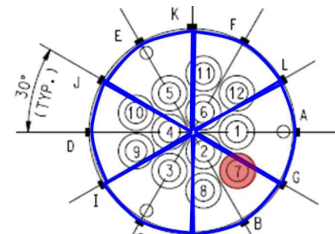
- 국외의 경우, X-ray 이미지 기술, FOS센서 매립 긴장재 기술, 진동모드해석 기반의 긴장력 평가기법, 전자기장을 이용한 텐던 손상추정기법, 전기저항 변형률 및 기전 임피던스 기반의 텐던 모니터링, 초음파 신호의 시간영역 반사법(TDR)을 이용한 텐던 부식과 파단 감지기법, AE기반의 텐던 파단감지 기법에 대한 연구가 수행되고 있음.
- 특히, 미국 University of Florida의 Rice교수 연구진은 전기저항 변형률 계측을 통해 PS 강연선의 파손을 감지하는 기법을 제안하였으며, 정착부의 변형률 응답 토모그래피(tomography) 분석을 통해 다중 PS강선의 국부파손을 감지하는 실험적 연구를 수행하였음. AE음향방출 센서를 통해 강연선 파단에 따른 신호응답을 분석하였으며, 손상 상시감지를 위한 연구현안은 전기저항 변형률 신호의 불연속 계측에 따른 신호응답의 불연속성과 부착 센서의 내구성을 확보하는 것임.



(a) 다중 PS강연선 정착부



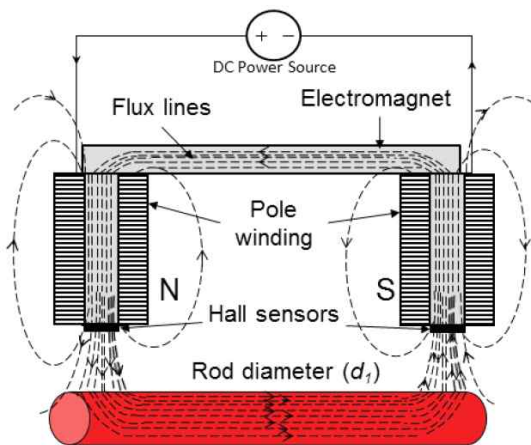
(b) PS강연선 파단



(c) 파단 강연선 감지

<그림 6> 텐던 파손감지 기술 연구사례 (University of Florida, Rice 교수)

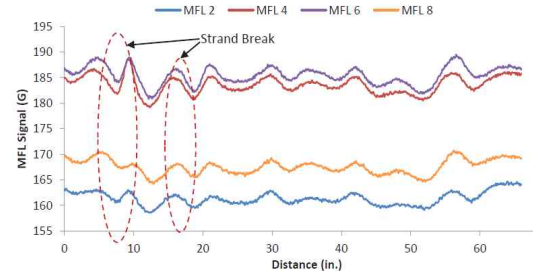
- 미국 University of Toledo의 Fernandes 박사 연구진은 EMI 전자기장 센서 및 Magnetic Flux Leakage(MFL) 개념을 적용하여 PSC 교량 텐던의 부식과 파단을 감지하는 기법을 연구하였으며, 외면 노출된 다중 PS 강연선의 부식 감지 성능이 검증되었음. MFL 신호의 취득과 분석 소프트웨어가 개발되었으며, 콘크리트 부재 내에 매립된 텐던에 대한 접근성과 기타 금속재인 철근과의 간섭효과 최소화 등 상시 감지에의 적용 문제가 연구현안이라 생각됨.



(a) EMI 전자기장 센서



(b) 강연선 부식



(c) 파단 강연선 감지

<그림 7> 텐던 파손감지 기술 연구사례 (University of Toledo, Fernandes 박사)

- 국제적으로 PSC 교량 긴장재의 파손 모니터링 기술과 관련하여 활발한 연구를 수행중인 주요 연구진의 최근 연구성과 및 연구현안을 요약하면 다음과 같음.

연구기관	연구내용 및 성과	연구현안
University of Florida (USA)	- 변형률 응답을 통한 PS강선 파손 감지 알고리즘 제안 - 텐던 정착부 변형률 응답을 통해 비부착 다중 PS강연선의 파손 감지 기술 및 AE기반 실험 검증	- 변형률 신호의 불연속 계측에 따른 상시감지 적용 문제 - 정착부 부착 센서의 내구성
Institute for Building Materials (Switzerland)	- 전기저항 임피던스(ETI)기법을 통한 덕트의 건전성 및 긴장재 부식 감지 기술 - 현장적용을 통한 장기간 손상감지 적용성 검증	실제 구조물에 적용시 비교대상인 초기 임피던스 응답 신호에 좌우됨

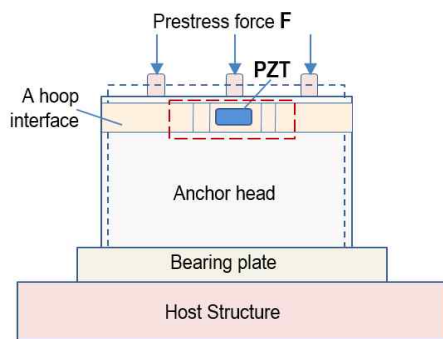
Imperial College (UK)	▪ 유도 초음파 및 임펄스 에코 기법을 통해 그라운드된 PS강연선의 국부손상 감지 기법 제시 ▪ 다발성 PS강연선의 응력변화 유발 신호감지 기법	▪ 유도초음파의 분산효과 최소화 및 파손감지 거리 확보 ▪ 온도변화 유발 오류 최소화
University of Delaware (USA)	▪ EM 전자기장 센서 및 Time domain reflectory(TDR) 기법을 이용한 강 케이블의 부식감지 기술 ▪ 강 케이블 표면 부식 및 덕트의 내부 공동 감지 기술	▪ 콘크리트내 매립 텐던에 대한 적용 기술로의 발전 ▪ PS강선 파손감지 기법 개발
University of Toledo (USA)	▪ EM 전자기장 센서 및 Magnetic flux leakage(MFL) 개념을 적용하여 긴장재의 부식과 파단을 감지 ▪ MFL data의 취득과 분석 S/W 및 하드웨어가 개발됨	▪ 텐던 부재에 대한 접근성과 상시모니터링에의 적용 문제 ▪ 타부재들의 간섭효과 문제
Transport Research Laboratory (UK)	▪ 콘크리트 외부표면 부착 AE센서로 연속적 음향방출 신호계측을 통해 부착식 PS강선 파단 감지기술 ▪ 교통유발 노이즈를 소거하는 하드웨어/SW 개발	▪ PS강선 파손 결정 알고리즘 ▪ 비파괴성 이벤트 유발 노이즈를 소거하는 기술

제3장. 연구수행내용 및 성과

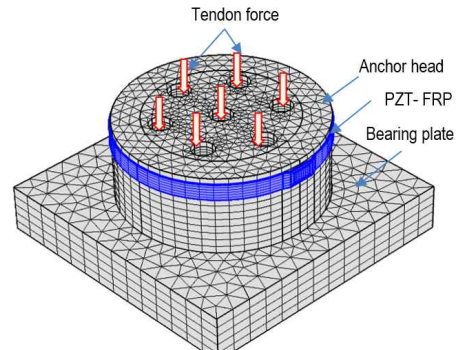
1. 연구개발 목표

가. 최종 목표 및 연구내용

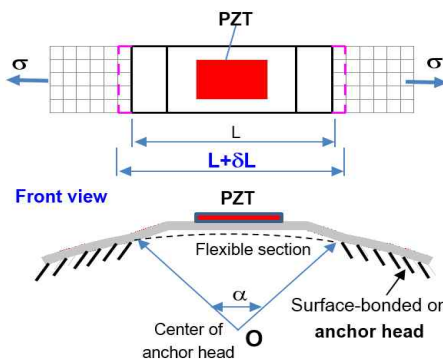
구분	내용
최종 목표	PSC 구조물의 다중 PS강연선과 정착부의 파손감지에 적합한 웨어러블 압전센서 장치 기술의 개발 및 활용 성능 검증
세부 목표	- PS 강연선과 정착부의 파손 감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술 - 기전 임피던스-동적변형률 기반 PS 강연선과 정착부의 파손 감지 기법 개발 - 보강재-압전센서 복층 인터페이스 제원 및 텐던 정착부 웨어러블 매커니즘 분석 - 웨어러블 압전센서 장치를 통한 강연선과 정착부 파손감지 기법 정립 - 웨어러블 압전센서 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성과 성능평가 - 웨어러블 압전센서 장치가 탑재된 정착부 모형제작 및 다중 PS텐던 정착부의 임피던스 계측 실험 - 이중 기전응답 기반의 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 개발 - 실험실 환경에서 다중 PS 강연선과 정착부 파손감지 성능 평가 수행 (온도변화, 긴장력 및 정착부 조건에 따른 실험적, 수치해석적 분석 및 검토)



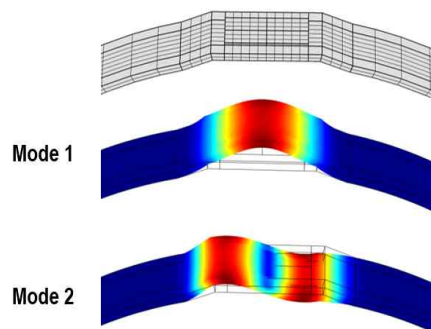
(a) 앵커블록용 압전 인터페이스 모델



(b) 정착부 유한요소해석



(c) 압전 인터페이스의 제원 모델



(d) 압전 인터페이스 동적응답

<그림 1> PS 강연선 및 정착부 파손감지용 웨어러블 센서 장치 개념도

나. 연구수행 방법 및 연구 결과

(1) 세부연구내용 1 : PS 강연선과 정착부의 파손 감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술

연구 범위	연구 수행 방법	연구 내용
1) 임피던스-동적변형을 기반 PS 강연선과 정착부의 파손 감지 기법 개발	1.1) PS 강연선과 정착부의 파손에 따른 정착부 응력거동 해석 및 응답특징 모델링	■ 텐던-정착부 상세 유한요소 모델링 ■ 정착부 콘크리트 손상 모델링 ■ PS 강연선 파손유발 정착부 응력변화 해석 ■ 콘크리트 정착부의 응력변화 및 소성역 해석
	1.2) PS 강연선과 정착부의 압전응답 기반 파손감지 기법 분석	■ 지압부 콘크리트 손상에 따른 임피던스 응답 변화 분석 ■ 부착식 텐던의 PS강연선 손상에 따른 앵커블록 임피던스응답 변화 분석 ■ 비부착식 텐던의 PS강연선 파손 모델링 및 텐던-정착부 응답 변화 분석 ■ PS 강연선/정착부 손상에 따른 압전 동적변형률응답 분석
	1.3) 기전 임피던스와 동적변형률의 병렬이용을 통한 긴장재 정착부 손상감지 기법	■ 임피던스 신호의 RMSD 분석을 통한 국부손상 감지 기법 ■ 동적변형률의 주파수 분석을 통한 진동특성 추출 기법 ■ 임피던스와 동적변형률을 동시 적용하는 국부/전역적 손상탐색 기법 ■ 신호응답에 미치는 온도영향 분석 및 보정 기준 설정
2) 보강재-압전센서 복층 인터페이스 제원 및 정착부 웨어러블 매커니즘 설계	2.1) 기전 임피던스/동적변형률용 인터페이스의 구조 제원 특성 모델링	■ PZT 인터페이스-정착부 연동 모델의 임피던스 응답 ■ PZT 인터페이스-정착부의 임피던스 응답 파전달 해석 ■ PZT 인터페이스의 제원에 따른 임피던스 응답 해석 및 손상유발 민감도 분석 ■ PZT 인터페이스의 제원에 따른 동적변형률 응답해석 및 손상유발 민감도 해석
	2.2) 복층 웨어러블 인터페이스의 제원 설계	■ 압전 PZT와 피복층/부착층 제원에 따른 압전응답 분석 ■ 정착부의 구조특성 변화에 민감한 인터페이스 응답 분석 ■ 복층 PZT-피복 FRP 융합 신소재의 제원 및 구조응답 민감도 분석 ■ 웨어러블 인터페이스의 부착기법 선정 및 부착효과 분석
	2.3) 정착부 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계	■ 텐던 손상유발 정착부 응력에 민감한 인터페이스 응답 분석 ■ 정착부 주장응력 거동에 민감한 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계 ■ 정착부 지압응력 거동에 민감한 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계 ■ 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답 분석
3) 웨어러블 압전센서 장치를 통한 강연선과 정착부 파손 감지 기법 정립	3.1) 웨어러블 인터페이스 장치의 최적위치 분석	■ 텐던 정착부용 웨어러블 PZT 센서 장치의 개념설계 ■ 앵커헤드용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 및 최적 형상 제원 분석 ■ 정착부 지압판용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 및 최적 형상 제원 분석 ■ 웨어러블 압전센서 장치용 PZT 센서의 최적 제원 분석
	3.2) 압전 PZT 센서 네트워킹 및 토모그래피 개념을 적용한 압전응답 신호분석 기술	■ 웨어러블 인터페이스 내부 PZT 센서의 압전 동적변형률/임피던스 신호 분석 알고리즘 작성 ■ PZT 센서의 네트워킹 및 멀티 센서 신호분석 기법 설계 ■ 강연선 파손유발 임피던스 응답의 토모그래피 분석 기법

1.1 임피던스-동적변형을 기반 PS 강연선과 정착부의 파손 감지 기법 개발

1.1.1 PS 강연선과 정착부의 파손에 따른 정착부 응력거동 해석 및 응답특징 모델링

□ 텐던-정착부 상세 유한요소 모델링

- 본 연구를 위해 실제 사장교(부산 화명대교)의 PS 강연선 케이블-앵커 및 콘크리트 정착부 설계 자료를 사용하여 텐던-정착부의 유한요소 모델링을 수행하였음. 강연선 케이블의 인장강도(f_u)는 1,860MPa 임.
- 텐던-정착부 정밀 모델은 그림 1-1-1과 같이 앵커헤드(anchor head), 지압판(bearing plate), 콘크리트 정착부(concrete anchor)로 구성되었음. 그림 1-1-2는 대상 텐던-정착부에 대한 유한요소모델임. 구조계와의 연결을 경계조건으로 모사하여 콘크리트 정착부 배면에 스프링을 배치하였고, 텐던의 배치에 따라 장력이 발생하는 z축 방향에 대하여 스프링 강성을 부여하였으며 그 값은 $2.5 \times 10^{15} \text{N/m}^2$ 임. 지압판 및 앵커헤드는 강재로, 정착부는 철근콘크리트 재료로 모델링하였으며, 각 요소별 재료특성은 표 1-1과 같음.

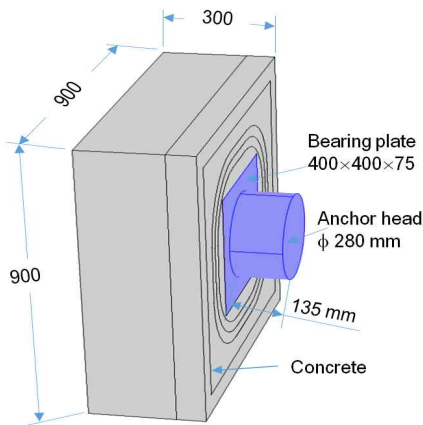


그림 1-1-1 화명대교 텐던-정착부 제원

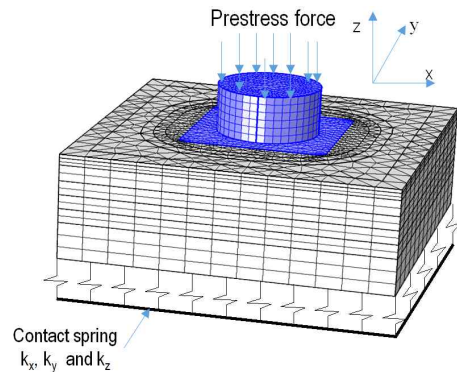


그림 1-1-2 텐던-정착부 유한요소모델

표 1-1 텐던-정착부 유한요소 모델의 재료특성

Parameter	앵커헤드/지압판	콘크리트	철근
Young' s modulus E (GPa)	200	32	200
Poisson' s ratio, ν	0.3	0.2	0.3
Density, ρ (kg/m ³)	7,850	2,400	7,850
Damping loss, η	0.01	0.01	0.01
Compressive Strength f'_c (MPa)	460	40.0	460
Tensile Strength f'_t (MPa)	460	4.0	460

- 정착부는 철근콘크리트로 모델링하였으며, 철근은 콘크리트 체적의 약 2%로 모사되었음. 유한요소모델의 단순화를 위하여 식 (1-1)을 통해 콘크리트 내부의 철근의 재료특성을 정착부의 등가 탄성계수로서 고려하였음. 또한, 식 (1-2)를 통해 철근콘크리트의 등가 압축강도를 49.6 MPa로 산정하였음(무근 콘크리트 대비 24% 높은 값).

$$\sigma_s E_s + \sigma_c E_c = \sigma_{eq} E_{eq}$$

$$E_{eq} = \frac{V_s}{V_t} E_s + \frac{V_c}{V_t} E_c \quad (1-1)$$

$$f'_c = \left(\frac{E_{eq}}{0.043 K_1 \rho^{1.5}} \right) \quad (1-2)$$

□ 정착부 콘크리트 손상 모델링

- 정착부 콘크리트의 손상 모델링을 위하여 Ottosen의 손상모델을 이용하였음. Ottosen의 손상모델은 식 (1-3)과 같이 4개의 변수로 구성됨. 여기서, A, B, k_1 , k_2 는 무차원 변수이며, f'_c 는 압축강도임. I_1 는 응력 텐서의 1차 불변량(invariant)이며, J_2 , J_3 은 편향 텐서의 2차 및 3차 불변량 임.

$$A \frac{J_2}{f'_c} + \lambda(\theta) \sqrt{J_2} + BI_1 - f'_c = 0$$

$$\lambda(\theta) = \begin{cases} k_1 \cos\left(\frac{1}{3} \arccos(k_2 \cos(3\theta))\right) & \cos 3\theta > 0 \\ k_1 \cos\left(\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos(-k_2 \cos(3\theta))\right) & \cos 3\theta < 0 \end{cases}, \cos(3\theta) = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \quad (1-3)$$

- Ottosen의 손상모델은 하중에 의해 발생하는 손상의 정도를 판정할 때 일반적으로 사용되는 기준이며, 손상모델 변수의 조건에 따라 아래에 해당하는 경우 Drucker-Prager 기준 ($A=0$, $\lambda(\theta)=\text{constant}$) 또는 Von Mises 기준 ($A=0$, $B=0$, $\lambda(\theta)=\text{constant}$) 에 의해 손상을 판정함. 본 연구에서는 압축강도-인장강도 비(f'_t/f'_c)가 0.1인 경우의 Ottosen 파괴기준에 해당하는 손상모델 및 그 변수 값(표 1-1-2)을 사용하였음.

표 1-1-2 Ottosen 파괴 기준에서 일반적으로 사용되는 손상모델의 변수 값

f'_t/f'_c	A	B	k_1	k_2
0.1	1.3	3.2	11.7	0.98

□ PS 강연선 파손유발 정착부 응력변화 해석

- 그림 1-1-3은 앵커헤드-지압판 유한요소모델이며, 이로부터 PS 강연선 손상에 따른 정착부의 응력변화 해석을 수행하였음. 이때 강연선의 일부가 파단되어 긴장력을 발휘할 수 없는 경우를 손상유형으로 선정하였음.
- 앵커헤드-지압판 유한요소모델에서 정상상태의 강연선에 긴장력을 적용하기 위하여 앵커홀 내부의 표면에 각각 긴장력 작용방향으로 150kN의 하중을 각각 입력하였음. 그림 1-1-4는 1번 강연선 손상이 발생하기 전·후의 응력분포 차이를 나타내며, 손상된 강연선의 위치에 따라 응력분포 변화를 분석하였음.

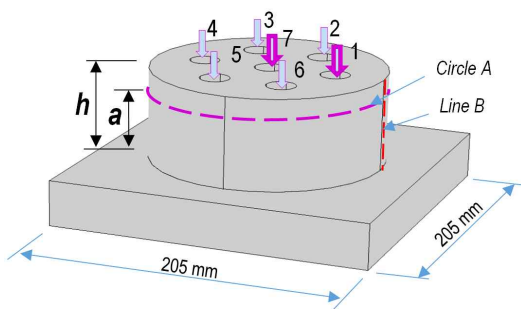


그림 1-1-3 앵커헤드-지압판 유한요소모델

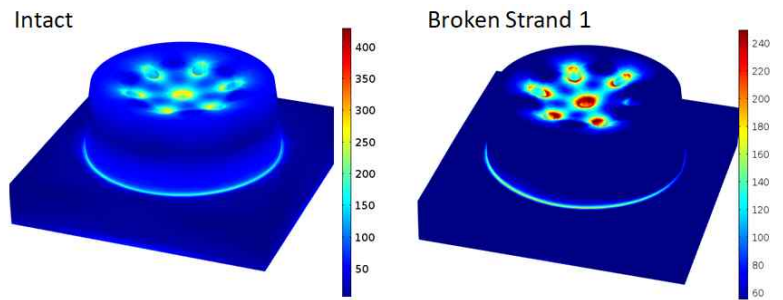


그림 1-1-4 강연선 손상에 따른 앵커헤드-지압판의 응력분포

- 국부 강연선의 손상은 앵커헤드의 전면, 앵커홀 및 앵커헤드 측면의 응력변화를 유발하는 것으로 분석됨. 이에 근거하여, 앵커헤드 표면의 주장응력 변화와 국부 손상 강연선의 위치와의 관계를 분석하였음.
- 그림 1-1-5는 1번 및 7번 강연선이 각각 파단 되었을 때 앵커헤드 측면(circle A)의 주장응력 변화 분석 결과임. 동일한 손상 조건에서도 앵커헤드 높이(a/h)에 따라 주장응력의 분포가 다르게 나타났으며, 앵커헤드의 전면에 가까운 위치일수록(a/h 값이 클수록) 손상에 의한 응력차이가 크게 발생하였음.

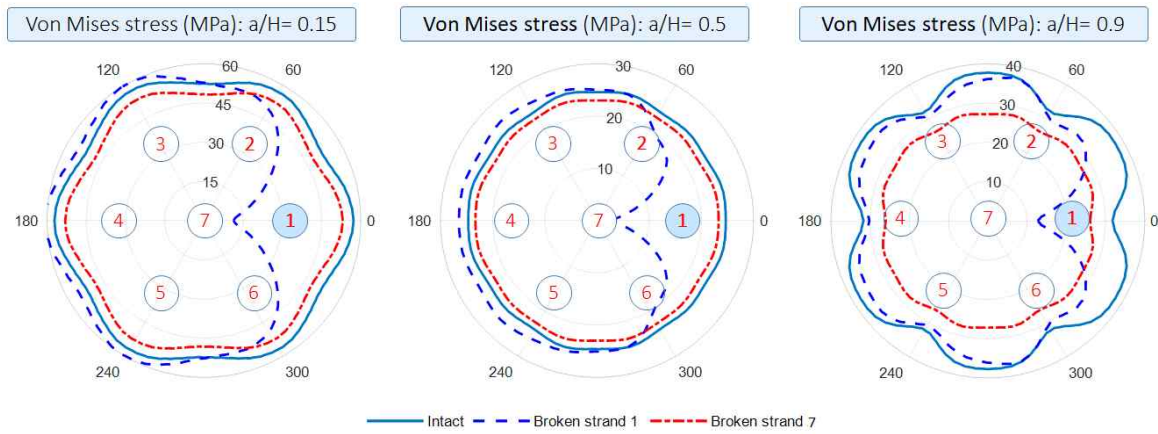


그림 1-1-5 PS 강연선 손상에 대한 앵커헤드 표면의 주장응력 변화

- 국부 강연선의 손상과 앵커헤드 표면의 응력변화 분석으로부터 손상감지에 적합한 측정 위치를 분석하였음. 그림 1-1-6과 같이 특정 위치 P점에서의 강연선 파단 위치별 민감도를 분석하였음. P점과 가장 가까운 1번 강연선 파단에 대해서는 높은 민감도를 보였으며, 그 이외의 2~6번 강연선 파단에 대해서는 상대적으로 낮은 민감도를 보였음. 이로부터 국부 강연선의 파단을 구분하여 감지할 수 있는 계측 위치를 분석하였음.

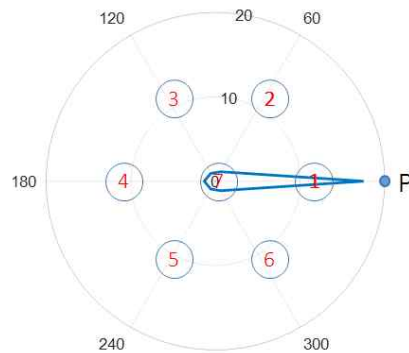


그림 1-1-6 손상된 강연선의 위치에 따른 특정 위치 P에서의 주장응력 민감도

□ 콘크리트 정착부의 응력변화 및 소성역 해석

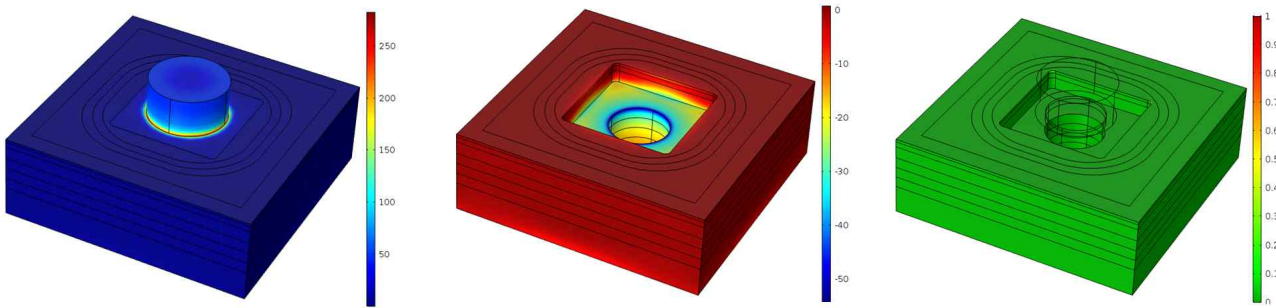
- 텐던-정착부 유한요소모델(그림1-1-2)에 대하여 프리스트레스 긴장력에 대한 정착부의 응력변화 및 소성역(손상발생) 해석을 수행하였음. 콘크리트 정착부의 균열은 시공 중 긴장력 재하 또는 구조적 불안정성으로 인한 하중 증가에 의해 발생할 수 있음. 본 해석에서는 시공과정 중 텐던 긴장력 재하의 경우를 고려하였음.
- 긴장력 하중 재하를 위해 그림 1-1-2와 같이 앵커헤드의 전면에 분포하중을 입력하였음. 하중 시나리오로서 표 1-1-3의 4단계를 구성하였음. 비손상 정상단계(intact)로서 $0.54 f_u$ 에 대한 하중을 고려하였으며, 콘크리트 손상모사를 위해 3단계에 걸쳐 $0.83 f_u$ 수준까지 하중을 증가시켰음.

표 1-1-3 텐던-정착부 모델의 프리스트레스 하중 시나리오 및 하중상태별 콘크리트 손상정도

Case	하중 P(kN)	긴장력(MPa)	정착부 콘크리트 손상 정도
Intact	3,100	$0.54 f_u$	비손상
Crack level 1	3,660	$0.63 f_u$	지압판 가장자리 콘크리트 표면의 초기균열 발생
Crack level 2	4,380	$0.76 f_u$	표면균열의 확장 및 내부균열 발생
Crack level 3	4,770	$0.83 f_u$	표면균열 및 내부균열의 진전 발생

- 하중 시나리오에 대하여 정착부의 응력해석을 수행하였음. 그림 1-1-7은 정상상태(intact)에 대한 응력 분포도임. 하중에 의해 앵커헤드와 지압판의 접촉 경계에서 응력이 크게 발생하였으며(그림 1-1-7(a)), 지압판과 콘크리트 정착부의 접합경계에서 응력텐서의 1차 invariant 값이 크게 발생하였음(그림

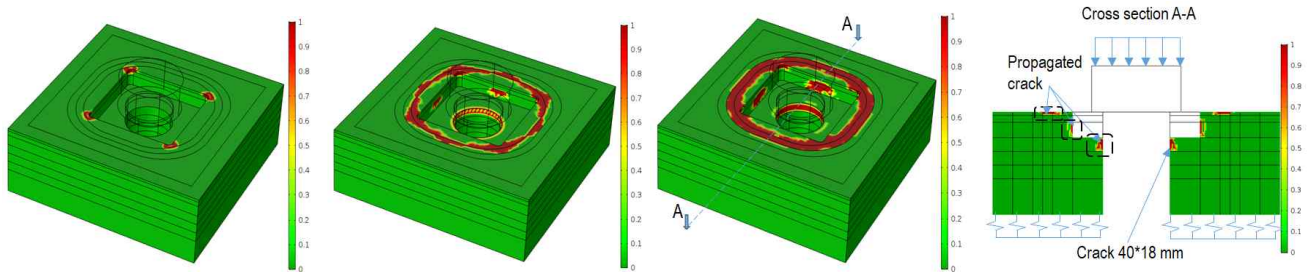
1-1-7(b)). 이때, 정착부에 발생한 Von Mises 응력은 최대 280MPa이며, 응력텐서의 1차 invariant는 최대 50MPa 임. 손상해석 결과, 텐던의 장력이 $0.54f_u$ 수준에서는 정착부의 소성변형이 발생하지 않는 것으로 분석되었음(그림 1-1-7(c)).



(a) Von Mises 응력(MPa) (b) 응력텐서의 1차 invariant (c) 소성분포도

그림 1-1-7 비손상 상태(Intact)에 대한 콘크리트 정착부 응력해석 결과 및 소성분포

- 그림 1-1-8은 Crack level 1~3의 긴장력 조건에 대한 손상발생 해석 결과임. Crack level 1의 경우, $0.63f_u$ 수준의 긴장력에 의해 지압판의 가장자리의 콘크리트 표면에서 초기균열이 발생하였음(그림 1-1-8(a)). Crack level 2의 경우, $0.76f_u$ 수준의 긴장력에 의해 기존의 표면 균열이 확장되고 내부균열이 발생하였음(그림 1-1-5(b)). Crack level 3의 경우, 표면 균열 및 내부 균열이 진전되었음(그림 1-1-5(c)). 그림 1-1-8(d)는 콘크리트 정착부의 A-A 단면을 나타낸 것으로서 각 단계의 균열 진전 분석 결과임. 이때, 균열단계별 소성영역은 전체 콘크리트 정착부 체적의 0.1%, 0.43%, 1.52%에 해당하는 정도임.



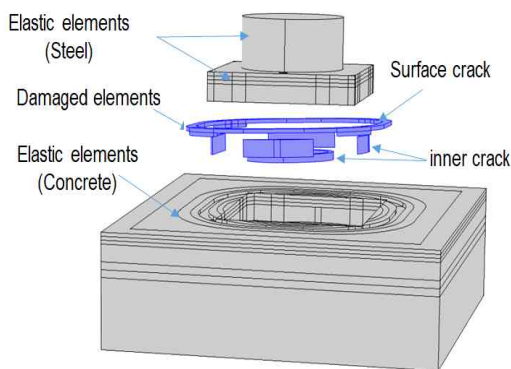
(a) Crack level 1 (b) Crack level 2 (c) Crack level 3 (d) Crack level 3의 A-A 단면

그림 1-1-8 긴장력 시나리오에 따른 콘크리트 정착부 손상발생 해석 결과

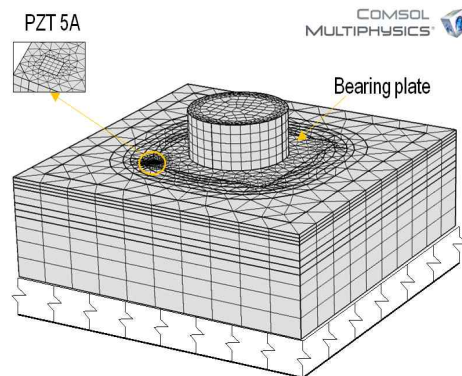
1.1.2 PS 강연선과 정착부의 압전응답기반 파손감지 기법 분석

□ 지압부 콘크리트 손상에 따른 임피던스응답 변화 분석

- 그림 1-1-9의 앵커헤드-정착부 유한요소모델을 대상으로 정착부 손상에 대한 앵커블록의 압전 임피던스 응답을 분석하였음. 앞서 1.1.4에 제시된 손상해석 결과를 이용하여 손상 단계별 손상영역을 결정하였으며, 그림 1-1-9(a)와 같이 표면 균열(surface crack) 및 내부 균열(inner crack)로 모델링하였음. 정착부의 임피던스 응답 추출을 위하여 그림 1-1-9(b)와 같이 지압판의 가장자리에 압전 PZT5A 요소를 모델링하였음.
- 그림 1-1-10(a)와 같이 정착부의 손상 발생에 따른 압전 임피던스 응답을 추출하였음. CCD Index 분석을 통해 5개 주파수 대역의 임피던스 응답 변화를 정량적으로 평가하였음. Range 5를 제외한 모든 주파수 대역에서 손상에 따른 임피던스 응답 변화가 일정한 패턴을 보였으며, 그 중 Range 2의 주파수대역(120~140kHz)에서 가장 큰 변화가 발생하였음. 이로부터 지압판의 PZT에서 측정된 임피던스 응답으로부터 정착부의 손상감지가 가능한 것으로 판단됨.

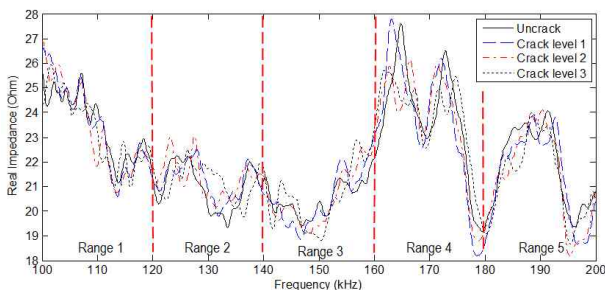


(a) 유한요소모델 구성

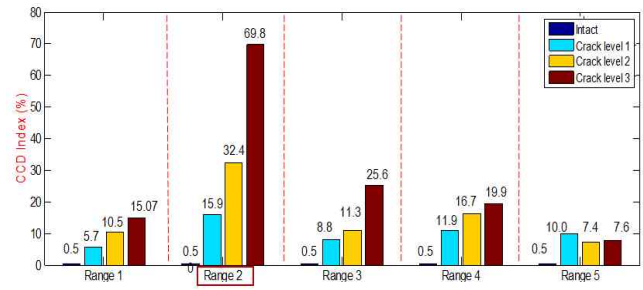


(b) 유한요소모델의 mesh 생성

그림 1-1-9 앵커헤드-정착부 및 압전센서 유한요소모델



(a) 손상에 대한 정착부 임피던스 응답 변화



(b) 손상에 대한 임피던스 응답의 CCD Index 분석

그림 1-1-10 정착부 손상에 따른 앵커블록의 임피던스 응답 및 CCD 분석 결과

□ 부착식 텐던의 PS강연선 손상에 따른 앵커블록 임피던스 응답 변화 분석

- 그림 1-1-11의 앵커헤드-지압판 유한요소모델을 대상으로 부착식 텐던의 강연선 손상에 따른 앵커블록의 임피던스 응답을 분석하였음. 임피던스 응답 추출을 위해 앵커헤드 표면 상단에 PZT 요소를 모델링하였음.
- 손상 시나리오로서 표 1-4와 같이 비손상(T0) 및 3개 손상 경우(T1-T3)로 구성하였음. 부착식 텐던의 경우 강연선의 손상은 전체 텐던의 긴장력 저하를 발생시키므로 강연선의 손상모사 시 저하된 긴장력을 각 강연선에 대해 동일하게 적용하였음.

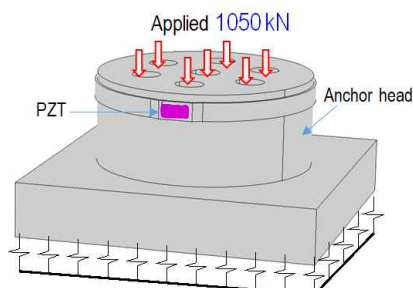
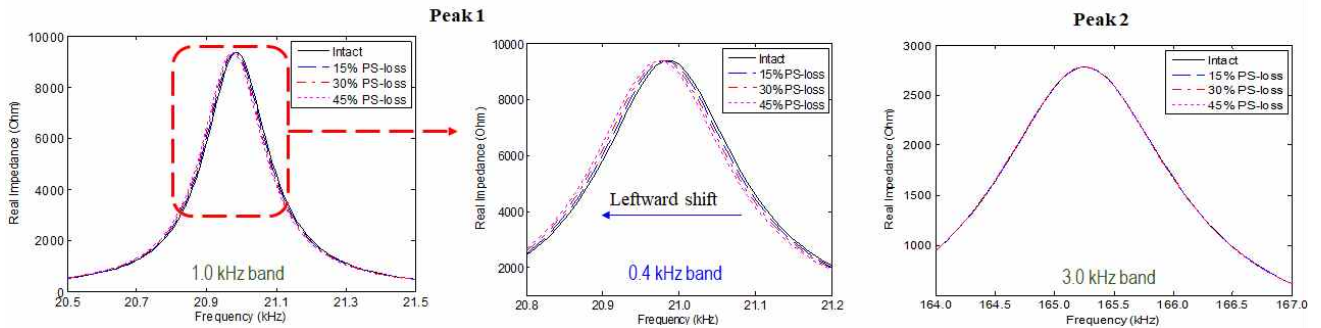


표 1-4 PS 강연선 손상 시나리오

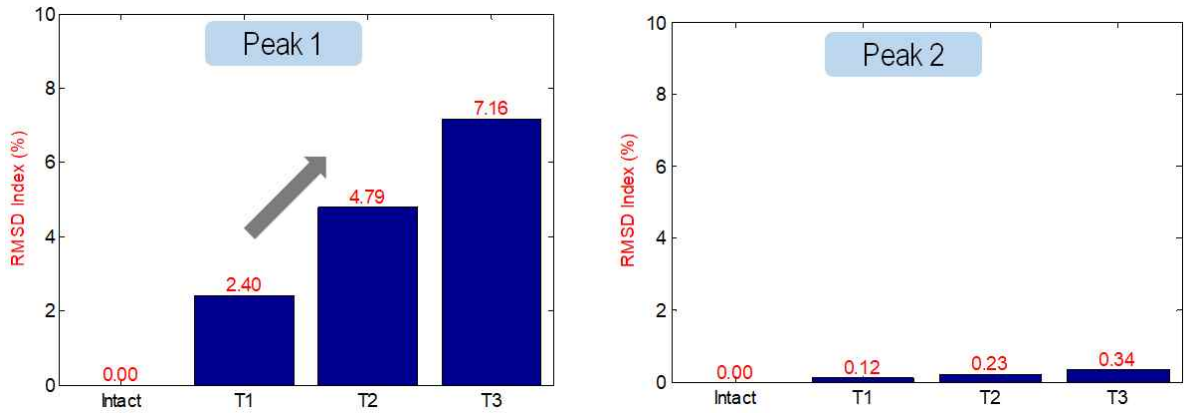
Case	손상유형	긴장력 (kN)
T0	비손상	1,050
T1	15% PS-loss	893
T2	30% PS-loss	735
T3	45% PS-loss	578

그림 1-1-11 앵커헤드-지압판 유한요소 모델(부착식 텐던)

- 앵커헤드 표면의 PZT로부터 강연선 손상 시나리오별 임피던스 응답을 추출하였음. 주파수 대역별 임피던스 응답을 분석한 결과, 0~200kHz 주파수 범위 내에 Peak 1(20.94Hz) 및 Peak 2(165.2Hz)의 두 개의 피크 응답이 관찰되었음. 강연선 손상에 대한 임피던스 응답의 변화는 Peak 2에 비해 Peak 1에서 크게 나타났으며, 강연선의 긴장력이 감소할수록 응답신호는 왼쪽으로 변화하였음(그림 1-1-12(a)).
- 임피던스 응답의 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 주파수 대역별 RMSD 분석을 수행하였음. 강연선 손상이 심화됨에 따라 RMSD 값이 점차 증가하였으며, 이는 앵커헤드의 표면에서 측정된 임피던스 응답으로부터 강연선 손상 추정 가능성이 있음을 의미함(그림 1-1-12(b)).



(a) 강연선 손상에 대한 앵커블록의 임피던스 응답 변화



(b) 강연선 손상에 대한 앵커블록 임피던스 응답의 RMSD Index 분석

그림 1-1-12 강연선 손상에 대한 앵커블록의 임피던스 응답 및 RMSD 분석

□ 비부착식 텐던의 개별 PS강연선 파손 모델링 및 텐던-정착부 응답 변화 분석

- 그림 1-1-13의 앵커헤드-지압판 유한요소 모델을 대상으로 비부착식 텐던의 강연선 파손에 따른 정착부 압전응답을 분석하였음. 임피던스 응답 측정을 위하여 앵커헤드 표면에 4개의 PZT요소를 모델링하였음.
- 비부착식 텐던의 경우, 손상된 강연선의 긴장력 손실이 주변의 강연선의 긴장력에 영향을 주지 않는 것으로 가정하였음. 손상시나리오는 표 1-5와 같으며 3번 강연선 및 4번 강연선이 파손되는 경우로 구성하였음.

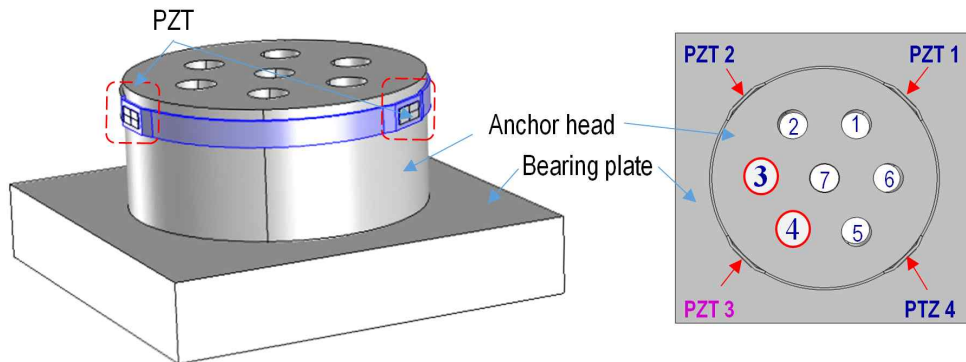
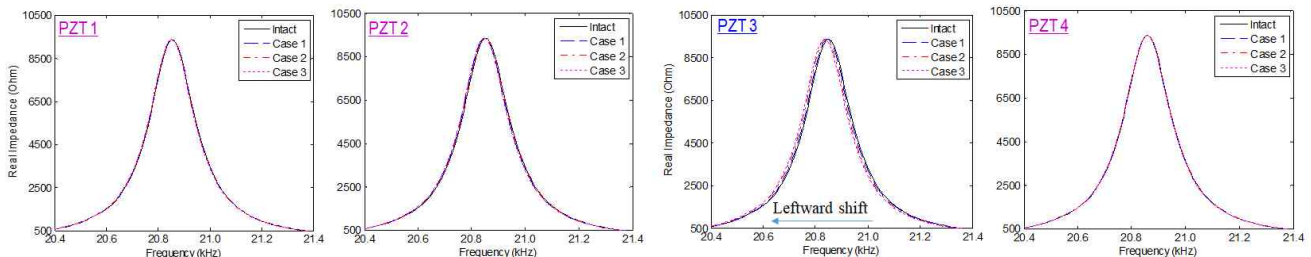


그림 1-1-13 앵커헤드-지압판 유한요소 모델(비부착식 텐던)

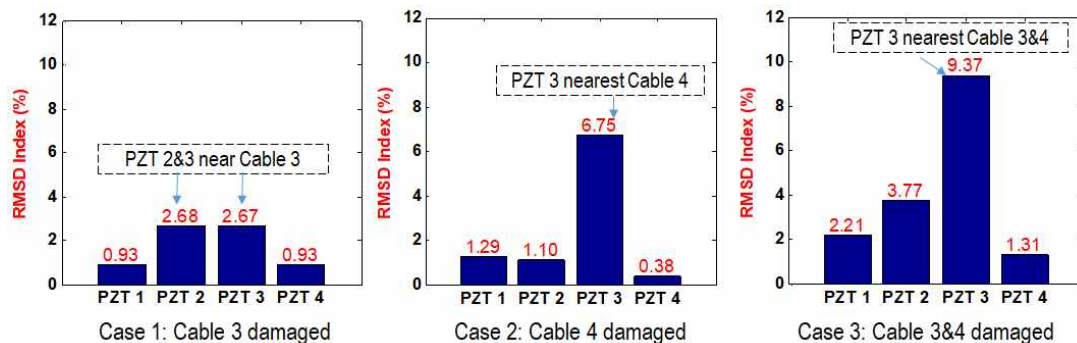
표 1-5 비부착식 텐던의 손상 시나리오

Case	손상유형	긴장력(kN)
Intact	-	1,050
1	3번 강연선 파손	900
2	4번 강연선 파손	900
3	3, 4번 강연선 파손	750

- 국부 강연선 손상에 대하여 앵커헤드 표면의 PZT에서 임피던스 응답을 추출하였음. 그림 1-1-14(a)는 PZT1~PZT4의 20.4~21.4kHz 대역의 임피던스 응답을 나타냄. 손상된 3번, 4번 강연선의 위치와 가장 가까운 PZT3의 임피던스 응답에서 큰 변화가 발생하였음. 그림 1-1-14(b)와 같이 임피던스 응답의 RMSD 분석으로부터 손상 강연선과 가까운 PZT의 응답에서 손상 민감도가 크게 나타났음.



(a) 강연선 손상에 따른 PZT 위치별 임피던스 응답 변화

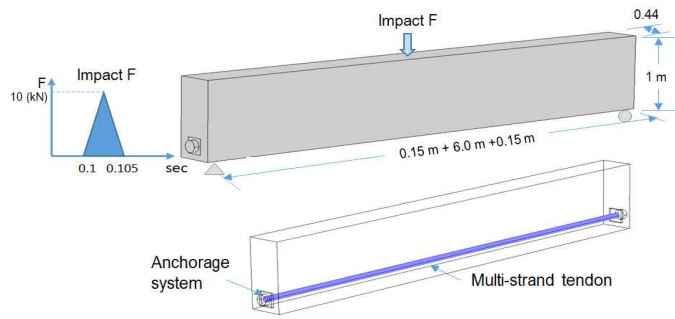


(b) PZT 위치별 임피던스 응답의 RMSD 분석

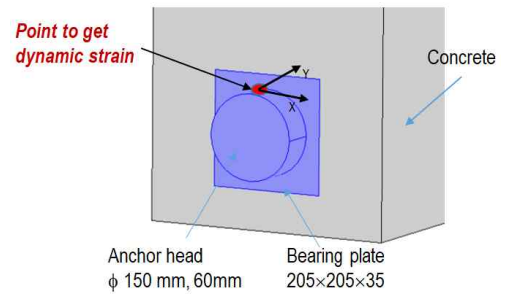
그림 1-1-14 비부착식 텐던의 강연선 손상에 따른 PZT 위치별 임피던스 응답 및 RMSD 분석 결과

□ PS 강연선 및 콘크리트 정착부 손상에 따른 압전 동적변형률 응답 변화 분석

- 그림 1-1-15와 같은 PSC 보를 유한요소모델링 하였으며, 이로부터 PS 강연선 및 콘크리트 정착부의 손상에 따른 동적변형률 응답의 변화를 분석하였음. 텐던-정착부는 부착식 PS 강연선, 앵커헤드 및 지압판으로 구성되었으며, 각 요소별 재료 물성은 표 1-1과 동일함. 보의 중앙 상단에 충격하중을 입력하여 앵커헤드 표면의 PZT 요소로부터 x, y축 방향의 압전 동적변형률을 추출하였음.
- 정착부의 국부응답인 압전 동적변형률 응답은 그림 1-1-16(a)과 같이 추출되었음. 이로부터 주파수응답을 그림 1-1-16(b)과 같이 분석하였으며, 4개의 피크 주파수가 분석되었음. 이들 피크 주파수는 PSC 보의 전역적 진동모드(그림 1-1-16(c))에 대응하는 고유진동 주파수로 분석되었음.

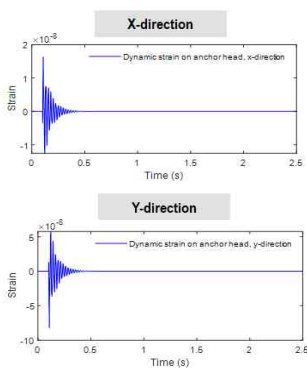


(a) PSC 보의 유한요소모델

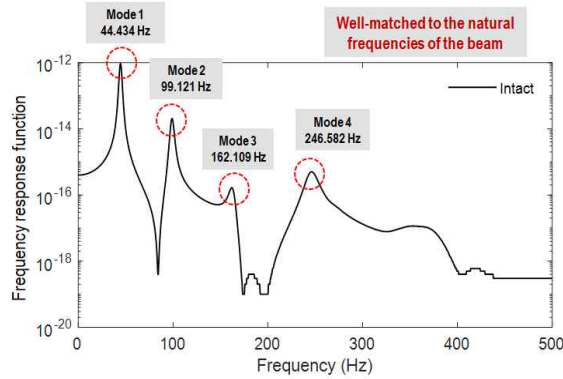


(b) 정착부, 앵커헤드 및 PZT 모델

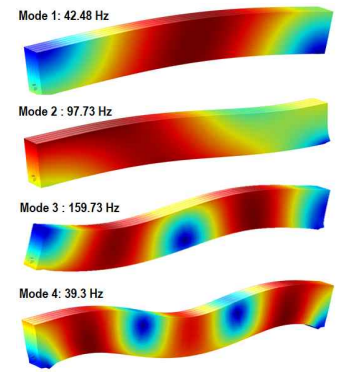
그림 1-1-15 텐던-정착부 동적변형률 분석을 위한 PSC 보의 유한요소모델링



(a) 앵커헤드 압전변형률



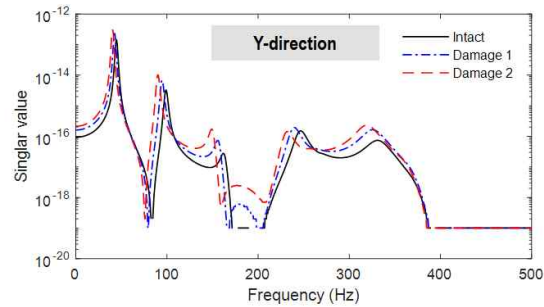
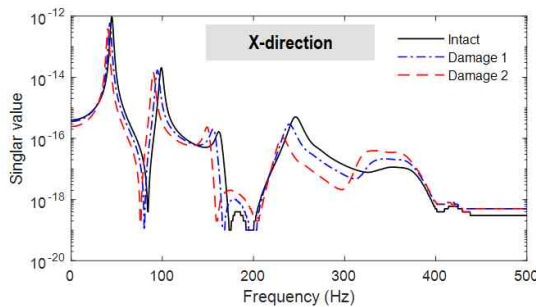
(b) 압전변형률의 주파수응답



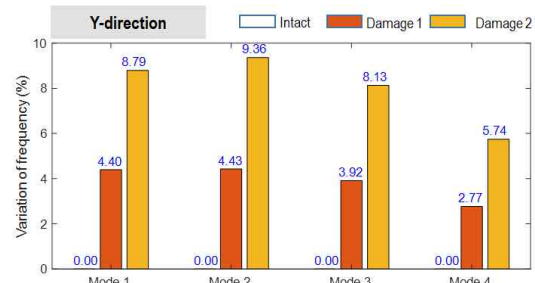
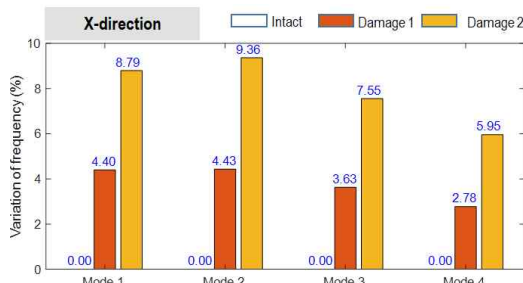
(c) PSC 보의 전역적 진동모드

그림 1-1-16 앵커헤드의 압전 동적변형률 응답 및 주파수 응답(비손상시)

- 정착부 앵커헤드에서 측정된 압전 동적변형률이 구조물의 전역적 상태변화를 감지할 수 있는 지를 분석하였음. 구조물의 전역적 손상으로서 1) 비손상(Intact), 2) 10% 강성도 감소(Damage 1), 3) 20% 강성도 감소(Damage 2)를 모사하였으며, 앵커헤드에서 동적변형률 응답을 추출하였음.
- 손상도가 커짐에 따라 동적변형률의 주파수응답 피크가 왼쪽으로 이동하였으며, 변형률 응답 방향에 따라 변화를 감지하는 민감도에 차이가 있었음(그림 1-1-17(a)). 또한, 상대적으로 저차 모드의 응답에서 변화를 민감하게 감지하였음(그림 1-1-17(b)). 상기의 결과로부터 정착부의 앵커헤드의 동적변형률 응답으로부터 구조물의 전역적 손상 감지가 가능할 것으로 판단됨.



(a) 손상에 따른 동적변형률의 주파수응답 변화



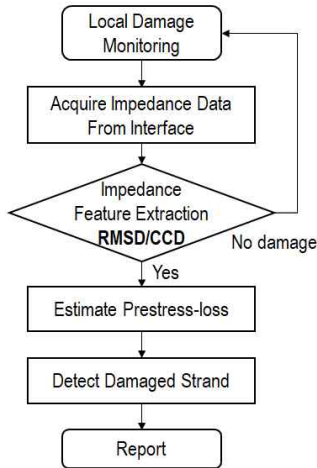
(b) 주파수 응답 특성의 정량적 변화

그림 1-1-17 텐던 정착부의 손상에 따른 압전 동적변형률의 주파수응답 특성 변화

1.1.3 기전 임피던스와 동적변형률의 병렬이용을 통한 긴장재 정착부 손상감지 기법

□ 임피던스 신호의 RMSD/CCD 분석을 통한 국부손상 감지기법

- 그림 1-1-18은 임피던스 신호의 RMSD/CCD 분석을 통한 국부손상 감지 과정 기법의 Flow Chart임. 전체 4 단계로 구성되며, 1) 인터페이스로부터 임피던스응답 측정, 2) 임피던스 응답의 RMSD 및 CCD 계산, 3) 긴장력 변화 추정, 4) 손상된 강연선 위치 감지. 2단계에서 응답신호의 변화가 없는 경우에는 비손상 상태로 판정됨. 손상 여부 판단 시, Control Chart 해석을 통해 임피던스 응답의 RMSD 및 CCD 값이 일정 수준 이상을 벗어나면 손상이 발생한 것으로 간주함.



❖ Root-Mean-Square-Deviation Index (Sun et al. 1995)

$$RMSD(Z, Z^*) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [Z^*(\omega_i) - Z(\omega_i)]^2}{\sum_{i=1}^N [Z(\omega_i)]^2}}$$

❖ Correlation Coefficient Deviation (Zagrai and Giurgiutiu 2001)

$$CCD = 1 - \frac{1}{\sigma_Z \sigma_{Z^*}} E \{ [\text{Re}(Z_i) - \text{Re}(\bar{Z})] [\text{Re}(Z_i^*) - \text{Re}(\bar{Z}^*)] \}$$

❖ Control Chart Analysis

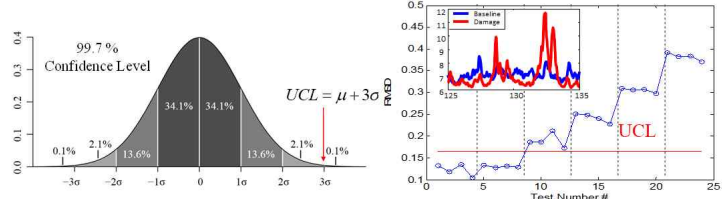


그림 1-1-18 임피던스 신호의 RMSD/CCD 기반 국부손상 감지 기법

□ 동적변형률 신호의 주파수영역 분석을 통한 전역적 진동특성 추출 기법

- 동적변형률 신호의 주파수응답 기반 진동모드 추출기법은 그림 1-1-19와 같은 4단계 과정을 통해 수행되며, 1) 인터페이스로부터 동적변형률 계측, 2) 주파수영역 분석(FDD 기법)을 통한 모드특성 추출, 3) 손상 위치 감지, 4) 손상크기 추정. 2단계에서 손상이 없는 것으로 판단될 경우, 이전의 단계를 반복 수행함.

Frequency-domain Decomposition (FDD) for Frequency and Mode Shape Extraction

Step 1: Establish PSD Matrix $S_{xx}(\omega)$

Step 2: Calculate singular value decomposition (SVD)

Step 3: Extract natural frequency & mode shape

$S_{xx}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & \dots & S_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1}(\omega) & \dots & S_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$

SVD $\rightarrow U^T(\omega) \Lambda(\omega) V(\omega)$

Mode-shapes $U^T(\omega)$ Natural Frequencies $\Lambda(\omega)$

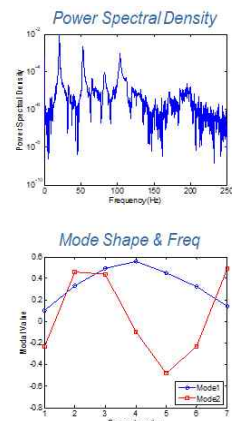
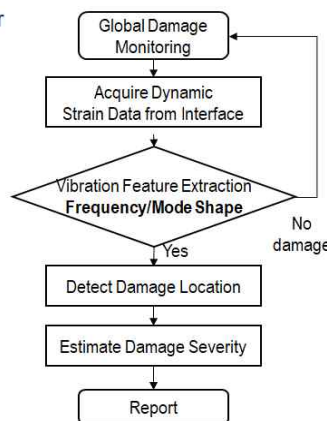


그림 1-1-19 동적변형률 신호의 주파수응답 기반 진동모드특성 추출 기법

□ 임피던스와 동적변형률을 동시 적용하는 국부/전역적 손상탐색 기법

- 앞서 1.2의 내용을 바탕으로 임피던스 응답과 동적변형률을 동시에 적용하여 국부 및 전역적 손상탐색이 가능함. 국부/전역적 손상탐색 기법은 그림 1-1-20과 같이 두 기법의 병렬 구성을 통해 수행될 수 있음.
- 정착부 앵커의 임피던스 응답으로부터 국부손상을 감지하며, 앵커의 동적변형률 응답으로부터 구조물의 전역적 상태변화를 손상을 감지할 수 있음. 한개의 PZT 압전센서로부터 임피던스 응답 및 동적변형률을 측정함에 따라, 국부/전역적 손상탐색을 수행할 수 있음

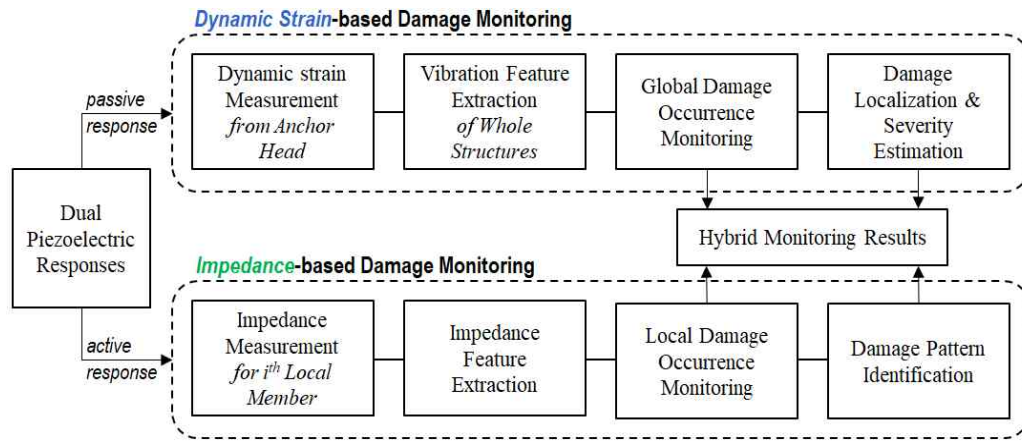


그림 1-1-20 임피던스와 동적변형률의 병렬적 이용을 통한 국부/전역적 손상탐색 기법(핵심성과 1-① 목표 달성)

□ 신호응답에 미치는 온도영향 분석 및 보정 기준 설정

- 임피던스 응답에 미치는 온도영향은 그림 1-1-21의 PSC 거더 모형에 대하여 수치 및 실험적으로 분석되었음. 긴장력이 일정할 때 6~22℃의 온도변화 조건 및 온도가 일정할 때 99~138kN의 긴장력 변화 조건에 대한 임피던스 신호를 계측하고 주파수응답 변화를 분석하였음.

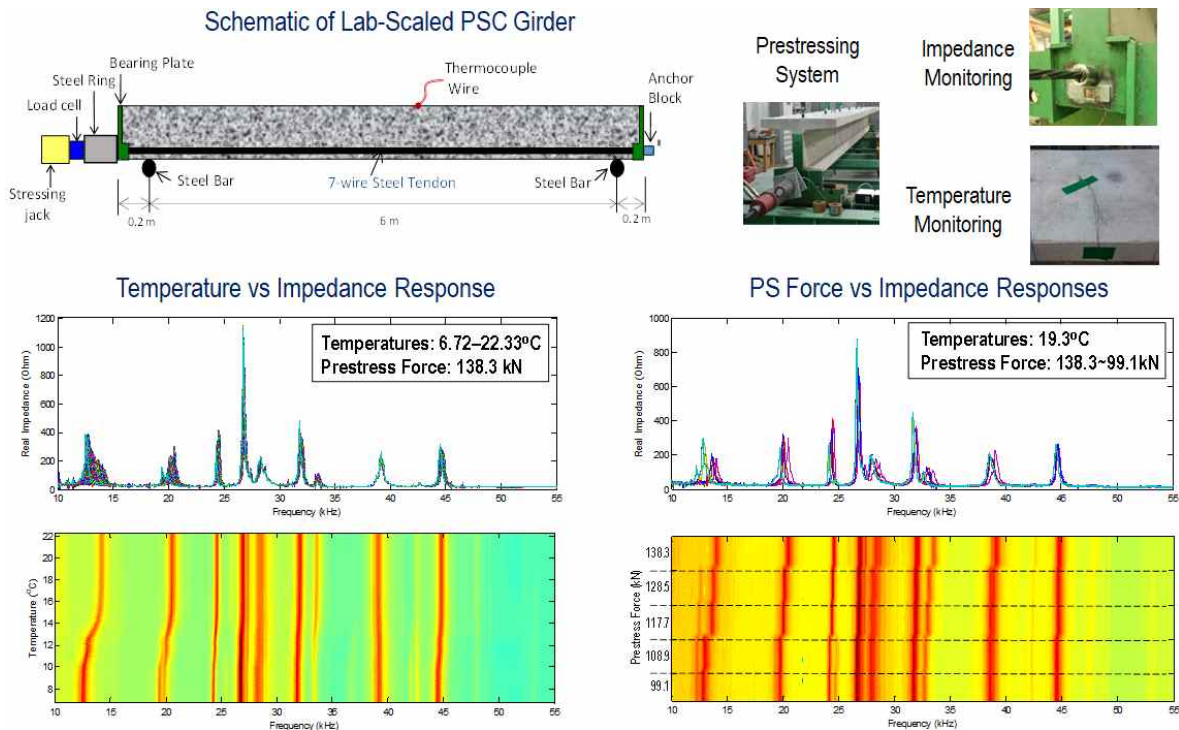
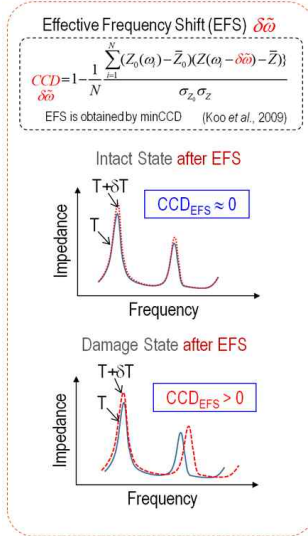


그림 1-1-21 (기존 연구결과) 텐던 정착부의 임피던스 응답에 미치는 온도영향 분석 실험

- 온도변화 조건의 경우, 첫 번째 및 두 번째 peak 주파수의 변화가 가장 두드러지게 나타났으며, 12~14℃의 온도변화 구간에서 상대적으로 큰 변화가 발생하였음. 긴장력 변화 조건의 경우, 피크 주파수의 변화가 상대적으로 선형적으로 변화하였음. 온도변화에 의한 응답신호의 변화는 손상에 의한 것으로 오인될 수 있음. 또한, 손상이 발생했으나 온도효과에 가려져 비손상으로 오인될 수 있음.
- 본 연구에서는 온도보정을 위해 EFS(effective frequency shift) 기법을 선정하였음. EFS 기반 온도보정 알고리즘은 다음의 과정을 통해 수행됨. 1) 다양한 온도조건에 대한 비손상 및 손상상태의 임피던스 응답 측정, 2) 온도 보정에 적합한 주파수대역 선정, 3) 선정된 주파수대역에 대한 임피던스 응답의 CCD_{EFS} 계산, 4) Control chart 분석을 통해 손상발생 여부를 결정할 상한관리치(UCL) 설정.
- 그림 1-1-21의 PSC 보에 대한 장기간 긴장력 실험을 통해 온도 변화시의 임피던스 응답의 변화를 모니터링하였으며, EFS 기법의 온도보정 성능을 검증하였음. 그림 1-2-22는 임피던스 주파수 대역별 온도 민감도를 분석하고, EFS를 통해 온도보정을 수행하여 긴장력을 감지한 결과임. 온도 변화와 긴장력 변화가 동시에 발생하는 경우, EFS기법을 통한 온도보정을 통해 텐던 긴장력 변화를 매우 정확하게 식별하였음.

EFS-based Temp. Compensation



Verification of EFS-based Temp. Compensation

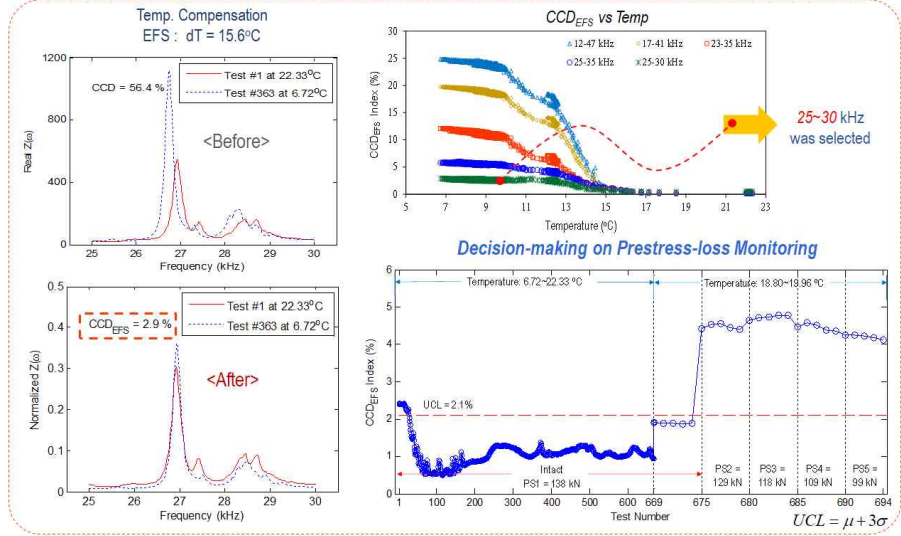


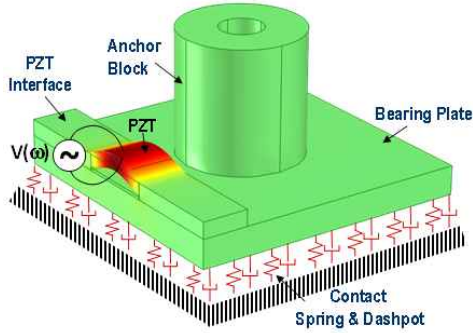
그림 1-1-22 텐던 손상 모니터링에 대한 EFS 기반 온도보정 기법의 성능 검증

1.2 보강재-압전센서 복층 인터페이스 제원 및 정착부 웨어러블 매커니즘 설계

1.2.1 기전 임피던스/동적변형률용 인터페이스의 구조제원 특성 모델링

□ PZT 인터페이스-정착부 연동 모델링 및 임피던스 응답 모델링

- PZT 인터페이스는 진동판 및 고정부로 구성된 인터페이스에 가진/검진을 위한 PZT 센서가 부착된 형태이며, 그림 1-2-1(a)은 앵커블록과 지압판으로 구성된 정착부와 PZT 인터페이스의 2자유도 구조연동 모델임. PZT 인터페이스와 지압판은 서로 부착되어 있으므로, PZT 센서에 전압이 인가되면 PZT의 변형에 의한 가진력이 구조물에 전달됨. 이로 인한, 구조물의 응답은 인터페이스를 통해 PZT의 임피던스 응답을 발생시킴.



(a) PZT 인터페이스-정착부 구조 연동 모델

▪ Dynamic Stiffness Matrix

$$\begin{bmatrix} K_{11}(\omega) & K_{21}(\omega) \\ K_{12}(\omega) & K_{22}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_i \\ X_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 m_i + i\omega c_i + k_i & -i\omega c_i - k_i \\ -i\omega c_i - k_i & -\omega^2 m_s + i\omega(c_i + c_s) + (k_i + k_s) \end{bmatrix}$$

▪ Resultant Mechanical Impedance

$$\bar{Z}(\omega) = \frac{F_i}{\dot{X}_i} = \frac{K_{11}(\omega)K_{22}(\omega) - K_{12}^2(\omega)}{i\omega K_{22}(\omega)}$$

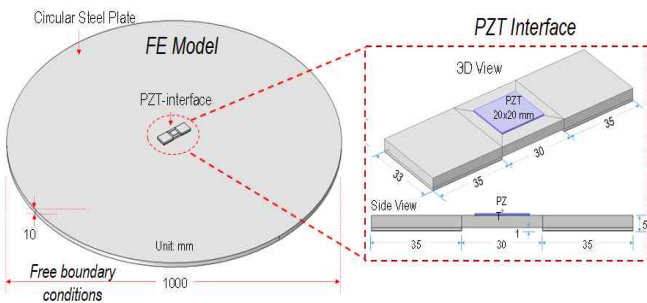
(b) 구조 연동 모델의 강성행렬 및 임피던스 응답

그림 1-2-1 PZT 인터페이스-정착부 구조 연동 모델링 및 임피던스 응답 모델링

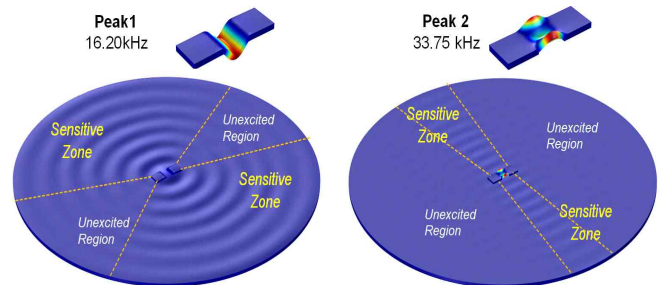
- PZT 인터페이스-정착부 연동 구조시스템의 동적 강성행렬은 그림 1-2-1(b)와 같으며, PZT 인터페이스의 임피던스 응답은 강성행렬로부터 $\bar{Z}(\omega)$ 식으로 구할 수 있음. 이때, 대상구조물에 해당하는 지압판의 배면은 스프링 및 감쇠기로서 모델링하였음.

□ PZT 인터페이스-정착부의 임피던스 응답 파전달 해석

- 그림 1-2-2(a)와 같은 유한요소 해석을 통해 PZT 인터페이스의 정착부내 위치에 따른 임피던스 응답의 민감도를 분석하였음. 이를 위해 PZT 인터페이스가 부착된 원형의 강판을 모델링하고, PZT 임피던스 응답의 파전달 해석을 수행하였음.
- 그림 1-2-2(b)와 같이 PZT 인터페이스의 1차 및 2차 진동모드와 대응되는 Peak 1 및 Peak 2의 임피던스 특성에 대하여 파전달 해석을 수행하였음. 압전효과에 의한 파 전달의 주된 방향은 주로 PZT 인터페이스의 길이 반대 방향으로 관찰되었음. Peak 1의 경우 파 전달 효과가 크고 넓게 나타났으며, Peak 2의 경우 파 전달효과가 작고 좁게 나타났음.



(a) PZT 인터페이스-정착부 유한요소모델



(b) 임피던스 응답의 파전달 해석

그림 1-2-2 PZT 인터페이스-정착부 임피던스 응답의 파전달 해석

- 파전달 해석 결과를 바탕으로 주파수 대역별 신호감지 민감도를 분석하였음. 그림 1-2-3과 같이 센싱 민감도는 Peak 1의 주파수 대역이 가장 큰 것으로 분석되었음. 실제 구조물에 적용 시, 이 같은 주파수 대역별 센싱 민감도 분포에 따라 PZT 인터페이스의 부착 위치를 고려하여야 할 것으로 분석됨.

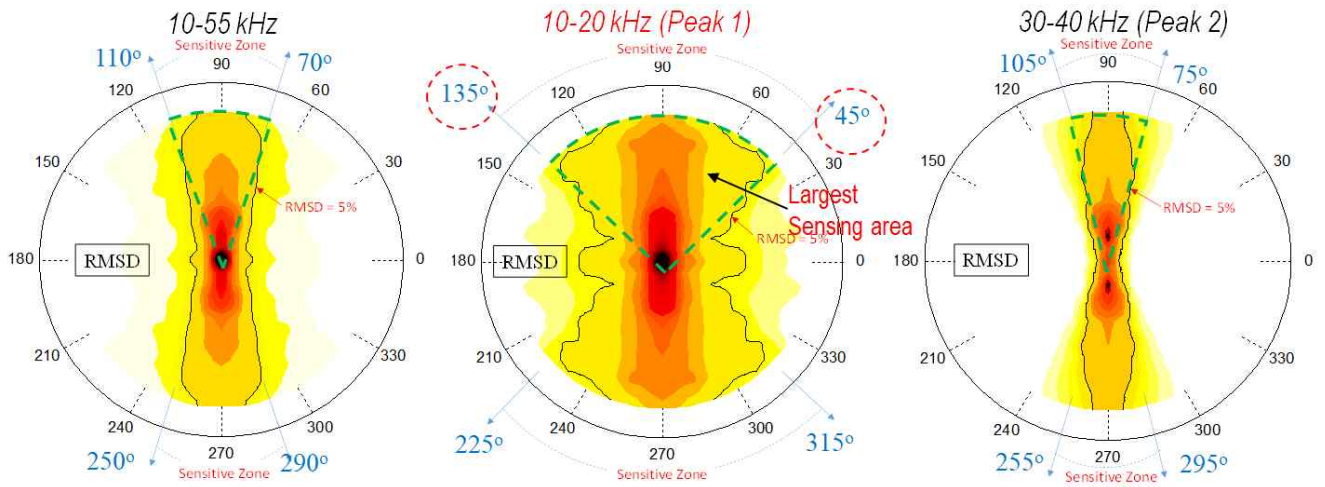


그림 1-2-3 PZT 인터페이스의 주파수 대역별 신호감지 민감도 해석

□ PZT 인터페이스의 제원에 따른 임피던스 응답 해석 및 손상유발 민감도 분석

- 구조물 응답에 민감한 인터페이스의 형상 재질, 경계조건에 따른 임피던스 응답을 해석하였음. 이를 위해, 그림 1-2-4와 같은 텐던 정착부(실제 7홀 앵커헤드)의 1/4 유한요소모델을 이용하였음. 유한요소모델은 앵커헤드와 지압판으로 구성되어 있으며, 앵커헤드의 측면에 PZT 인터페이스를 모델링하였음. 인터페이스 형상에 대한 변수로서 인터페이스 진동판의 길이($L_{flexible}$), 진동판의 두께(t_{FRP}), 진동판의 폭(b_{FRP})을 고려하였으며, 인터페이스 재료에 대한 변수로서 재료탄성계수(E_{CFRP})를 고려하였음.
- 그림 1-2-5와 같이 인터페이스 형상 및 재료에 따른 임피던스 응답을 분석하였음. 진동판의 길이와 두께가 증가함에 따라 응답 피크가 오른쪽으로 이동하였으며, 폭이 증가함에 따라 피크가 왼쪽으로 이동하였음. 또한, 인터페이스의 탄성계수가 증가함에 따라 피크가 오른쪽으로 이동하였음.
- 손상유발 구조거동 변화에 민감한 인터페이스의 제원을 분석하기 위해, 형상 및 재료에 따른 손상 민감도를 분석하였음. 이때, 1번 강연선이 파단된 경우를 모사하였음. 비손상과 손상 상태에 대한 임피던스 응답으로부터 인터페이스의 형상 및 재질별 RMSD 분석을 수행하였음. 그 결과, 진동판의 길이($L_{flexible}$) 및 두께(t_{FRP})가 증가할수록 손상민감도가 크게 나타났고, 진동판의 폭(b_{FRP})이 감소할수록 손상민감도가 크게 나타났음. 이때, 진동판의 두께에 따른 손상민감도는 비선형적으로 변화하며 두께가 얇아질수록 손상민감도는 크게 증가하였음. 또한, 인터페이스 재료의 탄성계수(E_{CFRP})가 증가할수록 손상민감도가 약간 증가하였음.

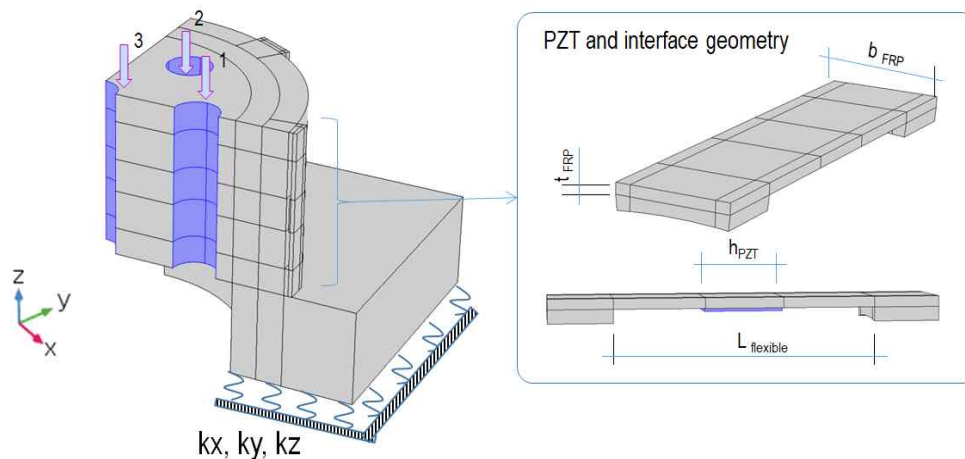
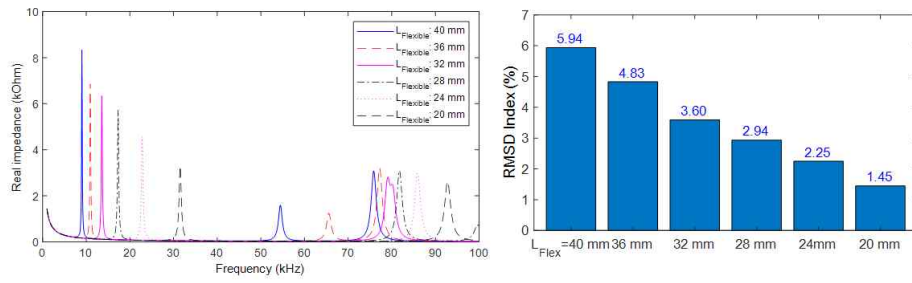
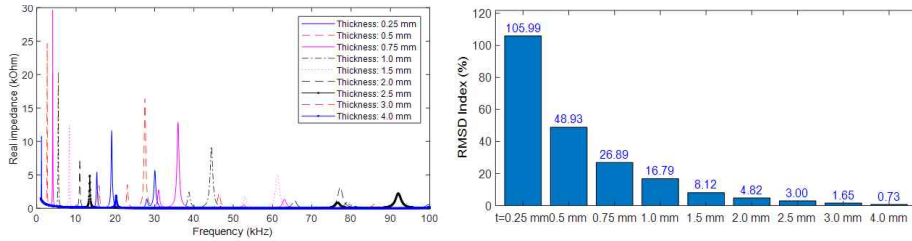


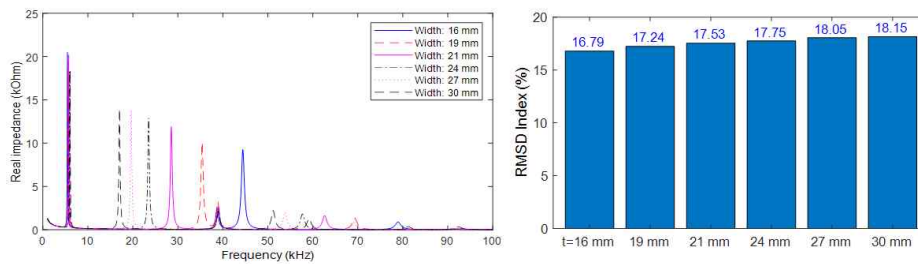
그림 1-2-4 PZT 인터페이스의 응답해석을 위한 텐던 정착부 모델



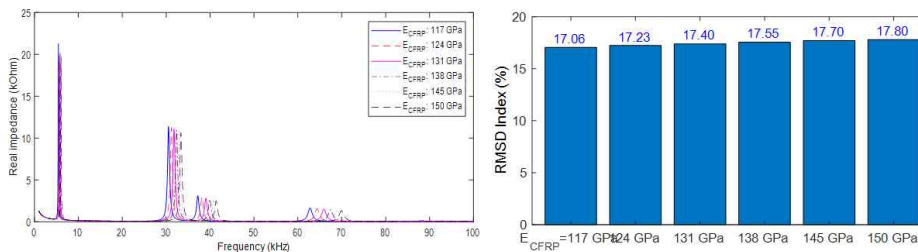
(a) 인터페이스 진동판의 길이에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도



(b) 인터페이스 진동판의 두께에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도



(c) 인터페이스 진동판의 폭에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도



(d) 인터페이스의 재료(탄성계수)에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도

그림 1-2-5 PZT 인터페이스의 형상 및 재료 특성에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도

□ PZT 인터페이스의 제원에 따른 동적변형률 응답해석 및 손상유발 민감도 해석

- 정착부의 압전 동적변형률 응답해석 결과는 앞서 1.2.4에 설명되었음. (PZT 인터페이스의 제원에 따른 동적변형률의 손상 민감도 분석은 세부연구내용 2의 모형실험연구에서 상세 분석되었음. 이는 수치해석을 통해 변형률 신호의 민감도를 식별하기 어려운 문제에 있음.)
- 그림 1-2-6은 콘크리트 정착부와 텐던 앵커블록의 동적변형률 응답을 수치해석한 예이며, 이로부터 구조물의 전역적 응답과 앵커블록의 국부 응답의 상관관계를 분석하였음.

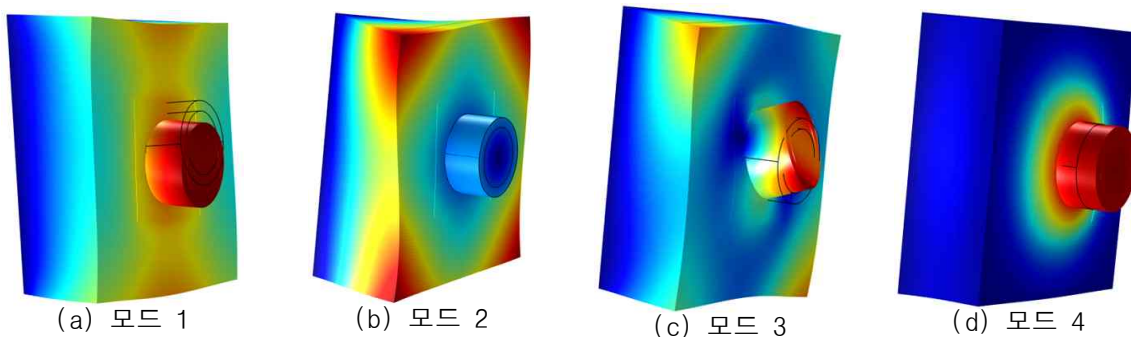
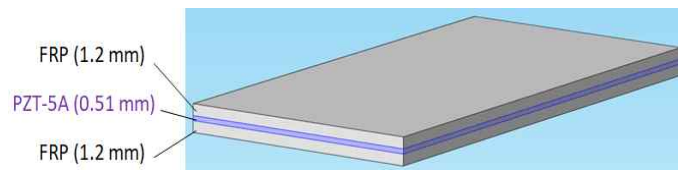


그림 1-2-6 콘크리트 정착부와 앵커블록의 동적변형률 응답 해석

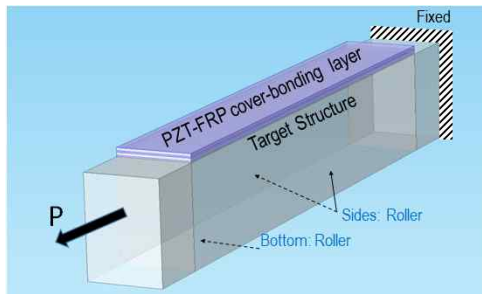
1.2.2 복층 웨어러블 인터페이스의 제원 설계

□ 압전 PZT와 피복층/부착층 제원에 따른 압전응답 분석

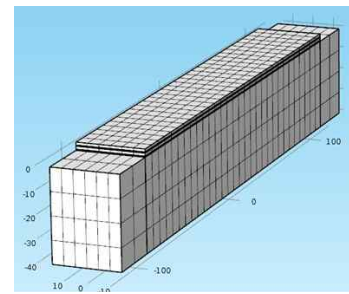
- 복층 웨어러블 인터페이스를 구성하는 압전 PZT, 피복층 및 부착층의 제원에 따른 압전응답 분석을 수행하였음. 이를 위해 복층 웨어러블 구조가 대상 구조물에 부착되었을 때 웨어러블 인터페이스 내 PZT의 압전응답이 대상 구조물의 거동을 반영하는지에 대해 검토하였으며, 2.2.3 및 2.2.4에서 피복층 및 부착층의 제원에 따른 상세 분석을 각각 수행하였음.
- 그림 1-2-7(a)와 같이 FRP로 피복된 복층 웨어러블 PZT 인터페이스-구조물 압전응답을 분석하였음. 유한요소모델에서 인터페이스 및 대상구조 사이의 부착층을 별도로 모델링하였음. 그림 1-2-7(b)과 같이 인터페이스가 부착된 보에 대하여 인장하중을 적용하여 PZT의 압전 변형률 응답을 분석하였음. 그림 1-2-7(c)의 유한요소모델에서 웨어러블 인터페이스의 각 층 구조에 적용된 재료 특성은 표 2-1과 같음.
- 그림 1-2-8은 인장하중을 받는 보와 피복된 복층 웨어러블 구조의 압전 변형률 응답을 나타냄. 보에 작용하는 인장하중이 증가하면 그림 1-2-8(a)~(e)와 같이 응력-변형률이 발생하며, 복층 웨어러블 구조 내의 PZT에서 그림 1-2-8(f)와 같은 압전 변형률이 발생함. 인장하중 증가에 따른 PZT의 압전응답의 변화는 대상 구조물의 거동을 반영하는 것으로 검토되었음.



(a) 복층 웨어러블 인터페이스 구조



(b) 인장하중 하의 복층 웨어러블 구조

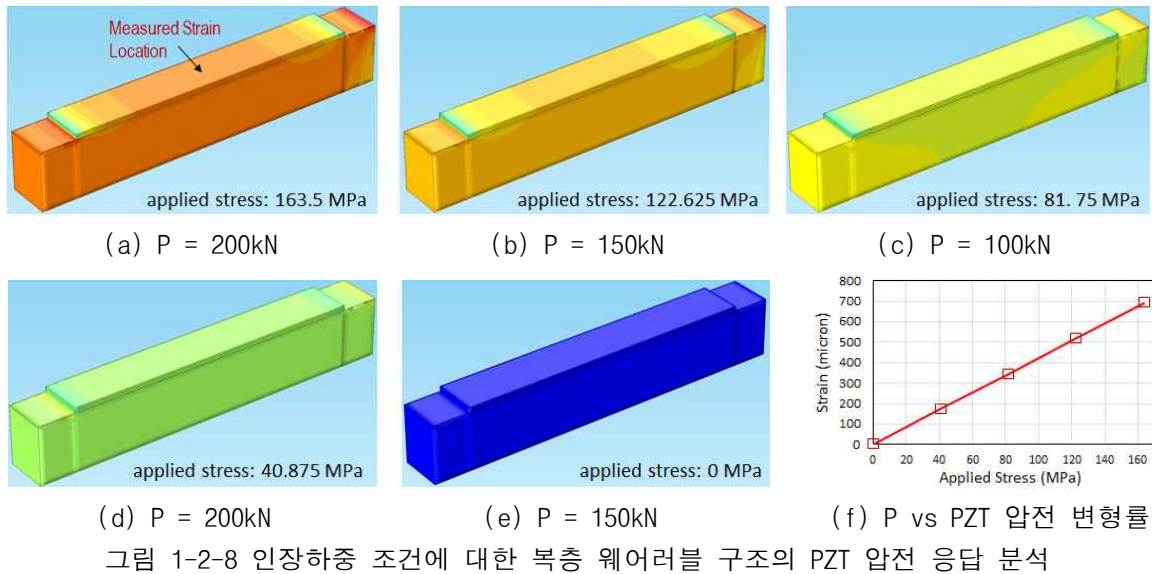


(c) 복층 웨어러블 구조 유한요소모델

그림 1-2-7 복층 웨어러블 인터페이스 구조의 유한요소 모델

표 2-1 웨어러블 인터페이스의 각 층 재료의 특성

Material properties	피복층(FRP)	PZT	부착층
Elastic modulus (N/m ²)	1.65E+11	-	1.09E+10
Shear elastic modulus (N/m ²)	6.11E+10	-	3.94E+09
Poisson ratio	0.35	-	0.38
Density (kg/m ³)	1600	7750	1700
Thickness(mm)	1.2	0.00051	0.5
Elastic compliance s ₃₁ (m ² /N)		-7.22E-12	
Dielectric coupling constant d ₃₃ (C/N)		3.74E-10	
Permittivity e ₃₁ (Farad/m)		1700	
Mechanical loss factor g		0.0125	
Dielectric loss factor d		0.015	



□ 정착부의 구조특성 변화에 민감한 인터페이스 응답 분석

- 앞서 2.1.3에 설명된 것과 같이 정착부의 특성변화에 민감한 PZT 인터페이스의 응답이 주파수영역에서 분석되었음. 이를 통해 대상 구조물의 제원에 따른 임피던스 응답의 변화를 추정할 수 있음. 또한, 그림 1-2-7의 인장하중하의 보 모델에 대하여 복층 웨어러블 인터페이스의 임피던스 응답을 주파수 영역에서 분석하였음. 이를 통해 텐던-정착부 구조에서 긴장력 변화로 인한 앵커부의 구조상태 변화를 분석하고자 하였으며, 긴장력 변화시 복층 웨어러블 인터페이스 내 PZT의 임피던스 응답의 변화를 분석하고자 하였음.
- 3 단계의 인장하중 조건에 대한 임피던스 응답을 추출하였으며, 그 주파수 특성은 그림 1-2-9(a)와 같음. 측정된 주파수범위 내에 3개의 피크가 관찰되었음. 각 피크는 그림 1-2-9(c)의 진동모드에 대응됨. 인장하중의 변화에 따른 임피던스 응답특성을 분석하였으며, 그림 1-2-9(b)와 같이 하중이 감소함에 따라 피크가 왼쪽으로 이동하는 특징이 관찰되었음.

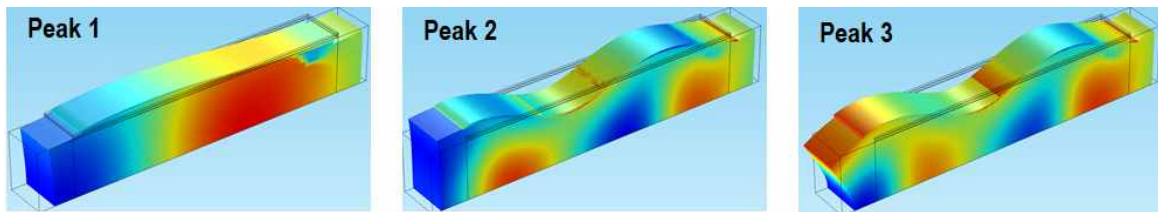
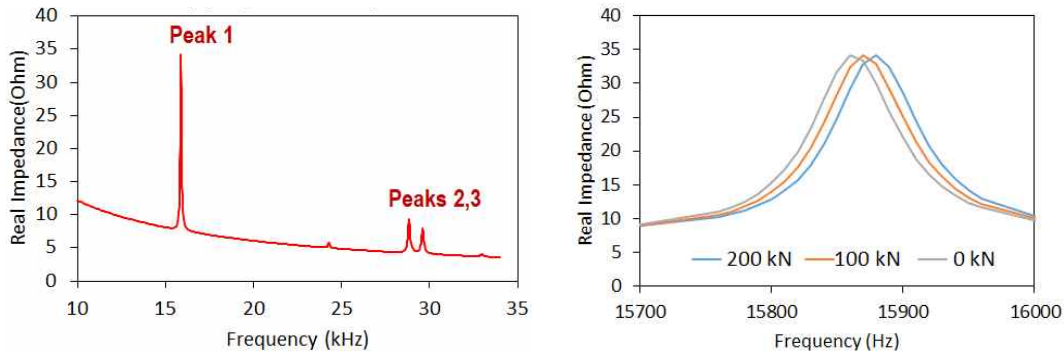


그림 1-2-9 인장하중 변화에 따른 웨어러블 인터페이스의 임피던스 응답 분석

□ 복층 PZT-피복 FRP 융합 신소재의 제원 및 구조응답 민감도 분석

- 복층 웨어러블 인터페이스의 핵심 구조인 피복층 및 부착층의 제원에 대한 구조응답 민감도 분석을 위하여 그림 1-2-10과 같이 인장하중 하에 있는 다층구조 복합체를 유한요소모델링 하였음. 유한요소모델은 피복층(cover layer), 부착층(bonding layer), 대상구조물(host structure)로 구성됨. 피복층의 재료로서 CFRP 및 GFRP를 고려하였으며, 대상구조물은 강재로 모델링하였음. 대상구조물과 부착층의 구조응답 차이를 비교하기 위하여 두 요소에서 인장하중에 대한 변형률 응답을 각각 추출하였음.

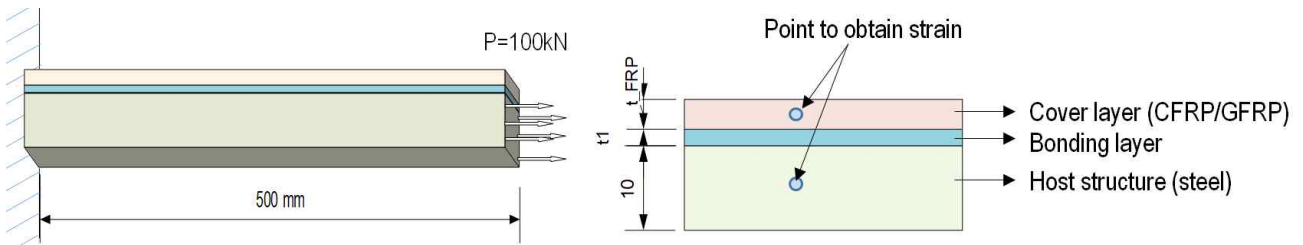


그림 1-2-10 피복층 및 부착층 제원분석을 위한 다층구조 복합체의 유한요소모델

- 그림 1-2-11은 피복층의 재료 및 두께에 따른 변형률을 비교한 것임. 피복층의 두께가 증가할수록 대상구조물의 변형률과 피복층의 변형률 사이에 차이가 증가하였음. 피복층 두께 차이에 대한 변형률 변화는 GFRP보다 CFRP에서 더 크게 발생하였음. 인장응력 증가에 따른 구조물의 응력 변화와 비교할 때, CFRP가 GFRP에 비해 하중전달 성능 측면에서 고 응력상태 하의 정착부에 대한 적용성이 우수한 것으로 분석됨.

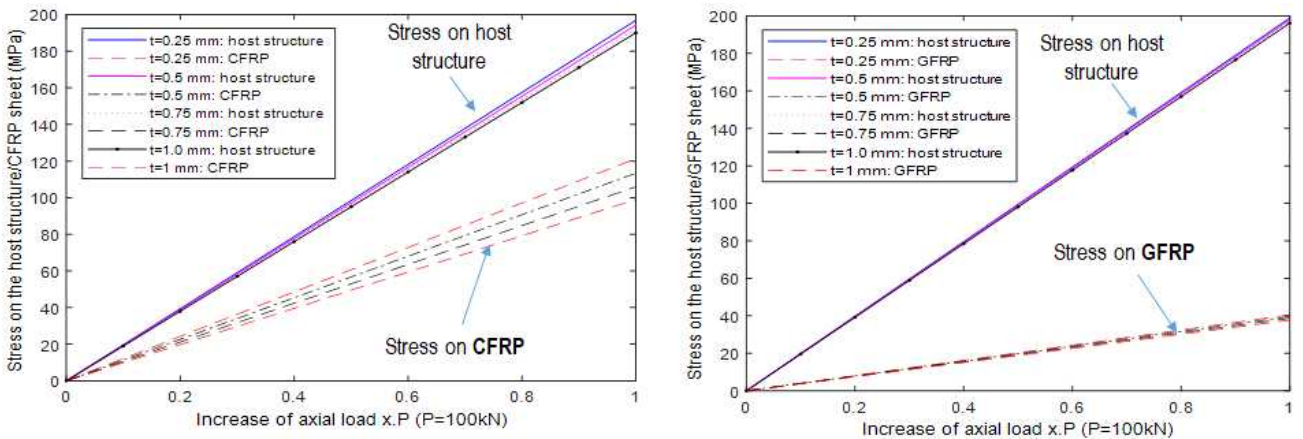


그림 1-2-11 피복층의 재료 및 두께에 따른 다층구조 복합체의 응력 비교

□ 웨어러블 인터페이스의 부착기법 선정 및 부착효과 분석

- 접착제에 의한 웨어러블 인터페이스의 부착성능 분석을 위하여 부착층의 두께 및 강성에 따른 다층구조 복합체의 구조응답을 그림 1-2-12과 같이 비교하였음. 이때, 피복층의 재료로서 CFRP를 고려하였음.
- 부착층의 두께가 증가함에 따라 하중전달 성능은 다소 감소하였으나 큰 차이는 보이지 않았음. 부착층의 강성차이에 따른 하중전달 성능은 고려하지 않아도 될 만큼 그 차이가 미미함에 따라, 상기의 정적 구조 응답 해석결과에서는 부착층의 강성 및 두께가 웨어러블 인터페이스의 성능에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석됨. (이후 기술되는 그림 1-3-1(b)에서 접착제 및 볼트 연결을 웨어러블 기법이 설명됨.)

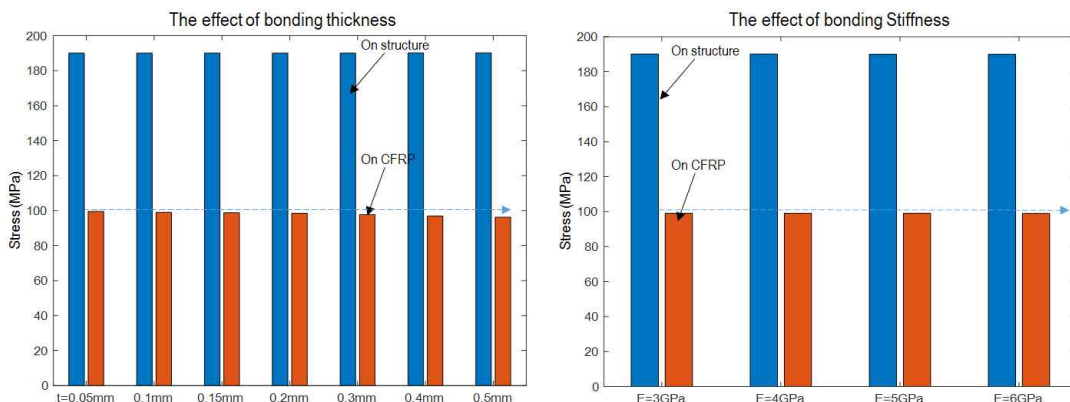


그림 1-2-12 부착층의 두께 및 강성에 따른 다층구조 복합체의 응답 비교

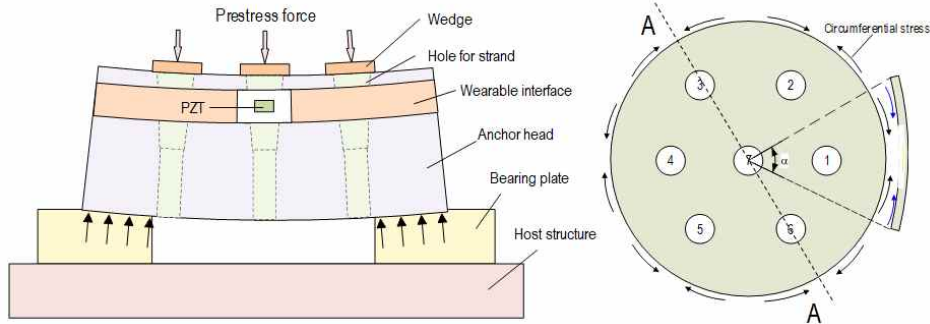
1.2.3 정착부 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계

□ 텐던 손상유발 정착부 응력에 민감한 인터페이스 응답 분석

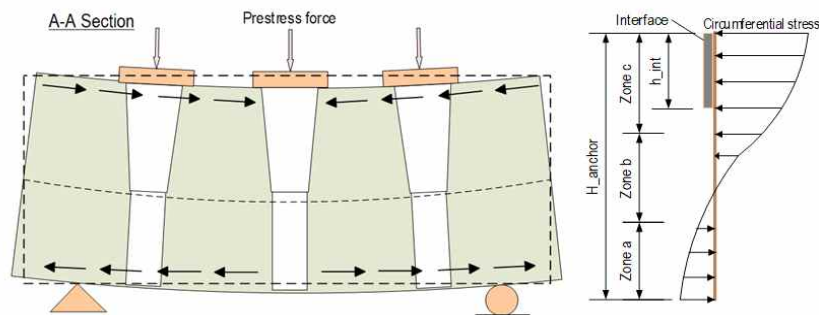
- 텐던 손상 유발 정착부의 주장응력 및 지압응력거동에 대한 임피던스 응답 분석을 위하여 아래에 기술되는 2.3.2의 웨어러블 메커니즘을 바탕으로 텐던 손상에 민감한 인터페이스의 응답을 분석하였음. 상세한 분석 사항은 3.1.2 및 3.1.3에 기술하였음.
- 3.1.2의 결과로부터 앵커헤드용 인터페이스는 진동판 길이 24~30mm, 진동판 폭과 두께는 압전센서의 최적형상을 고려한 최소 치수일 때 텐던 손상에 대해 가장 민감한 것으로 분석되었음. 또한, 3.1.3의 상세 분석 결과로부터 지압판용 인터페이스는 지압판의 가장자리에 위치할 때 콘크리트 정착부 손상에 대해 가장 민감한 것으로 분석되었음.

□ 정착부 주장응력 거동에 민감한 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계

- 다중 강연선 손상 감지용 인터페이스의 웨어러블 메커니즘 분석을 위하여 그림 1-2-13과 같이 정착부의 구조를 도식화하였음. 긴장력이 재하되기 전에 웨어러블 인터페이스가 앵커헤드의 측면에 설치되는 것을 전제로, 긴장력이 재하되기 전까지 앵커헤드 및 인터페이스의 변형이 없고 무응력 상태에 있음.
- 정착부에 긴장력이 재하되면, 앵커헤드의 가장자리가 지압판에 의해 지지되고 앵커헤드는 휨거동 상태에 놓이게 되어, 그림 1-2-13(b)와 같이 앵커헤드의 상부는 압축응력이 발생하며 하부는 인장응력이 발생함. 이에 따라 앵커헤드 표면의 주장응력 분포는 상부에서 하부로 갈수록 압축에서 인장형태로 변화함에 따라 중앙부의 변형률은 매우 낮을 것으로 분석됨.



(a) 앵커헤드용 인터페이스의 웨어러블 구조



(b) 앵커헤드 단면도 및 긴장력에 대한 주장응력 분포도

그림 1-2-13 앵커헤드용 인터페이스의 웨어러블 메커니즘

- 웨어러블 메커니즘을 기반으로 한 단일 PZT 인터페이스와 정착부 간의 구조모델은 그림 1-2-14(a)와 같이 간략화된 임피던스 모델(simplified impedance model, SMI)로 정리할 수 있음. 이는 아래의 식(2-1)의 운동방정식으로 표현될 수 있으며, 이때의 임피던스 응답은 식(2-2)에 의해 구할 수 있음.

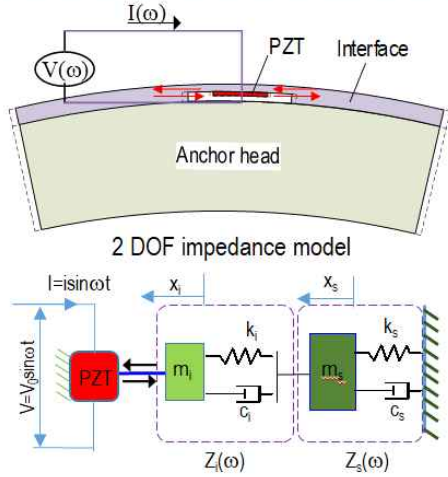
$$\begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_i & -c_i \\ -c_i & c_i + c_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{x}_s \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_i & -k_i \\ -k_i & k_i + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_i \\ x_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_0 e^{i\omega t} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-1)$$

$$Z_s(\omega) = \frac{K_{11}(\omega)K_{22}(\omega) - (K_{12}(\omega))^2}{i\omega K_{22}(\omega)} \quad (2-2)$$

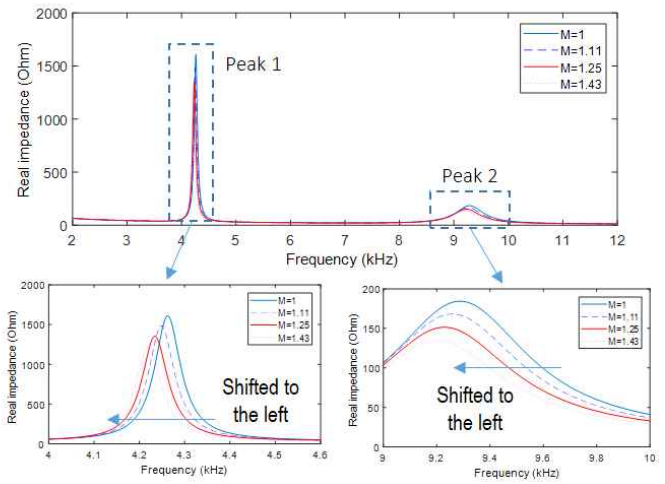
- 부착층에서의 응력은 식(2-3)의 응력계수 M 으로서 고려될 수 있음. 여기서 M이 1인 경우는 비손상 상태로서 응력이 존재하지 않으며, M이 1보다 큰 경우는 대상구조에 압축하중이 작용하며 1보다 작은 경우는 대상구조에 인장하중이 작용하는 것으로 볼 수 있음.

$$Z_T = Z_s \times M \quad (2-2)$$

- 그림 1-2-14(b)는 주장응력 변화에 따른 임피던스 응답의 변화를 해석한 결과임. 이때, 주장응력 변화는 부착층의 응력계수(식(2-2))로서 고려되었으며, 응력계수가 1보다 큰 경우에 대한 임피던스를 검토하였음. 응력계수가 증가할 때(주장응력이 증가할 때), 임피던스 응답의 피크는 좌측으로 이동하는 것이 관찰되었음.



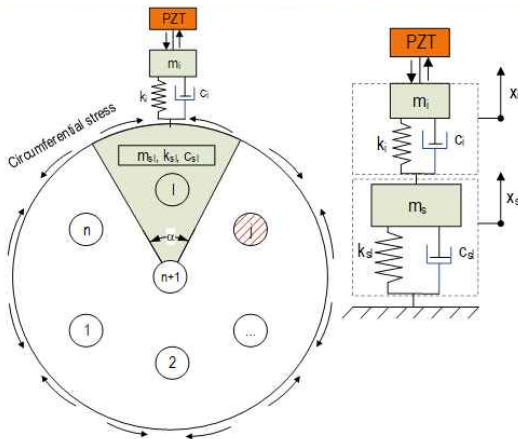
(a) 간략화된 임피던스 모델(SIM)



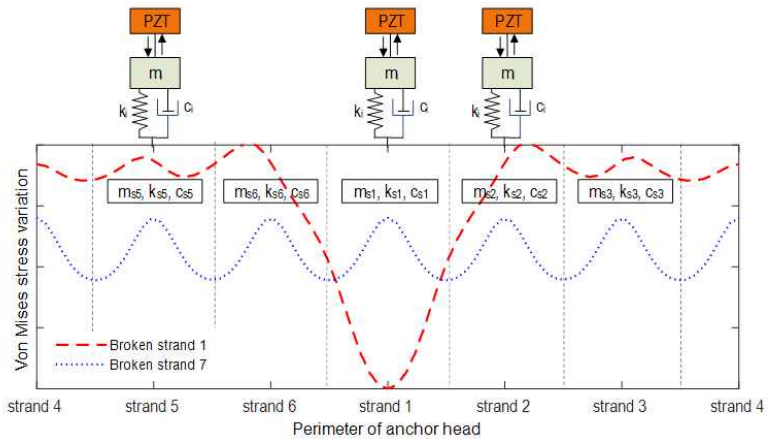
(b) 주장응력변화에 대한 임피던스 응답의 해석적 분석

그림 1-2-14 단일 PZT 인터페이스-정착부 모델 및 주장응력 변화에 대한 임피던스 응답의 해석적 분석

- PZT 센서가 여러 개인 경우에 대한 인터페이스-정착부 구조모델은 그림 1-2-15(a)과 같음. PZT 센서의 개수는 텐던의 강연선 개수에 의해서 결정되며, 각 PZT별 센싱 영역은 앵커헤드의 원주를 PZT 수만큼 등 간격으로 분할한 것과 같음. 각각의 분할된 센싱 영역에 대해서는 별개의 구조 파라미터의 값을 가지며 단일 PZT 시스템으로 다룰 수 있음. 그림 1-2-15(b)는 멀티 PZT의 센싱 영역별 주장응력 분포 예시를 나타낸 것으로써 강연선 손상 위치에 따라 주장응력 분포가 다르게 발생함을 알 수 있음.



(a) 간략화된 임피던스 모델



(b) 강연선 손상에 따른 멀티 PZT의 센싱영역별 주장응력 분포 변화

그림 1-2-15 멀티 PZT 인터페이스-정착부 모델 및 각 PZT별 센싱영역의 주장응력 분포

- 상기의 PZT 인터페이스의 웨어러블 메커니즘 및 1.2.2의 강연선 손상에 대한 텐던 정착부의 손상민감도 분석 결과를 바탕으로 그림 1-2-16과 같이 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 Prototype을 설계하였음. 3.3의 텐던 정착부 모형실험을 위해 제작된 9-strand 앵커헤드를 대상으로 Prototype을 설계하였으며, 멀티 센싱용으로서 8개의 PZT가 고려되었음. 각 PZT는 앵커헤드의 강연선 홀 형상에 맞추어 등 간격으로 배치되었음.

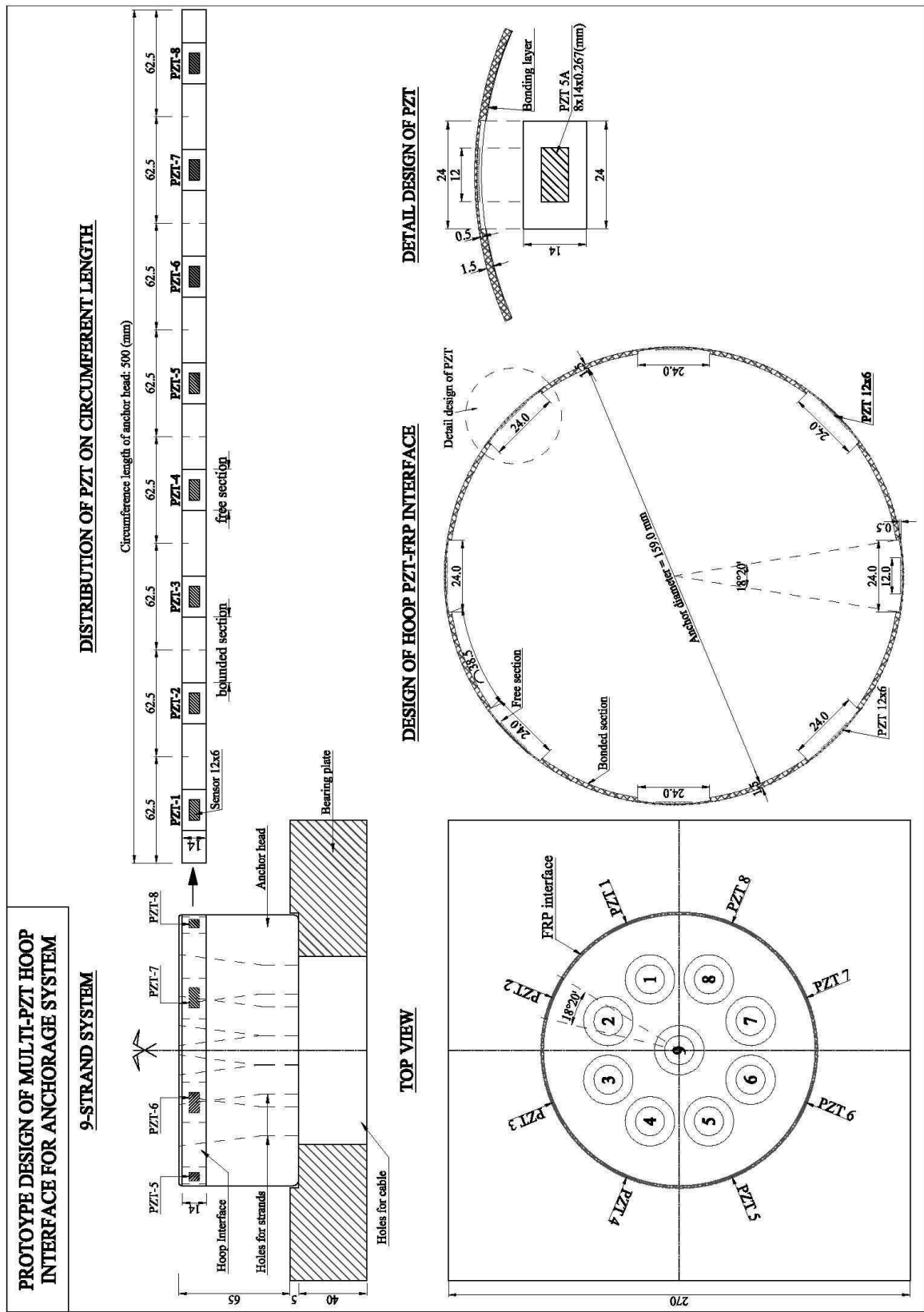


그림 1-2-16 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 Prototype 설계도면(핵심성과 1-② 목표달성㉠)

□ 정착부 지압응력 거동에 민감한 웨어러블 매커니즘 분석 및 Prototype 설계

- 3.1.3의 콘크리트 정착부 손상에 대한 정착부 국부응답의 손상민감도 분석 결과를 바탕으로 그림 1-2-17과 같이 지압판용 웨어러블 인터페이스 Prototype을 설계하였음. PZT 센서는 지압판의 중심을 기준으로 2단 원형 배치하였으며, 9-strand 텐던의 경우를 기준으로 설계되었음.

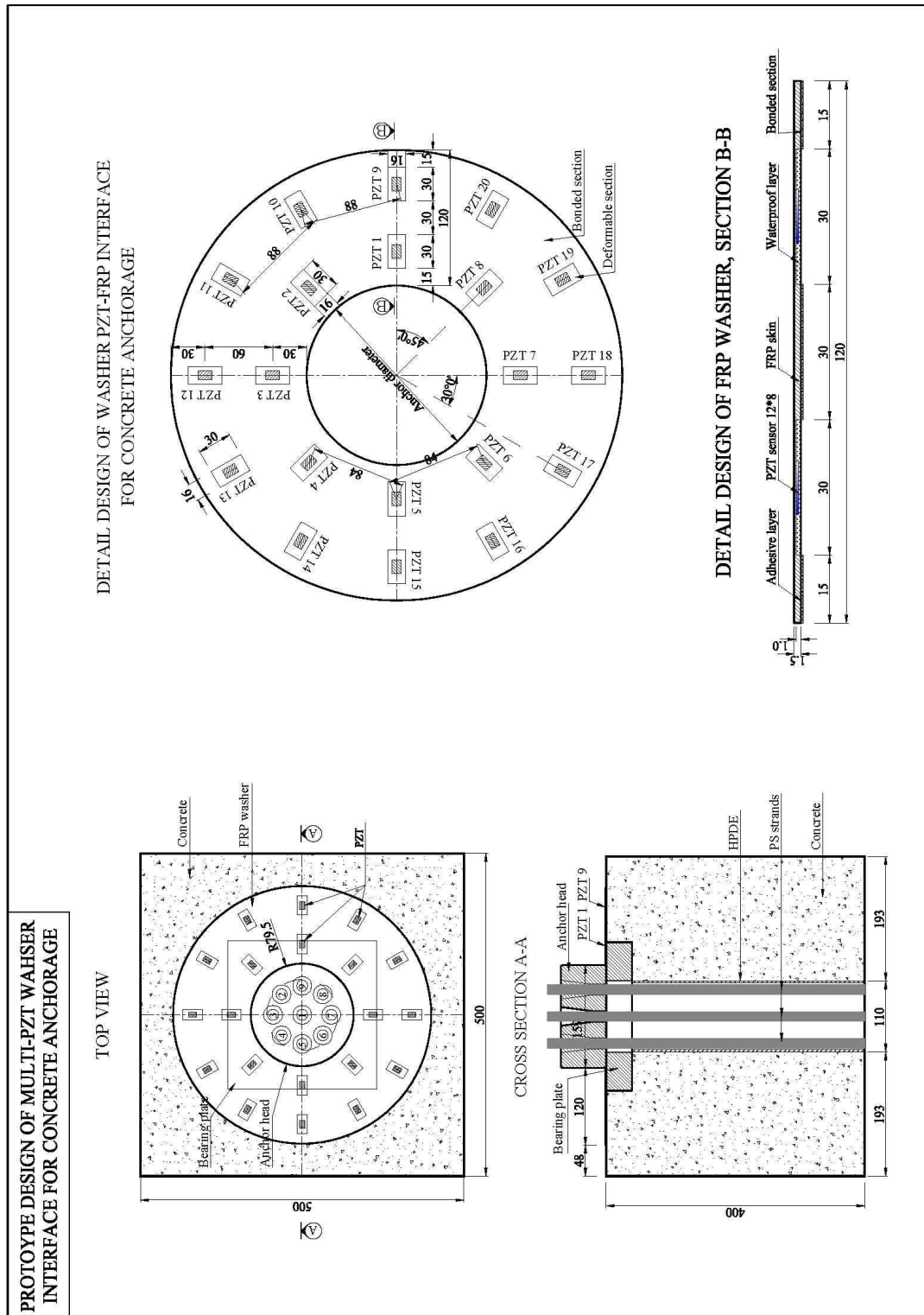


그림 1-2-17 지압판용 웨어러블 인터페이스 Prototype 설계도면(핵심성과 1-② 목표달성⑧)

1.3 웨어러블 압전센서 장치를 통한 강연선과 정착부 파손 감지 기법 정립

1.3.1 웨어러블 인터페이스 장치의 최적위치 분석

□ 텐던 정착부용 웨어러블 PZT 센서 장치의 개념설계

- 그림 1-3-1(a)와 같이, 텐던 정착부용 웨어러블 PZT 센서 장치는 FRP 재료(CFRP/GFRP)의 인터페이스, 압전 센서(PZT/MFC), 부착층(adhesive layer), 방수층(waterproof)으로 구성됨. 압전센서는 인터페이스의 움푹 패인 구조 내에 설치되며, 남은 공간은 실리콘 혹은 에폭시에 의해 방수처리 함.
- 그림 1-3-1(b)와 같이, 웨어러블 장치는 두 가지 방법에 의해 앵커헤드에 설치될 수 있음. 첫 번째 방법(Method 1)은 접착제(adhesive)를 이용하여 한쪽 끝이 열린 장치를 앵커헤드 위에서 아래로 끼우고 굳을 때까지 고정하여 설치함. 두 번째 방법(Method 2)은 볼트체결을 이용하여 웨어러블 장치를 앵커헤드 위에서 아래로 끼운 후 고정함. 인터페이스의 재료인 CFRP/GFRP는 그림 1-3-1(c)와 같이 여러 형태의 제품이 출시되어 있으며, 대상 텐던 정착부에의 적용여건에 따라 선택 가능함.

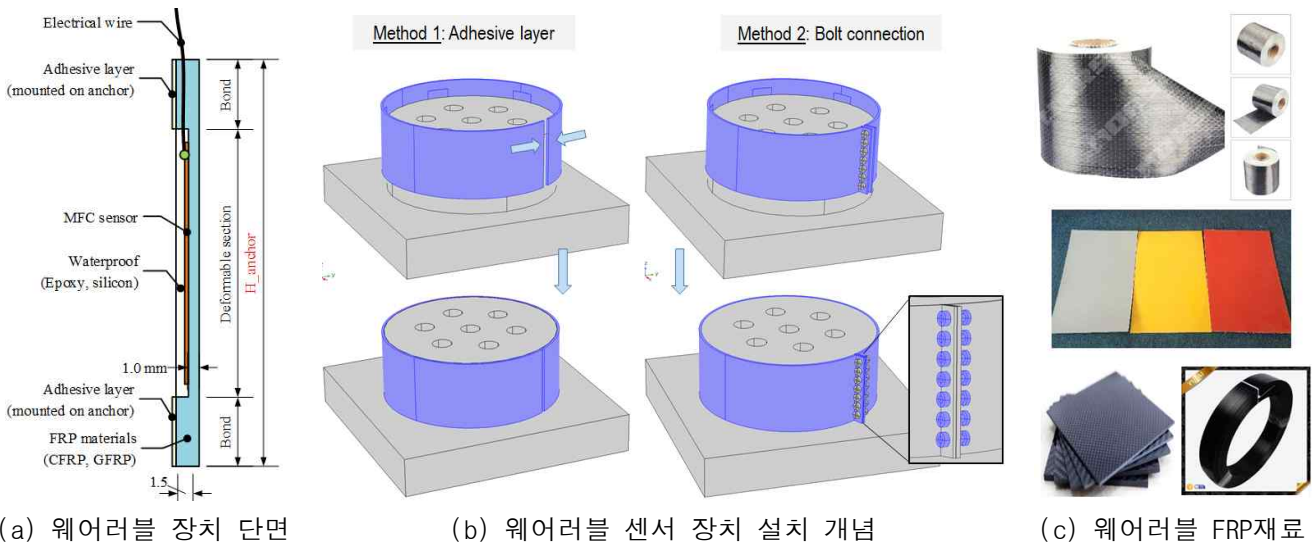
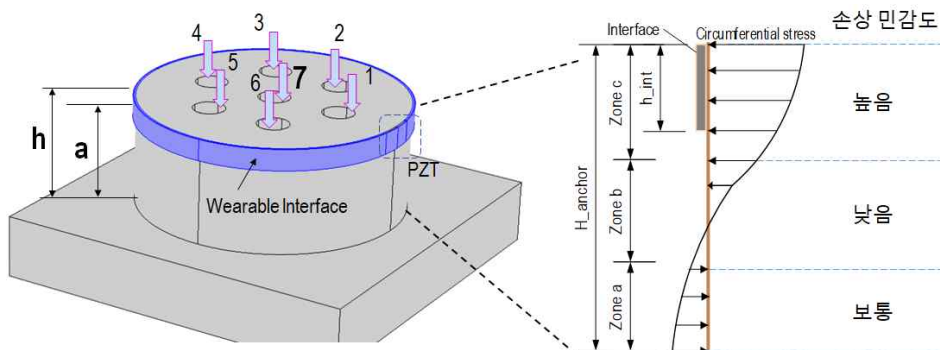
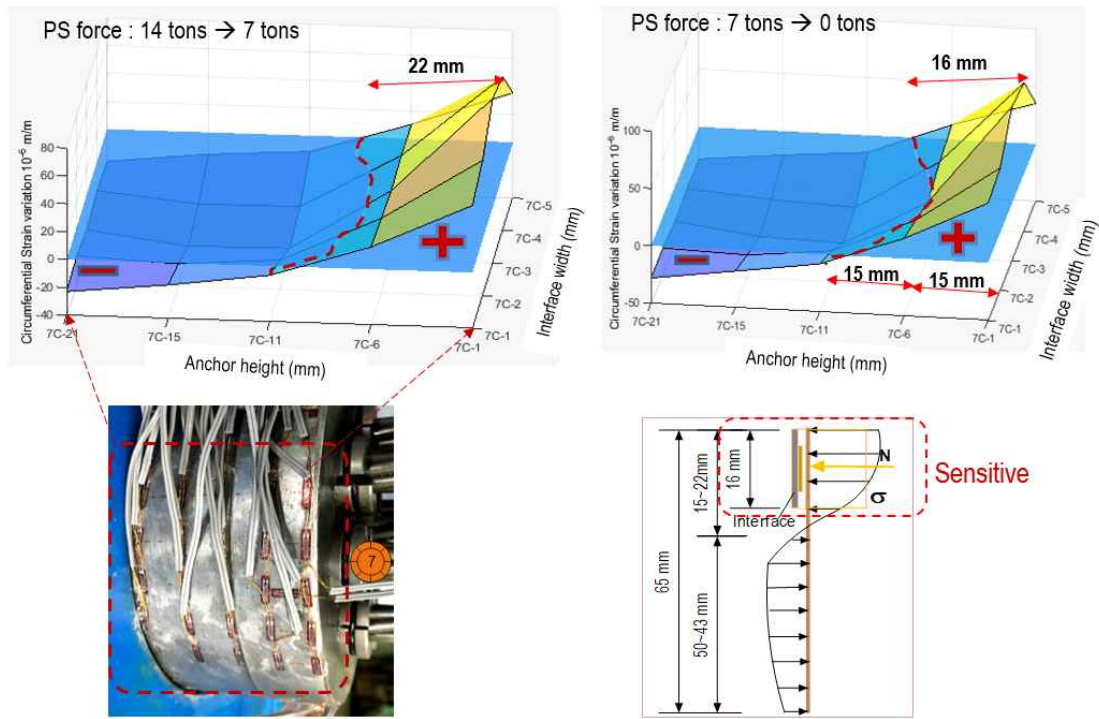


그림 1-3-1 웨어러블 PZT 센서 장치의 개념설계

□ 앵커헤드용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 및 최적 형상 제원 분석

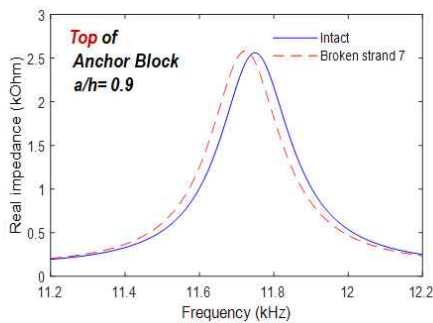
- 그림 1-3-1(a)의 앵커헤드-지압판 유한요소모델을 대상으로 임피던스 해석을 수행하여 앵커헤드용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 분석하였음. 앞서 2.3에 제시된 웨어러블 매커니즘의 응력-변형 해석결과에 따르면 앵커헤드 상단부(Zone c)의 손상민감도가 가장 크고, 중간부(Zone b)가 가장 작을 것으로 분석됨(그림 1-3-2(a)).
- 앵커헤드-지압판 실험모형을 대상으로 변형률 측정을 통해 인터페이스의 손상민감도를 분석하였음. 앵커헤드의 측면에 그림 1-3-2(b)와 같이 주장거동 방향의 변형률을 측정한 결과, 유한요소해석의 결과와 유사하게 앵커헤드의 상단부의 손상민감도가 가장 크며, 중간부가 가장 작은 것으로 분석되었음.



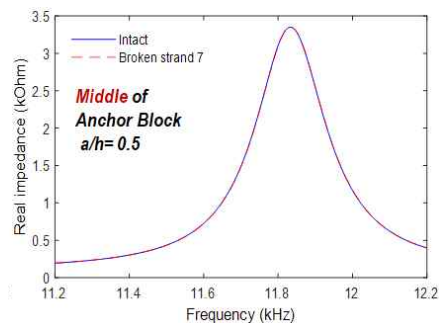


(b) 변형을 측정을 통한 앵커헤드 위치별 손상민감도 분석
그림 1-3-2 앵커헤드-지압판 인터페이스의 위치에 따른 손상 민감도

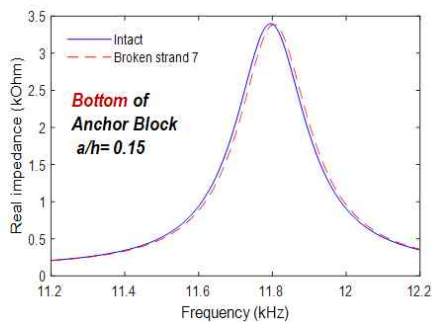
- 앵커헤드용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 분석을 위해 7번(중양) 강연선이 손상조건에 대해 분석하였음. 그림 1-3-3(a)~(c)와 같이 측정 위치(a/h)가 0.9, 0.5, 0.15인 경우에 대하여 손상 유발 임피던스 변화를 비교하였음. 손상에 따른 임피던스 응답의 변화는 $a/h=0.9$ 일 때 가장 크게 발생하였으며, 이를 통해 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치는 상단부에 가까운 곳으로 분석되었음.
- 앵커헤드용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 형상 분석을 위하여 앵커헤드-지압판 유한요소모델(그림 1-3-4(a))의 7번 강연선 손상조건에 대하여 임피던스 응답 및 손상민감도를 분석하였음. 웨어러블 압전센서 장치 중 임피던스 특성에 큰 영향을 미치는 부분은 그림 1-3-4(a)의 진동판 부분(flexible section)임. 따라서 최적 형상 분석을 위한 변수로서 진동판의 길이(L), 폭(W), 두께(t)를 고려하였음.



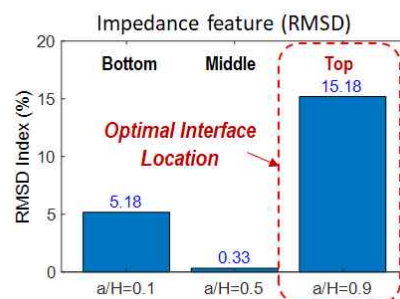
(a) $a/h=0.9$ 일 때



(b) $a/h=0.5$ 일 때



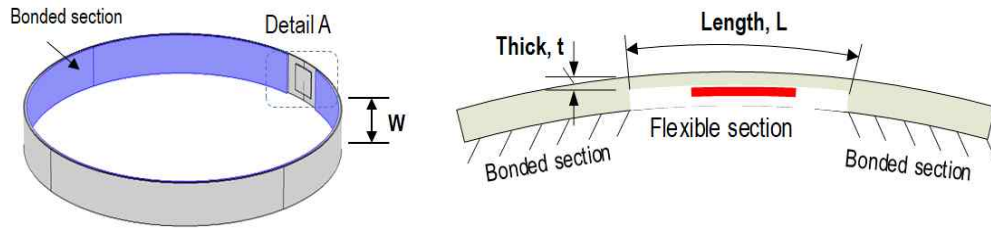
(c) $a/h=0.15$ 일 때



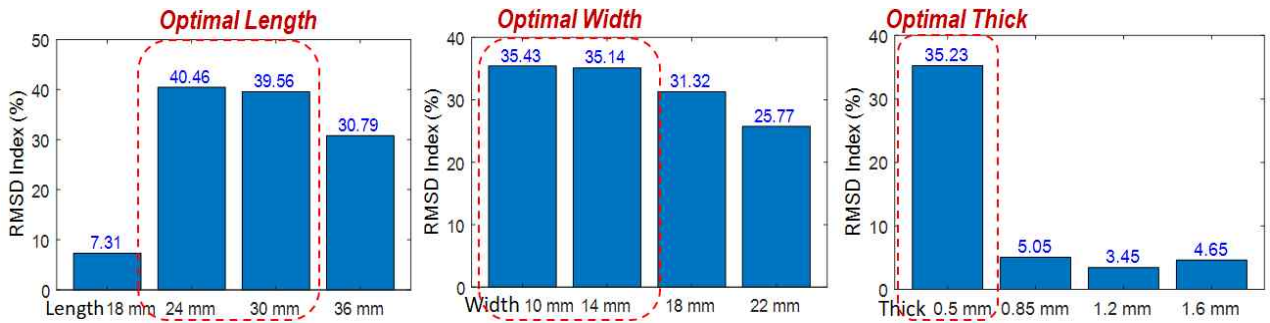
(d) 위치별 RMSD

그림 1-3-3 인터페이스의 위치에 따른 PZT 임피던스 응답의 손상 민감도

- 그림 1-3-4(b)는 각 형상 조건에 대한 임피던스 응답의 RMSD 분석 결과임. 진동판의 길이의 경우 24mm일 때 손상 민감도가 가장 높게 나타났으며, 진동판 폭이 좁을수록 손상민감도가 높게 나타났음. 또한, 진동판의 두께에 따른 손상민감도는 얇을수록 큰 경향을 보였으며, 각 두께별 민감도 편차가 매우 크게 나타났음. 이를 바탕으로 웨어러블 압전센서 장치의 최적형상은 진동판 길이 24~30mm이며, 진동판 폭과 두께는 압전센서의 최적형상(3.1.4 참조)을 고려한 최소 치수로 분석되었음.



(a) 웨어러블 압전센서 장치 유한요소모델 및 최적형상 분석 변수



(b) 손상 민감도 해석을 통한 장치의 최적 형상 선정

그림 1-3-4 웨어러블 압전 센서 장치의 손상민감도 분석을 통한 최적형상 선정

□ 지압판용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치 및 최적 형상제원 분석

- 그림 1-3-5와 같이 지압판용 웨어러블 압전센서 장치가 부착된 정착부를 유한요소모델링하여 임피던스 응답을 통한 콘크리트 균열발생 감지를 분석하였음.
- 압전센서는 지압판의 표면에 설치되고, 앵커헤드용 웨어러블 장치와 동일한 원리로 진동판 구조의 표면에 PZT가 부착된 매커니즘으로 구성하였음. 그림 1-3-6은 지압판 압전센서의 임피던스 응답 및 이에 대응하는 진동모드를 나타냄. 20~110kHz의 주파수 대역에서 2개의 뚜렷한 피크가 관찰되었으며, 이는 웨어러블 압전센서 장치의 진동판 휨 거동에 대한 진동모드에 대응되는 피크 주파수임.

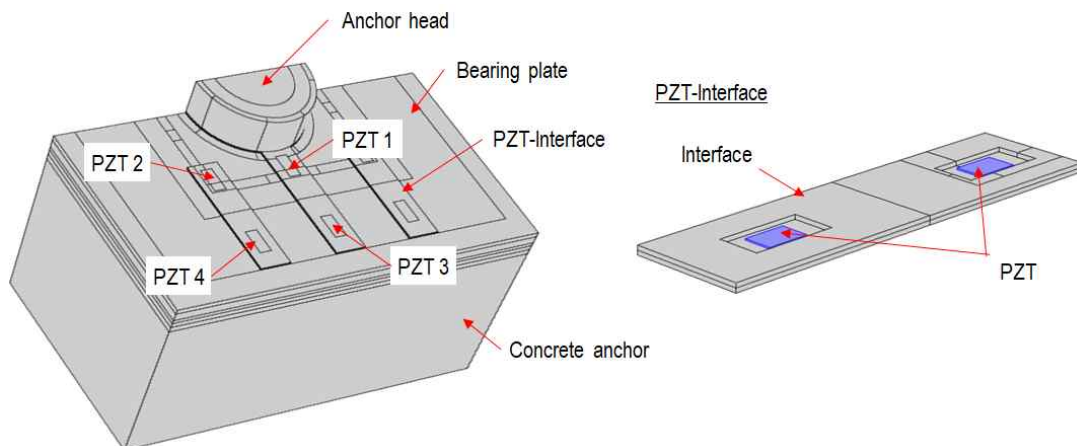


그림 1-3-5 지압판용 웨어러블 압전센서 및 정착부 유한요소모델

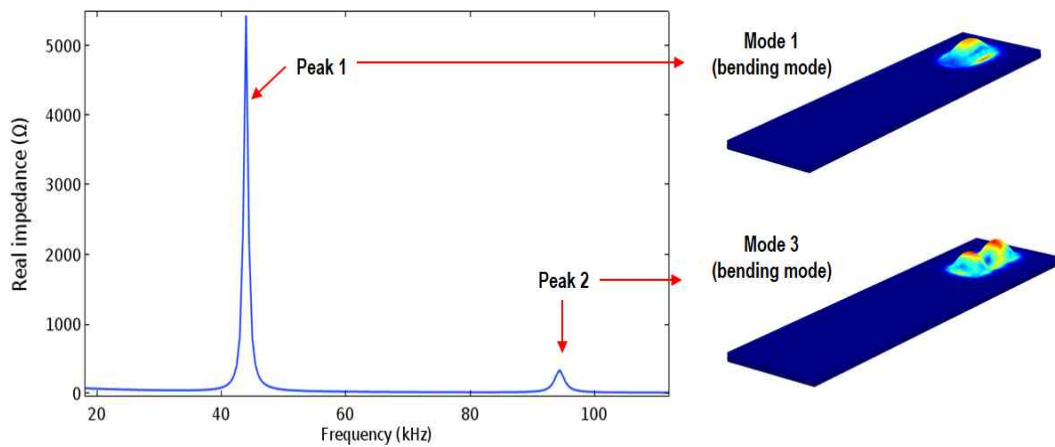
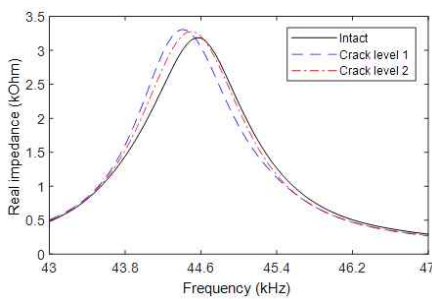
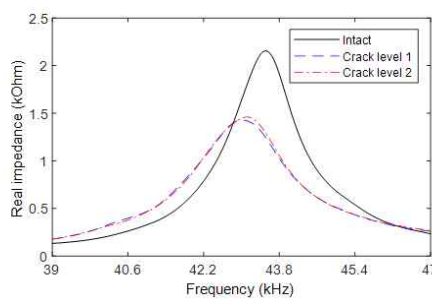


그림 1-3-6 지압판용 웨어러블 압전센서 임피던스 형상 및 진동모드

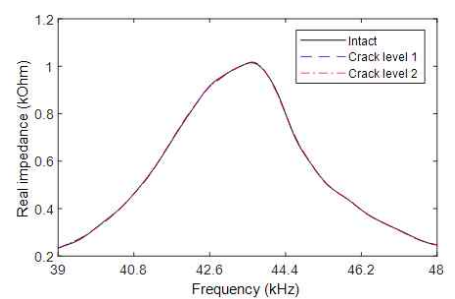
- 최적 압전센서 위치 분석을 위하여 지압판의 4개 위치에 모델링된 PZT로부터 임피던스 응답을 추출하고 손상민감도를 분석하였음. 이때, 손상 시나리오는 표 1-3의 콘크리트 정착부 손상을 고려하였음. 각 PZT로부터 추출된 임피던스 응답은 손상에 따라 그림 1-3-7(a)~(d)와 같이 변화하였음. 손상에 따른 임피던스 응답의 변화는 PZT1 및 PZT2에서 크게 발생하였음. RMSD 분석을 통해 PZT 위치별 손상민감도를 분석하였음. 정착부 손상에 대한 손상민감도는 PZT 2에서 가장 크게 나타났으며, PZT 2 위치가 지압판용 웨어러블 압전센서 장치의 최적 위치로 분석되었음.



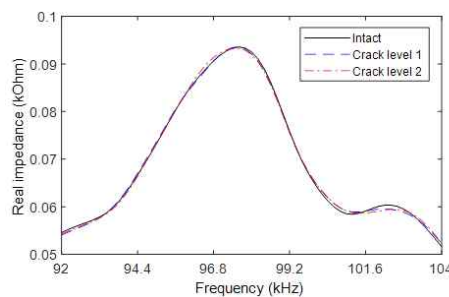
(a) PZT 1 임피던스 응답



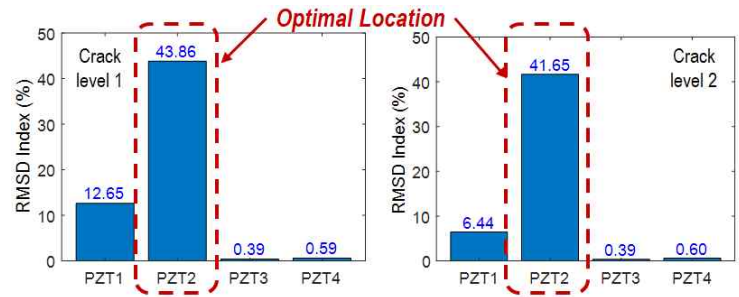
(b) PZT 2 임피던스 응답



(c) PZT 3 임피던스 응답



(d) PZT 4 임피던스 응답

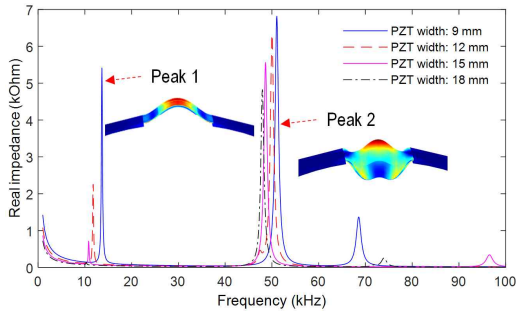


(e) 최적 PZT 위치 선정

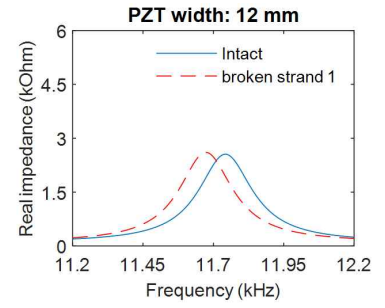
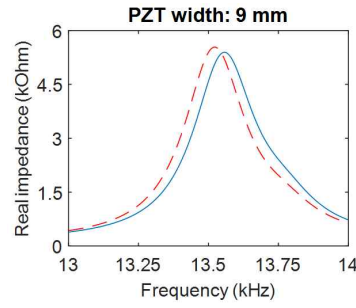
그림 1-3-7 지압판용 웨어러블 압전센서 임피던스 형상 및 진동모드

□ 웨어러블 압전센서 장치용 PZT 센서의 최적 제원 분석

- 웨어러블 압전센서 장치에 부착되는 PZT 센서의 최적 제원 분석을 위하여 PZT 형상에 따른 임피던스 응답 및 손상민감도 해석을 수행하였음. PZT 센서의 형상 변수로서 길이(length), 폭(width), 두께(thickness)를 고려하였음. 그림 1-3-2의 앵커헤드-지압판 유한요소모델을 대상으로 PZT 센서의 형상 변수별 임피던스 응답을 추출하였음. 손상민감도 분석 시 그림 1-3-2의 1번 강연선 손상을 고려하였음.
- PZT 센서의 길이, 폭, 두께에 따른 임피던스 응답을 각각 분석하였음. 그림 1-3-8(a)는 PZT 센서의 폭에 따른 임피던스 응답의 변화를 나타내며, 그림 1-3-8(b)는 강연선 손상에 따른 임피던스 응답 변화를 나타냄. 그림 1-3-9와 같은 RMSD 분석을 통해 PZT 센서의 길이 15mm, 폭 6mm, 두께 0.191mm 일 때 손상 민감도는 가장 높은 것으로 분석되었음. 이로부터 최적의 PZT 센서 제원은 센서 제작 및 주문 여건에 따라 길이 12~15mm, 폭 4~8mm, 0.127~0.267mm의 범위에서 선정할 수 있음.



(a) PZT 센서의 폭에 따른 임피던스 응답



(b) 손상에 따른 임피던스 응답 변화

그림 1-3-8 PZT 센서의 길이에 따른 임피던스 응답 및 손상에 따른 임피던스 응답 변화

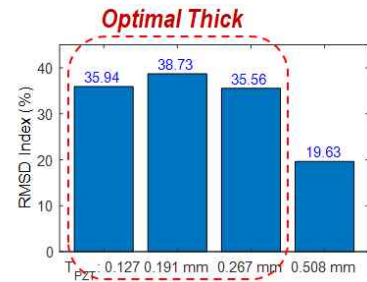
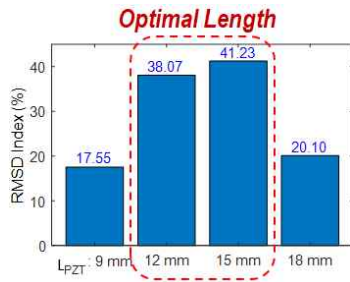


그림 1-3-9 손상 민감도 해석을 통한 PZT 센서의 최적 제원 선정

1.3.2 압전 PZT 센서 네트워킹 및 토모그래피(tomography) 개념을 적용한 압전 응답 신호 분석 기술

□ 웨어러블 인터페이스 내부 PZT 센서의 압전 동적변형률/임피던스 신호분석 알고리즘 작성

- 그림 1-3-10과 같이 압전응답 신호 및 역 압전응답 신호를 병렬적으로 분석함. 웨어러블 인터페이스 내부의 PZT 센서는 미리 설계된 회로에 따라 압전 동적변형률 및 임피던스 신호를 계측하도록 설계됨.
- 압전응답 신호는 강연선 손상 등의 국부손상 감지를 위한 신호분석과정(유효 주파수 대역 선정, 임피던스 특징 추출, 손상 기준 결정)을 거치게 되며, 역압전응답 신호는 구조물의 전역적 손상 감지를 위한 신호분석과정(PSD 행렬 계산, 특이치 분해, 고유진동수 추출)이 수행됨.
- 임피던스 신호의 분석결과와 동적변형률 신호의 분석결과를 하이브리드하여 국부 손상의 탐색 및 전역적 구조상태에 미치는 영향을 평가함.

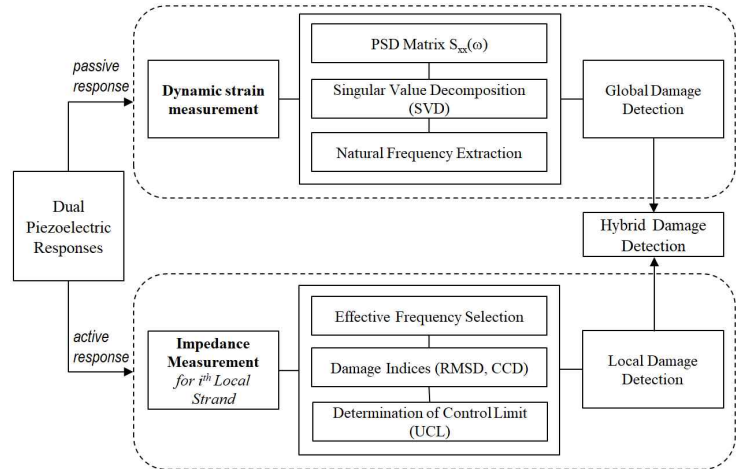


그림 1-3-10 웨어러블 인터페이스 내부 PZT 센서의 하이브리드 신호 분석 알고리즘

□ PZT 센서의 네트워킹 및 멀티 센서 신호분석 기법 설계

- 앞서 설명한 1.2.3의 연구결과에 의하면 손상된 강연선과 PZT 센서는 서로 가까울수록 손상민감도가 증가함. 이에 맞게 여러 개의 PZT 센서 위치를 적절히 배치할 경우 손상감지 성능을 높일 수 있음. 그림 1-3-11은 웨어러블 인터페이스 장치에 여러 개의 PZT 센서를 배치한 경우의 센서 네트워킹 체계를 나타냄. 멀티 PZT 센서는 멀티플렉서를 통해 연결되며, 임피던스 분석기는 가진 및 신호계측을 동시에 수행할 수 있음.
- 그림 1-3-12은 멀티 PZT 센서로부터 측정된 임피던스 응답의 분석 과정을 나타냄. 센서에서 측정된 임피던스 응답은 각각의 임피던스 특성(RMSD/CCD)을 추출하며, 각각의 센서에 대한 임피던스 특성을 비교하여 손상여부의 판정 및 손상 강연선을 결정함.

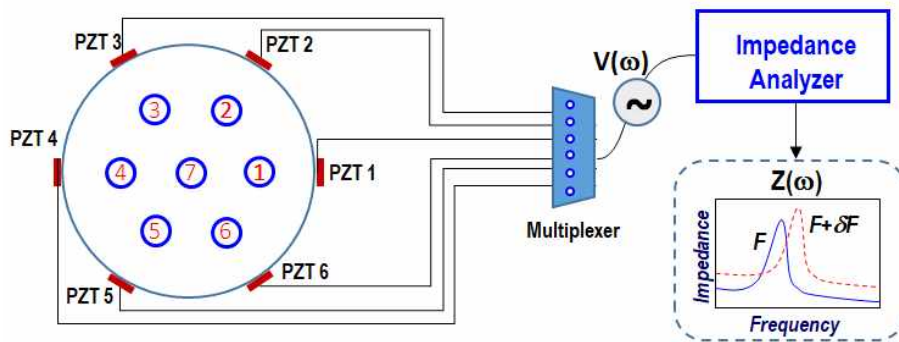


그림 1-3-11 웨어러블 인터페이스의 센서 네트워킹 체계도

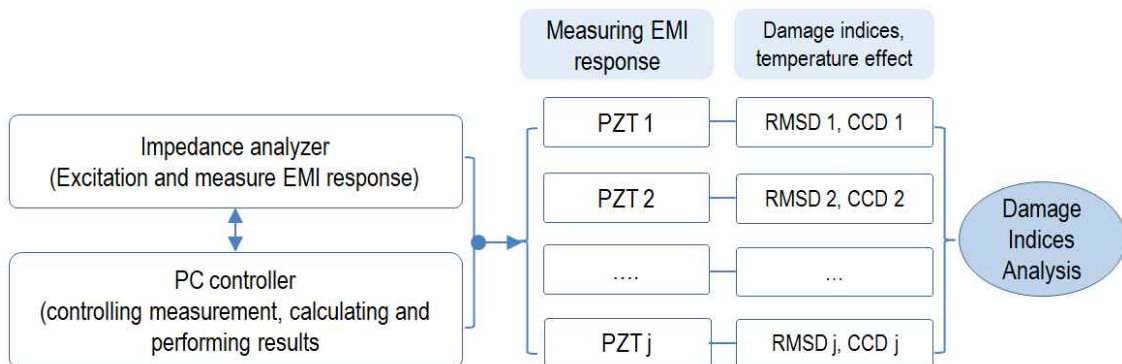
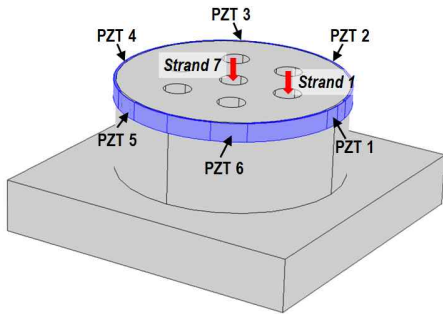
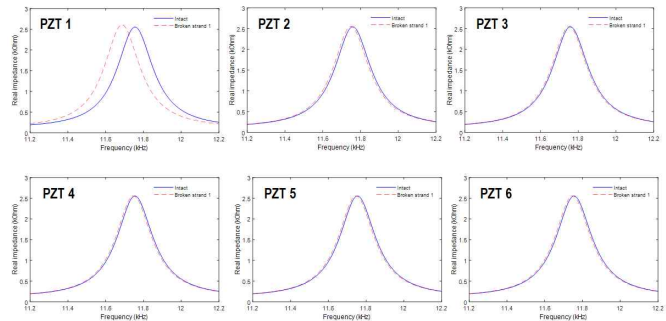


그림 1-3-12 웨어러블 인터페이스의 멀티 센서 신호 분석 기법

- 6개 PZT가 모델링 된 텐던 정착부 유한요소모델(그림 1-3-13(a))의 임피던스 해석을 통해 상기의 웨어러블 인터페이스의 센서 네트워킹 및 멀티 센서 신호 분석 기법의 적합성을 검증하였음. 강연선 손상으로서 1번 및 7번 강연선이 각각 파단된 경우와, 1번, 7번이 동시에 파단된 경우를 고려하였음. 그림 1-3-13(b)는 1번 강연선이 파단된 경우에 대하여 6개 PZT로부터 측정된 임피던스 응답을 나타냄. 1번 강연선과 가장 가까운 PZT 1 센서에서 손상에 따라 가장 큰 임피던스 응답 변화를 보였음.



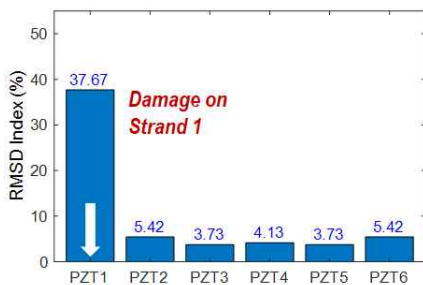
(a) 6-PZT 텐던 정착부 모델



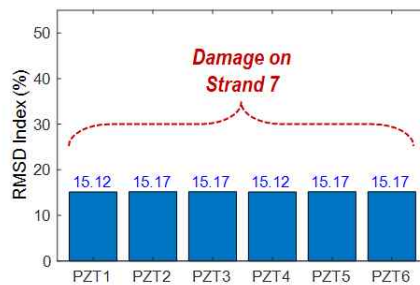
(b) 손상 전후의 임피던스 응답(strand 1 손상 시)

그림 1-3-13 6-PZT 텐던 정착부 모델 및 멀티 센싱 임피던스 응답

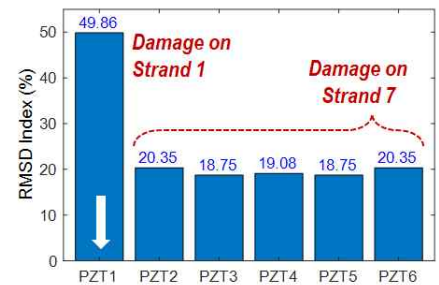
- 각 손상경우에 대하여 임피던스 응답을 측정하고 손상 강연선 감지를 위해 임피던스 특성치(RMSD) 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 1-3-14에 나타내었음. 그림 1-3-14(a)의 경우, PZT 1 센서의 RMSD 지수가 상한관리치(UCL)을 벗어남에 따라 1번 강연선의 손상으로 판정할 수 있으며, 그림 1-3-14(b)는 6개의 PZT 센서의 RMSD 지수값이 모두 비슷하며 모두 상한관리치를 벗어나며 따라 7번 강연선의 손상으로 판정할 수 있음. 그림 1-3-14(c)는 6개 PZT 센서의 RMSD 지수 값이 모두 상한관리치를 벗어나며 PZT 1의 결과가 눈에 띄게 큰 값을 가지므로 1번 및 7번 강연선 손상으로 판정할 수 있음.
- 상기와 같이 웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지 기법에 의한 손상감지 결과, 단일 손상뿐만 아니라 복수의 강연선 손상 경우에 대해서도 100%의 정확도로 감지하였음(핵심성과 1-③ 목표달성).



(a) Strand 1 손상



(b) Strand 7 손상



(c) Strand 1&7 손상

그림 1-3-14 멀티 센싱을 통한 웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지 성능 분석

□ 국부 강연선 파손 유발 임피던스 응답의 토모그래피 분석 기법

- 강연선의 파손으로 인한 임피던스 응답은 토모그래피 분석을 통하여 손상을 감지할 수 있음. 그림 1-3-15는 토모그래피 분석을 통한 강연선 파손 감지 기법을 도식화 한 것임. 앵커헤드 표면의 다수 계측점에서 추출된 임피던스 응답은 임피던스 특성치 분석을 통해 토모그래피를 작성하며, 토모그래피의 형상을 바탕으로 손상을 감지함.

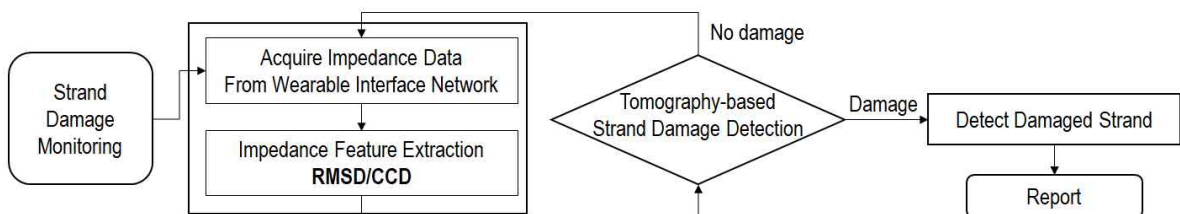
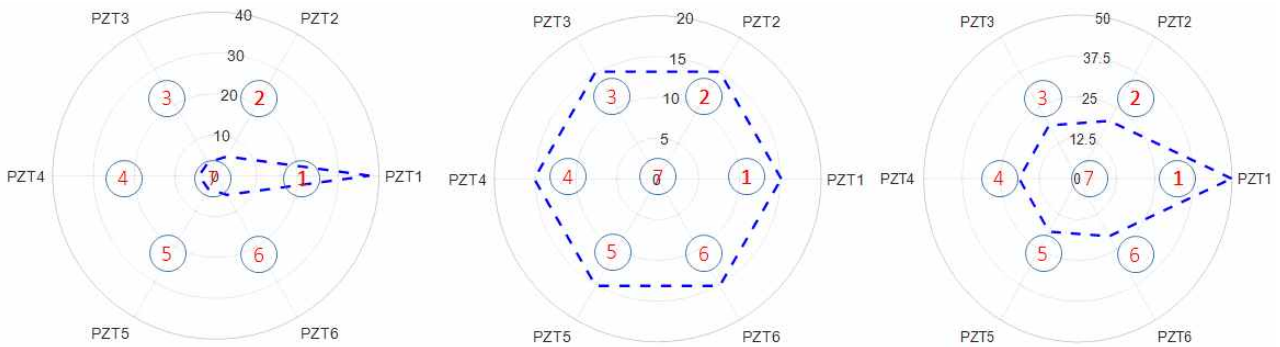


그림 1-3-15 토모그래피 기반 강연선 파손 감지 기법

- 3.2.2에서 다룬 강연선 손상을 토모그래피 기반 파손 감지 기법을 통해 강연선 파손여부를 감지하였음. 각 손상 경우에 대한 PZT 센서의 임피던스 응답은 그림 1-3-13(b)와 동일하며, 임피던스 응답으로부터 임피던스 특성치(RMSD/CCD)의 값을 계산함. 임피던스 특성치 결과를 토모그래피로 작성할 수 있으며, 그림 1-3-16은 RMSD 지수를 사용한 임피던스 응답의 토모그래피를 나타낸 것임.
- 그림 1-3-16(a)의 1번 강연선 손상의 경우 토모그래피 형상이 1번 강연선 방향으로 뾰족하게 돌출되어 나타났으며, 그림 1-3-16(b)의 7번 강연선 손상의 경우 토모그래피 형상이 정 육각형에 가깝게 나타났음. 그림 1-3-16(c)의 1번 및 7번 강연선 손상의 경우 토모그래피 형상이 1번 강연선 방향으로 돌출되는 동시에 토모그래피의 반경 또한 크게 발생하였음. 이로부터 토모그래피를 이용한 강연선 파손 감지 시, 토모그래피 형상의 돌출사향 및 반경 확장 여부에 따라 강연선 파손여부 및 파손 위치를 감지할 수 있음.



(a) Strand 1 손상

(b) Strand 7 손상

(c) Strand 1&7 손상

그림 1-3-16 임피던스 응답의 토모그래피 분석을 통한 강연선 파손 감지(RMSD 지수 사용)

(2) 세부연구내용 2 : 웨어러블 압전센서 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성과 성능평가

연구 범위	연구 수행 방법	연구 내용
1) 웨어러블 압전센서 장치가 탑재된 정착부 모형제작 및 다중 PS 텐던 정착부의 임피던스 계측 실험 수행	1.1) 다중 PS 긴장재 정착부 모형의 설계, 제작, 실험 준비	■ 텐던-정착부 모형구조물의 긴장후 정착방식 및 긴장력 조절 및 제어 방법 선정 ■ 압전응답 계측용 신호 감지, 임피던스/동적변형률 분석용 계측 장치 제원 결정 ■ 콘크리트 정착부 설계 및 제작
	1.2) 압전센서가 내장된 웨어러블 인터페이스 장치 제작	■ 9-strand용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답 분석 ■ 지압판용 웨어러블 인터페이스의 최적위치 분석 ■ 피복층-압전소자-부착층 복층 웨어러블 인터페이스 제원 설계 ■ 콘크리트 정착부 내장형 웨어러블 인터페이스 블록 설계 및 제작
	1.3) 제작된 웨어러블 압전센서 인터페이스를 결합한 정착부의 압전신호 감지 성능 분석	■ 앵커헤드용(주장응력 거동형) 웨어러블 인터페이스의 압전응답 분석 ■ 콘크리트 정착부용 내장 웨어러블 인터페이스 블록(지압응력 거동형)의 압전응답 분석 ■ 판형 CFRP 인터페이스의 주장응력 변화에 대한 임피던스 응답 특성 분석
2) 이중 기전응답 기반의 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 개발	2.1) 정착부 제원 및 웨어러블 인터페이스 유형에 따른 압전응답 분석 기술의 개발	■ 정착부 및 긴장재에 적합한 압전응답 분석 기법 설계 ■ 정착부 및 긴장재 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치를 위한 압전신호 분석 소프트웨어 작성
	2.2) PZT 센서 네트워킹 및 토모그래피 개념을 적용한 압전신호 분석 기술의 적용	■ PZT 센서의 압전 동적변형률/임피던스 신호감지, 네트워킹, 신호분석 소프트웨어 작성 ■ 국부 강연선 파손 유발 기전 임피던스 응답의 토모그래피 소프트웨어 작성 ■ 웨어러블 압전센서로부터 계측된 동적 변형률 신호의 주파수 분석 소프트웨어 작성
	2.3) 2 종류의 정착부/긴장재에 적합한 PS 강연선 파손감지 기술의 적용	■ 임피던스 응답 및 RMSD/CCD 분석기반 손상발생 감지 소프트웨어 작성 ■ 기전 임피던스 신호의 네트워킹 및 토모그래피를 이용하는 국부 강연선 파손 감지 소프트웨어 작성 ■ 주파수 분석에서 추정된 고유진동수를 이용하는 구조물 상태변화 감지 소프트웨어 작성.
3) 실험실 환경에서 다중 PS 강연선과 정착부 파손감지 성능평가	3.1) PS 긴장재 정착부 실험설치 및 정착부 압전응답 성능 검토	■ 비부착 텐던 정착부 실험용 프레임 및 텐던 정착부 설치 ■ 긴장력 감소에 따른 정착부 동적변형률-임피던스 계측 및 성능 검토 ■ PZT 인터페이스 동적변형률의 손상민감도 분석 및 전역적 거동특성 추출을 위한 PZT 센서 위치 및 방향 분석
	3.2) 2 종류의 정착부/긴장재를 대상으로 PS 강연선의 국부 파손 모사 및 계측 실험 수행	■ 다중 PS 강연선의 국부 파손 모사 및 EM 임피던스 계측 ■ 콘크리트 정착부 손상 모사 및 EM 임피던스 계측
	3.3) 2 종류의 정착부/긴장재를 대상으로 PS 강연선 파손 감지 기술 적용성 검토	■ 실험 계측값과 손상감지 S/W를 사용하여 국부 파손 감지
	3.4) 온도변화 및 긴장력 감소 조건하에서 장기 계측 실험 및 온도 영향 보정	■ 온도변화 유발 임피던스 응답 신호의 분석 및 손상감지 결과에 미치는 영향 분석

2.1 웨어러블 압전센서 장치가 탑재된 정착부 모형제작 및 다중 PS 텐던 정착부의 임피던스 계측 실험 수행

2.1.1 다중 PS 긴장재 정착부 모형의 설계, 제작, 실험준비

□ 텐던-정착부 모형구조물의 긴장력 도입 및 제어 방법 선정

- 텐던-정착부 모형의 긴장력 재하 실험을 위하여 그림 2-1-1과 같이 유압장치를 이용한 긴장력 제어 방법을 선정하였음. 본 연구에서 사용된 유압장치는 한 번에 하나의 텐던에 긴장력 도입 및 제어가 가능한 장치임. 이 같은 단일 텐던용 유압장치 사용을 위하여 그림 2-3-2의 실험용 프레임 설계 시 각 텐던 별 개별적인 Hole을 통해서 지지되도록 설계하였음.
- 텐던의 끝단과 유압장치와의 연결을 위하여 텐던 제작 시 한쪽 끝단을 나사선 가공된 강봉에 압착하였음. 텐던 끝단(나사선 강봉측)은 강봉 커넥터(steel rod-connector) 연결 후 유압장치(jacking system)를 설치함.
- 각 텐던별 긴장력의 측정을 위하여 텐던 고정용 볼트 사이에 로드셀(load cell)을 설치하였음. 로드셀과 연결된 인디케이터(indicator)를 통해 텐던에 도입된 긴장력을 확인할 수 있으며, 유압장치의 핸드레버를 이용하여 긴장력을 제어할 수 있음.
- 텐던 지지용 Hole 간의 간격은 로드셀 및 유압장치의 크기를 고려하여 작업상 간섭이 없도록 설계하였음. 앵커헤드측의 텐던 간 간격과 긴장력 도입부의 텐던간 간격의 차이로 인해 텐던에 경사가 발생함. 이에 대해 텐던의 안정성 확보를 위해 텐던의 길이 방향과 유압장치의 길이 방향이 일치하도록 경사판(inclined plate)를 이용하였음.

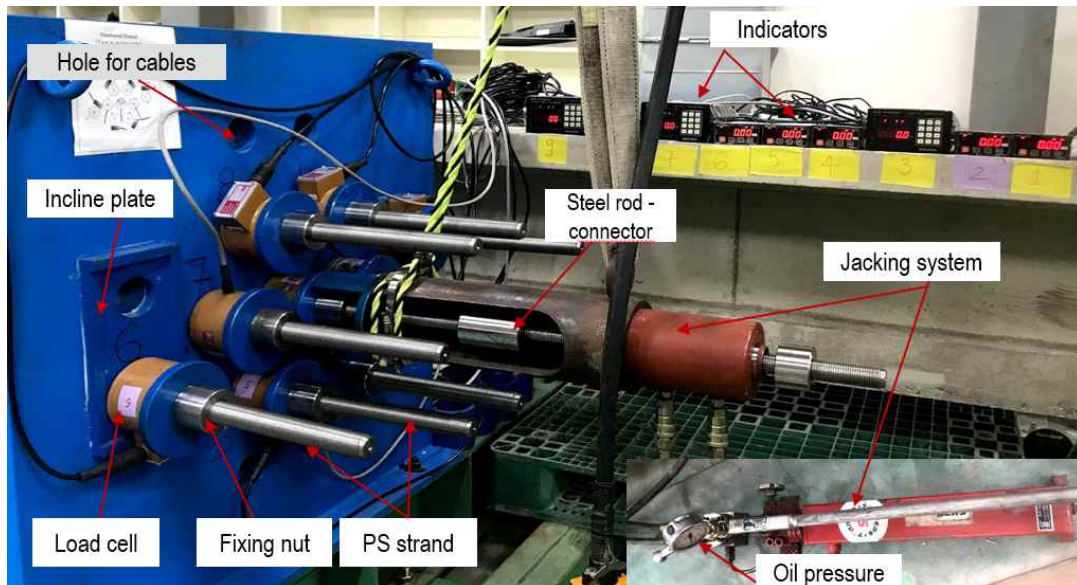
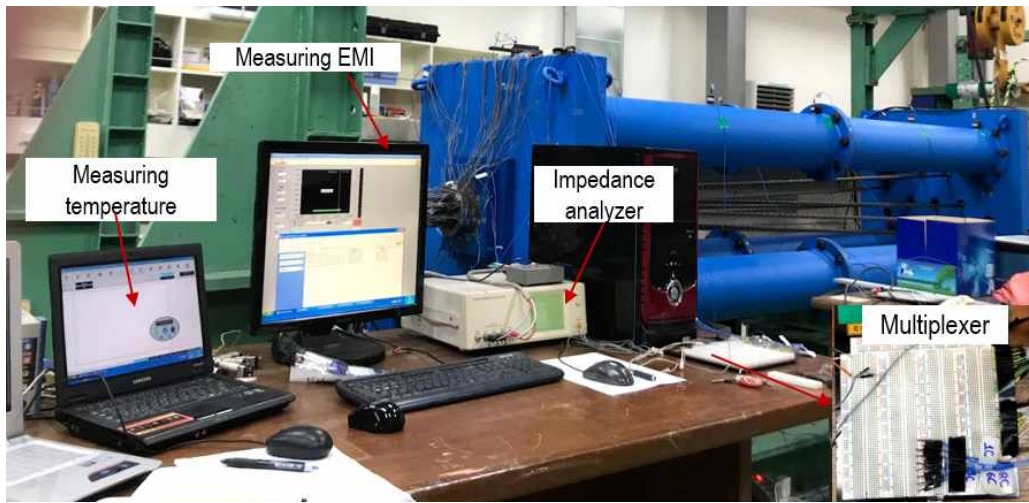


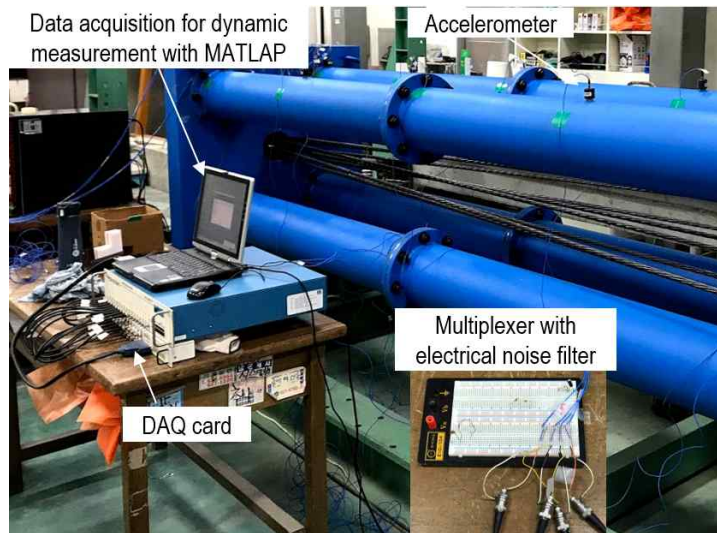
그림 2-1-1 텐던-정착부 긴장력 도입장치 및 긴장력 제어

□ 압전 응답 계측용 신호 감지, 임피던스/동적변형을 분석용 계측 장치 제원 결정

- 텐던-정착부의 압전응답 계측을 위하여 그림 2-1-2와 같이 압전 임피던스 및 동적변형을 계측을 위한 신호계측 및 분석 장치를 구성하였음.
- 압전 임피던스 계측 시스템은 그림 2-1-2(a)와 같이 임피던스 분석기, 멀티플렉서, 온도계측장치로 구성되었음. 임피던스 분석기는 HI0KI3532이며 계측 가능 주파수대역은 4Hz~5MHz 범위임. 멀티플렉서는 여러 개의 압전소자에 대한 임피던스 응답 계측을 위한 장치로서 간이 회로판을 이용하여 구현하였음. 온도계측장치는 데이터 로거 Kyohwa EDX-100A에 K-type thermocouple wire를 연결하여 구성하였음. 온도변화가 임피던스 응답에 미치는 영향 분석을 위하여 실험 수행시 동시 계측함.
- 압전 동적변형을 계측 시스템은 그림 2-1-2(a)와 같이 16채널 시그널 컨디셔너(PCB Piezotronics SERIES 481), 터미널 블록(BNC-2090A), 노이즈 필터가 내장된 멀티플렉서, DAQ 카드 내장 노트북 등으로 구성되었음. 신호 계측 및 저장은 노트북의 MATLAB 코드를 통해 수행될 수 있음. 동적변형을 분석 결과의 검증을 위하여 가속도센서를 함께 사용할 수 있도록 시스템을 구성하였음.



(a) 압전 임피던스 신호 계측 시스템



(b) 압전 동적변형률 신호 계측 시스템

그림 2-1-2 압전응답 계측 및 임피던스/동적변형률 신호계측 및 분석 장비

□ 콘크리트 정착부 모형 설계 및 제작

- 웨어러블 압전센서 장치의 성능검증을 위하여 그림 2-1-3과 같이 콘크리트 정착부 모형을 설계하였음. 콘크리트 정착부는 철근 콘크리트 구조로 설계되었으며 설계 압축강도는 27MPa 임. 460×460×500mm의 크기의 박스형 구조로서 긴장재 설치를 위한 hole(지름 110mm)이 중앙에 배치되었음. 또한, 박스의 상단 면은 지압판 설치를 위한 공간이 고려되었음.

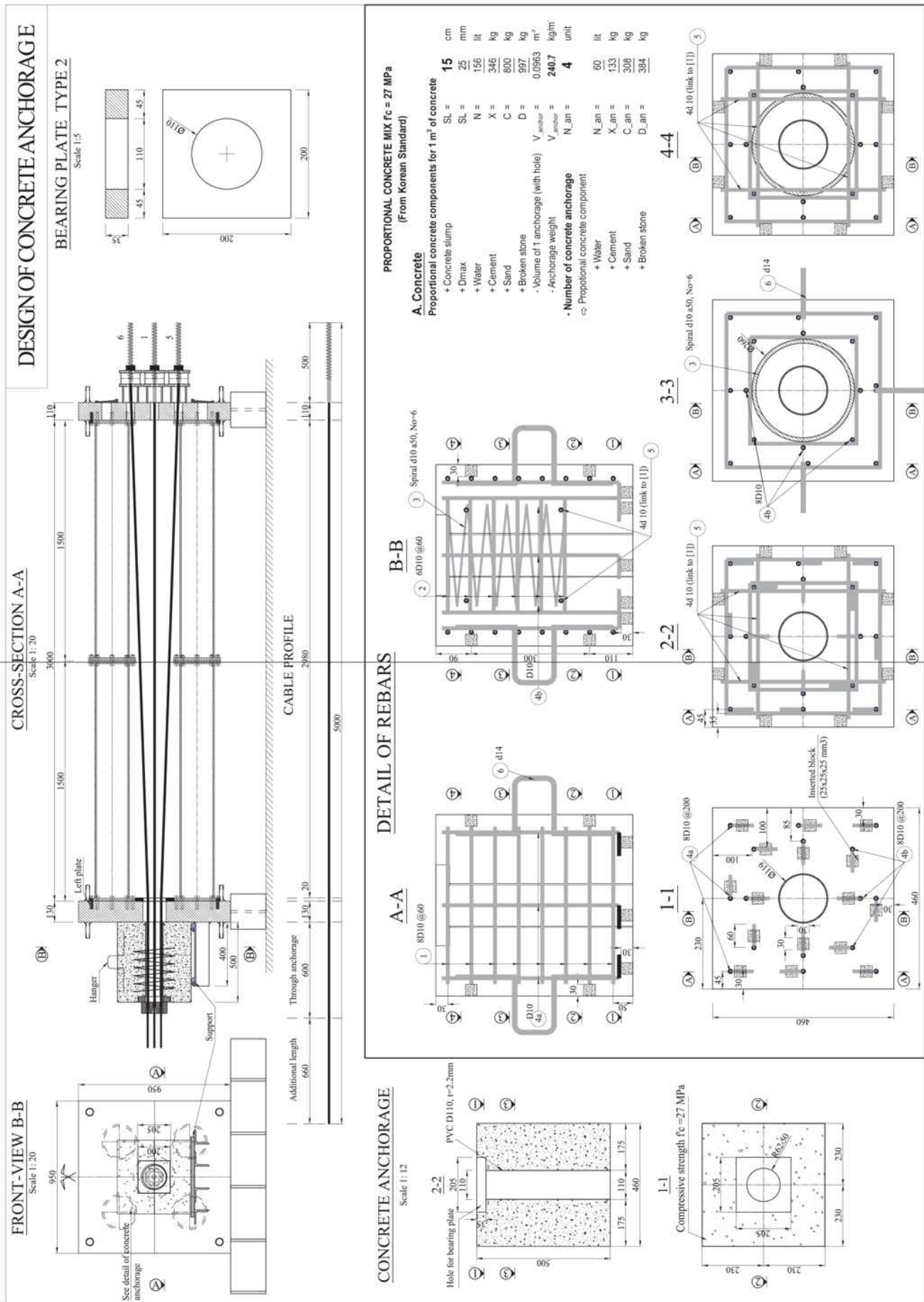
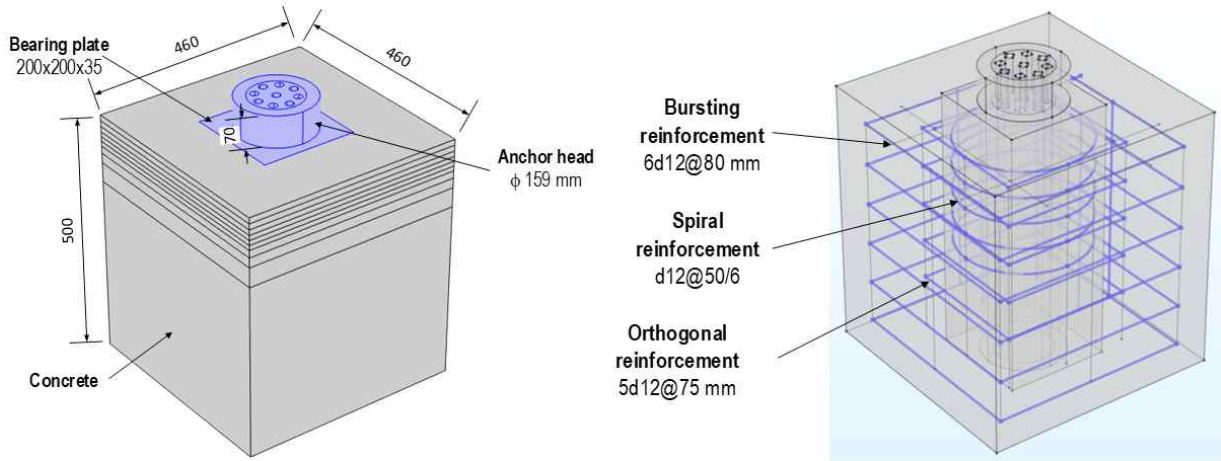
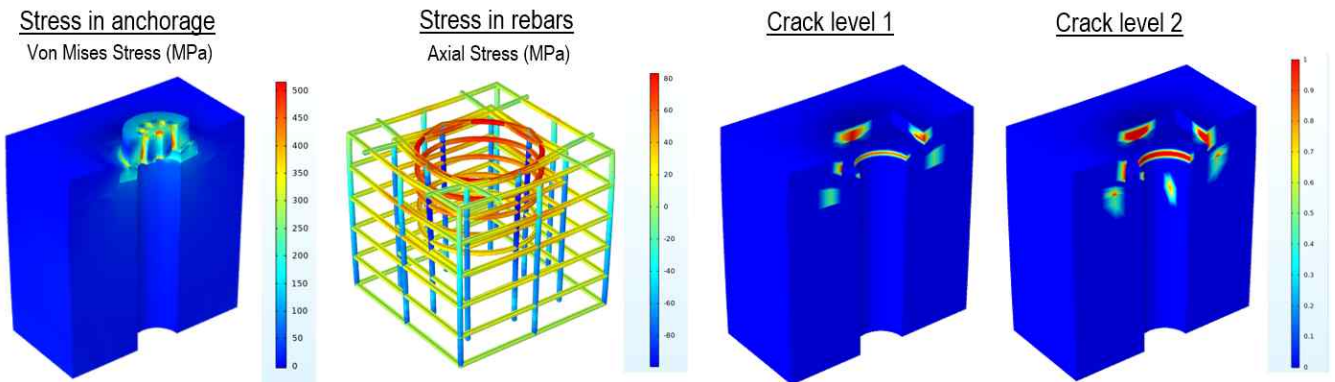


그림 2-1-3 텐던-콘크리트 정착부 모형 설계도면

- 설계된 콘크리트 정착부 모형의 구조성능 검토를 위하여 유한요소 해석을 수행하였음. 그림 2-1-4(a)는 콘크리트 정착부 유한요소모형을 나타내며 긴장력 하중 재하를 위한 앵커블록 및 지압판이 고려되었음. 그림 2-1-4(b)는 콘크리트 및 철근부의 응력해석 수행 결과로서 설계하중에 대해 각 재료별 허용응력 이하의 응력이 발생함을 확인하였음. 그림 2-1-4(c)는 콘크리트부 균열진전 해석 결과로서 초기균열이 발생하는 위치 및 균열을 야기하는 긴장력의 크기를 검토하였음. 지압판-콘크리트 경계의 모서리에서 초기 균열이 발생하며, 이때의 하중은 90ton의 압축하중으로 분석되었음.



(a) 콘크리트 정착부 유한요소모델



(b) 콘크리트 및 철근 부 응력해석

(c) 콘크리트부 균열진전 해석

그림 2-1-4 텐던-콘크리트 정착부 모형 설계안의 구조성능 검토를 위한 응력 및 균열 해석

- 수치해석을 통한 구조성능 검토 후 콘크리트 정착부 모형을 그림 2-1-5와 같이 제작하였음. 제작 순서는 다음과 같음. 1) 거푸집 제작 및 철근 조립, 2) 조립된 철근에 매립형 센서 설치, 3) 철근망과 거푸집 결합, 4) 콘크리트 타설, 5) 콘크리트 양생.
- 콘크리트 균열 손상 추정을 위하여 1.2의 정착부 내장형 스마트 블록을 매립한 후 콘크리트 타설이 진행 되었으며, 각 센서와 연결된 전선은 정착부 측면으로 돌출되도록 처리하였음. 그림 2-1-5(d)는 실험 프레임 좌측에 콘크리트 정착부가 설치된 사진임.



(a) 철근 조립



(b) 내장 센서 설치 및 철근-거푸집 결합



(c) 철근 콘크리트 양생

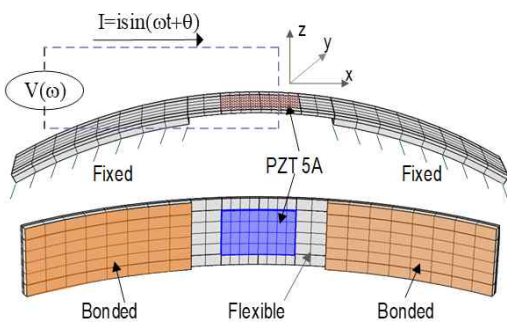


(d) 실험용 프레임에 거치된 텐던-앵커블록-콘크리트 정착부 예시
그림 2-1-5 콘크리트 정착부 모형 제작(핵심성과 2-① 목표달성㉠)

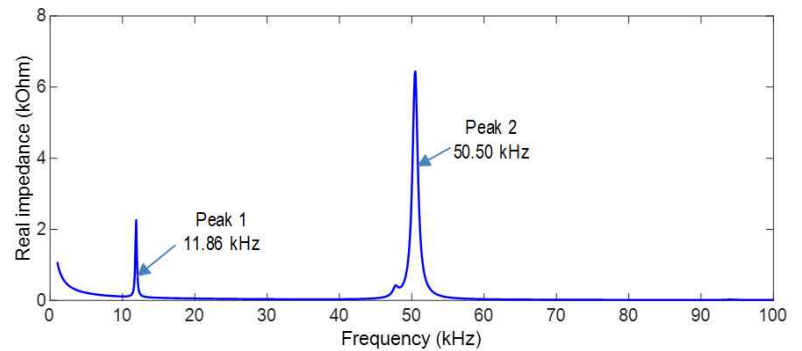
2.1.2 압전센서가 내장된 웨어러블 인터페이스 장치 제작

□ 9-strand용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답 분석

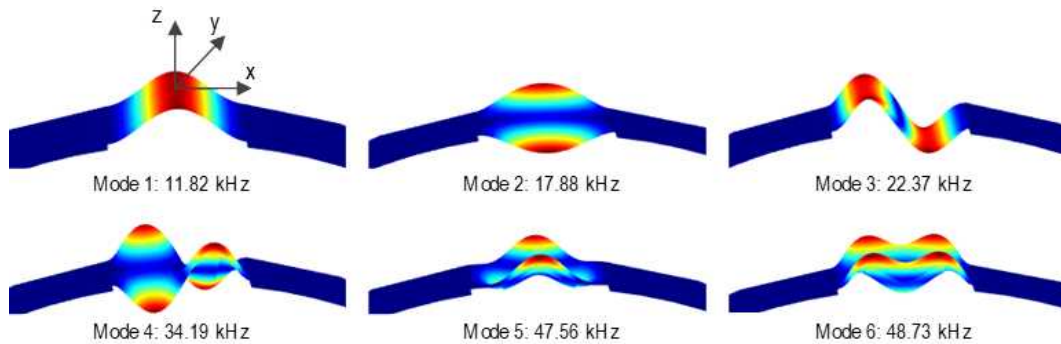
- 1차년도 연구결과로서 제시한 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답 분석을 위하여 앵커헤드에 설치된 웨어러블 인터페이스의 유한요소모델을 생성하였음. 그림 2-1-6(a)는 앵커헤드에 고정된 인터페이스의 형상 및 격자구조를 나타내며, 진동판 부분과 고정판 부분으로 구분되어 있음. 진동판에는 임피던스 측정을 위한 PZT가 모델링되었음. 이때, 고려된 웨어러블 인터페이스의 크기는 $22 \times 12 \times 0.5\text{mm}$ (진동판) 및 $30.5 \times 12 \times 1.5\text{mm}$ (고정판)이며, PZT의 크기는 $12 \times 8 \times 0.267\text{mm}$ 임.
- 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 유한요소모델로부터 압전응답을 추출하였음(그림 2-1-6(b)). 11.86kHz 및 50.50kHz에서 피크가 나타났음. 이는 인터페이스의 고유진동 특성(그림 2-1-6(c)) 중 Mode 1 및 Mode 6과 잘 일치함을 나타냄.
- 긴장재의 파손 발생 시 인터페이스로부터 추출된 압전응답의 변화를 분석하였음. 그림 2-1-6(d)와 같이 파손된 긴장재의 수가 증가함에 따라 피크 주파수가 감소하는 현상이 발생하였으며, 피크 1의 민감도가 더 큰 것으로 관찰되었음.



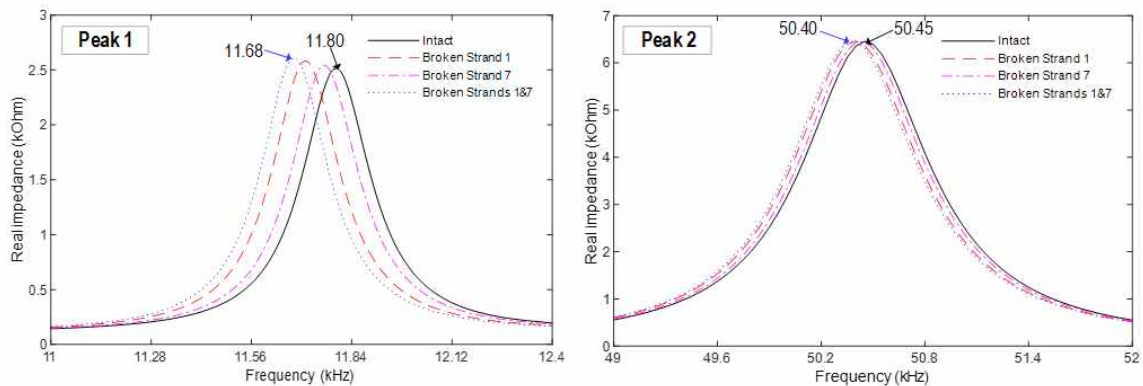
(a) 앵커헤드용 인터페이스 유한요소모델



(b) 인터페이스의 압전응답 특성



(c) 인터페이스의 고유진동 특성

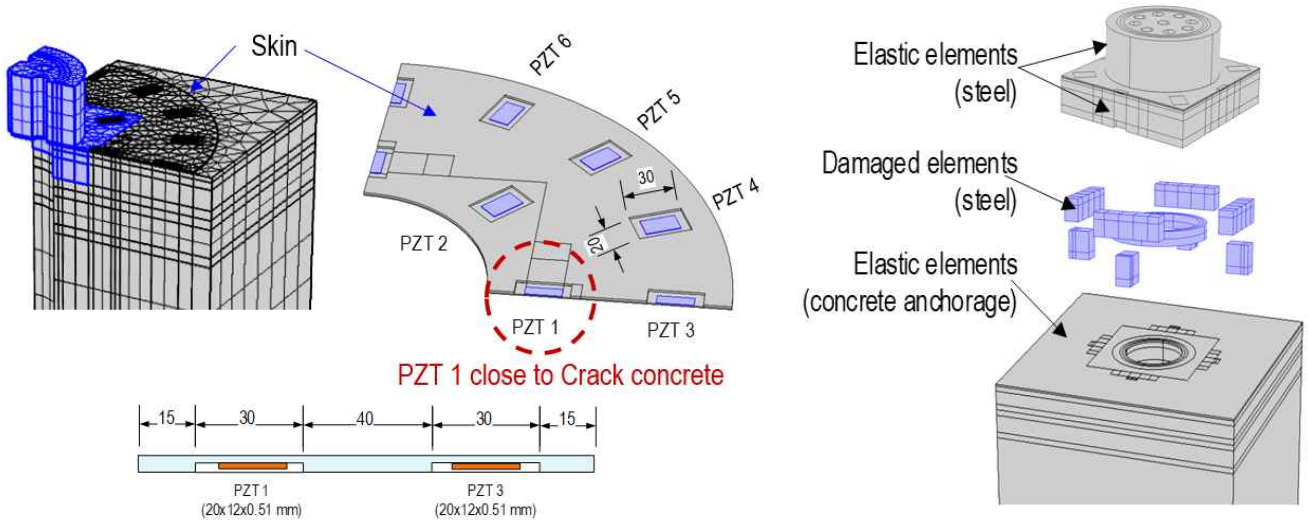


(d) 긴장재 파손에 따른 압전응답 변화

그림 2-1-6 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답특성 분석

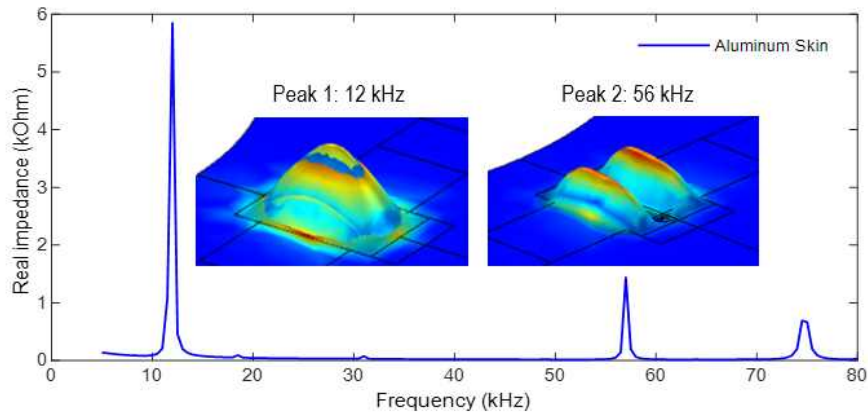
- 지압판용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답 분석을 위하여 그림 2-1-7(a)와 같이 지압판용 인터페이스가 부착된 콘크리트 정착부를 모델링하였음. 또한, 콘크리트 정착부 균열 모사를 위하여 콘크리트 부분에 그림 2-1-7(b)의 균열모델을 적용하였으며 2단계로 손상을 시뮬레이션 하였음.

- 지압판에 부착된 인터페이스의 압전응답을 그림 2-1-7(c)에 도시하였음. 12kHz 및 56kHz에서 피크가 관찰되었으며, 각 피크 주파수에 대응되는 인터페이스의 고유진동특성은 1차 및 2차 판형 모드와 대응되는 것으로 분석되었음.
- 콘크리트 정착부의 균열 발생 및 진전에 따른 압전응답 변화를 분석하였음. 그림 2-1-7(d)와 같이 피크 1에서는 균열이 진전함에 따라 피크 주파수의 감소하였으며, 피크 2에서는 주파수 특성의 변화가 매우 작은 것으로 분석되었음.

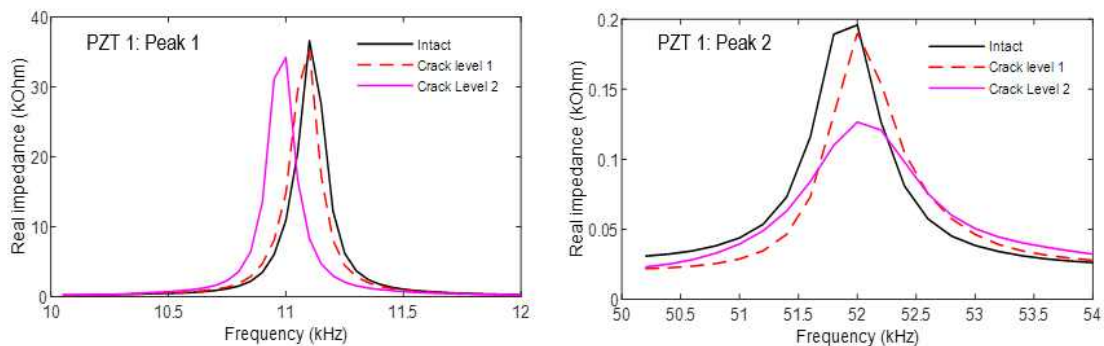


(a) 지압판용 인터페이스 유한요소 모델

(b) 콘크리트 균열모사 모델



(c) 인터페이스의 압전응답 특성



(d) 콘크리트 정착부 균열손상에 따른 압전 응답 변화

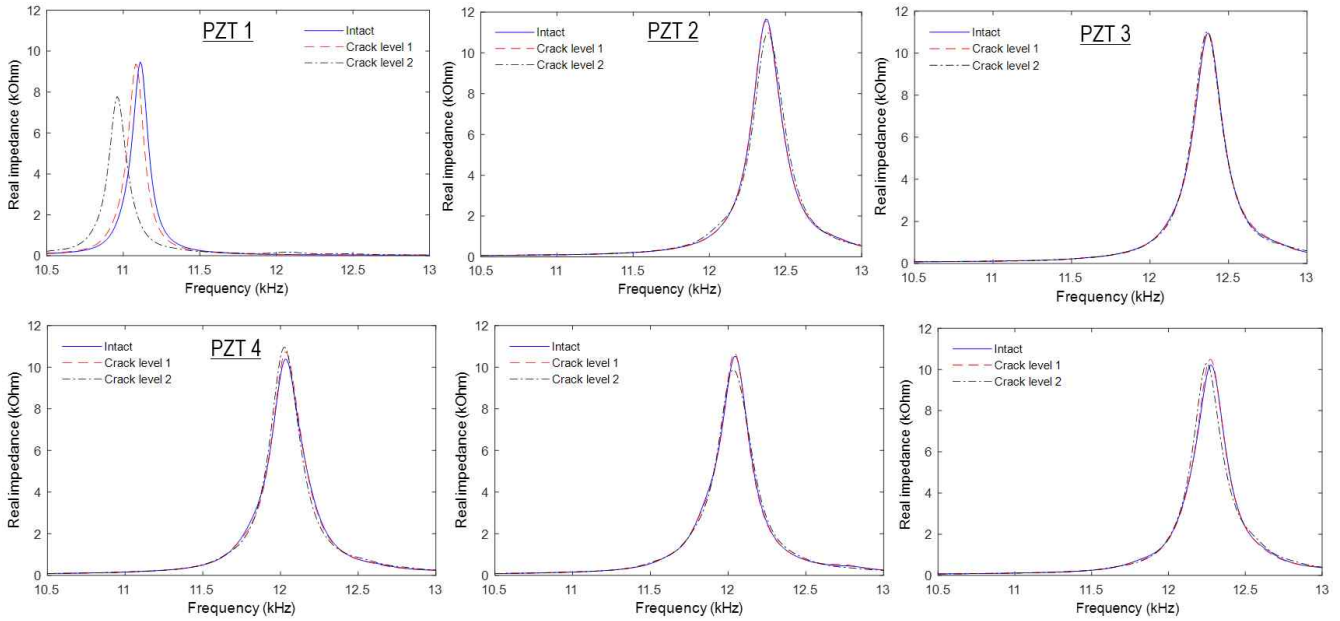
그림 2-1-7 지압판용 웨어러블 인터페이스 Prototype의 압전응답특성 분석

□ 지압판용 웨어러블 인터페이스의 최적 위치 분석

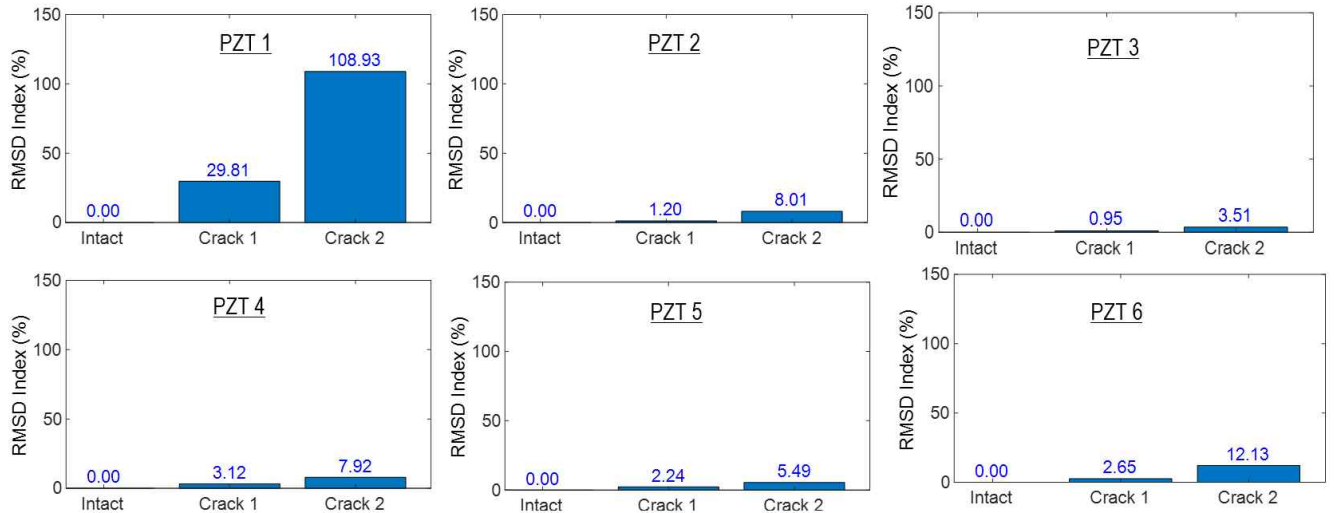
- 지압판용 웨어러블 인터페이스의 최적 위치 분석을 위하여 웨어러블 인터페이스에 배치된 PZT 위치에 따른 임피던스 응답을 분석하였음. PZT 위치로는 그림 2-1-7(a)와 같이 6곳을 고려하였음. 6개의 PZT 중 PZT1이 균열발생 위치와 가장 가까우며 PZT 2-PZT6은 일정 거리 떨어져 있음.
- 6개의 PZT로부터 2단계의 균열 손상에 대한 임피던스 응답을 추출하였음. 그림 2-1-8(a)에 나타낸 바와

같이 모든 PZT 센서의 임피던스 응답에서 약 12kHz의 피크가 관찰되었음. 균열의 발생 및 진전에 따라 임피던스 응답의 피크 주파수가 감소하는 현상이 관찰되었으며 그 민감도는 균열과 가장 가까운 PZT1에서 가장 크게 나타났음.

- 그림 2-1-8(b)는 균열 손상 전후에 대한 PZT의 임피던스 응답의 특성치를 나타낸 것임. 6개 위치에 대한 결과에서 균열손상의 발생 및 진전에 따른 RMSD 값의 변화가 단계적으로 발생하였음. RMSD 값의 변화는 균열위치와 가장 가까운 PZT 1의 결과에서 가장 크게 발생하였음.



(a) 콘크리트 정착부 손상에 대한 임피던스 응답 변화

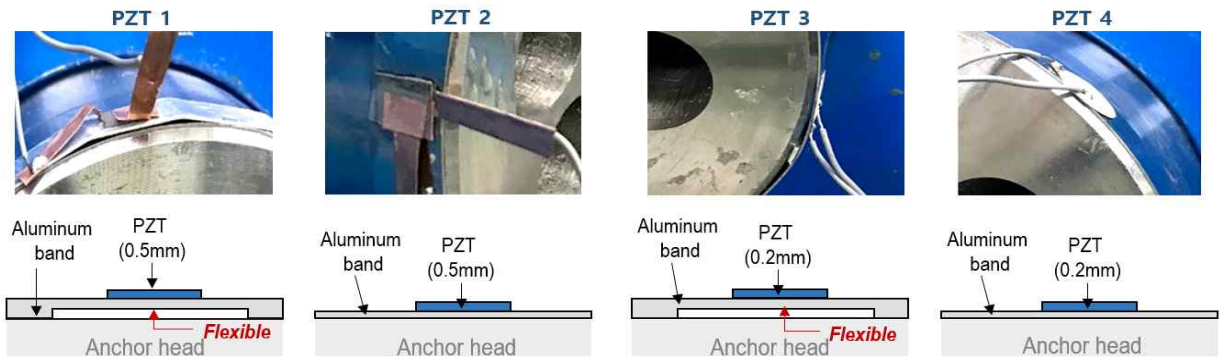


(b) 콘크리트 정착부 손상에 대한 임피던스 특성치(RMSD) 분석

그림 2-1-8 지압판용 웨어러블 인터페이스의 PZT 위치별 임피던스 특성 분석

□ 피복층-압전소자-부착층 복층 웨어러블 인터페이스 제원 설계

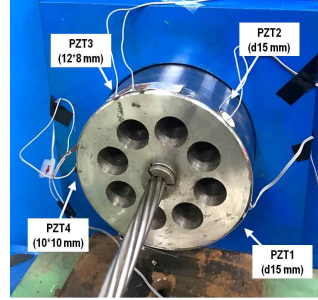
- 복층 웨어러블 인터페이스 제원 설계를 위하여 앵커헤드용 인터페이스에 대하여 압전소자의 종류 및 부착 방법에 따른 압전응답 분석을 수행하였음. 웨어러블 소재로서 그림 2-1-9(a)의 알루미늄 밴드를 이용하였으며 4가지 PZT 부착 조건(그림 2-1-9(b))을 고려하였음.
- 그림 2-1-10(a)는 긴장력 시나리오에 따른 PZT의 임피던스 응답 변화를 나타내며 PZT 종류 및 부착 조건에 따라 서로 다른 임피던스 응답 특성을 보였음. 모든 PZT의 임피던스 응답에서 긴장력이 증가함에 따라 임피던스 응답의 피크는 대체로 오른쪽으로 이동하는 것이 관찰되었으며, PZT 3의 임피던스 응답 변화는 상대적으로 작은 것으로 관찰되었음. 4개 PZT 조건 중 자유진동이 가능한 부분에 부착된 PZT 1의 민감도가 가장 높은 것으로 관찰되었음. 그림 2-1-10(b)는 PZT 1의 임피던스 응답 중 피크가 관찰된 주파수대역의 응답 변화를 나타낸 것임. Peak 2에서 긴장력 변화에 따른 피크 주파수의 변화가 매우 뚜렷하게 나타났다.



(a) 압전소자/인터페이스 유형

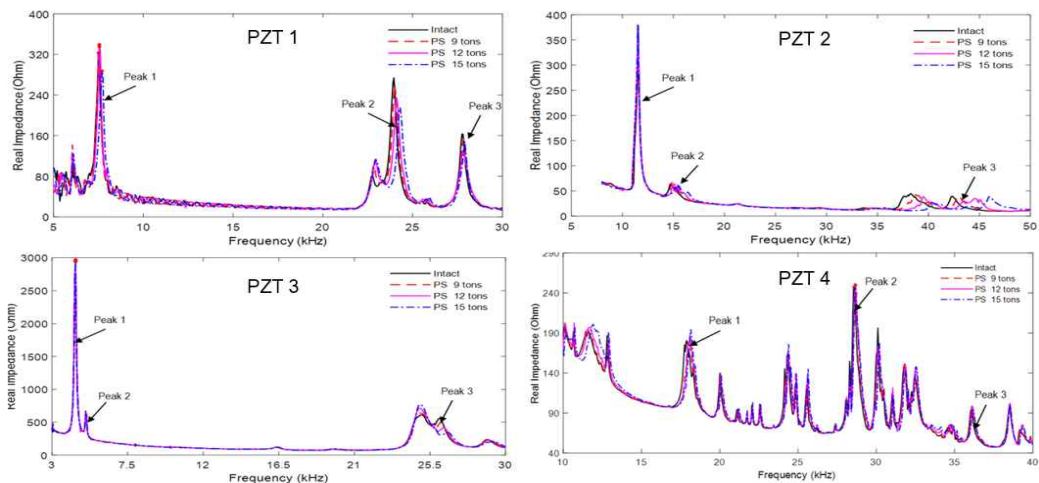


(b) 웨어러블 알루미늄 밴드

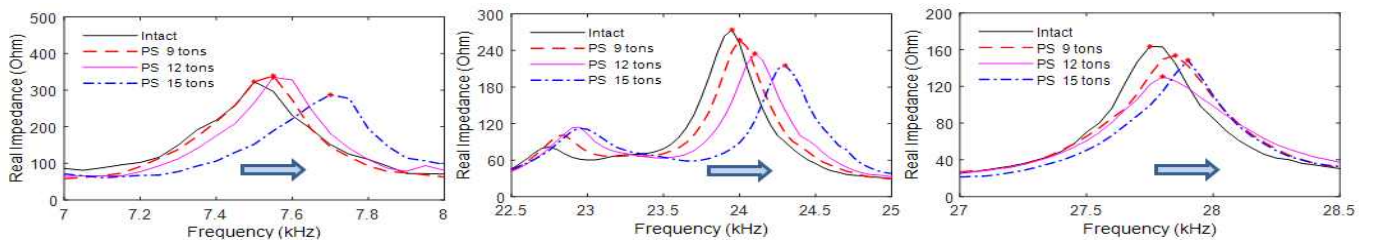


(c) 압전소자 유형 및 인터페이스 설치

그림 2-1-9 앵커헤드용 복층 웨어러블 인터페이스의 압전응답 계측 실험 구성



(a) 긴장력 변화에 대한 PZT별 임피던스 응답

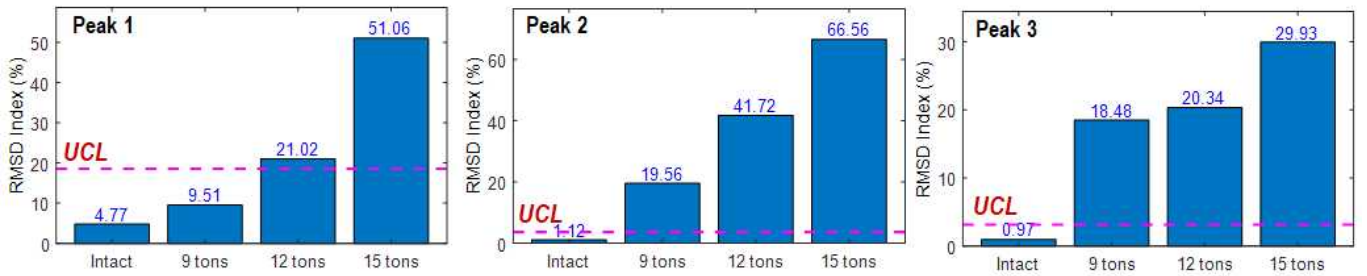


(b) 긴장력 변화에 대한 PZT 1(자유진동형, 사각PZT)의 주파수대역별 임피던스 응답

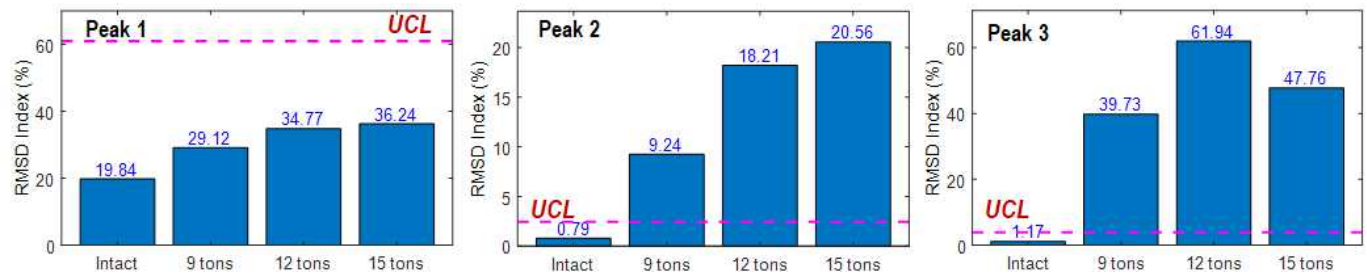
그림 2-1-10 복층 웨어러블 인터페이스 유형별 임피던스 응답 분석

- 그림 2-1-10(a)의 임피던스 응답 계측 결과로부터 각 피크에 해당하는 3개의 주파수 대역을 선정하고, 각 피크 주파수 대역별 임피던스 특성치(RMSD/CCD)를 분석하였음. 그림 2-1-11은 임피던스 특성 중 RMSD 지수 분석 결과 및 PZT 별 긴장력 변화 감지 성능분석 결과임.
- 4개 PZT 센서에서 Peak 3 주파수 대역의 임피던스 응답이 가장 정확하게 모든 긴장력 변화를 감지하였음. 또한 Peak 2 주파수 대역의 경우 PZT 2 센서를 제외한 모든 센서에서 정확하게 긴장력 변화를 감지하였음. Peak 1 주파수의 경우에는 모든 센서에서 긴장력 변화 감지 민감도가 낮았음.
- 긴장력 변화 시나리오로서 4단계가 고려되었으며, 최종 도입 긴장력(15 Ton)의 약 60% 수준인 9 Ton의 긴장력 변화에 대해 임피던스 특성치로부터 긴장력 변화 감지가 가능하였음.

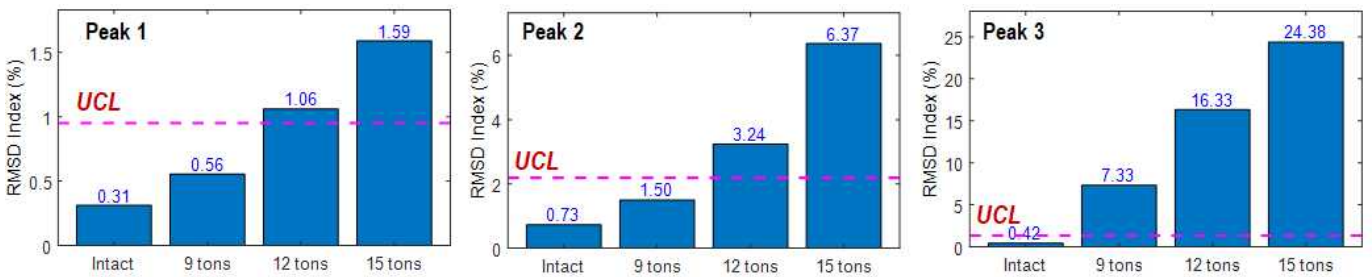
- PZT 센서에 따른 손상감지 성능에 차이가 있었으며, PZT 4의 경우, 긴장력 변화에 따라 3개 피크에 대한 결과에서 RMSD 지수가 서서히 변화하였으며, 상한관리도분석 결과 3개 피크 모두에서 긴장력 변화 감지가 가능하였음. 대체로 긴장력 변화 감지 성능은 사각형 타입 PZT에서 우수하였음. 각 위치에 사용된 PZT 센서의 종류에 따라 서로 다른 강성을 가지는데 사각형 PZT의 제원상 상대적으로 큰 가진력이 발생하여 충분한 압전응답을 얻을 수 있는 것으로 판단됨.



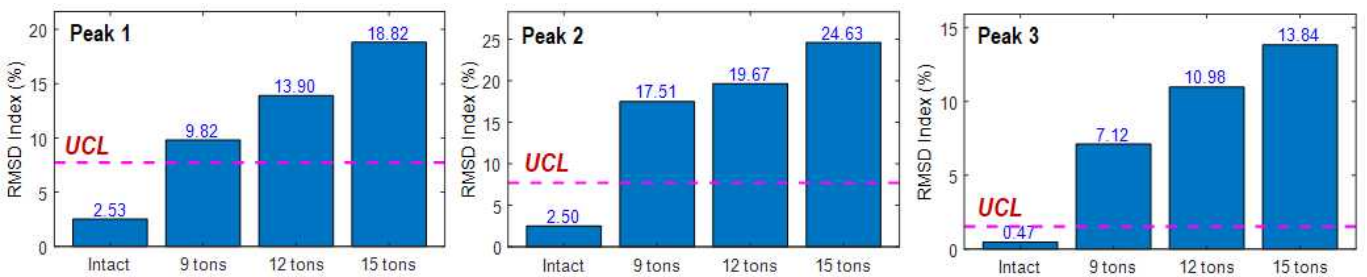
(a) PZT 1



(b) PZT 2



(c) PZT 3

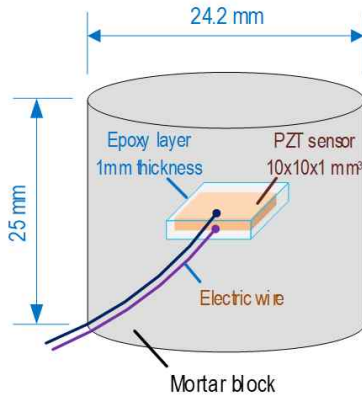


(d) PZT 4

그림 2-1-11 복층 웨어러블 인터페이스 유형별 임피던스 특성치(RMSD) 분석 및 긴장력 변화 감지 성능 분석

□ 콘크리트 정착부 내장형 웨어러블 인터페이스 블록 설계 및 제작

- 콘크리트 정착부의 파손감지를 위한 내장형 웨어러블 인터페이스 블록을 그림 2-1-12와 같이 설계하였음. 인터페이스 블록은 그림 2-1-12(a)와 같이 시멘트모탈 내부에 압전응답 측정용 PZT 센서가 내장된 원통형 구조임. 원통의 크기는 지름 24.2mm 및 높이 25mm이며, 내장된 PZT 센서는 10×10×1mm 크기로서 방수를 위하여 에폭시를 1mm 두께로 도포하였음.



(a) 인터페이스 블록 구조

(b) 내장용 PZT 센서

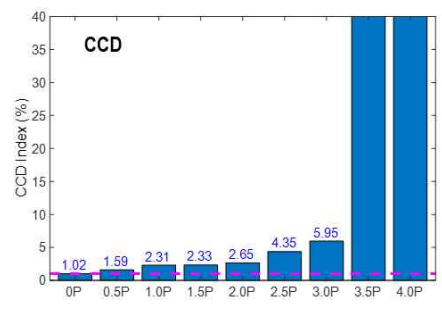
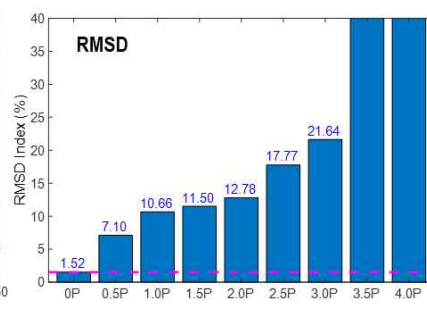
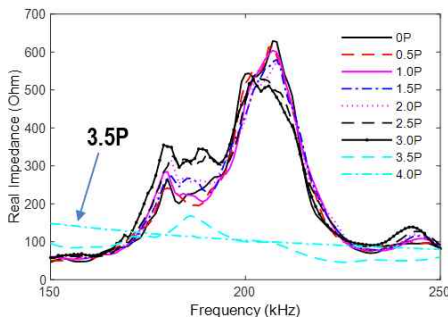
(c) 인터페이스 블록 실물

그림 2-1-12 콘크리트 정착부 내장형 웨어러블 인터페이스 블록

- 웨어러블 인터페이스 블록의 성능 검증을 위하여 그림 2-1-13(a)와 같이 인터페이스 블록에 대해 압축시험을 수행하였음. 압축 시험에 사용된 인터페이스 블록의 크기 및 구조는 그림 2-1-12(a)와 같음. 인터페이스블록의 임피던스 응답 측정결과 약 210kHz 주파수 대역에서 피크가 관찰되었음.
- 그림 2-1-13(b)는 150~250kHz 범위의 임피던스 응답 및 압축하중 변화에 대한 임피던스 특성치 분석결과를 나타냄. 압축하중이 증가함에 따라 피크 주파수는 점차 감소하는 현상이 관찰되었음. 압축하중의 증가에 따라 인터페이스 블록에 균열이 발생하였으며 압축하중 단계 3.5P에서는 의미있는 임피던스응답 측정이 어려웠음.
- 임피던스 응답의 RMSD 및 CCD 분석 결과, 압축하중 증가에 따라 임피던스 특성값이 단계적으로 변화하는 것을 관찰되었음. 이는 인터페이스 블록이 콘크리트 정착부의 응력변화를 감지할 수 있는 것으로 평가할 수 있음. 즉, 손상에 기인한 콘크리트 정착부 내 응력변화는 매립된 인터페이스 블록을 통해 감지할 수 있을 것으로 예상 할 수 있음. 압축하중 변화에 대한 민감도는 CCD 특성치에 비해 RMSD 특성치에서 더 높게 관찰되었음. 본 웨어러블 인터페이스 블록은 별도로 제작하여 정착부 구조물의 콘크리트 타설 전 매립하면 되므로 시공단계의 구조물에 간단하게 적용 가능함.



(a) 인터페이스 블록의 압축시험



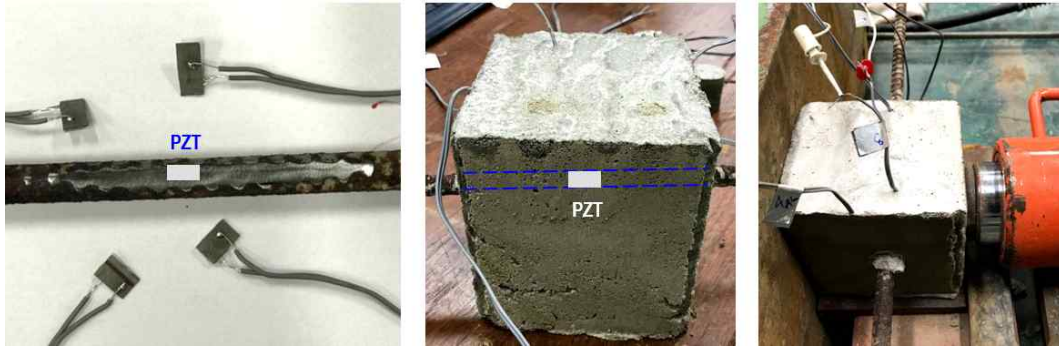
(b) 임피던스 응답 및 RMSD/CCD 분석

그림 2-1-13 콘크리트 정착부용 내장형 웨어러블 인터페이스 블록의 임피던스 특성 분석

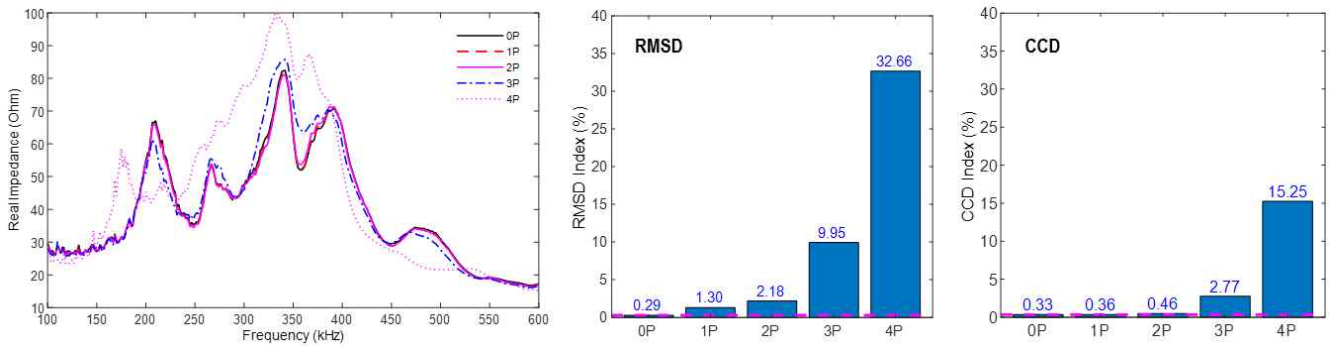
- 그림 2-1-14(a)와 같이 철근에 직접적으로 부착된 PZT의 임피던스 계측 실험을 통해 앞서 제시된 내장형 웨어러블 인터페이스 블록의 상대적인 성능을 비교하였음. 이를 위해 철근의 표면을 다듬고 PZT 부착 후,

물탈 블록에 매립하였음. 철근에 부착된 PZT의 임피던스 측정 결과, 100~600kHz 주파수 범위에서 약 4개의 피크가 관찰되었음.

- 그림 2-1-14(b)는 100~600kHz 범위의 임피던스 응답 및 압축하중 변화에 대한 임피던스 특성치 분석결과를 나타냄. 압축하중이 증가함에 따라 피크 주파수는 점차 감소하는 현상이 관찰되었음. 임피던스 응답의 RMSD 및 CCD 분석 결과, 압축하중 증가에 따라 임피던스 특성값이 단계적으로 변화하는 것을 관찰되었음. 압축하중의 증가에 따른 임피던스 응답의 변화는 웨어러블 인터페이스 블록과 유사하게 높은 성능을 보였음. 임피던스 주파수 대역이 상대적으로 높은 점과 철근조립 작업 전 센서 부착을 위한 과정을 수행해야한 다는 점에서 실제 구조물에서의 적용 가능성은 더 낮을 것으로 판단됨.



(a) 철근에 부착된 PZT 콘크리트 블록의 압축시험



(b) 임피던스 응답 및 RMSD/CCD 분석

그림 2-1-14 콘크리트 내 철근에 부착된 PZT의 임피던스 특성 분석

2.1.3 제작된 웨어러블 압전센서 인터페이스를 결합한 정착부의 압전신호 감지 성능 분석

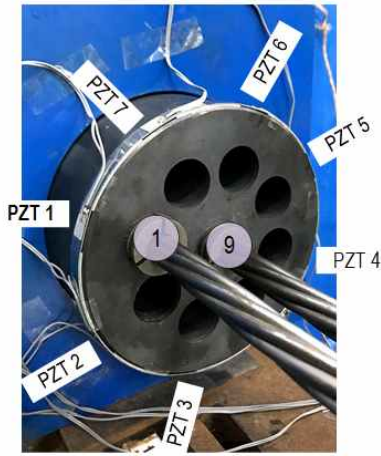
□ 앵커헤드용(주장응력 거동형) 웨어러블 인터페이스의 압전응답 분석

- 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스의 압전신호 감지 성능 분석을 위하여 그림 2-1-15와 같이 텐던-정착부 구조를 실험프레임에 설치하였음. 실험프레임의 좌측(anchor head side)에는 긴장재(PS strand), 9-강연선용 앵커헤드(anchor head) 및 지압판(bearing plate)을 설치하였음. 실험프레임의 우측(force control side)에는 그림 2-1-1의 긴장력 제어 시스템을 설치하였음.

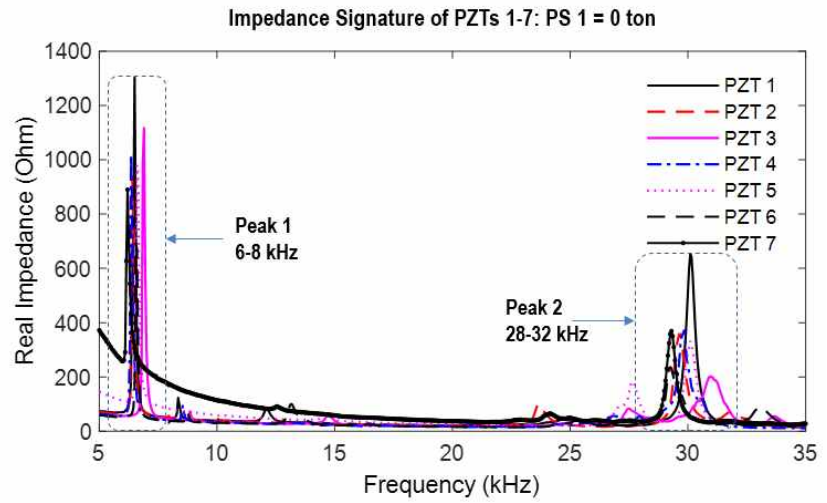


그림 2-1-15 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스의 압전신호 계측 실험 셋업(핵심성과2-① 목표달성⑧)

- 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스의 압전응답 분석을 위하여 9-hole 앵커헤드에 9개의 긴장재 모니터링을 위한 웨어러블 인터페이스가 설치되었음. 웨어러블 인터페이스는 세부연구내용 1의 PZT 센서별 센싱영역 개념(그림 1-2-15)에 따라 설계되었음. 그림 2-1-16(a)와 같이 8개의 PZT 배치로 설계되었으며 인터페이스 재료로서 Hoop형 밴드를 이용함에 조임쇠 영역을 고려하여 7개의 PZT를 부착하였음.
- 먼저, 2개 강연선에 대한 긴장력 제어 실험을 수행하였음. 두 개의 긴장재가 느슨한 상태(긴장력 0 ton)로 설치되었을 때, 7개의 PZT로부터 계측된 임피던스 응답은 그림 2-1-16(b)에 도시하였음. 6-8kHz 주파수 대역과 28-32kHz 주파수 대역에서 피크가 관찰되었음.
- 강연선의 긴장력 변화에 대한 임피던스 응답 분석을 위하여 Strand 1 및 Strand 9의 긴장력을 0~12ton까지 변화시켰음. 그림 2-1-16(c)는 Strand 9의 긴장력 변화에 대한 PZT 1 및 PZT 3의 임피던스 응답을 도시한 것임. 강연선의 긴장력이 작을수록 피크 주파수가 낮게 측정되었음.
- 계측된 임피던스 응답의 특성치(RMSD) 분석을 수행하였음. 그림 2-1-17(a)는 Strand 1의 손상에 대한 RMSD 분석 결과임. 손상 강연선과 가장 가까운 위치의 PZT1의 결과에서 긴장력의 변화가 가장 뚜렷하게 감지되었으며, 손상 강연선과 가장 먼 위치의 PZT4의 결과에서도 긴장력 변화에 대한 임피던스 응답의 민감도가 높은 것으로 관찰되었음.
- 그림 2-1-17(b) Strand 9의 손상에 대한 RMSD 분석 결과임. Strand 9의 경우 7개의 PZT와의 거리가 동일한 경우임. Strand 9의 손상에 대한 PZT 임피던스 응답의 변화가 7개의 PZT 결과에서 유사하게 나타날 것으로 예상되었으나, PZT 4에서 가장 변화가 크게 관찰되었으며 PZT 6 및 PZT 7은 손상을 감지하지 못하였음. 이는 인터페이스의 부착 조건에 따라 손상민감도가 상이하게 나타난 것으로 판단됨.
- Strand 1 및 Strand 9의 손상에 대하여 최종 도입 긴장력(12Ton)의 약 33% 수준인 4 Ton의 긴장력 변화에 대해 임피던스 특성치로부터 긴장력 변화 감지가 가능하였음.

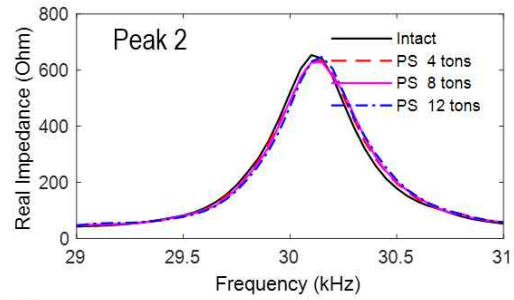
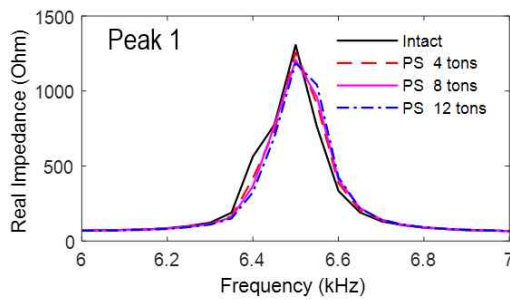


(a) PZT 인터페이스 설치

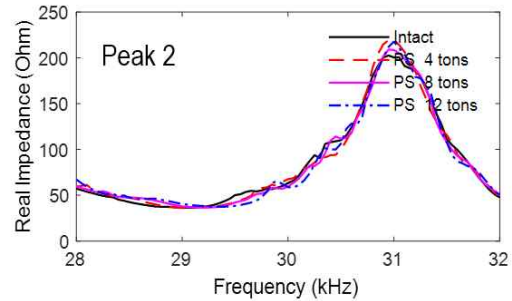
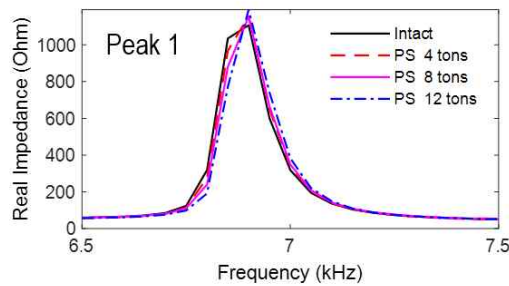


(b) PZT별 임피던스 응답

PZT 1

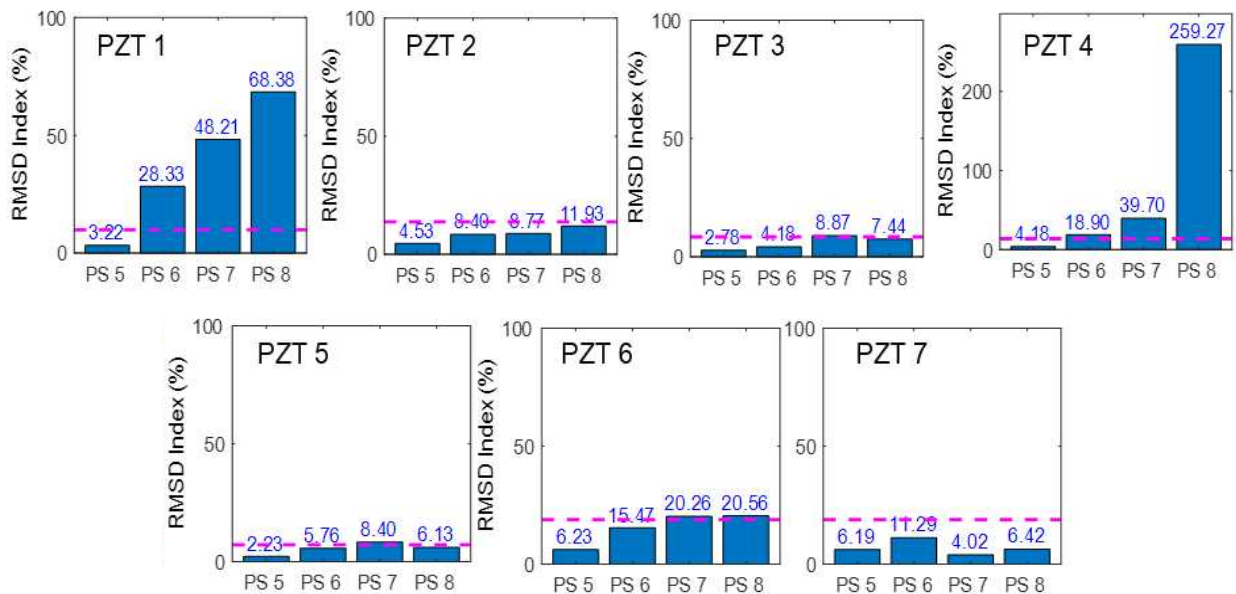


PZT 3

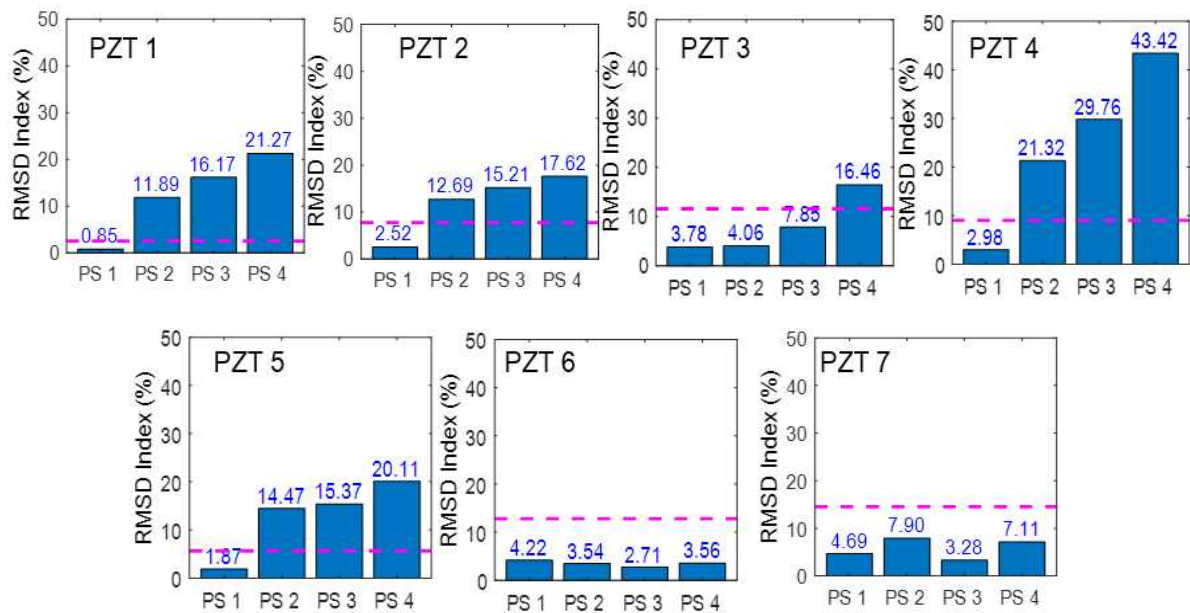


(c) Strand 9의 긴장력 변화에 대한 임피던스 응답 변화(PZT 1, PZT 3)

그림 2-1-16 긴장재 파손 감지용 주장응력 거동형 PZT 인터페이스 설치 및 PZT별 임피던스 응답 분석



(a) Strand 1 손상의 경우

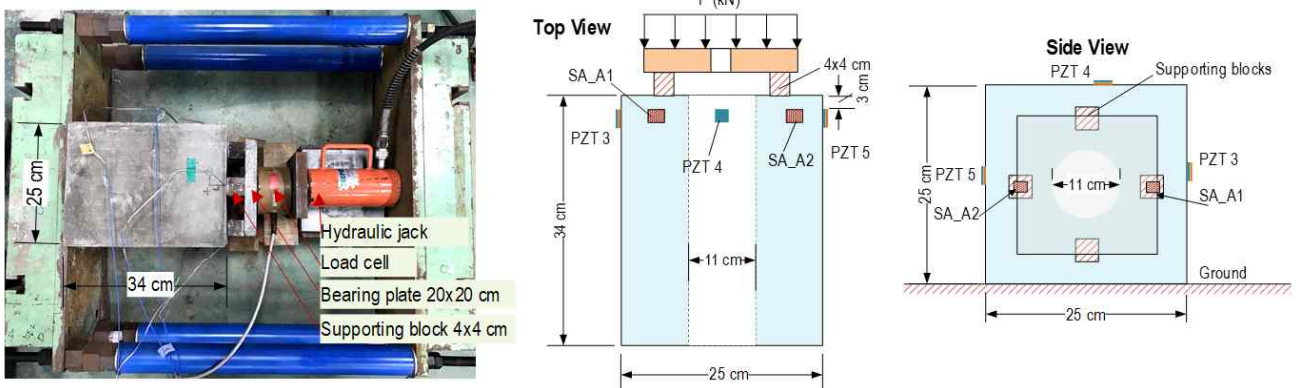


(b) Strand 9 손상의 경우

그림 2-1-17 손상 강연선 위치에 따른 인터페이스 내장 PZT의 임피던스 응답 특성치(RMSD) 분석

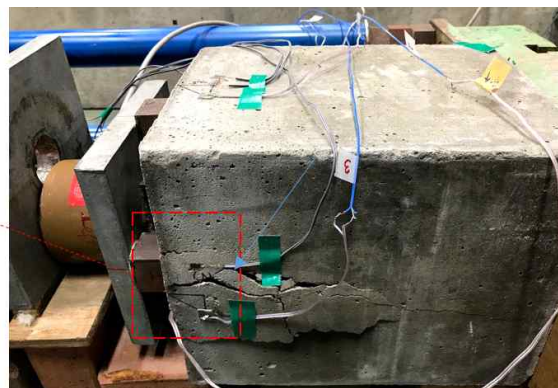
□ 콘크리트 정착부용 내장 웨어러블 인터페이스 블록(지압응력 거동형)의 압전응답 분석

- 그림 2-1-12와 같이 제작된 인터페이스 블록의 콘크리트 정착부 파손감지 성능검증을 위하여 인터페이스 블록이 내장된 무근콘크리트 모형을 제작하였음. 무근콘크리트 모형은 중공형 사각박스 형태(250×250×340mm)로 제작되었으며 인터페이스 블록(SA_A1, SA_A1)이 내장된 위치는 그림 2-1-18(a)와 같음. 또한, 인터페이스 블록의 성능 비교를 위하여 대조군으로서 콘크리트 표면에 부착된 PZT를 고려하였음.
- 무근콘크리트 모형에 대하여 압축하중 시험을 수행하였으며 균열 유도를 위하여 모형 상단면에 지지블록(supporting block)을 설치하였음. 압축하중 단계를 증가시킴에 따라 그림 2-1-18(b)와 같이 모형의 측면에서 균열이 발생하였음.



(a) 내장형 인터페이스 블록 설치 및 압축시험 셋업

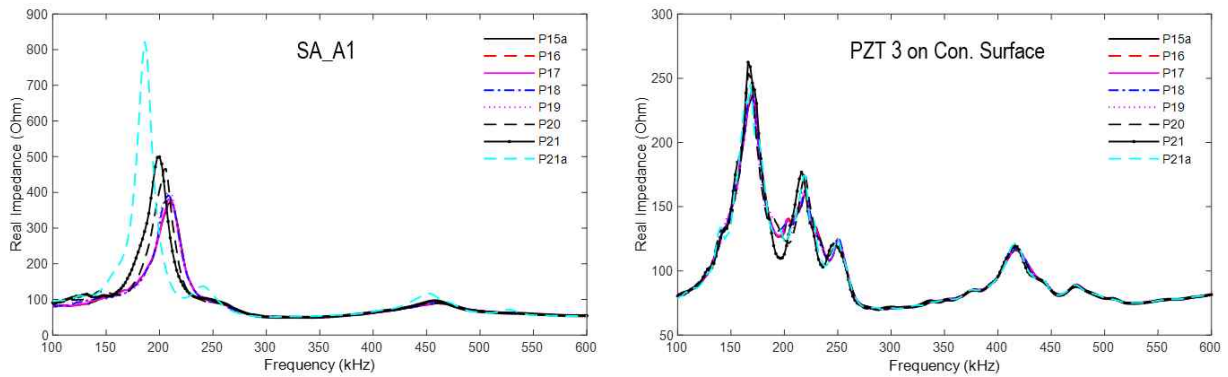
Embedded Smart Aggregate_A1
PZT 3 on Con. Surface



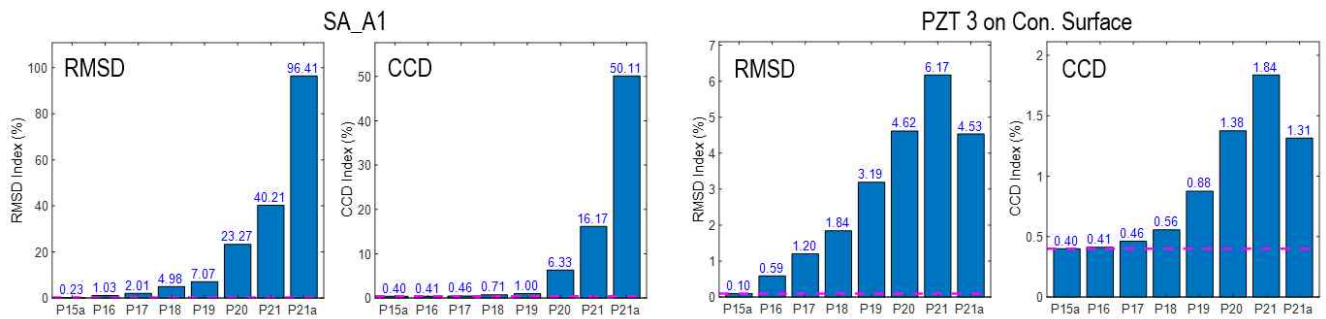
(b) 무근 콘크리트 정착부의 균열 발생

그림 2-1-18 내장형 웨어러블 인터페이스 블록 성능평가를 위한 무근 콘크리트 정착부 압축시험 셋업

- 압축하중 증가에 따른 인터페이스 블록의 임피던스 응답을 계측하였음. 그림 2-1-19(a)는 인터페이스 블록 SA_A1 및 콘크리트 표면의 PZT3으로부터 계측된 임피던스 응답을 도시하였음. 인터페이스 블록의 임피던스 응답은 압축하중이 증가함에 따라 피크 주파수가 감소하는 경향이 뚜렷하게 관찰되었음. 콘크리트 표면에 부착된 PZT의 경우도 압축하중 상태에 대한 피크 주파수 변화가 관찰되었지만, 그 민감도는 상대적으로 낮은 것으로 분석되었음.
- 임피던스 특성치(RMSD/CCD) 분석 결과, 콘크리트 표면에 부착된 PZT보다 콘크리트 모형에 내장된 인터페이스 블록의 압축하중 변화 감지 결과가 더욱 정확하며 그 민감도도 월등히 뛰어난 것으로 분석되었음.



(a) 압축하중 단계별 압전응답 변화(P21 초기 균열 발생)

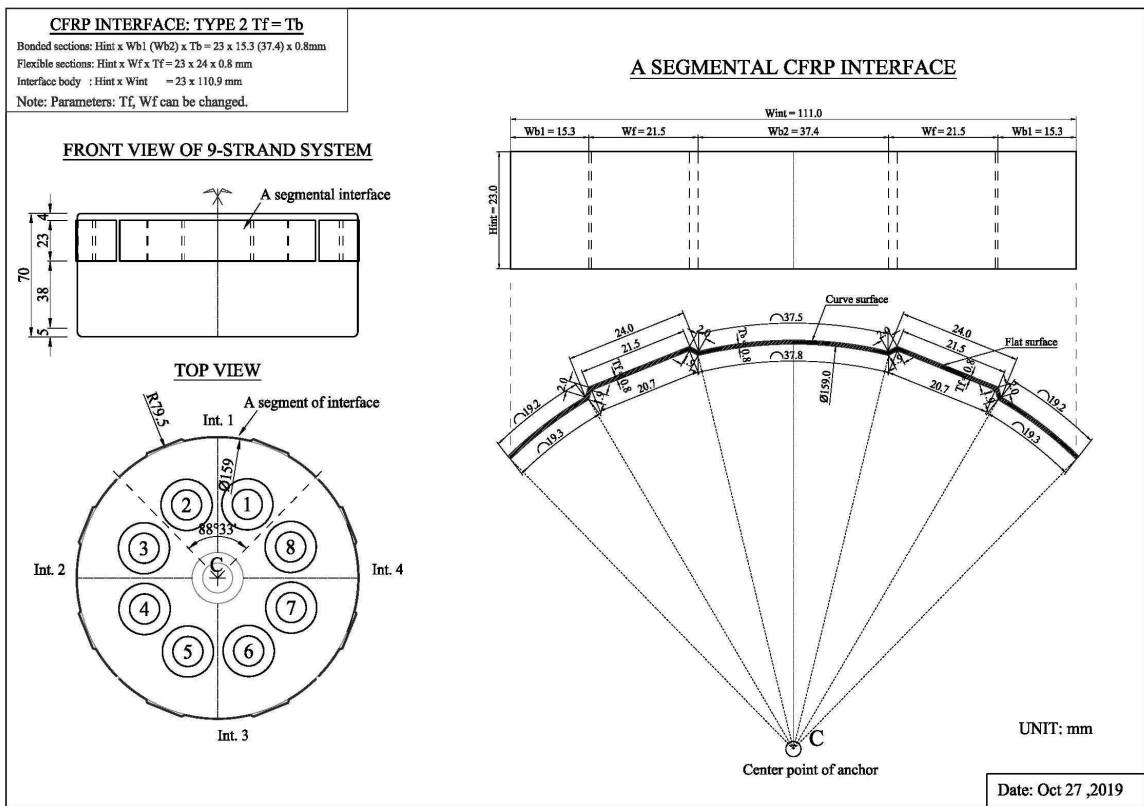


(b) 압축하중 단계별 압전응답 변화

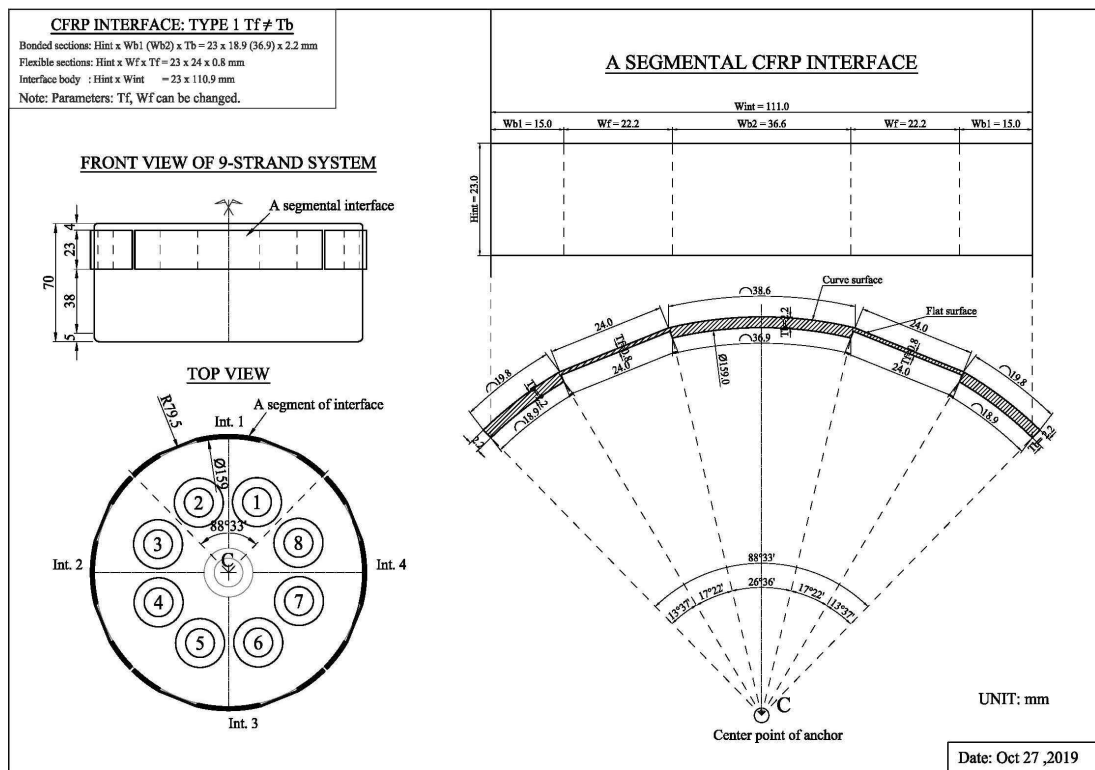
그림 2-1-19 압축하중에 대한 무근 콘크리트 정착부의 압전응답 변화(콘크리트 내장형 인터페이스 블록 vs 콘크리트 표면부착 PZT)

□ 판형 CFRP 인터페이스의 주장응력 변화에 대한 임피던스 응답 특성 분석

- CFRP 제작 여건 및 재료 물성을 고려하여 대상 텐던 정착부 앵커헤드의 사이즈에 따라 판형 CFRP를 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단되었음. 이에 따라, 그림 2-1-20과 같이 9-hole 앵커헤드 모니터링용 판형 CFRP 웨어러블 인터페이스를 설계하였음. 판형 CFRP 인터페이스는 2개의 PZT센서-진동판 구조를 지니며 단일 앵커헤드에 대해 4개가 부착됨.
- CFRP 인터페이스의 제작을 위해서는 형상가공용 몰드를 제작하고 탄소섬유 레이어링 및 수지함침 과정 후 특정 압력 및 온도를 가하여 경화과정을 거쳐야 함. 제작 과정 상 편의 및 가공 상 에러를 최소화할 수 있도록 두 가지 형태의 인터페이스 형상을 고려하였음. Type 1은 진동판 및 고정판 부분의 인터페이스의 두께가 균일한 형태이며 Type 2는 진동판의 두께가 고정판의 두께보다 얇은 특징이 있음.



(a) Type 1

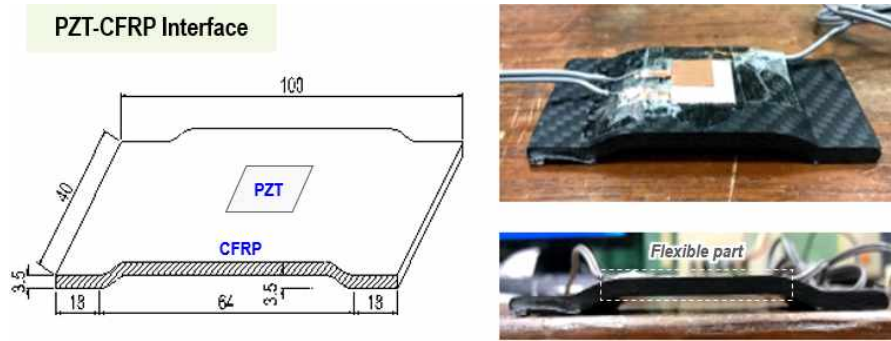


(b) Type 2

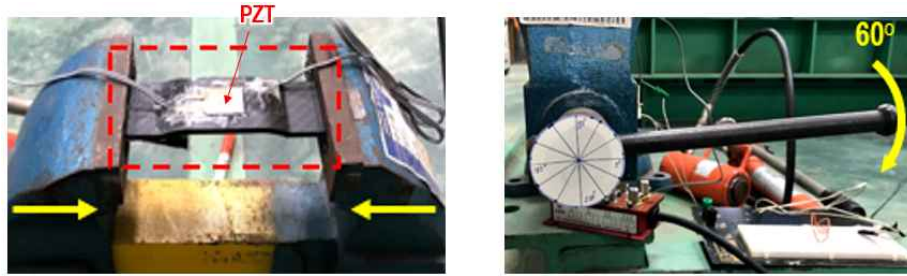
그림 2-1-20 9-hole 앵커헤드 모니터링용 CFRP 웨어러블 인터페이스 설계도

- 판형 CFRP 인터페이스의 주장응력 변화에 대한 임피던스 응답특성 분석을 수행하였음. 실험에 사용된 CFRP 인터페이스는 그림 2-1-21(a)와 같이 100×40×3.5mm의 크기이며 그림 2-1-20(a)와 같이 진동판 및 고정판의 두께가 일정함. CFRP 인터페이스의 진동판 부분의 윗면에는 임피던스 측정을 위한 PZT센서가 부착되었음. 주장응력 재현을 위하여 CFRP 인터페이스를 클램프에 끼운 상태로 클램프 레버를 조작하여 압축응력이 발생하도록 하였음. 초기 고정상태를 기준으로 레버를 최대 60° 까지 조작하였음.
- 그림 2-1-21(b)는 주장응력의 변화에 대한 임피던스 응답의 변화를 나타냄. 주장응력의 변화에 따라 임피던스 응답의 피크 주파수가 점차 감소하는 것이 관찰되었음. 임피던스 응답 특성치(RMSD 및 CCD) 분석

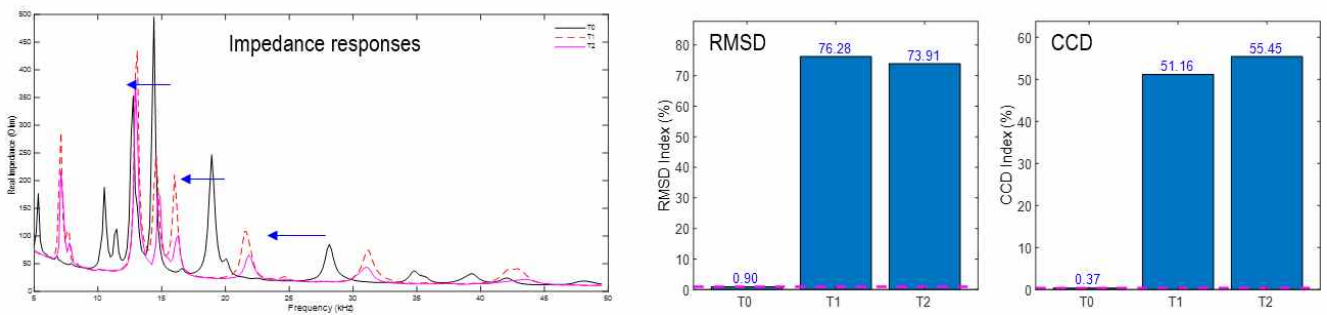
결과에서도 판형 CFRP 인터페이스의 주장응력 변화 시 임피던스 응답 특성치가 매우 뚜렷하게 변화하는 것으로 분석되었음.



(a) PZT-CFRP 인터페이스 형상 제원



(b) 주장응력 제어 실험 셋업



(c) 주장응력 변화에 대한 PZT-CFRP 인터페이스의 임피던스 응답 특성

그림 2-1-21 PZT-CFRP 인터페이스의 주장응력 변화에 대한 임피던스 응답 특성 분석

2.2 이중 기전응답 기반의 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 개발

2.2.1 정착부 제원 및 웨어러블 인터페이스 유형에 따른 압전응답 분석 기술의 개발

□ 정착부 및 긴장재에 적합한 압전응답 분석 기법 설계

- 정착부 및 긴장재의 파손 감지를 위한 압전응답 분석 기법은 세부연구내용 1의 그림 1-3-12에서 제시되었음. 이를 바탕으로 강연선 및 정착부 파손감지용 소프트웨어를 그림 2-2-1과 같이 구성하였음. 프로그래밍 언어로 Delphi 10.0 Seattle을 이용하였으며 사용자의 편의성을 위하여 GUI 환경으로 구성하였음.
- 전역적인 파손 감지를 위한 압전응답 분석기법으로는 그림 2-2-1의 Global DD 해석부에 나타난 바와 같이 압전소자로부터 계측된 동적변형률의 모드해석을 통한 고유진동수 분석을 이용하는 기술을 제시하였으며, 고유진동수의 변화를 모니터링함으로써 전역적 손상여부를 판정할 수 있음.
- 국부적인 파손 감지를 위한 압전응답 분석기법으로는 그림 2-2-1의 Local DD 해석부에 나타난 바와 같이 압전소자로부터 계측된 임피던스 응답의 특성치 및 상한 관리도 분석을 이용하는 기술을 제시하였으며, 임피던스 응답 특성치가 상한 관리도를 벗어나는 경우 손상으로 판정함. 이때 임피던스 응답 특성치로서 RMSD 및 CC를 이용하였음.

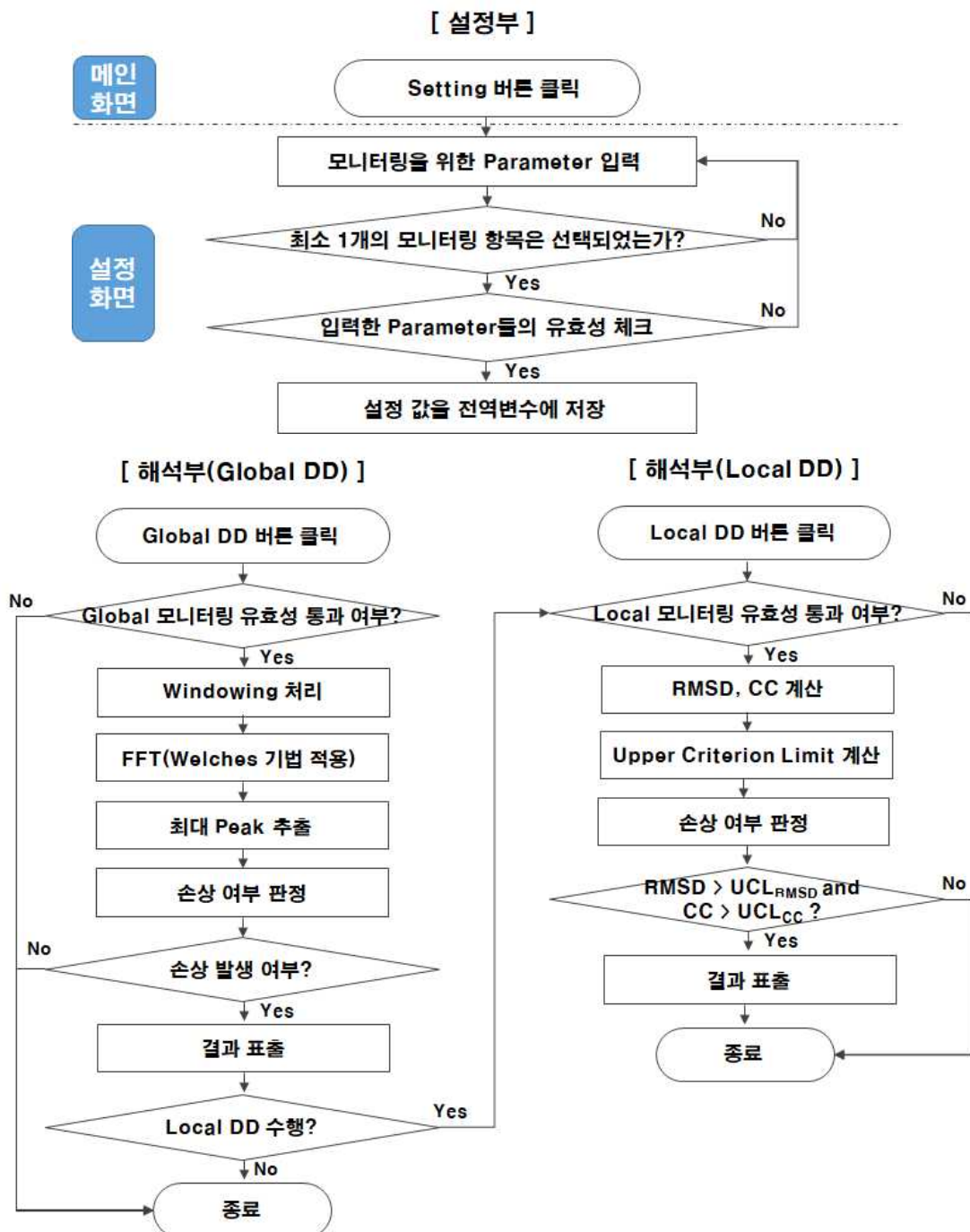


그림 2-2-1 강연선 및 정착부 파손감지용 소프트웨어의 구성도

- 정착부 및 긴장재 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치를 위한 압전신호 분석 소프트웨어 작성
- 강연선 및 정착부의 파손감지 소프트웨어를 그림 2-2-2와 같이 작성하였음. 소프트웨어의 메인화면은 “New”, “Setting”, “Run Global DD”, “Run Local DD”, “Exit” 5개의 아이콘으로 구성되어 있음. “New” 아이콘은 새로운 해석을 위한 재설정을 위한 것이며, “Setting” 아이콘은 압전응답 신호 분석을 위한 설정변수를 지정하기 위한 것임. 신호해석 변수 지정 후 “Run Global DD” 아이콘을 클릭하면 전역적 손상감지를 위한 동적변형률 신호분석이 수행됨. “Run Local DD” 아이콘을 클릭하면 국부적 손상감지를 위한 임피던스 신호분석이 수행됨. 프로그램 종료 시 “Exit” 아이콘을 클릭함.

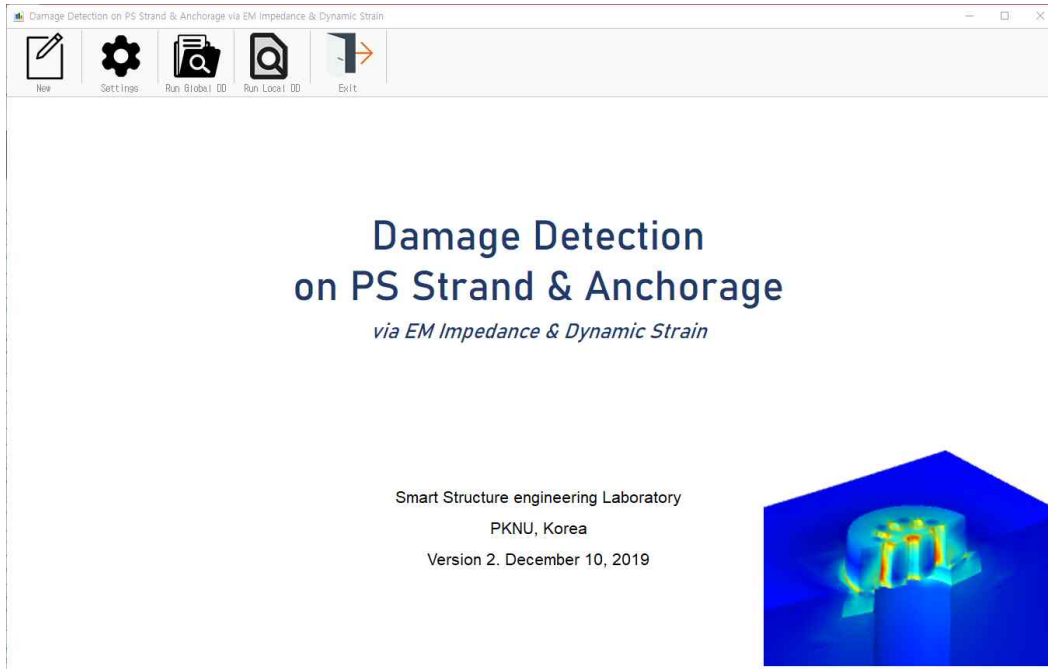


그림 2-2-2 강연선과 정착부의 파손 감지 소프트웨어 메인화면(핵심성과2-② 목표달성)

- 압전응답 신호해석을 위한 화면은 그림 2-2-3과 같으며 “Setting” 아이콘 클릭을 통해 접근할 수 있음. Global Monitoring 및 Local Monitoring 파트로 구분되어 있으며, 신호 유형별 해석 설정 변수 및 데이터 경로를 지정할 수 있음.
- Global Monitoring의 경우, 동적변형률 신호분석을 위한 FFT 개수, 필터 타입, 데이터 중첩률 및 관리도 해석 관련 변수를 설정할 수 있으며, 기준데이터 및 모니터링 데이터의 파일 경로를 지정함. Local Monitoring의 경우, 임피던스 응답 해석을 위한 변수로서 신호해석 주파수 대역, 데이터 수, PZT 센서 수, 계측횟수 등을 지정할 수 있음. 해석 대상 데이터의 파일 경로 지정 후 “Confirm” 아이콘을 클릭하면 설정된 변수를 저장하고 메인화면으로 돌아감.
- 다음으로, 메인화면에서 “Run Global DD” 아이콘을 클릭하면 그림 2-2-4와 같이 동적변형률 신호해석 결과 창이 Global Detection 탭에 나타남. 윈도우 우측 상단에는 기준 및 모니터링 상태에 대한 Raw 신호가 표시됨. 윈도우 우측 하단에는 기준 및 모니터링 상태에 대한 동적변형률 응답의 주파수응답이 표시됨. 우측 최하단에는 주파수 응답으로부터 추출된 상태별 고유진동수 및 이의 변화 정도가 표시됨. Status of Structure 파트에는 고유진동수 변화 분석을 통한 구조상태변화 감지 결과가 표시됨. 화면 좌측 설정 창에서는 그래프 작성에 필요한 옵션을 지정할 수 있음. 그래프 및 테이블 데이터는 상단의 데이터 선택 옵션을 통해 원하는 데이터를 선택 및 도시할 수 있음. 또한, 화면 좌측 설정 창에서는 그래프 작성에 필요한 옵션을 지정할 수 있음. 도시된 그래프 및 테이블 자료는 클립보드 또는 그림/텍스트 파일 형태로 저장 가능함.
- “Run Local DD” 아이콘을 클릭하면 그림 2-2-5와 같이 임피던스 응답 분석 결과를 확인할 수 있음. 분석 결과 중 “Impedance Data” 탭에서는 기준 데이터 및 모니터링 데이터로 지정한 임피던스 응답이 그래프 및 테이블로 표시됨. 그래프 및 테이블 데이터는 상단의 데이터 선택 옵션을 통해 원하는 데이터를 선택 및 도시할 수 있음. 또한, 화면 좌측 설정 창에서는 그래프 작성에 필요한 옵션을 지정할 수 있음. 도시된 그래프 및 테이블 자료는 클립보드 또는 그림/텍스트 파일 형태로 저장 가능함.

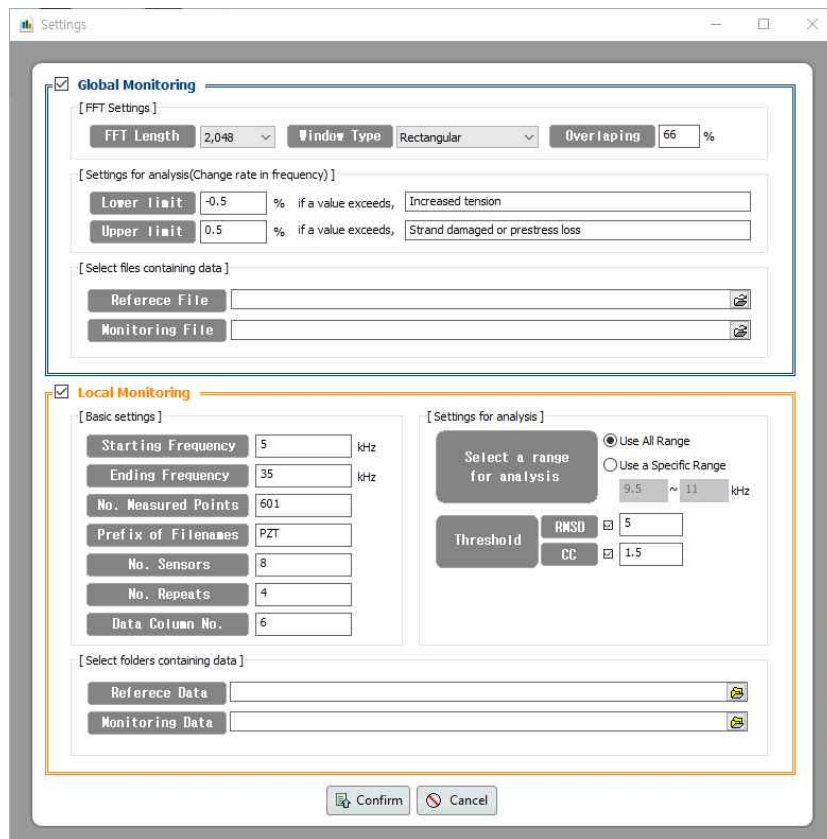


그림 2-2-3 강연선/정착부 파손감지 SW의 기전 임피던스 및 동적변형을 데이터 경로 및 신호해석 변수 설정 화면



그림 2-2-4 강연선/정착부 파손감지 SW의 동적변형을 응답 및 전역적 구조상태 표시 화면

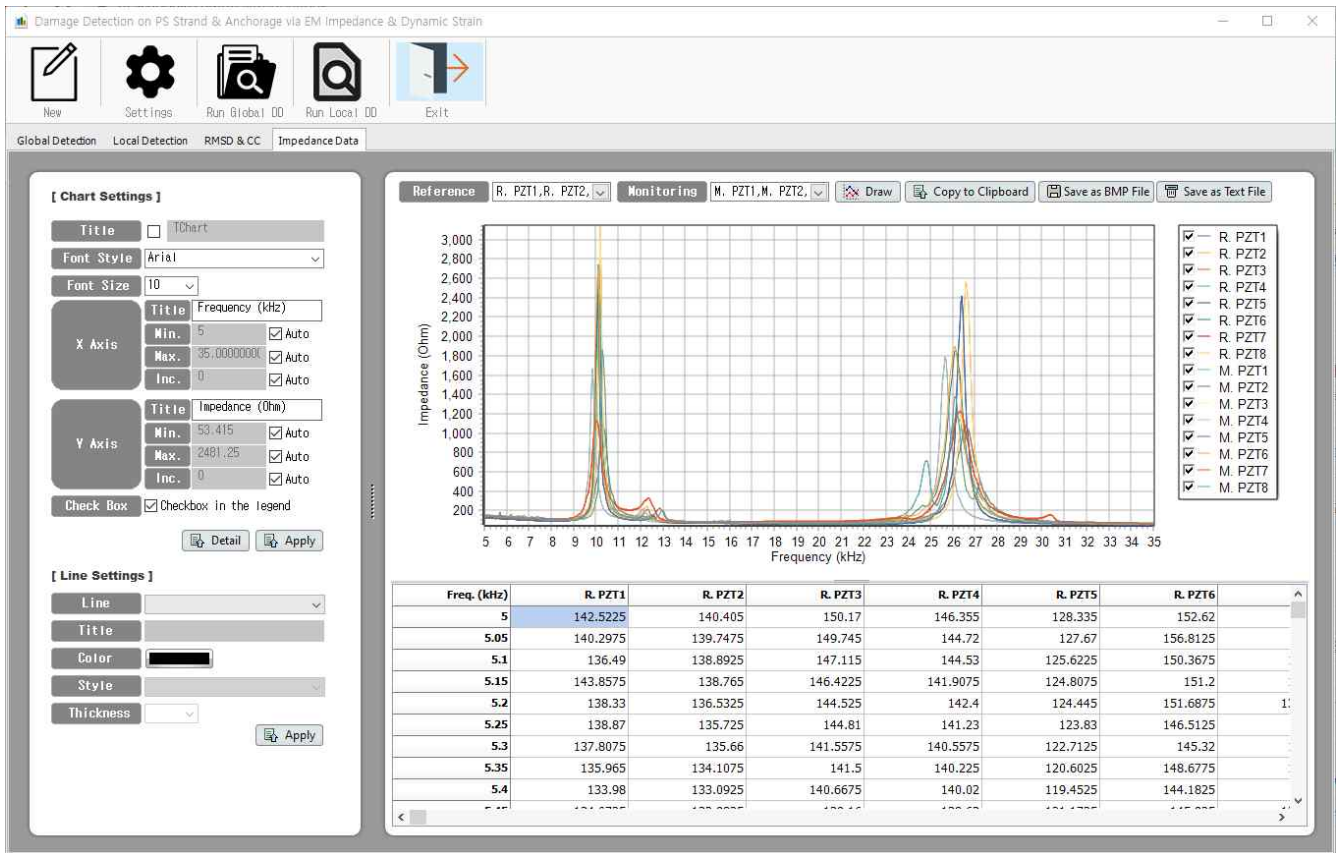


그림 2-2-5 강연선/정착부 파손감지 SW의 임피던스 응답 표시 화면

2.2.2 PZT 센서 네트워킹 및 토모그래피 개념을 적용한 압전신호 분석 기술의 적용

- PZT 센서의 압전 동적변형률/임피던스 신호감지, 네트워킹, 신호분석 소프트웨어 작성
 - 세부연구내용 1의 1.3.2에 제시된 웨어러블 인터페이스의 압전 신호 감지, 네트워킹 및 압전신호 분석 기법(그림 1-3-11 및 그림 1-3-12)을 그림 2-2-2와 같이 소프트웨어화 하였음.
 - 그림 2-2-3의 “Setting” 영역에서 해석 변수 입력을 완료하고 “Run Global DD” 또는 “Run Local DD” 아이콘을 클릭하면 “Global Detection” 탭에서 동적변형률 응답의 고유진동해석 결과를 확인할 수 있으며, “Local Detection” 탭에서 임피던스 응답의 토모그래피 해석 결과를 확인할 수 있음. 임피던스 응답의 경우, 여러 개의 PZT 센서로부터 계측된 임피던스 응답의 네트워킹을 통해 토모그래피 분석이 수행되며 이로부터 파손이 발생한 긴장재 위치의 추정이 가능함.
- 국부 강연선 파손 유발 기전 임피던스 응답의 토모그래피 소프트웨어 작성
 - 국부 강연선 파손 여부는 임피던스 응답의 토모그래피 결과는 그림 2-2-6의 “Local Detection” 탭에서 확인할 수 있음. 결과창의 우측에 토모그래피 분석 결과가 도시되며, 이로부터 강연선 파손 위치를 직관적으로 확인할 수 있고 토모그래피 아래의 테이블에는 파손 감지 여부가 표시됨. 결과창의 좌측에서는 토모그래피 분석 결과 그래프의 표시방법에 관한 옵션을 변경할 수 있으며, 옵션 변경 후 아래의 “Apply” 아이콘을 클릭하면 결과창에 반영됨. 결과창에 표시된 토모그래피 결과는 상단의 아이콘을 통해 클립보드에 복사하거나 이미지 파일로 저장할 수 있음.

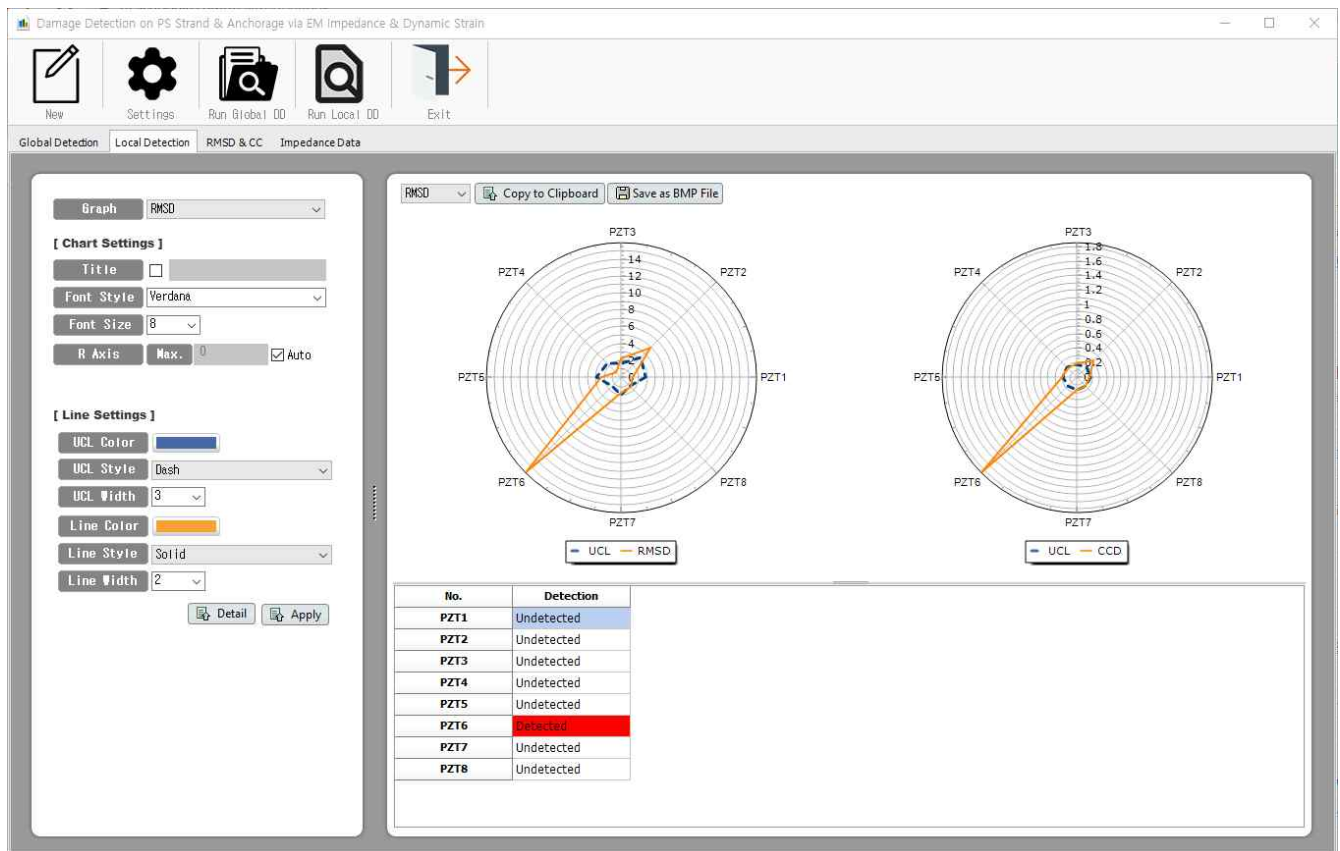


그림 2-2-6 인터페이스에 내장된 PZT 센서 간 네트워킹을 통한 토모그래피 결과 표시창

2.2.3 정착부/긴장재에 적합한 PS 강연선 파손감지 기술의 적용

□ 임피던스 응답 및 RMSD/CCD 분석기반 손상발생 감지 소프트웨어 작성

- 세부연구내용 1의 1.1.3에 제시된 임피던스 응답의 RMSD 및 CCD 기반 국부 손상감지 분석(그림 1-1-18)을 그림 2-2-7과 같이 소프트웨어화 하였음.
- 그림 2-2-3의 해석 변수 입력을 완료하고 “Run Local DD” 아이콘 실행 후 표시된 결과 창 중 “RMSD/CCD” 탭에서 임피던스 특성치 결과확인이 가능하도록 구성하였음. 소프트웨어의 내부 알고리즘을 통해 각각의 PZT 센서로부터 계측된 임피던스 응답으로부터 임피던스 특성치(RMSD 및 CCD) 분석을 수행하며, 각각의 그래프로써 결과가 표시되도록 설정되었음.

□ 기전 임피던스 신호의 네트워킹 및 토모그래피를 이용하는 국부 강연선 파손 감지 소프트웨어 작성

- 기전 임피던스 신호의 네트워킹을 통한 토모그래피 결과는 그림 2-2-6과 같이 결과창의 “Local Detection” 탭에서 확인할 수 있음.
- 각각의 PZT 센서로부터 계측된 임피던스 응답을 기반으로 분석된 임피던스 특성치(RMSD 및 CCD) 확인을 위하여 결과창의 “RMSD&CCD” 탭을 그래프 및 테이블 데이터 표시 영역으로 구성하였음. 결과창의 우측에서 RMSD 결과(좌측) 및 CCD 결과(우측)를 각각 확인할 수 있으며, 막대그래프 및 테이블 형태로 확인할 수 있도록 설정하였음. 그래프의 경우, 상한 관리도를 함께 표시하여 손상 여부를 확인 할 수 있도록 설정하였음. 결과창의 좌측에는 RMSD/CCD 그래프의 표시방법 설정이 가능하도록 그래프 옵션 변경 기능을 구성하였음. 옵션 변경 후 아래의 “Apply” 아이콘을 클릭하면 결과창에 반영됨. 결과창에 표시된 임피던스 특성치 결과는 상단의 아이콘을 통해 클립보드에 복사하거나 이미지 파일로 저장할 수 있음.

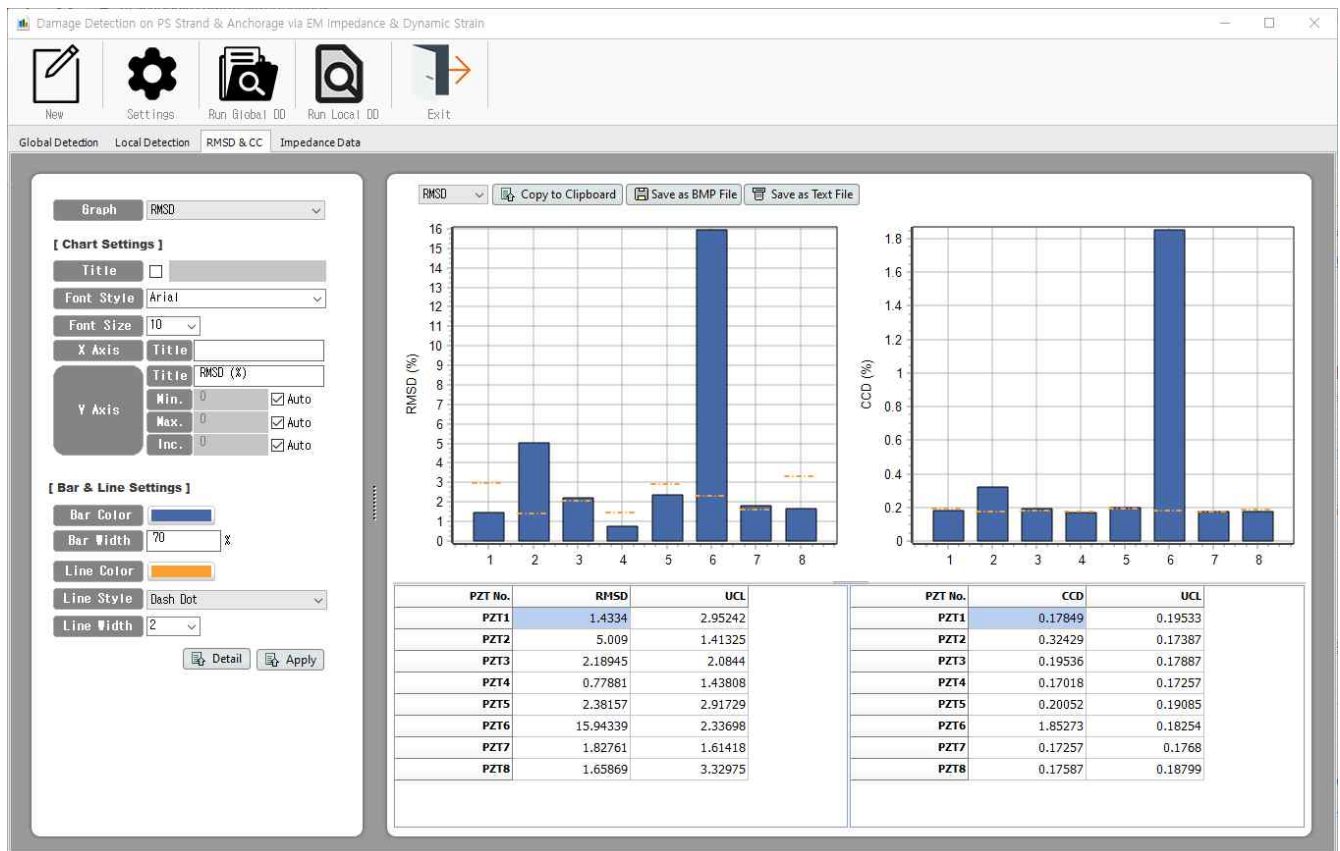


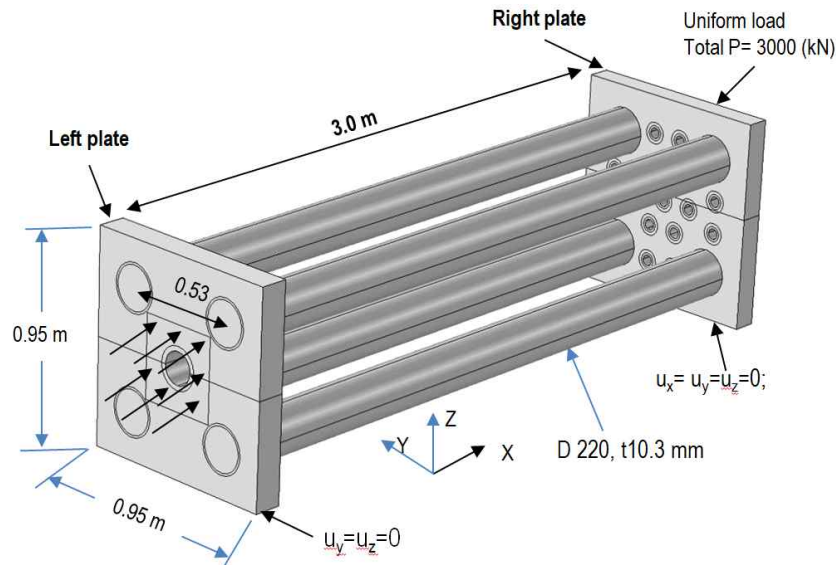
그림 2-2-7 정착부의 압전응답 신호로부터 추출된 임피던스 특성치 표시창

2.3 실험실 환경에서 다중 PS 강연선과 정착부 파손감지 성능 평가

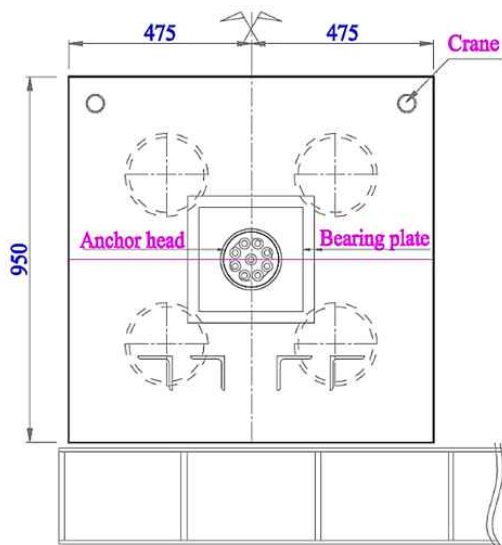
2.3.1 PS 긴장재 정착부 실험 설치 및 정착부 압전응답 성능 검토

□ 비부착 텐던 정착부 실험용 프레임 설치, 텐던 정착부 설치

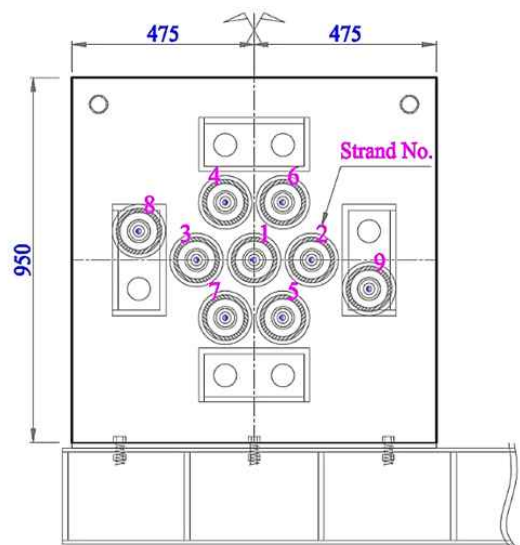
- 웨어러블 압전센서 장치의 실험검증을 위하여 텐던 정착부 모형 실험을 위한 실험 프레임 및 텐던 정착부 모형을 제작하였음.
- 텐던 정착부 실험을 위한 강재 프레임이 그림 2-3-1(a)과 같이 설계되었음. 프레임 설계 시, 텐던을 구성하는 케이블의 수를 최대 15개를 고려하였으며 내하 성능을 총 3,000 kN의 프리스트레스 긴장력을 견디도록 설계되었음. 프레임의 전체 크기는 가로 0.95m, 세로 0.95m, 길이 3m이며, 프레임의 좌측에는 정착부가 설치되고 우측에는 케이블의 긴장력 조절 장치가 설치되는 것을 고려하였음. 양측 지지판의 형상은 각각 그림 2-3-1(b),(c)와 같고, 좌측 지지판에는 앵커헤드 및 지압판이 설치되며, 우측 지지판에는 케이블 각각의 긴장력 조절이 가능하도록 케이블 홀을 분산 배치하였음.
- 텐던 정착부 실험용 프레임은 2차년도 연구의 실험조건을 고려하였음. 콘크리트 정착부가 없는 경우(그림 2-3-2(a)의 텐던-지압판 실험 셋업)와 콘크리트 정착부가 있는 경우(그림 2-3-2(b)의 텐던-콘크리트 정착부 실험 셋업)에 대하여 각각 실험을 수행할 수 있도록 설계되었음.
- 그림 2-3-3은 분할 제작 된 강재프레임을 실험실에 설치하는 과정임. 프레임 제작 시 운반 및 설치 여건을 고려하여 좌우의 지지판 및 하중 지지용 기둥을 분할 제작하였음. 좌우의 지지판을 세운 후 지지판 연결 기둥을 설치하는 순서로 진행되었으며, 1차 설치가 완료된 후 모든 볼트연결부의 체결을 완료하였음.



(a) 실험 프레임 3D 형상



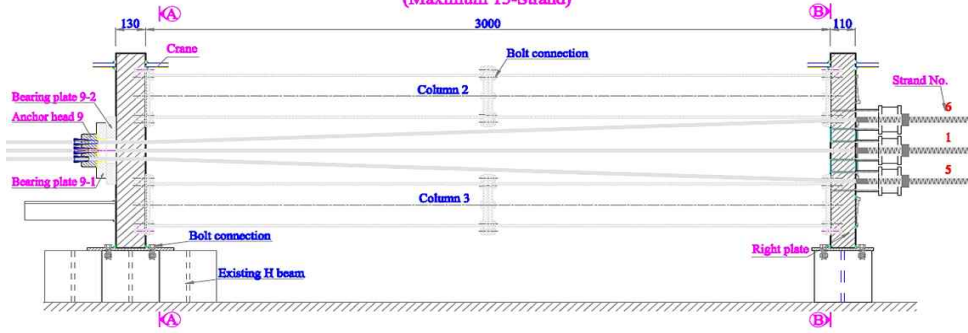
(b) Left plate 상세도



(c) Right plate 상세도

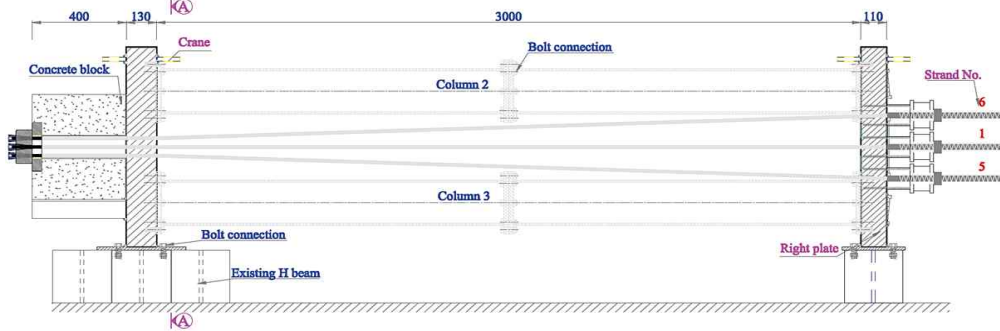
그림 2-3-1 텐던 정착부 실험용 프레임 설계

APPLICATION FOR TESTING OF STRAND BREAKAGE
(Maximum 15-Strand)



(a) 텐던-지압판 실험 셋업

CONCRETE CRACK DETECTION TESTING AT ANCHORAGE ZONE



(b) 텐던-콘크리트 정착부 실험 셋업

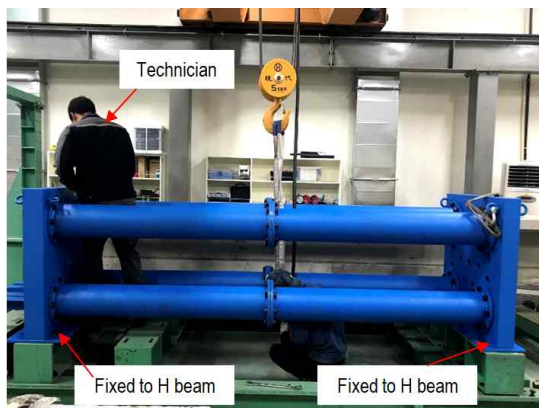
그림 2-3-2 텐던 정착부 실험 셋업 예시



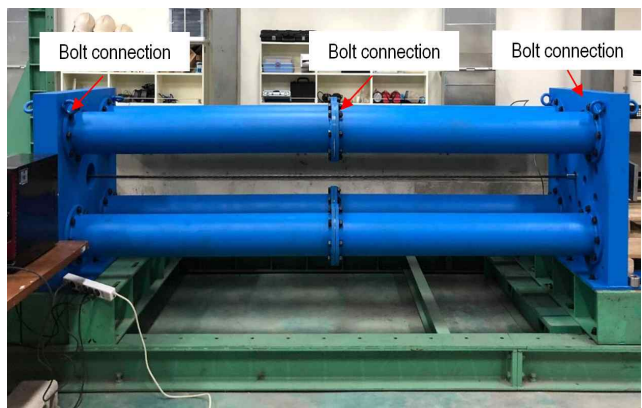
(a) 지지판 설치



(b) 지지판 연결 기둥 설치



(c) 1차 설치 완료 및 볼트 연결



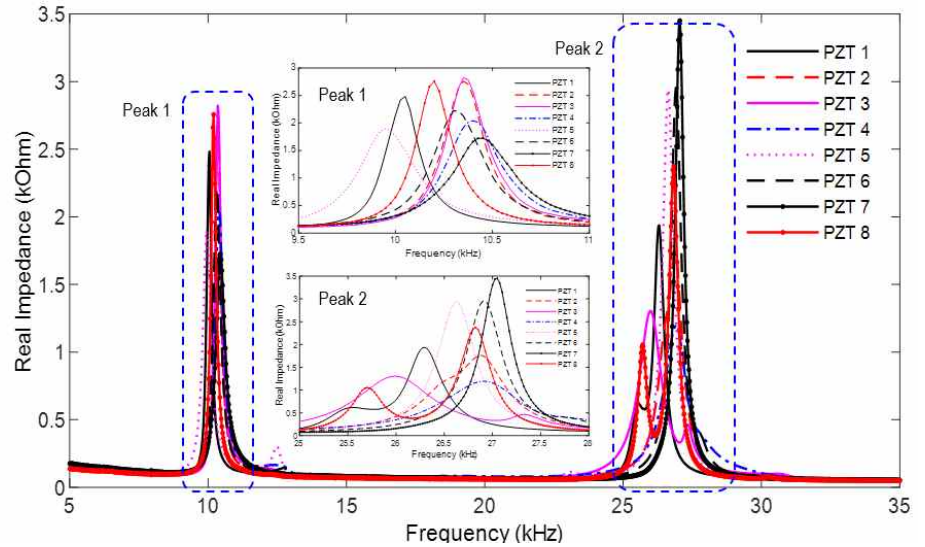
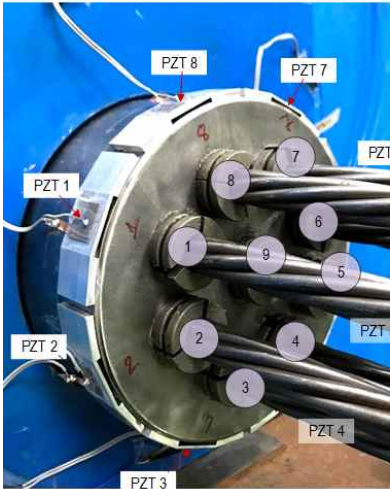
(d) 프레임 설치 완료

그림 2-3-3 실험 프레임의 조립 및 설치(핵심성과 2-① 목표달성㉠).

□ 긴장력 감소에 따른 정착부 동적변형률-임피던스 계측 및 성능 검토

- 긴장력 감소에 따른 정착부 임피던스 응답 계측을 위하여 그림 2-3-4(a)와 같이 앵커헤드-지압판 모형에 9개의 강연선을 설치하고 앵커헤드에 웨어러블 PZT 인터페이스를 설치하였음. 9-hole 앵커헤드용으로 제작된 웨어러블 인터페이스에 부착된 PZT는 8개이며 진동판의 윗면에 부착하였음. 그림 2-3-4(b)는 웨어

러블 인터페이스에 부착된 8개의 PZT로부터 계측된 임피던스 응답임. 모든 PZT의 임피던스 응답에 대하여 5~35kHz 주파수 범위 내에 2개의 피크가 관찰되었으며, 그 피크의 주파수는 약 10kHz 및 27kHz임.

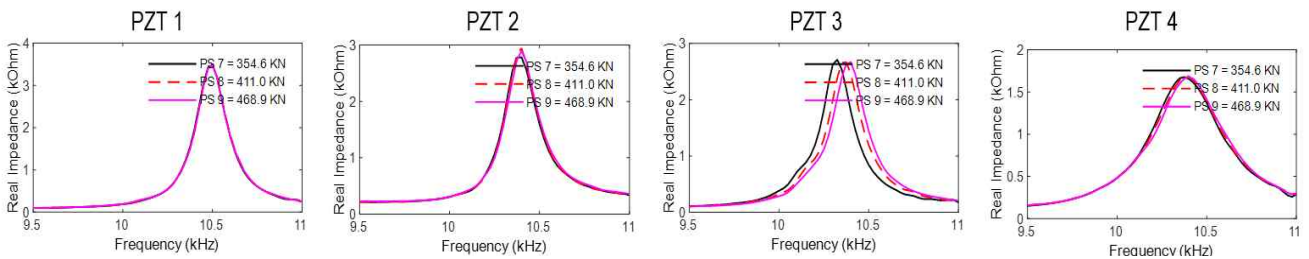


(a) 앵커헤드-웨어러블 인터페이스

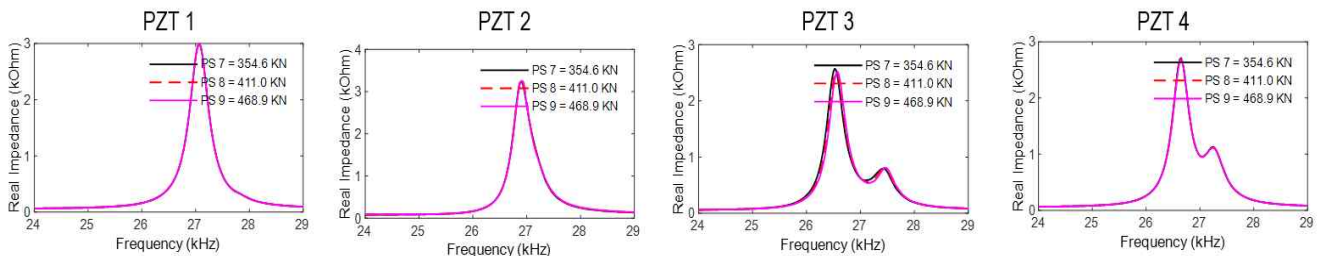
(b) 웨어러블 인터페이스의 임피던스 응답

그림 2-3-4 앵커헤드에 부착된 웨어러블 인터페이스 및 PZT 임피던스 응답

- 손상시나리오로서 Strand 3의 긴장력 손실을 고려하고 Strand 3의 긴장력을 최대 12ton까지 변화를 주었음. 이때, 나머지 8개 강연선의 긴장력은 고정하였음. 그림 2-3-5는 Strand 3의 긴장력 손실에 대한 웨어러블 인터페이스의 PZT(PZT1-PZT4) 임피던스 응답 변화를 나타냄. Strand 3의 긴장력의 손실에 따라 PZT 임피던스 응답의 피크 주파수가 점차 감소하는 현상이 관찰되었음. 피크 주파수 변화의 정도는 PZT 3의 임피던스 응답에서 가장 크게 발생하였음. 나머지 8개의 PZT 임피던스 응답에서도 피크 주파수 변화가 발생하였지만 그 변화량은 크지 않았음. 또한, Peak 1의 주파수 변화가 Peak 2에 비해 더 크게 나타났으며, 긴장력 손실 현상에 대해 Peak 1의 민감도가 더 큰 것으로 판단됨. PZT3은 긴장력 손실이 발생한 Strand 3과 가장 가까운 위치의 PZT 센서임.



(a) Peak 1



(b) Peak 2

그림 2-3-5 Strand 3의 긴장력 손실에 대한 웨어러블 인터페이스의 PZT 임피던스 응답의 변화

- 그림 2-3-4(a)와 같이 웨어러블 인터페이스가 설치된 앵커헤드로부터 동적변형률 계측 실험을 수행하였음. 동적변형률 계측 결과의 검증을 위하여 가속도 응답도 함께 계측하였음. 구조물의 전역적 거동의 계측을 위하여 그림 2-3-6과 같이 실험 프레임에 대해 충격가진을 수행하였음.

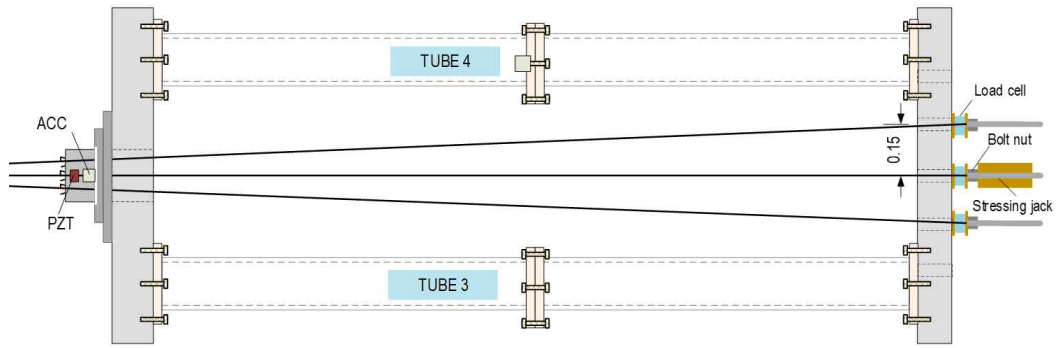
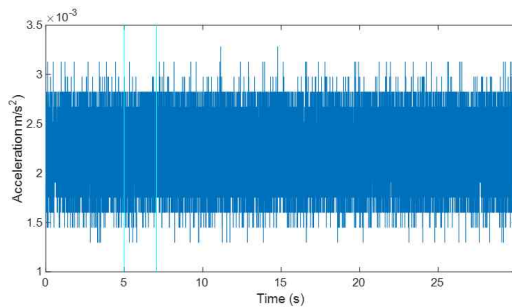
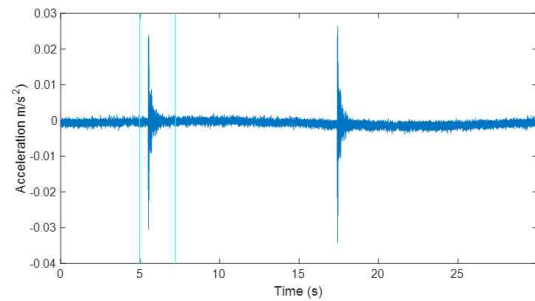


그림 2-3-6 웨어러블 인터페이스가 부착된 앵커헤드의 동적변형을 계측 실험 셋업

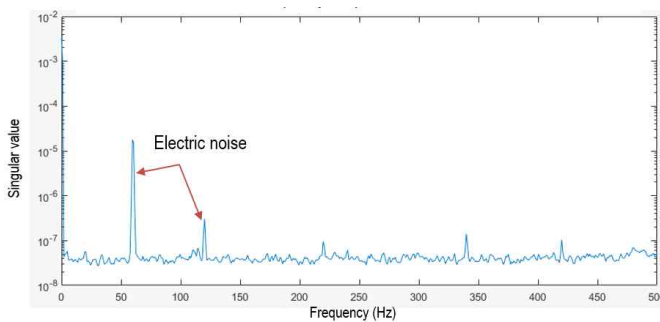
- 동적변형률은 30초간 계측되었으며 샘플링 주파수는 1kHz임. 계측시간 동안 실험프레임 중앙에 충격가진을 수행하였음. 그림 2-3-7(a)는 앵커헤드의 PZT센서로부터 계측된 동적변형률 응답을 나타냄. 실험 프레임의 큰 강성으로 인하여 동적변형률 응답에서 충격가진에 대한 응답은 관찰되지 않았음. 그림 2-3-7(b)는 앵커헤드의 가속도 센서로부터 계측된 가속도응답을 나타냄. 2번의 충격가진이 약 5초 및 17초에 수행되었음을 확인할 수 있음.
- 그림 2-3-7(c) 및 그림 2-3-7(d)는 PZT 동적 변형률과 가속도응답의 주파수응답함수를 나타냄. 주파수 응답해석에 사용된 FFT 개수는 1024개임. PZT 동적변형률의 결과에서는 의미있는 피크가 관찰되지 않았지만 가속도응답의 결과에서는 96Hz 및 307Hz의 피크가 관찰되었음. 이는 동적변형률 계측 및 분석조건이 전역적 거동 계측 조건에 부적합성에 의한 것으로 판단됨. PZT의 동적변형률 계측을 통한 전역적 거동 추출을 위해서는 데이터 계측 및 분석 조건(샘플링 주파수, 주파수 해석 조건 등)의 개선이 필요한 것으로 판단됨.



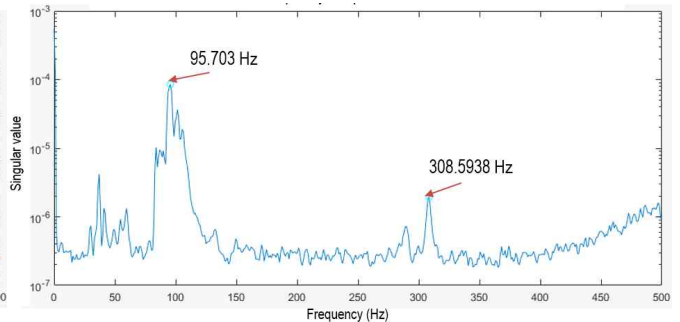
(a) PZT의 동적변형률 응답



(b) 가속도 응답



(c) PZT 동적변형률의 주파수응답함수



(d) 가속도응답의 주파수응답함수

그림 2-3-7 웨어러블 인터페이스가 부착된 앵커헤드의 동적변형률 응답 및 주파수특성 분석

- 그림 2-3-8과 같이 웨어러블 인터페이스 블록(SA 1)이 매립된 콘크리트 정착부부터 동적변형률 계측 실험을 수행하였음. 동적변형률 계측 결과의 검증을 위하여 콘크리트 표면의 PZT1 및 앵커헤드의 가속도 응답(ACC1)도 함께 계측하였음. 구조물의 전역적 거동의 계측을 위하여 콘크리트 정착부의 상단 중 앵커헤드와 가까운 부분에 충격가진을 수행하였음.
- 동적변형률은 30초간 계측되었으며 샘플링 주파수는 1kHz임. 그림 2-3-9는 콘크리트 정착부에 설치된 3가지의 센서로부터 측정된 동적변형률 및 가속도 응답을 나타냄. 세 가지 센서로부터 계측된 동적변형률 및 가속도 응답에서 충격가진으로 인한 측정 물리값의 변화 및 감쇠를 확인할 수 있음. 다음, PZT 동적

변형률과 가속도응답의 주파수응답해석을 수행하였음. 주파수응답해석에 사용된 FFT 개수는 128개임. 세가지 센서의 결과에서 모두 전역적 거동에 대한 주파수 특성이 추출되었으며 피크 주파수는 93.75Hz 및 296.88Hz로 추출되었음.

- 세가지 센서로부터 측정된 물리량의 주파수응답함수를 비교하면, 콘크리트 정착부에 매립된 웨어러블 인터페이스 블록의 결과에서 전역적 거동에 대한 주파수 피크가 가장 선명하게 관찰되었음.

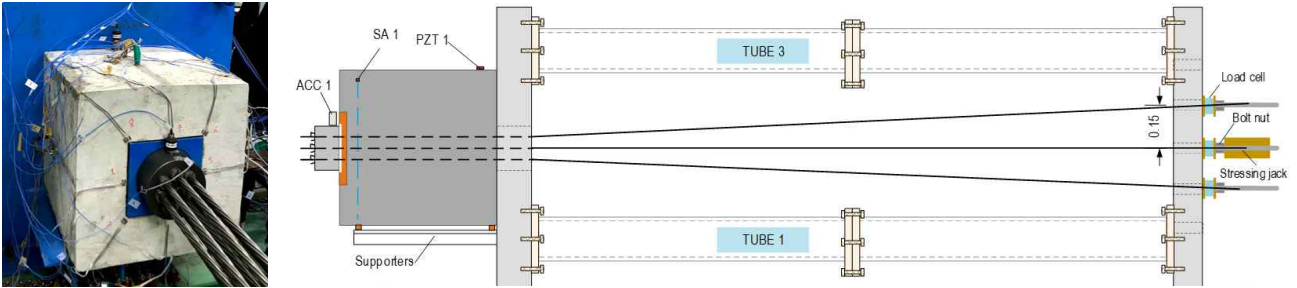
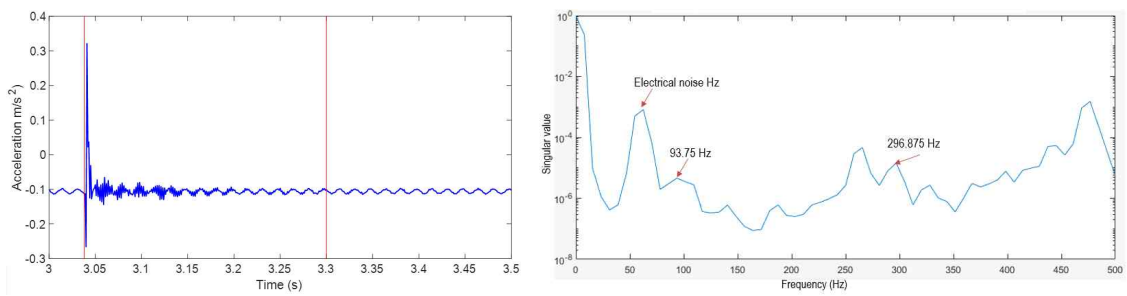
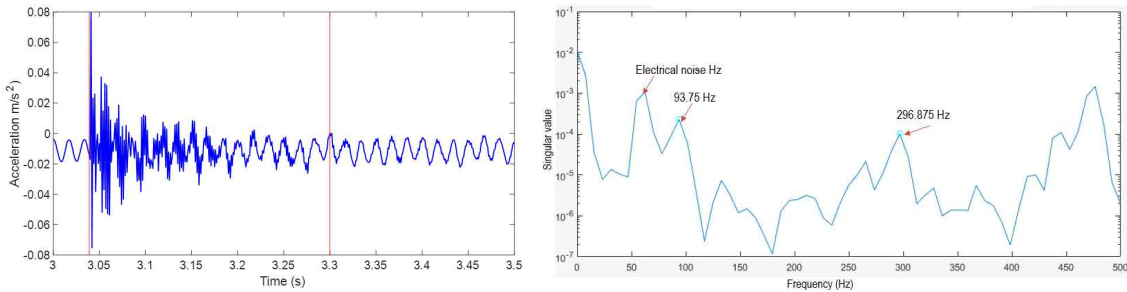


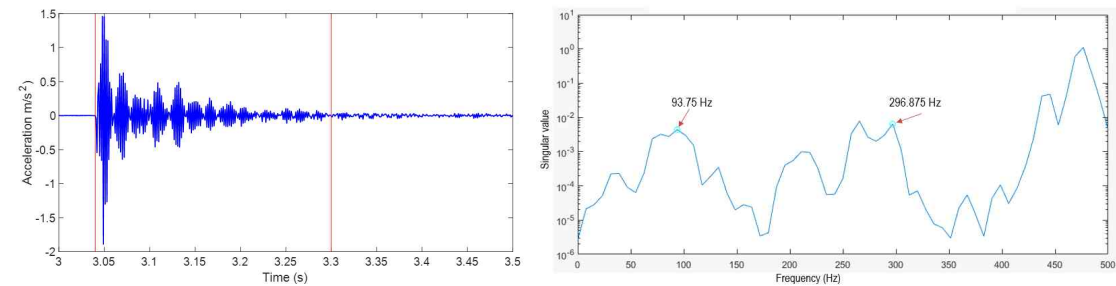
그림 2-3-8 콘크리트 정착부의 동적변형률 계측 실험 셋업



(a) 웨어러블 인터페이스 블록



(b) 콘크리트 표면의 PZT



(c) 정착부의 가속도센서

그림 2-3-9 콘크리트 정착부의 동적변형률(가속도) 응답 및 주파수특성 분석

- PZT 인터페이스 동적변형률의 손상민감도 분석 및 전역적 거동 특성 추출을 위한 PZT 센서 위치/방향 분석
- PZT의 압전 동적변형률을 이용한 구조물의 전역적 거동 특성 추출은 세부연구내용 1의 그림 1-1-15 및 그림 1-1-16과 같이 수치해석을 통해 검증되었음.
- PZT 인터페이스의 동적변형률은 전역적 거동 특성 추출에 활용되며, 그림 2-3-9의 콘크리트 정착부의 동적변형률 계측 실험을 통해 매립된 웨어러블 인터페이스 블록으로부터 동적변형률을 측정이 가능함을 검증하였음.

2.3.2 2 종류의 정착부/긴장재를 대상으로 PS 강연선의 국부 파손 모사 및 계측 실험 수행

□ 다중 PS 강선의 국부 파손 모사 및 EM 임피던스 계측

- 다중 PS 강선의 국부 파손을 모사하고 임피던스 응답 계측을 수행하였음. 강선의 국부 파손은 일부 강연선에 재하된 긴장력을 변화시키는 방법으로 손상을 모사하였음. 이를 위해 그림 2-3-10과 같이 텐던-정착부 모형을 실험 프레임에 거치하고 임피던스 계측 시스템을 구성하였음.
- 웨어러블 PZT 인터페이스는 그림 2-3-10과 같이 앵커헤드 원주면에 2열로 부착되었음. 9-강연선 모니터 링을 위해 설계된 웨어러블 인터페이스는 8개의 PZT-진동판 구조로 구성되었음.
- 웨어러블 인터페이스(Near-top)의 PZT로부터 계측된 임피던스 응답은 그림 2-3-4(b)와 같음. 모든 PZT의 임피던스 응답에 대하여 5~35kHz 주파수 범위 내에 2개의 피크가 관찰되었으며, 그 피크의 주파수는 약 10kHz 및 27kHz임.

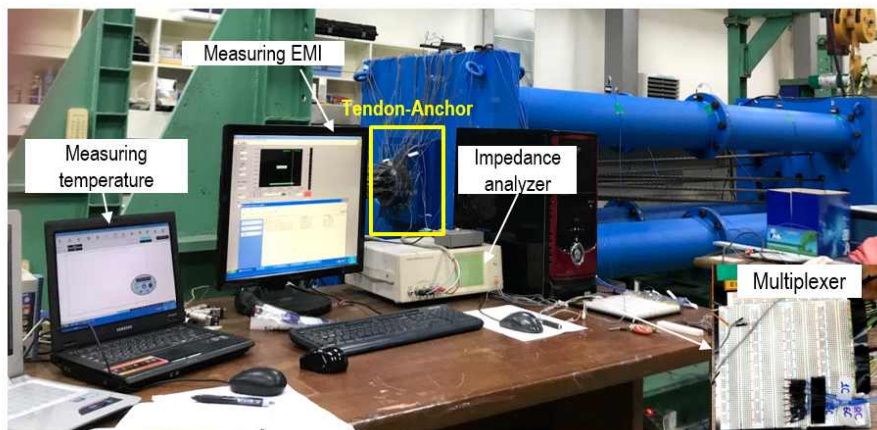
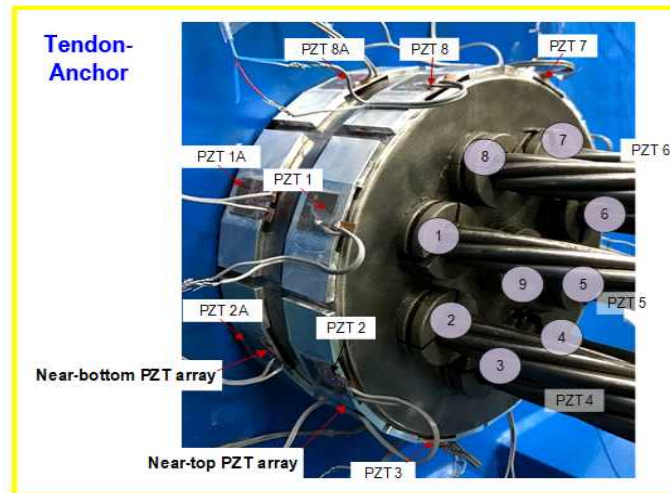
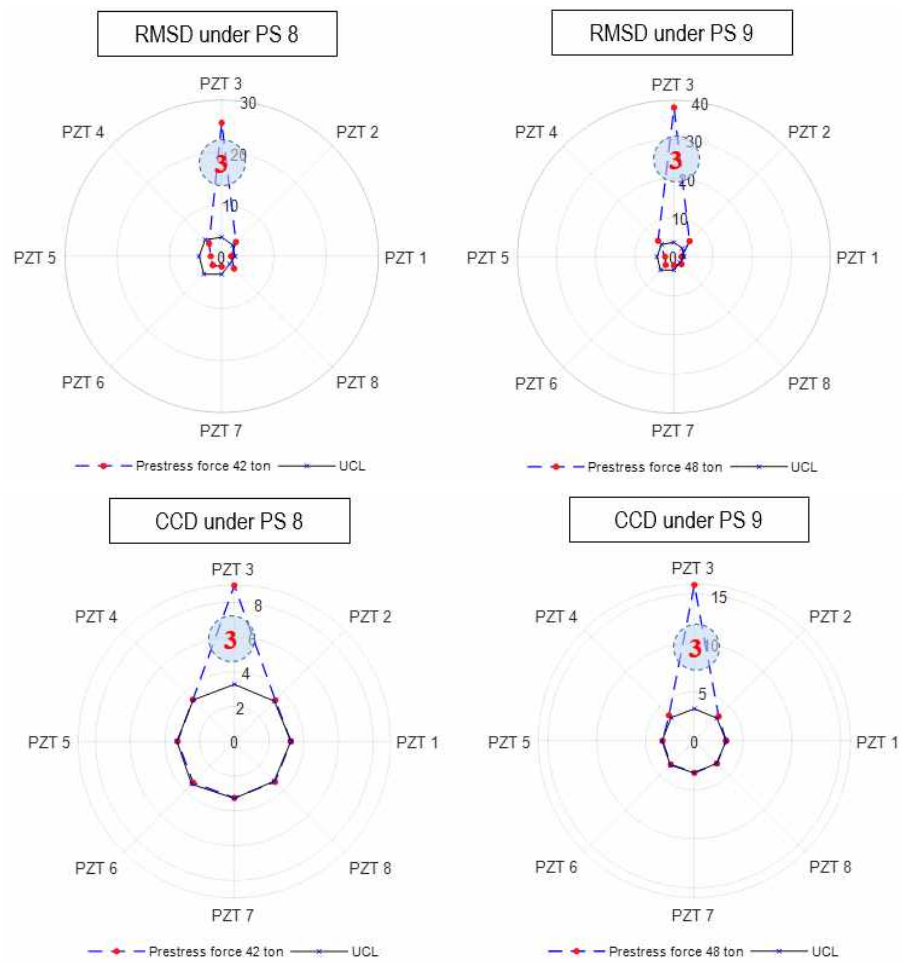
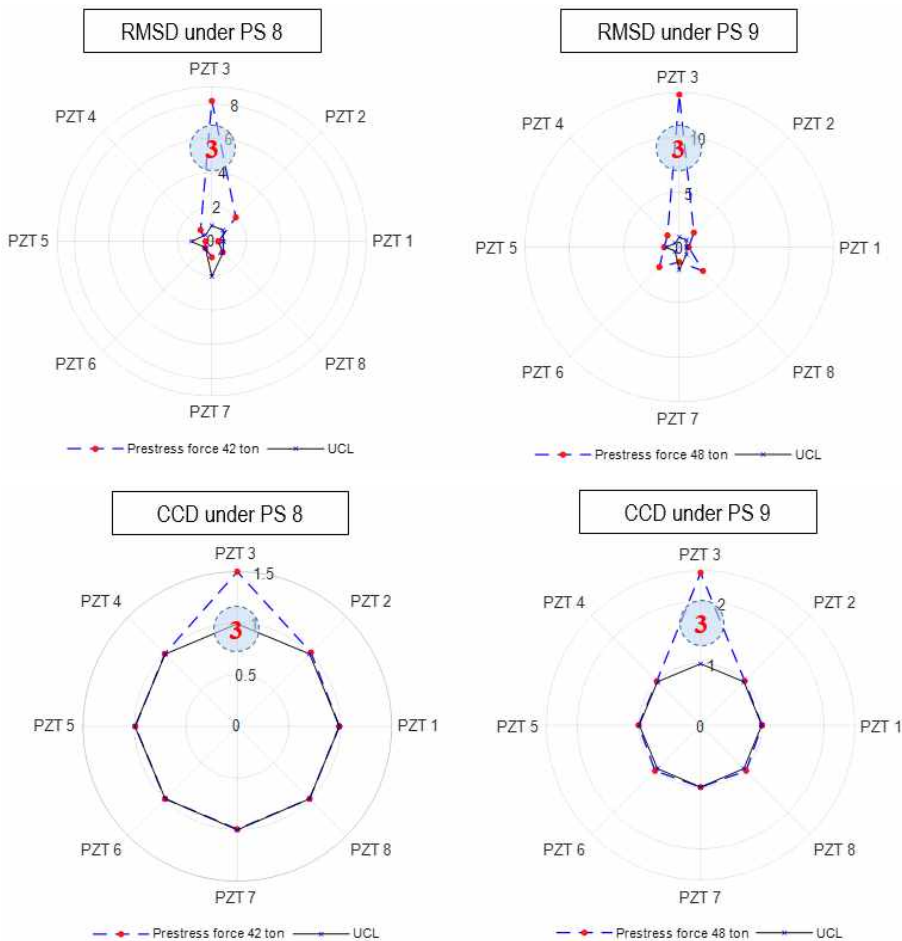


그림 2-3-10 텐던-정착부(tendon-anchor)의 웨어러블 PZT 인터페이스 설치 및 EM 임피던스 계측

- 강연선 국부손상에 대한 임피던스 응답 변화 분석을 위하여 9개의 강연선 중 Strand 3에 대하여 긴장력 6 ton을 변화시켰음. 전체 강연선 중 Strand 3의 위치는 외곽에 배치된 것으로서 손상 발생 시 앵커헤드의 비대칭적 응력장 변화를 야기함. Strand 3의 긴장력 변화조건에 대해 웨어러블 인터페이스(Near-top)의 PZT로부터 계측된 임피던스 응답은 그림 2-3-5(b)와 같음. Strand 3의 손상에 따라 각 PZT별 임피던스 응답의 두 피크 주파수가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 3번 강연선과 가장 가까운 PZT 3의 변화가 가장 두드러졌음.
- 그림 2-3-11은 임피던스 응답으로부터 6 Ton의 긴장력 변화에 대한 RMSD 및 CCD에 대한 토모그래피 분석을 수행하였음. 여기서 긴장력 변화량(6 Ton)은 긴장재에 재하 가능한 최대하중 15 Ton의 약 40% 수준에 해당함. 전체적으로 RMSD 및 CCD의 토모그래피 분석 결과 모두에서 Strand 3의 손상을 정확하게 판별하였음. 강연선 손상에 대하여 Peak 1은 Peak 2에 비해 높은 민감도를 보였음. 임피던스 특성치 중 RMSD에 의한 결과가 CCD에 비하여 민감도가 높게 나타났음.



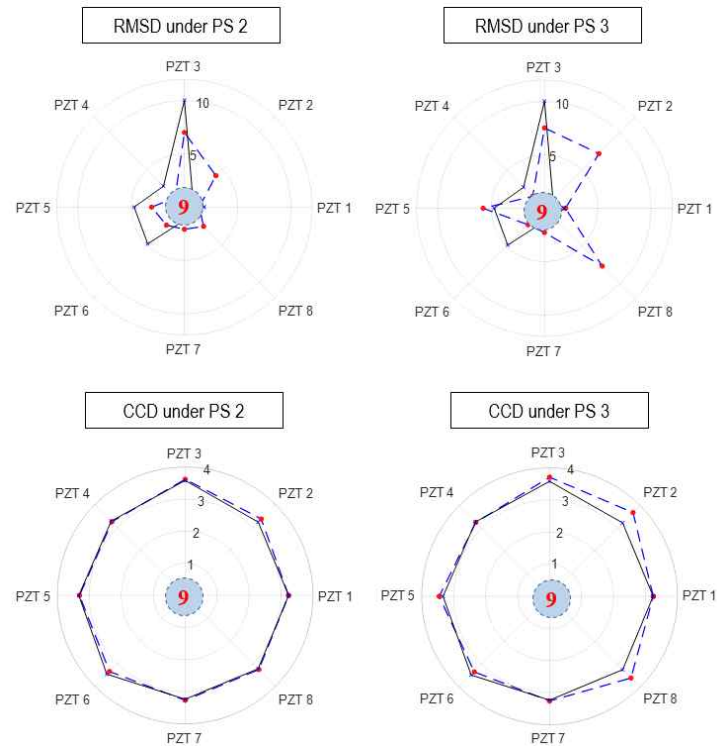
(a) Peak 1



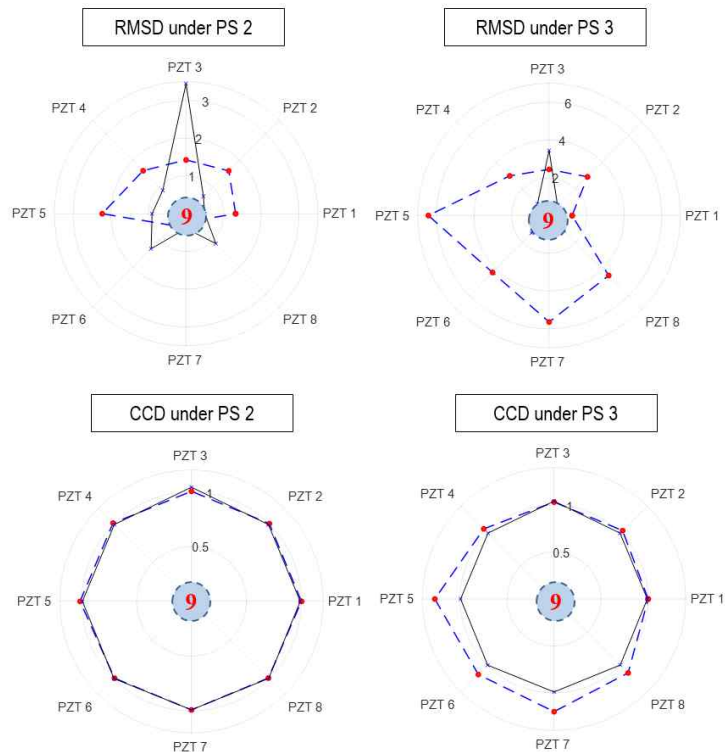
(b) Peak 2

그림 2-3-11 Strand 3의 긴장력 변화에 따른 임피던스 특성치(RMSD/CCD)의 토모그래피 변화($\Delta P = 6$ ton)
(핵심성과 2-③ 목표달성④)

- 다음으로 앵커헤드의 정중앙에 위치한 Strand 9의 손상에 대하여 웨어러블 인터페이스의 임피던스 응답 계측 실험을 수행하였음. 손상재현을 위하여 Strand 9의 긴장력을 최대 6ton 변화시켰음. 앵커헤드의 중앙에 배치된 Strand 9의 손상은 대칭적 응력장 변화를 야기함. Strand 9의 손상에 따라 모든 PZT의 임피던스 응답에서 긴장력 감소에 대한 주파수 특성 변화가 유사하게 관찰되었음.
- 그림 2-3-12는 임피던스 응답으로부터 RMSD 및 CCD에 대한 토모그래피 분석을 수행하였음. 이때 고려된 긴장력 변화량(6 Ton)은 긴장재에 재하 가능한 최대하중 15 Ton의 약 40% 수준에 해당함. RMSD에 비해 CCD의 토모그래피 결과의 정확도가 더욱 높은 것으로 나타났음. 중앙에 배치된 강연선(Strand 9) 손상의 경우 RMSD의 토모그래피 결과의 경우, Strand 3 손상 경우에 비해, Strand 9 손상 효과가 뚜렷하게 발생하지 않았음. Strand 9 손상에 대하여 Peak 2가 Peak 1 보다 높은 민감도를 보였음.



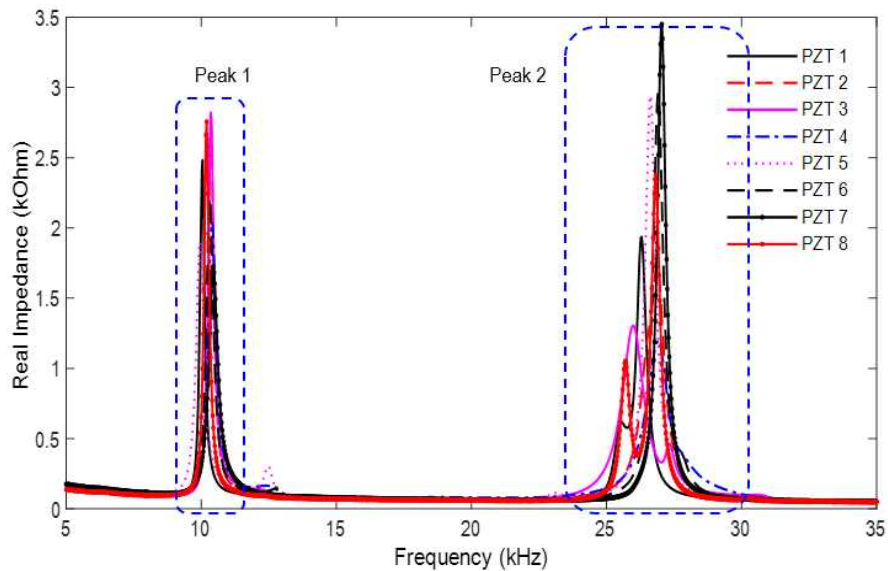
(a) Peak 1



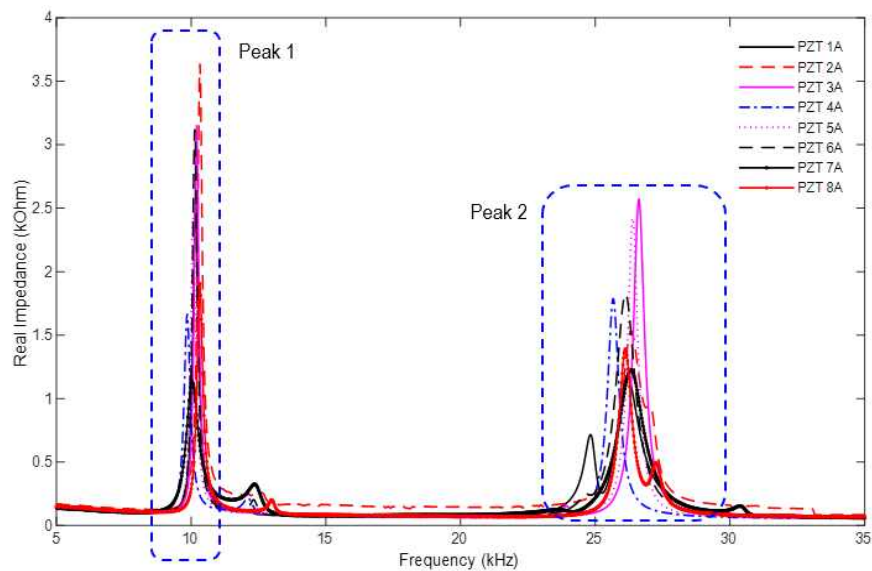
(b) Peak 2

그림 2-3-12 Strand 9의 긴장력 변화에 따른 임피던스 특성치(RMSD/CCD)의 토모그래피 변화($\Delta P = 6 \text{ ton}$)

- 앵커헤드에 부착된 웨어러블 인터페이스의 위치에 따른 파손감지 성능 분석을 위하여 그림 2-3-10과 같이 2열 배치된 웨어러블 인터페이스를 대상으로 강연선 손상에 대한 민감도를 분석하였음. 그림 2-3-13은 앵커헤드 상단 및 하단의 웨어러블 인터페이스로부터 계측된 임피던스 응답임. 두 경우에 대한 임피던스 응답에서 5-35kHz 범위에 2개 피크가 관찰되었음. 피크 주파수는 약 10kHz 및 27kHz로 유사하게 계측되었으며, 임피던스 응답 크기에 차이가 있음이 관찰되었음.



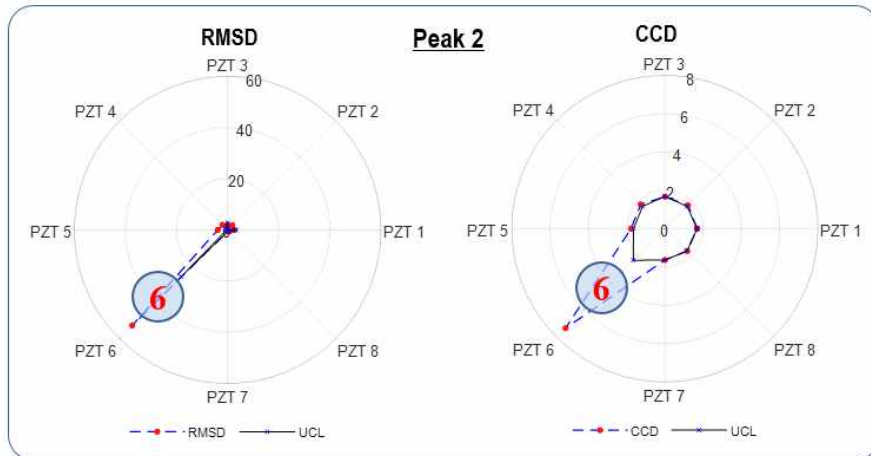
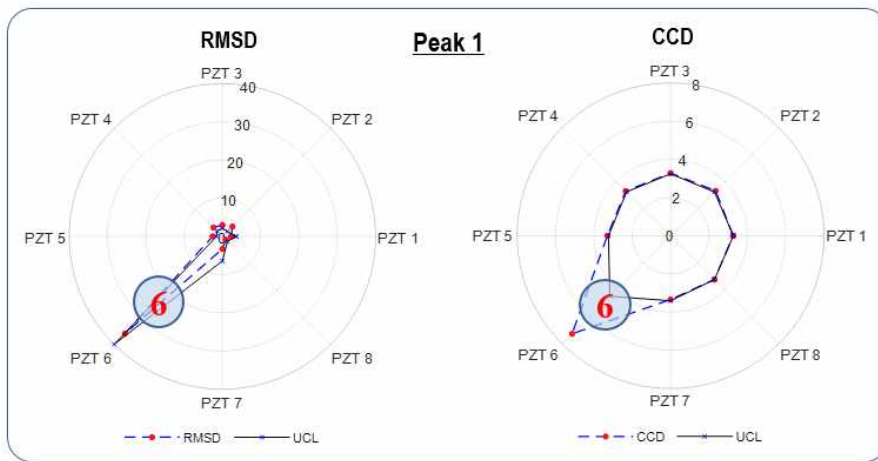
(a) 정착부 상단(near-top)



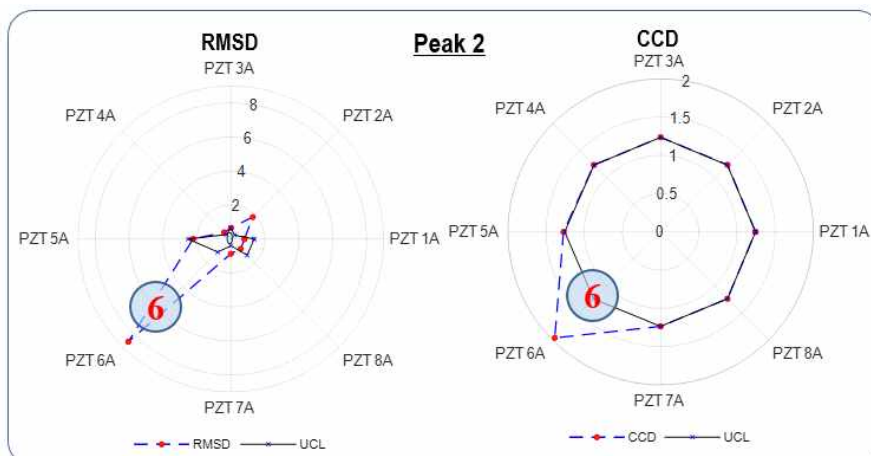
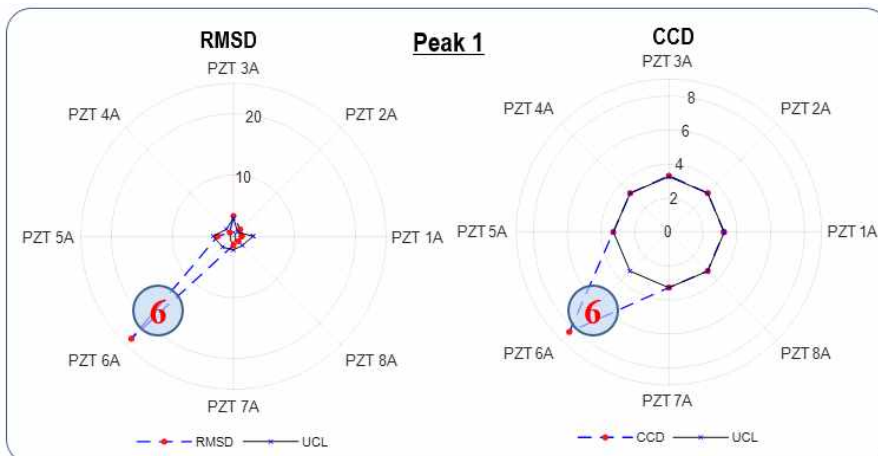
(b) 정착부 하단(near-bottom)

그림 2-3-13 웨어러블 인터페이스 부착 위치별 PZT 임피던스 응답

- 9개의 강연선 중 Strand 6에 6ton의 긴장력 변화를 주고 손상 전후의 임피던스 응답에 대한 토모그래피 분석을 수행하였음. 이때 고려된 긴장력 변화량(6 Ton)은 긴장재에 재하 가능한 최대하중 15 Ton의 약 40% 수준에 해당함. 그림 2-3-14에 나타난 바와 같이 앵커헤드 상단 및 하단 인터페이스에 대한 결과에서 모두 Strand 6의 손상을 직관적으로 감지할 수 있음. 다만, 앵커헤드 상단에 부착된 웨어러블 인터페이스의 토모그래피 결과에서 민감도가 더 높은 것으로 관찰되었음. 이에 따라, 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스는 앵커헤드 상단에 설치하는 것이 바람직한 것으로 판단됨.



(a) 앵커헤드 상단(near-top)



(b) 앵커헤드 하단(near-bottom)

그림 2-3-14 Strand 6의 손상에 따른 임피던스 응답 특성치의 토모그래피 변화($\Delta P = 6$ ton)

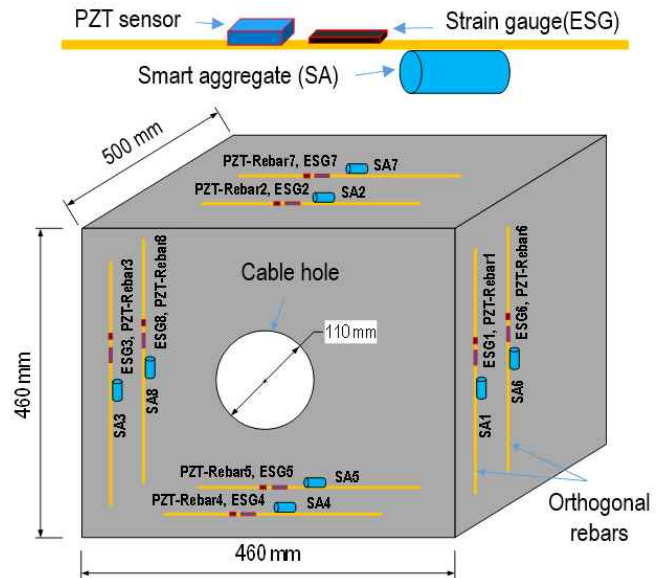
□ 콘크리트 정착부 손상 모사 및 EM 임피던스 계측

- 콘크리트 정착부 손상에 대한 임피던스 응답 계측을 위하여 그림 2-3-15와 같이 콘크리트 정착부의 압전 임피던스 응답 계측 실험을 구성하였음. 콘크리트 정착부의 임피던스 응답 계측을 위하여 그림 2-1-12와 같이 개발된 웨어러블 인터페이스 블록을 콘크리트 정착부 내에 매립하였음. 손상 감지 성능의 비교를 위하여 추가로 콘크리트 정착부의 표면에 PZT 센서를 부착하였으며 내부 철근에 PZT 센서를 부착하였음. 콘크리트 표면의 PZT 센서는 그림 2-3-15(a)에 나타난 바와 같이 지압판과 가까운 위치의 콘크리트 표면에 8개의 센서를 설치하였음. 콘크리트 내부에 매립된 철근부착용 PZT 센서는 그림 2-3-15(b)와 같이 설치하였음. 인장철근의 총 8곳에 센서가 배치되었고, 지압면과 가장 가까운 두 철근 레이어에 대하여 각각 4곳에 센서를 설치하였음.
- 그림 2-3-15(c)는 콘크리트 타설 전 설치된 내장형 인터페이스 블록 및 인장철근용 PZT 센서를 나타냄. 철근용 센서 부착 시 철근 표면을 다듬은 후 센서를 부착하고 에폭시를 이용하여 방수처리 하였음.

PZTs on anchorage surface
8 PZTs 12x12x0.51 mm³



(a) 콘크리트 정착부 표면의 PZT 센서 설치



(b) 콘크리트 정착부 내 센서 매립



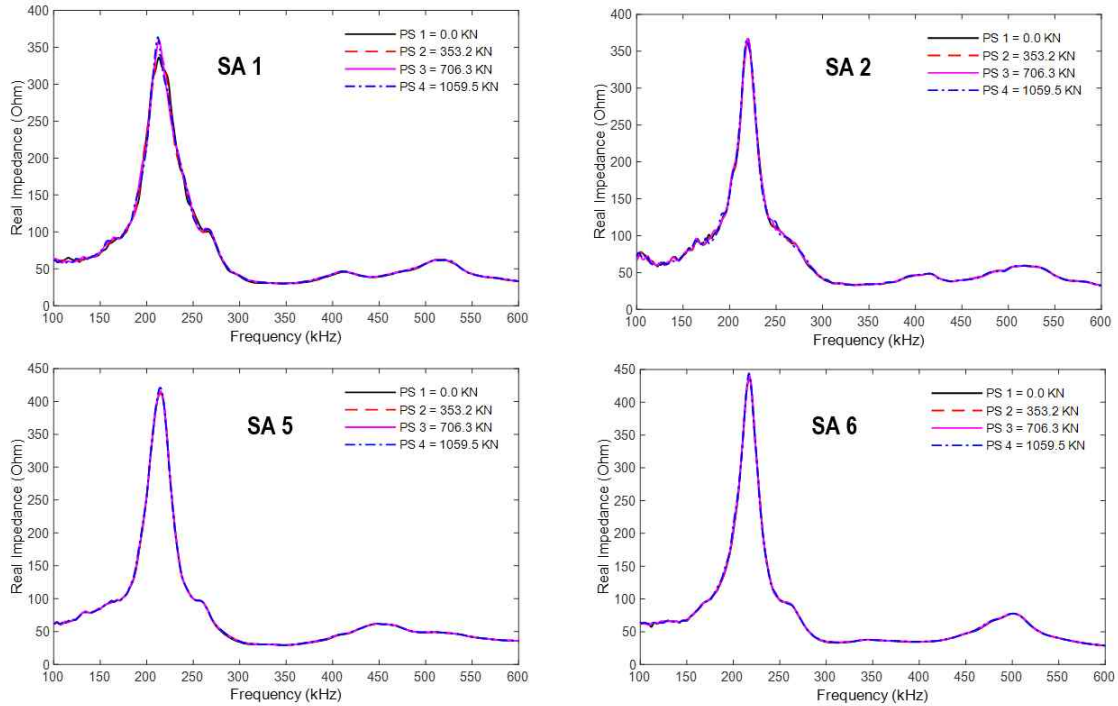
(c) 내장형 인터페이스 블록, 철근부착용 PZT 센서 설치

그림 2-3-15 콘크리트 정착부 내장 웨어러블 인터페이스 블록의 압전신호 계측 실험 셋업

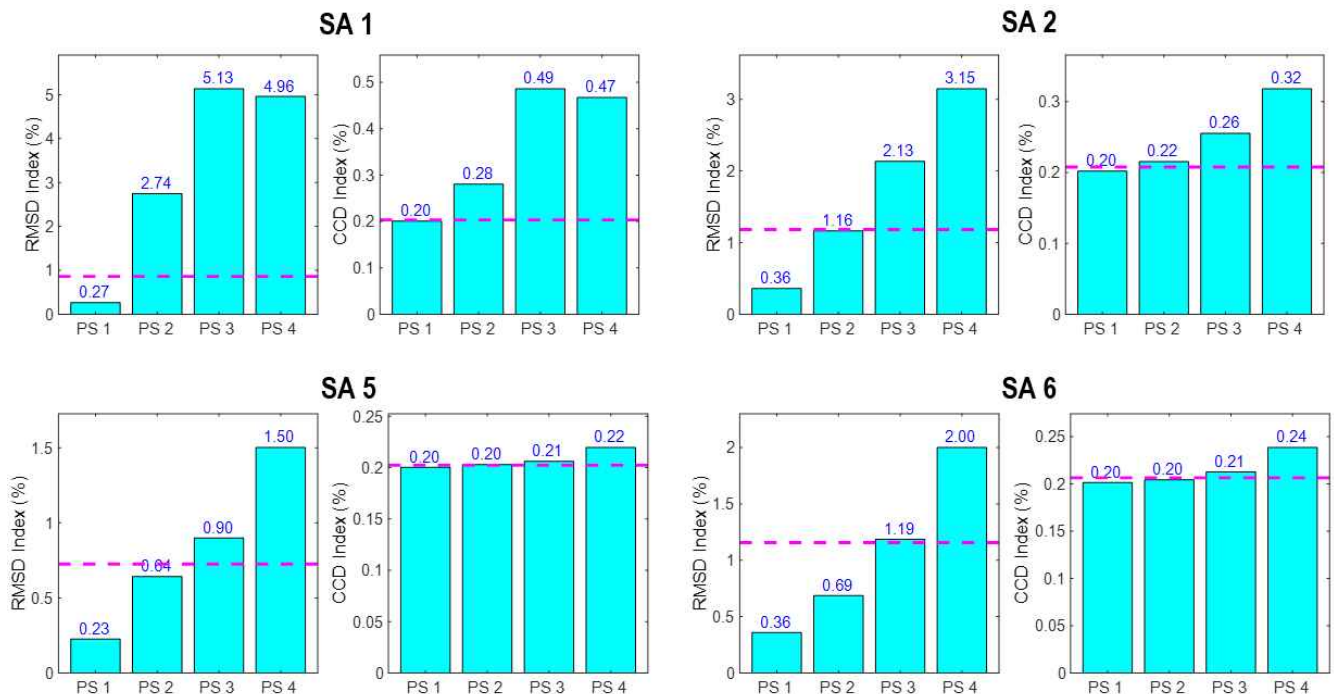
- 앞서 수행된 인터페이스 블록의 압축시험 결과(그림 2-1-13 및 그림 2-1-18)를 바탕으로 콘크리트 정착부의 손상으로서 텐던 긴장력의 변화를 고려하였음. 텐던 긴장력의 변화는 콘크리트 정착부 내 응력변화를 야기하여 손상을 간접적으로 모사할 수 있음. 단, 콘크리트 정착부 시험체가 파괴되는 시점까지는 상당히 큰 긴장력 도입이 필요하여 안전상 파괴가 일어나지 않을 정도의 긴장력 제어 실험을 수행하였음.
- 콘크리트 정착부의 손상시나리오로서 4단계의 긴장하중 상태를 고려하였음. 긴장력 제어 범위는 약 0 ~ 108 ton이며 이때, 개별 강연선 당 재하되는 하중은 0~12 ton 임. 각각의 하중단계에서 개별 강연선에 대한 긴장력 변화량은 동일함.
- 내장형 웨어러블 인터페이스 블록의 임피던스 응답 및 특성 분석결과를 그림 2-3-16에 나타내었음. 인터페이스 블록의 PZT 임피던스 응답은 약 200kHz에서 피크가 관찰되었음. 텐던 긴장력이 감소함에 따라 피크 주파수가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 8개의 인터페이스 블록에서 모두 유사하게 관찰되었음. 임피던스 응답으로부터 그림 2-3-16(b)와 같이 RMSD 및 CCD 분석을 수행하였음. 그 결과, 긴장력 변화에 대해 임피던스 특성값이 단계적으로 변화하는 것을 관찰하였음. RMSD 및 CCD의 관리도 분석 결과,

강연선 손상(긴장력 변화)을 100% 정확도로 감지하였으며, 이때의 긴장력 변화량은 최대 긴장력의 약 33% 수준임.

- 또한, 지압면과 가까운 곳에 설치된 인터페이스 블록(SA1 & SA2)의 결과가 지압면과 좀더 거리가 먼 인터페이스 블록(SA5 & SA6)의 결과보다 긴장력 변화에 대해 더욱 민감한 것으로 분석되었음. 또한, 임피던스 특성치 중 RMSD 지수가 CCD 지수보다 상대적으로 큰 민감도를 가지는 것으로 분석되었음. 그러나 임피던스 주파수 대역이 상대적으로 높은 점과 철근 조립 작업 전 센서 부착을 위한 과정을 수행해야 한다는 점에서 실제 구조물에의 적용 가능성은 더 낮을 것으로 판단됨.



(a) 웨어러블 인터페이스 블록의 PZT 임피던스 응답

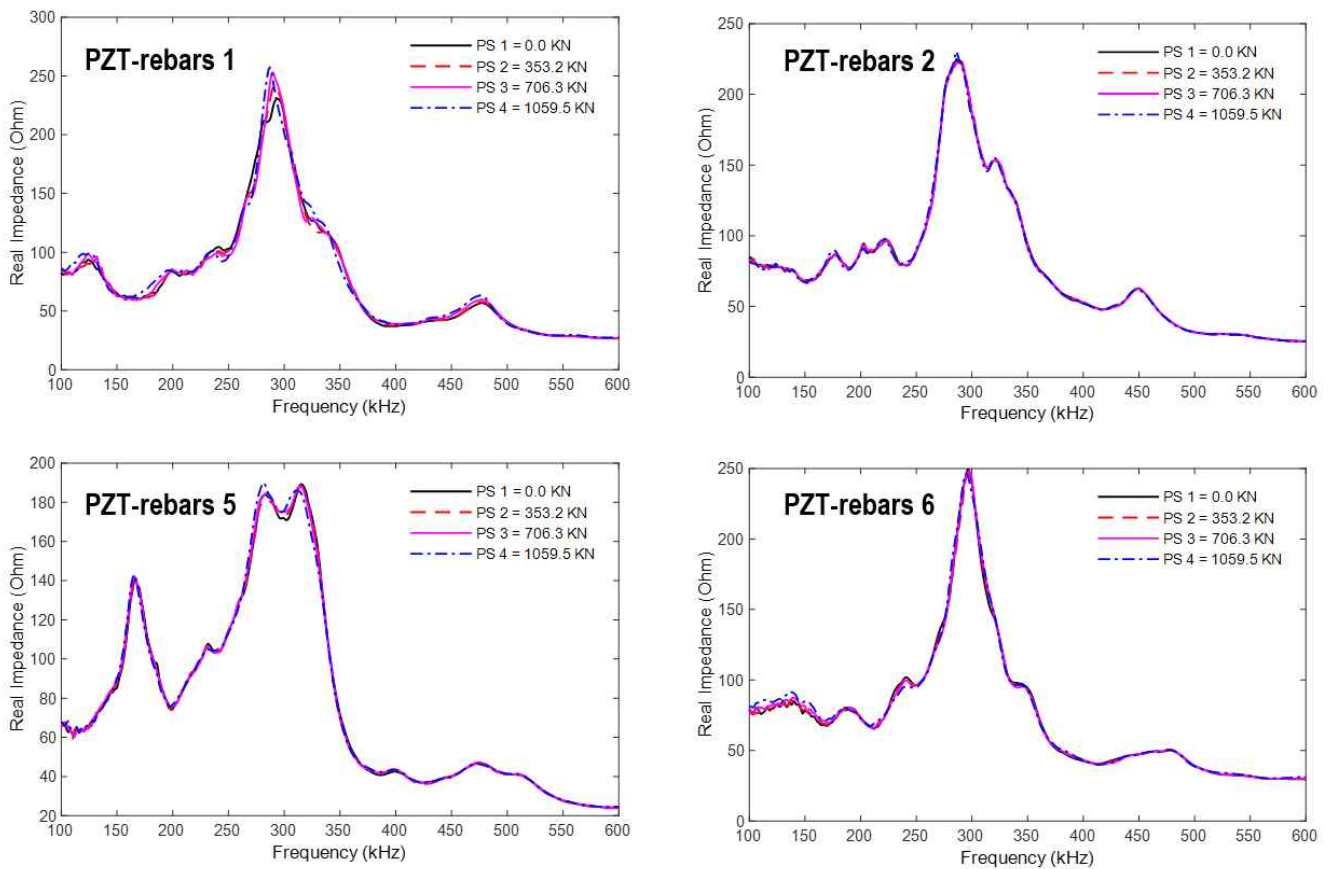


(b) 임피던스 응답의 RMSD/CCD

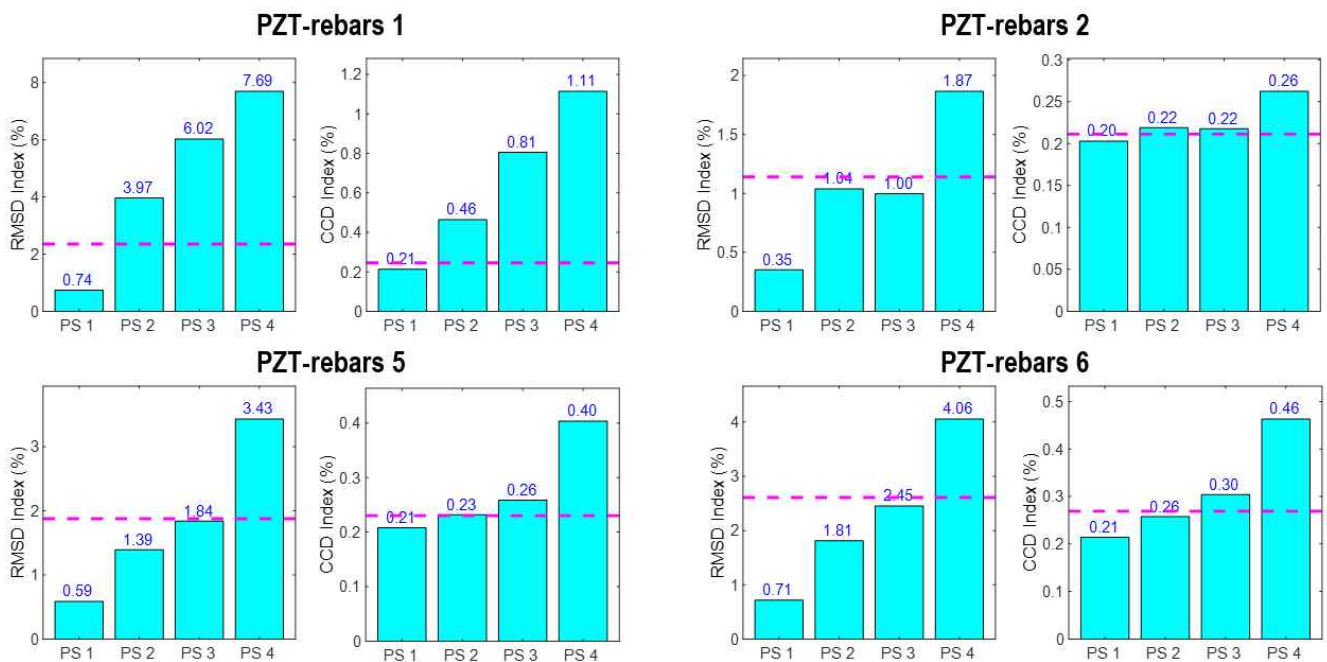
그림 2-3-16 콘크리트 정착부 손상에 대한 콘크리트 정착부 내장 웨어러블 인터페이스 블록의 PZT별 임피던스 특성 분석(PZT 1, PZT 2, PZT 5, PZT 6) (핵심성과 2-③ 목표달성⑥)

- 인장철근에 부착된 PZT 센서의 임피던스 응답 및 특성 분석 결과를 그림 2-3-17에 나타내었음. 인터페이스 블록의 PZT 임피던스 응답은 약 280kHz에서 피크가 관찰되었음. 이는 웨어러블 인터페이스 블록의 피

크 주파수보다 다소 높은 값임. 텐던 긴장력이 감소함에 따라 피크 주파수가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 8개의 인터페이스 블록에서 모두 유사하게 관찰되었음. 임피던스 응답으로부터 그림 2-3-17(b)와 같이 RMSD 및 CCD 분석을 수행하였음. 그 결과, 전반적으로 긴장력 변화에 대해 임피던스 특성값이 단계적으로 변화하는 것을 관찰하였음. 웨어러블 인터페이스 블록의 결과와 비교할 때, 긴장력 상태별 임피던스 특성 변화가 좀 더 뚜렷한 것으로 분석되었음.



(a) 철근에 부착된 PZT 임피던스 응답

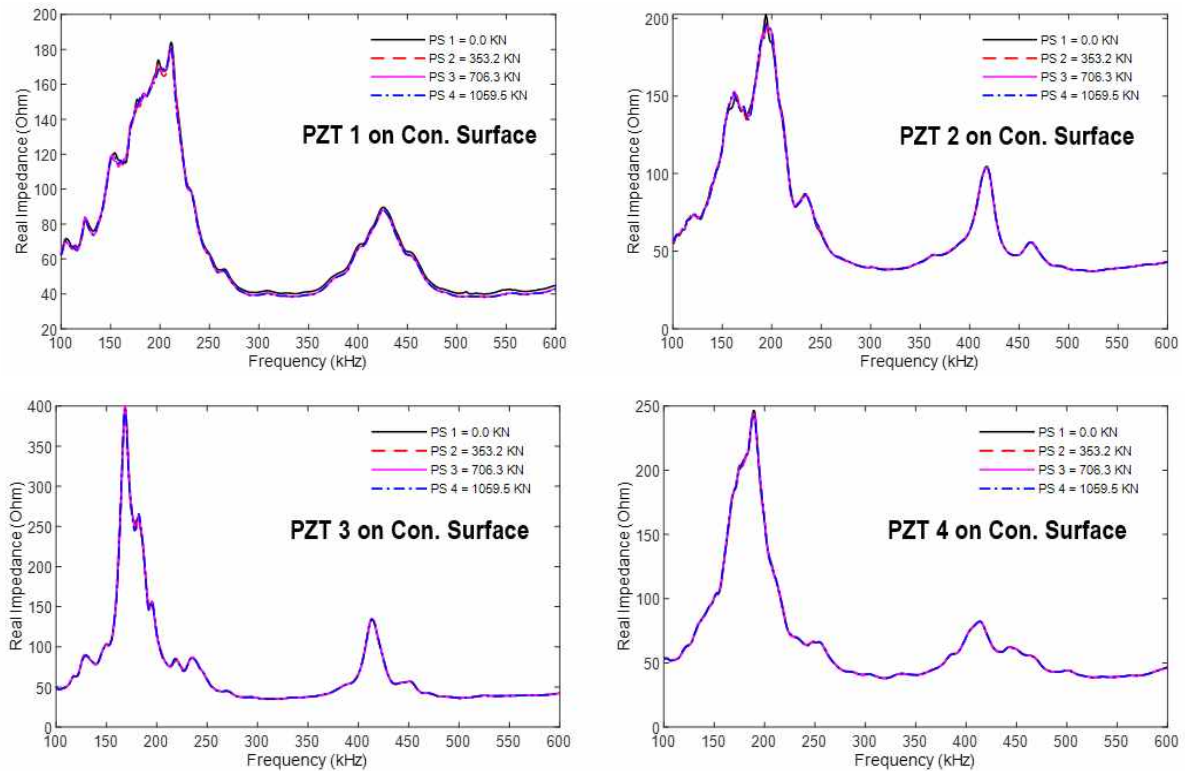


(b) 임피던스 응답의 RMSD/CCD

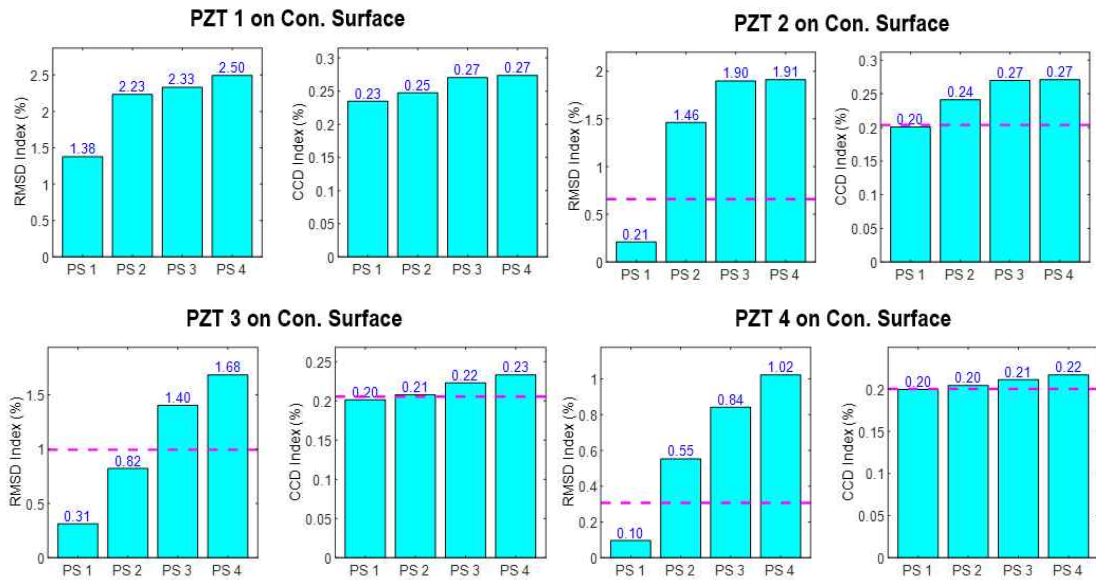
그림 2-3-17 콘크리트 정착부 내 철근에 부착된 PZT별 임피던스 특성 분석

- 콘크리트 정착부 표면에 부착된 PZT 센서의 임피던스 응답 및 특성 분석 결과를 그림 2-3-18에 나타내었음. 임피던스 응답은 약 150~200kHz 범위에서 피크가 관찰되었음. 텐던 긴장력이 감소함에 따라 피크 주

파수가 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이는 8개의 PZT 에서 모두 유사하게 관찰되었음. 임피던스 응답 으로부터 그림 2-3-18(b)와 같이 RMSD 및 CCD 분석을 수행하였음. 그 결과, 전반적으로 긴장력 변화에 대해 임피던스 특성값이 단계적으로 변화하는 것을 관찰하였음. 그러나 PZT 1의 결과에서는 임피던스 응답 으로부터 텐던 긴장력 감지가 어려웠음. 이는 콘크리트 표면이 불균질함에 따라 임피던스 응답의 차이가 발생한 것으로 판단되며, 콘크리트 표면 조건이 텐던 손상감지 결과의 정확도에 영향을 미치는 것으로 분석됨.



(a) 콘크리트 표면에 부착된 PZT 임피던스 응답



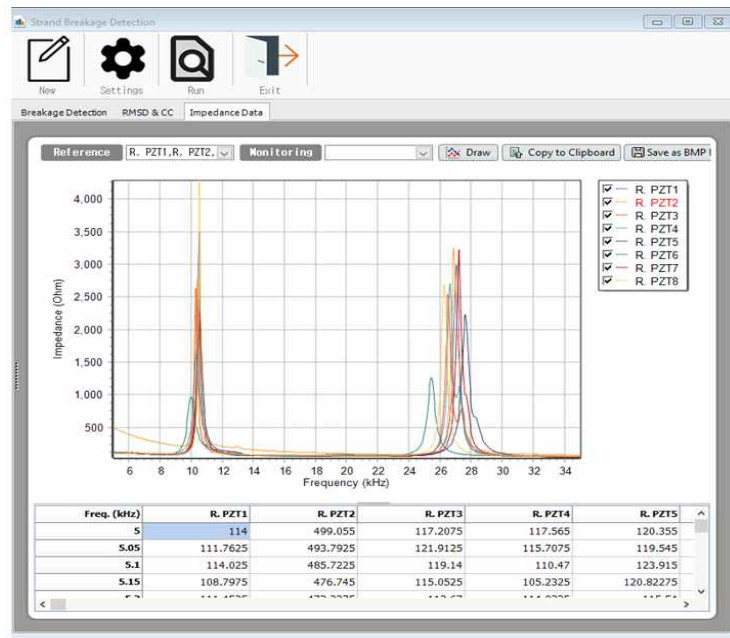
(b) 임피던스 응답의 RMSD/CCD

그림 2-3-18 콘크리트 정착부 표면에 부착된 PZT별 임피던스 특성 분석

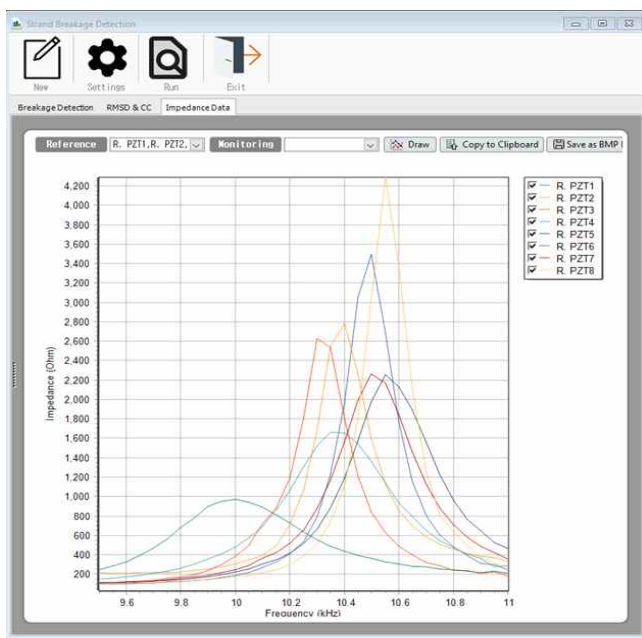
2.3.3 2 종류의 정착부/긴장재를 대상으로 PS 강연선 파손감지 기술 적용성 검토

□ 실험 계측값과 손상감지 SW를 사용하여 국부파손 감지

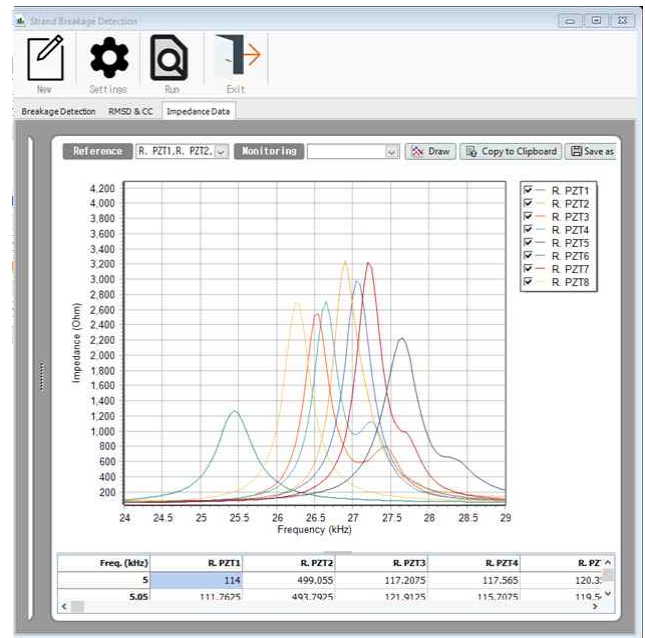
- 그림 2-2-1과 같이 개발된 손상감지 소프트웨어의 텐던-정착부 국부파손 감지 여부의 검증을 위하여 그림 2-3-2-1와 같이 9-hole 앵커헤드의 강연선 손상감지 실험을 수행하였음. 강연선 손상으로서 9개의 강연선 중 Strand 3에 대하여 긴장력 6 ton을 변화시켰음. 앵커헤드에 부착된 웨어러블 인터페이스로부터 계측된 임피던스 응답을 계측하고 손상감지 소프트웨어를 이용하여 신호해석을 수행하였음.
- 먼저, 손상감지 소프트웨어를 실행하고 “Setting” 창에서 신호해석 변수를 설정하였음. 신호해석을 위한 데이터로서 Reference data에 비손상 데이터의 저장위치를 경로로 지정하였으며, Monitoring Data에 Strand 3의 긴장력이 변화된 경우의 데이터 저장 위치를 경로로 지정하였음.
- “Run” 아이콘을 클릭하여 신호해석을 실행시키고 결과창의 “Impedance Data” 탭을 선택하여 임피던스 응답을 확인하였음. 그림 2-3-18은 Reference data의 임피던스 응답을 표시한 창이며 주파수 구간설정을 통해 그림 2-3-18(b), 그림 2-3-18(c)와 같이 첫 번째 피크 및 두 번째 피크에 대한 임피던스 응답을 검토하였음.



(a) 전 주파수대역 응답



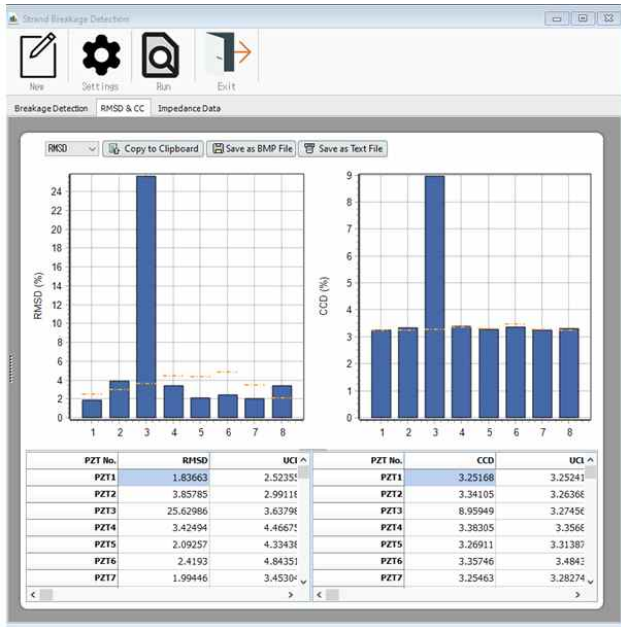
(b) Peak 1



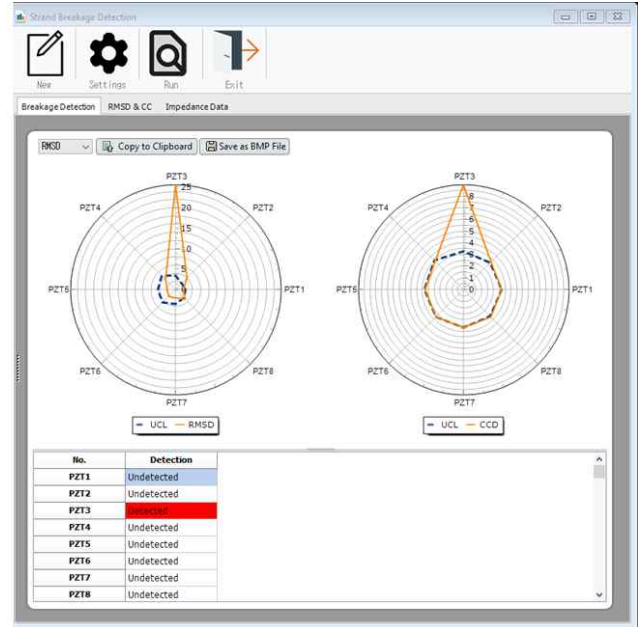
(c) Peak 2

그림 2-3-18 소프트웨어를 통한 웨어러블 인터페이스의 임피던스 응답 검토

- 그림 2-3-18(b)의 Peak 1에 대한 주파수 대역 자료로부터 임피던스 특성치 및 토모그래피 분석을 수행하였음. 이를 위해 해석 대상 주파수 대역을 9.5~11kHz로 지정하고 해석을 실행(Run)하였음. 결과창의 “RMSD & CC” 탭을 선택하여 임피던스 특성치 분석결과를 확인하였음. 그림 2-3-19(a)는 임피던스 응답의 특성치로서 RMSD 및 CCD 결과를 나타냄. RMSD 및 CCD 결과에서 긴장력 변화가 발생한 Strand 3과 가장 가까운 PZT 3의 특성치가 상한관리도를 벗어난 것으로 정확하게 분석되었음. 결과창의 “Breakage Detection” 탭을 선택하여 토모그래피 분석결과를 검토하였음. 그림 2-3-19(b)는 RMSD 및 CCD에 대한 토모그래피 분석 결과를 나타냄. 토모그래피 분석 결과 Strand 3이 위치하는 PZT 3 방향으로 뾰족한 형상으로 나타났음. 토모그래피 그래프 아래의 표에서는 강연선 손상여부 판정 결과가 표시되었음. 손상 판정 결과 PZT 3의 경우 “Detected” 로 표시되며 정확하게 손상이 감지 되었고, 나머지의 경우 “Undetected” 로 표시되었음.



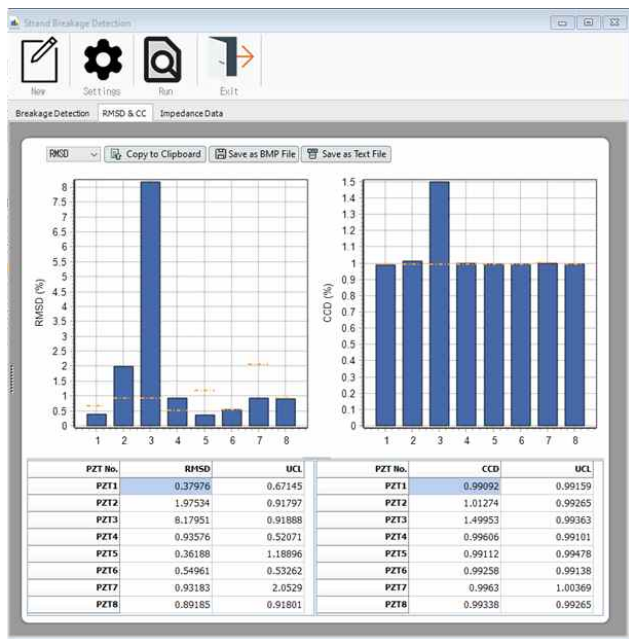
(a) 임피던스 특성치 분석 결과



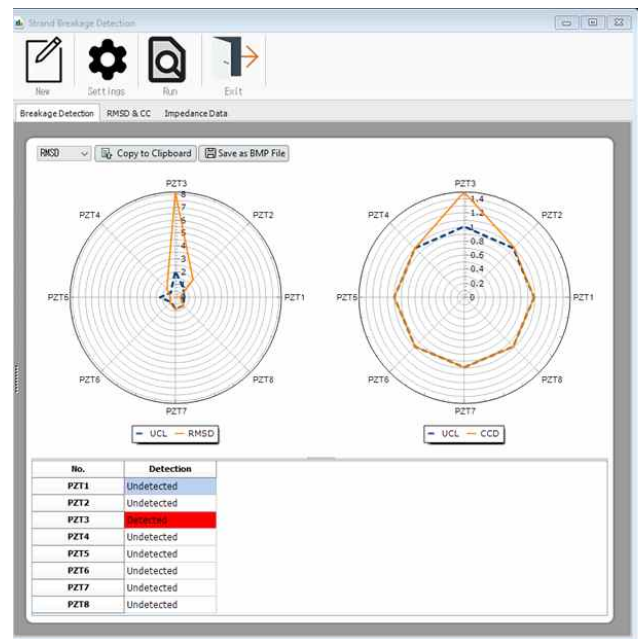
(b) 토모그래피 분석 결과

그림 2-3-19 소프트웨어를 통한 웨어러블 인터페이스의 임피던스 특성치 및 토모그래피 분석 결과 검토(Peak 1)

- 그림 2-3-18(c)의 Peak 2에 대한 주파수 대역 자료로부터 임피던스 특성치 및 토모그래피 분석을 수행하였음. 이를 위해 해석 대상 주파수 대역을 24~29kHz로 지정하고 해석을 실행(Run)하였음. 결과창의 “RMSD & CC” 탭을 선택하여 임피던스 특성치 분석결과를 확인하였음. 그림 2-3-20(a)는 임피던스 응답의 특성치로서 RMSD 및 CCD 결과를 나타냄. RMSD 및 CCD 결과에서 긴장력 변화가 발생한 Strand 3과 가장 가까운 PZT 3의 특성치가 상한관리도를 벗어난 것으로 정확하게 분석되었음. 결과창의 “Breakage Detection” 탭을 선택하여 토모그래피 분석결과를 검토하였음. 그림 2-3-20(b)는 RMSD 및 CCD에 대한 토모그래피 분석 결과를 나타냄. 토모그래피 분석 결과 Strand 3이 위치하는 PZT 3 방향으로 뾰족한 형상으로 나타났음. 토모그래피 그래프 아래의 표에서는 강연선 손상여부 판정 결과가 표시되었음. 손상 판정 결과 PZT 3의 경우 “Detected” 로 표시되며 정확하게 손상이 감지 되었고, 나머지의 경우 “Undetected” 로 표시되었음.



(a) 임피던스 특성치 분석 결과



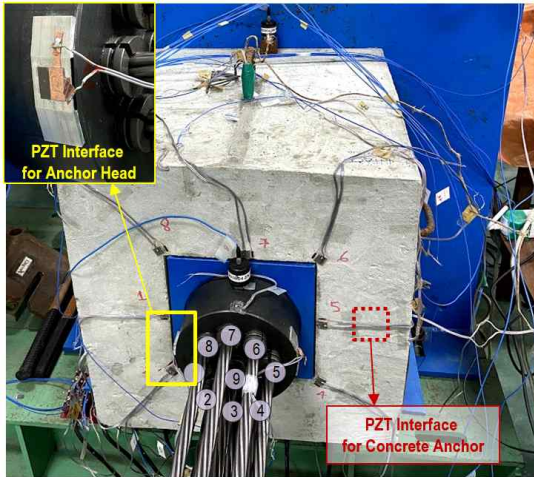
(b) 토모그래피 분석 결과

그림 2-3-20 소프트웨어를 통한 웨어러블 인터페이스의 임피던스 특성치 및 토모그래피 분석 결과 검토(Peak 2)

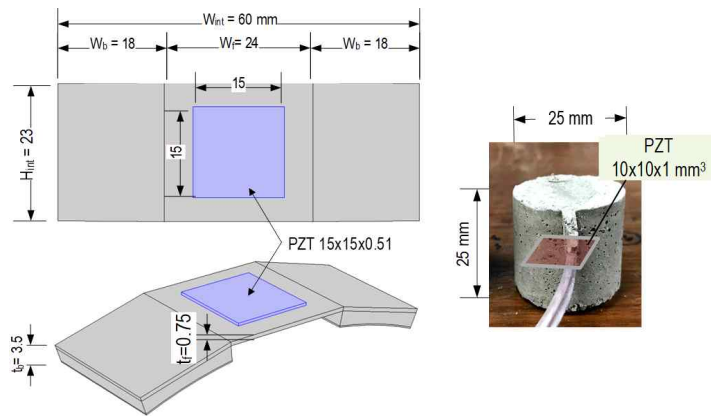
2.3.4 온도변화 및 긴장력 감소 조건 하에서 장기 계측 실험 및 온도 영향 검토

□ 온도변화 조건 하의 텐던 정착부 임피던스 응답 계측 실험 셋업

- 온도변화 조건에 대한 텐던 정착부의 임피던스 응답특성의 변화를 분석하기 위하여 그림 2-3-21과 같이 웨어러블 인터페이스가 설치된 텐던 정착부 모형에 대하여 임피던스 응답 모니터링을 수행하였음. 임피던스 응답 측정을 위하여 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스 및 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스를 설치하였음.
- 앵커헤드용 인터페이스는 Strand 1와 가까운 곳에 설치되었으며, 콘크리트 정착부용 인터페이스는 콘크리트 앵커의 우측(그림 2-3-15(a)의 SA1)에 매립 설치되었음. 각 웨어러블 PZT 인터페이스의 치수는 그림 3-2-21(b)에 나타내었음.
- 손상 시나리오로서 1) 비손상, 2) Strand 1 파손, 3) Strand 5의 파손을 고려하였음. 손상 재현을 위하여 대상 Strand에 재하된 긴장력을 제거하였음(PS force = 0).



(a) 텐던 정착부 모형



(b) 임피던스 계측용 웨어러블 PZT 인터페이스

그림 2-3-21 온도변화 조건에 대한 텐던 정착부의 임피던스 응답 모니터링 실험 셋업

- 텐던 정착부의 임피던스 응답 모니터링 실험은 4일에 걸쳐 수행되었으며, 온도는 콘크리트 정착부 표면에서 측정되었으며, 실험기간 동안 계측된 온도변화이력은 그림 2-3-22와 같음. 온도변화 범위는 13.7°C~20.13°C로 6.43°C의 차이가 발생하였음.

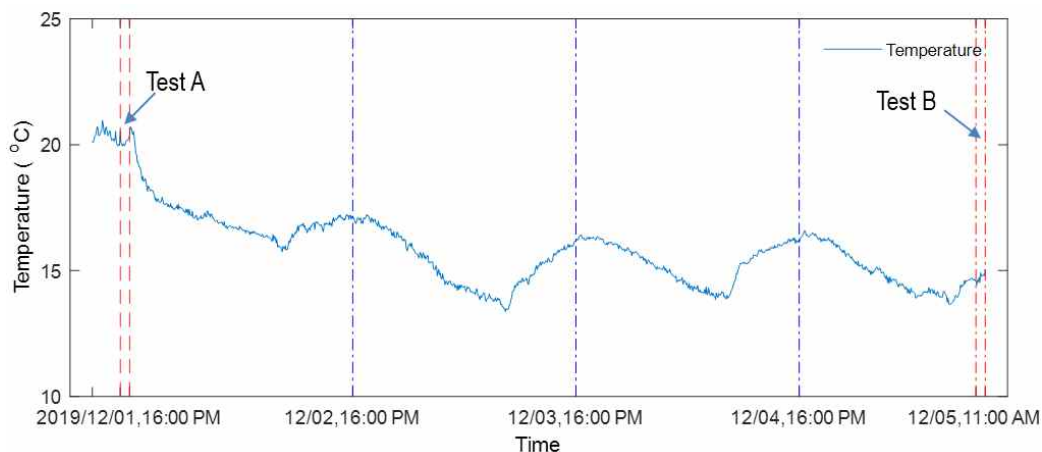
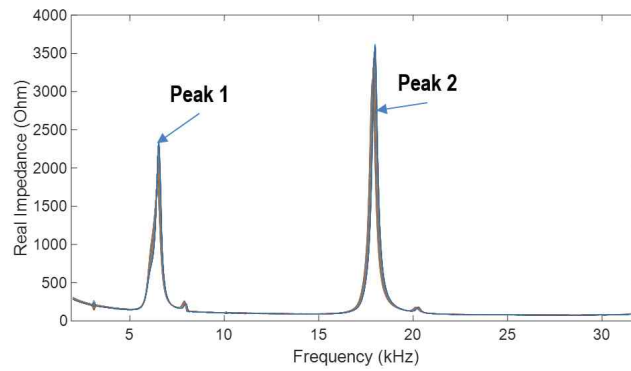


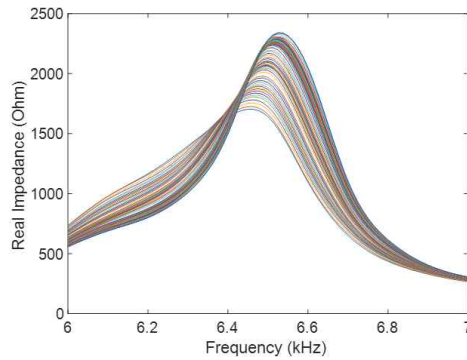
그림 2-3-22 텐던 정착부 임피던스 응답 모니터링 동안의 온도변화

□ 온도변화 조건 하의 텐던 정착부 임피던스 응답 변화 분석

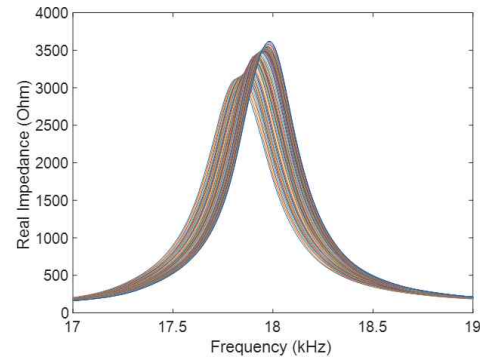
- 그림 2-3-22의 온도변화 조건에 대하여 총 30회의 임피던스 응답이 계측되었으며, 온도변화에 대한 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스에서 계측된 임피던스 응답의 변화는 그림 2-3-23과 같음. 2~32kHz 주파수 범위에서 2개의 peak가 관찰되었으며, 두 peak 주파수의 변화는 그림 2-3-23(b), (c)에 나타내었음. 두 peak에 대하여 온도가 감소함에 따라 peak 주파수가 증가하는 현상이 관찰되었음.



(a) 계측 주파수 대역에 대한 임피던스 응답(2-32kHz)



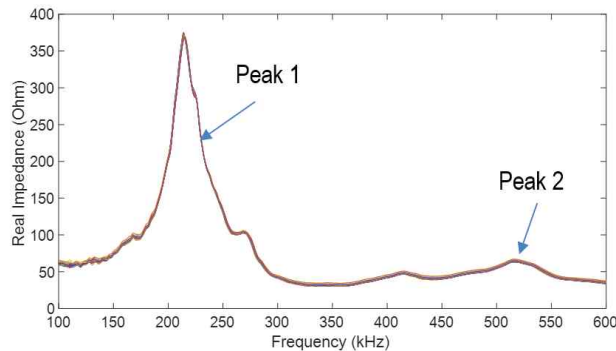
(b) Peak 1



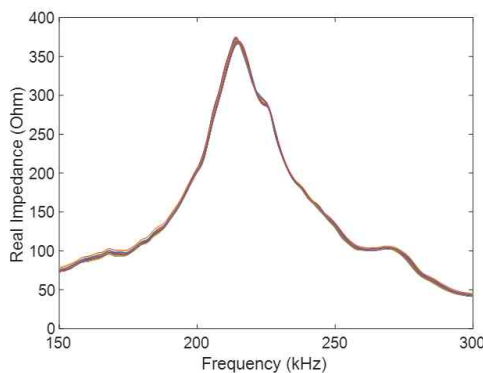
(c) Peak 2

그림 2-3-23 온도변화 조건에 대한 텐던 정착부의 임피던스 응답 변화(앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스)

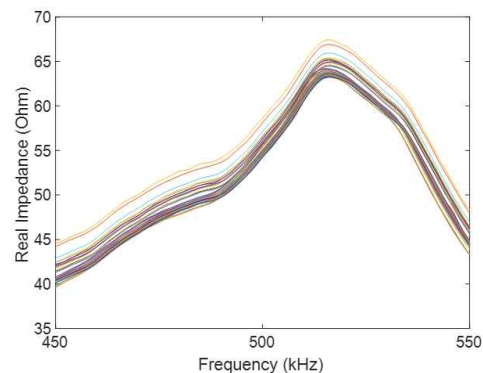
- 온도변화에 대한 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스에서 계측된 임피던스 응답의 변화는 그림 2-3-24와 같음. 100~600kHz 주파수 범위에서 2개의 peak가 관찰되었으며, 두 peak 주파수의 변화는 그림 2-3-24(b),(c)에 나타내었음. 두 peak에 대하여 온도가 감소함에 따라 peak 주파수가 증가하는 현상이 관찰되었음.



(a) 계측 주파수 대역에 대한 임피던스 응답(2-32kHz)



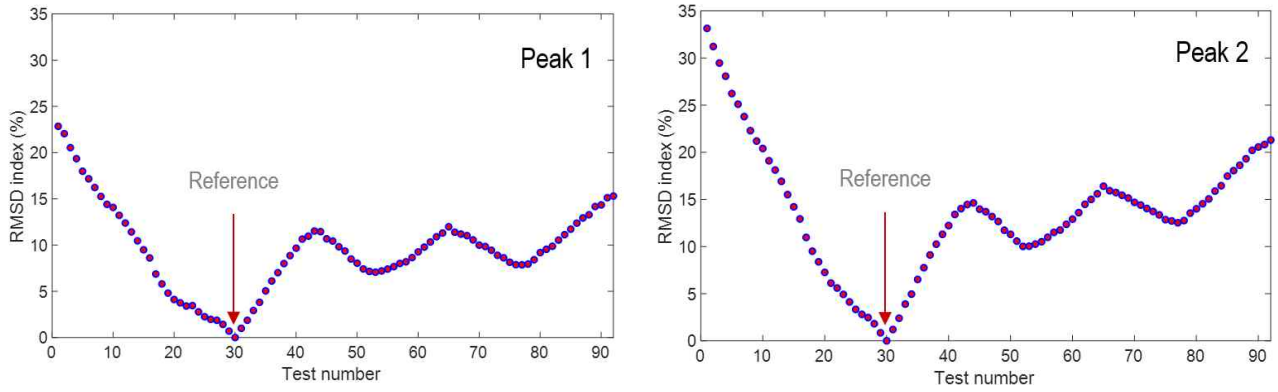
(b) Peak 1



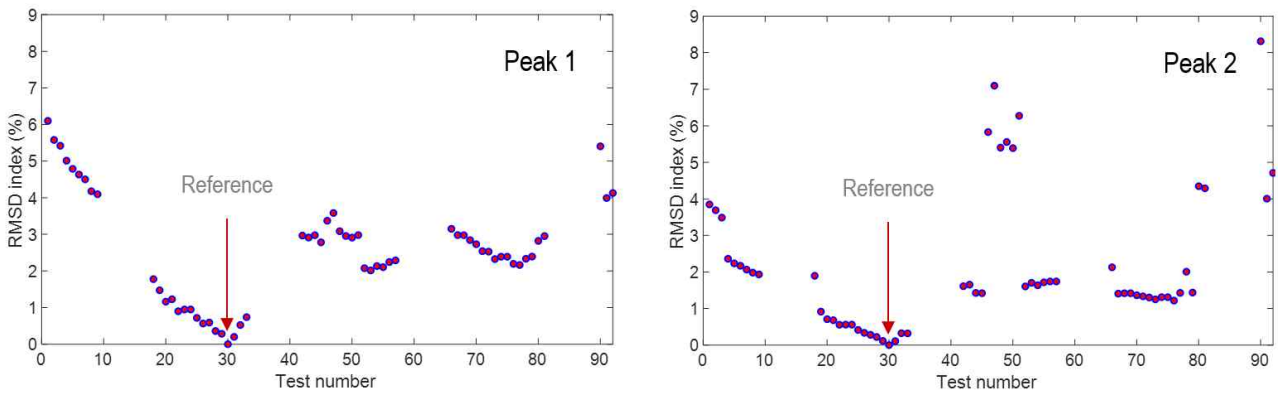
(c) Peak 2

그림 2-3-24 온도변화 조건에 대한 텐던 정착부의 임피던스 응답 변화(콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스)

- 그림 2-3-23 및 그림 2-3-24의 임피던스 응답으로부터 두 피크주파수 대역에 대한 RMSD 지수를 분석하였음. RMSD 분석의 기준 데이터로서 30번째를 이용하였으며 계측 시 온도는 약 17℃임. 그림 2-3-25에 Test number에 따른 RMSD 지수 분석 결과를 나타내었음. 온도 차이가 클수록 RMSD 지수가 크게 분석되었으며, RMSD 지수의 변화 분포는 그림 2-3-22와 같이 온도변화 분포와 유사하게 나타났음.
- 이러한 임피던스 응답 특성변화는 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스에서 크게 분석되었으며, 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스의 경우 온도에 대한 영향이 상대적으로 작은 것으로 분석되었음. 이는 콘크리트 정착부용 인터페이스는 콘크리트 내 매립 설치됨에 따라 PZT 센서에서의 온도변화 크기가 작게 발생한 것으로 판단됨.



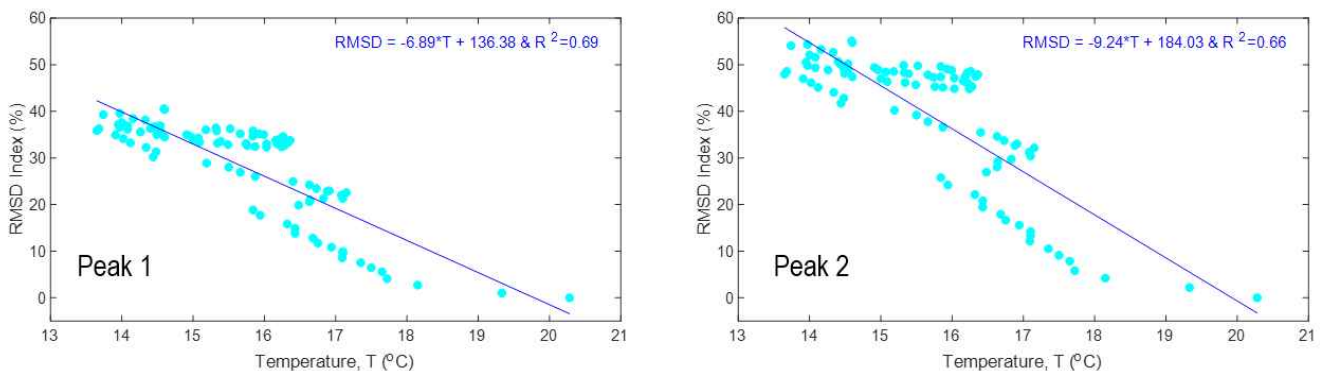
(a) 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스



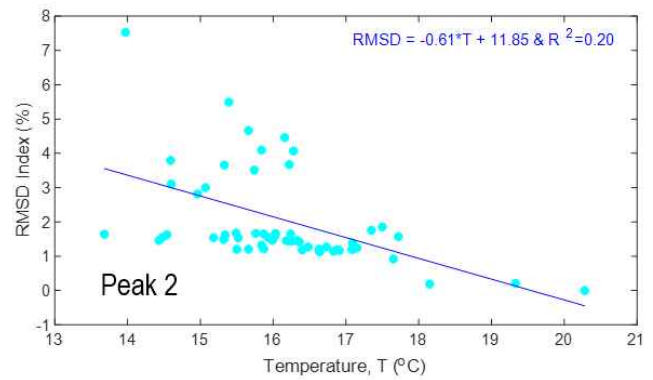
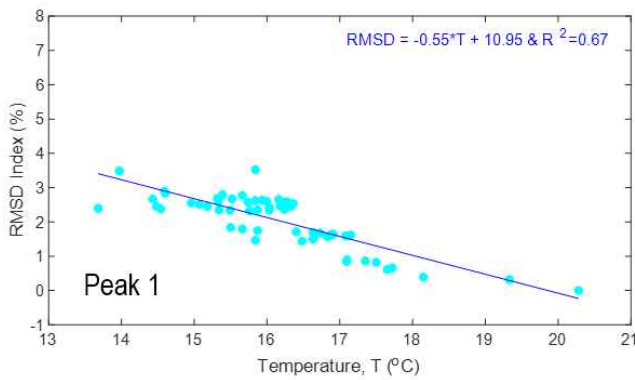
(b) 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스

그림 2-3-25 온도변화에 따른 임피던스 응답의 RMSD 지수 변화 분석

- 그림 2-3-26은 온도조건에 대한 RMSD 지수의 상관성 분석 결과를 나타냄. 이때, 기준 데이터로서 20.3℃에 계측된 임피던스 응답을 이용하였음. 온도조건과 임피던스 응답의 RMSD 지수 간의 관계는 두 peak 주파수 대역에서 모두 뚜렷한 선형적 상관성을 갖는 것으로 분석되었음. 콘크리트 정착부용 매립형 인터페이스는 앵커헤드용 인터페이스에 비해 온도변화에 대한 민감도가 매우 낮은 것으로 분석되었음.



(a) 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스

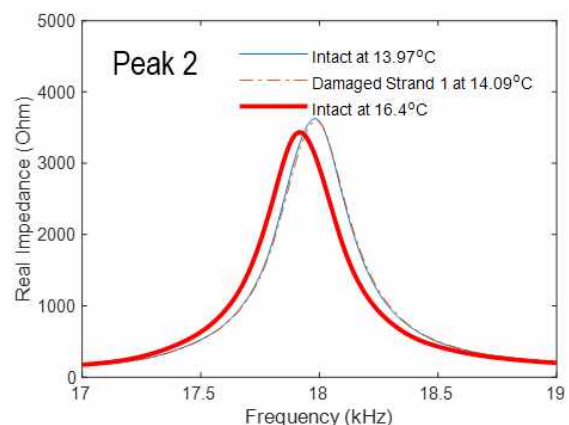
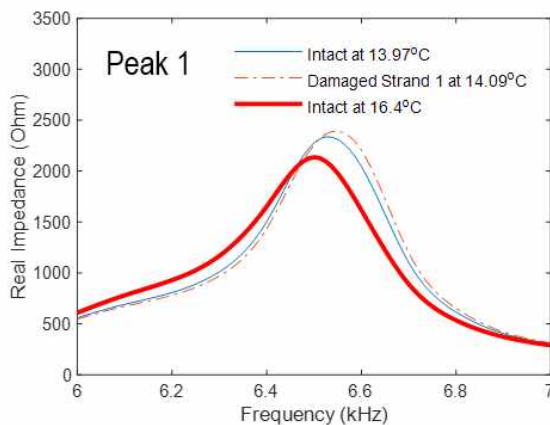


(b) 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스

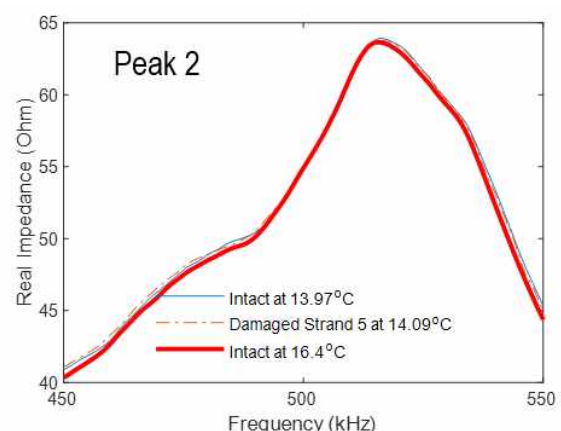
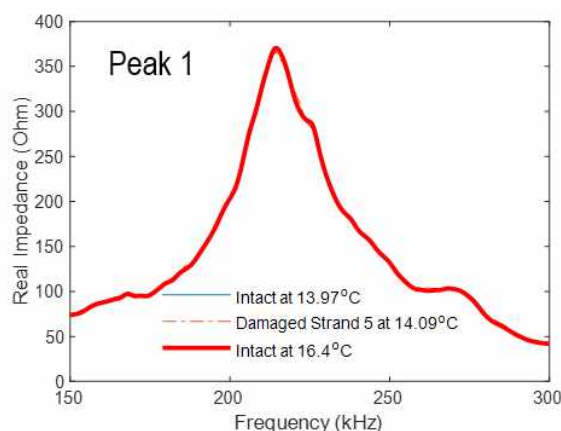
그림 2-3-26 온도조건과 임피던스 응답의 RMSD 지수 간의 상관성 분석

□ 온도변화 및 텐던 정착부 손상에 의한 텐던 정착부의 임피던스 응답 변화 분석

- 온도변화에 대한 임피던스 응답 변화와 텐던 정착부 손상에 의한 임피던스 응답 변화의 비교분석을 수행하였음. 이를 위해, 3가지 조건 1) 비손상 & 13.97°C, 2) Strand 1 파손 & 14.09°C, 3) 비손상 & 16.4°C에 대하여 임피던스 응답 계측 실험을 수행하였음.
- 그림 2-3-27(a)는 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스의 임피던스 응답을 나타냄. Strand 1 파손 조건에 대하여 peak 주파수가 증가하였으며, 온도 증가 조건에 대하여 peak 주파수가 감소하였음. Peak 1의 경우 1개 강연선 파손에 의한 임피던스 응답 변화 보다 약 2°C의 온도변화에 대한 변화가 더 큰 것으로 관찰되었음. Peak 2의 경우 강연선 파손의 경우에 비해 온도변화(2°C)에 의한 임피던스 응답의 변화가 더 큰 것으로 관찰되었음.
- 그림 2-3-27(b)는 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스의 임피던스 응답을 나타냄. 앵커헤드용 인터페이스에 대한 결과와 비교할 때 온도변화에 따른 임피던스 응답의 변화가 작게 발생하였음. 이에 따라, 콘크리트 정착부용 인터페이스는 온도변화에 대한 민감도가 낮은 것으로 분석되었음.



(a) 앵커헤드용 웨어러블 PZT 인터페이스



(b) 콘크리트 정착부용 매립형 웨어러블 PZT 인터페이스

그림 2-3-7 온도변화 및 강연선 손상에 따른 임피던스 응답 변화 비교

2. 연구 개발 성과

가. 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부	게재일	비고
1	Preload Monitoring in Bolted Connection Using Piezoelectric-Based Smart Interface	Sensors	Thanh-Canh Huynh; Jeong-Tae Kim	18	스위스	Molecular Diversity Preservation International	SCIE	2018.08.22	
2	PCA-based filtering of temperature effect on impedance monitoring in prestressed tendon anchorage	Smart Structures and Systems	Thanh-Canh Huynh; Jeong-Tae Kim	22 (1)	대한민국	Techno-Press	SCIE	2018.09.27	
3	Sensitivity of piezoelectric-based smart interface to structural damage in bolted connection	Sensors	Thanh-Canh Huynh; Jeong-Tae Kim	19	스위스	Molecular Diversity Preservation International	SCIE	2019.08.23	
4	Sensor fault diagnosis for impedance monitoring using piezoelectric-based smart interface technique	Sensors	Thanh-Canh Huynh; Jeong-Tae Kim	-	스위스	Molecular Diversity Preservation International	SCIE	2020.01.09 Accepted	

나. 지식재산권

번호	지식재산권 명칭	국명	출원			등록			기 여 율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	임피던스 측정주파수 사전 지정형 인터페이스와서	대한민국	부경대학교 산학협력단	2018.11.07	10-2018-0135529	1차 심사 중			100
2	압전소자를 이용한 케이블 장력 변화 추정 장치 및 케이블 장력의 현장계측 방법	대한민국	부경대학교 산학협력단	2018.11.13	10-2018-0138681	2차 심사 중			100

다. 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	프리스트레스 텐던 정착부 손상검출 소프트웨어	2019.12.10	김정태, 이소영, 당역로이, 박재형, 후인탄칸	2019.12.17	C-2019-041094	부경대학교 산학협력단	100

3. 연구 결과의 기술적 · 경제적 성과

□ 기술적 성과

- 본 연구에서 개발되는 PS 강연선 및 정착부 파손감지용 웨어러블 압전 센서 장치 시스템 기술은 향후 구조물의 하중전달 핵심연결부에 적용할 수 있는 원천기술이 될 것임. 이 기술은 다양한 구조연결부에 피복되어 하중응답 거동과 손상추적을 수행하는 웨어러블 장치의 개발에 활용될 수 있을 것임. 단, 기존의 PSC 교량과 같이 초기응력을 알 수 없는 경우에는 센서장치 설치 시점 대비 공용 중 하중이력의 상대적 변화량 모니터링으로 활용될 수 있음.
- 또한, 웨어러블 인터페이스 기술은 외력에 취약하고 내구성이 떨어지는 기존의 압전센서의 약점을 보완하는 기술로서 프리스트레스 교량, 강교량 등에서 기존의 센서 기술을 대체하는 새로운 기술의 개발에 활용될 수 있음.
- 웨어러블 센서/계측 장치 기술은 기존의 기술에 비해 손상탐색 범위가 웨어러블 인터페이스 장치 내의 전 범위로 확대되는 기술로서 새로 발생하는 손상의 탐지와 함께 기 발견된 손상의 향후 진전을 추적하는 기술로 활용될 수 있음.
- PS 강연선 정착부의 손상감지에 최적화된 센서배치 기술은 기타 건설 · 기계 · 항공 구조물의 센서배치 설계 기술에 활용될 수 있음. 특히, 구조물 진단회사의 센서 배치설계 시 가이드라인 및 토목구조용 범용 구조해석 프로그램 및 CAD 및 CAE와 접목하여 설계 · 시공 · 유지관리 분야에 활용할 수 있음.

□ 경제적 성과

- 본 연구의 성과는 개소당 2000~4000만원 상당의 고가 장비로만 가능했던 기술적인 부분을 웨어러블 장치와 소형 신호계측 장치로 대체 해결할 수 있는 저가의 시스템 기술을 개발 시 원천 기술로서 활용될 수 있음.
- 고가의 시스템 기술 비용 및 전문 인력의 부족으로 인해 적절하게 유지관리 되지 못하는 프리스트레스 구조물 텐던 정착부의 파손 발생 위험은 정기 육안검사 대상인 기타 구조부재에 비해 높음. 저가의 고내구성, 비전문가가 사용 가능한 손상감지 소프트웨어는 국내 SOC 유지관리 비용을 절감할 수 있음

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 성과 목표 및 달성 여부

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표	달성건수 (달성도)	비고
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3건	2건	4건 (130%)	초과달성
일반학술지게재(1점)	2건		2건 (100%)	
특허출원(1점)	2건	2건	3건 (150%)	
특허등록(2점)	1건	1건		2019/11/22 의견제출통지서 수신 2020/01/02 의견서 및 보정서 제출 완료 2020년 중 등록 완료 예상
소프트웨어(1점)	1건	1건	1건(100%)	2019.12.17. 등록완료
하드웨어(1점)	1건		1건 (100%)	2019.08.10. 제작 완료 (웨어러블 인터페이스)
소계(점수)	14점	9점	15점	

(1) 단위성과 1 : PS강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술

□ 질적 성과지표 ① : PS강연선과 정착부의 파손감지 기법 도출

- 본 성과지표 달성도는 파손감지기법의 알고리즘의 제시 여부에 따라 평가되며, 이는 연구수행내용 중 p.19의 그림 1-1-20에 제시하였음.
- PS 강연선과 정착부의 파손감지 기법은 PZT 인터페이스 내의 PZT 센서로부터 측정되는 임피던스 응답 및 압전 동적변형률 응답으로부터 PS 강연선 및 정착부의 파손을 감지하는 기법임. 임피던스 응답에 의한 국부손상탐색 기법 및 압전 동적변형률 응답에 의한 전역적 손상탐색 기법을 병렬적으로 이용하여 국부 및 전역적 손상 모니터링을 동시에 수행하는 파손감지 기법을 개발하였음.

□ 질적 성과지표 ② : PZT-FRP 정착부 웨어러블 인터페이스 장치 설계

- 본 성과지표 달성도는 PZT-FRP 정착부 웨어러블 인터페이스 장치의 설계도면 제시여부에 따라 평가되며, 이는 연구수행내용 중 p.29, 30의 그림 1-2-16 및 그림 1-2-17에 제시하였음.
- PZT-FRP 정착부 웨어러블 인터페이스 장치는 텐던 정착부에 부착/설치하여 PZT를 통한 임피던스 및 압전 동적 변형률을 측정하는 장치임. 웨어러블 인터페이스의 구조 및 설치 위치에 따른 손상민감도 분석을 통하여 앵커헤드용 장치와 지압판용 장치를 설계하고 그 도면을 제시하였음.

□ 질적 성과지표 ③ : 웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지 기법 설계

- 본 성과지표 달성도는 웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지기법의 정확도에 따라 평가되며, 이는 연구수행내용 중 p.37의 그림 1-3-13 및 그림 1-3-14에 제시하였음.
- 웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지 기법은 본 연구에서 개발된 웨어러블 장치를 텐던 정착부에 적용하여 그 장치로부터 측정된 임피던스 응답으로부터 파손을 감지하는 기법임. 수치해석을 통한 텐던 정착부 파손 감지 기법의 성능을 분석 한 결과 단일 손상 및 복수 손상 조건에 대해 100%의 정확도로 손상을 감지하였음.

(2) 단위성과 2 : 웨어러블 압전응답 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성 및 성능평가

□ 질적 성과지표 ① : 웨어러블 장치 설치된 정착부 제작/실험

- 웨어러블 장치는 텐던-정착부의 파손감지를 위한 것으로서 앵커헤드용 웨어러블 인터페이스 및 콘크리트 정착부용 내장형 인터페이스 블록을 개발하였음. 제작된 앵커헤드 및 콘크리트 정착부용 웨어러블 장치는 긴장력 시험을 위해 제작된 프레임구조물에 거치하였으며, 정착부 손상에 대한 압전 동적변형률/임피던스 응답 측정 실험을 수행하였음. 본 성과지표 달성 과정 중 1) 텐던-앵커헤드 정착부, 2) 콘크리트 정착부, 3) 긴장력 시험용 실험프레임이 설계 및 제작되었음.
- 본 성과지표 달성도는 정착부-웨어러블 실험 장치 시스템의 제작여부에 따라 평가되며, 이는 연구수행내용

중 p.44, 52, 65의 그림 2-1-5, 그림 2-1-15, 및 그림 2-3-3에 제시하였음.

□ 질적 성과지표 ② : 정착부 파손감지 S/W 개발

- 본 성과지표 달성도는 소프트웨어의 제작 여부로서 평가되며, 저작권협회에 소프트웨어 등록을 완료하였음. 개발된 소프트웨어는 연구수행내용 중 p.59의 그림 2-2-2(소프트웨어 메인화면)에 제시하였음.
- 정착부 파손감지 S/W는 웨어러블 장치로부터 측정된 압전 동적변형률 및 임피던스 응답으로부터 강연선 및 콘크리트 정착부의 손상을 감지는 프로그램임. 사용자의 편의성을 고려하여 GUI 기반의 프로그램으로 구현하였음. 신호해석 변수 값의 조정이 가능하며, 계측데이터의 가시화 뿐만 아니라 동적변형률 및 압전임피던스 응답, 특성치 분석 및 토모그래피 분석 결과를 직관적으로 확인되도록 구성하였음.

□ 질적 성과지표 ③ : 웨어러블 장치 피복 정착부의 파손감지 성능 평가

- 본 성과지표 달성도는 웨어러블 장치의 정착부 파손감지 정확도에 따라 평가되며, 이는 연구수행내용 중 p.70, 75의 그림 2-3-11 및 그림 2-3-16에 제시하였음.
- 웨어러블 장치의 성능평가를 위하여 자체 제작된 텐던-정착부에 설치하고 강연선 및 콘크리트 정착부 손상에 대한 감지 성능을 평가하였음. 두 종류의 웨어러블 장치는 각각 앵커헤드 및 콘크리트 정착부에 설치 및 내장되었음. 실험해석 결과, 6 Ton(최대 하중의 40% 수준)의 긴장력 변화에 대하여 앵커헤드에 설치된 웨어러블 장치로부터 100%의 정확도로 강연선 손상을 감지하였으며, 콘크리트 정착부에 내장된 웨어러블 장치로부터 100%의 정확도로 콘크리트 손상(내부응력변화)을 감지하였음.

[성과점검 기준표]

구분		핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준							양적 성과 건수
				질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	기준치		
주관	1	PS강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치의 개발 및 활용성 검증	1-1 PS강연선과 정착부의 파손감지용 웨어러블 압전센서 장치 기술	①	PS강연선과 정착부의 파손감지 기법 도출	1건	1건	알고리즘 설계여부	보고서 제시	20	특허: 출원 2 건 등록 2 건 논문: 2 건 시제품: 1 건 SW: 1 건
				②	PZT-FRP 정착부 웨어러블 인터페이스 장치 설계	1건	1건	설계도면	설계도면 제시	20	
				③	웨어러블 장치의 텐던 정착부 파손감지 기법 설계	95% 이상 정확 도	95% 이상 정확 도	측정	보고서 제시	10	
		1-2	웨어러블 압전응답 장치 및 파손감지 소프트웨어 작성 및 성능평가	①	웨어러블 장치 설치된 정착부 제작/실험	3건	3건	시스템 제작여부	보고서 제시	20	특허: 출원 1 건 등록 1 건 논문: 4 건 시제품: 1 건 SW: 1 건
				②	정착부 파손감지 S/W 개발	1건	1건	S/W 제작여부	S/W 등록	15	
				③	웨어러블 장치 피복 정착부의 파손감지 성능평가	95% 이상	95% 이상	파손감지 성능비교	보고서 제시	15	
계									100	특허: 출원 2 건 등록 2 건 논문: 6 건 시제품: 1 건 SW: 1 건	

2. 관련 분야 기여도

□ 기술적 측면

- 본 연구에서 개발하는 피복형 ‘웨어러블 압전센서’ 기술은 PSC 구조물 텐던 정착부의 손상이력 추적이 가능하여, 구조물의 유지관리의 효율성과 정확성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대됨.
- 피복형 ‘웨어러블 압전센서’ 기술은 건설 신소재 기술, 구조 건전성 감시 및 진단 기술, 인공지능 기술, 구조 해석/설계 기술 등 다양한 기술 분야가 접목되어 개발되는 기술임. 특히, 전통 학문 분야인 구조 건전성 감시 및 진단 기술, 구조 해석/설계 기술 등을 미래 기술로 주목받고 있는 신소재 기술과 접목함으로써, 제4차 산업혁명 시대에 부합하는 기술적 발전이 이루어질 것으로 기대됨.
- 본 연구에서 개발될 CFRP-MFC 신소재 기술은 하중 연결부 부재에 대한 의존성이 큰 장대 케이블 교량, 초고층 빌딩 및 플랜트 등의 상시 계측에 적용성이 클 것으로 기대됨. 특히 기존의 기술로는 하중이력/손상감지에 적용이 어려운, 신기술이 필요한, 교량 붕괴취약 핵심연결부의 공용 중 모니터링/유지관리 및 구조물의 신설 시 적용이 기대됨.
- 공용중인 PSC 구조물 텐던 정착부의 파손에 따른 구조성능의 현격한 저하가 발생하기 전에 능동적으로 파손을 감지할 수 있는 시스템이 필요하며, 성공적 기술개발로 건설시공 및 유지관리 분야에 새로운 상품 창출에 기여할 것으로 판단됨.

□ 경제적 · 산업적 측면

- 미국 연방도로교통부 2015년 보고서와 일본 국토성 보고서는 기설 교량의 교체에 따른 유지관리 시장의 활성화와 이에 따른 첨단 기술 시장의 발전을 예상하고 있음. 미래 건설시장의 변화에 대응하는 첨단 기술 확보로 변화하는 국내외 유지관리 기술시장 여건에 능동적으로 대처할 수 있을 것으로 기대됨.
- 한국시설안전공단 2014년 보고서 등에 따르면 기설 교량의 노후화로 2020년 이후 국내의 도로교 및 철도교의 유지관리 비용이 수조원에 이를 것으로 예측되고 있음. 본 연구에서 개발되는 기술을 실용화를 통해 국내 SOC 유지관리 예산을 절감할 수 있을 것으로 기대됨.
- 고 비용의 전문인력 및 고가의 시스템 기술 비용으로 인해 관리 받지 못하는 구조물에는 대형사고의 위험이 높음. 따라서, 전문인력 및 고가의 시스템 기술을 대체 할 수 있는 고내구성, 첨단 기능의 유지관리 기술이 개발된다면 국내 SOC 유지관리 체계의 변화를 가져올 수 있으리라 기대됨.

□ 사회적 측면

- 최근 경주 · 포항 지진 등으로 인해 구조물의 안전성에 대한 국민적 관심이 높음. 특히 설계 외력을 초과하는 지진을 경험한 구조물이 안전한지에 대한 불안감이 큼. 본 연구를 통해 개발되는 시스템 기술은 이 같은 상황에 놓인 노후구조물의 국부파손과 구조물의 상태변화를 감시하여 사회적 불안감을 해소하는데 기여할 것임.
- 본 연구는 다양한 기술 분야가 융합된 기술의 개발, 국제 저널 발표, 특허 출원을 통해 제4차 산업혁명 시대에 부합하는 창의적 연구인력을 양성할 것임. 이와 같이 과정에 참여한 연구인력은 향후 건설 분야의 새로운 먹거리를 창출하고 관련 분야의 기술 발전을 선도할 수 있을 것으로 기대됨.
- 프리스트레스 구조물에 적합한 첨단 계측 및 평가, 사전유지관리, 적정 보수 · 보강 재료 및 공법 기술 개발에 필요한 양질의 일자리 창출.

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 해당없음

제5장. 연구개발성과의 활용계획

□ 연구개발 시스템 기술의 활용 분야

- 웨어러블 압전센서 장치 및 텐던 정착부 손상감지기술은 비부착식 텐던 형식의 PSC 구조물의 건전성 감시에 적용이 가능함. 또한, 웨어러블 장치 설계 기술 및 기전 임피던스 예측/해석 기술을 응용연구를 통해 교량, 건축물, 원전 격납구조, 플랜트와 선박·해양 구조물 등 프리스트레스 공법을 적용한 구조물 건전도 유지관리 분야에서 다양하게 활용이 가능함. 다만, 본 기술을 부착식 텐던 형식의 PSC 구조물에 적용 시 손상/비손상 강연선 간의 인장력 분산 현상을 고려하여 그 활용성 검증이 필요할 것으로 예상됨.
- 대표적인 기술수요처로는 유지관리 회사, 교량유지관리 사업소, 한국시설안전공단, 한국도로공사, 플랜트 산업단지, 조선소 등임. 한국시설안전기술공단의 2014년도 보고에 따르면 국내 노후시설물 중 560개소가 30년 이상 경과된 교량이며, 50년 이상 공용된 교량은 133개소로 보고되었음. 향후 10년간 노후화 시설물은 2배 이상 급증할 것으로 예상되며 전체 시설물의 21.5%에 이를 것으로 보고되었음.

□ 실 교량의 유지관리에 적용 방안

- 본 연구종료 후 인근의 교량유지관리 사업소(화명대교, 부산항대교 등)와 협의하여 실물 다중 PS 강연선을 장착한 정착부를 대상 모델로 선정하여 연구를 추진할 예정임. 이때, 실제 현장에서 감지 가능한 긴장력 변화 범위에 대한 연구가 필요함. 성공적으로 연구가 완료되면 주요 교량유지관리 기관에 적극 홍보하여 시스템 기술을 현장 적용하고자 함.

□ 실용화·제품화 방안

- 연구 종료 후 2년 이내에 연구개발 시스템 기술(웨어러블 압전센서 장치 및 텐던 정착부 손상감지 기술)을 관련 기업체에 해당 기술을 이전하고 이후에도 기업체와 공동으로 현장 설치된 개발 시스템의 장기 성능을 평가하여 지속적인 성능 개선(기술성숙도 6단계) 및 기술 지원을 할 것임.
- 이로부터 연구 종료 후 5년 이내에 완제품 형태의 시스템을 생산(기술성숙도 8단계)할 수 있도록 산학 연구를 추진할 것임. 또한 관련 구조물(교량, 원전, 플랜트 등) 관리기관과 협의하며, 국내외 관련 학술 논문 홍보를 할 것임.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당 없음.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당 없음.

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 안전점검 활동

종류	실시시기
일상점검	연구개발활동에 사용되는 기계, 기구, 전기,약품, 병원체 등의 보관상태 및 보호 장비의 관리실태 등을 육안으로 실시하는 점검으로서 매일 1회 실시
정기점검	연구개발활동에 사용되는 기계, 기구, 전기,약품, 병원체 등의 보관상태 및 보호 장비의 관리실태 등을 안전점검기기를 이용하여 실시하는 세부적인 점검으로 매년 1회 이상 실시
정밀 안전진단	연구개발활동에 유해화학물질 관리법 제2조 7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실, 산업안전보건법 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실, 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실을 대상으로 2년마다 1회 실시

2. 교육훈련

□ 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」에 따라 아래와 같이 교육훈련을 실시.

교육과정	교육대상	교육시간	교육내용
정기 교육·훈련	모든 참여연구원	월 1시간 이상	· 연구실 안전환경 조성 법령에 관한 사항 · 연구실내 유해·위험요인에 관한 사항 · 안전한 연구개발활동에 관한 사항 · 물질안전자료에 관한 사항 · 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항
신규채용 등에 따른 교육·훈련	신규 참여연구원	8시간 이상	· 연구실 안전환경 조성 법령에 관한 사항 · 연구실내 유해·위험요인에 관한 사항 · 보호장비 및 안전장치 취급과 사용에 관한 사항 · 연구실 사고사례 및 사고예방 대책에 관한 사항 · 안전표지에 관한 사항 · 물질안전자료에 관한 사항 · 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항
연구내용 변경에 따른 교육·훈련	모든 참여연구원 (연구내용 변경 시)	2시간 이상	· 연구실내 유해·위험요인에 관한 사항 · 안전한 연구개발 활동에 관한 사항 · 물질안전자료에 관한 사항 · 그 밖에 연구실 안전관리에 관한 사항

3. 건강검진

- 학교보건법에 의거하여 본교 건강센터에서 주관하며 매년 학부생 및 대학원생을 대상으로 건강검진 실시.

4. 보험가입 현황

보험명	보상내용	대상	주관부서
재산종합보험 (교육시설공제가입)	재산종합위험담보 : 4천 8십억원 (신체배상책임보험 특별약관 포함)	피보험자	재무과
	건물 피해 : 전손의 경우 신축단가, 분손의 경우 복구실소 요액	전체	
	사망/장애 : 호프만계수에 의해 산출한 실손해액	학생	
	부상 : 치료실비 전액지급	학생	
실험실 연구활동 종사자 안전보험	사망·치료 중 사망 : 1억원, 후유장애 : 1억원, 부상: 1천만원	연구활동 종사자	시설과
학생단체 상해보험	상해사망, 후유장애 : 1억원, 상해, 후유정도에 따른 보상 : 약관보상	재학생	학생 지원과
교직원 단체보험	생명상해, 사망 및 장애 : 1억원/인 의료비지원 : 암치료비 1천만원/인당, 입원의료비지원 1천만원/인당	교직원	총무과

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	논문	PCA-based filtering of temperature effect on impedance monitoring in prestressed tendon anchorage	부경대 학교	교신	Smart Structures and Systems	3.622 (상위 10%)	2018.09.27	단독	SCIE, 피인용수 5회 (google)
2	논문	Preload Monitoring in Bolted Connection Using Piezoelectric-Based Smart Interface	부경대 학교	교신	Sensors	3.301 (상위 25%)	2018.08.22	단독	SCIE, 피인용수 20회 (google)
3	논문	Sensitivity of piezoelectric-based smart interface to structural damage in bolted connection	부경대 학교	교신	Sensors	3.301 (상위 25%)	2019.08.23	단독	SCIE
4	논문	Sensor fault diagnosis for impedance monitoring using piezoelectric-base d smart interface technique	부경대 학교	교신	Sensors	3.301 (상위 25%)	2020.01.09 Accepted	단독	SCIE
5	특허	압전소자를 이용한 케이블 장력 변화 추정 장치 및 케이블 장력의 현장계측 방법	부경대 학교	발명자	대한민국	-	2018.11.07. (출원, 현재 등록 심사중(2차))	단독	-
6	소프트 웨어	프리스트레스 텐던 정착부 손상검출 소프트웨어	부경대 학교	저작자	대한민국	-	2019.12.17.	단독	-

제11장. 기타 사항

없음.

제12장. 참고 문헌

1. Kim, J.T., Yun, J.B., Ryu, Y.S. and Cho, H.M. (2004), Identification of prestress-loss in PSC beams using modal information, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 17, No. 3-4, pp.467-482.
2. Ottosen, N.S. (1977), A failure criterion for concrete, *Journal of the engineering mechanics division*, Vol. EM4, pp.527-535.
3. Kim, J.T., Nguyen, K.D. and Huynh, T.C. (2013), Wireless health monitoring of stay cable using piezoelectric strain response and smart skin technique, *Smart Structures and Systems*, Vol. 12, No. 3-4, pp. 381-397.
4. DCT (2017), 복합재료 성형, <http://www.dctcomposite.com/>
5. Kim, J.T., Park, J.H. and Hong, D.S. (2010), Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete, *Smart Structures and Systems*, Vol. 6(5-6), pp.711-730.
6. University of Illinois Urbana-Champaign (2009), Smart Structures Technology Laboratory, Prof. B.F. Spencer, <http://sstl.cee.illinois.edu/>
7. The Guardian, Genoa bridge collapse: 'Unusual' span had seen frequent repair work (2018), <https://www.theguardian.com/world/2018/aug/14/unusual-span-of-collapsed-genoa-bridge-had-seen-frequent-repair-work>, 14 Aug. 2018.
8. Kim, J.T., Sim, S.H., Cho, S., C.B. Yun, and Min, J.Y. (2016), Recent R&D activities on structural health monitoring in Korea, *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 3, No. 1, 91-114.
9. Huynh, T.C. and Kim, J.T. (2014), Impedance-based cable force monitoring in tendon-anchorage using portable PZT-interface technique, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2014, Article ID 784731, 11 pages.
10. Khan, S., Lorenzelli, L., and Dahiya, R.S., (2015), Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates: A Review. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15 No. 6, pp. 3164-3185.
11. Rodgers, M.M., Pai, V.M., and Conroy, R.S. (2015), Recent Advances in Wearable Sensors for Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, No. 6. pp. 3119-3126.
12. Nguyen, K.D., Kim, J.T., and Park, J.H. (2013), Multiscale structural health monitoring of cable-anchorage system using piezoelectric PZT sensors, *Int. Journal of Distributed Sensor Networks*, Vol. 2013, Article ID 2547856, 9 pages.
13. Huynh, T.C. and Kim, J.T. (2018), RBFN-based Temperature Compensation Method for Impedance Monitoring in Prestressed Tendon Anchorage, *Structural Control & Health Monitoring*, e2173, <http://doi.org/10.1002/stc.2173>.
14. Abdeljaber, O., Avci, O., Kiranyaz, S., Gabbouj, M., and Inman, D.J. (2017), Real-time vibration-based structural damage detection using one-dimensional convolutional neural networks. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 388, pp. 154-170.
15. de Oliveira, M., Monteiro, A., and Vieira Filho, J. (2018), A New Structural Health Monitoring Strategy Based on PZT Sensors and Convolutional Neural Network. *Sensors*, Vol. 18, No. 9, pp. 2955.
16. Lopes, V., Park, G., Cudney, H.H., and Inman, D.J. (2016), Impedance-Based Structural Health Monitoring with Artificial Neural Networks. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 206-214.
17. Wang, C., Wang, N., Ho, S.-C., Chen, X., Pan, M., and Song, G. (2018), Design of a Novel Wearable Sensor Device for Real-Time Bolted Joints Health Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 2018, pp. 1-1.
18. Yang, Y., Lim, Y.Y., and Soh, C.K. (2008), Practical issues related to the application of the

- electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: II. Numerical verification. *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, No. 3, pp. 035009.
19. Park, J.H., Huynh, T.C., and Kim, J.T. (2015), Wireless monitoring of typhoon-induced variation of dynamic characteristics of a cable-stayed bridge, *Wind and Structures*, Vol. 20, No. 2, pp. 293–314.
 20. Huynh, T.C., Park, J.H. and Kim, J.T. (2016), Structural identification of cable-stayed bridge under back-to-back typhoons, *Measurement*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.03.032>.
 21. Huynh, T.C., Nguyen, C.U., Dang, N.L., Kim, J.T. (2017), Advances and Challenges in Impedance-based Structural Health Monitoring, *Structural Monitoring and Maintenance*, Vol. 4, No. 43.
 22. Huynh, T.C, Park, Y.H., Park, J.H., and Kim, J.T. (2014), Feasibility verification of mountable PZT-interface for impedance monitoring in tendon-anchorage, *Shock and Vibration*, Article ID 262975, 11 pages.
 23. Kim, J.T., Park, J.H., Hong, D.S. and Park, W.S. (2010), Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp.115–128.
 24. Ho, D.D., Nguyen, K.D., Yoon, H.S., and Kim, J.T. (2012), Multi-scale Acceleration-Dynamic Strain-Impedance Sensor System for Structural Health Monitoring, *Int. Journal of Distributed Sensor Network*, Vol. 2102, Article ID 709208, 17 pages.
 25. Kim, J.T., Ho, D.D., Hong, D.S., Nguyen, K.D., Shin, S.W., Yun, C.B., and Shinozuka, M. (2013), System identification of cable-stayed bridge using vibration response by smart sensor system, *Smart Structures and Systems*, Vol. 11, No. 5, pp. 533–553.

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.