최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구(기반연구 유형)	
공고번호	공고-제05호	연구개발과제번호		20CTAP-C157163-01	
국가과학기술 표준분류	EI1101	80%	EA0109	20%	00%
연구주제	(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현	(중분류) 건설 자동화		(소분류) 시설물 무인 진단 시스템	

연구개발과제명	국문	노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발		
	영문	Development of Multi-measurement Method incorporating External Magnetization EM and 3D GPR for Automatic Diagnosis of Residual Tension of outdated PSC Structures		
주관연구개발기관	기관명	재단법인 차세대융합기술연구원	사업자등록번호	135-82-12905
	주소	(16229) 경기도 수원시 영통구 이의동 864-1	법인등록번호	135822-0004959
연구책임자	성명	김준경	직위	선임연구원(연구실장)
	연락처 직장전화	031-888-9844	휴대전화	010-3085-2238
	연락처 전자우편	junkyeong@snu.ac.kr	국가연구자번호	11027792
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)		
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(9개월)		
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)		

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	55,500	314,500	-	-	-	-	425,500	314,500	740,000	-
1년차	160,000	24,000	136,000	-	-	-	-	184,000	136,000	320,000	-
2년차	210,000	31,500	178,500	-	-	-	-	241,500	178,500	420,000	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	롯데건설(주)	안범준	책임	02-3483-7825	bumjoon.ahn@lotte.net	공동과제총괄	대기업
	㈜스마트인사이드에이아이	김태헌	연구소장	031-290-7533	tamasic@nate.com	공동과제총괄	중소기업

연구개발담당자 실무담당자	성명	박세환	직위	연구원
	연락처 직장전화	031-888-9407	휴대전화	010-5110-9348
	연락처 전자우편	sehwan0721@snu.ac.kr	국가연구자번호	11822460

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 3월 18일

연구책임자 : 김 준 경 (서명)

주관연구개발기관의 장 : 차세대융합기술연구원 주 영 창 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 롯데건설(주) 하 석 주 (직인)

㈜스마트인사이드에이아이 박 승 희 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)
공고번호	공고-제05호	연구개발과제번호		20CTAP-C157163-01

국가과학기술 표준분류	EI1101	80%	EA0109	20%		00%
연구주제	(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현		(중분류) 건설 자동화		(소분류) 시설물 무인 진단 시스템	

연구개발과제명	국문	노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발		
	영문	Development of Multi-measurement Method incorporating External Magnetization EM and 3D GPR for Automatic Diagnosis of Residual Tension of outdated PSC Structures		
주관연구개발기관	기관명	재단법인 차세대융합기술연구원	사업자등록번호	135-82-12905
	주소	(16229) 경기도 수원시 영통구 이의동 864-1	법인등록번호	135822-0004959

연구책임자	성명		김준경	직위	선임연구원(연구실장)
	연락처	직장전화	031-888-9844	휴대전화	010-3085-2238
		전자우편	junkyeong@snu.ac.kr	국가연구자번호	11027792

연구개발기간	전체 : 2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)
	1년차 : 2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(9개월)
	2년차 : 2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년)

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	55,500	314,500	-	-	-	-	425,500	314,500	740,000	-
1년차	160,000	24,000	136,000	-	-	-	-	184,000	136,000	320,000	-
2년차	210,000	31,500	178,500	-	-	-	-	241,500	178,500	420,000	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	롯데건설(주)	안범준	책임	02-3483-7825	bumjoon.ahn@lotte.net	공동과제 총괄	대기업
	㈜스마트인사이드에이아이	김태헌	연구소장	031-290-7533	tamasic@nate.com	공동과제 총괄	중소기업

연구개발담당자 실무담당자	성명		박세환	직위	연구원
	연락처	직장전화	031-888-9407	휴대전화	010-5110-9348
		전자우편	sehwan0721@snu.ac.kr	국가연구자번호	11822460

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022년 3월 18일

연구책임자 : 김 준 경 (직인)

주관연구개발기관의 장 : 차세대융합기술연구원 주 영 창 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 롯데건설(주) 하 석 주 (직인)

㈜스마트인사이드에이아이 박 승 희 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="3">국토교통기술촉진연구사업</td><td rowspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2" rowspan="2">20CTAP-C157163-01</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="3">국토교통기술혁신연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술표준분류</td><td>EI1101</td><td>80%</td><td>EA0109</td><td>20%</td><td></td><td>00%</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구주제</td><td colspan="2">(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현</td><td colspan="2">(중분류) 건설 자동화</td><td colspan="2">(소분류) 시설물 무인 진단 시스템</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한
외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 740,000천원
(정부지원연구개발비 : 370,000천원, 기관부담연구개발비 : 370,000천원,
지방자치단체 : 천원, 그 외 지원금 : 천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="2">기초[✔] 응용[ ] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="3">착수시점 기준(TRL 1)
종료시점 목표(TRL 5)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [✔]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">기반연구</td></tr>
<tr><td rowspan="5">연구개발목표 및 내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한
외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">본 연구 개발을 통하여 노후 프리스트레스트 구조물의 무인안전진단을 위한 다중 계측 시스템 및 계측 데이터를 이용한 AI기반 긴장 응력 자동 진단 시스템을 개발함으로써 프리스트레스트 구조물 무인 진단 시스템의 원천 기술을 개발 함.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="6">PSC I형 거더에 최적화된 외부 자화 시스템 설계 및 외부 자화의 기반 기술 개발</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">○ 1차 연도
● 주관연구기관 : 차세대융합기술연구원
▫ 외부 비접촉 EM 센서를 내부 PS 텐던 자화 기법 개발
▪ 자기 중첩 효과를 이용한 특정 위치 자화 기법 개발
- 트윈 코일을 이용한 특정 위치 자화 기법 개발
- 노출 시편을 이용한 특정 위치 자화 기법 검증
▪ 3방향 계측을 통한 PS 텐던 자기이력 계측 기법 개발
- 내부 PS 텐던의 자화에 의한 자속 발생도 시뮬레이션
- 3방향 계측을 통한 특정 위치 자속 계측 기법 개발
● 공동연구기관 : 롯데건설
▫ GPR을 이용한 내부 형상 스캔 기법 개발
▪ 지표투과레이더(GPR)을 이용한 내부 PS 텐던 위치 확인 기법 개발
- 주파수 및 스캔 위치에 따른 내부형상 탐사 정확도 검증
- PS 텐던 위치 파악을 위한 주파수 및 스캔방법 최적화
▪ 콘크리트 시편을 이용한 GPR 스캔 기법 검증
● 참여기업 : ㈜스마트인사이드
▫ 시뮬레이션을 통한 외부 비접촉 EM센서 설계 및 개발
▪ 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 비접촉 EM센싱 기법 검증
▪ 검증을 통한 외부 비접촉 EM센서 설계 및 개발</td></tr>
<tr><td>2년차</td><td>목표</td><td colspan="6">외부 자화 시스템 검증 및 긴장 응력 계측 기법 개발</td></tr>
</table>

		내용	○ 2차 연도 ● 주관연구기관 : 차세대융합기술연구원 ▫ AI 기반 프리스트레스트 구조물 긴장 응력 진단 기법 개발 ▪ 철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 알고리즘 개발 ▪ AI 기반 긴장 응력 자동 진단 알고리즘 개발 - EM + GPR 통합 데이터베이스 구축 알고리즘 개발 - 다중 계측 데이터를 활용한 AI 기반 긴장 응력 진단 알고리즘 개발 - 프리스트레스트 부분 모델을 이용한 긴장 응력 진단 알고리즘 검증 ● 공동연구기관 : 롯데건설 ▫ 3-Directional Scan을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발 ▪ PS 구조물의 좌우측면 및 하부 스캔을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발 ▪ 3방향 GPR 탐사 데이터를 이용한 내부 형상 이미지화 ▪ 내부 형상 탐사를 통한 내부 철근 배근 상태 및 쉬스 위치 확인 기법 개발 ● 참여기업 : ㈜스마트인사이드 ▫ EM + GPR 다중 계측 센서 개발 및 제작 ▪ EM + GPR 다중 계측이 가능한 스마트 센서 헤드 설계 ▪ 외부 자화 EM 및 3D-GPR 동시 계측이 가능한 센서 헤드 시제품 제작 ▪ 다중 계측 센서 데이터 처리 알고리즘 개발
연구개발성과			○ 본 연구개발을 통해 개발한 핵심 연구 성과는 다음과 같음 ▪ 외부 비접촉형 EM 센서를 이용한 PS텐던의 자기이력 계측 기술 ▪ 3차원 GPR스캐닝을 이용한 내부 형상 스캔 기술 ▪ 다중 계측 데이터를 이용한 AI 기반 긴장 응력 자동 진단 기술 ○ 본 연구개발을 통하여 2년간 4편의 SCI급 해외 논문, 특허 출원 3건, 특허 등록 2건, 소프트웨어등록 1건을 연구개발성과로 창출함. ○ 연구과제 종료 후 참여기업과의 협업을 통하여 연구 과제 결과물의 실용화를 위한 후속연구를 실시하고자 함.
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			○ 활용계획 • 후속연구를 통한 프리스트레스트 시설물의 무인 안전 진단 시스템 개발 및 실용화 • 다중 계측을 통한 프리스트레스트 구조물 긴장 응력 진단 기법의 국내외 특허권 획득으로 미래기술선점 및 무형자산 확보 • 프리스트레스트 텐던 긴장 응력 진단 산업, 프리스트레스트 구조물 유지관리 산업 등 신산업 창출 ○ 기대효과 • 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 진단을 통한 유지관리의 효율성이 증진되어 즉각적인 보수/보강을 통해 유지관리 비용 절감이 가능함. • 긴장 응력의 효율적인 관리로 프리스트레스트 구조물의 공용수명을 증가시킴으로써 프리스트레스트 구조물 철거 및 재시공에 따른 사회적 비용 발생 절감이 가능함. • 프리스트레스트 구조물의 지능형 진단 시스템의 선진 기술 개발을 통해 국가 위상 증진 및 해외 시설물 유지관리 수주 가능성 증대가 기대됨. • EM+GPR 다중 계측 기법을 이용한 프리스트레스트 진단 기법에 대한 원천기술 확보를 통해 기술 및 제품의 수출 가능함. • 보다 안전하고 효율적인 프리스트레스트 구조물의 유지관리로 발생 가능한 사고를 미연에 방지하며 이를 통해 국민 안전 증대 및 사회적 불안감 감소가 기대됨.
연구개발성과의 비공개여부 및 사유			해당없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명정보	생물자원		정보	실물
	5	2	2	–	–	1	–	–	–	–	–	–

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호
	–	–	–	–	–	–	–	–	–

국문핵심어 (5개 이내)	긴장 응력 자동 진단	외부 비접촉 EM 센서	지표투과레이더	인공지능	노후 PSC 구조물
영문핵심어 (5개 이내)	Automated Tension Diagnosis	External Non-contact EM Sensor	GPR	Artificial Intelligence	Outdated PSC Structure

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 01

1-1. 연구 개발의 개요 ····· 01

1-2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황 ····· 01

1-3. 연구 개발과제의 연차별 목표 ····· 06

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 12

2-1. 연구 개발의 추진전략·방법 및 추진체계 ····· 12

2-2. 연구 개발의 수행 내용 ····· 12

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 91

(1) 정성적 연구개발성과 ····· 91

(2) 정량적 연구개발성과 ····· 91

(3) 세부 정량적 연구개발성과 ····· 94

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 97

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 97

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 97

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구 개발의 개요

○ 본 연구개발의 목표는 「**노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발**」로써 다음과 같은 세부 연구목표를 가짐

- 외부 비접촉형 EM 센서를 이용한 PS텐던의 자기이력 계측 기술 개발
- 3차원 GPR 스캐닝을 이용한 내부 형상 스캔 기술 개발
- 다중 계측 정보를 이용한 긴장 응력 자동 진단 기술 개발

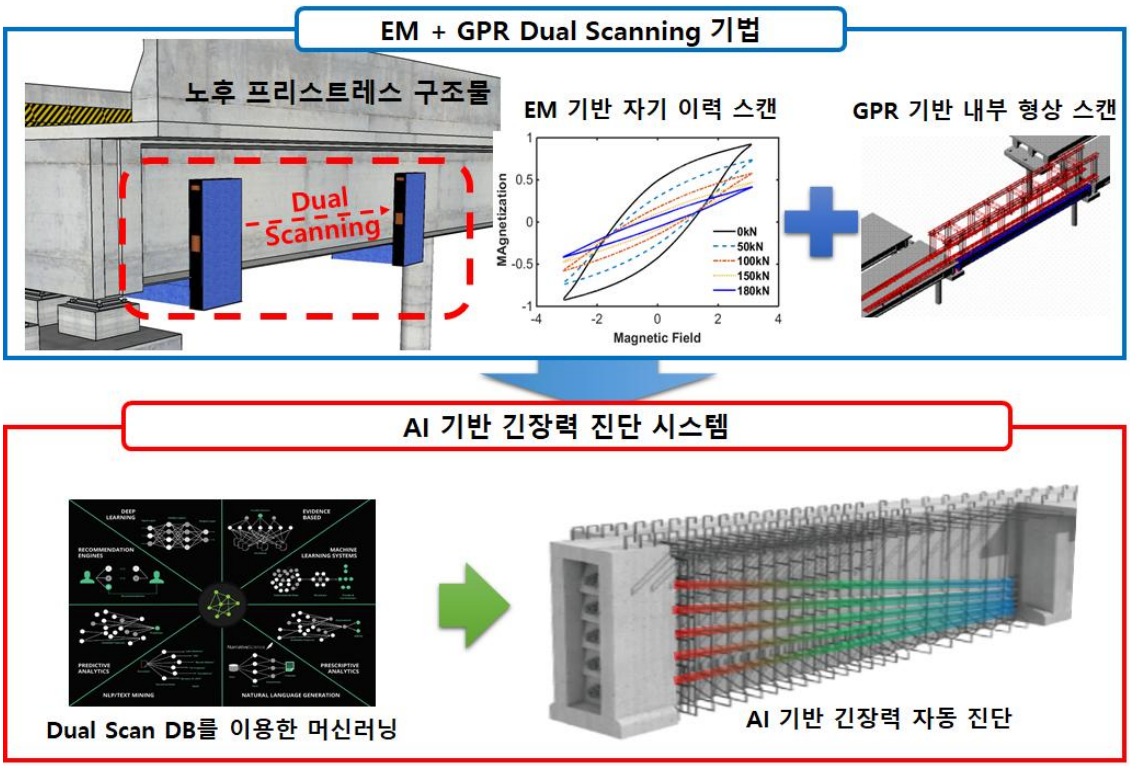


그림 1. 노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 모식도

○ 본 연구 개발을 통하여 노후 프리스트레스트 구조물의 안전진단을 위한 외부 비접촉 EM 계측 시스템, EM+GPR 다중 계측 시스템 및 계측 데이터를 이용한 AI기반 긴장 응력 자동 진단 시스템을 개발함으로써 **프리스트레스트 구조물의 무인 진단 시스템의 원천 기술을 개발**하고자 함.

○ 이를 통해 기존 육안점검에만 의존했던 노후 PSC 구조물의 안전진단을 보다 효율적이고 정확하게 실시함으로써 노후된 PSC 구조물의 증가하는 현 시점에서 필요한 **구조물 안전 진단 기술에 대한 원천 기술 개발 및 검증**을 실시하고자 함.

1-2. 연구 개발 대상의 국내·외 현황

① 연구개발의 배경

○ 프리스트레스트 구조물은 구조적 장점과 경제적 효율성으로 인해 국내외적으로 건설이 활발하게 진행되고 있으며 국내에서는 대표적으로 PSC 교량, 원전구조물 및 대공간 건축물 등에 활용되고 있음.

○ 특히 가장 활발히 시공되고 있는 PSC I거더 교량은 시공 상의 장점 등으로 인해 중소규모 교량에 많이

적용되고 있으며 국내에서는 1960년대 초부터 PSC I거더 교량이 건설되기 시작하였으며 현재 공용 중인 도로교량 중 PSC I거더 교량은 6,779개소이며 60년대 준공 교량이 22개소, 70년대 147개소, 80년대 390개소, 90년대 1,189개소, 00년대 3,130개소, 2010년 이후 1,900 개소에 이르고 있음.

○ 현재 공용중인 PSC I거더 교량의 안전등급 분포는 다음 표와 같이 공용연수에 따라 노후화되어 안전등급이 지속적으로 낮아지고 있는 상황임.

표 1. PSC I거더 교량 안전등급 현황(비율)

(%)

구분	A	B	C	D	E
2010년 이후	71.8	17.0	0.1	0.0	0.0
00년대	45.9	48.2	1.1	0.0	0.0
90년대	16.1	68.1	7.3	0.0	0.0
80년대	5.6	53.3	22.8	0.3	0.0
70년대	1.4	32.0	21.8	2.0	0.0
60년대	0.0	35.7	28.6	0.0	0.0
전체	43.3	44.1	3.8	0.1	0.0

(박경훈 등, PSC I거더 교량의 개축 및 노후 현황 분석)

○ 특히 지난 2016년 발생한 서울 정릉천고가교 텐던 손상과 같이 노후화된 프리스트레스트 구조물에서 긴장응력이 손실되어 문제가 발생하는 상황이며 상기와 같이 국내 도로교의 상당수를 차지하는 프리스트레스트 구조물이 노후화될수록 많은 문제가 발생할 것으로 판단됨.

② 연구과제의 필요성

○ 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력을 계측하기 위하여 초음파, 탄성파 속도를 이용한 긴장 응력 추정 기법, 진동 특성을 이용한 긴장 응력 추정 기법 및 자기장을 이용한 긴장 응력 추정기법 등 긴장 응력 계측을 위한 비파괴 검사법에 대한 연구가 진행되고 있음.

○ 그러나 현재까지의 비파괴 검사 기법으로는 노출된 비부착형 프리스트레스 텐던이나 신규 가설되는 프리스트레스트 구조물에 대해서만 긴장 응력 진단이 가능하며, 기 가설된 노후 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 진단 방법은 전무한 상태임.

○ 인공지능을 활용하여 구조물의 안전진단을 위해 빅데이터 기반의 안전진단 기법, 인공지능 + 증강현실을 이용한 안전 진단 기법 등에 대한 연구가 진행되고 있나 기존 센서 데이터를 활용함으로써 계측이 불가능한 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 진단 기법에 적용하는데는 그 한계가 있음.

○ 따라서 노후화된 프리스트레스트 구조물의 안전 진단을 위하여 공용중 긴장 응력 진단이 가능한 기법에 대한 기초 원천 기술의 연구개발이 필요한 상황임.

○ 이에 본 연구에서는 **기존 노후화된 프리스트레스 구조물의 긴장 응력을 외부에서 계측할 수 있는 센서에 대한 기술 및 이를 활용한 인공지능 기반 긴장 응력 추정 기법**에 대한 기초 원천 기술 개발을 진행하고자 함.

② 국내외 시장 현황

○ 국내 시설물에 대한 안전점검, 정밀안전진단 및 보수보강의 수요가 꾸준히 증가하고 시장규모도 커가고 있으며 유지관리 시장도 양적으로 점점 성장하고 있음.

○ 2010년 기준 유지 및 보수 공사 건수는 2000년에 비하여 4.3배 가량 증가하였고, 공사금액은 약 3.7배 성장

하였으며 점점 증가세가 커질 것으로 예상됨.

○ 아래 표에 의하면 공사 건수가 2008년 48,531건이 2017년 78,027건으로 증가했고, 공사금액은 2008년 2.3조원에서 2010년 5조원으로 급증함.

표 2. 유지관리 공사현황

연도	유지관리 공사건수			유지관리 공사금액		
	원도급 건수	원도급+하도급	전문건설업 비중(%) (원도급 기준)	원도급 (백만)	원도급+하도급 (백만)	전문건설업 비중(%) (원도급 기준)
2008	40,692	48,531	10.0	1,749,303	2,348,349	9.2
2009	50,325	60,372	11.3	2,241,134	3,115,448	11.6
2010	53,041	62,687	12.1	2,291,371	3,105,969	11.2
2011	53,975	65,270	12.0	2,382,195	3,112,908	11.3
2012	53,713	66,143	11.9	2,438,434	3,522,708	11.5
2013	54,872	67,857	11.7	2,431,659	3,478,933	11.4
2014	53,981	67,777	11.8	2,290,785	3,398,441	10.7
2015	59,332	72,992	12.5	2,802,646	4,089,347	11.8
2016	64,213	76,108	12.6	3,133,392	4,459,367	12.2
2017	66,487	78,027	12.4	3,663,960	5,056,395	13.7

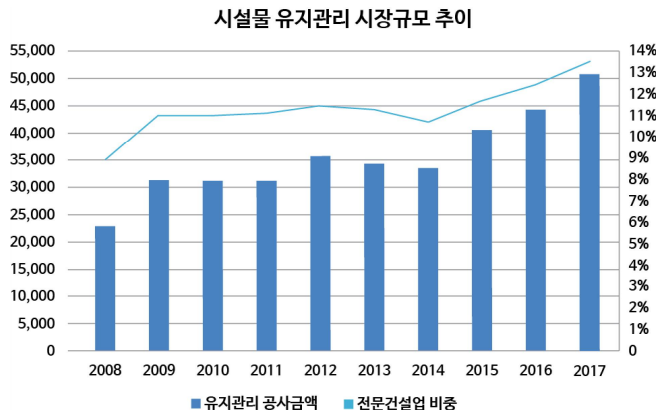


그림 2. 시설물 유지관리 시장규모 추이

○ 국내 건설 생산 규모는 세계 4위이나 구조물의 유지관리 성능평가 기술 등 핵심기술이 부족한 형편이며, 구조물 사용성 및 내구성을 평가하기 위한 기술은 외국 선진회사기술과 장비에 의존함.

○ 구조물 관련 유지관리기술 국산화에 대한 연구와 투자가 필요하며, 유지관리기술은 국내의 우수한 시공기술과 맞물려 세계 시장에서 살아남는 데에 기여할 것으로 판단됨.

○ 한국건설산업연구원이 발간한 '2015년 건설3 와 7대 건설, 부동산, 이슈보고서'에 의하면 안전진단 및 유지관지 시장의 성장이 장기간 지속될 것으로 전망하였음. 실례로, 대한시설물유지관리협회의 시장규모는 2000년 1조원에서 2014년 3조700억으로 약370%증가한 것으로 나타남. (헤럴드경제 2015년 1월 23일 기사)

○ 『시설물의 안전관리에 관한 특별법』 제정 이후 제 1,2종에 대한 안전관리 상태는 양호한 수준이나 종외의

시설물의 붕괴사고 등 안전사고는 지속적으로 증가하고 있음.

○ 시설물의 종류별로는 건축물이 48,260개소(70.5%)로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 국내의 건축물 또한 20~30년 후 고령화 시대에 진입하나 안전성 증대를 위한 선제대응형 방안의 마련은 아직 수행되고 있지 않음.

○ 첨단 센서들이 새롭게 개발되고 기존 센서들의 성능이 향상되고 있지만, 건축물의 복잡한 구조 거동 특성 때문에 하나의 센서 혹은 단일 종류의 센서 조합만으로는 정확한 구조평가가 어려워 다종의 센서를 동시에 활용하여 각 센서의 단점을 보완하고 적용성 및 신뢰성을 향상시키는 다중 센싱 기술이 제시되고 있으며 이에 따라 향후 다중 센싱 기술이 관련 시장을 주도할 것으로 예상됨.

○ 다음과 같이 세계 안전 시장은 점차 성장하고 있으며 향후 2024년까지 약 666조 가량의 대형 시장이 형성될 것으로 판단되며 국내 시장 또한 12조원의 대형 시장으로 성장할 것으로 예상됨.

(단위 : 억원)

년도	(2020년) 현재년도	(2022년) 개발 종료후 1년	(2024년) 개발 종료후 3년
세계 시장 규모	4,538,400	6,001,110	6,667,480
한국 시장 규모	99,743	111,061	122,380

※The Rfeedonia Group(2016) DB 기준 세계 안전시장 규모

○ 신흥국 교통망 확충으로 교량 건설이 지속되는 가운데, 미국, 일본 등 선진국의 경우 교량 교체 및 유지관리 시장이 활성화 될 것으로 전망됨

- 미국에서는 교량 보수를 위해 연간 205억 달러의 비용이 소요될 것으로 예측
- 미국 연방 도로 교통부(US Department of Transportation)는 미국 전역에 구조적 결함 또는 붕괴위험이 발견된 교량은 7,795개이며, 이로 인해 발생되는 연간 보수비용이 약 205억 달러 수준임을 발표
- 미국의 교량의 상태등급 평균은 C+로 평균 이하인 것으로 나타났으며, 9개 중 하나의 교량에서 구조적 결함이 발견
- 교량의 평균 운용기간은 42년으로 나타났으며,'13년 기준 결함이 있거나 기능적으로 활용되지 않는 교량의 경우도 각각 63,510개와 84,344개로 나타남.

③ 관련 연구 및 지식재산권 현황

○ 본 연구 개발 대상과 관련된 국내 연구개발 현황 및 본 연구 개발 대상의 차별성은 다음과 같음.

부처명	사업명	과제명	예산(백만원)	차별성
교육부	개인기초연구	케이블 교량 및 PSC 교량의 장력/긴장 응력 관리를 위한 저전력 EM 센싱 기반 무선 모니터링 시스템 개발	50	본 연구 개발 대상 기술은 매립형 센서를 이용한 신규 PSC 거더 교량에 대한 긴장 응력 계측이 아닌 기존 노후 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 계측이 가능한 차별성이 있음
과학기술정보통신부	한국건설기술연구원연구운영비지원사업	PSC 교량의 스마트 긴장 응력 관리 및 고품질 그라우트 기술 개발	6,008	
국토교통부	국토교통기술촉진연구사업	FBG 광섬유센서 및 EM 센서 융합 생애주기 긴장 응력 관리형 블록아웃 PSC 거더 시스템 개발	900	
교육부	개인기초연구	역전자기수축 현상을 이용한 PSC 자가진단 사물인터넷	37.5	본 연구 개발 대상 기술은 외부에서 접근이 어려운 PS 텐던에 비접촉식으로 자기이력을 계측하여 긴장 응력을 측정하는데 차별성이 있음

중소기업청	산학연공동기술개발사업	프리스트레스트 콘크리트(PSC) 빔 교량의 잔류유효긴장 응력 추정기법 개발	19	본 연구 개발 대상 기술은 PSC 교량의 처짐에 의한 간접적 계측이 아닌 PS 텐던 자기이력의 직접적인 계측을 통해 긴장 응력을 계측하는데 차별성이 있음
중소기업청	산학연공동기술개발사업	공용중인 콘크리트 구조물의 잔존 프리스트레스 측정장비 개발	35	본 연구 개발 대상 기술은 프리스트레스트 구조물을 절단하지 않고 외부에서 비접촉식으로 긴장 응력을 추정하는데 차별성이 있음
중소벤처기업부	중소기업네트워크형사업	인공지능과 증강현실을 이용한 ICT 기반 시설안전 진단 관리 시스템 개발	30	본 연구 개발 대상 기술은 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 진단을 위한 기초 센서 시스템 개발 및 그를 이용한 인공지능 기반 긴장 응력 진단 시스템을 개발하는데 차별성이 있음
교육부	이공학학술연구기반구축	Total Flux 및 MFL 융합을 통한 AI 기반의 대형 케이블 건전도 평가용 익스퍼트 진단 시스템 개발	227	
과학기술정보통신부	원자력연구기반확충사업	인공지능기술을 활용한 플랜트 상태 진단, 예측 및 비정상상태 안전조치 최적화 기술 개발	388.5	

○ 본 연구 개발 대상과 관련된 국내 지식재산권 현황 및 본 연구 개발 대상의 차별성은 다음과 같음

등록번호	등록일자	특허명	차별성
10-1654500	2016.08.30	PSC 거더 정착구-쉬스관 연결형 EM 센서	본 연구 개발 대상 기술은 매립형 센서를 이용한 신규 PSC 거더 교량에 대한 긴장 응력 계측이 아닌 기존 노후 PSC 교량의 긴장 응력 계측이 가능한 차별성이 있음
10-1912855	2018.10.23	인공신경망 및 빅데이터 기반 PSC 거더의 PS 텐던 긴장 응력 손실 진단 장치 및 방법, 그리고 컴퓨터에서 판독 가능한 기록 매체	
10-1552793	2015.09.07	PS 강재의 상태 변화 모니터링이 가능한 PSC 정착구 및 이를 구비한 PSC거더	
10-1486436	2015.01.20	회전 와셔를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 긴장 응력 측정방법	본 연구 개발 대상 기술은 PS 텐던과 비접촉식으로 자기이력을 계측하여 긴장 응력을 추정하는데 차별성이 있음
10-1590830	2016.01.27	역자기변형 현상과 유도자기장을 이용한 프리스트레스트 강재의 긴장응력 및 부식정도의 측정방법 및 이를 위한 전자석 장치	본 연구 개발 대상 기술은 PSC 거더 내부 철근에 의한 자속 영향을 제거하고 PS 텐던에 의한 자기 변화를 선택적으로 계측하여 긴장 응력을 추정하는데 차별성이 있음

○ 본 연구개발 목표는 기존 노후화된 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력을 비파괴 적으로 진단하는 기법으로써 상기 기술된 연구과제 및 특허와 차별성이 있음.

○ 또한 외부 계측 센서를 통해 단순히 계측하는 수준이 아닌 트윈 코일 및 3차원 계측/스캔 기법에 대한 원천 기술 개발을 진행하여 기존 연구와 차별화된 신규 센싱 시스템 및 긴장 응력 진단 기법을 개발하고자 함.

1-3. 연구개발과제의 연차별 목표

가. 연구 개발의 최종 목표 및 최종성과물

구분	내용 및 설정근거
최종 목표	노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발
세부 목표	▪ 외부 비접촉형 EM 센서를 이용한 PS텐던의 자기이력 스캔 기술 개발 ▪ 3차원 GPR스캐닝을 이용한 내부 형상 스캔 기술 개발 ▪ 다중 계측 데이터를 이용한 긴장 응력 자동 진단 기술 개발

나. 최종성과물의 기술성숙도 설정근거

구분		연구착수	연구종료	단계별 설명
기초연구 단계	TRL 1	■	□	
	TRL 2	□	□	
실험 단계	TRL 3	□	□	
	TRL 4	□	□	
시작품 단계	TRL 5	□	■	
	TRL 6	□	□	
실용화 단계	TRL 7	□	□	
	TRL 8	□	□	
사업화 단계	TRL 9	□	□	

최종성과물	기술성숙도(TRL)		설정근거
	연구시작시	연구종료시	
노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술	TRL 1	TRL 5	-(연구시작시) 현재 자기 이력 계측을 통한 긴장 응력 추정에 대한 연구는 진행되어 있으나 외부 비접촉 스캐닝을 통한 긴장 응력 추정은 이론적 가능성 검토만 되어 있는 단계로 TRL 1단계에 해당함 -(연구종료시) 연구기간 21개월 및 연구비 3.7억원(정부출연금 기준)에 따라 1차년도에 기초연구 및 실험적으로 제안 기술을 증명하고 2차년도에 실험실 수준의 성능 평가 및 유사환경 시험을 실시하여 제안된 기술을 TRL 5단계로 기술성숙도를 향상시키고자 함

다. 연차별 연구 개발 목표 및 내용

1) 1차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(차세대융합기술연구원)
  - 외부 비접촉 EM 센서를 내부 PS 텐던 자화 및 자기이력 계측 기법 개발
- 공동연구기관(롯데건설)
  - GPR을 이용한 PSC 구조물 내부 형상 탐사 기법 개발
- 참여기업(스마트인사이드)
  - 시뮬레이션을 활용한 외부 비접촉 EM센서 설계 및 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(차세대융합기술연구원)
  - 자기 중첩 효과를 이용한 특정 위치 자화 기법 개발
    - 자기 중첩 관련 문헌 조사
    - 자기 중첩 효과를 활용하여 특정 위치 자화가 가능한 트윈 코일 기반의 외부 비접촉형 자화 시스템 개발
    - 노출형 시험체를 이용한 외부 비접촉형 자화 기법 검증

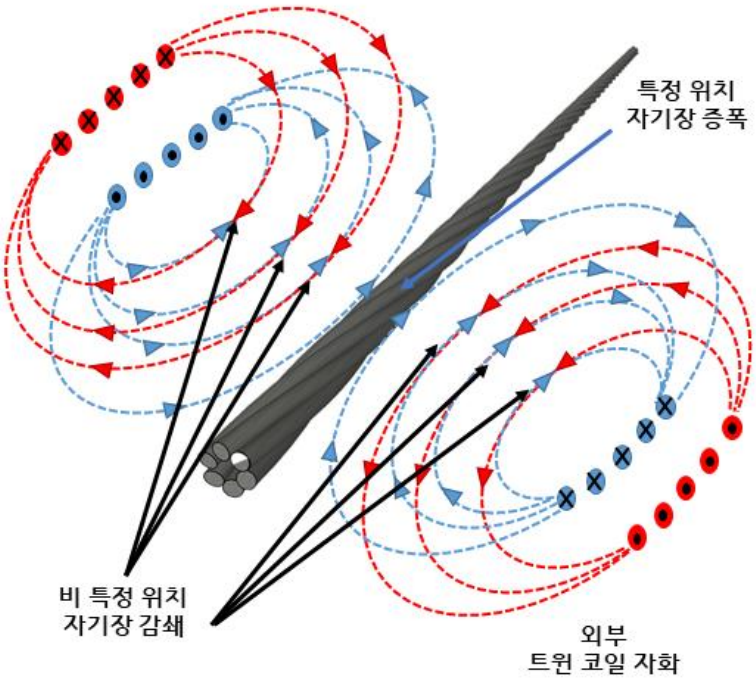


그림 3. 트윈 코일을 이용한 특정 위치 자화

  - 3방향 계측을 통한 PS 텐던 자기이력 계측 기법 개발
    - 3방향 계측을 통한 특정 위치 자속 계측 기법 개발
    - 프리스트레스트 구조물 내부 쉬스를 따라 설치되어 있는 PS 텐던의 자속을 보다 정밀하게 계측하기 위하여 텐던이 위치하는 좌표에서의 자속을 증폭하여 계측하는 선택적 증폭 계측 기법 개발
    - 노출 시편을 이용한 PS 텐던 자기이력 계측 기법 검증

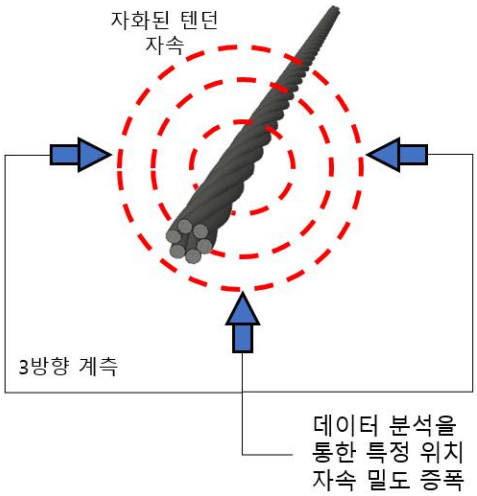


그림 4. 3방향 계측을 통한 PS 텐던 자기 이력 계측



그림 5. 실험실 수준 테스트 시편

- 공동연구기관(롯데건설)
  - 지표투과레이더(GPR)을 이용한 내부 PS 텐던/철근 위치 및 형상 확인 기법 개발
    - GPR을 이용한 콘크리트 구조물 내부 탐상 기법 관련 문헌 조사
    - 주파수 및 스캔 위치에 따른 내부형상 탐사 정확도 검증
    - PS 텐던 위치 파악을 위한 주파수 및 스캔방법 최적화

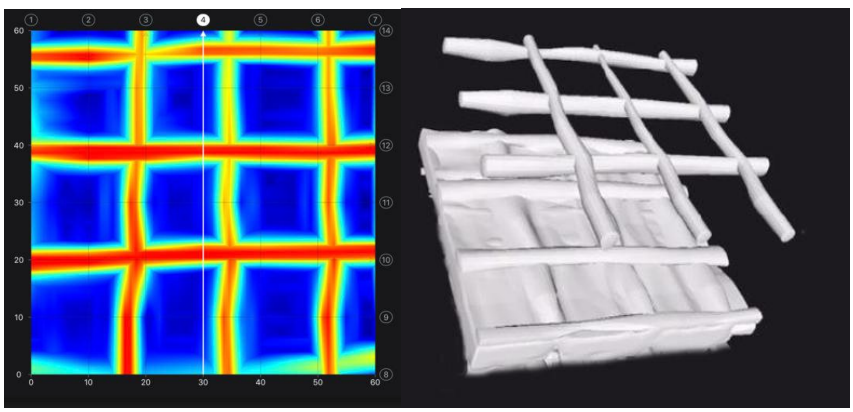


그림 6. GPR을 이용한 내부 탐상

  - 레이저스캐너를 이용한 PSC 구조물 외부 형상 계측 기법 개발
    - 레이저스캐너를 이용한 PSC 구조물 외부 형상 계측 기법 개발
    - GPR 데이터와 레이저스캐너 데이터 통합을 통한 PSC 구조물 내외부 형상 계측 기법 개발

- 참여연구기관(스마트인사이드)
  - 시뮬레이션을 통한 외부 비접촉 EM센서 설계 및 개발
    - 가상시뮬레이션 프로그램을 활용하여 외부 비접촉 EM센싱 기법 검증
    - 내부 PS 텐던의 자화에 의한 자속 발생도 시뮬레이션
    - 검증을 통한 프리스트레스 구조물 외부 비접촉 EM센서 설계 및 개발

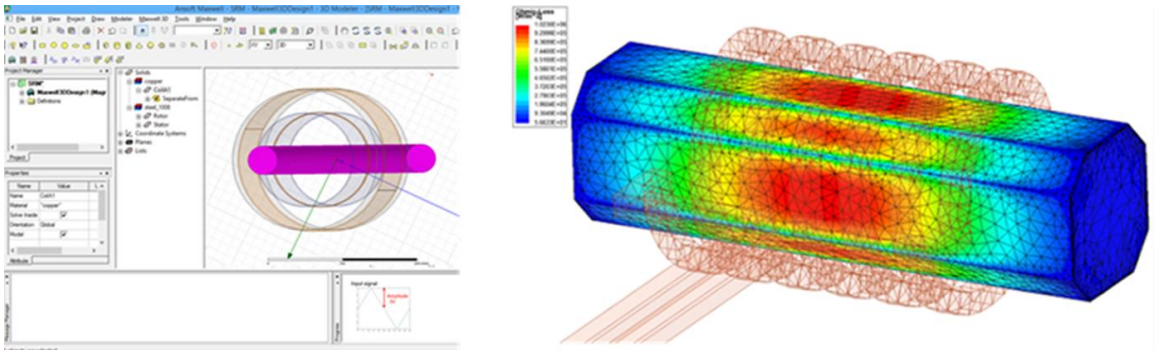


그림 7. 시뮬레이션을 통한 외부 자화 EM 센서 개발

2) 2차 연도

① 개발 목표

- 주관연구기관(차세대융합기술연구원)
  - AI 기반 프리스트레스트 구조물 긴장 응력 진단 기법 개발
- 공동연구기관(롯데건설)
  - 3-Directional Scan을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발
- 참여기업(스마트인사이드)
  - EM + GPR 다중 계측 센서 개발

② 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(차세대융합기술연구원)
  - 철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 알고리즘 개발
    - 외부 자기장에 의하여 자화되는 철근 및 쉬스에 의한 자속 발생량을 소거하여 PS 텐던에 의한 자속 변화만을 계측하는 알고리즘 개발

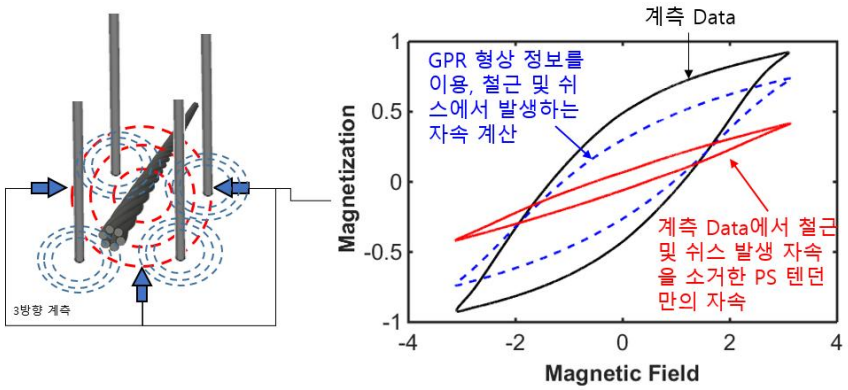


그림 8. 철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거

  - AI 기반 긴장 응력 자동 진단 알고리즘 개발
    - 프리스트레스트 구조물에 대한 자기이력 데이터 및 GPR 스캔 데이터의 각 위치별 통합 데이터베이스 구축 알고리즘 개발
    - 해석모델을 활용하여 다중 계측 DB 구축 및 이를 이용한 머신러닝 학습 데이터를 통해 긴장 응력을 자동으로 진단할 수 있는 인공지능 기반 긴장 응력 진단 알고리즘 개발
    - 프리스트레스트 부분 모델을 이용한 긴장 응력 진단 알고리즘 검증

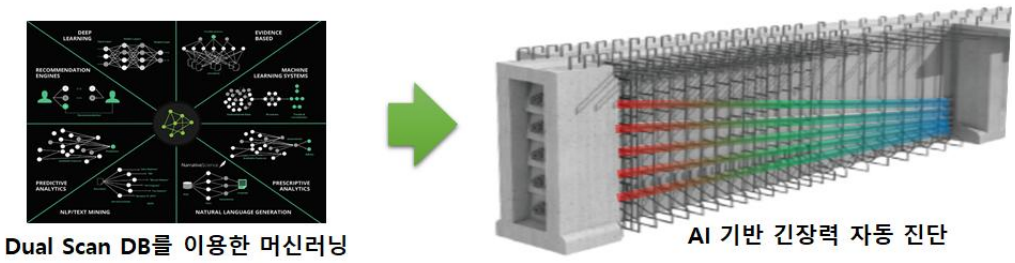


그림 9. AI 기반 긴장 응력 자동 진단 시스템

- 공동연구기관(롯데건설)
  - 3-Directional Scan을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발
    - PS 구조물의 좌우측면 및 하부 스캔을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발
    - 3D GPR 탐사 데이터를 이용한 내부 형상 이미지화
    - 내부 형상 탐사를 통한 내부 철근 배근 상태 및 쉬스 위치 확인 기법 개발
    - 설계도면 확보 및 설계도면과 GPR 데이터의 비교검증을 통한 신뢰도 확보

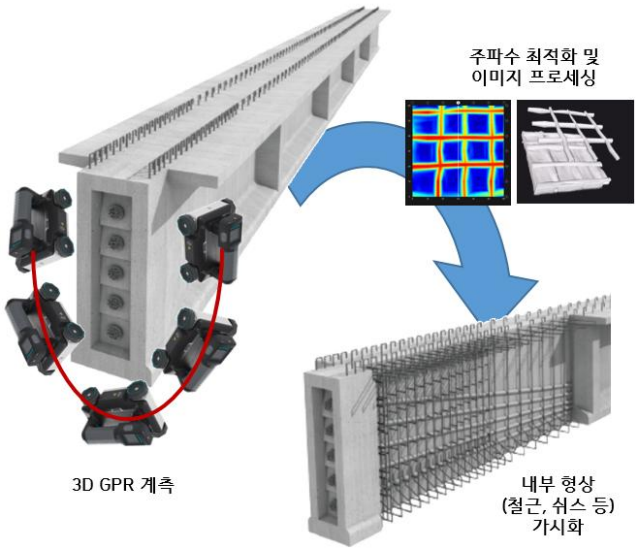


그림 10. 3D GPR 스캐닝을 통한 내부 형상 이미지화

  - 현장 모사 실험체를 이용한 개발 기술 성능 검증
    - 소형 PSC 시편 설계 및 제작
    - 소형 PSC 시편 설계 시 변형률 게이지, 광섬유 센서 등을 설치하여 비교검증을 통한 성능검증 시행
    - 소형 PSC 거더를 이용한 EM+GPR 다중 계측 기반 긴장 응력 진단 기법 검증

- 참여기업(스마트인사이드)
  - EM + GPR 다중 계측 스마트 센서 개발
    - EM + GPR 다중 계측이 가능한 스마트 센서 헤드 설계
    - 외부 자화 EM 및 3D-GPR 동시 계측이 가능한 센서 헤드 시제품 제작
    - 다중 계측 센서 데이터 처리 알고리즘 개발

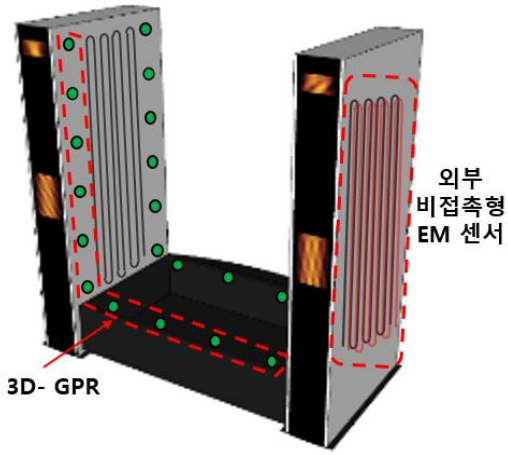


그림 11. EM + GPR 다중 계측 센서 헤드 모식도

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	외부 비접촉 EM 센서를 이용한 내부 PS 텐던 자화 기법 개발	외부 자기장 집속 기법 개발 및 시작품 제작을 위한 센서 설계	관련 연구 없음 콘크리트 내부 철근 탐사 가능, 1.6〃 bar 기준 40mm 깊이까지 자화가능 (미국/elcometer)	PS 텐던 1T 이상으로 자화 가능	PS 텐던의 자속 변화의 계측을 용이하게 할 수 있는 수치로 설정	30
	콘크리트 내부 철근 및 쉬스 위치 파악 기술 개발	콘크리트 내부 GPR 탐상 데이터를 이용한 철근 및 쉬스 위치 파악 기술 개발	콘크리트 내부 PVC관 탐사 기준 10.91% 오차로 계측 가능 철근 깊이 10cm, 직경 1.6cm 기준 6.7% 오차로 계측 가능 (대만/Chung Hua University)	콘크리트 내부 철근 오차율 10% 이내로 탐사 가능	국내 콘크리트 내부 탐사 기술 수준과 비슷한 수준으로 목표치를 설정	20
2년차 (2021)	AI 기반 프리스트레스트 구조물 긴장 응력 진단 기법 개발	외부 자화 데이터를 이용한 PS 텐던 긴장 응력 계측 알고리즘 도출	기 가설된 포스트텐션 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무 기 가설된 포스트텐션 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무	긴장 응력 오차율 10% 이내로 계측 가능	외부 자화를 이용한 긴장 응력 계측의 기초연구로써 오차율을 10%로 설정함	30
	프리스트레스트 구조물 내부 형상 탐사 기법 개발	실제 프리스트레스트 구조물 내부 GPR 탐상 데이터를 이용한 철근 및 쉬스 위치 파악 기술 개발	콘크리트 내부 PVC관 탐사 기준 10.91% 오차로 계측 가능 철근 깊이 10cm, 직경 1.6cm 기준 6.7% 이내로 계측 가능 (대만/Chung Hua University)	콘크리트 내부 철근 및 쉬스관 형상 정보 오차율 5% 이내로 취득 가능	프리스트레스트 구조물에 기존 연구 되었던 연구 결과보다 높은 정확도를 얻기 위해 설정	20

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1. 연구 개발의 추진전략・방법 및 추진체계

가. 연구개발 추진전략・방법

○ 본 연구의 최종 목표를 달성하기 위하여 당 연구팀에서 수행한 선행 연구를 바탕으로 **원거리 비접촉 스캔 기법 기반 PS 텐던 자기 이력 계측 기법의 원천기술을 개발**하고 GPR 스캔을 통한 프리스트레스트 구조물 내부 형상 탐사 기법을 고도화하여 **노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단이 가능한 기술**에 대한 연구를 진행하고자 함.

○ EM + GPR 다중 계측 데이터를 이용하여 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력을 자동으로 진단할 수 있는 AI 기반 긴장 응력 진단 시스템으로 완성하여 프리스트레스트 구조물의 무인 진단 시스템의 원천 기술을 개발하고자 함.

○ 이에 본 연구팀은 마그네틱 센싱을 이용한 PSC 구조물 긴장 응력 계측 전문가인 차세대융합기술연구원 김준경 연구실장 연구팀을 주관으로 PSC 구조물 설계/시공 및 형상탐사 전문가인 롯데건설 안범준 책임연구원 연구팀 및 구조물 안전진단 센서 개발 전문가인 ㈜스마트인사이드 김태헌 연구소장 연구팀을 공동연구기관으로 편성하여 **체계적인 연구를 추진**하고자 함.

○ 특히 본 연구는 외부 자화 EM 센서라는 원천기술을 차세대융합기술연구원에서 수행하고 설계/시공 전문기업인 롯데건설 및 구조물 유지관리 서비스 전문 기업인 스마트인사이드를 공동연구기관으로 편성함으로써 **원천기술개발** 뿐만 아니라 본 기술을 상용화하기 위한 **시스템 하드웨어 개발 및 개발 기술의 시험 및 검증**을 실시함으로써 과제 종료 후 실용화를 위한 기반을 마련할 수 있음.

○ 제한적인 연구 기간 내 효율적인 연구수행을 위하여 본 연구팀은 본 연구팀에서 개발하는 원천 기술인 외부 비접촉 EM 스캔 기법을 위한 센서 및 알고리즘을 원천 개발하고 GPR 및 AI 알고리즘은 기 상용화된 제품/소프트웨어 및 전문가를 적극 활용하여 본 연구에서 제안하는 기술을 완성하고자함.

○ 이를 통해 PSC 구조물 설계/시공 기술 – EM+GPR 다중 계측 기술 – 인공지능의 융복합 연구를 주도적으로 실시하여 원천적인 연구성과물을 도출해내고자 함.

○ 추가적으로 본 연구개발을 통하여 2년간 2편 이상의 SCI급 해외 논문, 2건 이상의 특허 출원 및 1건 이상의 특허 등록을 수행할 것으로 예상되며, 공동연구기관과의 협업을 통하여 연구 종료 후 연구 과제 결과물의 실용화를 위한 후속연구를 실시하고자 함.

나. 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
과제명	노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발	주관연구책임자 (김준경)외 총 3명

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	1	7
중소기업	1	2
대 학 교	-	-

주관연구기관명
EM + GPR 다중 계측 기반 긴장 응력 자동 진단 기술 개발
김준경 외 4 명
담당기술개발내용
▪ 트윈 코일을 이용한 특정 위치 자화 기법 개발 ▪ 3방향 계측을 통한 특정 위치 자기 신호 증폭 기술 개발 ▪ 다중 계측 데이터를 이용한 인공지능 기반 긴장 응력 자동 진단 기술 개발

롯데건설
PSC 구조물 내부 탐상을 위한 3D GPR 계측 기술 개발
안범준 외 6 명
담당기술개발내용
▪ GPR을 이용한 콘크리트 내부 철근 및 쉬스 탐상 기법 개발 ▪ GPR 스캔을 이용한 프리스트레스트 구조물 내부 형상 탐사 기법 개발

스마트 인사이드
노후 PSC 구조물 긴장 응력 진단을 위한 외부 자화 EM 센서 개발
김태헌 외 5 명
담당기술개발내용
▪ 시뮬레이션을 통한 비접촉 EM센싱 기법 검증 및 하드웨어 설계 ▪ EM + GPR 다중 계측 센서 개발 및 시제품 제작

다. 추진일정

1차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	자기 중첩 효과를 이용한 특정 위치 자화 기법 개발													30,000	김준경 (차세대융합기술연구원)
2	3방향 계측을 통한 PS 텐던 자기이력 계측 기법 개발													30,000	김준경 (차세대융합기술연구원)
3	지표투과레이더(GPR)을 이용한 내부 PS 텐던 위치 확인 기법 개발													100,000	안범준 (롯데건설)
4	콘크리트 시편을 이용한 GPR 스캔 기법 검증													80,000	안범준 (롯데건설)
5	시뮬레이션을 활용한 외부 비접촉 EM센서 설계													80,000	김태헌 (스마트인사이드)
2차년도															
1	철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 알고리즘 개발													30,000	김준경 (차세대융합기술연구원)
2	AI 기반 긴장 응력 자동 진단 알고리즘 개발													50,000	김준경 (차세대융합기술연구원)
3	3-Directional Scan을 통한 내부 형상 탐사 기법 개발													144,000	안범준 (롯데건설)
4	부분모델 시편을 이용한 형상 탐사 기법 검증													100,000	안범준 (롯데건설)
5	EM + GPR 다중 계측 센서 설계 및 시제품 제작													96,000	김태헌 (스마트인사이드)

1) GPR 스캐닝을 이용한 내부 형상 스캔 기술 개발

① 1차 연도

- GPR 탐사기술 개요

· GPR(Ground Penetrating Radar) 기술은 지하영상을 얻기 위해 Radar Pulse를 이용한 물리탐사 방법의 일종으로, 마이크로웨이브(UHF/VHF주파수) 전자기파를 사용하는 비파괴 검사 기술

• GPR 탐사(측정) 원리

· GPR 기술은 1~2500MHz 범위의 전자기파를 지하로 방사시켜 경계면에서 반사되어 지상으로 되돌아온 전자기파를 수신기로 수집하여 자료처리 및 해석을 통해 지하 영상단면(reflection image)을 획득하는 기술을 말함.

· 전자기파의 경우 그림 12와 같이 매질의 특성이 달라지는 경계면에서 일부가 반사되고 나머지는 다음 층으로 투과하여 진행하는 경향을 보임.

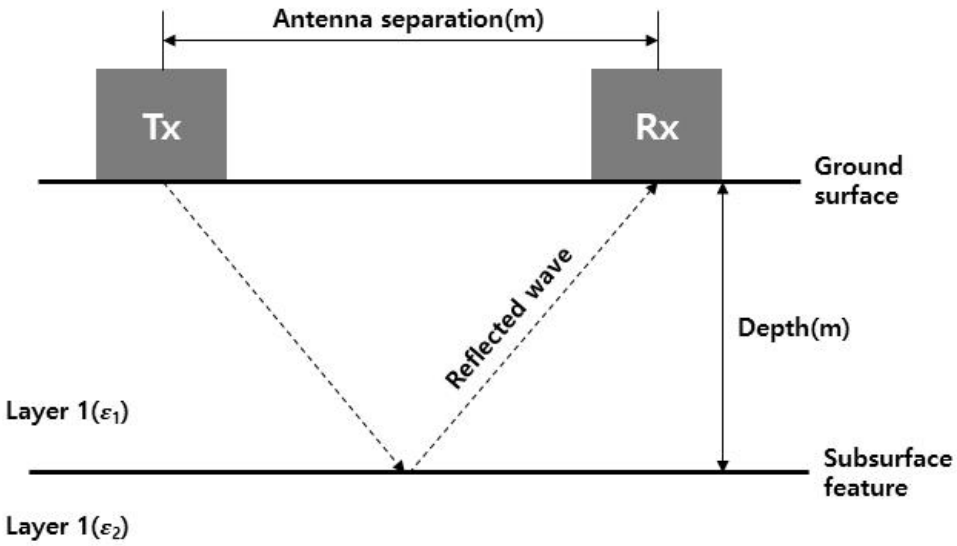


그림 12. 전자기파 펄스의 송신 및 수신

· GPR 탐사는 송신기에서 방출된 전자기 에너지가 이상체 경계면에서 반사, 굴절 혹은 회절을 통해 지표로 되돌아오는 신호의 변화를 기록하게 됨.

• 전자기파의 기본 특성

· 전자기파의 반사 특성은 지반의 유전상수(ϵ) 차이에 영향을 받으므로, 전자기파의 전파속도와 파장은 파가 통과하는 유전상수에 따라 달라지는 특성을 가짐.

· 또한, 전자기파 감쇄는 전기전도도에 비례하고, 매질의 수분함량 및 전도성 물질 함유 등이 주요 영향요소로 분류됨.

- **영향요소(유전상수)**

  · 파의 전달속도는 유전상수의 제곱근에 반비례하며, 유전상수는 수분함량과 공극률에 영향을 받음.

  · 일반적으로 물질의 유전율은 공기의 유전율과 비율로 표시되는 유전상수 (dielectric constant)로 표현됨.

  · 유전상수가 높으면 전자기파의 전파가 어렵고 두 물질 경계부에서의 유전상수의 차가 반사를 일으키게 됨.

- **영향요소(전기전도도)**

  · 파의 감쇄는 전기전도도에 비례하며, 전기전도도는 매질 내 수분함량과 점토함량 및 전도성 물질의 함량과 관련되고, 전기전도도가 큰 매질의 경우 유도 전자기파 감쇄로 투과심도가 감소하는 특성을 가짐.

  · 표 3은 매질에 따른 유전상수와 전자기파의 속도를 나타냄.

표 3. 매질에 따른 유전상수(상대유전율)과 속도관계

매질	상대유전율(ε_r)	속도(m/ns)
Air	1	0.3
Fresh Water	81	0.033
Dry Sand	3~5	0.15
Clay	5~40	0.06
Concrete	6~12	0.08~0.12
Rebar	200~	~0.02

- **유전체 내 전자기파의 전파**

  · 모든 물질은 전자기파의 전계와 자계에 영향을 주는 고유한 특성을 가지며, 이를 전자기적 특성이라고 함.

  · 이는 일반적으로 전도율(conductivity), 복소 유전율(complex permittivity), 복소 투자율(complex permeability)로 나타냄.

  · 콘크리트나 모르타르와 같이 전기전도성이 없고 자성을 띄지 않는 물질을 유전체(dielectric material)라고 함.

  · 유전체의 경우 전도율이 거의 0에 가까우며, 강자성체(ferromagnetic)가 아니므로 복소 투자율은 진공의 투자율과 거의 같은 특성을 가짐.

  · 따라서 유전체의 전자기적 특성은 복소 유전율로 규정되며 이는 일반적으로 식 1과 같이 나타냄.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \ [F/m] \tag{1}$$

· 식 1에서 ε는 복소 유전율을 나타내며, ε'는 유전상수(dielectric constant)를, ε''는 loss factor를 의미함.

· 비율 $\varepsilon''/\varepsilon'$는 매질에서의 전력 손실의 척도를 의미하며 식 2에서 손실탄젠트 (loss tangent)를 의미함.

$$\tan\delta_c = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \cong \frac{\sigma}{\omega\varepsilon'} \tag{2}$$

• **콘크리트 내에서의 전파속도**

· 공기 중에서의 전자기파는 빛의 속도 c로 전파되고, 이 속도는 매질에 따라 달라지며 콘크리트 내에서의 전자기파의 속도는 식 3과 같음.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \tag{3}$$

· 전자기파를 이용하는 비파괴 검사는 전파의 속도가 측정시간을 결정하며 이를 통해 물체에 대한 정보를 판별함.

· 따라서 매질의 전자기적 특성 중 특히 유전상수 ε_r'이 미치는 영향이 중요함.

• **콘크리트 내에서의 파장**

· 평면파의 파장(λ, wavelength)은 식 4처럼 매질의 유전상수 뿐 아니라 주파수 (f, frequency)에 관련되어 있음을 알 수 있음.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f} \times \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r'}} \tag{4}$$

· 콘크리트의 경우 ε_r' 값이 1보다 큰 수이므로 파장은 공기보다 작아지며 이는 파장이 목표물의 분해능(해상도, resolution)과 연관성이 있으므로 주파수를 고려해야 함을 의미함.

- GPR 계측 주파수 비교분석

• **콘크리트 두께 측정**

· GPR 계측을 위한 주파수 비교분석을 위한 문헌 조사를 실시하였으며, 문헌 조사 결과 탐색 대상에 따른 주파수 대역별 다양한 연구가 진행되었음.

· 콘크리트 두께 측정의 경우 900MHz, 1000MHz, 1500MHz의 중심 주파수를 갖는 3종류의 안테나를 이용하여 탐사 성능을 비교하였음.

· 표 4, 5, 6은 콘크리트 두께 측정에 관한 연구 결과를 나타낸 것이며, 그 값은 다음과 같음.

표 4. 900MHz 안테나 이용 콘크리트 두께 측정 결과

Thickness(mm)	900MHz	
	Calculated value(mm)	Error(%)
100	97.34	2.66
150	145.75	2.83
200	195.70	2.15
250	244.64	2.14
300	303.34	1.11

표 5. 1000MHz 안테나 이용 콘크리트 두께 측정 결과

Thickness(mm)	1000MHz	
	Calculated value(mm)	Error(%)
100	101.97	1.97
150	152.44	1.63
200	203.43	1.72
250	254.93	1.94

표 6. 1500MHz 안테나 이용 콘크리트 두께 측정 결과

Thickness(mm)	1500MHz	
	Calculated value(mm)	Error(%)
100	101.46	1.46
150	151.93	1.27

· 실험 결과, 안테나의 주파수가 올라갈수록 탐사 가능 깊이가 줄어드는 것을 확인할 수 있었으나, 반대로 탐지의 정확도는 올라가는 것을 확인할 수 있었음.

· 즉 높은 주파수는 낮은 주파수에 비하여 심부까지 투과되지 못하나 반면에 파장이 짧아 해상도가 증가하는 것을 알 수 있음.

· 표 7은 주파수에 따른 대략적 침투 심도 및 해상도의 관계를 나타내며 매질이 젖은 상태와 마른 상태일 때 비교하여 나타내었음.

표 7. 주파수에 따른 대략적 침투 심도 및 해상도 관계

안테나 주파수 (MHz)	대략 침투심도 (Dense Wet Clay)	대략 침투심도 (Clean Dry Sand)	해상도 (최소가능)
100	6[m]	18[m]	Tunnel @ 18m depth 60cm pipe @ 6m depth
250	4[m]	12[m]	90cm pipe @ 12m
500	1.8[m]	4.4[m]	15cm pipe @ 4m
1000	90[cm]	1.8[m]	0.5cm hose @ 90cm Wire mesh, shallow
2000	15[cm]	60[cm]	모노필라멘트

· 콘크리트의 경우 dry sand의 침투심도와 비슷하며, 따라서 2000MHz의 주파수를 이용할 경우 대략 60cm의 침투 심도를 갖는 것을 알 수 있음

- **매설물 탐지(철근 콘크리트 라이닝)**

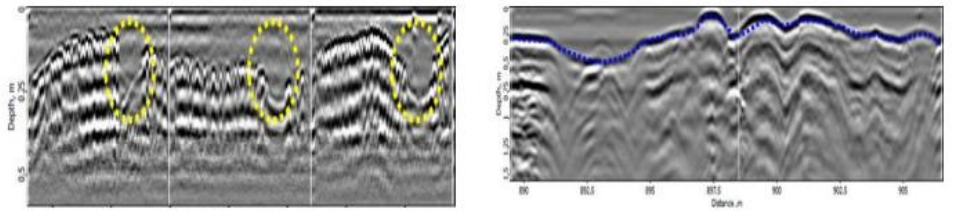
· 표 8과 같이 NATM 공법으로 시공된 도시철도 터널 4곳의 터널 천단부에 대해 400MHz, 900MHz, 1600MHz의 주파수 안테나를 사용하여 탐사를 수행함.

표 8. 매질에 따른 유전상수(상대유전율)과 속도관계

District	Tunnel type	Structure type	Length(m)
A Tunnel	Double track	Reinforced concrete	480
B Tunnel	Double track	Plain/reinforced concrete	520
C Tunnel	Single track	Reinforced concrete	510
D Tunnel	Single track	Plain/reinforced concrete	200

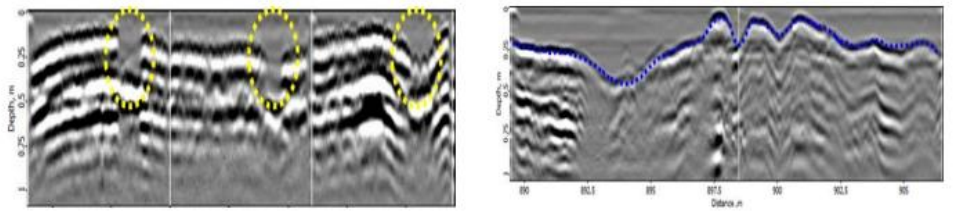
· 터널 A와 C의 경우 그림 13에서 보이는 신호를 파악해 보았을 때 배면의 공동, 들뜸 등의 이상 신호와 라이닝 두께, 강지보공 등의 라이닝 내부의 상태 파악이 어려운 것으로 파악됨.

· 하지만, 고주파수 안테나의 경우 철근 피복두께, 배근 간격에 대한 상태는 확인이 가능한 것으로 증명됨.



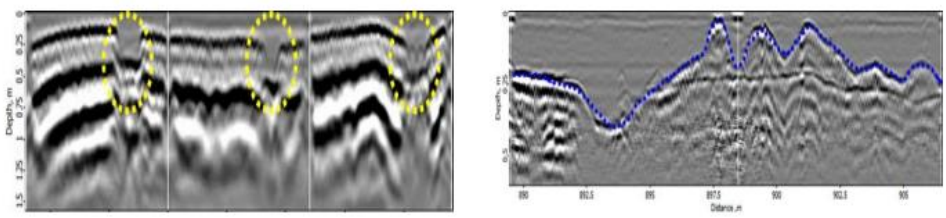
A Tunnel C Tunnel

(a) Result of 400MHz



A Tunnel C Tunnel

(b) Result of 900MHz



A Tunnel C Tunnel

(c) Result of 1600MHz

그림 13. 철근 콘크리트 라이닝의 GPR 감지 신호

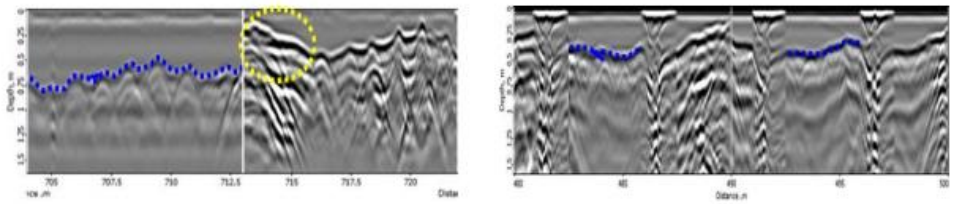
- **매설물 탐지(무근 콘크리트 라이닝)**

  · 그림 14와 같이 1600MHz 안테나의 가탐심도의 한계로 인해 40㎝ 이상에 대한 공동, 라이닝 두께 등의 확인이 어려움.

  · 400MHz, 900MHz 안테나의 경우 가탐심도의 한계가 40㎝ 이상이었고, 원지반까지 탐사가 가능함.

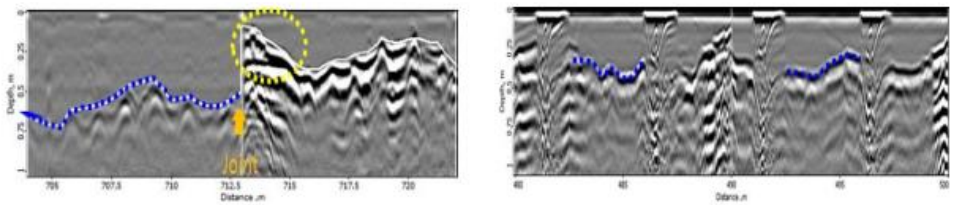
  · 분해능의 경우, 1600MHz 안테나는 가탐심도까지 공동, 라이닝 두께의 신호가 명확히 확인이 가능한 것으로 나타남.

  · 반면, 900MHz 안테나와 400MHz 안테나의 경우 분해능이 떨어지는 것을 확인하였으며, 특히 400MHz 안테나의 경우 공동, 라이닝 두께의 신호가 명확히 구분되지 않는 것으로 나타남.



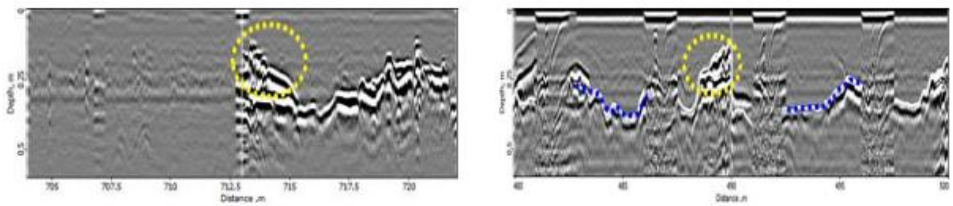
B Tunnel D Tunnel

(b) Result of 400MHz



B Tunnel D Tunnel

(b) Result of 900MHz



B Tunnel D Tunnel

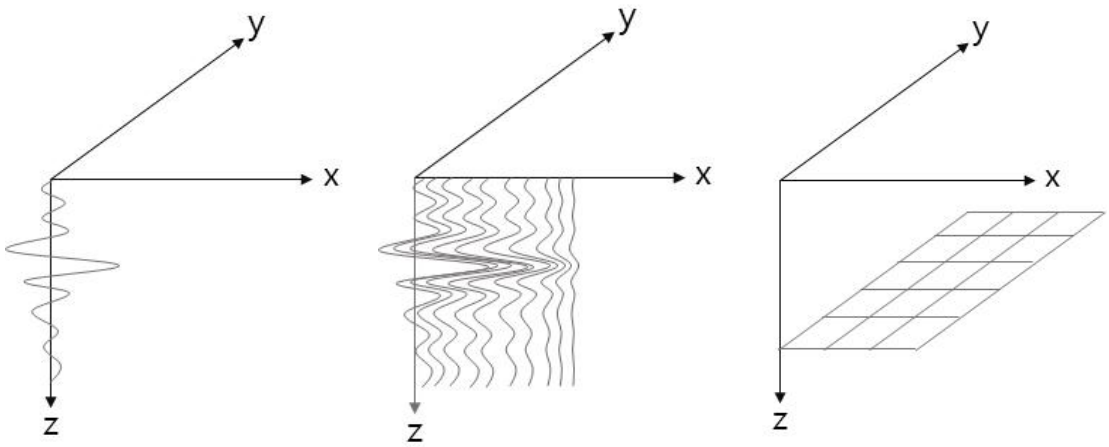
(c) Result of 1600MHz

그림 14. 무근 콘크리트 라이닝의 GPR 감지 신호

- GPR 스캔 방법 비교분석

• 스캔 방식에 따른 데이터 취득

· GPR 스캔은 그림 15와 같이 시각화 방법에 따라 A-scan, B-scan, C-scan으로 분류됨.



(a) A-scan (b) B-scan (c) C-scan

그림 15. GPR 데이터의 시각화 방법

· 여기서 A-scan은 단일 수신파를, B-scan은 특정 방향을 따라 연속된 수신파의 세트를 시각화한 방법을 말함.

· 또한, B-scan 데이터를 모아서 z 축을 따라 x, y축의 수평 영역에 대한 시각화를 하는 방법을 C-scan이라고 정의함.

· GPR 데이터 취득 시 매설물 탐상을 위해 일반적으로 이용하는 B-scan 이미지 데이터의 경우 매설물은 포물선 형태로 나타나게 됨.

· B-scan 데이터의 수평축은 GPR 장비(안테나)의 이동거리를 나타내며 수직축은 반사파의 도착시간을 거리로 환산한 심도를 나타냄.

• 안테나 배열에 따른 신호 차이

· GPR 장비의 경우 그림 16과 같이 송수신 안테나가 탐사 측선에 모두 수직하는 경우 (PR-BD, Perpendicular-Broadside)와 송수신 안테나가 탐사 측선에 모두 평행하는 경우(PL-BD, Parallel-Broadside)로 나눌 수 있음.

· GPR 안테나 배열에서 가장 많이 쓰이는 배열 방법은 송수신 안테나가 탐사 측선에 모두 평행하는 경우(PL-BD)이며, 이렇게 배열된 안테나의 경우 탐사하는 동안 반사를 감쇄시키며 가장 많은 에너지를 제공하게 됨.

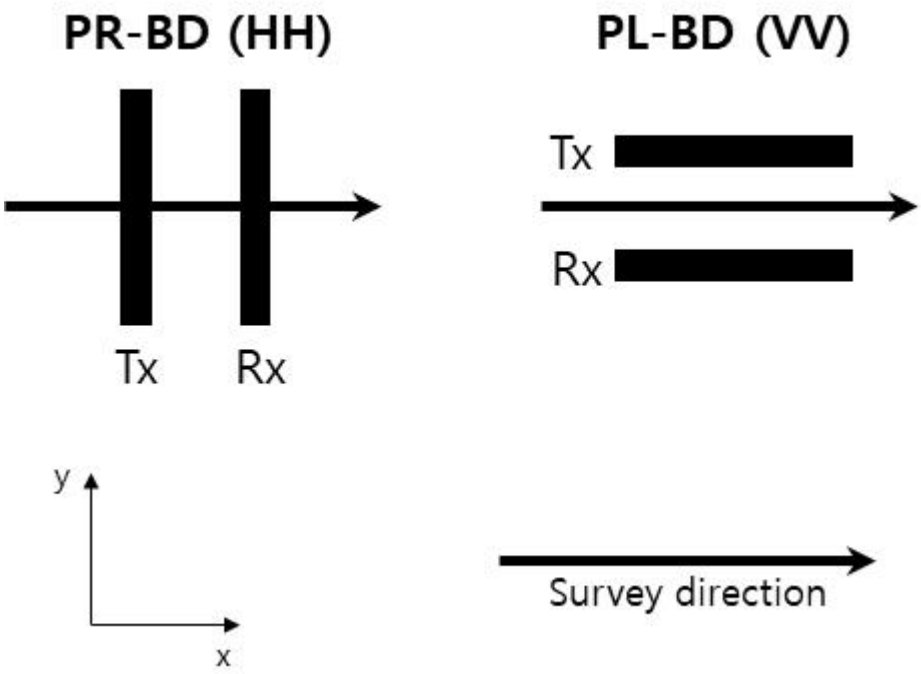


그림 16. GPR 장비의 안테나 배열

- 이는 송수신 안테나가 탐사 측선에 모두 평행하는 경우(PL-BD)가 더 깊숙이 전자기파가 침투함을 의미하며 내부구조를 가장 잘 보여주는 효과적인 방법임을 의미함.

- 하지만 송수신 안테나가 탐사 측선에 모두 수직하는 경우(PR-BD)는 표면에 있는 매설물의 탐지가 탐사 측선에 모두 평행하는 경우보다 용이함.

- 따라서 보통 시설물 내부탐상에 사용되는 GPR 장비의 경우 PR-BD 형식의 안테나 배열을 가진 장비가 많으며 이는 철근의 배열, 누수 등 비교적 표면에 자리 잡고 있는 내부 탐상을 위함임.

- 그림 17은 안테나의 GPR 장비의 안테나 배열을 그림으로 나타낸 것이며 그림 18은 안테나 배열 별 탐지 능력을 나타냄.

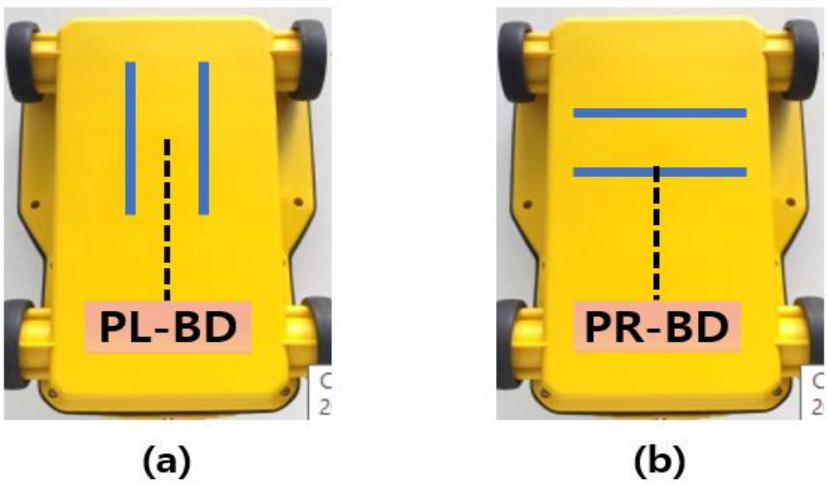


그림 17. GPR 장비의 안테나 배열; (a)탐사 측선에 모두 수직하는 경우 (b)탐사 측선에 모두 평행하는 경우

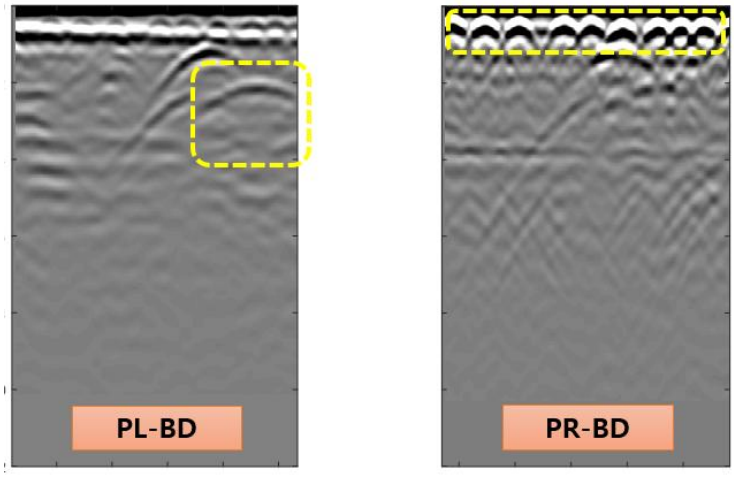


그림 18. 안테나 배열 별 탐지 범위 및 능력

- **제조사별 콘크리트 스캐너 비교**

1) IDS GeoRadar C-thrue

· 주파수(Frequency) : 4 antennas at 2.000MHz
· 안테나 편파(Antenna Polarization) : Double(PL-BD, PR-BD)
· 가탐심도(Range depth) : 0 ~ 80 (cm)

2) GSSI Structure scan mini

· 주파수(Frequency) : 1 antenna at 1.600MHz
· 안테나 편파(Antenna Polarization) : Single
· 가탐심도(Range depth) : 0 ~ 40 (cm)

3) GSSI Structure scan mini XT

· 주파수(Frequency) : 1 antenna at 2.700MHz
· 안테나 편파(Antenna Polarization) : Single
· 가탐심도(Range depth) : 0 ~ 40 (cm)

4) Hilti PS 1000

· 주파수(Frequency) : 3 antennas at 2.000MHz
· 안테나 편파(Antenna Polarization) : Single
· 가탐심도(Range depth) : 0 ~ 30 (cm)

5) Proceq GPR Live

· 주파수(Frequency) : 1 antenna (stepped frquency continuous wave GPR similar to 1.600 GHz)
· 안테나 편파(Antenna Polarization) : Single
· 가탐심도(Range depth) : 0 ~ 70 (cm)

· 제조사별 안테나의 배열 및 주파수를 고려하여 GPR 장비를 비교한 결과, PL-BD 방식과 PR-BD 방식을 결합한 IDS Geo Radar C-thrue 장비가 PSC I형 거더의 표면과 내부의 탐상이 용이할 것으로 판단함.

- 시험체를 이용한 위치 측정

- **일반 콘크리트 시편**

· GPR 장비를 이용한 실측 위치 대비 오차율 검증을 위해 건설기술연구원 내에 있는 시험체를 이용하여 실험을 진행함.

· 그림 19와 같이 시험체를 이용한 실험은 B-scan과 C-scan 두 가지 스캔 방식으로 진행하였으며 그림 20과 21은 시험체의 도면을 나타냄.



그림 19, 시험체를 이용한 위치 측정

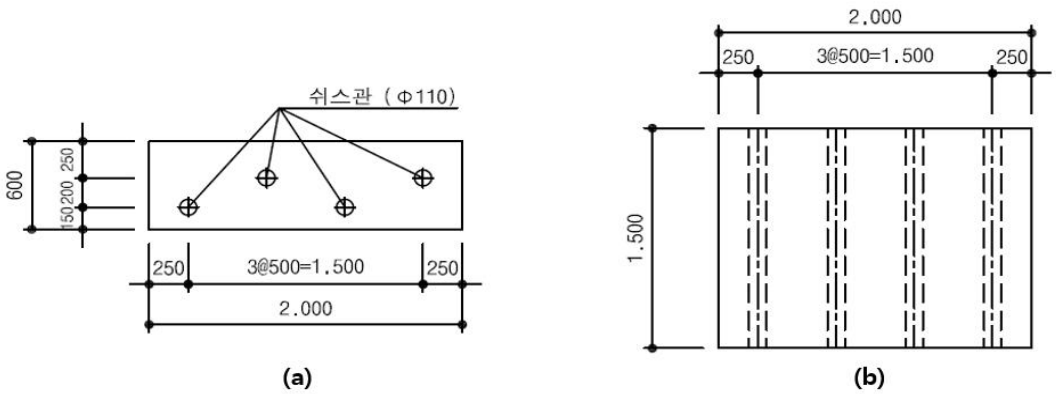


그림 20. 시험체 쉬스관 도면; (a)시험체 평면도 (b)시험체 정면도

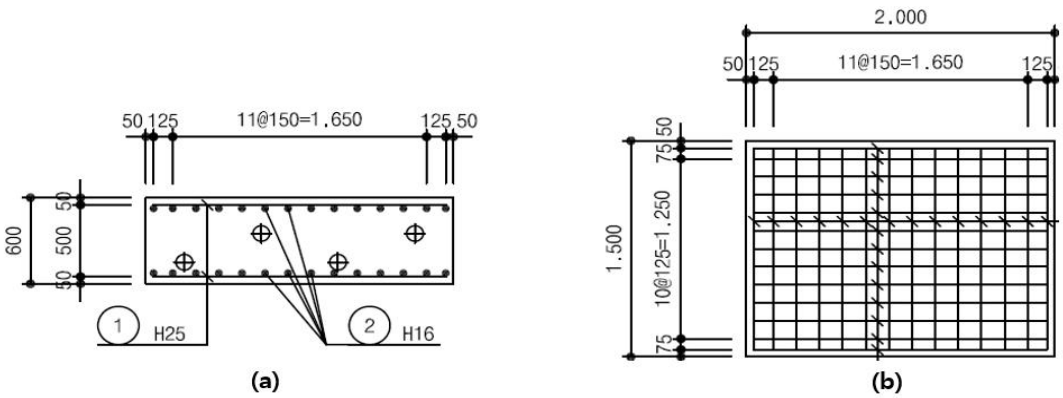


그림 21. 시험체 철근 도면; (a)시험체 평면도 (b)시험체 정면도

· 그림 20의 시험체의 평면도와 정면도를 살펴보면 쉬스관이 시험체 150㎜ 깊이에 매설되어 있으며, 좌측과 우측의 쉬스관은 벽면과 250㎜ 떨어져 있는 것을 확인할 수 있음.

· 또한, 그림 21의 시험체의 평면도와 정면도를 살펴보면 철근이 시험체 50㎜ 깊이에 매설되어 있으며, 125㎜ 간격의 격자무늬로 매설된 것을 확인할 수 있음.

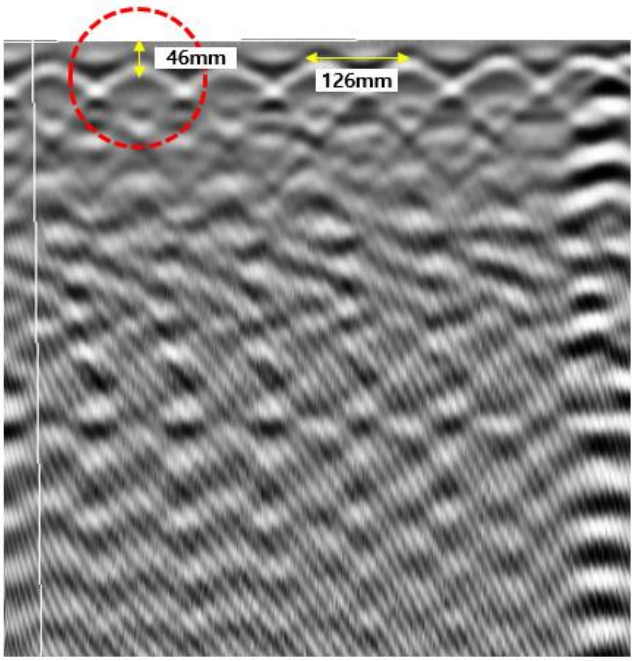


그림 22. 단방향 B-scan 철근 위치 측정 결과

· 그림 22의 단방향 B-scan 철근 위치 측정 결과 표면에 있는 철근의 깊이는 약 46㎜도 측정되었으며, 철근 간격의 경우 126㎜로 측정되었음.

· 측정 결과 단방향 B-scan 데이터의 경우 실제 도면의 위치와 오차율이 10% 내외로 측정된 것을 확인할 수 있었으나, 쉬스관의 위치 및 550㎜ 깊이에 매설된 철근의 경우 노이즈의 영향으로 측정에 어려움을 가짐.

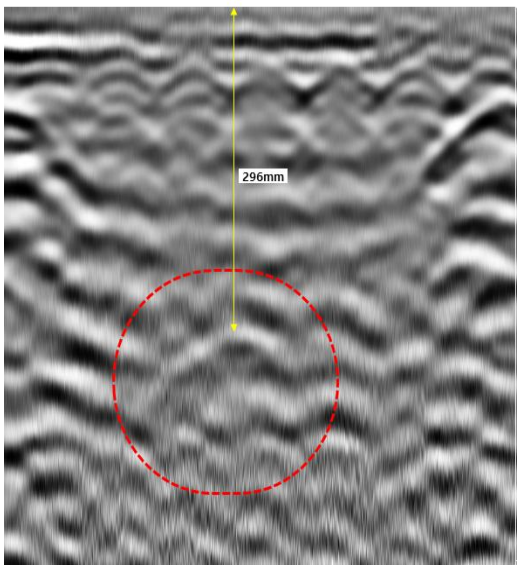


그림 23. 다중 데이터 병합 B-scan 철근 위치 측정 결과

· 격자 형태로 취득한 총 28개의 B-scan 데이터를 병합한 결과 약 300㎜ 깊이에 있는 쉬스관을 측정할 수 있었음.

· 따라서 단일 B-scan 데이터 대비 다중 B-scan 데이터의 병합이 더욱 정확한 측정 결과를 보임을 검증하였음.

· 병합한 데이터를 이용하여 C-scan 데이터를 취득할 수 있었으며 그 결과를 그림 24에 나타내었음.

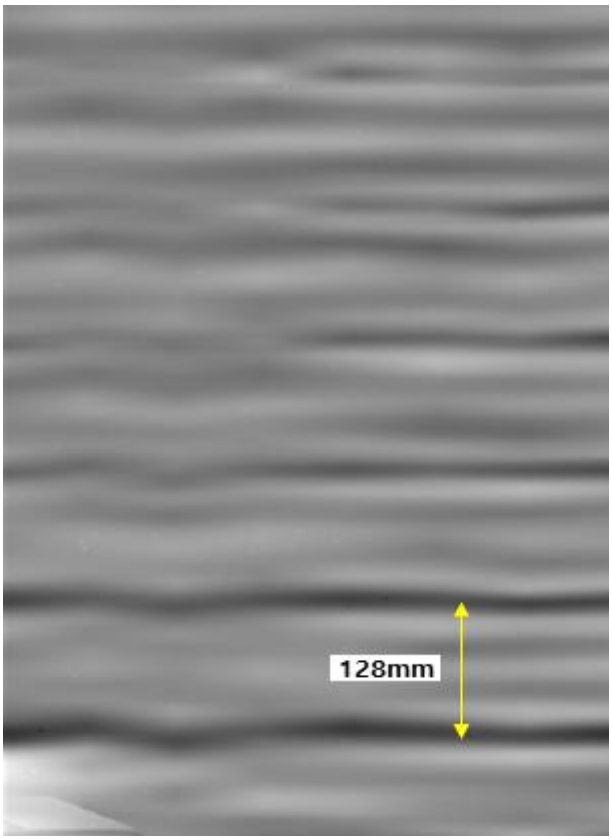


그림 24. C-scan 철근 위치 측정 결과

· 그림 24의 C-scan 철근 위치 측정 결과 표면에 있는 철근 간격이 128㎜로 측정된 것을 확인함.

· 이는 실제 도면의 철근 간격이 125㎜인 것과 비교하였을 때 3%의 오차율을 갖는 것을 검증함.

• **PSC 구조물 모형 시편**

· GPR 장비를 이용하여 프리스트레스트 구조물의 실제 매설된 쉬스관 위치 대비 측정 오차율 검증을 위해 건설기술연구원 내에 있는 프리스트레스트 구조물을 이용하여 실험을 진행함.

· 데이터 취득의 경우 B-scan 데이터만 취득하였으며, 쉬스관의 위치에 수직 방향 및 수평 방향에 대한 데이터를 취득하였음.



그림 25. 프리스트 구조물의 GPR 장비를 이용한 쉬스관 위치 계측

· 실험에 사용된 프리스트레스트 구조물의 도면을 그림 26에 나타내었으며 타겟으로 잡은 쉬스관의 위치만 표기함.

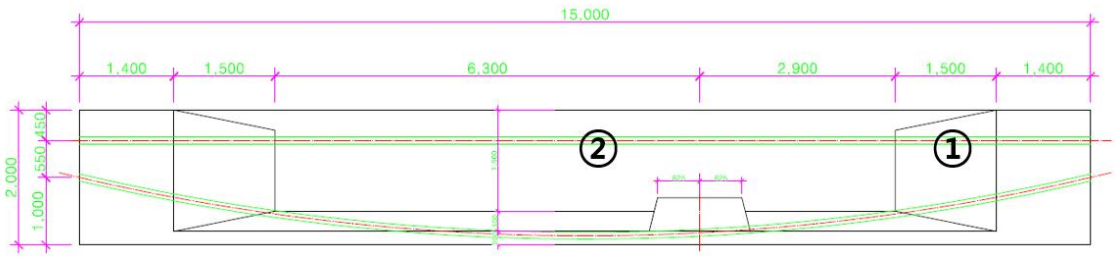


그림 26. 프리스트레스트 구조물 도면

· 데이터 취득 실험은 그림 26의 1번 위치와 2번 위치에서 진행하였으며 그 결과를 그림 27에 나타내었음.

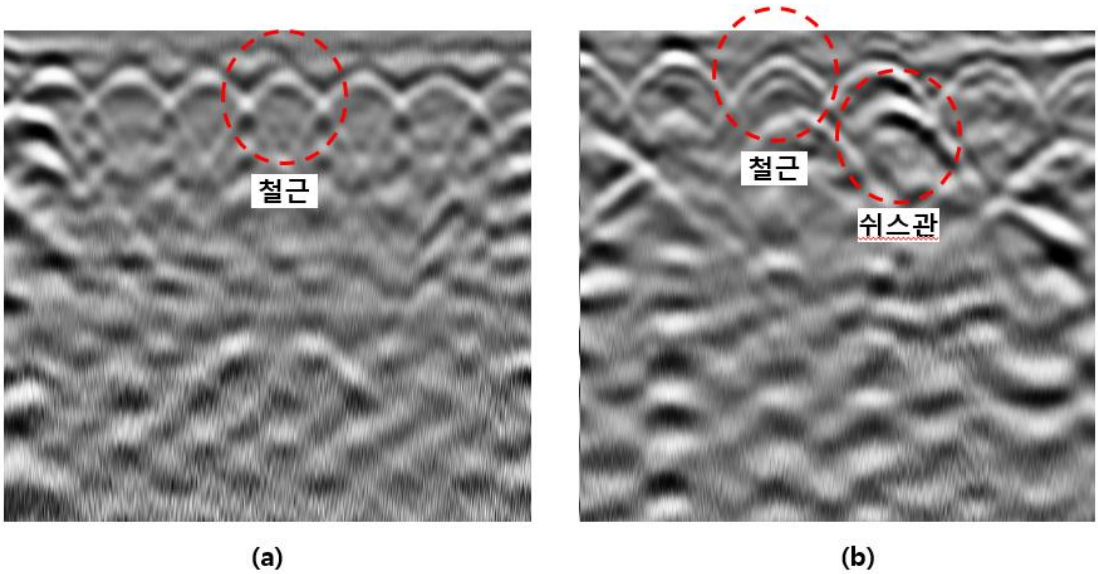


그림 27. 프리스트레스트 구조물 B-scan 데이터 취득 결과; (a)2번 위치에서의 데이터 취득 (b)1번 위치에서의 데이터 취득

· 데이터 취득 결과 쉬스관과 수평 방향으로 데이터 취득 시 쉬스관 탐상이 어려움을 검증함.

· 그림 27의 (a)는 그림 26의 2번 위치에서 쉬스관과 수직방향으로 데이터를 취득한 결과이며 쉬스관의 위치 측정이 어려움을 확인함.

·

· 그림 27의 (b)는 그림 26의 1번 위치에서 쉬스관과 수직 방향으로 데이터를 취득한 경우이며 쉬스관의 위치를 측정할 수 있었음.

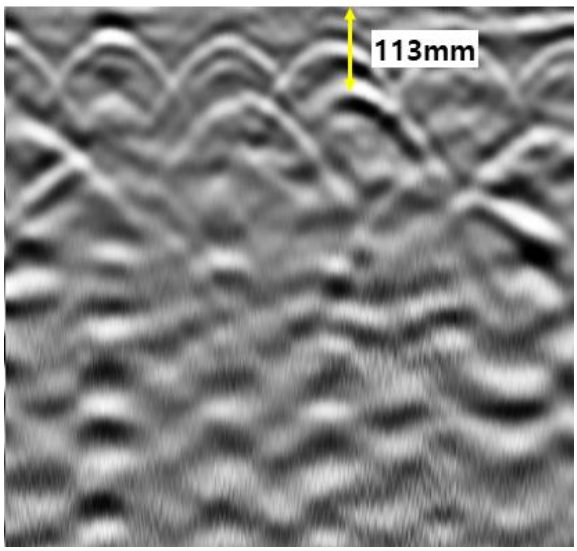


그림 28. 쉬스관 위치 측정 결과

· 그림 28에서 쉬스관의 깊이는 약 113㎜로 측정되었으며, 실제 도면과 비교하였을 때 비슷한 위치에 위치해 있는 것을 검증함.

· 이를 통해 추후 쉬스관 위치 파악에 관한 연구의 진행 시 프리스트레스트 구조물이 꺾여 들어가는 변단부 부분인 1번 위치에서 쉬스관과 수직 방향으로 측정하는 방식으로 진행할 예정임.

② 2차 연도

- GPR 데이터 기반 CNN(Convolution Neural Network)을 이용한 매설물 두께 예측

- **CNN의 원리**

· 기계 학습 분야(ML, Machine Learning) 중 인공 신경 회로망의 일종인 합성곱 신경망(CNN)은 특히 이미지 및 영상 인식에서 뛰어난 성능을 보여줌.

· 특히, CNN은 입력층과 출력층 사이에 많은 은닉층을 포함한 구조를 가지며, 계층별 모든 뉴런이 이전 또는 다음 계층의 뉴런들과 완전히 연결되어 있는 구조의 기존의 인공 신경 회로망과 달리 필터를 이동하여 중복으로 뉴런의 값을 계산하는 것을 특징으로 함.

· CNN의 은닉층은 합성곱층(convolutional layer), 결합층(Pooling layer), 완전 연결층(fully-connected layer) 등으로 이루어져 있으며, 보통의 CNN 모델들은 합성곱층을 거치고 나온 특징 지도(feature map)를 다시 합성곱층을 거치거나 결합층을 거치게 되고, 마지막 단계는 완전 연결층을 거침으로써 분류(classification)를 수행하게 됨.

· 합성곱층의 노드들은 자신의 수용 영역에 대해서만 데이터를 처리하게 되며, 그림 29와 같이 합성곱층의 입력층은 높이(height), 폭(width), 깊이(depth) 형식으로 정의하고, 주로 높이와 폭은 이미지의 크기를, 깊이는 이미지의 색상을 의미함.

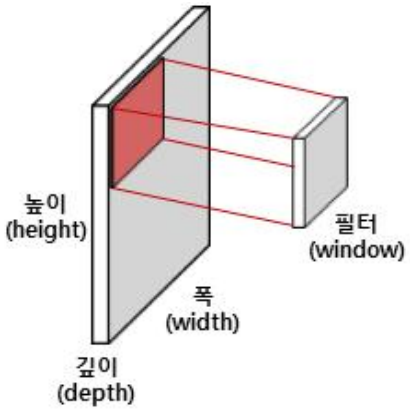


그림 29. 입력층(이미지)과 필터

· 이미지에 대해 연산을 하기 위해 필터가 정의되는데, 필터는 이미지의 모든 영역에 대해 필터의 크기만큼 중복하여 연산을 진행하며, 이때 필터는 모수로써 가중값과 편향 값을 갖게 되는데, 필터의 매개변수(parameter)가 가중값에 해당함.

· 결합층은 추가적인 추상화 및 노이즈 제거를 위한 층으로써, 특징 지도의 크기를 결합 연산을 통해 줄여주는 역할을 함.

· 결합층은 필터에 의해 탐색 과정을 거치게 되고 결합 함수를 통해 결과를 하나로 요약해 주며, 결합 연산에는 최댓값 결합(max pooling) 방식과 평균값 결합(Average pooling) 방식이 있음.

· 합성곱층과 결합층의 과정을 거친 뒤, CNN의 마지막 층인 완전 연결층을 적용하기 위해서 마지막 결합층의 모든 노드를 일차원으로 만드는 작업 즉, 평탄화 (flattening) 작업이 필요함.

· 따라서 그림 30과 같이 노드를 일차원으로 만든 후에는 보통의 다층 신경망과 똑같이 일차원으로 만들어진 노드들을 입력층으로 하여 완전 연결층을 구성하게 됨.

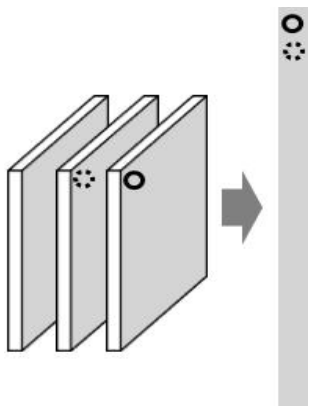
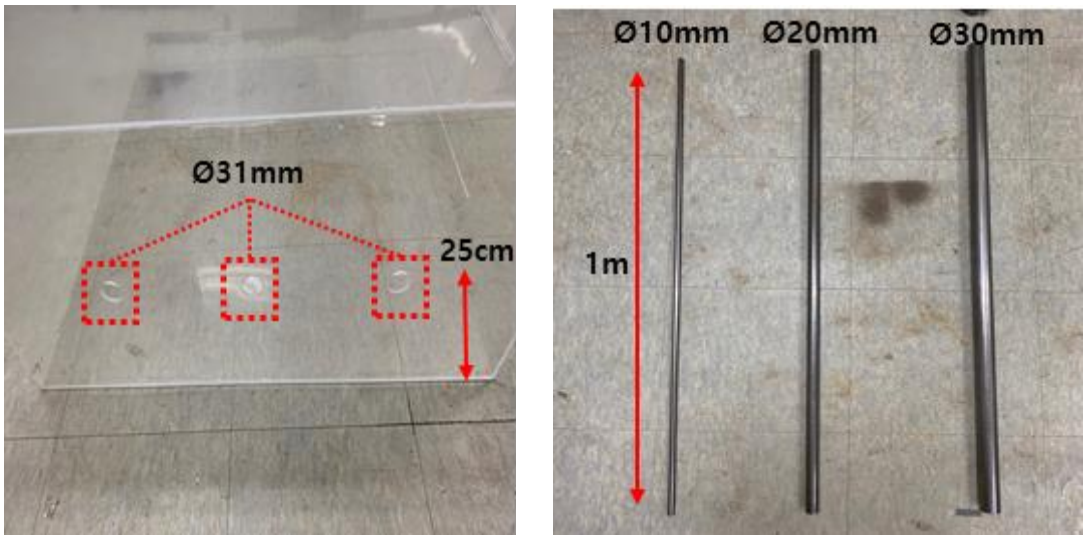


그림 30. 노드의 평탄화

• **B-scan 및 구조보정 이미지의 CNN 적용 시 정확도 비교**

· CNN을 적용하기 위한 GPR 이미지 데이터 취득을 위해 그림 31과 같이 시편을 제작하였으며, 시편은 80×80×50(㎝)의 아크릴 상자로써 철근을 설치하기 위해 높이 25㎝ 위치에 ∅31㎜ 크기의 구멍을 냄.

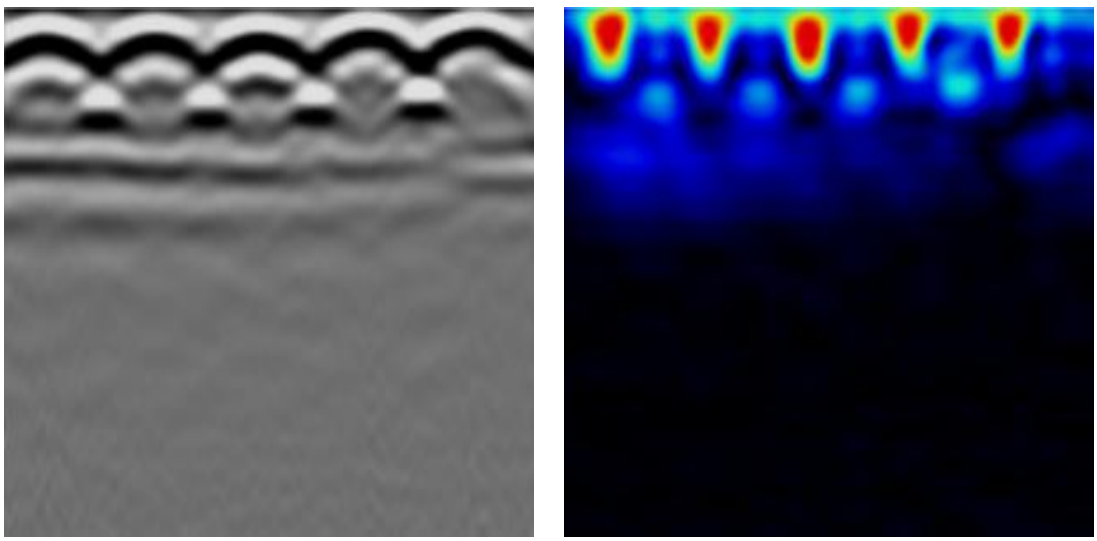


(a) 아크릴 박스 시편 (b) 철근 시편

그림 31. 데이터 취득을 위한 시편 제작

· 그림 31의 (b)는 왼쪽부터 길이 1m의 직경 ∅10㎜, ∅20㎜, ∅30㎜에 대한 철근 시편이며 GPR 데이터의 경우 공기 중에서 GPR 데이터의 노이즈가 가장 작아지기 때문에, 학습 결과를 극대화하기 위해 공기 중에서 각 직경 별 철근에 대해 100개씩 총 300개의 B-scan 이미지 데이터를 취득함.

· 취득한 B-scan 이미지 데이터는 구조보정을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있음.



(a) B-scan 이미지 데이터 (b) 구조보정 후 이미지 데이터

그림 32. B-scan 데이터 및 구조보정을 통해 변환된 데이터

· 취득한 B-scan 및 히트맵 이미지 데이터를 기반으로 CNN을 이용한 철근 두께 예측의 결과를 비교하기 위해 각 이미지 데이터에서 철근이 검출된 영역을 추출하였으며, 취득한 데이터에서 70%는 학습데이터로 설정하였고, 30%는 검증데이터로 설정하여 구축함.

· 학습 및 검증데이터는 32×32 픽셀로 설정하였으며, 히트맵 이미지 데이터는 R, G, B 값을 갖는 컬러 이미지로 구성되어 있어, 3차원(3-dimension)으로 CNN에 사용되는 필터를 설정함.

· 본 연구에 사용한 CNN 모델을 간략하게 추상화하여 그림 33에 나타냄.

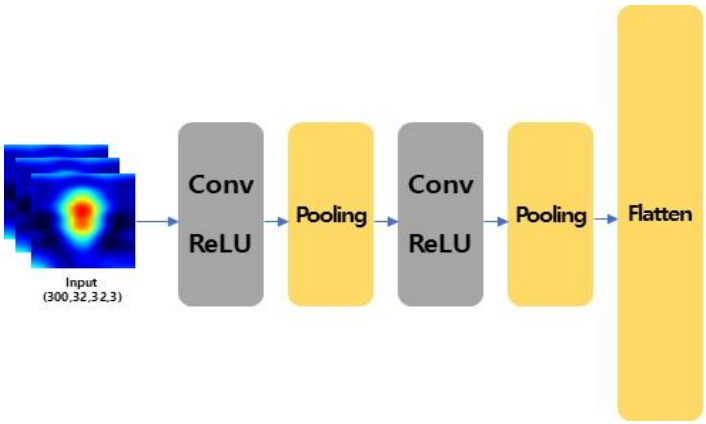


그림 33. CNN 모델 개략도

· 첫 번째 합성곱층에 사용한 필터는 총 32개의 3×3 크기의 필터를 사용하였고, 두 번째 합성곱층에서는 총 64개의 3×3 크기의 필터를 사용하였으며, 각 합성곱층에서 활성함수로써 ReLU 함수를 사용하였고, 각각의 결합층에서는 2×2 크기의 필터를 이용함.

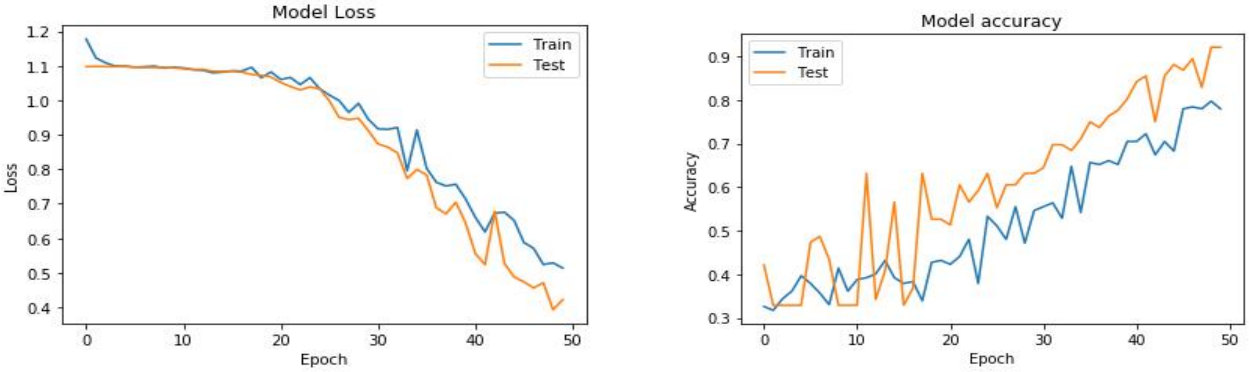
· 2개의 합성곱층과 2개의 결합층인 비교적 간단한 모델을 이용하였으며, 마지막 단계인 완전연결층에서 softmax 함수를 이용하여 추출된 특성을 통해 철근의 두께별 이미지 분류를 진행하였음.

· 실험은 먼저 구조보정 이미지 데이터를 이용하였을 때 철근 두께 예측의 정확도 비교를 위해 GPR 데이터 분석에 주로 이용되는 B-scan 이미지 데이터를 이용하여 학습 및 검증데이터를 구축하여 구성한 CNN 모델에 50회(Epoch) 반복 학습시킴.

· 같은 방법으로 구조보정 이미지를 이용하여 CNN 모델에 학습시켰으며 학습 및 검증데이터에 대한 손실률과 정확도는 그림 34, 35와 같이 나타남.

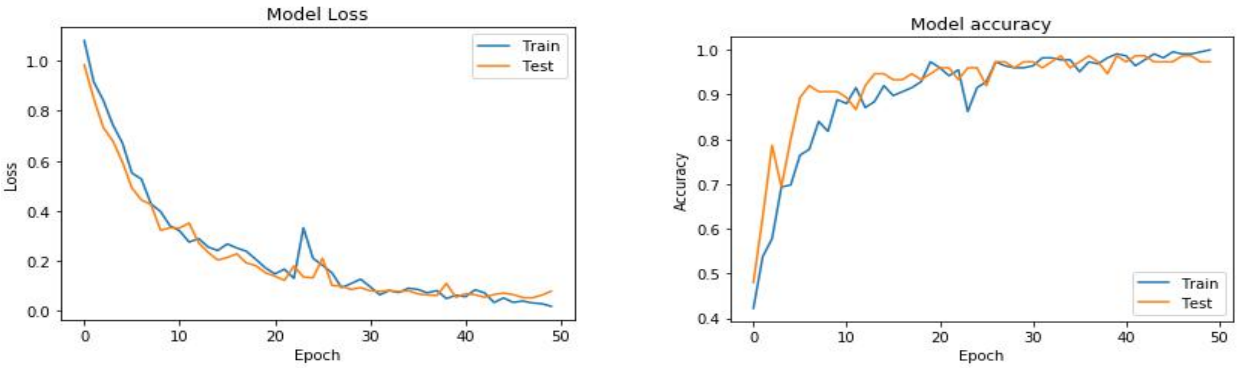
· B-scan 이미지 데이터의 경우 학습 횟수가 증가할수록 학습데이터 및 검증데이터의 손실률이 0.4 즉, 40%정도 되는 것을 그림 34 (a)를 통해 볼 수 있었으며, 정확도 또한 학습데이터와 검증데이터가 큰 차이를 보이는 것을 그림 34 (b)를 통해 확인할 수 있음.

· 반면 구조보정 이미지 데이터의 경우, 학습 횟수가 증가할수록 학습데이터 및 검증데이터의 손실률이 점점 0에 가까워지는 것을 그림 35 (a)를 통해 확인할 수 있으며, 정확도는 1에 가까워지는 것을 그림 35 (b)를 통해 확인할 수 있음.



(a) 훈련 및 검증 데이터의 손실률 (b) 훈련 및 검증 데이터의 정확도

그림 34. B-scan 이미지 데이터의 손실률과 정확도



(a) 훈련 및 검증 데이터의 손실률 (b) 훈련 및 검증 데이터의 정확도

그림 35. 구조보정 이미지 데이터의 손실률과 정확도

· 훈련된 CNN 모델을 이용하여 15개의 B-scan 및 구조보정 이미지에 대한 철근 두께 예측을 진행한 것을 그림 36과 37에 나타내었다.

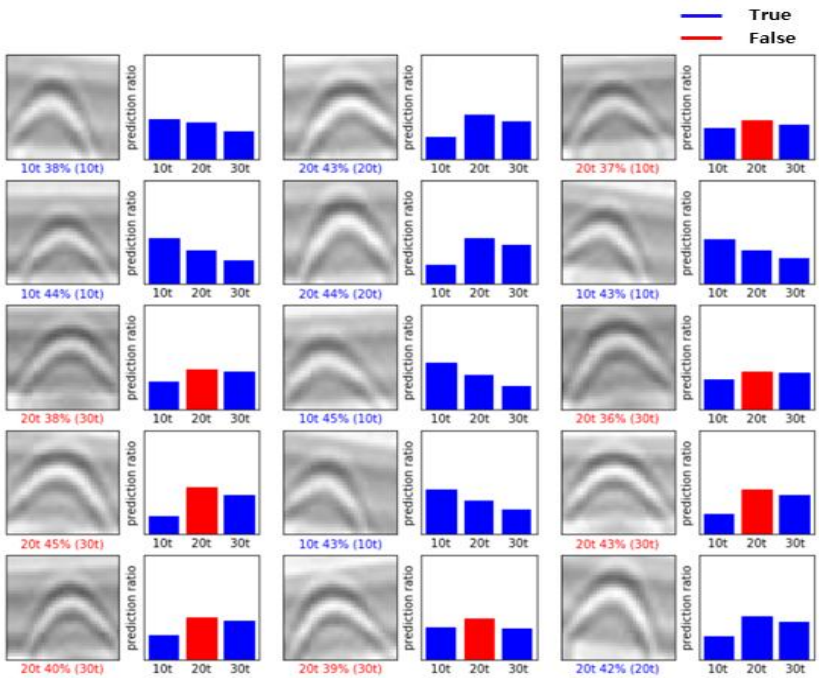


그림 36. B-scan 데이터를 이용한 내부형상 탐사 오차율 결과

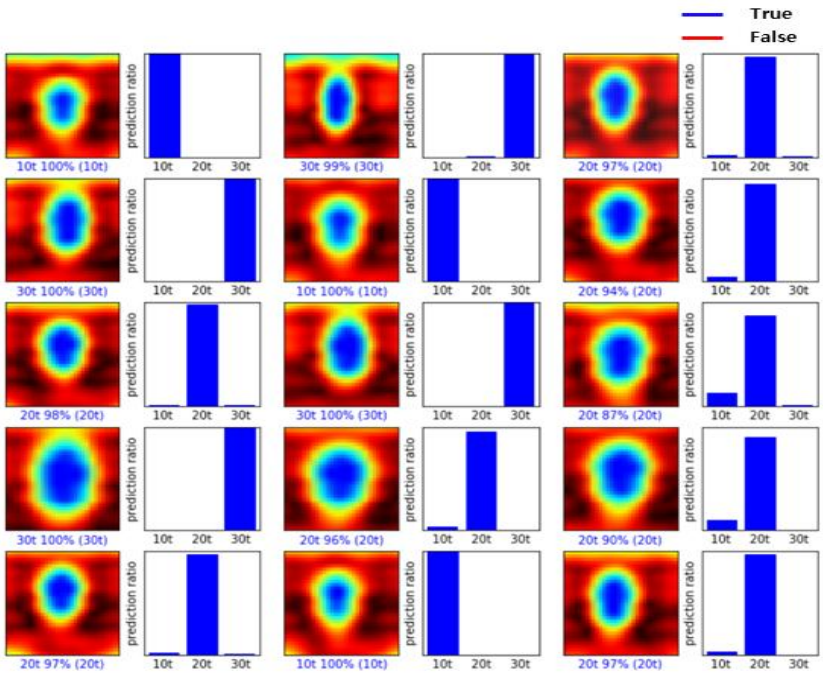


그림 37. 구조보정 이미지 데이터를 이용한 내부형상 탐사 오차율 결과

· 그림 36과 37에서 보이는 B-scan 및 구조보정 이미지는 테스트에 사용한 이미지를 가시화한 것이고, 이미지 아래의 라벨은 차례대로 예측한 철근 두께, 정확도, 실제 철근의 두께를 의미함.

· B-scan 이미지를 이용하여 철근 직경을 예측 결과 15회의 테스트 중 8회를 올바르게 예측하였으며, 7회를 올바르게 예측하지 못하는 결과를 볼 수 있었으며, 올바르게 예측한 결과 또한 38%~45%의 낮은 정확도를 보여줌.

· 반면, 구조보정 이미지의 경우, 15회의 테스트 모두 올바르게 예측하였으며 정확도 또한 87%~100%의 높은 정확도를 보여줌.

· 이에 본 연구를 통해 구조보정 이미지 데이터를 이용하여 CNN을 적용한 결과가 B-scan 이미지 데이터를 이용한 것보다 정확하게 철근 두께를 예측할 수 있음을 확인함.

- 실거더 축소 모형 및 실거더를 이용한 위치 측정

• 실거더 축소 모형 제작 및 이를 이용한 타겟 위치 측정

· 현장에서 쓰이고 있는 PSC 실거더의 경우 데이터 취득에 어려움이 있어 실거더의 축소 모형 시편을 제작하고자 하였으며, 따라서 실거더의 4분의 1 크기의 시편을 제작함.

· 시편은 다올이앤씨에게 제작 의뢰를 맡겨 제작하였으며, 충북 음성에 있는 다올이앤씨 충북 음성공장에 설치하였음.

· 시편의 설계도를 그림 38, 39, 40에 나타내었으며 시편 제작 과정에 대해 그림 41에 나타내었음.

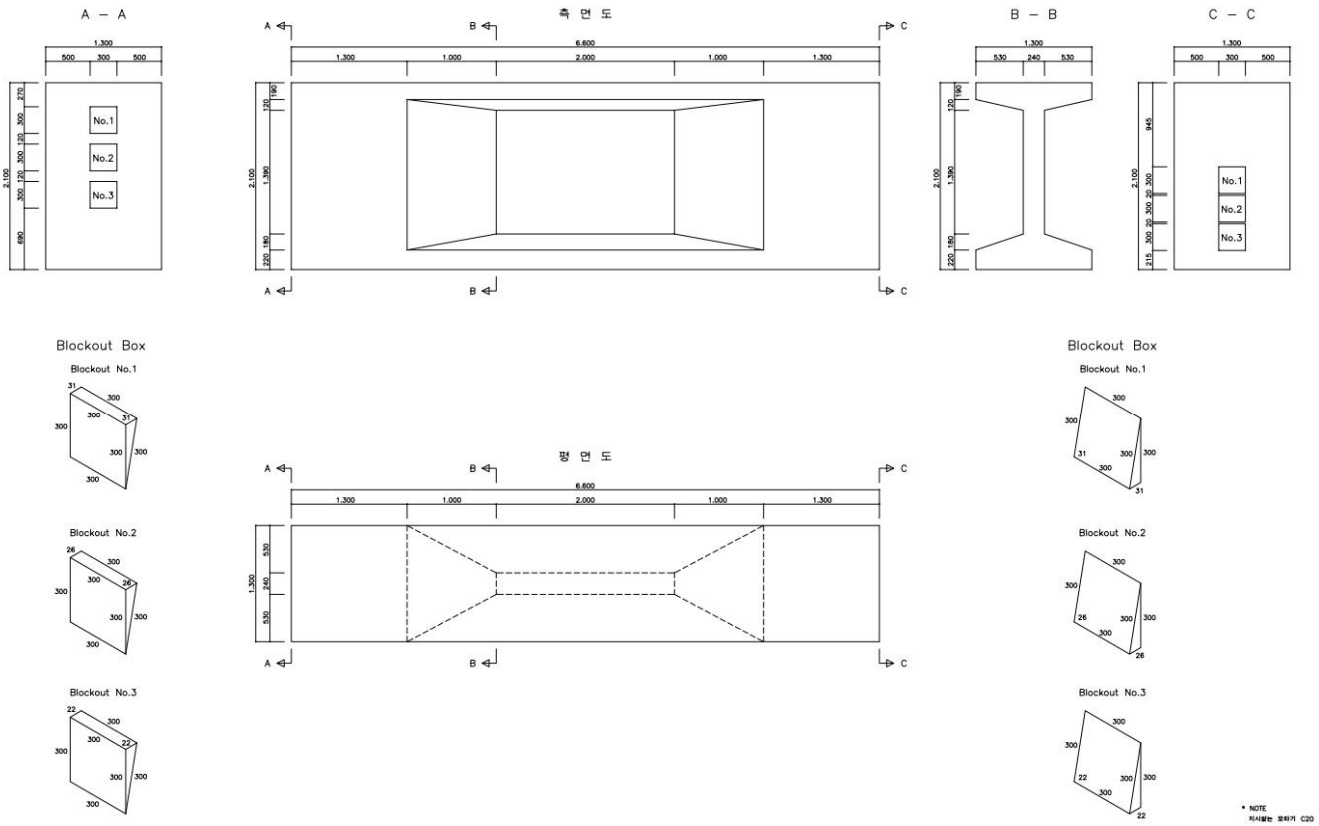


그림 38. 시편 일반도

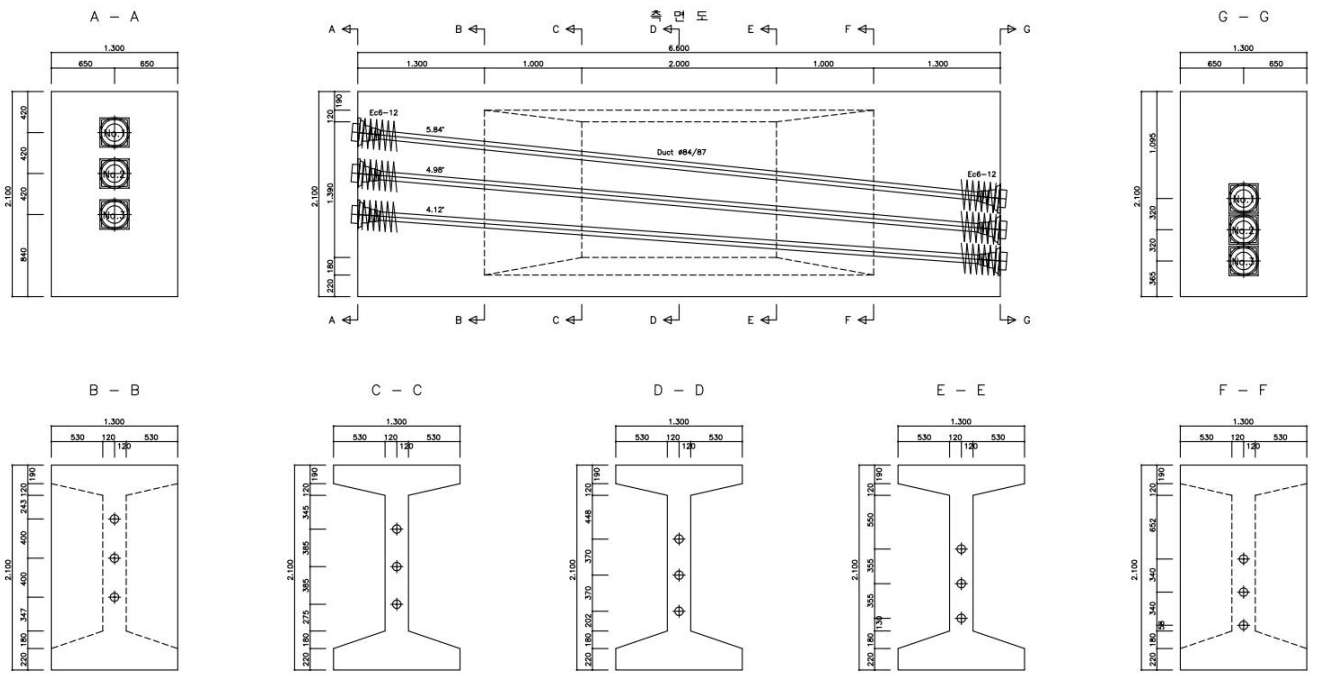


그림 39. 시편 강연선 배치도

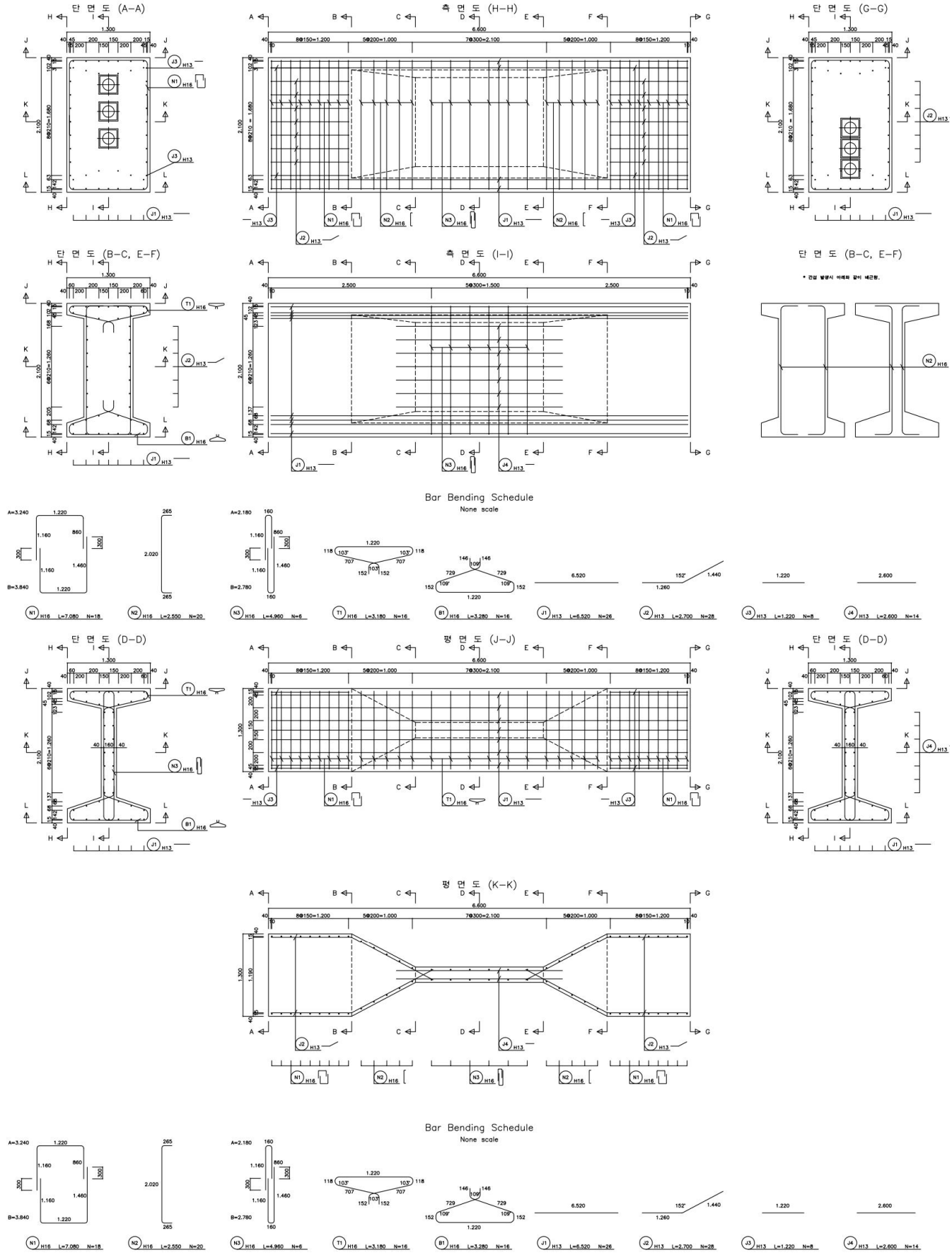


그림 40. 시편 철근 배치도



(a) 바닥 거푸집 설치



(b) 철근 조립



(c) 보강철근 조립 및 덕트 설치



(d) 덕트 및 철근 위치 확인



(e) 외벽 거푸집 설치



(f) 콘크리트 타설



(g) 시편 제작완료

그림 41. PSC 시편 제작 과정

- 시편은 양측 정착구를 통해 텐던의 긴장 응력을 줄 수 있게 제작하였으며, 그라우팅을 하지 않았기 때문에 긴장 응력을 빼기에도 용이하게 하였음.

- 시험체를 제작하는데 소요된 시간은 한달 반이며, 제작한 시편을 이용하여 GPR 및 외부 자화 EM 센서의 데이터 취득 실험을 진행하고자 함.

- 실거더 축소 모형 시편을 이용한 외부 자화 EM 센서 데이터 취득 실험에 앞서, 시편의 내부 형상 GPR 데이터와 도면을 비교하기 위해 GPR 데이터를 취득함.



그림 42. 실거더 축소 모형 시편 GPR 데이터 취득

- 실험은 20개의 섹터로 구분하여 위에서 아래 방향으로 b-scan을 진행하였으며, 한 개의 섹터당 10개의 데이터를 취득하였고 2일간 총 400개의 데이터를 취득함.

- 취득한 데이터를 이용하여 PSC 구조물의 철근 위치 및 쉬스관의 위치 정보에 대해 데이터베이스를 구축함.

- **현장 실거더의 타겟 위치 측정**

· 실험은 화도 양평에 있는 ㈜롯데건설 현장의 50m 길이의 실거더를 타겟으로 하여 실험을 진행함.




그림 43. 화도 양평 공사 현장(좌), 실거더 쉬스관 장착 모습(우)

· 데이터 취득은 거더 좌측의 변단면 부분에서 진행하였는데, 이는 변단면에서의 쉬스관 데이터가 가장 잘 계측되기 때문이며 그림 44와 같이 1번~10번 간격으로 위에서 아래로 데이터를 계측함.

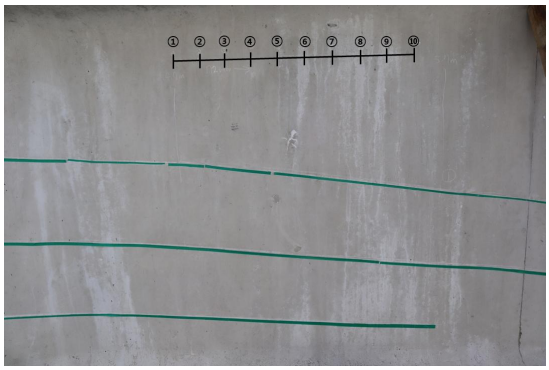




그림 44. GPR 데이터 계측

· 데이터 분석 결과 쉬스관의 위치는 그림 45와 같이 철근 배근의 안쪽에 설치되는 것으로 확인함.

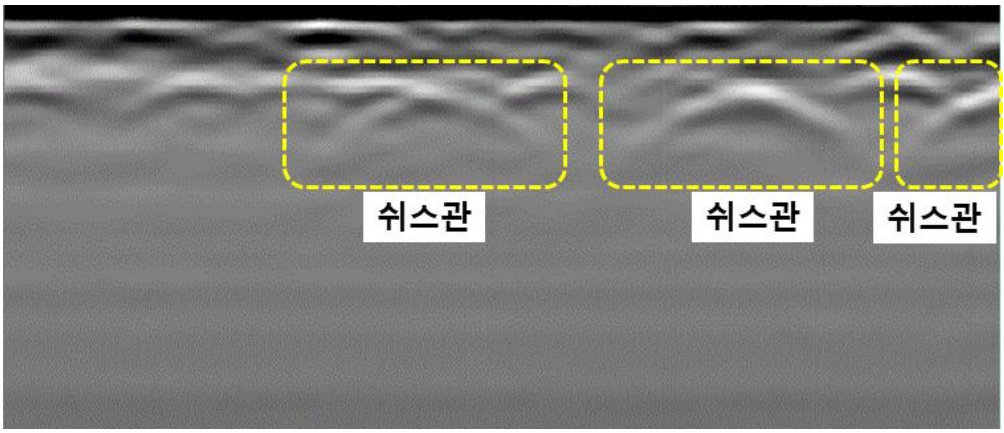


그림 45. 쉬스관 위치 탐색

2) 외부 비접촉형 EM 센서를 이용한 PS텐던의 자기이력 스캔 기술 개발

① 1차 연도

- 외부 비접촉 EM 센싱 기법 개발

· 외부 비접촉 EM 센서 개발을 위해 ANSYS Maxwell 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 진행하였음.

· 시뮬레이션 결과를 통해, 외부 비접촉 EM 센싱을 위한 전류 값, 전류 방향, 코일 turn 수, 재료의 재질, 코일의 위치 파악 등 다양한 변수를 고려하여 시뮬레이션을 진행하였음.

- **원통형 코일 외부 자화 시뮬레이션 결과**

· 그림 46과 같이 네 개의 원통형 코일 가운데에 쉬스관 모형의 모델링을 진행하였으며, 이를 통해 외부 자화의 정도를 살펴 보고자 함.

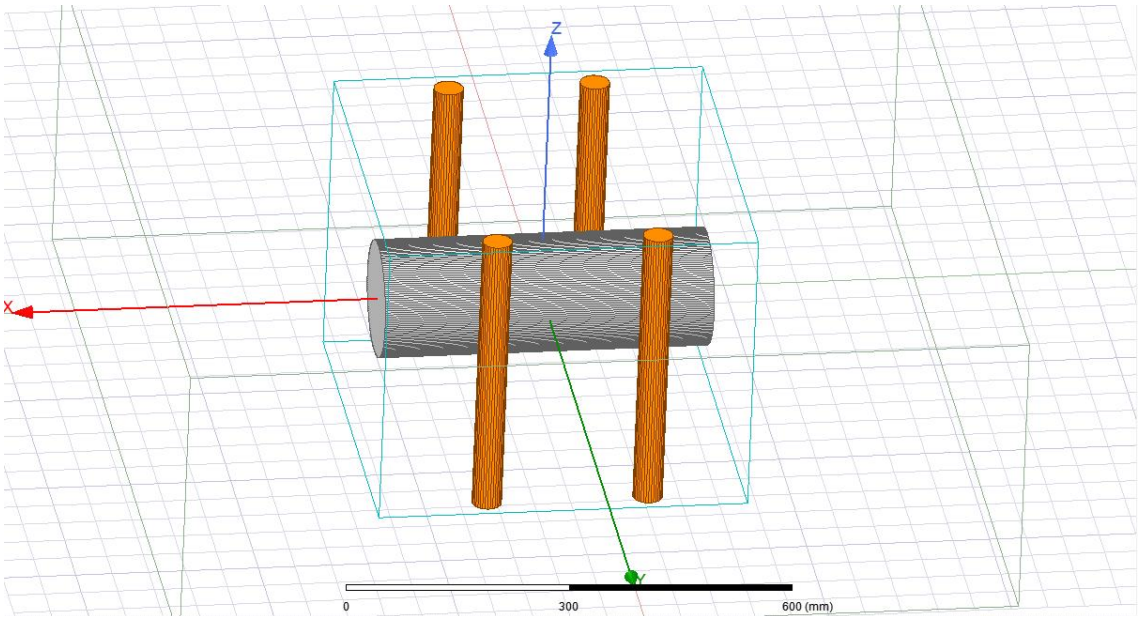


그림 46. 원통형 코일 및 쉬스관 모형 모델링

· 쉬스관의 재질은 탄소강으로 설정하였고, 코일의 재질은 일반적인 구리의 재질로 설정하였음.

· 시뮬레이션을 위한 설정값으로, 코일의 turn 수는 400회로 설정하였으며 이때 흐르는 전류 값은 15A로 설정해 주었음.

· 시뮬레이션이 소요된 총 시간은 대략 4시간 정도이며, 시뮬레이션에 대한 결과를 그림 47, 48, 49에 나타내었음.

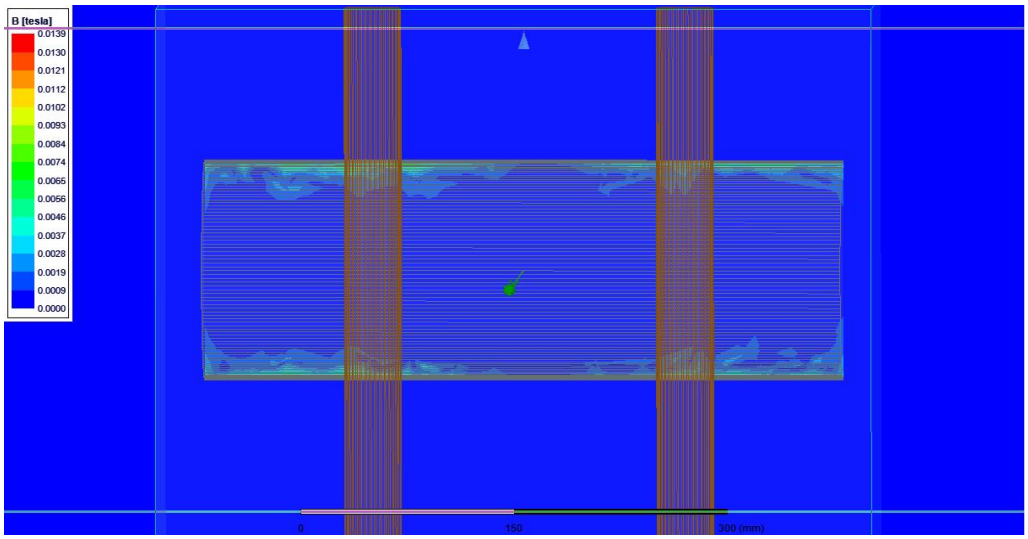


그림 47. X-Z 축 방향 평면 자화 정도 결과

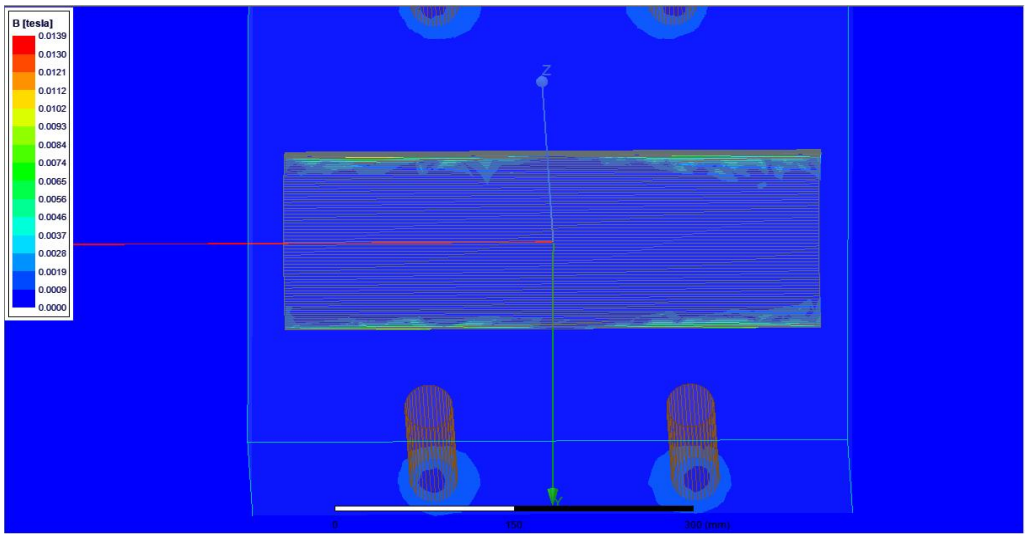


그림 48. X-Y 축 방향 평면 자화 정도 결과

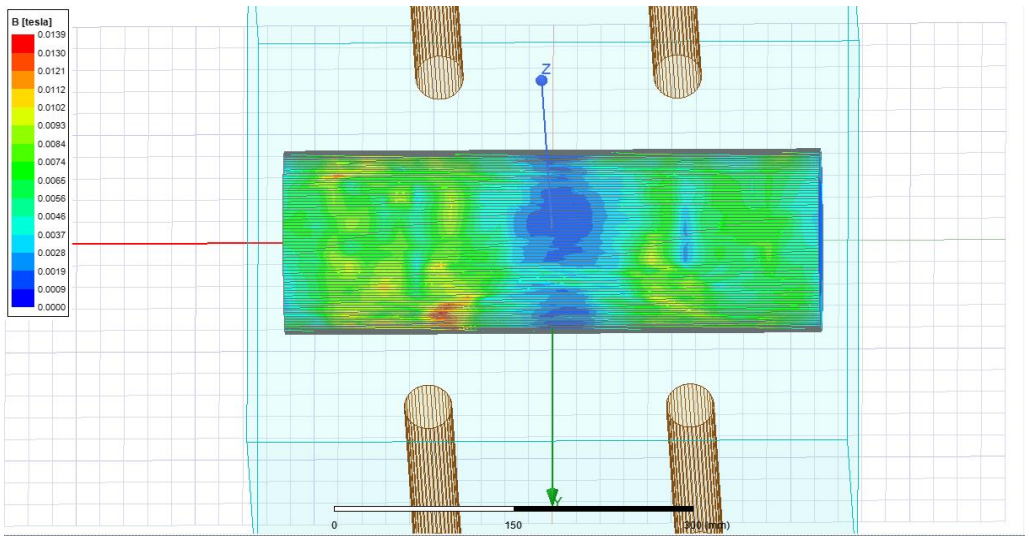


그림 49. 쉬스관 모형 자화 정도 결과

· 시뮬레이션 결과, 그림 47과 48의 X-Z 평면과 X-Y 평면의 쉬스관 자화 정도를 살펴보았을 때 자화의 집중도가 중심부에 위치하지 않은 것을 확인할 수 있었음.

· 이는 그림 49의 쉬스관 모형의 자화 정도를 살펴보면 더욱 뚜렷한 결과를 볼 수 있는데, 중심부에 집중된 자화의 형태가 아닌 코일에 앞에 위치가 자화되는 형태를 띠는 것을 검증함.

- **다중 원통형 코일 외부 자화 시뮬레이션 결과**

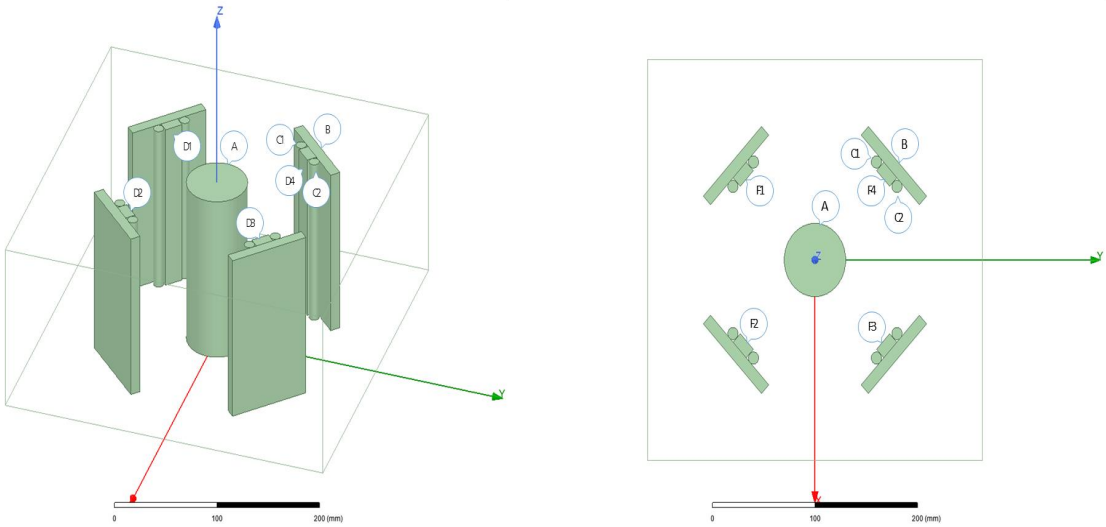


그림 50. 다중 원통형 코일 및 쉬스관 모형 모델링

표 9. 다중 원통형 코일 모델의 기능 및 재료

구분	기능	재료
A	자화 대상	탄소강
B	전자기장 차폐	알루미늄
C1~C2	전자기장 발생	구리
F1~F4	전자기장 유도(코어)	F1: 스테인리스강
		F2: 규소강
		F3: 페라이트
		F4: 탄소강

· 연자성재료 중에서 연자성체의 대표적인 재료는 규소강판, 페라이트 등이 있으며 규소강판은 강판에 규소가 약 0.5～5% 함유된 것을 의미함.

· 규소강판은 전기저항과 포화자속밀도가 높은 장점은 있지만 녹슬기 쉬운 단점이 있음.

· 페라이트는 자성을 가진 세라믹으로 절연체에 가깝기 때문에 전류는 통하지 않아 고주파의 전자제품에서 많이 사용함.

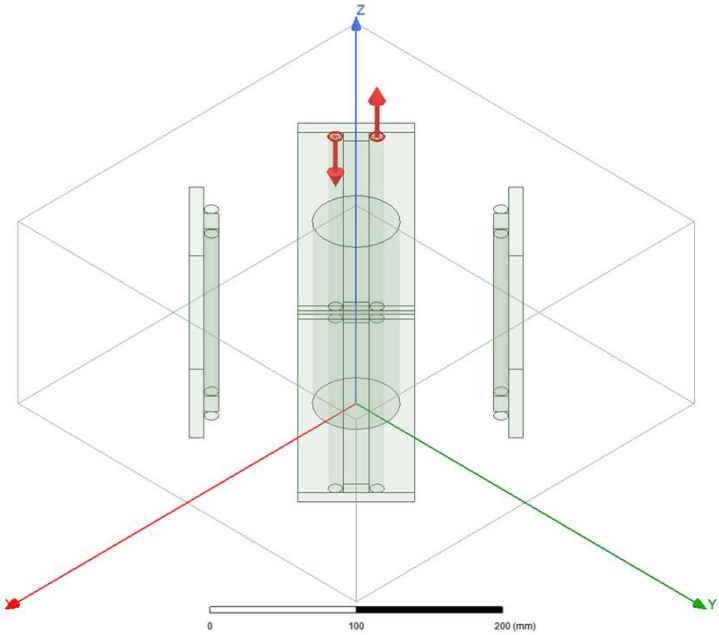


그림 51. 다중 원통형 코일 전류 설정

· C1, C2는 각각 얇은 도선 100가닥이 1A씩 흐르는 것으로 모사하였고, 평행한 도선에서 척력을 통한 자장 형성을 위해 전류를 서로 반대 방향으로 설정하였음.

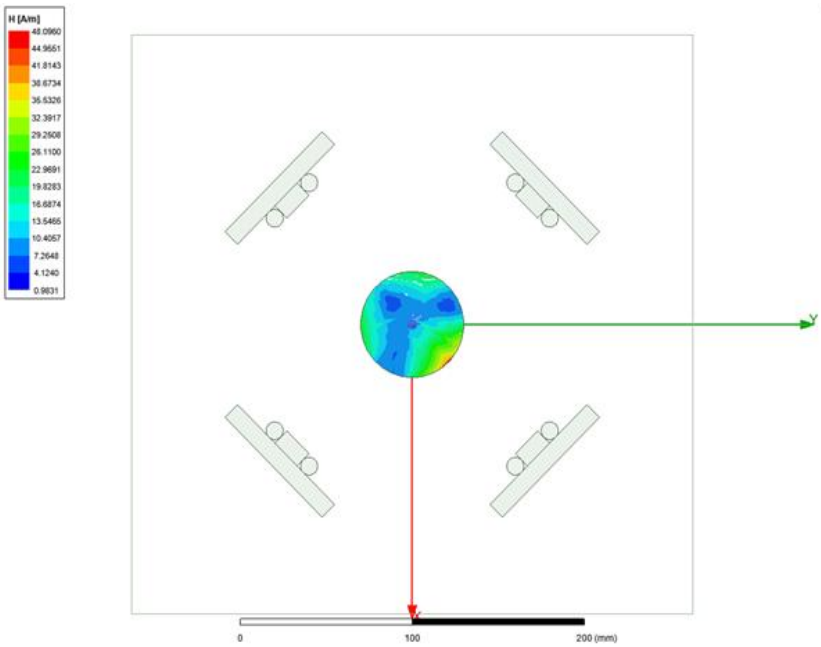


그림 52. 자계강도(Magnetic Field Strength) 시뮬레이션 결과

· 코어별 발생한 자속밀도(Magnetic Flux Density, B)를 살펴보면 F3(페라이트), F2(규소강), F1(스테인리스강), F4(탄소강)순으로 강력하며, 자화 대상체도 F3쪽 부분의 자계강도(Magnetic Field Strength)가 높은 것을 알 수 있음.

• **원형 코일 외부 자화 시뮬레이션 결과**

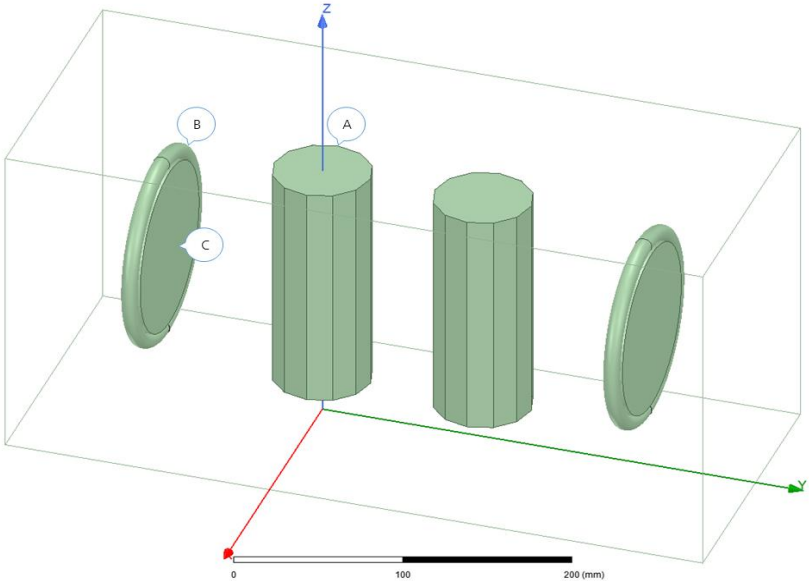


그림 53. 원형 코일 및 쉬스관 모형 모델링

표 10. 원형 코일 모델의 기능 및 재료

구분	기능	재료
A	자화 대상	탄소강
B	전자기장 차폐	알루미늄
C1~C2	전자기장 발생	구리

· 본 연구에서는 직접적이 접촉 없이 자기회로를 구성해야 하므로 영역 전체를 대상으로 거대한 단방향 자기장을 구축하는 방식이나 목표의 중심부위로 집중적인 자기장을 방출하는 방식을 택할 수 있음.

· 2개의 원형 코일 모델링 및 쉬스관 모델링을 그림 54와 같이 구축하고 실험 1에서 가장 우수한 성능을 보였던 페라이트를 코어로 선정함.

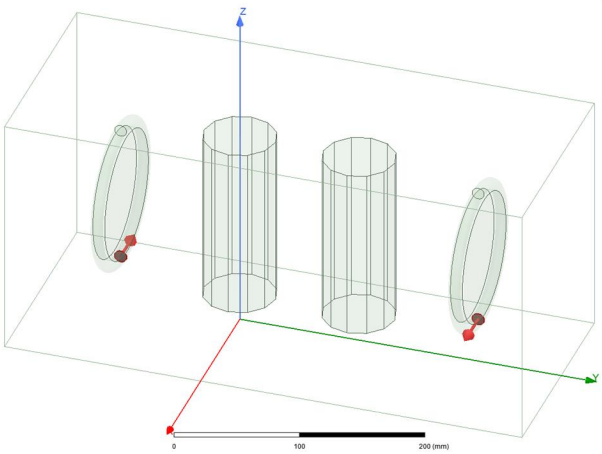


그림 54. 원형 코일 모델링 전류의 설정

· 원형 코일에 인가하는 전류의 설정은 집중적인 자기장을 중심부위로 자기장이 발생하도록 그림 54의 화살표와 같이 전류를 설정함.

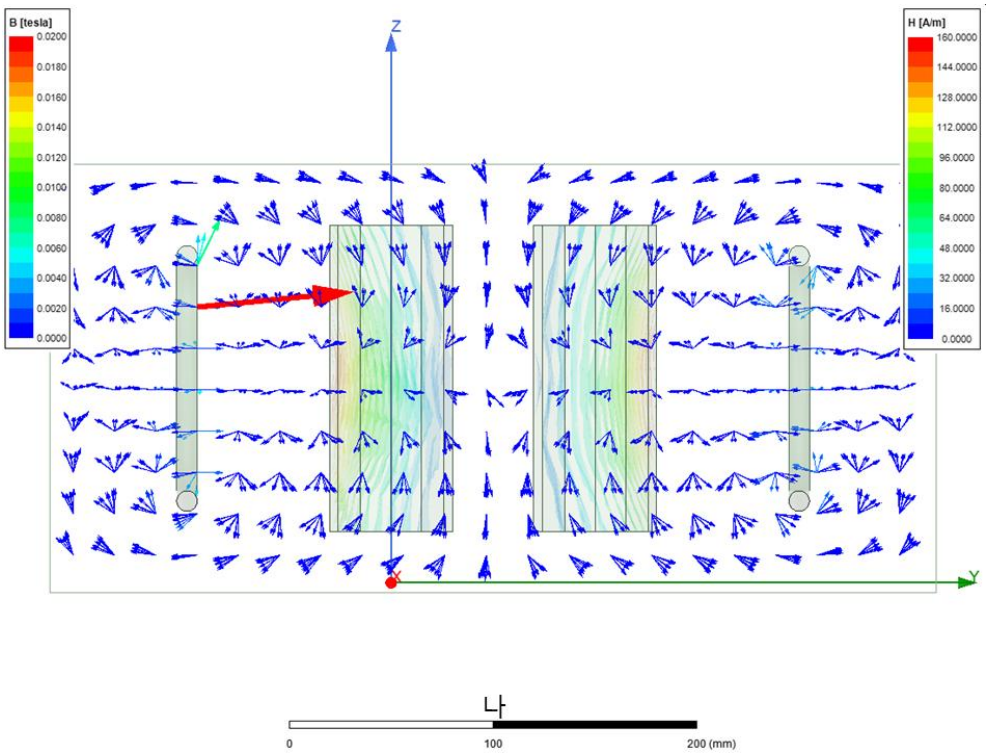


그림 55. 자속밀도 벡터(Magnetic Flux Density Vector) 결과 (거리 50mm)

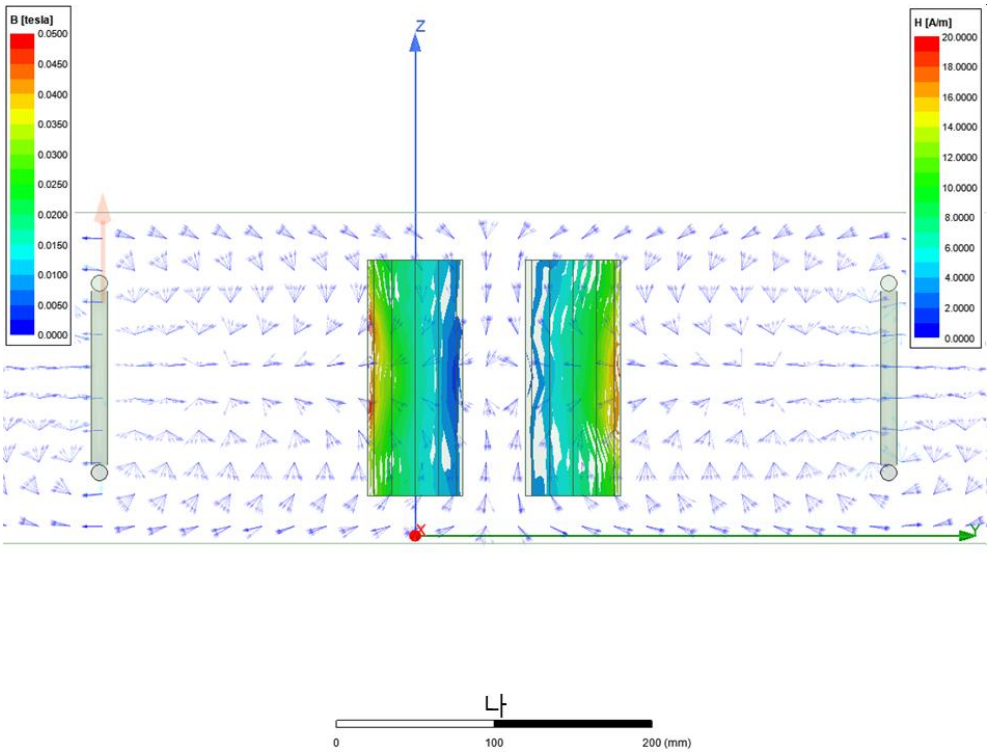


그림 56. 자속밀도 벡터(Magnetic Flux Density Vector) 결과 (거리 150mm)

· 그림 55에서 볼 수 있듯이 대상체와 발성체의 거리를 50mm, 입력 전류를 1A로 설정하였을 경우 원형 코일의 중심부를 양분하여 좌우로 대립한 2개의 자기장이 구축된 모습을 볼 수 있었음.

· 그림 56의 경우 대상체와 자기장 발성체의 거리를 기존 50mm에서 150mm로 3배 멀게 설정하고 입력 전류를 3A 증가시켰으며, 기존 설정과 동일한 경향을 보이는 것을 확인함.

- **전류 제어 코일 배열을 이용한 외부 자화 시뮬레이션 결과**

  · 특정 위치 자화를 위해 그림 57과 같이 전류 제어 코일 배열 형태의 모델링을 한 뒤 시뮬레이션을 진행함.

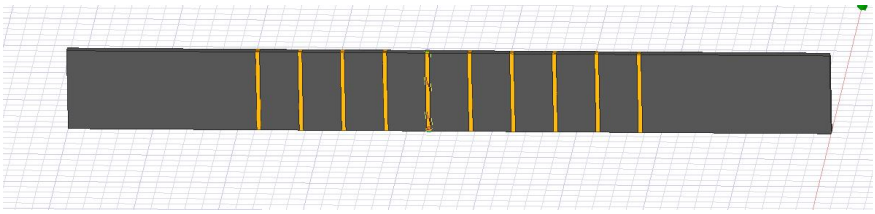


그림 57. 전류 제어 코일 배열 모델링

  · 철판의 형태에 코일이 일정한 간격으로 감겨있는 모형이며, 철판의 재질은 탄소강, 코일의 재질은 구리로 설정해 주었음.

  · 세부 설정값으로, 코일의 turn 수는 20회로 설정해 주었으며 정확한 시뮬레이션을 위한 매쉬 설정으로 철판의 매쉬는 2000개, 코일의 매쉬는 1㎜ 간격으로 보다 세밀하게 설정해 주었음.

  · 또한, 왼쪽 코일부터 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}의 각각의 전류를 설정해 주었으며, 그 값은 $I_1=I_{10}=0.0364A$, $I_2=I_9=-0.2406A$, $I_3=I_8=1.273A$, $I_4=I_7=-3.031A$, $I_5=I_6=1.989A$로 설정해 주었음.

  · 각 코일에 흐르는 전류값을 다르게 설정하여 가운데에 있는 코일에서 자기장이 집중되도록 유도함.

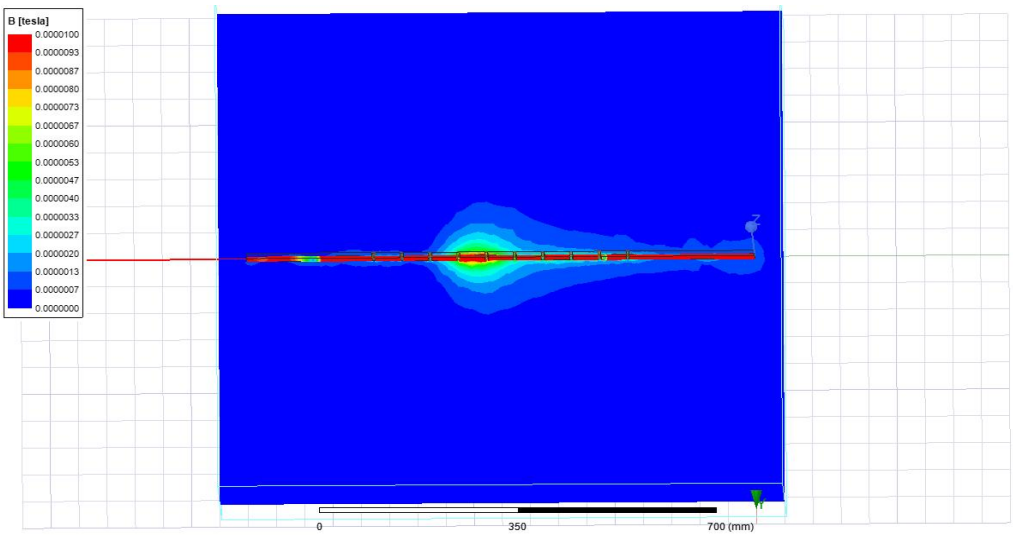


그림 58. X-Y 평면 자화 정도 결과

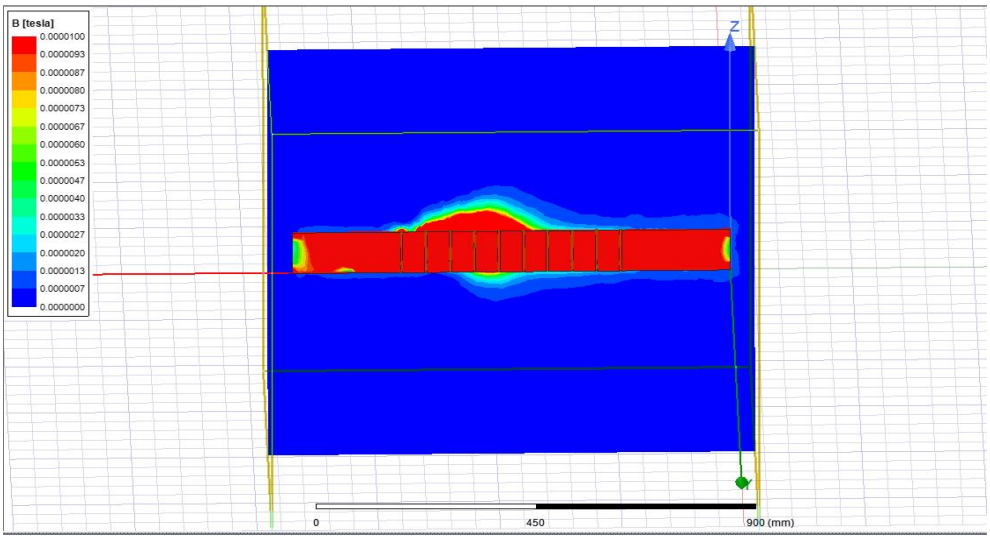


그림 59. X-Z 평면 자화 정도 결과

· 그림 58과 59의 결과를 살펴보면 중앙에 자기장이 형성되는 것을 살펴볼 수 있으나, 자기장이 주변으로 퍼지는 현상이 있음.

· 이는 그림 60의 X-Y 평면을 벡터 형상으로 변경하였을 때 더 뚜렷하게 살펴볼 수 있으며 그림 61에서 철판의 벡터 형상을 살펴보면 자기장이 양옆으로 퍼지는 것을 확인할 수 있음.

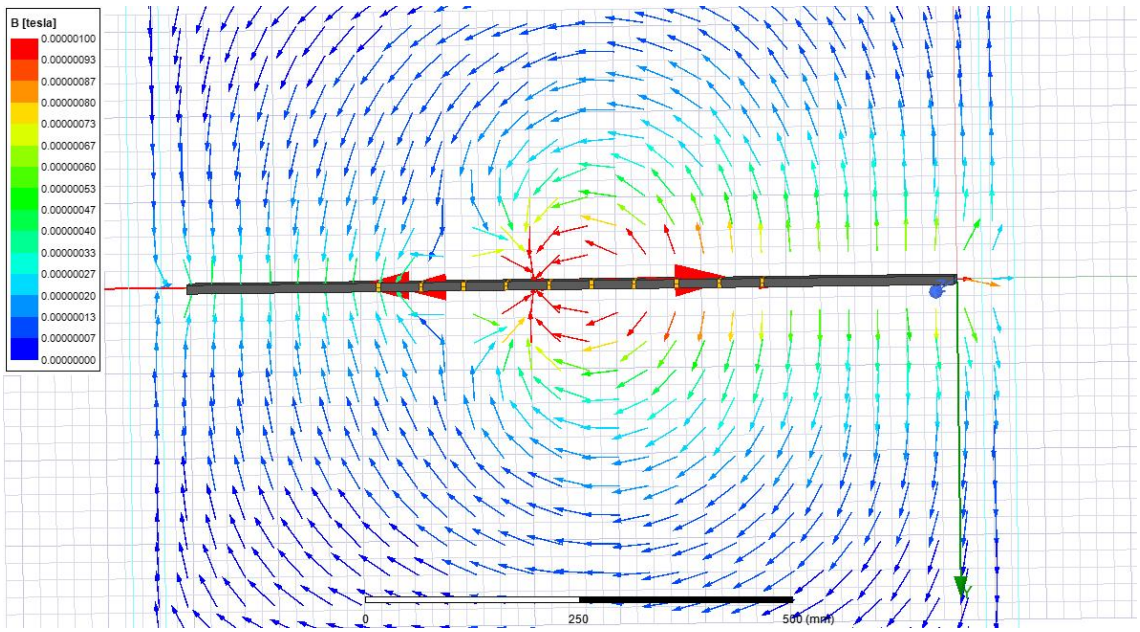


그림 60. X-Y 평면의 벡터 형상 결과

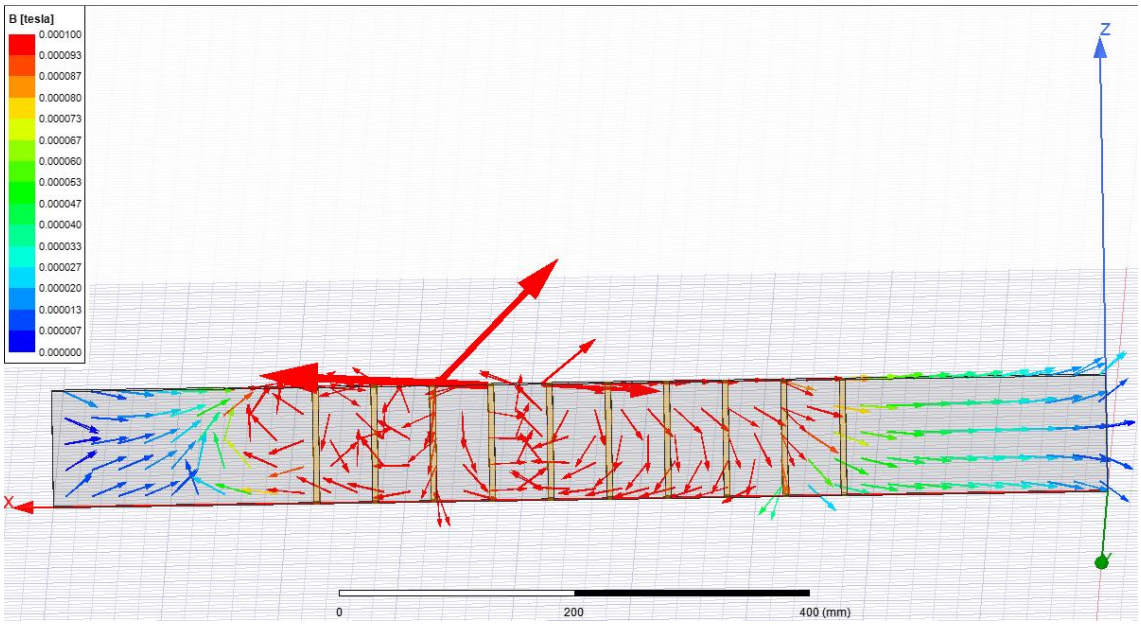


그림 61. 철판의 벡터 형상 결과

- 이는 철판의 재질 값을 탄소강으로 설정한 것이 문제를 띤다고 판단되며, 탄소강보다 자기적 성질이 높은 재질로 변경이 필요함.

- 기존 모델링 및 설정값은 그대로 하였으며, 철판의 재질만 ferrite로 변경하여 시뮬레이션을 진행함.

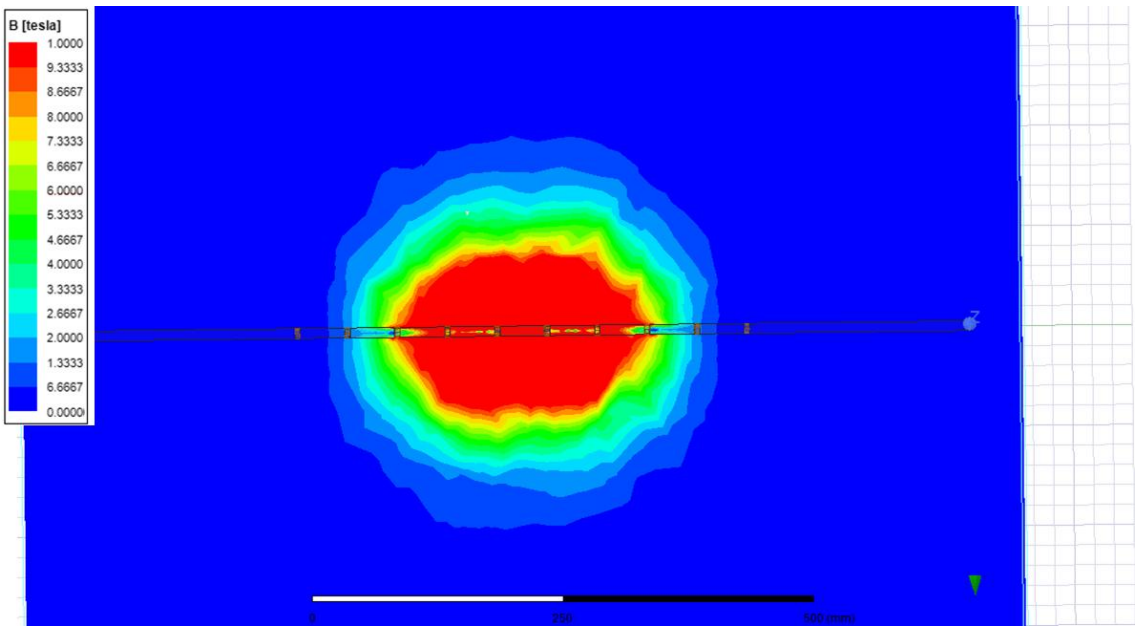


그림 62. ferrite 재질의 철판을 이용한 X-Y 평면 자화 정도 결과

- 철판을 ferrite 재질로 변경한 결과, 그림 62와 같이 자기장이 중앙에 집중되어 형성하는 결과를 얻어낼 수 있었음.

- 또한, 특정 위치(중앙)에서 자화되는 정도를 살펴보고자 Y 좌표로 1m 떨어진 간격에서 똑같은 센서 모델을 만들어 특정 위치 자화의 경향을 살펴보고자 하였음.

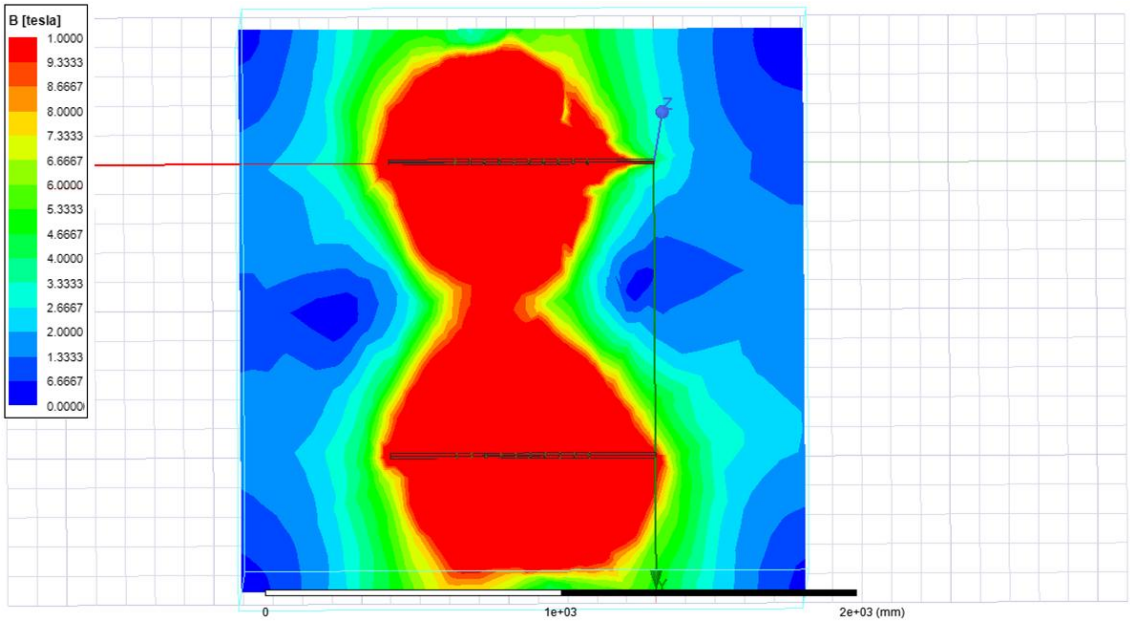


그림 63. X-Y 평면에서 두 개의 센서 설치 시 자화 정도 결과

· 두 개의 센서를 설치한 결과, 그림 63에서 보이는 것과 같이 중앙에서 집중된 자화의 경향을 보이는 것을 검증하였으며, 이를 이용하여 센서 가운데에 텐던 모형을 만들어 자화의 경향을 살펴보고자 함.

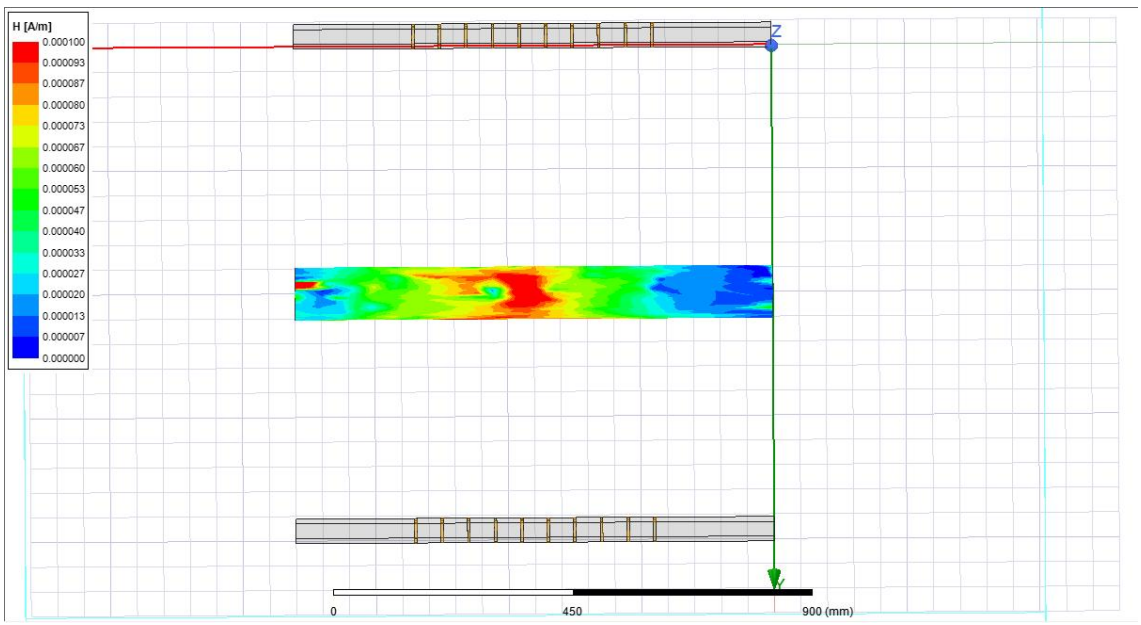


그림 64. 텐던의 자화 정도 결과(센서와 평행 방향)

· 철판의 자화를 살펴보면 그림 64와 같이 평행 방향으로 설치되어 있는 텐던의 중앙부에 집중해 있는 것을 확인할 수 있음.

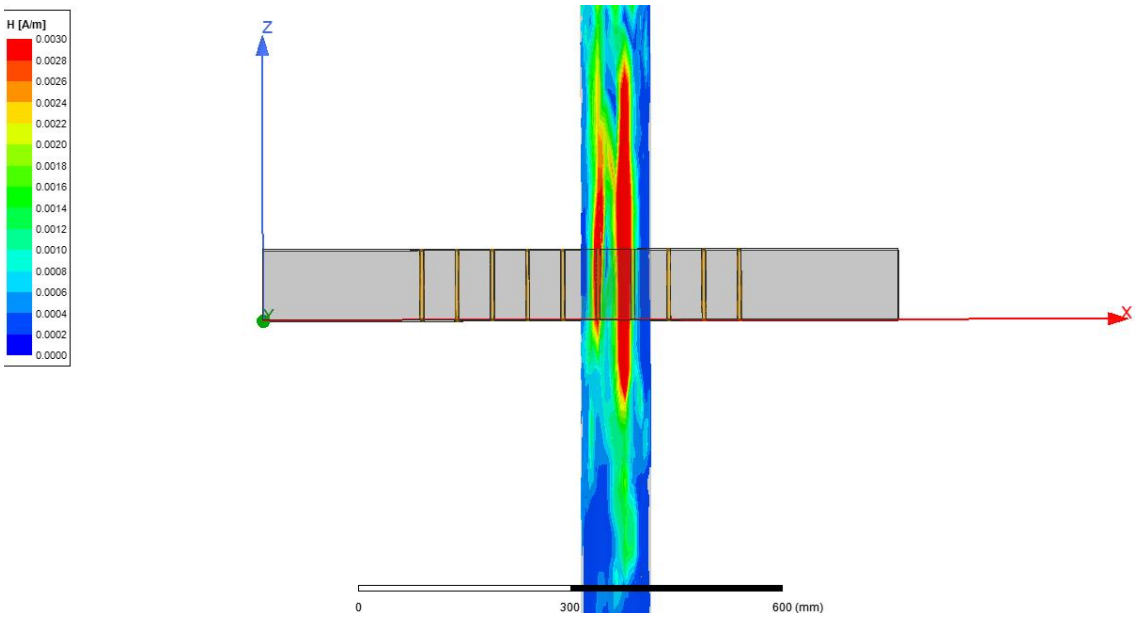


그림 65. 텐던의 자화 정도 결과(센서와 수직 방향)

· 또한, 그림 65의 결과를 통해 센서와 수직 방향으로 있는 텐던의 경우에도 중앙부에 자화가 집중된 것을 확인할 수 있음.

- **외부 비접촉 자화 센서 설계 및 제작**

· 시뮬레이션 결과를 통해 시작품을 제작하였으며 센서는 코어 위에 10개의 코일 Array가 형성되도록 설계하였으며 각 코일은 시뮬레이션과 같이 상호 다른 방향으로 전류가 흐를 수 있도록 설계함.

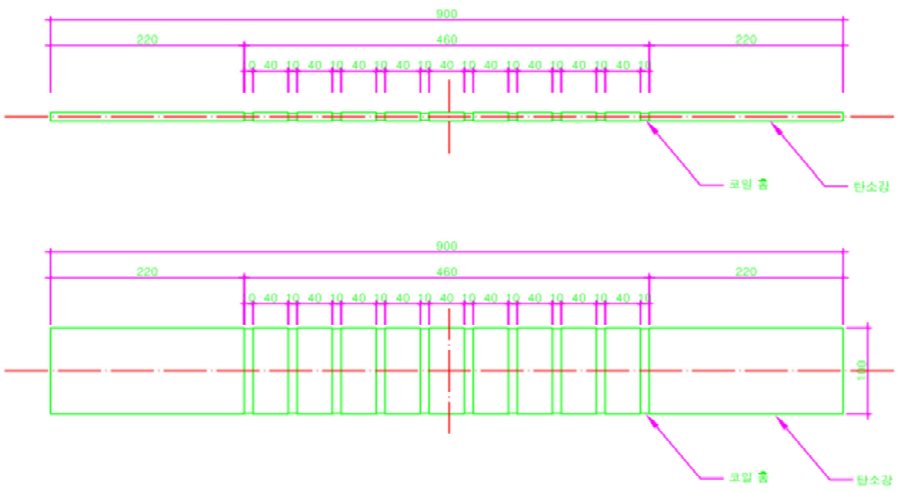


그림 66. 외부 비접촉 자화 센서 설계도

· 상기 설계대로 코어 제작 및 코일을 감아 외부 비접촉 자화 센서 시작품을 제작 완료하였음.



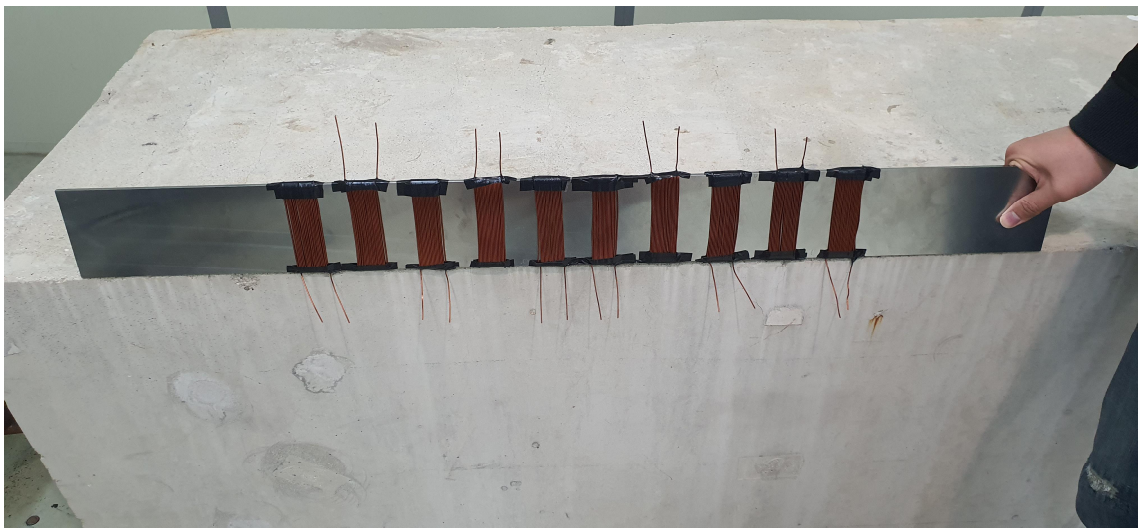


그림 67. 외부 비접촉 자화 센서 시작품 제작

② 2차 연도

- 외부 비접촉 EM 센싱 기법 고도화

· 1차 연도에 설계 및 제작한 센서의 경우, 타겟의 자화 값이 목표로 설정한 값보다 낮으므로 타겟의 자화 정도를 올리기 위해 센서의 설계 및 제작의 추가적인 연구가 필요하다고 판단함.

· 따라서 시뮬레이션을 실제 PSC I형 거더의 모델링을 통해 기존 대비 고도화된 센서 설계를 진행하였으며, 외부 자화 시 타겟의 자화 정도를 이론을 통해 검증하여 최종적인 센서의 설계 및 제작을 진행함.

• **외부 자기장 집속 코일 모델링**

· 외부 비접촉 EM 센서를 이용한 긴장 응력 추정 실험에 앞서, 시뮬레이션을 이용하여 실제 PSC I형 거더 내부에 있는 텐던에 자속 밀도가 도달하는지 확인하기 위해 PSC I형 거더의 모델링 작업을 진행함.

· 거더에 사용되는 콘크리트, 철근, 쉬스관, 텐던의 재질을 모두 동일하게 설정해 주었으며 따라서 실제 실험 진행 시 자화의 경향을 예측할 수 있게 하였음.

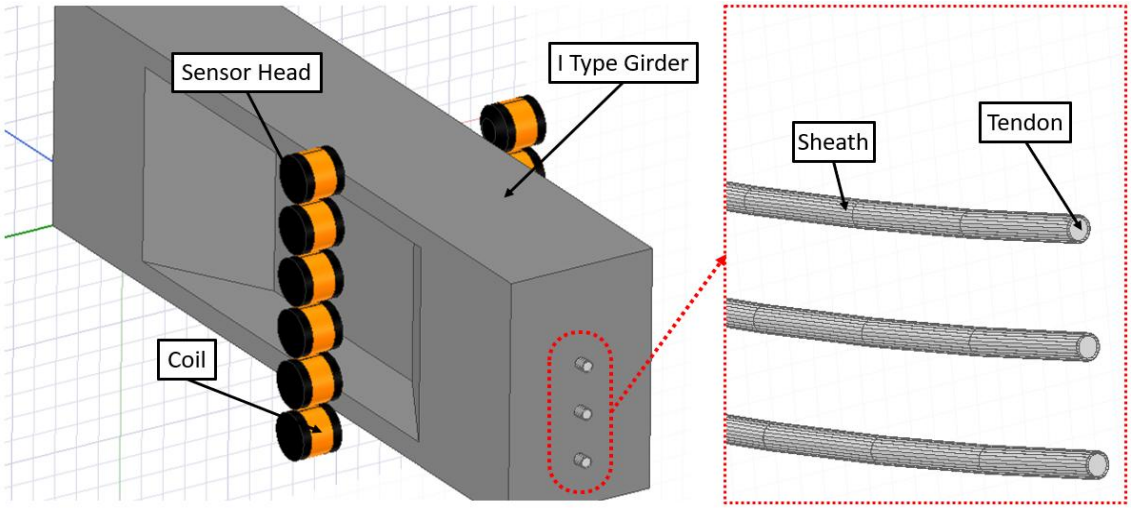


그림 68. PSC I형 거더 및 센서 모델링

표 11. PSC I형 거더 및 센서 모델링의 재질 정보

재료(material)					
Sensor Head	Coil	Girder	Steel	Sheath	Tendon
Nickel alloy	Copper	Concrete	steel_1008	Galvanized steel	Carbon steel

· 시뮬레이션은 코일의 감은 수, 전류, 센서 헤드의 재질 및 크기를 바꿔가며 진행하였으며 솔레노이드 형태의 센서의 경우, 판 형태의 센서와 달리 높은 전류를 인가할 수 있으므로 기존 인가한 전류보다 높은 전류를 인가하여 진행하였음.

· 또한, 솔레노이드 센서의 크기를 고려하여 기존 양쪽 각각 10개씩 총 20개의 코일을 적용하였던 이전의 시뮬레이션에서 코일의 개수를 조정해 가며 텐던에 도달하는 자속밀도를 측정하였음.

- 시뮬레이션을 이용한 최적 센서 설계

- **좌·우측 8개씩 2쌍 배치하였을 경우**

· 좌측 16개, 우측 16개를 동일한 간격으로 배치하여 시뮬레이션을 진행하였으며 이때 인가한 전류 및 코일의 감은 수는 다음과 같음.

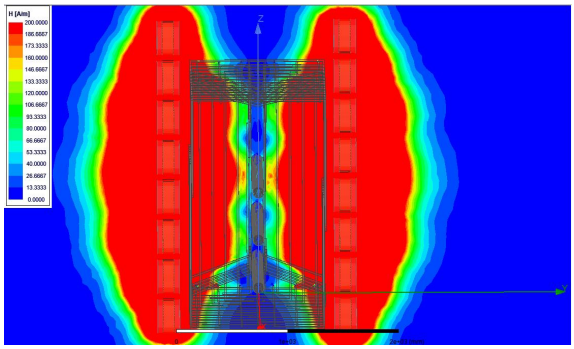
표 12. 코일에 인가된 전류값 및 감은수

감은 수 (turn)			
600			
전류 설정값 (A)			
left_1	left_2	right_1	right_2
$I_1=I_8=-7.218$	$I_1=I_8-7.218$	$I_1=I_8=-7.218$	$I_1=I_8=-7.218$
$I_2=I_7=38.19$	$I_2=I_7=-38.19$	$I_2=I_7=38.19$	$I_2=I_7=-38.19$
$I_3=I_6=-90.93$	$I_3=I_6=90.93$	$I_3=I_6=-90.93$	$I_3=I_6=90.93$
$I_4=I_5=59.67$	$I_4=I_5=-59.67$	$I_4=I_5=59.67$	$I_4=I_5=-59.67$

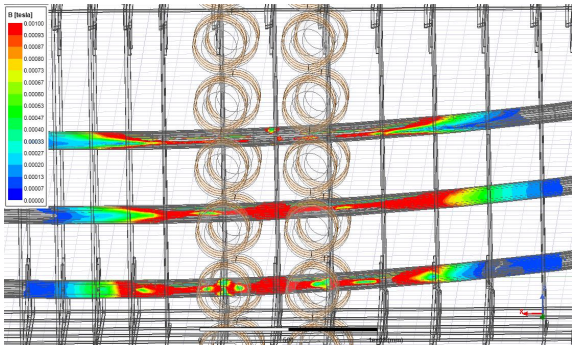
· 위 표에서 나타난 것과 같이 코일의 감은 수는 모두 600번 권선으로 하였으며 각 코일에 인가되는 전류(I_1~I_8)는 표에 나타난 것과 같이 인가함.

· I_1~I_8은 코일을 위에서부터 아래로 순서대로 번호를 나타낸 것으로써, 좌측 및 우측 모두 동일함.

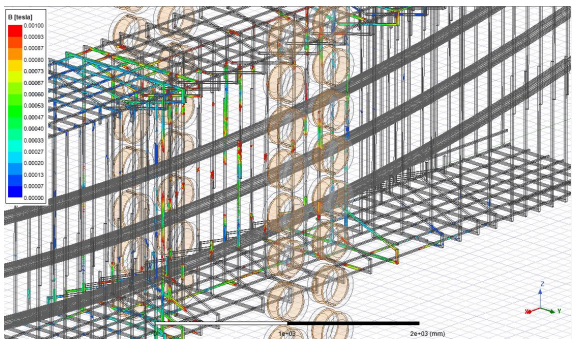
· 센서 헤드의 재질은 Nickel alloy, Incoloy 901을 사용하였음.



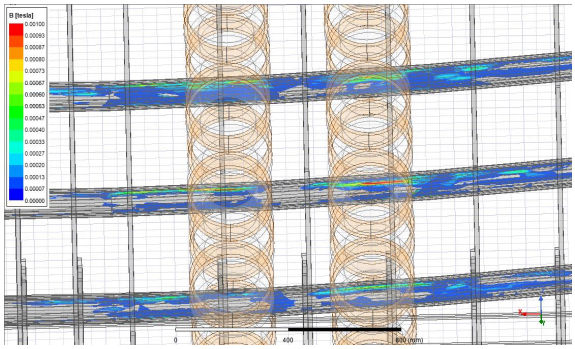
(a) 센서에서 발생하는 자계의 세기



(b) 쉬스관에 도달한 자속 밀도의 세기



(C) 철근에 도달한 자속 밀도의 세기



(d) 텐던에 도달한 자속 밀도의 세기

그림 69. 시뮬레이션 결과 (좌, 우 8개씩 2쌍 배치)

· 좌·우 8개씩 2쌍을 배치하였을 경우 쉬스관, 철근, 텐던에 도달하는 자속 밀도의 세기는 그림 69와 같음.

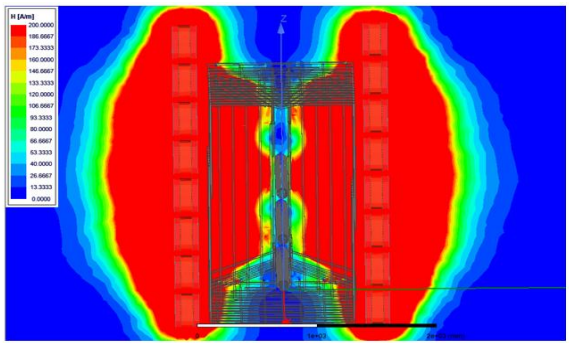
· 센서 헤드의 크기가 크지 않은 대신 개수를 늘려 타겟 지점에 도달하는 자속밀도의 크기를 증가시켰음.

· 하지만, 센서 헤드의 개수가 많아 최종 제작할 시작품의 무게가 무거워지는 단점이 있으며 이로 인해 거치대가 센서 헤드의 무게를 버티는 것이 힘든 한계점이 존재함.

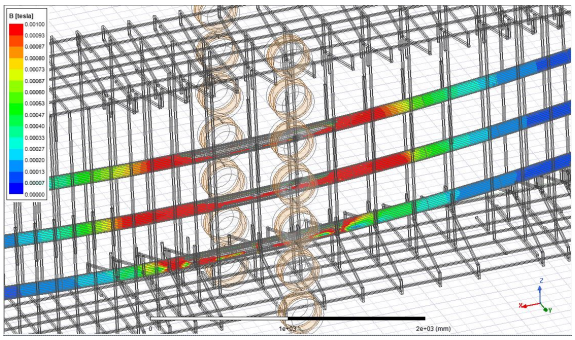
• **좌·우측 8개씩 배치하였을 경우**

· 좌, 우측 8개씩 배치한 경우 8개씩 2쌍을 배치하였을 경우보다 센서의 개수를 반으로 줄였기 때문에 센서 헤드의 크기를 늘려 자계의 세기를 증가시키려 하였음.

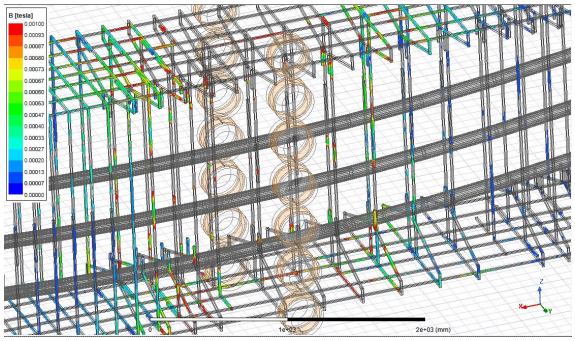
· 센서 헤드의 크기를 제외한 센서 헤드의 재질, 인가한 전류값, 코일의 감은 수 등은 2쌍을 배치한 경우와 동일하게 설정하였음.



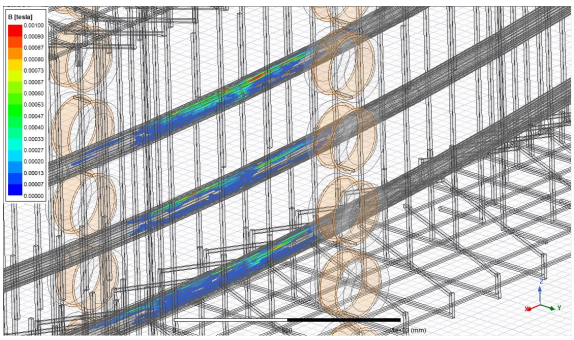
(a) 센서에서 발생하는 자계의 세기



(b) 쉬스관에 도달한 자속 밀도의 세기



(C) 철근에 도달한 자속 밀도의 세기



(d) 텐던에 도달한 자속 밀도의 세기

그림 70. 시뮬레이션 결과 (좌, 우 8개씩 배치)

- 센서헤드의 크기를 늘리고 개수를 줄인 좌·우 8개씩 배치한 경우, 2쌍을 배치한 경우와 타겟 위치에서의 자속 밀도의 크기가 큰 차이가 없었음.

- 따라서 센서 헤드의 크기를 조절하는 경우 센서의 개수를 줄여도 타겟 위치에서 충분한 자속 밀도의 세기를 얻을 수 있다는 결론을 얻음.

- 하지만 센서 헤드의 크기가 커졌기 때문에 여전히 무게가 많이 나가는 한계점이 존재하였으며, 따라서 센서의 개수를 줄이고자 함.

• **좌·우측 4개씩 배치하였을 경우**

- 센서의 총 무게를 줄이고자 좌·우측 4개씩 배치하였으며, 센서 헤드의 크기 또한 줄여 무게를 줄이고자 하였음.

- 또한 기존에 인가하였던 전류값은 실제 실험을 진행하는데 power amp를 이용하였을 경우 인가하기 어려운 문제점이 존재하여 power amp의 용량에 맞는 값으로 수정을 진행함

- 센서의 개수 및 무게, 인가하는 전류의 값을 줄였기 때문에 기존의 배치, 센서 헤드의 재질을 이용하면 타겟 위치의 충분한 자속 밀도의 세기를 얻을 수 없었으므로, 해당 부분을 변경하였음.

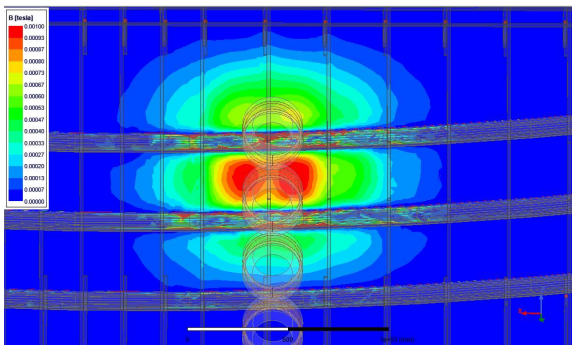
- 변경한 센서 헤드의 재질은 Nickel alloy, Incoloy 800으로 하였으며 인가하는 전류값 및 코일의 감은 수는 다음 표와 같음.

표 13. 코일에 인가된 전류값 및 감은수

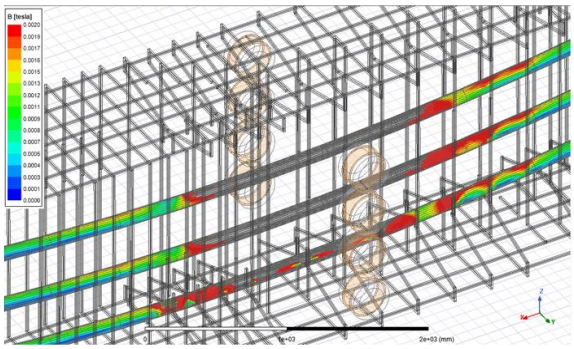
감은 수 (turn)	
600	
전류 설정값 (A)	
left	right
I_1 = -2.5	I_1 = -2.5
I_2 = 10	I_2 = 10
I_3 = 10	I_3 = 10
I_4 = -2.5	I_4 = -2.5

- I_1~I_4는 코일을 위에서부터 아래로 순서대로 번호를 나타낸 것으로써, 좌측 및 우측 모두 동일함.

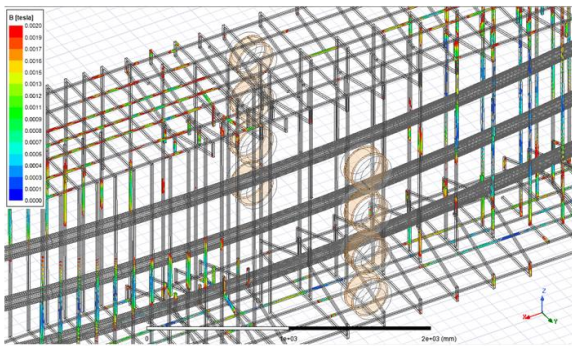
- 센서의 배치는 PSC I형 거더의 변단부 부분에 위치하여 타겟인 텐던과 최대한 가깝게 위치하였으며, 그 결과는 다음 그림과 같음.



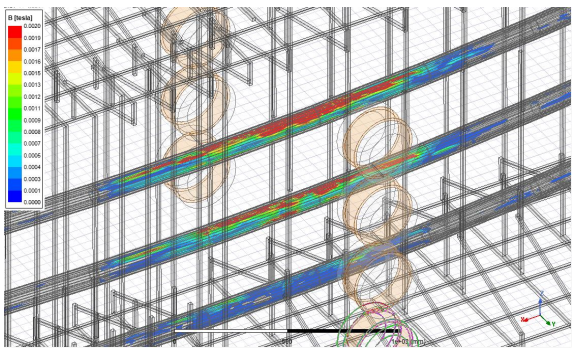
(a) 센서에서 발생하는 자계의 세기



(b) 쉬스관에 도달한 자속 밀도의 세기



(C) 철근에 도달한 자속 밀도의 세기



(d) 텐던에 도달한 자속 밀도의 세기

그림 71. 시뮬레이션 결과 (좌, 우 4개씩 배치)

- 센서의 배치 및 센서 헤드의 재질을 바꾼 결과, 이전과 비슷한 정도의 자속 밀도 세기를 확인할 수 있었으며, 센서 헤드의 크기를 줄였기 때문에 센서의 총 무게 또한 현저히 낮출 수 있음.

- 따라서 외부 비접촉 EM 센서의 최종 모델로 해당 시뮬레이션으로 도출한 센서의 크기 및 센서 헤드의 재질, 코일의 감은 수, 인가하는 전류값을 선정하였으며 이론적으로 해당 위치에서의 자속밀도의 값을 계산하여 검증하고자 함.

- 외부 비접촉 EM 센서의 외부 자기장 계산

• 원형 코일 외부 자기장 식 유도

· 솔레노이드의 외부 자기장 식은 원형 코일의 외부 자기장 식으로부터 유도됨.

· 자기장 $\vec{B}$는 벡터 퍼텐셜 $\vec{A}$의 회전(Curl)로 구해짐.

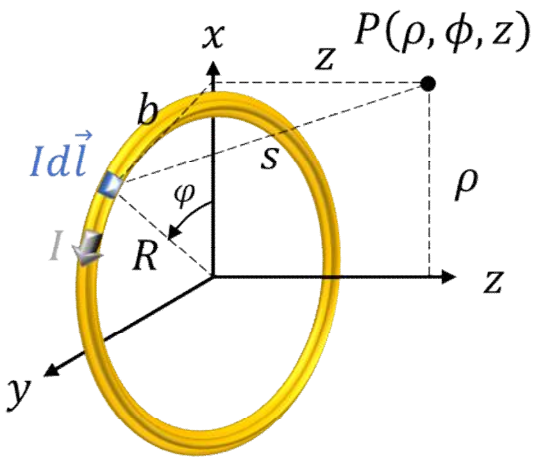


그림 72. 원형 코일이 점 P에 작용하는 자기장

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi}\oint\frac{d\vec{l}}{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi}\sqrt{\frac{R}{\rho}}\left\{\left(\frac{2}{k}-k\right)K(k)-\frac{2}{k}E(k)\right\}\hat{\phi} \tag{5}$$

· 여기서, $k^2 = \frac{4R\rho}{z^2+(R+\rho)^2}$, $K(k)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\frac{d\theta}{\sqrt{1-k^2\sin^2\theta}}$는 제1종 완전 타원 적분, $E(k)=\int_0^{\frac{\pi}{2}}\sqrt{1-k^2\sin^2\theta}\,d\theta$는 제2종 완전 타원 적분을 의미함.

$$\vec{B}=\nabla\times\vec{A}=\frac{1}{\rho}\begin{vmatrix}\hat{\rho} & \hat{\phi} & \hat{z}\\ \frac{\partial}{\partial\rho} & \frac{\partial}{\partial\phi} & \frac{\partial}{\partial z}\\ A_\rho & \rho A_\phi & A_z\end{vmatrix}=\frac{1}{\rho}\left(-\frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial z}\hat{\rho}+\frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial\rho}\hat{z}\right)=B_\rho\hat{\rho}+B_z\hat{z} \tag{6}$$

· 원형 코일의 반경 방향 자기장

$$B_\rho(\rho,z)=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial z}=\frac{\mu_0 Iz}{2\pi\rho\sqrt{z^2+(R+\rho)^2}}\left(\frac{z^2+\rho^2+R^2}{z^2+(R-\rho)^2}E(k)-K(k)\right) \tag{7}$$

· 원형 코일의 축 방향 자기장

$$B_z(\rho,z)=\frac{1}{\rho}\frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial\rho}=\frac{\mu_0 I}{2\pi\sqrt{z^2+(R+\rho)^2}}\left(\frac{R^2-z^2-\rho^2}{z^2+(R-\rho)^2}E(k)+K(k)\right) \tag{8}$$

- **솔레노이드의 외부 자기장 식 유도**

  · 원형 코일의 자기장을 길이 방향(z축)으로 적분하면 솔레노이드의 외부 자기장을 유도할 수 있음.

  · 솔레노이드의 단위 길이당 감은 수 n과 점 P와 코일 사이의 거리 $\zeta = z - z'$를 고려하면 벡터 퍼텐셜의 세기 A_ϕ는 다음과 같은 식으로 유도됨.

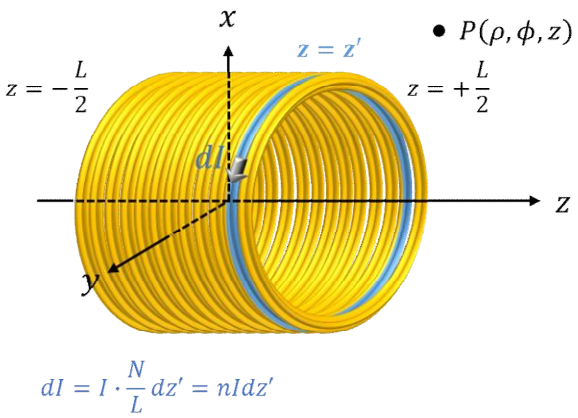


그림 73. 솔레노이드가 점 P에 작용하는 자기장

$$A_\phi = \frac{\mu_0 nI}{4\pi} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^{2\pi} \frac{R\cos\phi d\phi dz'}{\sqrt{(z-z')^2 + R^2 + \rho^2 - 2R\rho\cos\phi}} = \frac{\mu_0 nI}{4\pi} \int_{\zeta_+}^{\zeta_-} \int_0^{2\pi} \frac{-R\cos\phi d\phi d\zeta}{\sqrt{\zeta^2 + R^2 + \rho^2 - 2R\rho\cos\phi}} \quad (9)$$

$$A_\phi = \frac{\mu_0 nI}{2\pi} \sqrt{\frac{R}{\rho}} \left[\zeta k' \left(\frac{k'^2 + h^2 - h^2 k'^2}{h^2 k'^2} K(k') - \frac{1}{k'^2} E(k') + \frac{h^2 - 1}{h^2} \Pi(h, k') \right) \right]_{\zeta_-}^{\zeta_+} \quad (10)$$

  · 여기서, $\zeta_\pm = z \pm \frac{L}{2}$, $h^2 = \frac{4R\rho}{(R+\rho)^2}$, $k'^2 = \frac{4R\rho}{\zeta^2 + (R+\rho)^2}$, $K(k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k'^2 \sin^2\theta}}$는 제1종 완전 타원 적분, $E(k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k'^2 \sin^2\theta}\, d\theta$는 제2종 완전 타원 적분, $\Pi(h, k') = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{(1 - h^2 \sin^2\theta)\sqrt{1 - k'^2 \sin^2\theta}}$는 제3종 완전 타원 적분을 의미함.

  · 솔레노이드의 반경 방향 자기장

$$B_\rho(\rho, z) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial z} = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} = -\frac{\partial A_\phi}{\partial \zeta} = \frac{\mu_0 nI}{2\pi} \sqrt{\frac{R}{\rho}} \left[\frac{k'^2 - 2}{k'} K(k') + \frac{2}{k'} E(k') \right]_{\zeta_-}^{\zeta_+} \quad (11)$$

  · 솔레노이드의 축 방향 자기장

$$B_z(\rho, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial(\rho A_\phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\rho} A_\phi + \frac{\partial A_\phi}{\partial \rho} = \frac{\mu_0 nI}{4\pi\sqrt{R\rho}} \left[\zeta k' \left(K(k') + \frac{R - \rho}{R + \rho} \Pi(h, k') \right) \right]_{\zeta_-}^{\zeta_+} \quad (12)$$

- **원형 코일과 솔레노이드 코일의 자기장 합성**

  · 감은 수 N_i을 고려하면 솔레노이드 코일을 원형 코일로 모사할 수 있음.

  · 그림 3과 같이 M개의 코일이 나열된 경우, z축 위의 거리가 z만큼 떨어진 점 P에서 합성된 자기장 식은 다음과 같음.

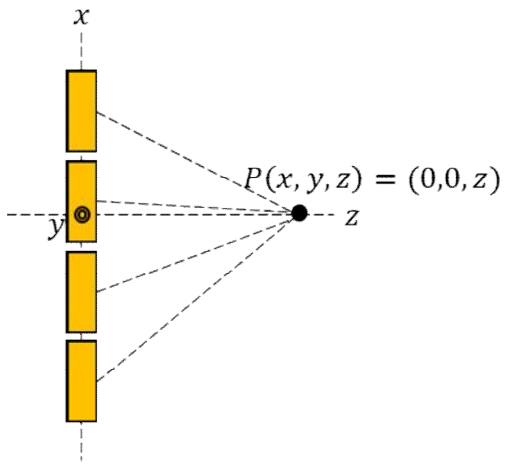


그림 74. 다중 코일로부터 점 P에 작용하는 자기장

  · x축 방향 자기장

$$B_x(\rho_i,\phi_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 N_i I_i z}{2\pi\rho_i\sqrt{z^2+(R+\rho_i)^2}}\left(\frac{z^2+\rho_i^2+R^2}{z^2+(R-\rho_i)^2}E(k_i)-K(k_i)\right)\cos\phi_i \tag{13}$$

  · y축 방향 자기장

$$B_y(\rho_i,\phi_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 N_i I_i z}{2\pi\rho_i\sqrt{z^2+(R+\rho_i)^2}}\left(\frac{z^2+\rho_i^2+R^2}{z^2+(R-\rho_i)^2}E(k_i)-K(k_i)\right)\sin\phi_i \tag{14}$$

  · z축 방향 자기장

$$B_z(\rho_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 N_i I_i}{2\pi\sqrt{z^2+(R+\rho_i)^2}}\left(\frac{R^2-z^2-\rho_i^2}{z^2+(R-\rho_i)^2}E(k_i)+K(k_i)\right) \tag{15}$$

  · 같은 방식으로 단위 길이당 감은 수 n_i인 M개의 솔레노이드 코일이 나열된 경우, z축 위의 거리가 z만큼 떨어진 점 P에서 합성된 자기장 식은 다음과 같음.

  · x축 방향 자기장

$$B_x(\rho_i,\phi_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 n_i I_i}{2\pi}\sqrt{\frac{R}{\rho_i}}\left[\frac{k_{i,\pm}^2-2}{k_{i,\pm}}K(k_{i,\pm})+\frac{2}{k_{i,\pm}}E(k_{i,\pm})\right]_{\zeta_-}^{\zeta_+}\cos\phi_i \tag{16}$$

· y축 방향 자기장

$$B_y(\rho_i,\phi_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 n_i I_i}{2\pi}\sqrt{\frac{R}{\rho_i}}\left[\frac{k_{i,\pm}^2-2}{k_{i,\pm}}K(k_{i,\pm})+\frac{2}{k_{i,\pm}}E(k_{i,\pm})\right]_{\zeta_-}^{\zeta_+}\sin\phi_i \tag{17}$$

· z축 방향 자기장

$$B_z(\rho_i,z)=\sum_{i=1}^{M}\frac{\mu_0 n_i I_i}{4\pi\sqrt{R\rho_i}}\left[\zeta k_{i,\pm}\left(K(k_{i,\pm})+\frac{R-\rho_i}{R+\rho_i}\Pi(h_i,k_{i,\pm})\right)\right]_{\zeta_-}^{\zeta_+} \tag{18}$$

· 여기서, $k_{i,\pm}$는 ζ_+에서 $k_{i,+}$, ζ_-에서 $k_{i,-}$를 의미하며, $k_{i,\pm}$가 코일 i뿐만 아니라 ζ그림 4와 같이 완전히 같은 코일이 마주 보고 있는 경우, 중심축에서 합성 자기장의 x, y축 방향 자기장은 상쇄되며 z축 방향 자기장은 2배가 됨.

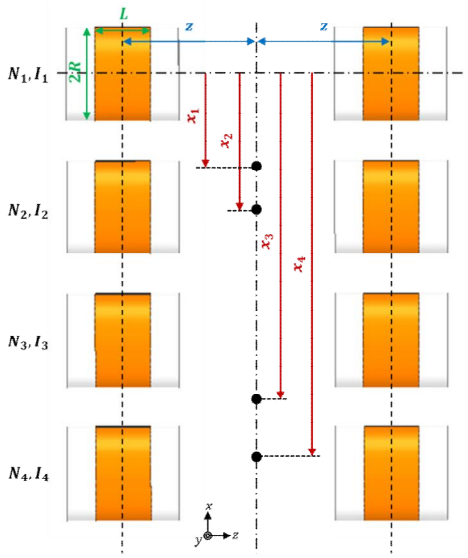


그림 75. 마주 보는 다중 코일이
중심축에 작용하는 자기장

· 계산에 사용한 솔레노이드 코일의 기하 변수 및 전류의 세기와 같은 고정 변수는 아래의 표 13과 같음.

표 13. 계산에 사용한 고정 변수

고정 변수	값
코일의 반지름 R	0.075 [m]
코일의 길이 L	0.1 [m]
중심축으로부터 코일까지의 거리 z	0.27 [m]
각 코일의 감은 수 $N_1=N_2=N_3=N_4$	468 [회]
코일 전류의 세기 $I_1=I_4$	- 2.5 [A]
코일 전류의 세기 $I_2=I_3$	10 [A]

· 첫 번째 코일의 중심축으로부터 떨어진 거리 x_i에 따라 계산된 솔레노이드 코일의 합성 자기장은 다음 표 14와 같음.

표 14. 합성 자기장 계산 결과

변수	x_1 = 0.168[m]	x_2 = 0.245[m]	x_3 = 0.587[m]	x_4 = 0.692[m]
솔레노이드 1의 반경 거리 ρ_1	0.168[m]	0.245[m]	0.587[m]	0.692[m]
솔레노이드 2의 반경 거리 ρ_2	0.077[m]	0.000[m]	0.342[m]	0.447[m]
솔레노이드 3의 반경 거리 ρ_3	0.322[m]	0.245[m]	0.097[m]	0.202[m]
솔레노이드 4의 반경 거리 ρ_4	0.567[m]	0.490[m]	0.148[m]	0.043[m]
솔레노이드 1의 방위각 ϕ_1	180°	180°	180°	180°
솔레노이드 2의 방위각 ϕ_2	0°	0°	180°	180°
솔레노이드 3의 방위각 ϕ_3	0°	0°	180°	180°
솔레노이드 4의 방위각 ϕ_4	0°	0°	0°	0°
코일 식에서 계산된 합성 자기장 $B_{z,coil}$	0.0011[T]	0.0017[T]	9.5477 ×10-4[T]	4.4455 ×10-5[T]
솔레노이드 식에서 계산된 합성 자기장 $B_{z,solenoid}$	0.0012[T]	0.0018[T]	9.8765 ×10-4[T]	1.7089 ×10-5[T]

· 계산된 솔레노이드 코일의 합성 자기장은 수 mT 정도였음.

· x_1, x_2, x_3에서는 원형 코일과 솔레노이드의 합성 자기장 오차가 적었지만 x_4에서는 오차가 큰 편임.

· x_1, x_2, x_3의 경우, 전류의 세기가 센 2, 3번째 코일이 점 P에 작용하는 자기장의 세기가 합성 자기장의 80~90%를 차지함.

· x_4의 경우는 x_1, x_2, x_3의 경우와 달리 전류의 세기가 낮은 4번째 코일이 점 P에 작용하는 자기장의 세기(-3.5254×10-4 T [coil], -3.7199×10-4 T [solenoid])와 3번째 코일이 작용하는 자기장의 세기(4.1160×10-4 T [coil], 4.0510×10-4 T [solenoid])와 큰 차이가 없음.

· 그러나 두 주요 자기장의 방향이 반대여서 합성 자기장의 세기를 작게 만듦.

· 아래 그림 76에서 볼 수 있듯이 반경 거리가 작을 때, 원형 코일과 솔레노이드 코일의 z축 방향 자기장 차이가 큰 것을 알 수 있음.

· 이러한 이유로 x_4에서 오차가 크다는 것을 판단할 수 있음.

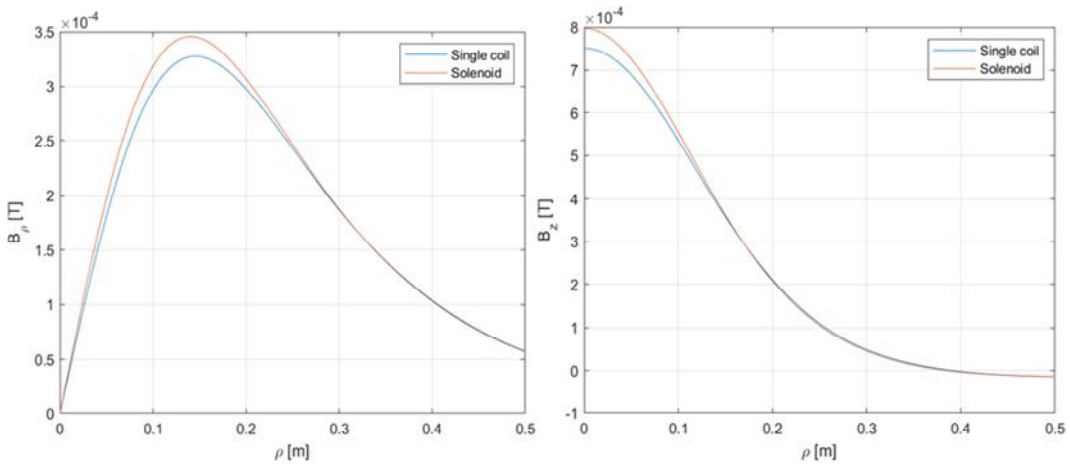


그림 76. 반경 거리에 따른 자기장 변화; (a)반경 방향 자기장 (b)길이 방향 자기장

- **솔레노이드 코일의 유효 투자율 고려**

· 솔레노이드 코일이 철이나 니켈 프레임에 감겨있는 경우, 진공 투자율 μ_0 대신 유효 투자율 μ_{eff} 을 고려해야 함.

·

· 프레임의 투자율이 μ, 프레임 면적이 S_f, 빈 부분의 면적이 S_a, 전체 면적 $S_t = S_f + S_a$일 때, 유효 투자율 μ_{eff}은 다음과 같음.

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_0 S_a + \mu S_f}{S_t} = \frac{\mu_0 \pi\left(\frac{D}{2} - t\right)^2 + \mu\left(\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \pi\left(\frac{D}{2} - t\right)^2\right)}{\pi\left(\frac{D}{2}\right)^2} \tag{19}$$

· 여기서, 프레임의 전체 지름은 D, 프레임 두께는 t임.

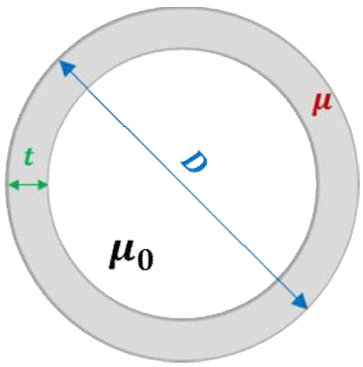


그림 77. 프레임의 단면도

· 따라서, 유효 비투자율 x은 다음과 같이 표현 가능함.

$$x = \frac{\mu_{eff}}{\mu_0} = \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^2 + \frac{4\mu}{\mu_0} \cdot \left(\frac{t}{D} - \left(\frac{t}{D}\right)^2\right) = \left(1 - \frac{2t}{D}\right)^2 + 4\mu_r \cdot \left(\frac{t}{D} - \left(\frac{t}{D}\right)^2\right) \tag{20}$$

· 프레임의 재질이 니켈일 경우, 비투자율 $\mu_r = \mu/\mu_0$=100이고 지름 D가 131.7 ㎜, 두께 t가 1.7 ㎜일 때, 유효 비투자율 x는 약 6.0456 정도임.

· 이 유효 비투자율 χ을 고려한 합성 자기장 계산 결과는 다음과 같음.

표 15. 유효 비투자율을 고려한 합성 자기장 계산 결과

변수	x_1 = 0.168[m]	x_2 = 0.245[m]	x_3 = 0.587[m]	x_4 = 0.692[m]
솔레노이드 1의 반경 거리 ρ_1	0.168[m]	0.245[m]	0.587[m]	0.692[m]
솔레노이드 2의 반경 거리 ρ_2	0.077[m]	0.000[m]	0.342[m]	0.447[m]
솔레노이드 3의 반경 거리 ρ_3	0.322[m]	0.245[m]	0.097[m]	0.202[m]
솔레노이드 4의 반경 거리 ρ_4	0.567[m]	0.490[m]	0.148[m]	0.043[m]
솔레노이드 1의 방위각 ϕ_1	180°	180°	180°	180°
솔레노이드 2의 방위각 ϕ_2	0°	0°	180°	180°
솔레노이드 3의 방위각 ϕ_3	0°	0°	180°	180°
솔레노이드 4의 방위각 ϕ_4	0°	0°	0°	0°
코일 식에서 계산된 합성 자기장 $B_{z,coil}$	0.0069[T]	0.0102[T]	0.0058[T]	2.6876 ×10-4[T]
솔레노이드 식에서 계산된 합성 자기장 $B_{z,solenoid}$	0.0072[T]	0.0107[T]	0.0060[T]	1.0331 ×10-4[T]

· 유효 투자율을 고려하게 되면 합성 자기장은 수십 mT 정도까지 도달 가능함.

· 이는 시뮬레이션 결과와 거의 유사한 값으로써 이론적으로 타겟 위치인 텐던에 도달하는 자속밀도 값에 대해 검증을 함.

- 센서 헤드 및 센서 헤드 거치대 시작품 제작

· 시뮬레이션 결과를 토대로 도출한 센서 헤드의 크기, 코일의 감는 수 등을 고려하여 센서 헤드 및 센서 헤드 거치대를 제작함.

· 센서 헤드는 Nickel alloy, Incoloy_800H 재질의 니켈 합금(Ni 30%, Fe 47%, Cr 20%)을 이용하였으며, 총 크기는 168.3Ø*203[mm]이고 코일의 두께 1.2[mm]를 고려하여 코일을 감는 홈의 두께를 7[mm], 길이를 100[mm]로 설정하였으며, 따라서 총 6 layer로 약 500번가량 감을 수 있는 센서 헤드를 제작하였음.

· 제작한 센서 헤드의 도면 및 도면에 따른 제작 사진은 다음과 같음

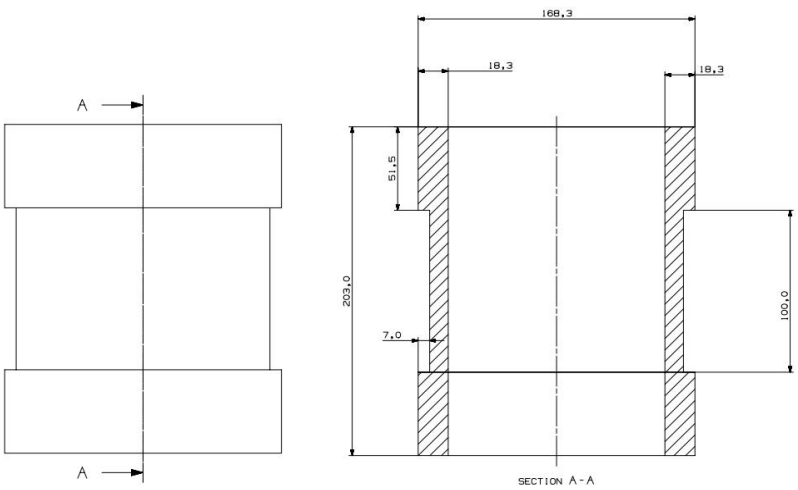


그림 78. 센서 헤드 도면




그림 79. 센서 헤드 시작품 제작 및 센서 제작에 사용한 코일

· 센서 헤드는 PSC I형 거더의 변단부 부분에 좌·우 4개씩 총 8개를 설치하기 위해 8세트를 만들었으며, 센서 헤드에 코일을 감아 EM 센서를 제작함.

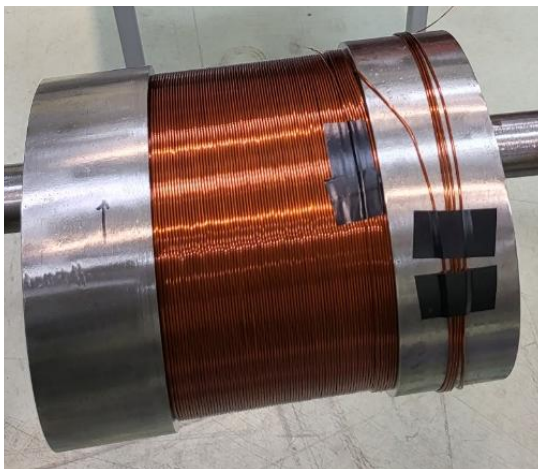


그림 80. EM 센서 제작

· 센서는 6 layer로써 총 490번가량 감았으며, 센서 하나당 무게는 30kg 정도로 한쪽 거치대당 무게는 약 120kg로 구성됨.

· 센서를 설치하기 위한 거치대의 경우 자기장에 영향을 미치지 않는 플라스틱 재질로 제작하였으며, 변단부 사이에 위치할 수 있는 높이 및 폭으로 설정함.

· 센서의 간격은 수식을 이용하여 이론적으로 검증한 결과에 따라 설정하였으며 센서의 무게를 버틸 수 있도록 선반에 올려지는 형태로 제작함.

· 제작한 거치대의 도면 및 사진은 아래의 그림과 같음.

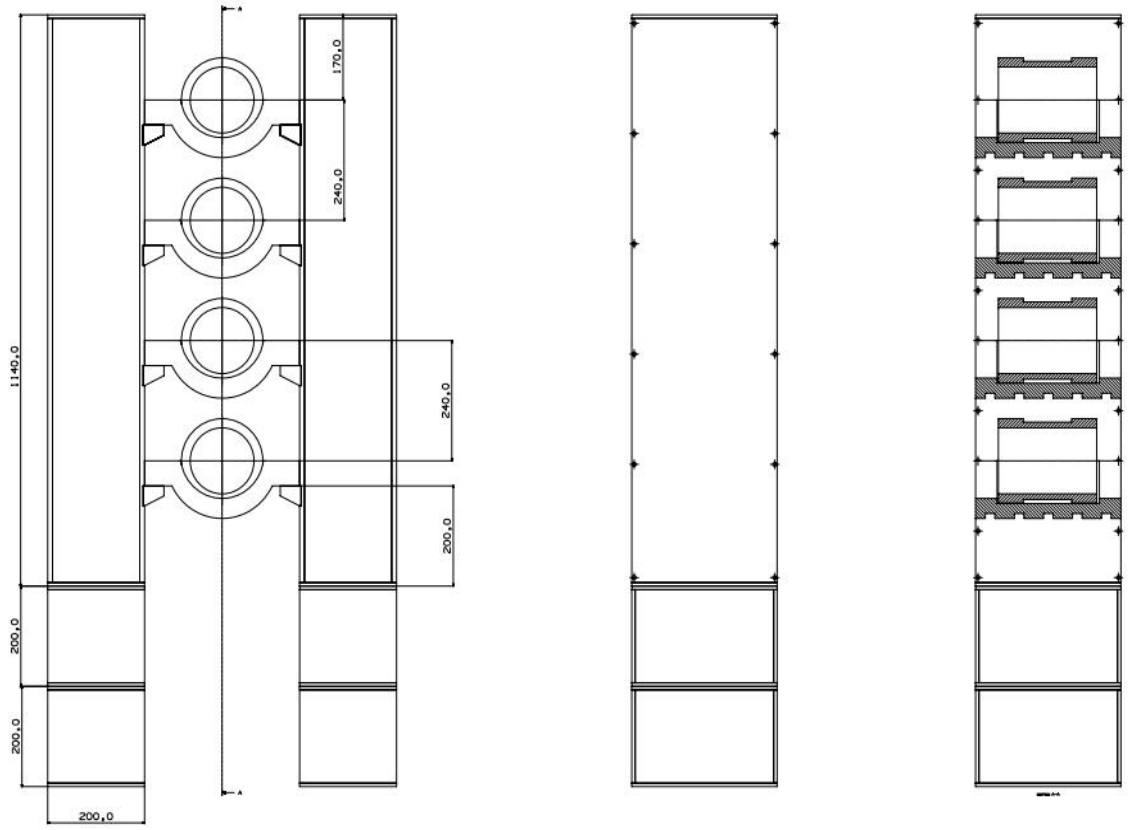


그림 81. 거치대 도면

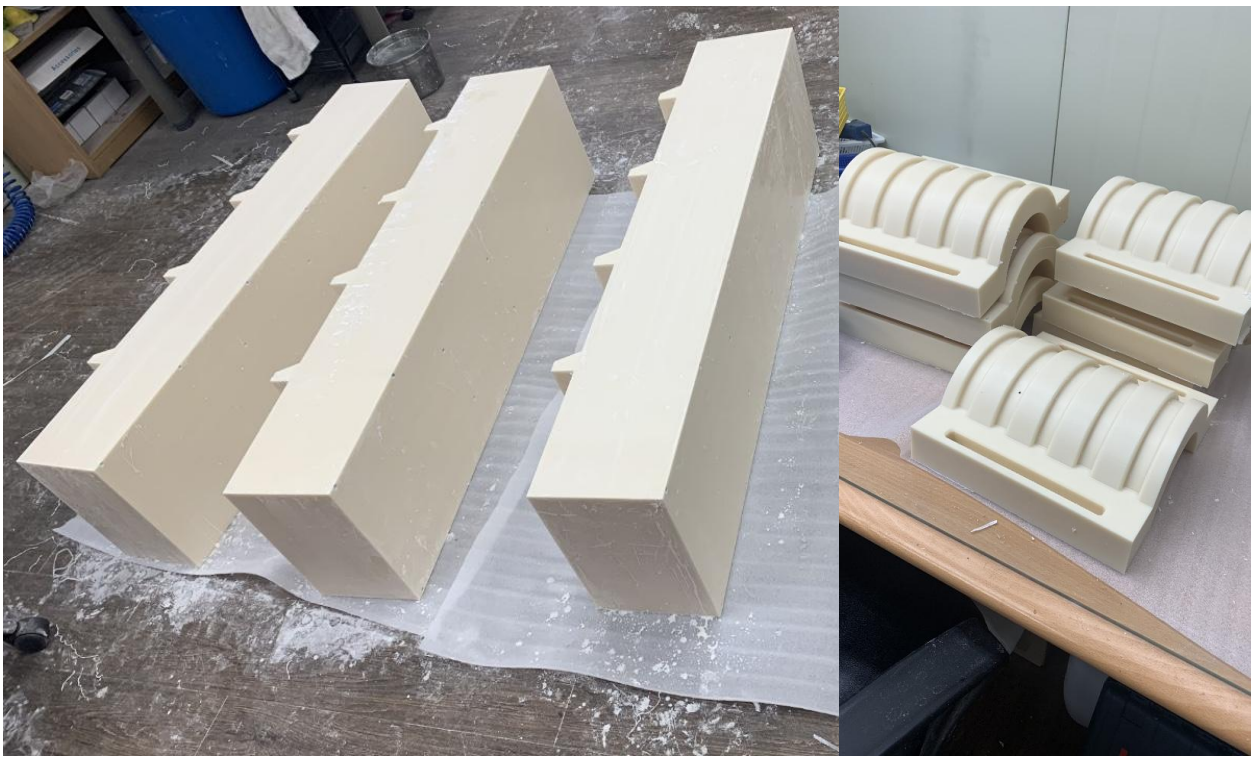


그림 82. 거치대 시작품 제작

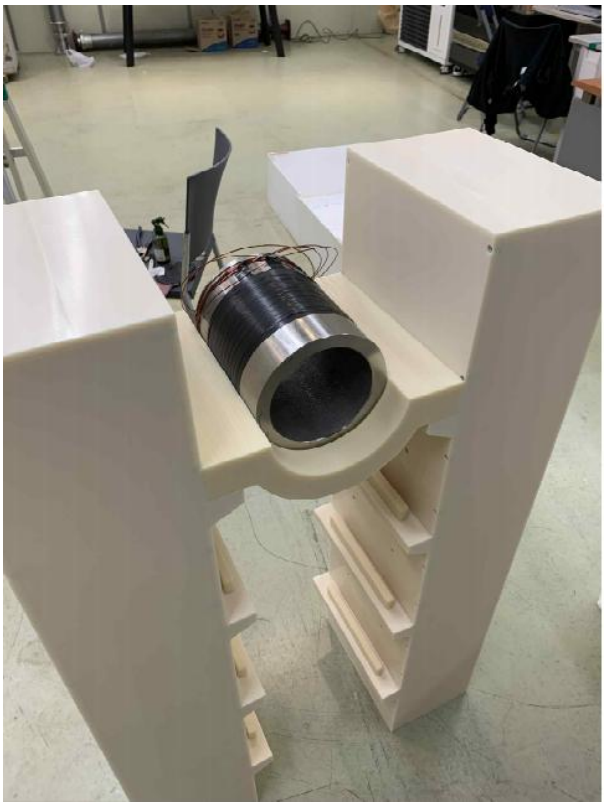


그림 83. 거치대에 EM 센서 설치 시 모습

3) 다중 계측 정보를 이용한 긴장 응력 자동 진단 기술 개발

① 1차 연도

- 외부 자화 계측 데이터 취득을 위한 계측부 설계

- **홀 센서의 원리**

· 자기장의 변화를 감지하는 센서의 종류로는 홀 센서, GMR 센서, MR 센서 등 다양한 종류의 센서가 존재함.

· 이중 본 과제에 사용한 센서는 홀 센서로써, 홀 센서는 홀 효과 또는 전류자기효과를 이용하는 센서를 말함.

· 홀 효과(Hall effect)는 1879년 미국의 물리학자 에드윈 홀(E. H. Hall)에 의해서 발견된 효과로, 자기장 속의 도체에서 자기장의 직각방향으로 전류가 흐르면 전류와 자기장 두 가지 모두 수직하는 방향으로 전기장이 나타나는 현상을 의미함.

· 그림 84와 같이 x방향으로 전류 I_y가 흐르는 가느다란 금속 또는 반도체 판에 수직으로 자계 B_z를 작용시키면, 로렌츠의 힘(Lorentz force)에 의해 전기를 운반하는 캐리어가 전류와 자계에 직각인 방향으로 그 운동이 굽혀지게 됨.

· 이로 인해 Bz, Iy에 수직인 방향으로 기전력 Ex가 발생하게 되며 전류와 자기장에 수직 방향의 양단이 전하를 띄게 되며 내부에는 전장이 형성됨.

· 이때, 로렌츠의 힘과 형성된 전장에 의해 힘의 평형을 이루면 양단에 생성된 전압은 자장에 비례하게 되며 이를 홀 효과 또는 전류자기효과라고 부름.

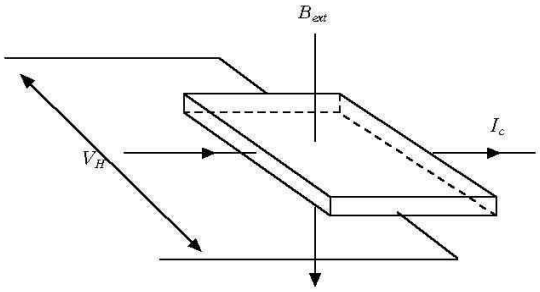


그림 84. 홀 효과

· 홀 센서는 이러한 홀 효과를 이용하여 자계의 강도나 방향을 측정하는 자기센서이며 자기장 측정용 홀소자로는 일반적으로 홀전압이 큰 반도체가 주로 사용됨.

· 특히 온도계수가 비교적 낮은 인듐과 안티몬의 화합물(InSb), 갈륨과 비소의 화합물(GaAs)등을 사용하여 제작하며 되도록 두께가 작은 평판형으로 만듦.

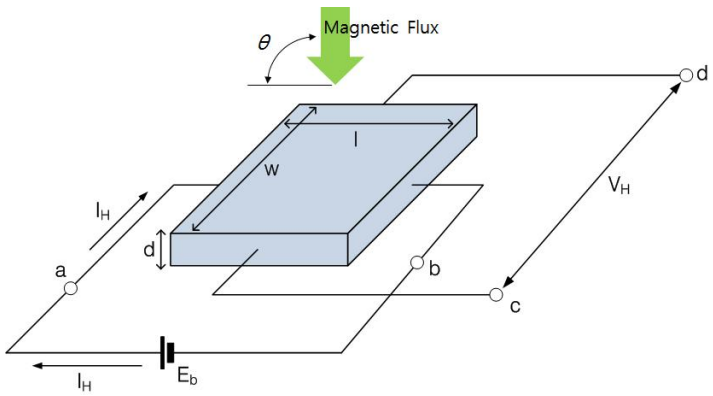


그림 85. 홀 센서의 구조 및 흐름 모식도

· 위 그림에서 홀센서의 입력단자 a-b간에 일정한 정전류 I_H를 흘려주면 출력단 c-d간에는 기전력이 발생하여 아래와 같이 자속밀도 B에 비례하는 V_H의 홀 전압이 발생됨.

· 홀센서는 자속의 수직성분만을 측정하게 되므로 자속의 값에 cosθ를 곱하여 수직 성분만을 반영하게 됨.

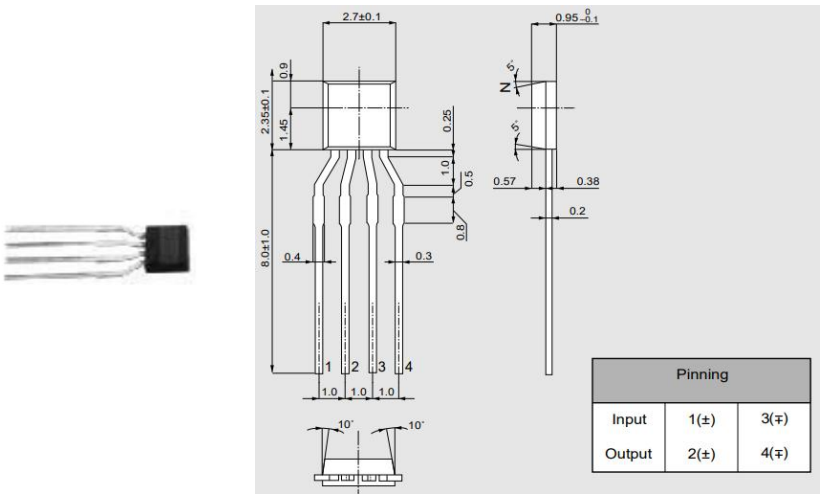
· 홀 전압을 V_H[V], 전류를 I_H[A], 자속밀도를 B[Wb], 홀 상수를 RH[m^3/As], 반도체 판의 두께를 d[m]라고 하면, 홀 전압 V_H[V]는 다음 식으로 표시됨.

$$V_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_H \cdot B\cos\theta \qquad \left[\frac{m^3}{A\cdot s}\right]\times\left[\frac{1}{m}\right]\times[A]\times\left[\frac{V\cdot s}{m^2}\right]=[V] \qquad (21)$$

- **홀 센서 기반 계측부 제작**

· 본 연구에서는 거치대에 설치하기 위해 InSb 홀 센서 HW-302B 4개를 제작하였으며, HW-302B의 경우 정전류 (constant current), 정전압 (constant voltage)구동이 가능함.

· 그림 86은 본 연구에 사용된 홀센서이며, 표 16 및 그림 87은 HW-302B의 전기적 특성 및 input voltage에 따른 output voltage를 나타낸 그래프를 의미함.



(a) (b)

그림 86. HW-302B 홀 센서; **(a)** HW-302B 홀 센서 사진 **(b)** HW-302B 홀 센서 도면 및 핀 정보

표 16. HW-302B 홀 센서의 전기적 특성

(Ta=25°C)

Item	symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Hall Voltage	V_H	Const. Voltage Drive B=50mT, Vc=IV	122		204	mV
Input Resistance	R_{in}	B=0mT, Ic=0.1mA	240		550	Ω
Output Resistance	R_{out}	B=0mT, Ic=0.1mA	240		550	Ω
Offset Voltage	V_{os}	B=0mT, Vc=IV	-7		+7	mV
Temp. Coefficient of VH	αV_H	B=50mT, Ic=5mA		-1.8		%/° C
Temp. Coefficient of Rin	αR_{in}	B=0mT, Ic=0.1mA		-1.8		%/° C
Dielectric Strength		100V D.C	1.0			MΩ

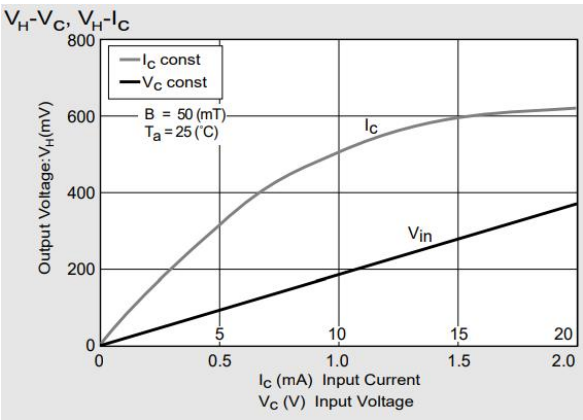


그림 87. HW-302B 홀 센서의 input voltage에 따른 output voltage

· 상기 정보를 토대로 거치대에 연결하여 신호를 계측하기 용이하게 홀 센서를 제작하였으며 제작한 홀 센서는 아래의 그림과 같음.



그림 88. HW-302B 홀 센서



그림 89. 외부 자화 EM 센서용 홀 센서 시작품 제작

· 홀 센서의 1번, 3번 핀의 경우 input 값으로써, 1.5[V] 건전지를 연결하여 주어 전원 공급 시 제약이 없게 하였음.

· 2번, 4번 핀의 경우 output 값으로써, 신호 계측기에 연결이 용이하게 하기 위해 연장 케이블을 이용하여 총 길이가 3[m] 정도 되도록 제작하였음.

① 2차 연도

- AI 기반 PSC 구조물 긴장 응력 진단 기법 개발

• PSC I형 거더 축소 시편을 이용한 외부 비접촉 EM 센서 검증

· 외부 비접촉 EM 센서 검증에 대한 실험은 총 3차례 진행되었으며, 실험은 모두 충북 음성에 있는 다올이앤씨 충북음성공장에서 진행되었음.

· 외부 비접촉 EM 센싱 시스템은 크게 자화부, 계측부 및 전류를 제공해주는 Power Amp로 구성되며 자화부의 경우 다시 EM 센서, 거치대로 구성되고 계측부는 홀 센서 및 신호 계측기로 구성됨.

· 1차 실험의 경우, 타겟 위치의 타겟 위치 확인 및 표시, 계측부와 자화부의 현장에서의 작동 여부 테스트 등을 진행하였음.

· 2차, 3차 실험의 경우 텐던에 단계별로 유압을 통해 긴장 응력을 주었으며, 단계에 도달했을 때 계측부의 데이터를 저장하는 형식으로 진행하였음.

• 1차 외부 비접촉 EM 센서 검증 실험

· 실험 진행에 앞서, 거치대에 계측부의 설치 위치 확인을 위해 프리스트레스트 구조물의 변단부 부분에 타겟 위치를 마킹하는 작업을 진행함.



그림 90. 변단부 부분 타겟 위치 마킹

· 그림 90은 텐던 위치를 표시한 그림으로써, 빨간선으로 표시된 부분이 텐던의 위치를 의미하며 이는 도면과 비교하여 위치를 산정하였음.

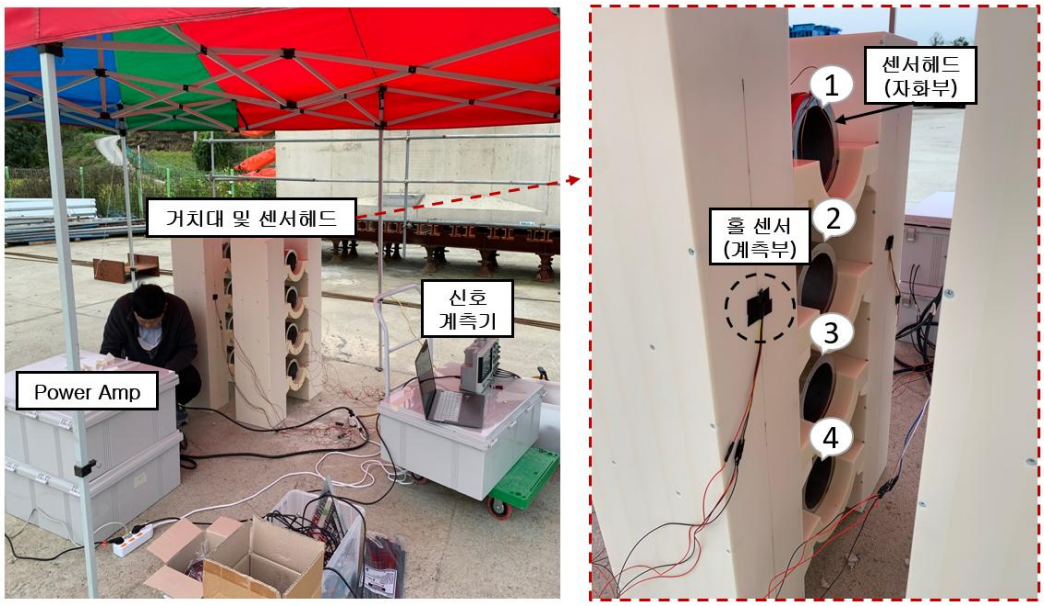


그림 91. 외부 자화 EM 센싱 시스템 설치 모습

· 외부 자화 EM 센싱 시스템의 설치 모습은 위의 그림과 같으며, 텐던의 타겟 위치에 홀 센서를 설치하였으며, 이를 신호 계측기에 설치하여 데이터를 계측하였음.

· Power Amp의 경우 220[V]의 전압을 공급받아 최대 10[A]의 전류를 센서에 인가할 수 있으며, 가운데 2번 3번 센서의 경우 +10[A]의 전류를 인가해 주었으며 1번 4번 센서는 -2.5[A]의 전류를 인가해 주어 시뮬레이션의 설정값과 같게 함.



그림 92. 타겟 위치 외부 자화 EM 센싱 시스템 설치 모습

· 그림 92는 외부 자화 EM 센싱 시스템을 PSC I형 거더의 좌·우측에 설치한 모습으로써, 좌측 솔레노이드 센서에서 발생한 자기장이 우측의 홀 센서에서 감지가 되는지 실험을 진행함.

· 데이터 확인 결과, 좌측 솔레노이드 2번, 3번에서 발생한 자기장이 우측 홀 센서에서 감지하는 것을 확인하였으며, 우측에서 발생한 자기장 또한 좌측 홀 센서에서 감지하는 것을 검증하였음.

· 이를 통해, PSC I형 거더의 외부에서 내부로 자기장이 통과하는 것을 확인할 수 있었으며, 따라서 타겟 위치의 텐던을 자화 할 수 있음을 검증하였음.

• **2차, 3차 외부 비접촉 EM 센서 검증 실험 준비**

· I형 거더 축소 시편을 이용한 외부 자화 EM 센서 성능 평가 시험을 2차, 3차에 걸쳐 진행하였으며, 실험 목적으로는 외부 자화 센서를 이용하여 I형 거더 축소 시편의 텐던 긴장 응력 변화를 계측하고자 하였음.

· 본 실험의 목표는 긴장 응력의 스텝 별 계측 성능을 평가하며, 로드셀의 긴장 응력 계측값과 외부 자화 센서의 계측값을 비교하는 것을 목적으로 하였음.

· 실험의 방법은 아래의 표에 나타낸 것과 같고, 각 스텝별로 로드셀의 긴장 응력 계측값과 홀 센서의 계측 값을 저장하였음.

표 17. 스텝 별 긴장 응력 변화

step	1	2	3	4	5	6
tension[bar]	0	100	150	200	250	333

· 실험의 방법은 아래의 표에 나타낸 것과 같고, 각 스텝별로 로드셀의 긴장 응력 계측값과 홀 센서의 계측 값을 저장하였음.

· 텐던 별 긴장 응력을 주는 순서로는 맨위의 텐던을 첫 번째로 긴장하였으며 순서대로 가운데, 맨 아래 텐던에 긴장 응력을 스텝별로 인가함.

· 아래 그림93은 실험 진행을 위해 프리스트레스트 구조물의 변단부 부분에 외부 자화 EM 센싱 시스템(계측부, 자화부, 전류 공급부)을 설치한 모습을 나타냄.



그림 93. 외부 자화 EM 센싱 시스템 설치 전경

· 그림 94는 전류 공급부를 나타내는 그림으로써, 전류 공급부는 Function Generator와 Power Amp로 구성되어 있음.

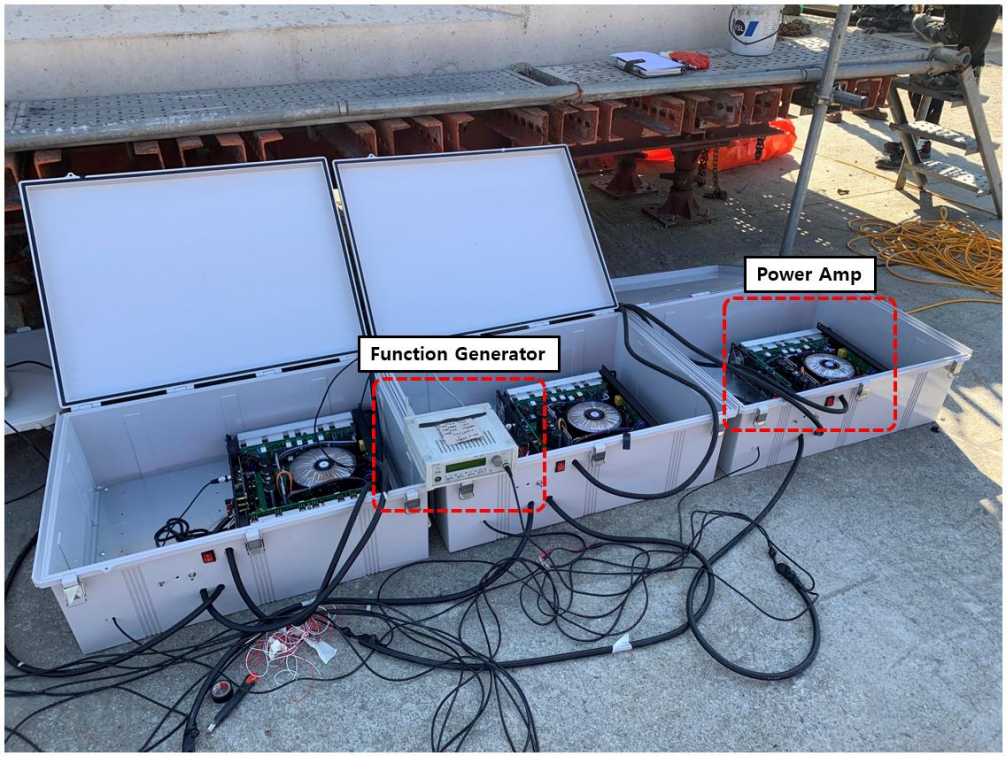


그림 94. 전류 공급부 설치 전경

· Function Generator는 Power Amp에 주파수, 파형, input voltage 값을 설정해 주는 역할을 하며, 본 실험의 설정으로는 주파수 10[Hz], 파형은 square로 설정하였으며 마지막으로 input voltage 값은 1.5[V]로 설정해 주었음.

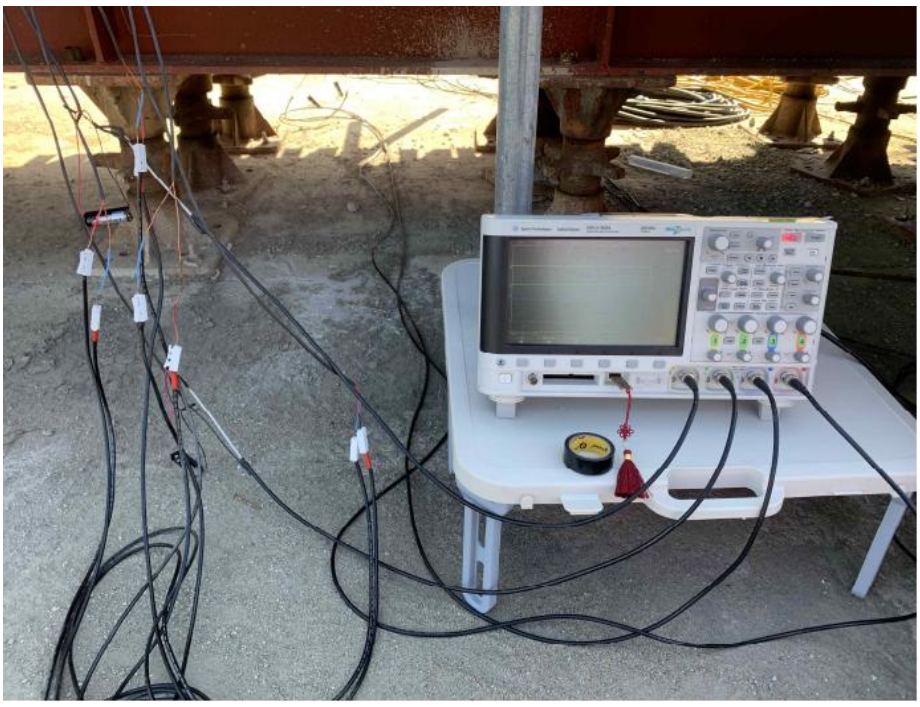


그림 95. 신호 계측기 (오실로스코프)

· 신호 계측기인 오실로스코프는 총 4개의 홀 센서의 신호를 받아들일 수 있으며, 각 홀센서의

설치 위치 및 번호는 아래의 그림과 같음.

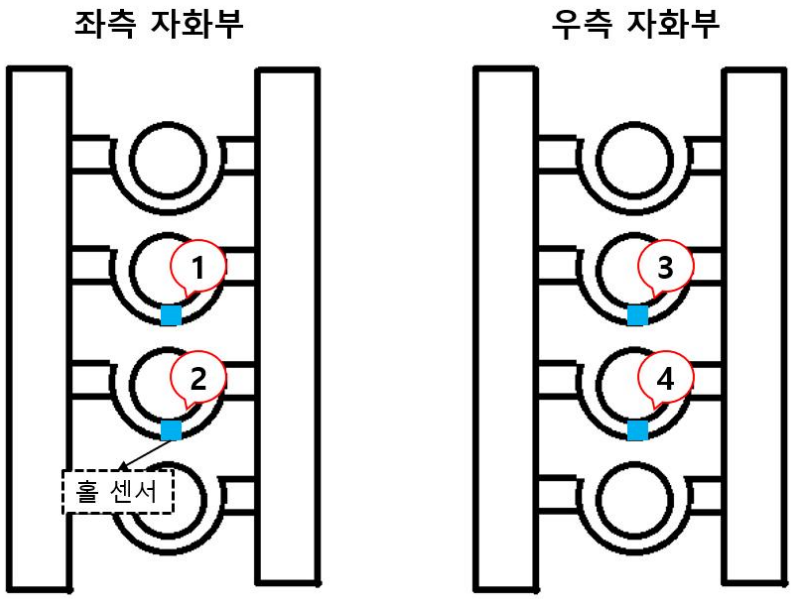


그림 96. 홀 센서 설치 위치 및 순서

· 홀 센서의 설치 위치를 기존 거치대의 좌·우측에 설치하는 것에서 센서가 설치된 아래로 변경되었는데, 이는 기존의 설치 방식인 거치대의 좌·우측의 경우 홀 센서의 신호가 변경된 설치 방식인 센서 설치 아래의 방식보다 계측 신호가 매우 약하였기 때문에 해당 위치로 변경하여 실험을 진행하였음.



(a) (b)

그림 97. 텐던의 긴장 응력 인가 모습 전경; (a)로드셀 및 인장기 설치 모습
(b)인장기 조절 유압 프레스

· 위의 그림은 텐던에 긴장 응력을 인가하기 위해 인장기 및 인장기의 인장력을 측정하기 위한 로드셀의 설치 전경이며 1번, 2번, 3번 텐던의 긴장 응력을 줄 때 모두 측정을 실시함.

- **2차 외부 비접촉 EM 센서 검증 실험 결과**

  · 2차 EM 센서 검증 실험은 1, 2, 3번 텐던 각각 스텝 별로 진행되었으며, 각 텐던에 대해 계측된 홀 센서(S-1~S-4)의 raw data의 값은 아래와 같음.

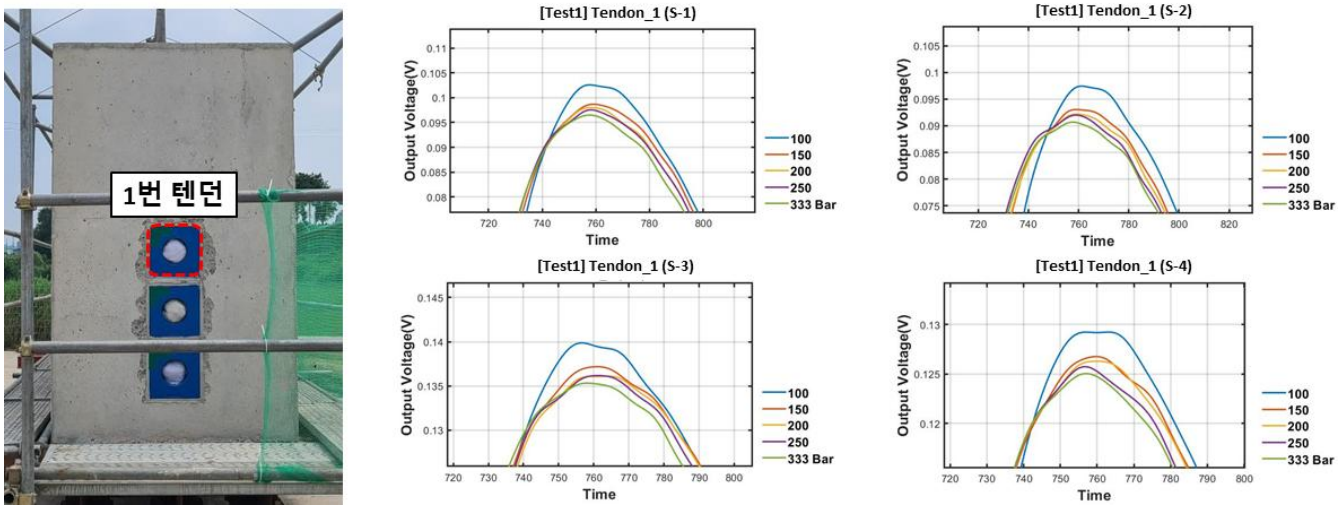


그림 98. 1번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

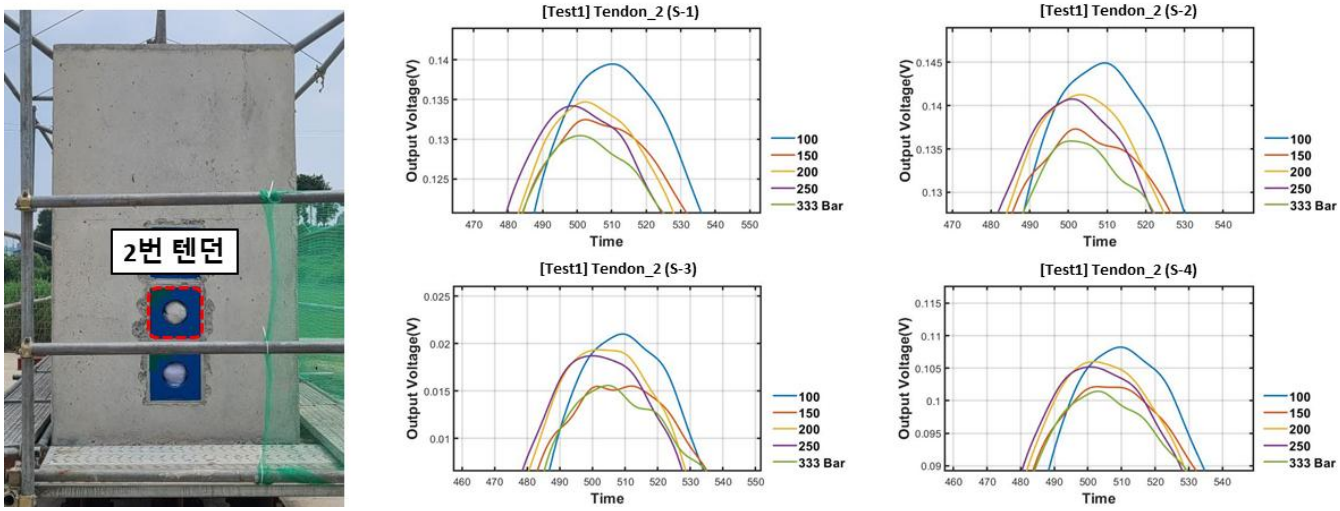


그림 99. 2번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

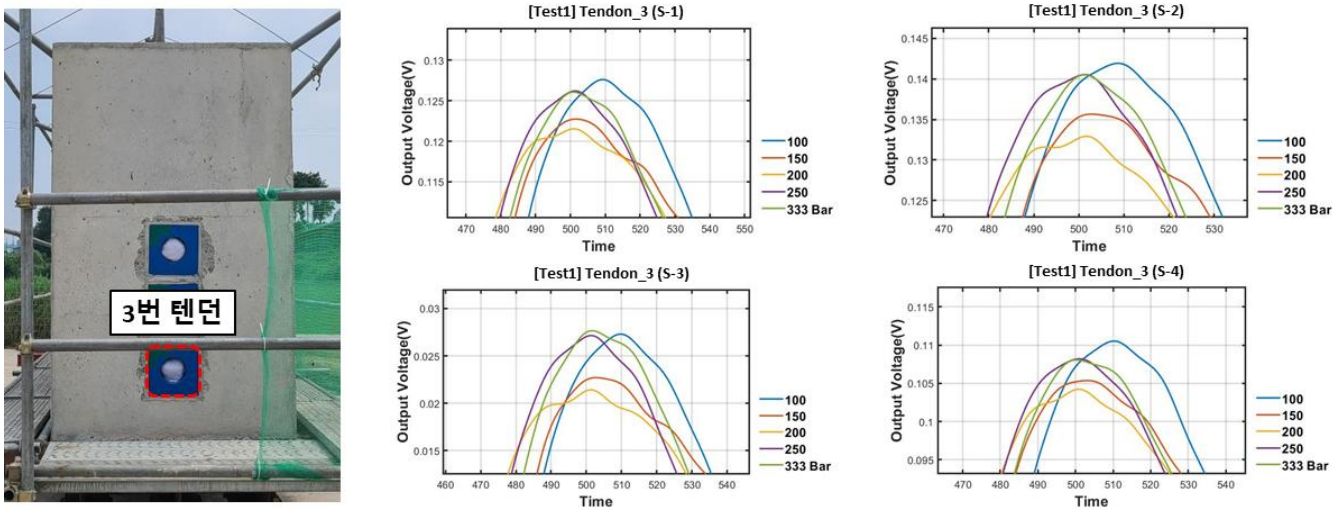


그림 100. 3번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

· 2차 EM 센서 검증 실험의 센서별 raw data를 살펴보면, 1번 텐던의 경우 100bar부터 333bar까지 긴장 응력을 줄수록 output voltage 값이 점차 낮아지는 경향을 보여줌.

· 2번 텐던의 경우 100bar부터 333bar까지 긴장 응력을 줄수록 output voltage 값이 점차 낮아지는 그래프의 경향을 보여주지만, 자화가 1번 텐던과 비교하였을 때 충분하지 않아 250bar의 데이터의 경향이 1번 텐던과는 다른 경향을 보임.

· 3번 텐던의 경우 1번, 2번 텐던과 비교하였을 때 가장 낮은 수치의 자화 정도를 보이므로, 3번 텐던의 raw data는 경향성을 띤다고 보기 힘듦.

• **3차 외부 비접촉 EM 센서 검증 실험 결과**

· 3차 EM 센서 검증 실험은 2차 실험과 동일하게 진행하였으며, 3차 실험에 대한 홀 센서의 raw data 값은 아래와 같음.

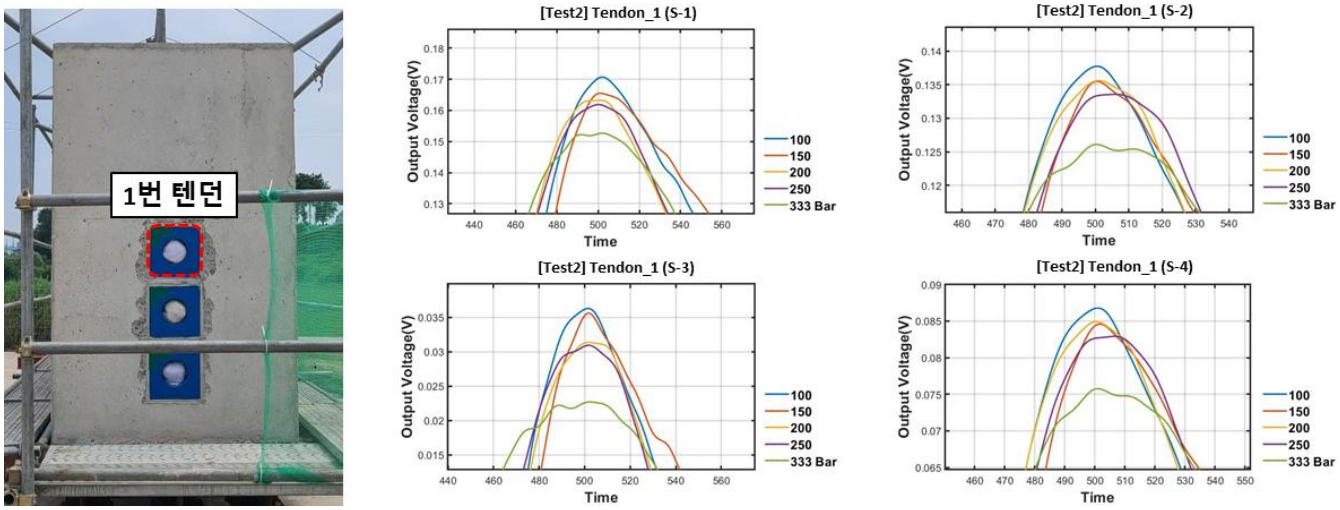


그림 101. 1번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

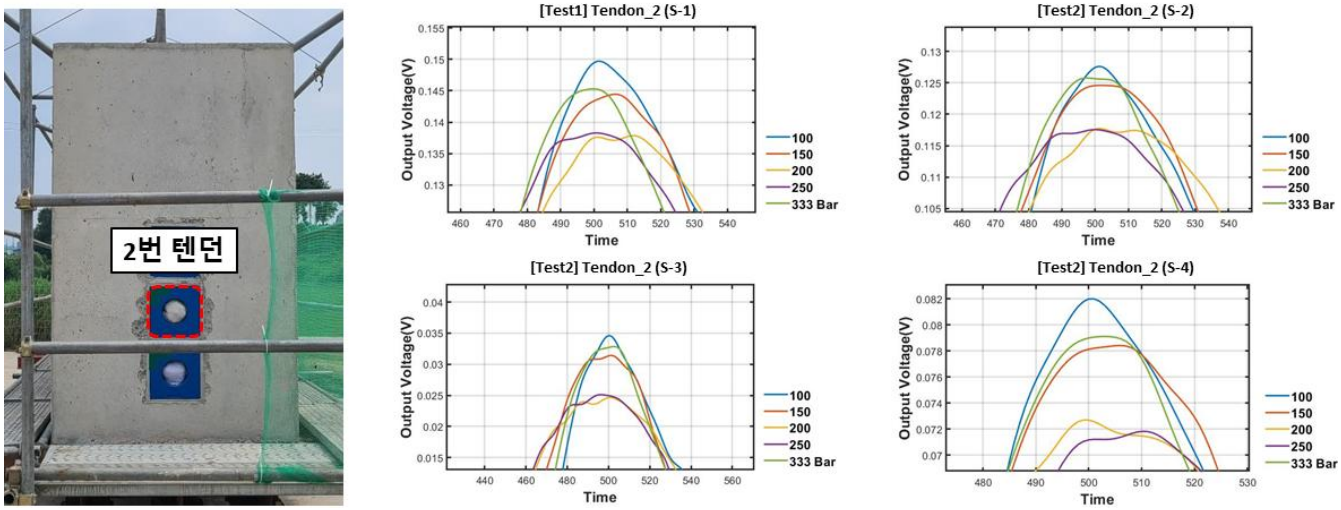


그림 102. 2번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

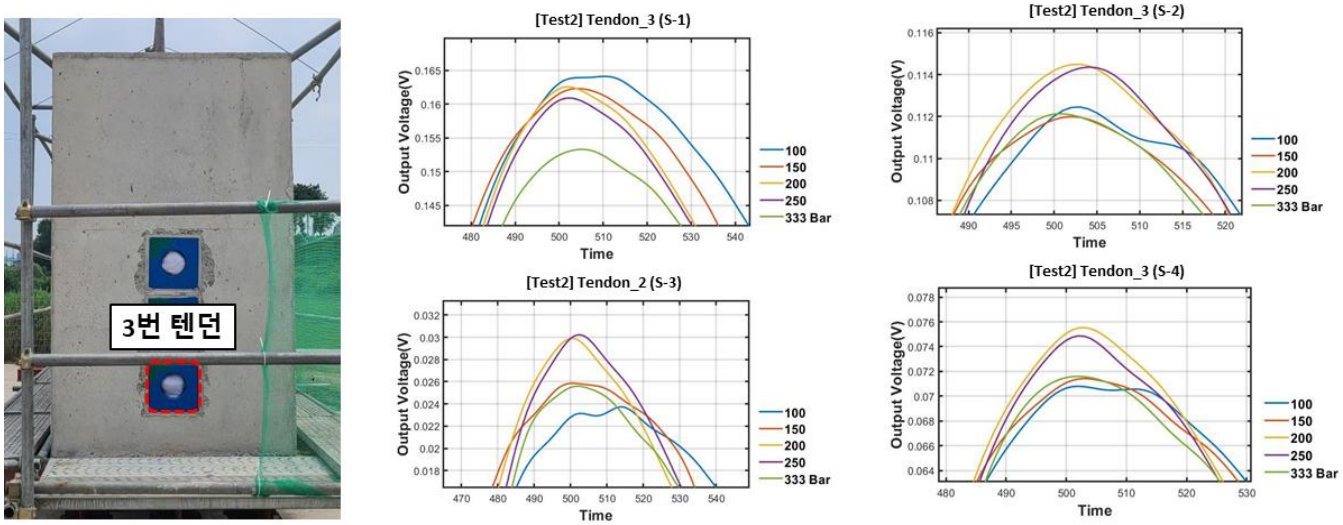


그림 103. 3번 텐던에 대한 센서별 raw data 그래프

- 3차 EM 센서 검증 실험의 센서별 raw data 그래프를 살펴보면 전체적으로 2차 실험 때와 동일한 양상을 보이는 것을 확인함.

- raw data의 경우, 경향성을 보이긴 하지만 일정한 경향성을 띤다고 보기 힘들며, 홀 센서의 계측 데이터마다 데이터의 범위도 다르므로 데이터의 가공을 통해 정량적인 값을 도출하고자 함.

- 아래의 그림은 2차, 3차 외부 비접촉 EM 센서실험에서 1~4번 홀 센서의 tension 별 계측 데이터의 평균값을 모두 더해준 뒤, 그 값의 면적을 구한 그래프로써, value 값에 따른 tension의 값을 얻을 수 있음.

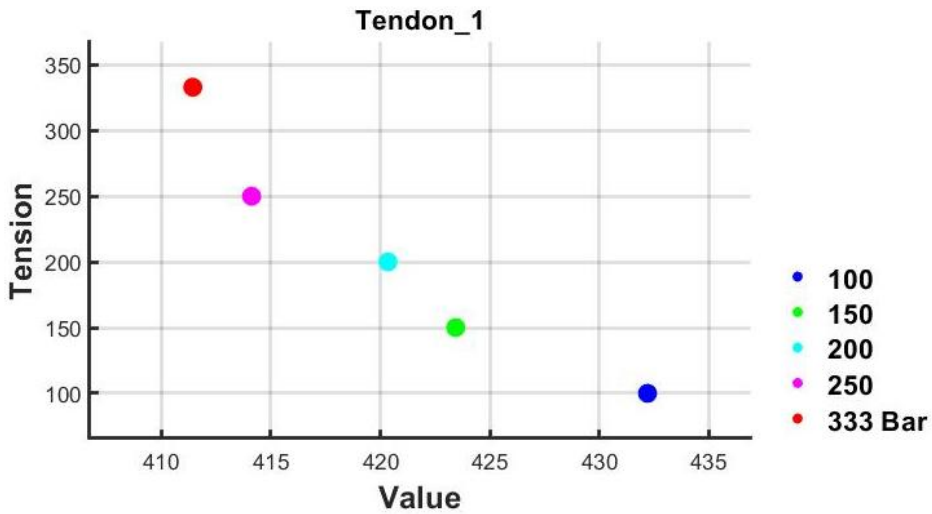


그림 104. 2차 실험 1번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

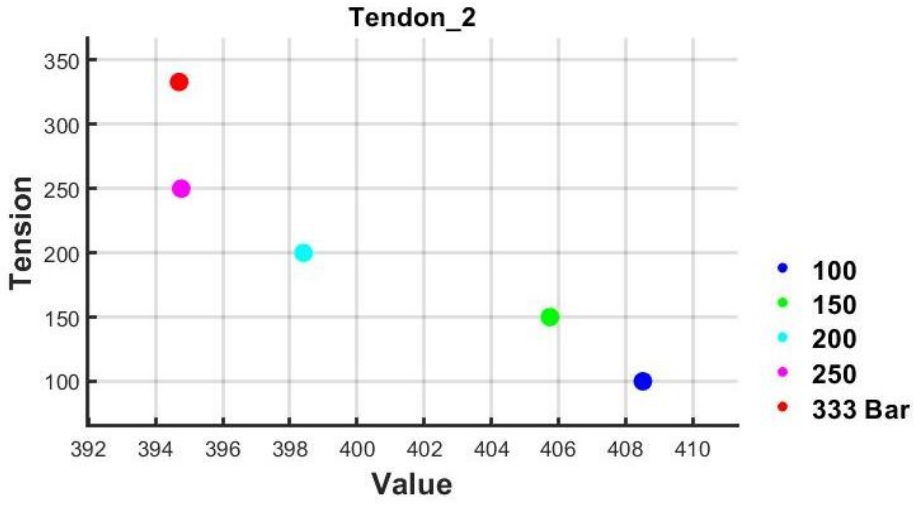


그림 105. 2차 실험 2번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

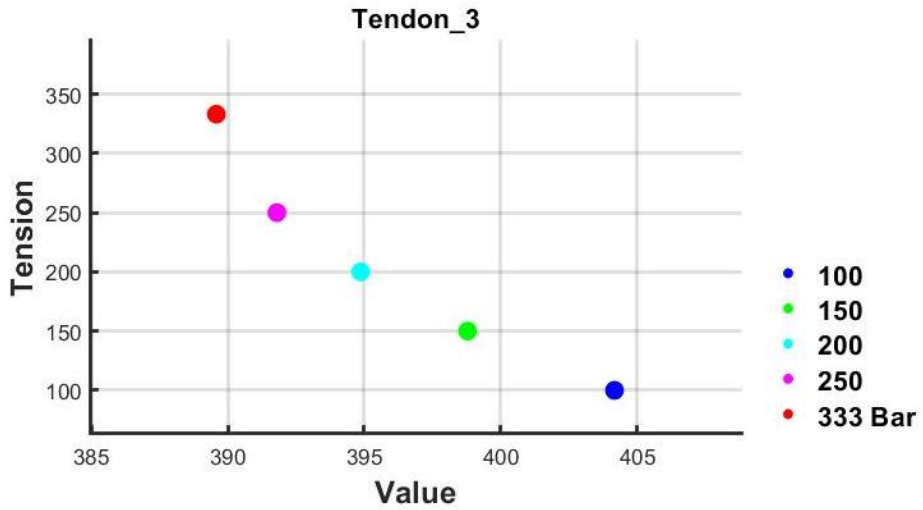


그림 106. 2차 실험 3번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

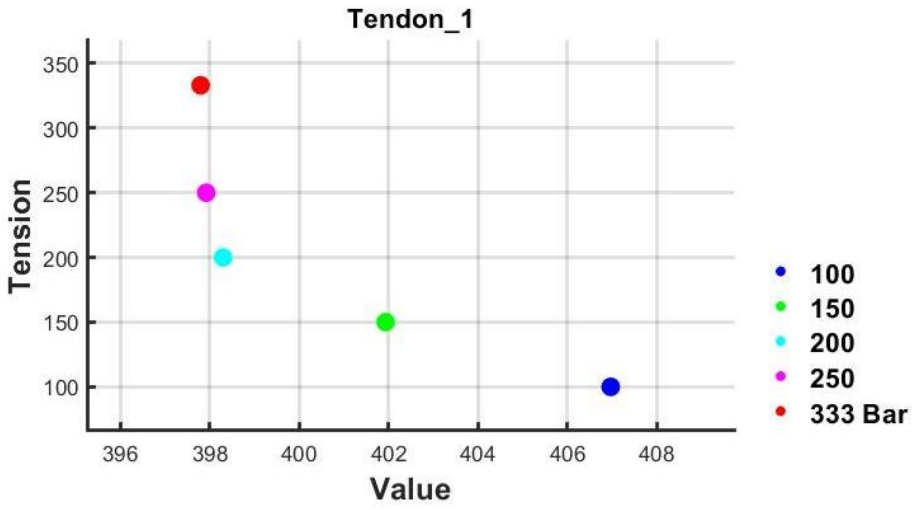


그림 107. 3차 실험 1번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

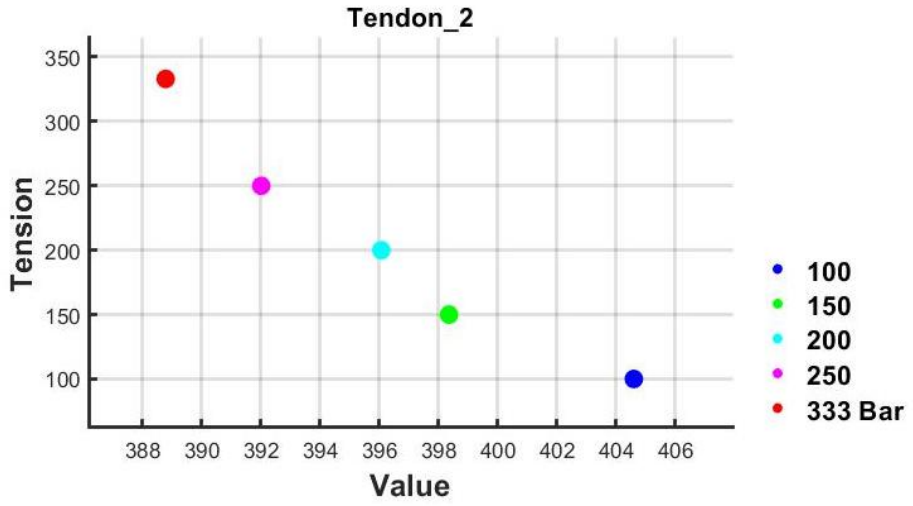


그림 108. 3차 실험 2번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

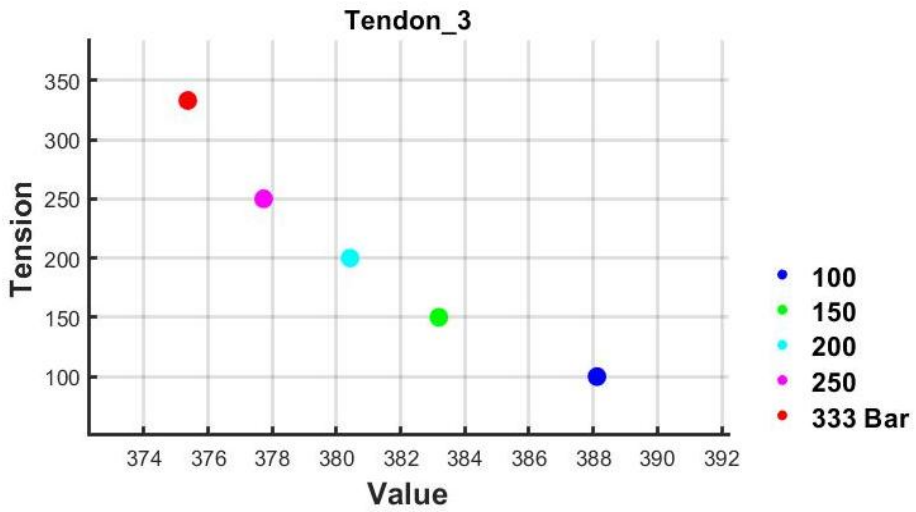


그림 109. 3차 실험 3번 텐던의 계측 데이터 가공을 통한 value 값에 따른 tension의 변화 추이

- 데이터 가공을 통해 나타낸 그래프의 경우 raw data와 비교하였을 때 보다 가시적이며 정량적인 값을 나타내고 있는 것을 확인할 수 있음.

- 하지만 계측기에서 저장하는 시간에 따라 value 값이 바뀔 수 있어, value 값이 가장 큰 100bar를 기준으로 하여 150, 200, 250, 333bar의 value 값을 나눠 비율로 나눔.

- 2차 시험과 3차 시험 데이터의 1~3번 텐던에 해당하는 value 값의 비율에 따른 tension 그래프에 모두 표현하여 정량적인 값을 보이는지 확인하고자 하였으며, 그 결과는 아래의 그림과 같음.

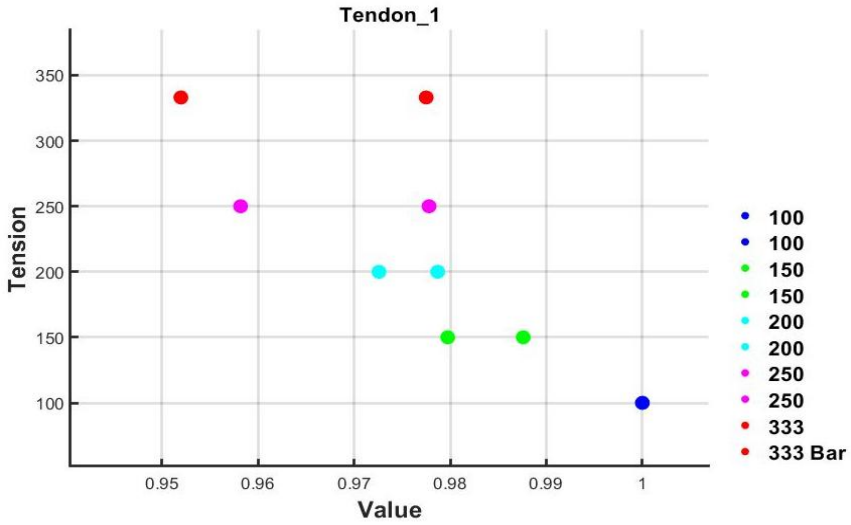


그림 110. 2차, 3차 실험의 1번 텐던 계측 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이

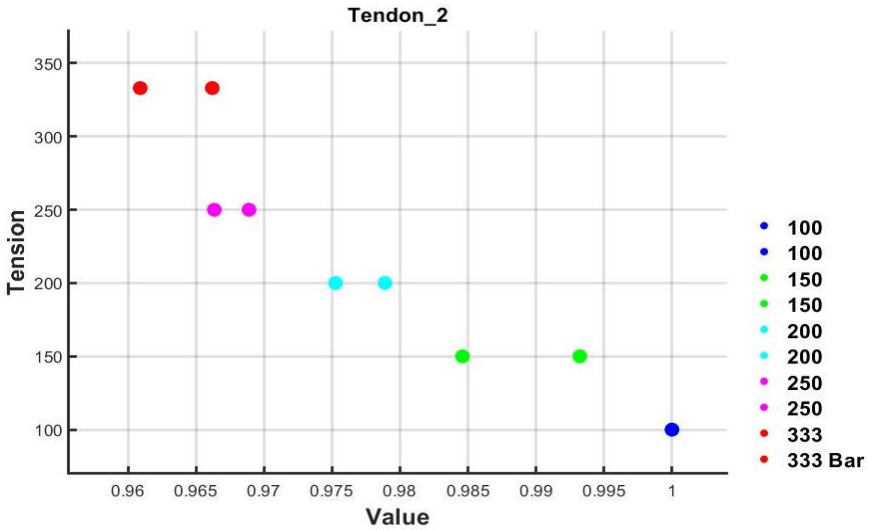


그림 111. 2차, 3차 실험의 2번 텐던 계측 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이

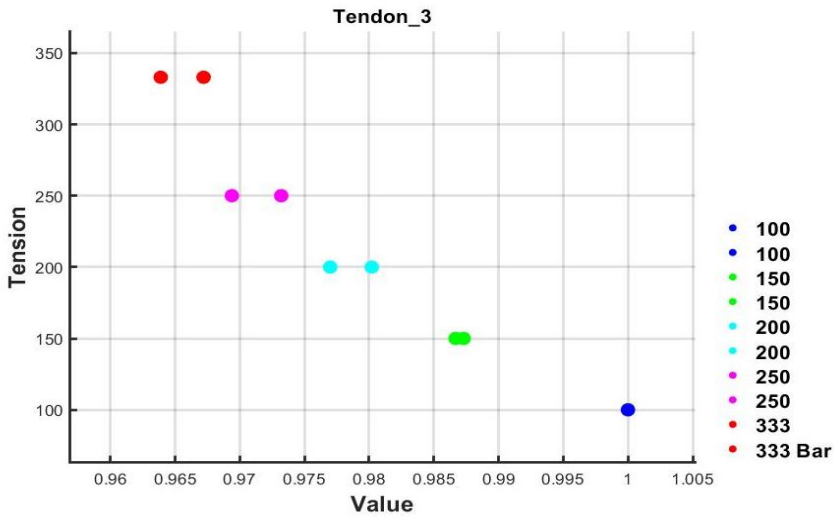


그림 112. 2차, 3차 실험의 3번 텐던 계측 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이

· value 값의 비율로 그래프를 나타낸 결과 그래프를 비율로 나타내지 않았을 때와 비교하여 경향을 살펴보았을 때 보다 정량적인 수치를 보이는 것을 확인함.

· 하지만 그림 110의 333bar와 250bar에 대한 그래프를 보면 정량적인 수치를 보이고 있지 않으며, 이를 이용한 긴장 응력 추정 역시 어려움을 보인다고 판단함.

· 따라서, 보다 정량적인 결과를 도출하고자 하였으며 이에 온도 보상을 통해 온도에 따른 value 값의 변화를 최소화하고자 함.

- **철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 알고리즘 개발**

· 계측된 데이터에서 철근 및 쉬스에 의한 자기이력 소거 알고리즘 개발
· 시뮬레이션을 통해 실거더 축소 모델의 철근 및 쉬스에 의한 자기이력 발생량 산출

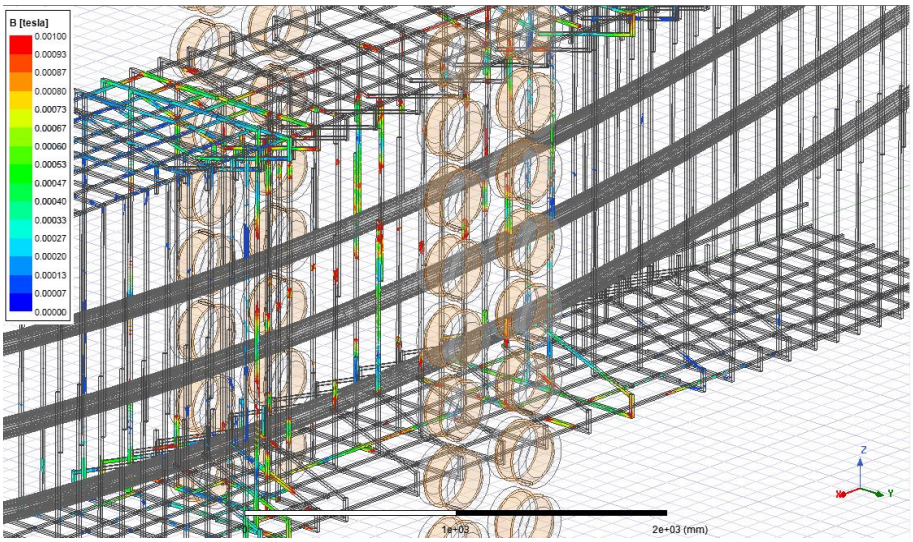


그림 113. 실거더 축소 모델 철근 및 쉬스 자기이력 발생량 산출

· 시뮬레이션 결과 값을 바탕으로 각 센서 데이터에서 계측된 데이터의 철근 및 쉬스에 의한 자기이력 소거

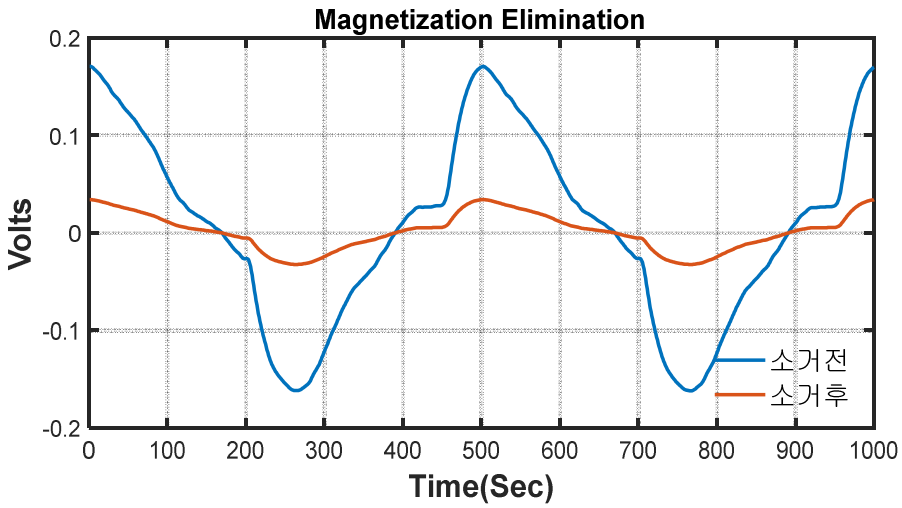
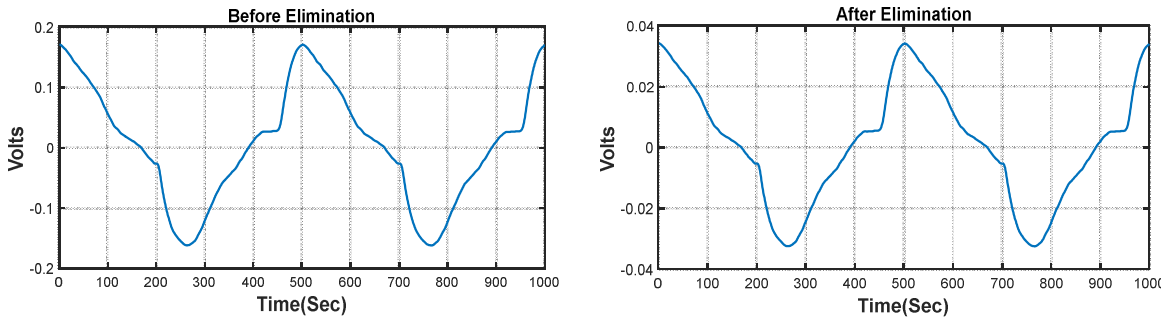


그림 114. 철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 전후 데이터 비교

· 소거 전후 데이터 비교시 철근에 의한 자화로 인해 전체적인 출력값은 줄어들었으나 신호데이터의 변화 자체는 없었음.



(a) 소거 전 데이터 (b) 소거 후 데이터

그림 115. 철근 및 쉬스에 의한 자기 이력 소거 전후 데이터 비교

- **온도 보상 데이터 취득 실험**

· EM 센서의 코일에 전류를 인가할 경우, 코일의 온도가 상승하게 되고 코일의 온도 상승 시 코일의 저항이 증가하게 됨.

· 따라서, 2차, 3차 실험에서 취득한 계측 데이터의 정량화를 위해 온도 보상이 필요하다고 판단하여 아래 그림과 같이 실험실에서 온도 보상에 대한 실험을 진행함.

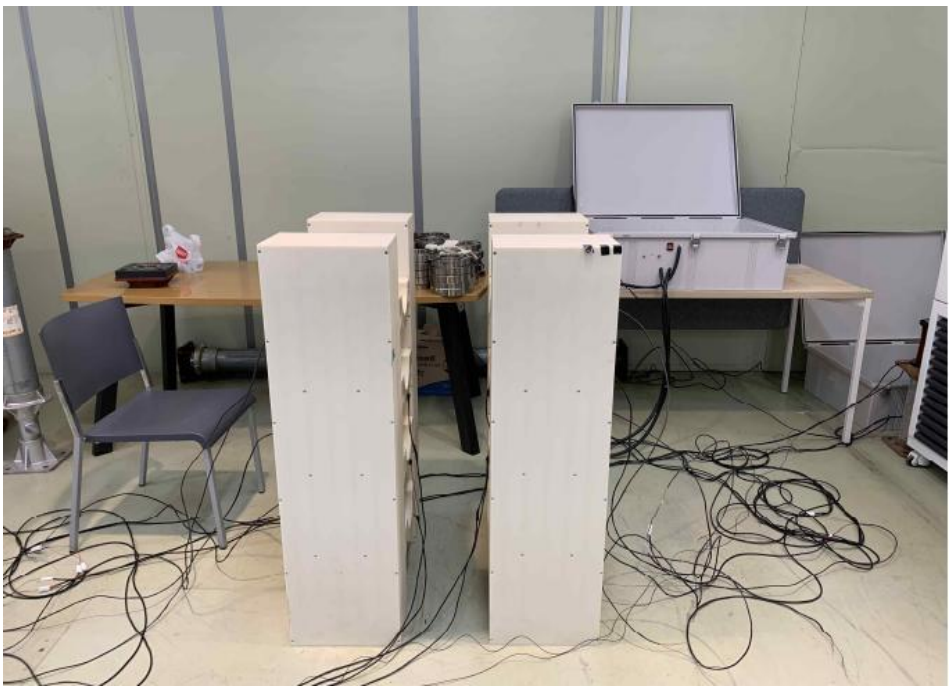


그림 116. 온도 보상을 위한 온도 값에 따른 센서별 raw data 취득 실험

· 온도 보상은 2차, 3차 외부 비접촉 EM 센서 실험의 설정 세팅과 동일하게 하였으며, 프리스트레스트 구조물의 변단부 부분의 거리와 동일한 거리에 거치대 및 센서를 설치하여 온도 상승에 따른 센서별 raw data를 취득함.

· 실험을 통해 계측한 EM 센서 코일의 온도 상승은 다음과 같음.

표 18. 코일 온도 상승 계측 값

step	1번 센서 헤드	2번 센서 헤드	3번 센서 헤드	4번 센서 헤드
1	21.3	38.1	31.6	18.3
2	21.4	49.5	35.5	19.3
3	22.1	59.6	43	19.4
4	22.8	66.2	46.5	20.7
5	23.3	71.2	51.5	20.8
6	24	80	55.4	22.1
7	24.4	84.3	58.7	22.8
8	24.7	87.6	60.6	22.9
9	25.1	94.6	65.2	22.9
10	25.5	97.2	65.8	23.4
11	25.2	100.2	69	23.8
12	25.9	105.6	71.3	22.9
13	26	106.1	72.3	22.7
14	26.4	110.7	73.3	22.9
15	26.8	114.7	77.6	22.8
16	27.4	122.9	84.5	24.5
17	28	123.2	85.9	24.8
18	28.5	127.4	89.6	28
19	29.3	128.5	90	27.9
20	29.6	133.1	91.4	27.4
21	31.1	138	92	28.8
22	31.1	141.9	98.7	30.5
23	31.3	146.5	103.4	32.5

- 코일의 온도 상승 계측은 좌측의 거치대에 설치된 센서 4개의 코일 부분의 온도 상승을 계측한 것으로서, 맨 위의 센서 헤드를 1번 센서로 설정하였으며 아래 순서대로 2번, 3번, 4번 센서 헤드로 설정하였음.

- 코일의 온도 상승 계측 값을 살펴본 결과, 전류가 2.5[A] 인가되는 1번, 4번 센서 헤드의 경우 온도 상승 폭이 크지 않았으며, 8[A]가 인가되는 2번, 3번 센서 헤드의 온도 상승 폭이 큰 것을 확인함.

- 따라서, 온도 보상은 상승 폭이 제일 큰 2번 센서 헤드의 온도 상승 기준으로 x축을 설정하였으며, 스텝별 peak 값을 추출해 센서 각각의 온도 보상 식을 도출하였으며 그 결과는 다음과 같음.

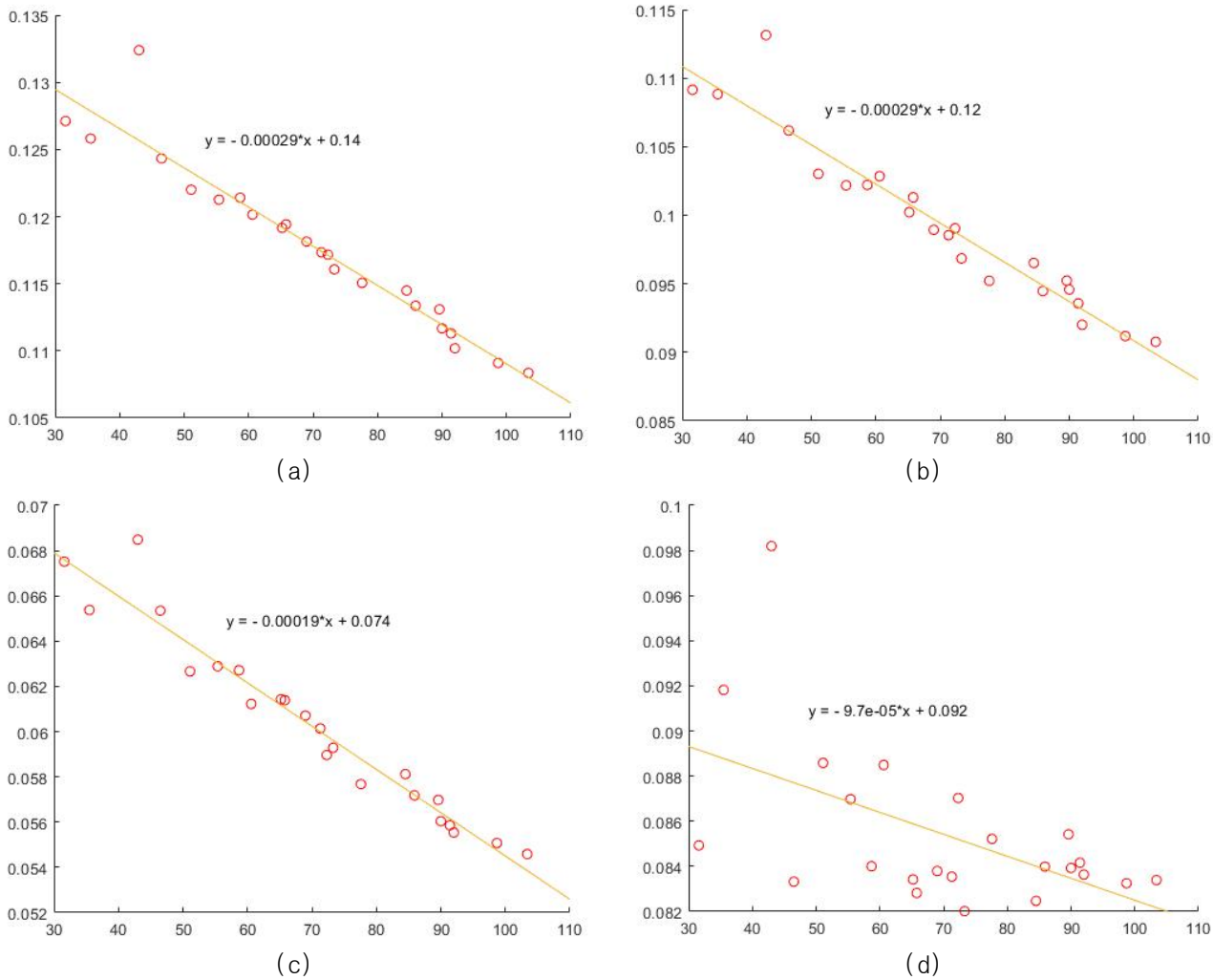


그림117. EM 센서별 온도에 따른 그래프 추이; **(a)**1번 **(b)**2번 **(c)**3번 **(d)**4번

- 그림 115의 그래프의 x축이 온도, y축이 output voltage 값을 의미하며 코일 온도가 증가할 수록 저항이 높아져 output voltage 값이 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있음.

- 그림 115의 (a)~(d)에 나타낸 식을 통해 EM 센서별 온도에 따른 온도 보상 식을 알 수 있으며, 해당 식의 R^2 값은 (a):0.927, (b):0.926, (c):0.947, (d):0.3으로써, (d)의 온도 보상 식을 제외한 (a)~(c)의 온도 보상 식은 신뢰성이 높다고 할 수 있음.

- 이에, 2차, 3차 외부 비접촉 EM 센서실험에서 계측한 EM 센서 온도를 도출해낸 센서별 온도 보상 식의 x에 적용해 값을 빼주어 온도 보상을 진행함.

• **텐던별 긴장 응력 추정.**

- 온도 보상을 한 데이터를 토대로 raw data의 value 값에 따른 tension을 구하는 방법으로 value 값에 따른 tension의 값의 그래프를 아래와 같이 구함.

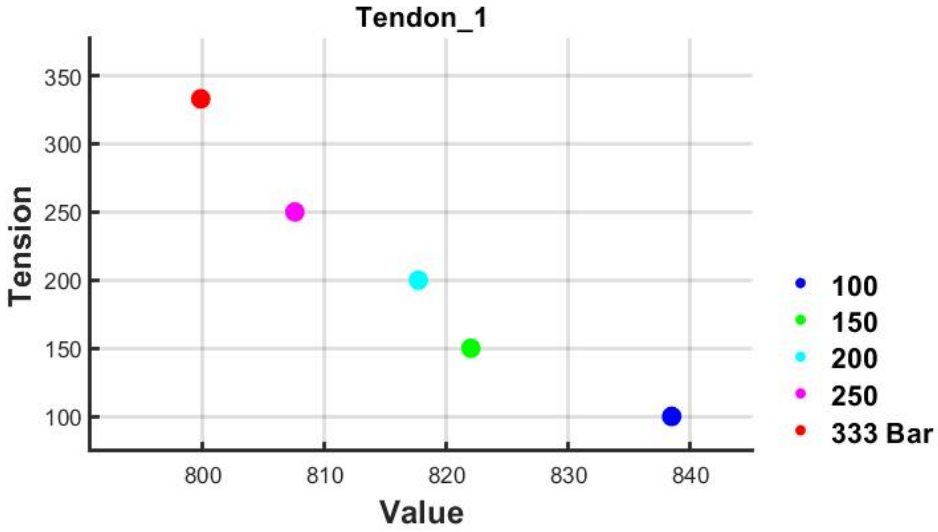


그림 118. 2차 실험의 1번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

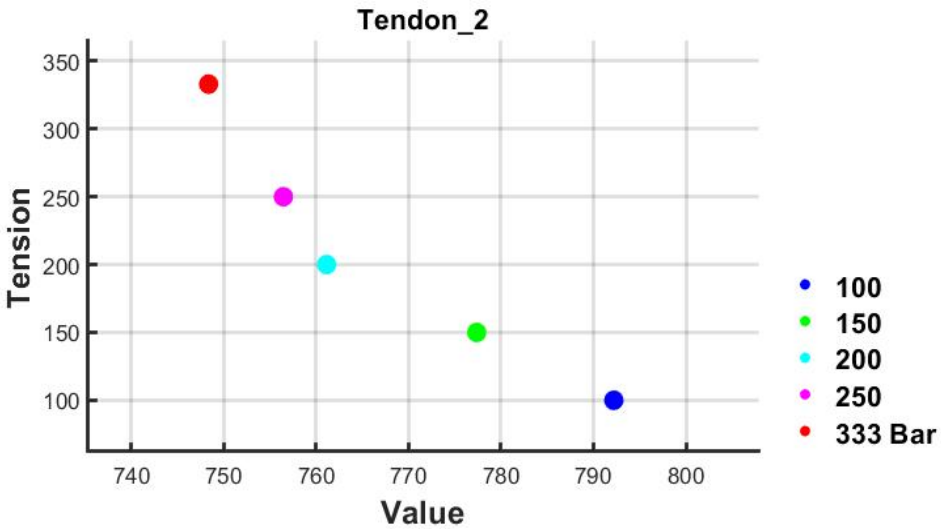


그림 119. 2차 실험의 2번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

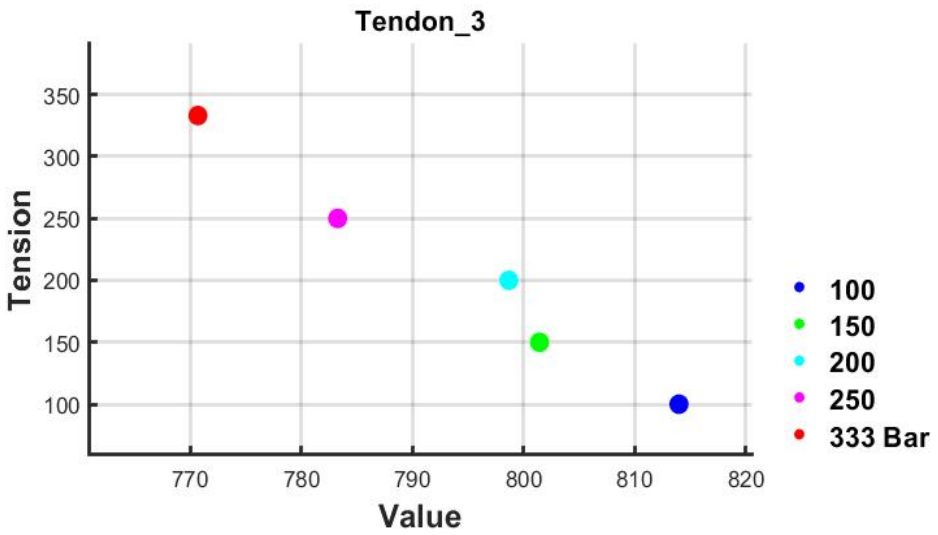


그림 120. 2차 실험의 3번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

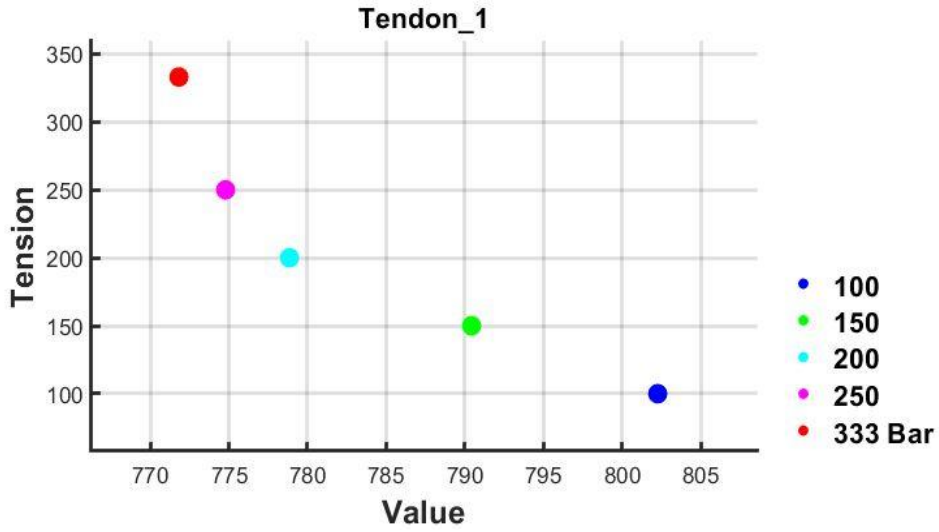


그림 121. 3차 실험의 1번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

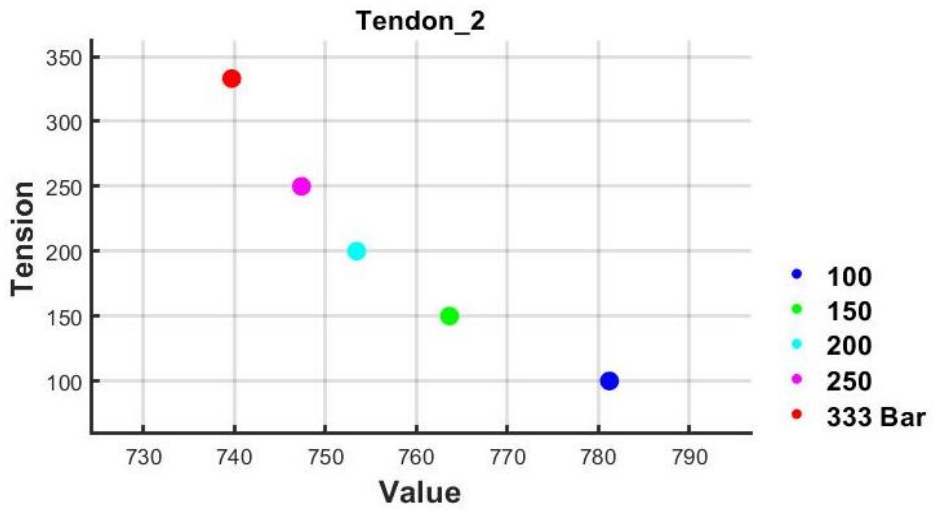


그림 122. 3차 실험의 2번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

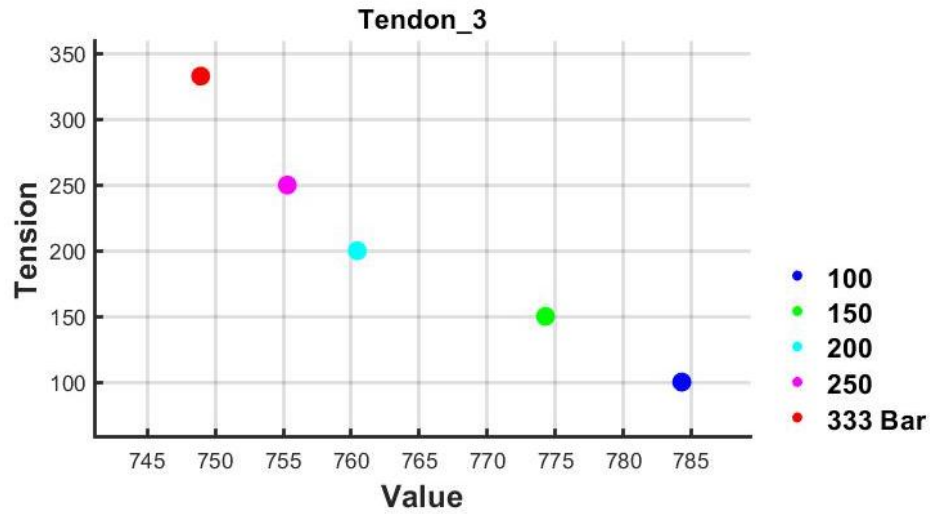


그림 123. 3차 실험의 3번 텐던의 value 값에 따른 tension의 변화 추이

· 온도 보상을 하지 않은 데이터와 상기 그래프를 비교하여 보았을 때 보다 정략적인 값을 나타내는 것을 확인하였으며 온도 보상 데이터 또한, 100bar의 value 값을 기준으로 하여 그 외 tension 값을 나눠 value의 비율로 그래프를 나타냄.

· raw data와 동일한 방식으로 텐던별로 하나의 그래프에 2차, 3차 실험의 온도 보상 데이터를 함께 나타내어 경향성을 확인하기 쉽게 하였음.

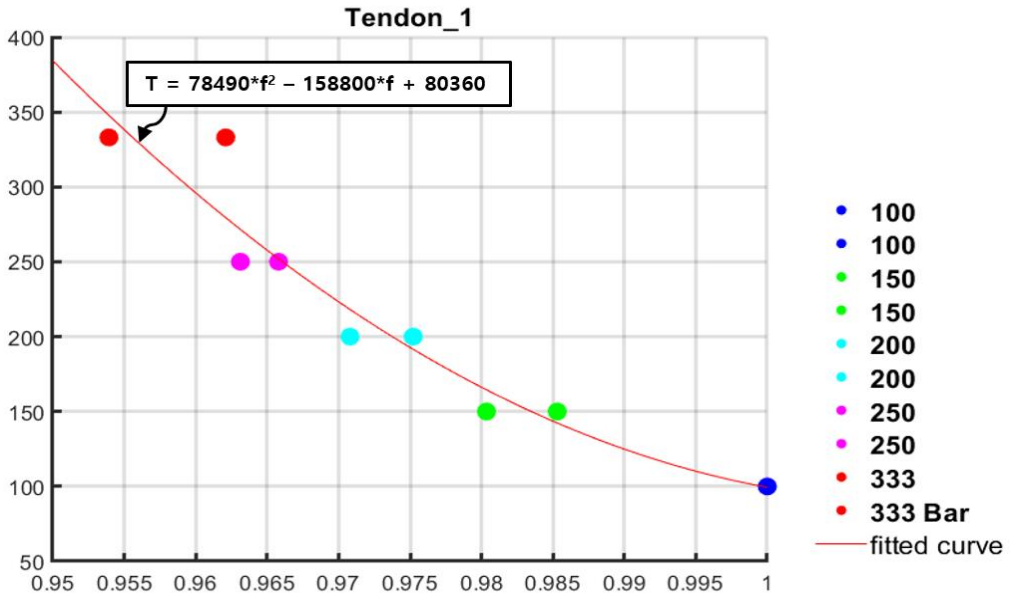


그림 124. 2차, 3차 실험의 1번 텐던 계측 온도 보상 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이; T:Tension, f:factor

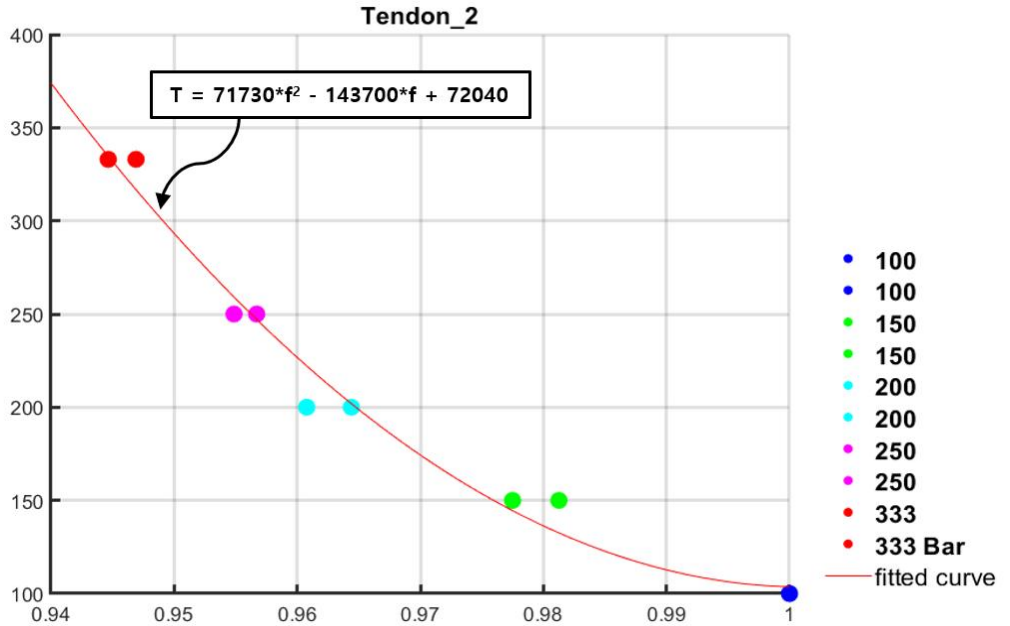


그림 125. 2차, 3차 실험의 2번 텐던 계측 온도 보상 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이; T:Tension, f:factor

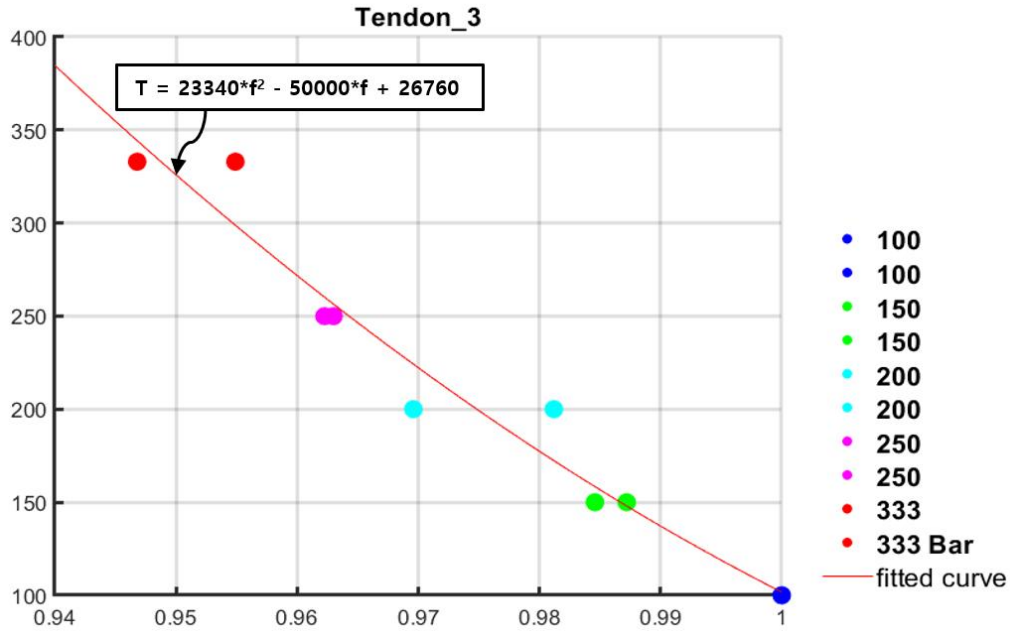


그림 126. 2차, 3차 실험의 3번 텐던 계측 온도 보상 데이터의 가공을 통한 value 값의 비율에 따른 tension의 변화 추이; T:Tension, f:factor

- value 값의 비율로 그래프를 나타내었을 때, 보다 뚜렷한 경향성을 보이는 것을 확인하였으며, 온도 보상 데이터의 경우 raw data와 비교하였을 때 정량적인 값을 나타내는 것을 확인할 수 있음.

- 또한, 각 tension 별 value의 오차율을 확인해 보았을 때 1번 텐던의 추세선의 R^2 값은 0.9349, 2번 텐던은 0.9815, 3번 텐던은 0.9558로써, 이는 2~7% 이내이며 본 연구에서 목표로 설정한 값인 10%를 만족하는 것을 확인함.

- 따라서, value 값의 비율로 tension 값의 추정을 분포를 통해 유추할 수 있으며, 이를 이용하여 프리스트레스트 구조물의 텐던 잔존 긴장 응력의 추정이 가능함을 검증함.

- **인공지능을 활용한 긴장 응력 자동 진단 기법**

- ANN을 활용한 긴장 응력 자동진단 알고리즘 개발을 위하여 다음과 같이 알고리즘을 구성함

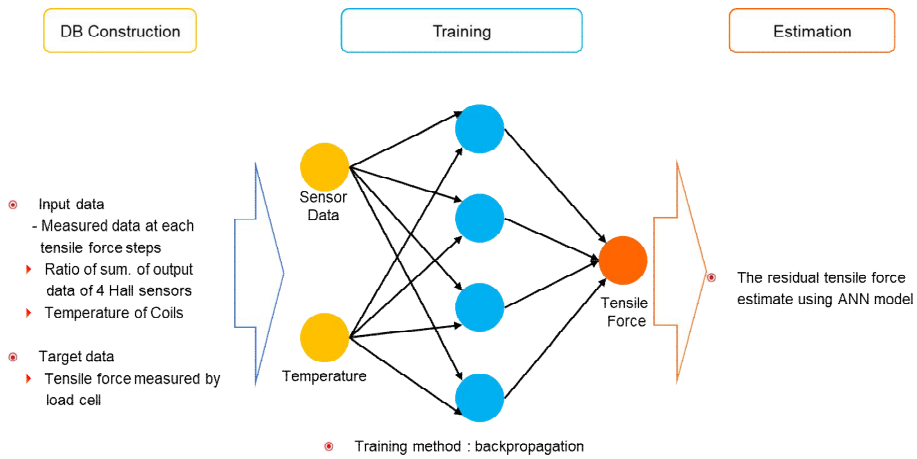


그림 127. 긴장 응력 자동진단 알고리즘

· 입력데이터로 각 긴장 응력 단계별로 계측되는 홀센서 데이터의 합을 사용함.

· 설치된 홀센서 1번부터 4번까지의 1,000포인트 계측 값의 평균값을 모두 합하여 긴장 응력 추정 인자로 활용함.

· 또한 온도에 따라 계측 데이터 출력값이 달라지므로 계측 시의 각 코일 온도 평균값을 하나의 입력 인자로 추가함.

· 긴장 응력 자동진단 알고리즘은 MATLAB을 활용하여 구축되었으며 feedforward net을 활용하여 back propagation 기법으로 구축하였으며 은닉층의 개수는 5개로 구축함.

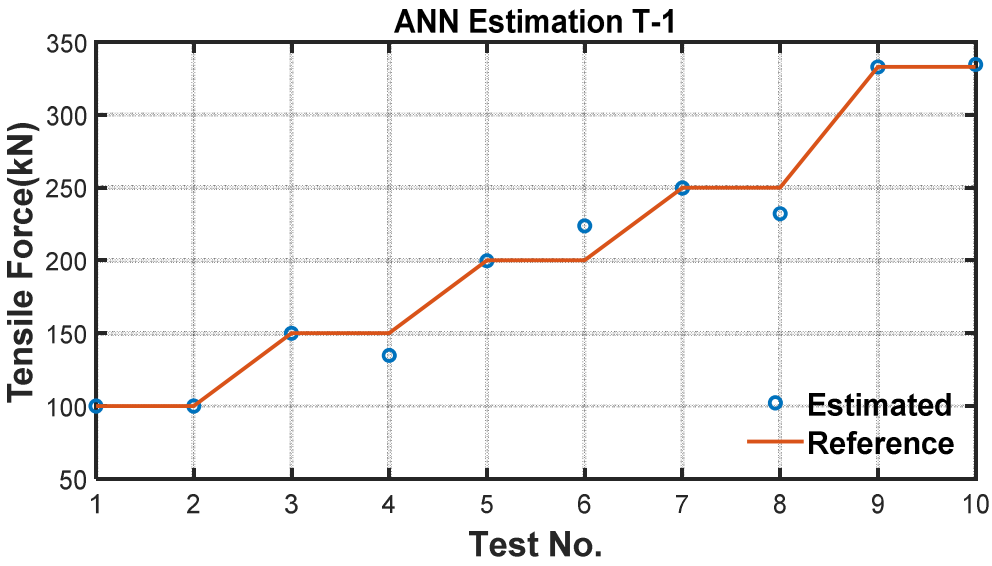
· 설계된 ANN 알고리즘의 성능 검증을 위하여 다음과 같이 실거더 축소 모델 실험 결과 값을 사용하여 테스트를 실시함.

표 19. 인공지능 기반 자동 긴장 응력 추정 오차율

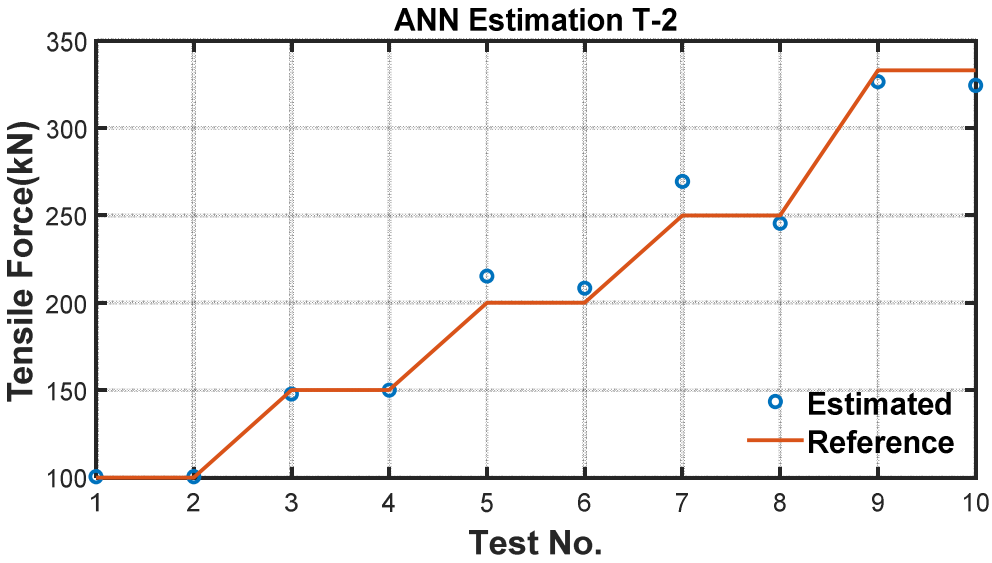
기준 긴장 응력	Tendon 1		Tendon 2		Tendon 3	
	추정 긴장 응력	오차율	추정 긴장 응력	오차율	추정 긴장 응력	오차율
100	99.9973	0.003%	100.5209	0.521%	104.952	4.952%
100	99.9973	0.003%	100.5209	0.521%	104.952	4.952%
150	149.9753	0.016%	147.8011	1.466%	171.0295	14.020%
150	136.7881	8.808%	150.0437	0.029%	123.407	4.395%
200	199.7682	0.116%	215.2903	7.645%	200.3794	0.190%
200	230.7216	9.861%	208.3768	4.188%	202.8693	1.435%
250	249.7089	0.116%	269.4482	7.779%	255.7915	2.317%
250	232.1168	7.153%	245.4725	1.811%	244.0472	2.381%
333	332.8865	0.034%	326.5158	1.947%	334.9678	0.591%
333	334.4852	0.446%	324.418	2.577%	331.6208	0.414%

· Tendon 3의 세번째 계측 결과 값을 제외하고는 모두 10% 이내의 오차로 긴장 응력을 추정하는 것을 확인할 수 있었음.

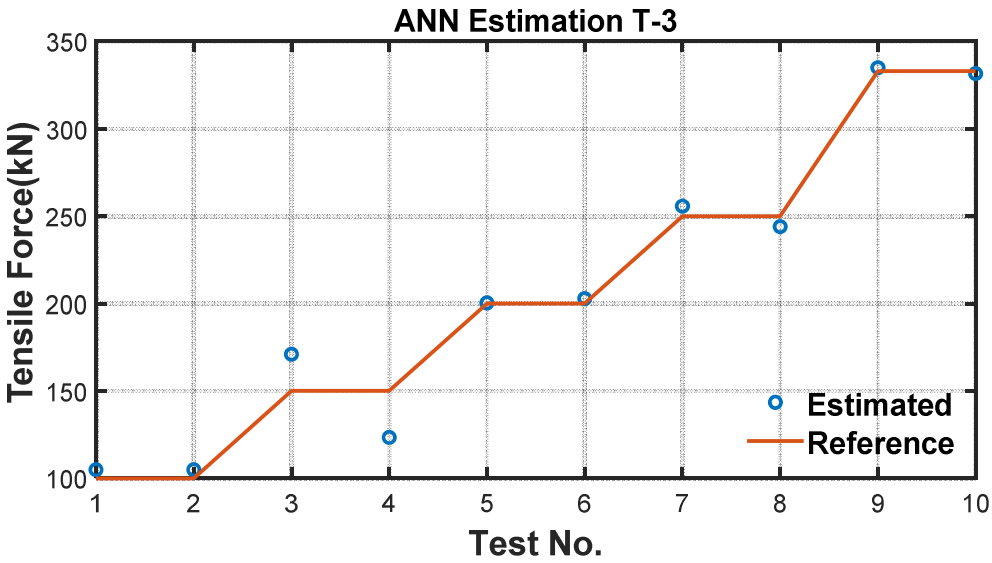
· Tendon 3의 경우 외부자화센서의 이동 불가로 인해 자화가 많이 이루어지지 못하여 생긴 오차로 판단되며 추후 센서 이동 또는 센서헤드 틸팅 등을 통해 집속 자화를 시켜주면 오차는 10% 이내로 줄어들 것으로 판단됨.



(a) Tendon 1



(b) Tendon 2



(c) Tendon 3

그림 128. ANN 테스트 결과

· 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻음.

1) 실험은 PSC 거더의 축소 모형을 이용하여 진행하였으며, 철근이 다른 부분보다 비교적 적게 들어가서 자기장의 영향이 가장 적은 변단부 부위에 외부 자화 시스템을 설치하였음.

2) 또한, 쉬스관 내 텐던의 위치가 변단부 부위에 외부 자화 시스템을 설치하였을 때 가장 가까이 있어 외부 자화 시 다른 부분 대비 가장 효과적으로 텐던을 자화시킬 수 있음.

3) 외부 자기장 집속 기술을 통해 원하는 위치의 텐던 자화를 시킬 수 있음을 확인하였고, 자기장 집속의 위치 변화는 전류의 세기, 거치대의 높이, 보빈의 설치 방법 등 다양한 요소를 통해 변화시킬 수 있음.

4) 전체적인 데이터 값은 긴장 응력이 증가할수록 value의 비율 값이 낮아지는 경향을 보이는 것을 확인하였으며, 이를 이용한 ps 텐던의 잔존 긴장 응력의 추정 가능성을 확인함.

· 본 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위한 추후 연구로는 다음과 같음.

1) 변단부 부분 이외의 부분에 적용 가능한 외부 자화 시스템 제작을 위해 시뮬레이션을 통한 센서 최적화 및 이외의 부분에 대한 실험 데이터 취득 및 이를 인공지능에 적용하기 위한 학습데이터 추가 확보

2) DAQ를 이용하여 input 및 output 값의 제어를 통한 보다 양질의 데이터 취득

3) MR센서, GMR센서 등 다양한 자기 센서를 통해 최적의 긴장 응력 계측 솔루션 도출

4) 코일의 임피던스를 낮추어 센서 헤드에 인가되는 전류를 증폭시켜 보다 강한 자화량확보

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 본 연구개발을 통하여 세계 최초로 외부 자화 기법을 활용한 노후 PSC 거더의 비파괴 긴장력 진단 기법 개발

- PSC I형 거더에 사용할 수 있는 세계 최초 다중 코일형 외부 자화 EM 센서 시제품 개발 완료
  · 자기장 시뮬레이션을 이용하여 PSC 거더 외부에서 발생시킨 자기장이 PSC 거더 내부의 PS 텐던까지 영향을 줄 수 있는 코일 배치 및 크기 설계
  · 외부 자화 EM 센서 설계에 따라 실제 PSC I형 거더에 사용할 수 있는 외부 자화 EM 센서 시제품 제작 완료

- 외부 자화 EM 센서를 활용하여 PSC I형 거더 내부 텐던의 자화가 가능하며 긴장력에 따른 자기 응답 변화를 계측하여 긴장력 진단이 가능함
  · 실거더 축소 모델을 활용하여 외부 자화 EM 센서의 자화 가능 여부 및 긴장력에 따른 자기 응답 변화 계측 실험 실시
  · 실험 결과를 통해 개발된 외부 자화 EM 센서가 효과적으로 PSC 거더 내부 PS 텐던을 자화시키는 것을 확인하였으며 긴장력에 따른 자기 응답 변화 또한 확인함
  · 텐던을 제외한 철근 및 쉬스에 의한 자기 응답 소거 기법 적용 결과 전체적인 비율이 감소하였을 뿐 긴장력 변화에 의한 철근 및 쉬스의 자기응답 변화는 미미하였음

- 다지점 GPR 스캐닝 및 다방향 GPR 스캐닝을 통하여 GPR 계측 심도를 향상시켰으며 이를 통하여 PSC I형 거더 내부의 철근 및 쉬스관의 위치를 오차율 5% 이내로 계측이 가능함

- 외부 자화를 위한 고전류 입력으로 인한 코일 온도 변화에 따른 입력 자기장 변화를 보상하기 위한 온도 보상 알고리즘 개발

○ 인공지능 기반 노후 PSC 거더 잔여 긴장력 자동 진단 기법에 대한 알고리즘 및 성능 검증 실시

- 인공신경망을 활용한 인공지능 기반 노후 PSC 거더 잔여 긴장력 자동 진단 알고리즘 구축
- 계측데이터를 활용한 긴장력 인자 도출 및 온도 영향을 입력하여 PSC 거더교의 잔여 긴장력을 오차율 10% 이내로 계측이 가능하였음

(2) 정량적 연구개발성과

○ 본 연구과제를 통해 다음과 같이 SCI급 국외논문 4편, KCI 국내논문 1편, 특허출원 4건, 특허등록 2건, 소프트웨어 등록 1건을 달성함

- 국내논문의 경우 기존 4편의 작성이 목표되었으나 연구 결과의 우수성으로 인해 국내논문을 대신하여 국외 SCI급 논문으로 대체하여 작성 및 제출함
- 본 연구과제 결과를 토대로하여 SCI급 논문을 작성 중에 있으며, 해당 논문을 통해 기존 계획했던 SCI 2편, KCI 4편에 대한 정량적 성과를 모두 달성할 수 있을 것으로 기대함

< 정량적 연구성과 목표 및 달성치 >

(단위 : 편, 건, 명, 천원)

구분		목표	달성치	비고
국외논문 게재	SCI	2	4	
	비SCI	-	-	-
	계	2	4	
국내논문 게재	SCI	-	-	-
	비SCI	4	1	국내논문을 대신하여 SCI 논문 게재
	계	4	1	국내논문을 대신하여 SCI 논문 게재
특허출원	국내	3	4	
	국외	-	-	-
	계	3	4	
특허등록	국내	1	2	-
	국외	-	-	-
	계	1	2	-
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문	2	2	연차실적보고서 및 최종보고서
	소프트웨어	1	1	-

○ 연구개발 목표의 주요 성능 평가 항목 및 개발 목표치는 다음과 같음

평가 항목 (주요성능 Spec[1])	단위	전체 항목에서 차지하는 비중[2] (%)	세계최고 수준 보유국/보유기업 (/)	연구개발 전 국내수준	개발 목표치	달성치	평가 방법[3]
			성능수준	성능수준			
1.PS 텐던 자화도	T	30	외부 비접촉형 긴장력 계측 기법 전무	외부 비접촉형 긴장력 계측 기법 전무	1.5 T	1 T (시뮬레이션)	외부 비접촉형 자화 센서를 이용하여 PS 텐던을 자화시키고 자화된 PS 텐던의 자화도를 가우스미터 등으로 계측하여 자화도 산정
2.내부 형상 탐사 오차율	%	20	철근 깊이 10cm, 직경 1.6cm 기준 6.7%(대만/Chung Hua University)	PVC 탐사 기준 10.91%	5%	5% 이내 탐사 가능	설계도 기준 철근 위치 및 직경과 GPR 계측 결과와의 비교를 통한 오차율 산정
3.긴장력 계측 오차율	%	50	외부 비접촉형 긴장력 계측 기법 전무	외부 비접촉형 긴장력 계측 기법 전무	10%	10% 이내 긴장력 추정 가능	PS 텐던 외부에 설치된 로드셀, 유압잭을 이용해 환산한 긴장력과 비교하여 오차율 산정

- PS 텐던 자화도의 경우 시뮬레이션을 통해 1T 이상을 자화 시킬 수 있는 것으로 모델링 되었으나 실 장비 구축에 있어 입력 전압의 한계(220V, 32A) 로 인해 구현되지 못함

- 일반 장비로 구현할 수 있는 0.01T의 자화도만으로도 긴장력에 따라 자기 이력 응답을 확인하는 것이

가능하였으며 이를 바탕으로 10% 이내 긴장력 추정이 가능한 것으로 확인함

○ 본 연구개발을 통한 연차별 성과 목표 및 달성 현황은 다음과 같음.

구분	년도	성과목표	세계최고수준 (보유국/ 보유기관)	연구전 국내수준	목표치	달성치	가중치 (%)	평가기준
최종 목표	2021	다중 계측 기반 PSC 구조물 긴장 응력 자동 진단 기법 개발	기 가설된 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무	기 가설된 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무	긴장 응력 오차율 10% 이내로 자동 계측 가능	긴장 응력 오차율 10% 이내로 자동 계측 가능	100	PS 텐던 외부에 설치된 로드셀, 유압잭을 이용해 환산한 긴장 응력과 비교하여 오차율 산정
1차 년도	2020	외부 비접촉 EM 센서를 이용한 내부 PS 텐던 자화 기법 개발	콘크리트 내부 철근 탐사 가능, 1.6〃 bar 기준 40mm 깊이까지 자화가능 (미국/elcometer)	관련 연구 없음	PS 텐던 1T 이상으로 자화 가능	PS 텐던 1T 이상으로 자화 가능 (시뮬레이션 검증 완료)	30	가우스미터를 이용한 외부 비접촉 자화를 통한 PS 텐던 자화도 계측
		콘크리트 내부 철근 및 쉬스 위치 파악 기술 개발	철근 깊이 10cm, 직경 1.6cm 기준 6.7% 오차로 계측 가능 (대만/Chung Hua University)	콘크리트 내부 PVC관 탐사 기준 10.91% 오차로 계측 가능	콘크리트 내부 철근 오차율 10% 이내로 탐사 가능	콘크리트 내부 철근 오차율 10% 이내로 탐사 가능	20	설계도 기준 철근 위치 및 직경과 GPR 계측 결과와의 비교를 통한 오차율 산정
2차 년도	2021	AI 기반 프리스트레스트 구조물 긴장 응력 진단 기법 개발	기 가설된 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무	기 가설된 프리스트레스트 구조물의 긴장 응력 계측 기법 전무	긴장 응력 오차율 10% 이내로 계측 가능	긴장 응력 오차율 10% 이내로 계측 가능	30	PS 텐던 외부에 설치된 로드셀, 유압잭을 이용해 환산한 긴장 응력과 비교하여 오차율 산정
		프리스트레스트 구조물 내부 형상 탐사 기법 개발	철근 깊이 10cm, 직경 1.6cm 기준 6.7% 이내로 계측 가능 (대만/Chung Hua University)	콘크리트 내부 PVC관 탐사 기준 10.91% 오차로 계측 가능	콘크리트 내부 철근 및 쉬스관 형상 정보 오차율 5% 이내로 취득 가능	콘크리트 내부 철근 및 쉬스관 형상 정보 오차율 5% 이내로 취득 가능	20	설계도 기준 철근 위치 및 직경과 GPR 계측 결과와의 비교

- PS 텐던 자화도의 경우 시뮬레이션을 통해 1T 이상을 자화 시킬 수 있는 것으로 모델링 되었으나 실 장비 구축에 있어 입력 전압의 한계(220V, 32A) 로 인해 구현되지 못함
- 일반 장비로 구현할 수 있는 0.01T의 자화도만으로도 긴장력에 따라 자기 이력 응답을 확인하는 것이 가능하였으며 이를 바탕으로 10% 이내 긴장력 추정이 가능한 것으로 확인함

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Technique for Detecting Subsurface Cavities of Urban Road Using Multichannel Ground-penetrating Radar Equipment	Sensors and Materials	Yoon Jin-sung	32	Japan	M Y U Scientific Publishing Division	SCIE	2020.12.29	2435-0869	100
2	Improvement of GPR-Based Rebar Diameter Estimation Using YOLO-v3	REMOTE SENSING	Sehwan Park	13(10)	Switzerland	MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute	SCIE	2021.05.20.	2072-4292	100
3	Verification of Tensile Force Estimation Method for Temporary Steel Rods of FCM Bridges based on Area of Magnetic Hysteresis Curve using Embedded Elasto-Magnetic Sensor	SENSORS	Won-kyu Kim	22(3)	Switzerland	MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute	SCIE	22.01.27	1424-8220	25
4	Residual Tensile Force Estimation Method for Earth Anchor using Elasto-magnetic Sensing System	PLOS ONE	Sehwan Park	17(3)	United States	Public Library of Science	SCIE	2022.03.01	1932-6203	33
5	구조물의 변위 변형 감지를 위한 변형률 센서를 장착한 커스터마이징 비콘 개발	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	김준경	25(5)	대한민국	한국구조물진단유지관리공학회	KCI	2021.01.21.	2234-6937	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021 한국전산구조공학회 정기학술대회	유한요소 해석을 이용한 PS 텐던의 외부 자화 최적 설계	박세환	2021.04.08.	The-K호텔 경주	대한민국
2	2021 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회	유한요소 해석을 이용한 PS 텐던 외부 자화용 센서 설계 및 검증	김한선	2021.11.18	제주 섭지코지	대한민국

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2020	연차실적계획서	-	-
2	2021	최종보고서	-	-

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	트윈코일모듈 기반 외부 자화 장치 및 이를 위한 동작 방법	대한민국	차세대융합기술연구원	2021.01.04	10-2021-0000560				100%	자체 활용
2	특허	복수의 소형 솔레노이드 모듈을 이용하는 외부 자화 시스템 및 이를 위한 동작 방법	대한민국	차세대융합기술연구원, 롯데건설	2021.12.29.	10-2021-0190497					
3	특허	복수의 솔레노이드 모듈을 이용하는 외부 자화 시스템 및 이를 위한 동작 방법	대한민국	차세대융합기술연구원	2021.09.07	10-2021-0119134	차세대융합기술연구원	2021.10.01	10-2310402-0000	50%	기술 이전
4	특허	온도 보상이 가능한 코일 센서 기반 긴장력 계측 시스템	대한민국	스마트인사이드에이아이	2021.03.11	10-2021-0032085	스마트인사이드에이아이	2021.06.16	10-2268085-0000	100%	자체 활용

ㅇ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1										√	
2				√						√	
3										√	
4										√	

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율
1	AI(인공지능) 기반 긴장력 진단 프로그램	2021.12.24	김태헌	2022.01.13	42870	스마트인사이드에이아이	100

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	외부자화 EM 센서 시제품	2021.03.24.	차세대융합기술연구원	차세대융합기술연구원	PSC 교량 긴장력 계측	3년	-	-

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)
1	통상실시권 부여	복수의 솔레노이드 모듈을 이용하는 외부자화 시스템 및 이를 위한 동작 방법	(주)스마트인사이드에이아이	2021.10.29	2021	3,000

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○ 노후 PSC 진단 관련 기술 및 제작한 시작품에 대한 홍보
- 2021 융합기술 스타트업 데모데이

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 노후 PSC 구조물의 잔여 긴장 응력 자동 진단을 위한 외부 자화 EM 및 3D GPR 다중 계측 기술 개발 - 외부 비접촉형 EM 센서를 이용한 PS텐던의 자기이력 스캔 기술 개발 - 3차원 GPR스캐닝을 이용한 내부 형상 스캔 기술 개발 - 다중 계측 데이터를 이용한 긴장 응력 자동 진단 기술 개발	○ 본 연구개발을 통하여 세계 최초로 외부 자화 기법을 활용한 노후 PSC 거더의 비파괴 긴장력 진단 기법 개발 - PSC I형 거더에 사용할 수 있는 세계 최초 다중 코일형 외부 자화 EM 센서 시제품 개발 완료 · 자기장 시뮬레이션을 이용하여 PSC 거더 외부에서 발생시킨 자기장이 PSC 거더 내부의 PS 텐던까지 영향을 줄 수 있는 코일 배치 및 크기 설계 · 외부 자화 EM 센서 설계에 따라 실제 PSC I형 거더에 사용할 수 있는 외부 자화 EM 센서 시제품 제작 완료 - 외부 자화 EM 센서를 활용하여 PSC I형 거더 내부 텐던의 자화가 가능하며 긴장력에 따른 자기 응답 변화를 계측하여 긴장력 진단이 가능함 · 실거더 축소 모델을 활용하여 외부 자화 EM 센서의 자화 가능 여부 및 긴장력에 따른 자기 응답 변화 계측 실험 실시 · 실험 결과를 통해 개발된 외부 자화 EM 센서가 효과적으로 PSC 거더 내부 PS 텐던을 자화시키는 것을 확인하였으며 긴장력에 따른 자기 응답 변화 또한 확인함 · 텐던을 제외한 철근 및 쉬스에 의한 자기 응답 소거 기법 적용 결과 전체적인 비율이 감소하였을 뿐 긴장력 변화에 의한 철근 및 쉬스의 자기응답 변화는 미미하였음 - 외부 자화를 위한 고전류 입력으로 인한 코일 온도 변화에 따른 입력 자기장 변화를 보상하기 위한 온도 보상 알고리즘 개발 - 다지점 GPR 스캐닝 및 다방향 GPR 스캐닝을 통하여 GPR 계측 심도를 향상시켰으며 이를 통하여 PSC I형 거더 내부의 철근 및 쉬스관의 위치를 오차율 5% 이내로 계측이 가능함 ○ 인공지능 기반 노후 PSC 거더 잔여 긴장력 자동 진단 기법에 대한 알고리즘 및 성능 검증 실시 - 인공신경망을 활용한 인공지능 기반 노후 PSC 거더 잔여 긴장력 자동 진단 알고리즘 구축 - 다중 계측데이터를 활용한 긴장력 인자 도출 및 온도 영향을 입력하여 PSC 거더교의 잔여 긴장력을 오차율 10% 이내로 계측이 가능하였음	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ 국내 논문 게재
- 비 SCI 4건 중 1건 완료

2) 자체 보완활동

○ 국외 논문 게재
- 연구 개발 결과의 우수성으로 인해 국내 논문을 대신하여 국외 논문으로 게재 하였으며, SCI급 국외 논문을 2건 초과 달성 하였음
- 비 SCI 1건을 대신하여 국외 논문을 본 연구 과정 및 결과를 토대로 작성중에 있으며 '22년 중 SCI급 국외 논문 게재를 통해 성과를 달성할 예정임

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 본 연구개발을 통하여 세계 최초로 외부 자화 기법을 활용한 노후 PSC 거더의 비파괴 긴장력 진단 기법 개발
- PSC 거더 내부 텐던에 대한 직접적인 긴장력 계측 기법이 존재하지 않는 상황에서 외부 자화 EM 센서를 이용하여 센서가 설치되지 않은 노후 PSC I형 거더 내부 텐던의 직접적인 계측이 가능함을 확인함
- 기존 EM 센서로는 적용이 어려운 PSC I형 거더 내부 텐던 자화를 위하여 다중 솔레노이드 코일 자기장의 중첩 효과를 활용하여 자기장을 PSC I형 거더 내부로 집속하고 이를 바탕으로 PSC 거더 내부의 PS 텐던을 자화시킴
- PS 텐던의 긴장력에 따라 자기 응답이 변화한다는 점을 바탕으로 외부 자기장 도입 및 외부 자기 응답 계측을 통하여 외부 비접촉 잔여긴장력 계측 기술에 대한 원천 기술 개발
- 외부 자화 EM 센서의 시뮬레이션을 통한 검증 및 실거더 축소 모델을 통한 제시된 기술 검증을 실시하였으며 잔여 긴장력을 오차율 10% 이내로 추정이 가능함을 확인함
- 추가적인 시뮬레이션 및 현장 검증 실험을 통해 긴장력 자동 진단 DB 구성이 가능하며 이를 바탕으로 기존 기술로는 추정하기 어려운 노후 PSC 교량의 잔여 긴장력에 대한 추정이 가능함
- 이를 통해 국내 단중경간 교량 중 가장 많은 비율로 건설된 PSC I형 교량의 정밀 안전진단이 가능하며 데이터 기반의 유지보수를 통한 비용 절감이 기대됨

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 노후 프리스트레스트 구조물의 긴장력 진단 선진기술 선점으로 미래 원천기술 확보

○ 한국도로공사 및 지자체 관리 교량의 안전성 평가에 적용하여 PSC 교량의 안전 진단 사업화

○ 구조물 유지관리 기업으로의 기술이전을 통해 프리스트레스트 구조물의 긴장력 관리 사업 실용화

○ 센서/계측기기 업체로의 기술이전을 통한 프리스트레스트 구조물 긴장력 진단 시스템 제품화

○ EM+GPR 다중 계측을 통한 프리스트레스트 구조물 긴장력 진단 기법의 국내외 특허권 획득으로 미래기술 선점 및 무형자산 확보

○ 프리스트레스트 구조물 진단 시스템을 확장하여 현수교/사장교 케이블 및 강 구조물 등 기타 구조물의 안전 진단 기법으로 활용 가능

○ 프리스트레스트 텐던 긴장력 진단 산업, 프리스트레스트 구조물 유지관리 산업 등 신산업 창출

○ 후속연구를 통한 프리스트레스트 시설물의 무인 안전 진단 시스템 개발 및 실용화

○ 본 연구를 발전시켜 실용화 단계에서는 I형 거더 이외에도 박스형 거더와 같은 다른 형태의 PSC 거더에도 적용 가능하도록 양면 자화가 아닌 단면 자화를 통한 텐던의 긴장 응력 추정 기법에 관한 기술 개발 진행

< 별첨 >

별첨 자료
1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 '국토교통기술촉진연구사업' 연구개발과제 최종보고서이다.

2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.