

마 그 네 틱 기 반 P o r t a b l e
강 구 조 물 손 상 검 출 시 스템 개 발

2020

국 토 교 통 과 학 기 술 진 흥 원
국 토 교 통 부

마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 개발

2020.02.21.

주관연구기관 / (주)다음기술단
공동연구기관 / 성균관대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 개발'(연구개발 기간 : 2017.04.01 ~ 2019.12.31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2020. 02. 21.

주관연구기관명 : (주)다음기술단

(대표자) 박 철



공동연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단

(대표자) 추현승



주관연구기관책임자: 최상식

공동연구기관책임자: 박승희

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호		해당 단계 연구 기간	2019.01.01. ~2019.12.31	단계구분	3/3 (해당단계)/(총단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	사회이슈해결			
연구과제명	대과제명	마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 개발			
	세부과제명	마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 개발			
연구책임자	최상식	해당단계 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: 00 명	해당단계 연구비	정부: 100,000천원 민간: 34,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 134,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 11 명 내부: 11 명 외부: 00 명	총 연구비	정부: 500,000천원 민간: 167,400천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 667,400천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)다음기술단 다음세대기술원 성균관대학교 산학협력단			참여기업명	(주)다음기술단
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제 연구과제와 관련 특허권을 확보하고 있으며 본 연구개발은 응용개발 분야임 과제 수행 중에 개발된 성과는 특허출원을 통해 지적재산권을 보호할 예정
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	5	4				4					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요약

구조물의 강재 및 용접부 결함에 MFL 방식의 강재 손상검출 장비를 적용하여 시간적·공간적 제약 없이 구조물 전체에 대한 비파괴검사를 실시하고 구조물의 안전을 확보하고자 본 연구를 실시하였다.

본 연구를 통해 마그네틱 기반의 평판부와 필렛용접부 적용이 가능한 휴대용 점검 장비를 3차에 걸쳐 설계 및 제작하였으며, 결함을 확인할 수 있도록 시각화 알고리즘 점검자 모니터링 프로그램을 개발하였다. 개발품은 공인시험기관을 통해 성능평가를 완료하여 계획한 질적성과 목표치를 모두 달성하였으며, 특허출원/등록, S/W 등록, 국내·외 학술지 게재논문, 시작품 등의 양적성과도 모두 달성하였다.

보고서 면수

103면

연구의 목적 및 내용	• 비파괴 점검기술의 국·내외 최신 동향 분석 • 강구조물과 용접부의 취약부 및 손상유형 분석 • 휴대용 마그네틱 센싱 하드웨어 구조 최적 설계 • 휴대용 하드웨어 제작을 위한 PCB 설계 • Hall 센서를 이용한 휴대용 누설 자속(MFL) 측정 시스템 상세 설계 • 시험체 자화를 위한 자화부 최적설계 • PCB 구조의 마그네틱 센싱 모듈 제작 • 강구조물 점검용 H/W 제작 (휴대성 고려) • 콤팩트 타입 데이터 수집 장치 제작 (점검 가능 지속시간 고려) • 사용자 친화적 모니터링 UI 구축 • 마그네틱 신호의 가공 및 특성 추출을 위한 신호처리 알고리즘 개발 • 통계학적 기법 기반의 자동 손상 진단 기법 개발 • 운영 중 진동/온습도 및 점검 속도 영향 보상 알고리즘 개발 • 손상 정보 인식/알림 시스템 구축 • 현장시험을 위한 실제 구조물 Test Bed 선정 및 섭외 • 마그네틱 센싱기반 강구조물 및 용접부 점검 매뉴얼 작성 • Mock-up 제작 • 실내 실험을 통한 DB 구축 및 시스템 안정화 및 목표 성능 검증 • 현장시험 및 점검 결과 보고서 작성				
연구개발성과	• 강구조물 진단을 위한 휴대용 마그네틱 점검 장비 개발 • 마그네틱 기반 강구조물 및 용접부 손상검출 알고리즘 개발 • 진단결과 분석 및 수집된 신호자료 시각화 시스템 UI 개발 • 강구조물 및 용접부 손상별 유지관리 매뉴얼 정립				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	• Portable 마그네틱 점검장비 개발 - 시간적, 공간적 제약으로 인한 강구조물 및 용접부의 제한적인 안전점검 방식을 개선하여 강구조물 전체에 적용할 수 있는 새로운 안전점검 방식 제안 • 진단결과분석 및 수집된 신호자료 시각화 시스템 UI 개발 - 강구조물 및 용접부 손상에 대한 즉각적 대응 가능 - 마그네틱 기반 장비활용을 통한 안전점검 비용 절감 • 해당기술 개발에 따른 파급효과 - 효율적인 강구조물 유지 관리 기대 - 안전점검 시 비파괴검사 비용 절감 기대 - 강구조물의 국부적이 아닌 전체적인 안전점검 가능 - 강구조물 점검 시 투입 인원 및 시간 감소				
핵심어 (5개 이내)	마그네틱	손상검출	휴대용	강재	용접

< SUMMARY >

Purpose & Contents	• Analysis of latest trends in non-destructive inspection technology • Analysis of vulnerabilities and damage types of steel structures and welds • Optimal Design of Portable Magnetic Sensing Hardware Structure • PCB design for portable hardware • Portable Leakage Flux (MFL) measurement system using Hall sensor • Optimal design of magnetization part for magnetization of test specimens • H / W for steel structure inspection (Consideration of portability) • Production of compact type data acquisition device • User-friendly monitoring UI construction • Development of signal processing algorithm for machining and character extraction of magnetic signal • Development of automatic damage diagnosis based on statistical techniques • Development of Compensation Algorithm for Vibration, Temperature, Humidity and Inspection Speed during Operation • 3D Damage Location Detection and Damage Visualization Algorithm Development • Construction of damage information recognition / notification system • Selection and consultation of actual structure test bed for field test • Preparation of Magnetic Sensing Based Steel Structure and Welding Inspection Manual • Welding Inspection Guidelines for Magnetic Sensing Based Steel Structure and Welding • Mock-up production • Establishment of DB and system stabilization through indoor experiment and verification of target performance • Field test and report of inspection result				
Results	• Development of portable magnetic inspection equipment for steel structure diagnosis • Development of Magnetic Based Steel Structure and Welding Damage Detection Algorithm • Analysis of diagnosis result and development of collected signal data visualization system • Establishment of maintenance manual for steel structure and welded parts damage				
Expected Contribution	• Development of Portable Magnetic Inspection System – Improved the limited safety checks of steel structures and welds due to time and space constraints – Suggestion of A new safety inspection method that can be applied to all steel structures • Diagnosis result analysis and visualization system UI development of collected signal data – Immediate response to steel structure and weld damage – Reduced safety inspection costs through the use of magnetic-based equipment • Impact of technology development – Expected steel structure maintenance – Expected to reduce the cost of nondestructive inspection during safety inspection – Full safety checks of steel structures possible – Decreased man power and time when checking steel structures				
Keywords	Magnetic	Damage detection	Portable	Steel	Welding

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 국내외 기술 개발 현황	06
3. 연구수행내용 및 성과	08
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	87
5. 연구개발성과의 활용 계획	89
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	96
7. 연구개발성과의 보안등급	97
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	97
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	97
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	98
11. 기타 사항	102
12. 참고 문헌	102

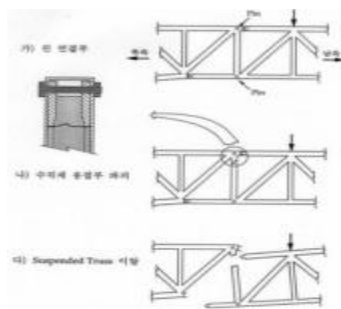
1. 연구개발 목적

가. 강구조물 유지관리 필요성

- ‘시설물의 안전관리에 관한 특별법’ 으로 현재 강교량은 정기적으로 정기점검, 정밀점검, 정밀안전진단 수행 대상으로 관리하고 있음
- 강교량은 서울시 관리 전체 교량 352개 중 133개가 해당하는 큰 비중을 차지하며, 서울시에서는 강교량 안전점검엔 용접결함(불량, 균열, 누락), 부식발생 및 비파괴검사 등이 포함돼 있어 전문성을 요하기 때문에 따로 집중관리하고 있음
- 강구조물에서는 반복하중 등에 의한 피로균열이 발생하는데 피로균열의 경우 대부분 응력이 집중하는 부분에서 발생하며 아주 미세하여 초기발견이 상당히 어려움
- 1994년 10월 21일 시공 및 유지관리 등의 문제로 성수대교가 붕괴하여 34명의 사상자가 발생하였고, 이를 계기로 실시한 한강교량 정밀진단결과 당산철교의 재시공이 결정되었으며, 당산철교 철거작업 중 상판이 붕괴하는 등 강구조물 유지관리의 중요성은 지속적으로 제기되고 있음



<성수대교 붕괴>



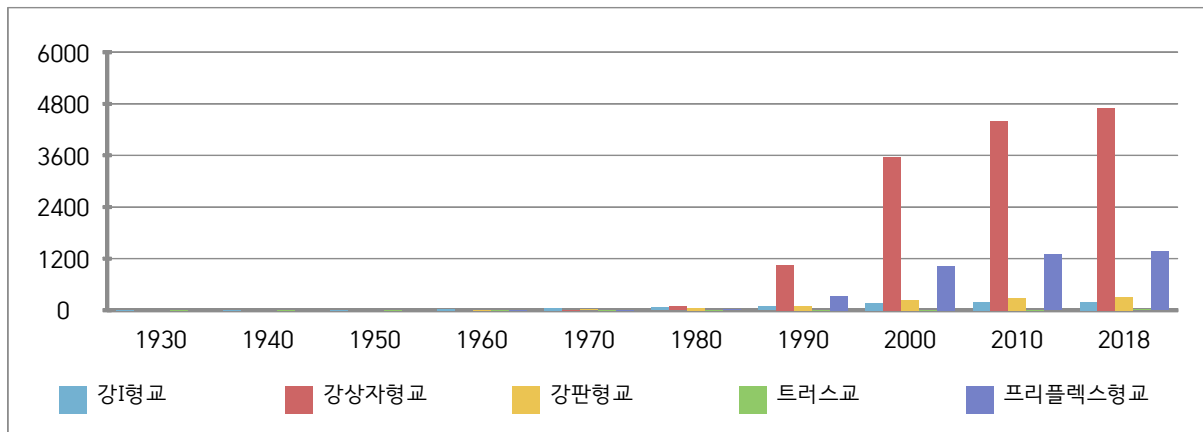
<성수대교 붕괴 원인>



<당산철교 상판 붕괴>

나. 강구조물 현황

- 국토교통부 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 에서 상부구조기준 강재로 이루어진 교량을 검색 (2018년 12월 31일 기준)한 결과 총 6,592개의 교량이 있는 것으로 확인되었으며, 1990년을 시작으로 급속도로 강교량이 건설되는 것을 확인하였음



구분	강I형교	강상자형교	강판형교	트러스교	프리플렉스형교
1930	1	0	0	1	0
1940	1	0	0	1	0
1950	3	0	0	1	0
1960	30	0	4	2	1
1970	46	7	16	2	2
1980	64	83	53	4	17
1990	90	1043	102	6	342
2000	164	3560	238	10	1030
2010	196	4404	289	13	1296
2018	201	4705	307	17	1362

다. 현재 유지관리의 체계

- 용접부의 결함을 검사하기 위하여 사용되는 비파괴검사 방법으로는 육안 검사(VT), 침투탐상검사(PT), 초음파 탐상검사(UT), 방사선 투과검사(RT), 자분탐상검사(MT) 등에 의한 방법이 있음
- 기존 비파괴검사는 강재 표면의 도장을 제거하고 표면을 매끄럽게 하거나, 구조물을 외부와 차단하고 방사선을 투과하거나, 손상된 표면에 자분을 뿌리고 자력을 이용해 균열을 확인하는 등 비파괴검사가 복잡하고 시간이 오래 걸리는 단점이 있어 교량 거더 전체의 신뢰성 있는 안전성을 확인하기에는 물리적인 한계가 있음



<침투탐상검사(PT)>



<초음파 탐상검사(UT)>



<방사선 투과검사(RT)>



<자분탐상검사(MT)>

- 또한, 강재 구조물에 대한 정밀점검 시에 재료시험 항목에서 강재용접부 결함조사는 자분탐상 및 초음파 탐상법을 50m 당 최소 1개소를 기준으로 선택과업으로 실시하도록 하고 있어, 크고 넓은 교량 거더에서 1~2개소에 대한 검사만으로 거더 전체에 대한 안전성을 확인하고 있는 상태임
- 정밀안전진단시에도 강재 용접부 자분탐상시험 및 방사선 투과시험은 균열의심부 및 맞대기 용접부에 대해서 50m에 대해 최소 1개소 이상, 초음파 탐상시험은 플레이트 거더교 경간별 거더 당 1개소, 박스 거더교는 2개소로 조사 및 수량을 결정하도록 하고 있음

[시설물의 안전관리에 관한 특별법] 강재 구조물 비파괴 검사 방법	
육안검사(VT), 침투 탐상검사(PT), 초음파 탐상검사(UT), 방사선 투과검사(RT), 자분 탐상검사(MT), 액체탐상(DT) 등	

정밀점검 [강재 용접부 결함조사]		
구분	기본과업	선택과업
재료시험 항목	-	MT 및 UT
평가방법	-	용접부 결함 탐상
기준수량 (상하부)		과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정 (50m 마다 1회)

정밀안전진단 [강재 용접부 결함조사]		
구분	기본과업	선택과업
재료시험 항목	맞대기 용접부 UT	맞대기 및 균열의심부 RT 및 MT
평가방법	필요시 RT	균열의심부 필요시 PT
기준수량 (상하부)	플레이트거더교: 1개소/경간별 거더 박스거더교: 2개소/경간별 거더	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정 (50m 마다 1회)

※ 50m는 종수량을 결정짓기 위한 "단위길이"

- 아래 그림은 실제 ○○대교(강교) 비파괴 검사 사례로 안전진단 시 전체 용접 물량 대비 약 1%의 비파괴검사를 실시하고 있어 구조물 내구수명이 50년 일 때 구조물 전체 용접 물량 대비 총 5% 내외의 비파괴검사를 실시할 것으로 추정된다. 이는 안전진단 구조물 대비 미비한 비파괴 검사 물량으로 국민의 안전성을 보장하기 어려운 수치이다.

○○대교(강교) 용접부 비파괴 검사 사례	
1. S1경간 맞대기 용접부 길이 2.7m (플랜지 폭) × 2 (상·하부) × 6 (맞대기 용접 횟수) × 3 (거더 개수) × 2 (상·하부) = 194.4 m	
2. 2015년 안전진단 UT 4회 × 0.5cm (검사 길이) = 2m ∴ 전체 용접 물량 대비 약 1.02% 조사	
3. 2010년 안전진단 UT 6회 × 0.5cm (검사 길이) = 3m ∴ 전체 용접 물량 대비 약 1.54% 조사	
4. 플랫 용접 주요부 (플랜지외 복부연결) 40m × 4회 (플랫용접) × 2 (상·하부) × 3 (거더 개수) × 2 (상·하행) = 1920m ∴ 조사를 0%	

구조물 내구수명이 50년 일 때 구조물
전체용접 물량 대비 총 5% 내외

**안전진단 구조물 대비
미비한 비파괴 검사**

라. 구조물 안전점검의 문제점

- 강구조물에 대한 검사는 육안검사(VT)를 위주로 하고 균열의심부 등에 대해서는 비파괴검사를 수행하도록 하고 있는데, 강박스 거더는 내부가 어두워 잘 보이지 않는 데 이곳에서 약간의 조명으로 균열을 육안으로 확인하고 있음



<강박스 거더 내부>

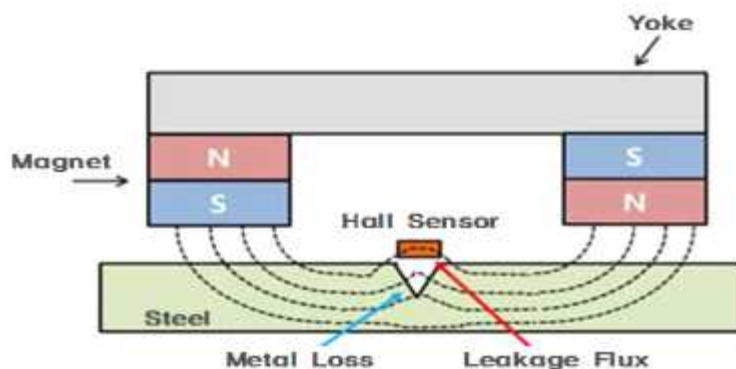


<강박스 거더 외부>

- 강박스 거더 내부에서 조사자가 육안검사로 피로균열 같은 미세한 균열을 확인하는 것은 어려운 실정이며, 정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라 일부분에 대한 비파괴검사를 근거로 전체 구조물의 안전성을 판단하는 것은 상당한 오류가 있음
- 현재 시행하고 있는 비파괴검사 장비 및 인력만으로 강구조물을 전체적으로 안전점검하는 것은 시간적, 공간적으로 불가능한 실정

2. 연구개발의 필요성

- 강구조물을 육안검사 하듯이 용이하게 점검하면서 구조물의 안전성에 대한 신뢰성을 확보할 수 있도록 구조물을 전체적으로 간편하게 신속히 정밀조사 할 수 있는 강재 및 용접부 휴대용 점검 장비 필요
- 강구조물에 발생하는 균열을 주기적으로 점검하여 피로균열 같은 미세한 균열을 초기에 확인하는 것은, 균열이 확대되기 전에 보강할 수 있도록 하여 취성파괴와 같이 예측 불가능한 사고를 미연에 방지하고 큰 손상을 보강함에 따른 유지관리 비용 증가를 방지하기 위해 필요함
- 마그네틱 센싱 기반 안전장비란 금속재질의 대상물을 자석(Magnet)을 이용하여 자화시키면 자기장이 형성되는데, 이때 시편의 결함 부분에서 자속이 누설되고 이러한 누설을 홀 센서로 계측하여 결함을 탐지해내는 원리
- 누설되는 자속의 세기는 홀 센서로 계측 할 수 있으며, 홀 센서가 자기장에 위치했을 때, 자기장과 전류의 수직하는 방향으로 홀 전압이 발생하며 이러한 원리를 홀 효과(Hall Effect)라 하며, 이를 이용하여 계측 되어진 전압값을 통해 손상 위치와 크기를 추정할 수 있음
- 마그네틱 기반의 시각화된 이미지를 이용한 디스플레이 표시와 손상 발생 시 알람을 발생하여 상황인지가 즉각적으로 이루어짐, 이를 통한 점검자의 신속한 판단 및 대응을 도움으로써 강구조물 및 용접부 손상 유지관리의 효율성 향상이 기대됨
- 휴대용(Portable) 마그네틱 손상검출 장비 개발을 통해 국부적인 조사가 아닌 전체적인 강구조물의 비파괴조사가 가능하며, 객관적인 DATA 축적 및 시간과 비용절감 효과를 가진 새로운 점검방식의 제안이 필요



<마그네틱 필드를 이용한 손상 검출 원리>

3. 연구개발 범위

가. Portable 마그네틱 점검장비 개발

- 내용 : Portable 마그네틱 신호 수집장치 제작
- 현황 : (주)다음기술단은 성균관대학교 산학협력단과 국민안전처 재난안전기술개발사업단에서 주관하는 ‘재난안전기술개발기반구축사업’의 ‘초고층 빌딩 고속 승강기 추락사고 예방을 위한 마그네틱 센싱 기반의 재난대응형 안전진단 시스템 개발’을 수행하고 있으며, 엘리베이터 케이블의 손상발생의 상시진단이 가능한 마그네틱 센싱기반 지능형 안전진단 시스템 개발을 수행 중에 있음
- 필요 : 정밀안전진단 시 강재용접부 초음파 탐상시험은 경간별/거더당 1개소 또는 2개소의 극히 일부만만 실시하기 때문에 강재구조물의 점검결과에 대한 신뢰성 확보가 어려우므로 국부적인 점검절차가 아닌 구조물 전체에 대한 점검이 필요함

나. 강구조물 및 용접부 손상분석 알고리즘 설계

- 내용 : 마그네틱 기반 강구조물 및 용접부 손상분석 알고리즘 설계
- 현황 : 강구조물 및 용접부의 피로균열은 구조물의 취성파괴를 야기하기 때문에 예측 불가능한 사고로 이어질 수 있는 주요 손상임. 구조물 전체를 검사하고 육안으로 관찰이 어려운 미세한 균열을 찾아내어 균열의 폭과 깊이 및 길이를 신뢰성있게 확인함으로써 커다란 손상이 발생하기 전에 구조물에 발생한 손상에 선제적으로 대응할 수 필요성이 요구됨
- 필요 : 강구조물 및 용접부의 손상부 누설자속의 유형을 분석하여 패턴인식기반을 구축하는 것은 신속하고 체계적인 안전점검을 위해 필요

다. 진단결과분석 및 수집된 신호자료 시각화 시스템 UI 개발

- 내용 : Portable 마그네틱 점검장비를 통해 수집된 신호자료를 시각화 및 경보음 제공 시스템 UI 개발
- 현황 : 누설자속을 이용한 와이어로프의 결함 검출은 검사장비가 고정되어 있어 컴퓨터 모니터를 통해 관찰하고 있으며, 용접부에 대한 비파괴검사는 검사 결과 판정이 오래걸리거나 내업을 통해 결함을 판정
- 필요 : 현장에서 균열 등의 결함 검출 시 경보음을 주어 균열 부위에 대한 파악을 쉽게 하고 주위에 발생한 결함을 추가로 확인하도록 하며, 구체적인 시각화 점검장비는 점검자의 주관적 견해로 인해 야기되는 오류를 예방할 수 있음

라. 강구조물 및 용접부 손상별 유지관리 매뉴얼 정립

- 내용 : 마그네틱 기반 강구조물 및 용접부 손상별 유지관리 매뉴얼 정립
- 필요 : 마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상 검출 장비를 활용할 경우 점검 매뉴얼, 점검 지침, 손상별 유지관리 대응 매뉴얼 작성 필요



<연구개발 범위>

4. 연구개발 단계

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

5. 타산업 연계 및 국제협력 가능성

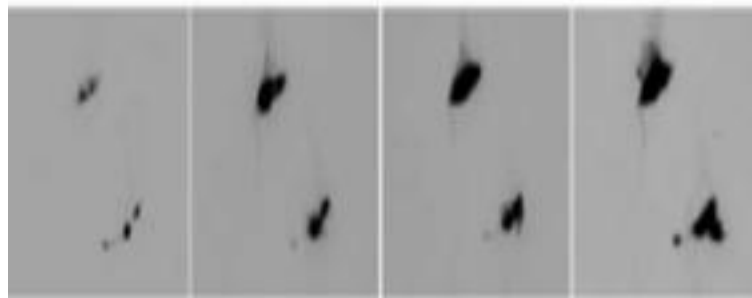
- 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법' 대상 시설물(국토교통부 한국시설안전관리공단) 중 해당 강구조물의 점검 및 진단에 적용
- 주관기관인 (주)다음기술단은 KOICA ODA 사업으로 연구기간 중 인도네시아 국가 시설물 안전역량 강화사업 참여, 시범 사업에 적용 가능
- 향후 국외의 기존 유지관리 영업망(중국, 동남아시아, 인도, 중동, 남미)을 통한 해외 marketing 추진(전시회 및 기술설명회 참여)

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 기술 개발 동향

가. 국내 현황

- 국내의 경우 정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라, 육안 검사(VT), 침투탐상검사(PT), 초음파 탐상검사(UT), 방사선 투과검사(RT), 와전류 탐상법(ECT), 자분탐상검사(MT), 방사선 사진 판독 등에 의해 국부적인 내구성조사 항목으로 실시되고 있음
- 유사 기술을 이용하여 파이프 및 탱크 바닥과 같은 균일단면을 가지는 강자성체의 불연속점을 찾는 연구가 진행 중이나 강재의 손상검사를 위해 기술이 개발된 케이스는 없음. 외국의 장비를 구입하거나 임대하여 검사/용역 하는 수준의 시장형태임
- 적외선 열화상 카메라를 이용한 비파괴 검사기술로 도장 두께 및 도장 내 녹을 검출하는 기술, 비접촉식 레이저 초음파 영상화를 통한 노치 손상 시각화 연구, 피로균열 감지용 무선 센서노드 기술 등 강재의 비파괴 검사기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음



<도장 내부 녹 검출>



<비접촉식 레이저 스캐닝 구조물 손상 검출 >

- 해외 연구사례를 벤치마킹하여 연구단계에서는 시뮬레이션 및 연구실 단위의 실험은 이루어지고 있으나 실제 최종 개발품 및 현장 적용품은 존재하지 않아 선도국가와의 기술격차는 5년 이상으로 판단됨
- 강자성체이며 연속체라는 유사한 특성을 가진 배관구조물을 대상으로는 마그네틱 센싱을 이용한 손상검색기법에 대한 연구가 이루어 졌지만, 현장 조사 중 조사자가 이동하면서 비파괴검사에 적용하기에는 하드웨어의 개선 및 최적 손상진단 알고리즘의 개발이 반드시 요구됨

나. 국외 현황

- 해외의 경우 안전진단을 위해 마그네틱 기반의 비파괴 검사법이 개발되고 연구된 결과 미국, 유럽 지역의 경우 기업들에 의해 사업화 되고 있으며, 성능을 안정화 시키고 그 적용범위를 확대하는 방향으로 연구가 꾸준히 진행되고 있음
- 마그네틱 센싱 기반의 진단 기술은 해외의 경우 연속체 구조물의 비파괴검사에 일찍이 적용되었지만, 기업에 의해 용역형태의 사업화가 되면서 폐쇄적인 기술정보 공유로 인해 기술수준의 발전이 다소 지체 되어있는 상태임
- 이로 인해 기술의 초기와 마찬가지로 단순한 일차적인 마그네틱 신호로부터 신호필터링을 통해 LF 신호와 LMA 신호의 구분을 통해 전문가가 직접 손상을 판정하는 수준에 머무르고 있어 객관성이

부족함

- 온도 및 진동 / 이동 속도에 따른 계측 값 보상이 부분적으로 이뤄지고 있지만 연구적인 단계에서 머무를 뿐 전체적인 솔루션에 적용되어 손상진단에 활용된 경우가 없어 정량화가 어려웠고, 원신호 또는 주관적인 정보의 전달로 점검책임자가 결과를 직관적으로 인지 하는데 어려움이 있음
- 최근 정보통신기술로 본 기술의 개선 및 발전의 여지가 많지만 적극적인 연구의 부족으로 기술의 발전이 정체 되어있는 상태임

2. 현재 적용기술의 분석

가. 강재용접부의 균열상황을 파악하는 비파괴검사

- 침투탐상시험 : 도포막을 제거한 표면에 침투액을 도포하고 시간경과 후 건어내어 현상액을 도포했을 때, 균열이 있으면 모세관현상에 의해 침투액을 빨아내기 때문에 균열을 확인할 수 있는 방법
- 자분탐상시험 : 시험대상 위치의 도포막을 제거하여 자화형광자분(磁化螢光磁粉)을 도포한 뒤를 자외선으로 조사하여 균열을 확인하는 방법
- 초음파탐상시험 : 시험대상 위치에 초음파를 전파시켜 균열장소에서 반사되는 것으로 균열을 확인하는 방법

나. 강재 부식 상황을 파악하는 비파괴검사

- 부식된 강재 중에 남아있는 강재두께를 측정하는 방법으로 초음파탐상시험이 사용되고 있다.
- 시험 시에는 시험위치의 도포막과 녹을 제거(녹에 의해凹凸이 생긴 경우는 초음파 전파용 탐촉자가 밀착하지 못해 측정 정밀도가 저하됨)

다. 기타

- 이 외에 전자(電磁)초음파 탐상법, 방사선 탐상법과 레이저를 이용하는 방법 등이 개발되고 있으나 실용면에서는 문제점이 많음
- 어떤 방법을 사용해도 균열 확인은 가능하지만 검사기술자의 검사능력이 결과를 좌우함
- 비파괴검사가 복잡하고 시간이 오래 걸리기 때문에 국부적으로 안전점검이 수행되고 있으며 국부적인 조사를 이용해 전체 구조물에 대한 건전성을 평가하고 있어, 구조물 상태에 대한 왜곡된 점검이 수행되고 있음

제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 강구조물 손상 및 진단기술

가. 강구조물의 손상

(1) 강구조물 손상종류 확인

- [안전점검 및 정밀안전진단 세부지침] 강구조물의 점검부위 및 손상종류 확인
- 강 구조물의 균열은 눈에 잘 띄지 않으므로 거세트판 용접 끝부분이나 하중 집중점의 용접부 등 취약부에는 분명히 균열이 있을 것으로 생각해야 발견할 수 있으며, 특히 용접부의 도장 부풀음, 쇠파우 부착, 이상음 발생 등의 징후가 있는 부분을 중점적으로 확인하고 있다.

<강 바닥판, 강 거더 및 강 교각(강 주탑)>

점검부위	손상종류
공통	• 도장 손상 및 부식 • 현장이음부 볼트손상, 누수 • 신축이음 하면, 배수구 주변, 난간하면 누수, 부식 • 이상음 발생
피로강도등급 낮은 용접상세부 (D, E급)	• 피로균열
받침부	• 복부판 부식 및 국부좌굴 • 거더와 받침연결부 부식 • 게르버교의 경우 핀 연결부 부식 • 지점보강재 하단 용접부 균열 • 박스내부 출입구 방치 • 박스내부 바닥 물고임 및 부식
중앙부	• 부식 • 플랜지 변형 및 처짐 • 맞대기 용접부, 덮개판 덧댐부 끝부분 균열
주탑	• 주탑하단부 연결볼트 부식 및 파단
보수부위	• 용접부 및 용접부 주변 균열
부재연결판	• 트러스교, 아치교의 현재, 사재, 수직재 연결판의 부식, 균열 및 변형 • 사장교, 현수교의 케이블 정착부 연결판의 부식, 균열 및 변형



<용접부 균열>



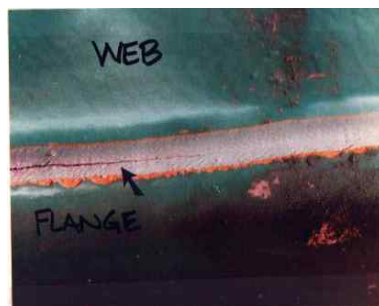
<용접교차부 균열>



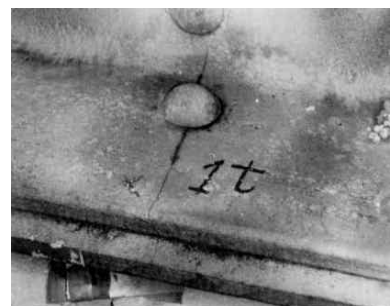
<맞대기 용접부(하부플랜지)>



<수직보강재 맞대기 용접부>



<필렛용접부(용접거더)>



<리벳거더 하부앵글(리벳거더)>

(2) 재료시험 기준수량(교량)

<기본과업>

구 분	교 량		비 고
	상부구조	하부구조	
반발경도시험	- 철근콘크리트 : 2개소/50m - 강합성교 : 1개소/50m	1개소/연장50m - 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	• 동일부위 시험
초음파 전달속도시험	- 철근콘크리트 : 2개소/50m - 강합성교 : 1개소/50m	1개소/연장50m - 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	
철근탐사시험	- 철근콘크리트 : 2개소/50m - 강합성교 : 1개소/50m	1개소/연장50m - 교대, 교각 개소수 (경간장 50m 이상)	
탄산화 깊이 측정	5경간 이내 : 4~6개소1) 5경간 이상 : 6~9개소2)		
염화물 함유량시험	3개소 이상3)		• 간만대 또는 비말대 포함
균열깊이 조사	- 부재의 중요도를 고려 - 책임기술자의 판단에 따라 수량 결정		• $C_w=0.3\text{mm}$ 이상 균열
강재용접부 초음파탐상시험	- 플레이트거더교 : 1개소/경간별 거더 - 박스거더교 : 2개소/경간별 거더		• 맞대기용접부

주1) 철근콘크리트 상부구조에서의 최소 2개소 이상 실시

주2) 철근콘크리트 상부구조에서의 최소 3개소 이상 실시

주3) 염화물 함유량 시험시 시료(코어) 채취위치는 철근콘크리트 상부구조에서 최소 1개소 이상 실시하고, 염해에 취약한 해상교량과 하천교량 중 염해의 영향이 있을 것으로 판단되는 하천과 바다가 만나는 합류부 부근 교량의 경우에는 교량 하부 수중부(간만대 또는 비말대)를 대상으로 1곳 이상의 시료를 채취하여 염화물 침투 및 염해여부 확인

<선택과업>

구 분	교 량		비 고
	상부구조	하부구조	
코어채취1)	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		
수중조사	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		• 필수적으로 실시
비파괴 재하시험	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		
철근부식도시험	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		
강재용접부 자분탐상시험	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		• 균열의심부
방사선투과시험	과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정		• 맞대기용접부

주1) 콘크리트 코어를 채취할 경우 그 채취 지점은 구조물에 영향이 최소화되는 지점을 선정토록 하며, 이전에 수행한 안전점검이나 정밀안전진단에서 코어채취 및 실내시험에 대한 자료가 충분하고 평가기준에 적합한 경우에는 기존의 자료를 이용할 수 있다.

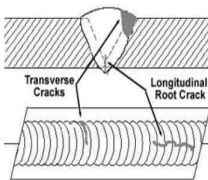
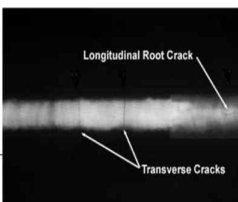
(3) 강구조물 주요결함 · 손상과 대책

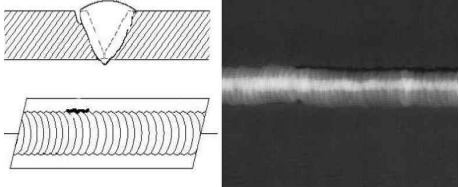
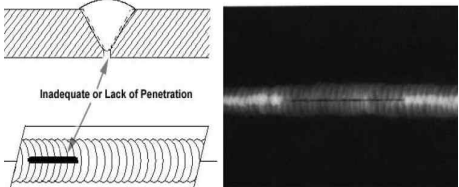
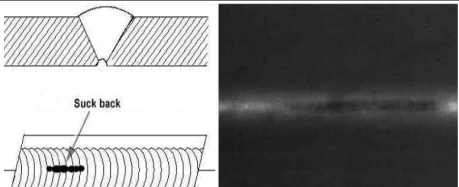
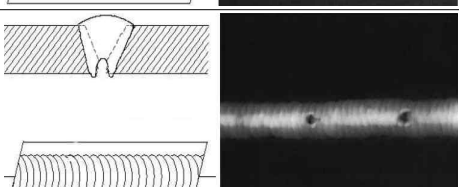
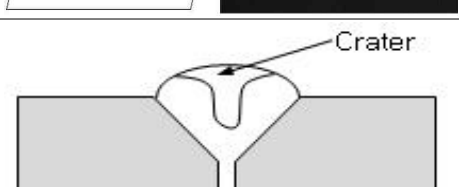
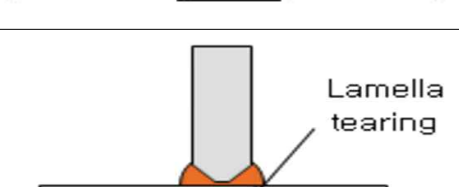
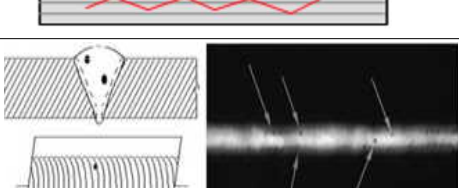
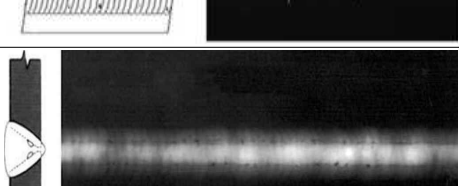
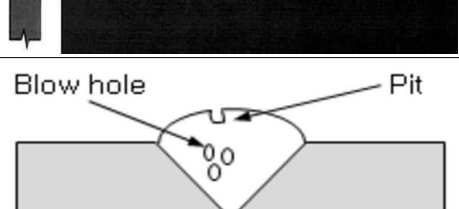
- 1995년 [시설물의 안전관리에 관한 특별법]이 제정된 이후 많은 교량에 대한 정밀안전진단이 수행되었으며 각종 보고서를 통해 발표된 교량에 대한 진단결과를 분석해 보면, 구조형식별로 공통적으로 발생하는 결함 · 손상이 있는 것을 알 수 있으며, 대부분의 결함 및 손상은 설계불량, 시공성을 고려하지 않은 설계, 시공정밀도 부족, 마무리 작업 소홀 등에 기인한 것으로 확인하였다.

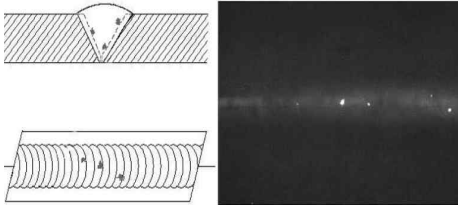
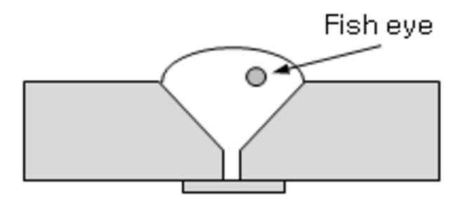
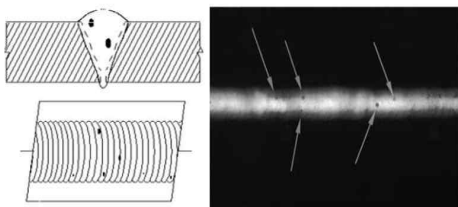
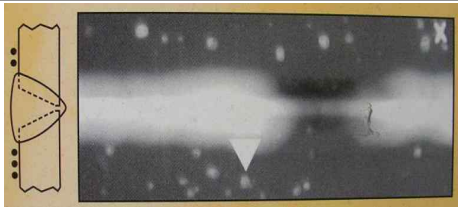
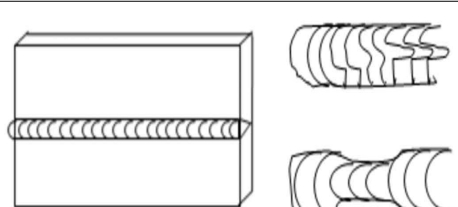
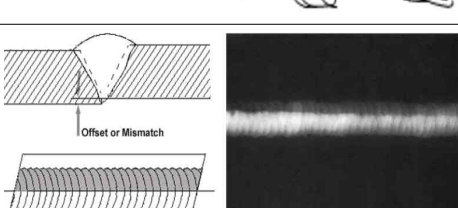
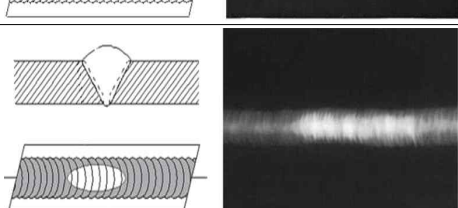
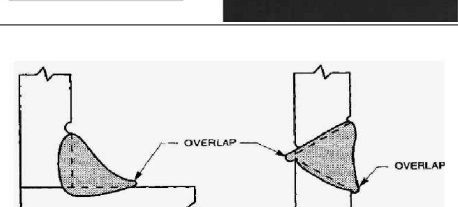
결함 내용		원인	대책
국부변형	• 복부판 좌굴	• 보강재 간격 부적절 • 복부판 두께 부적절 • 운반, 가설시 취급 부주의	설계 ○ 여유도 확보한 계산 필요 ○ 용접, 볼트체결 작업이 가능한 도면 작성 ○ 모서리 중 응력 집중부의 부재 상세도 작성 ○ 점검, 보수, 보강 작업이 가능한 부재 설계 시공 ○ 시공상세도 작성전 구조안전 재검토 ○ 시공상세도 작성시 작업조건, 취양부 등에 대한 철저한 검토 ○ 각 공정별 시공규정 숙지 및 작업 절차서 이행 철저 ○ 각 공정별 작업시 사전 검사 강화 ○ 가조립 이행 철저
	• 보강재 좌굴	• 보강재와 받침 위치의 불일치 및 무분별한 절취 • 가설 JACK 설치시 응력집중	
균열	• 모서리의 용접부 균열 • 노치부 균열 • 교번응력 발생부위의 균열 • 가로보, 세로보의 균열	• 공동, 크랙, 용입불량 등 용접불량 • 부재형상의 부적절	
용접불량	• 맞대기 용접부 용입 불량 • 필렛 용접부 용접 길이부족 • 크랙, 공동, 용접 누락 등 결함	• 용접 절차 불이행 • 제작시 검사 불철저 • 시공 소홀	
볼트체결 불량	• 볼트 조임 불량 또는 풀림 • 볼트 누락 • 볼트절단	• 볼트체결 작업 및 검사 소홀 • 제작 오차 과다	
부식	• 신축이음부의 거더단부 • 슬래브 접속부 • 박스형 단면 내부 • Truss, Arch부재의 박스 단면 내부	• 신축이음부의 누수 • 슬래브 하면으로 침투한 빗물 • 도장 불량 • 유지관리 불량	시공 ○ 슬래브 하면에 물끊기 홈 설치 철저 ○ 배수구멍 위치와 주부재 이음위치 상이하게 배치 ○ 볼트 이음부의 방수처리 철저

(4) 용접부의 주요손상

- 전문가 자문 및 자료 조사를 통해 총 21개 용접결함 종류를 확인하였으며, 4개 분류로 구분함

구분	손상명칭	발생원인	사진
불연속	균열 (Crack)	- 이음의 간격이 너무 커졌을 때 - 판부의 용접 비드가 작아졌을 때 - 일층비드 졸단에서 운봉이 부적당 할 때 - 용접볼 선택이 잘못일 때 - 비드단면 형태가 부적당할 때 - 개선형태, 루트간격이 부적당 - 냉각속도가 커졌을 때 - 개선 수분제거 및 용접봉 건조 불량시	 

구분	손상명칭	발생원인	사진
	언더컷 (Undercut)	- 전류가 너무 높을 때 - 아크 길이가 너무 길 때 - 용접속도가 너무 빠를 때 - 부적당한 용접봉 사용 시	
	용입부족 (Incomplete Penetration)	- Root Gap이 좁을 때 - 용접속도가 너무 빠를 때 - 용접전류가 낮을 때 - High-Low가 심할 때	
	내면오목부 (Internal concavity or suck back)	초층이 이후 층의 용접과정에서 발생하는 응고 수축에 의해 빨려 들어간 현상	
	용락 (Burn-Through)	입열이 높거나 국부적인 과열에 의해 녹아서 흘러내린 현상	
	Crater	- 용접마지막에 아크를 급히 절단함으로 우묵히 패인 부분 - 온도저하로 생긴 용접금속의 수축으로 균열이 발생하는 경우가 있음	
	Lamellar tearing	- 철골부재의 용접 이음에 의해 압연강판 두께 방향으로 강한 인장구속 발생 - T형이음, 구석이음에서 많이 발생	
공극	기공 (Porosity)	- 용접봉에 습기가 많을 때 - 용접부가 급랭될 때 - 이음부에 오일, 페인트 등 - 아크 분위기 속에 수소, 산소, 일산화탄소가 많을 때	
	융합불량 (Lack of Fusion)	- 개선 각도가 좁았을 때 - 용접 속도가 늦었을 때 - 전류치가 낮았을 때	
	Pit · Blow hole	- 용접시 용접금속 내에 흡수된 가스가 표면에 나와 생성하는 작은 구멍이 Pit - 내부에 그대로 잔류된 기공이 Blow hole	

구분	손상명칭	발생원인	사진
혼입	슬래그 혼입 (Slag Inclusion)	- 슬래그 제거가 불완전했을 때 - 전류가 낮거나 운봉속도가 너무 느릴 때 - 용접봉의 각도 부정확할 때 - 슬래그가 용융지보다 앞설 때	
	텅스텐 혼입 (Tungsten Inclusion)	TIG 용접을 할 때 용접하고 있는 텅스텐 전극의 선단을 용접작업자의 잘못으로 용저비에 접지시키면 텅스텐이 용접금속으로 이행하여 혼입	
	Fish eye	Blow hole 및 혼입된 Slag가 모여 둥근 은색반점이 생기는 결함	
	Cluster Porosity	용접부위에 기름이나 구리스 등의 이물질이 묻어있는 상태에서 용접을 진행할 경우에 발생	
	스패터 (Satter)	- 용접 작업중 용접봉으로부터 튀어나온 용융 금속입자가 식어 굳는 것 - 도장과 접합부에 지장을 주기 때문에 제거해야 함	
기타 (치수)	비드 외관불량	- 용접봉의 조작으로 인해 용적급속 표면에 생기는 띠모양 - 비드 폭과 띠 모양이 불균일하여 허용치를 넘게 되면 외관불량이 됨	
	엇갈림 (Offset or Mismatch)	용접 전, 취부상태가 불량할 경우에 Root Joint 부위의 Mis-alignment에 의해 발생	
	Excess Weld Reinforcement	용접이 과다할 때 발생	
	오버랩 (Over lap)	- 전류가 너무 낮을 때 - 용접속도가 너무 느릴 때 - 운방방법 (용접봉 취급) 불량	

구분	손상명칭	발생원인	사진
	Throat(목두께)) 부족	- 모살용접에서 용접덧살 두께가 부족하여 발생한 결함 - 구조내력상 중대한 결함	
	각장부족	- 모살용접에서 용착면의 길이가 부족하여 발생한 결함 - 구조내력상 중대한 결함	

구분	용접결함 종류
불연속	균열, 언더컷, 용입부족, 내면오목부, 용락, Crater, Lamellar tearing
공극	기공, 용합불량, Pit·Blow hole
혼입	슬래그 혼입, 텅스텐 혼입, Fish eye, 스패터(Satter), Cluster Porosity
기타	비드 외관불량, 엇갈림, 오버랩, 목두께 부족, 각장부족, Excess Weld Reinforcement

나. 강구조물 진단기술

(1) 강구조물 진단장비 기술 동향

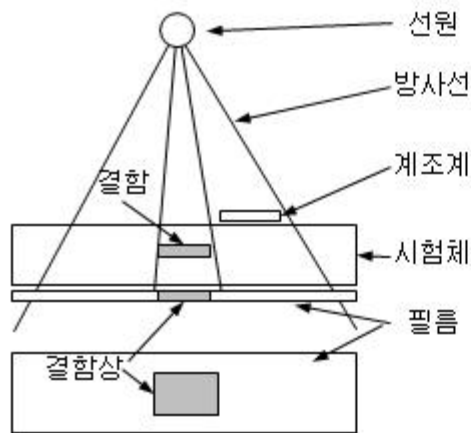
- 고강도 강재의 출현과 함께 용접 및 제작기술의 발전으로 인하여 다양한 형상을 갖는 강구조물의 건설이 날로 증가하고 있다. 기존 콘크리트 구조물에 비하여 강구조물은 시공성, 내진성이 높으나 공장에서 제작 가능한 치수의 제한으로 인하여 많은 이음부를 갖는 구조물이다. 강구조물 제작에 있어서 이음부의 용접결함과 피로균열은 강구조물의 성능에 가장 중대한 영향을 미치고 있으며, 강구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 용접부의 결함과 피로균열이 발생하기 쉬운 구조상에 대한 결함 및 균열 검출법이 중요하다고 할 수 있다.
- 용접부위에서 발생하는 결함의 종류는 기공(Porosity), 불완전 용입, 불완전 용융, 균열, 오버랩 등 다양하며, 용접부의 결함은 강구조물을 취약하게 만드는 원인이 된다. 용접부 결함은 육안으로 조사가 거의 불가능하기 때문에 여러 가지 비파괴조사 방법을 이용하여 결함을 조사하고 있다.
- 초기에는 방사선투과법과 초음파탐상법으로 대표되었던 비파괴검사 기술이 주로 품질관리 목적으로 적용되어 왔으나, 현재에는 구조물의 유지관리에서 점검의 보조수단으로 광범위하게 사용되고 있다. 현재 강구조물의 품질관리 및 점검에 적용되고 있는 비파괴검사법은 크게 내부결함과 표층부 결함 및 손상 검출 목적으로 적용되고 있다. 앞서 언급한 두 가지 비파괴검사법이 내부결함의 검출을 목적으로 적용되는 반면에, 자분탐상법, 염료침투법, 와상전류법 등은 표면탐상을 주목적으로 개발된 비파괴검사법이다. 비파괴검사법의 종류에 따라 차이는 있으나 대부분의 검사법이 강구조물에 발생한 균열, 용접결함, 재료의 열화 등을 검출하기 위한 목적으로 적용되고 있다.

(2) 강구조물 진단기술 및 방법

- 방사선투과법
 - 강구조물의 용접부 결함검출에 대표적으로 적용하고 있는 비파괴검사법인 방사선투과법(Radiographic Methods)은 고전적인 검사법으로써 X-선 또는 감마선을 물체에 투과하여 물체내부의 이미지를 얻어내는 방법이다.
 - X선을 사용하는 비파괴시험은 상업용 X선 발생기에 의해 생성되는 X-방사선이 조사 부위의 두께 및 원자번호에 비례하여 흡수된다는 원리에 근거하고 있다. 따라서 이 방법에 의해 결함이 있는 물체를 조사하는 경우, 결함 부위에서의 X선 흡수는 결함부 바로 옆의 손상되지 않은 부위와 비교하면 다른 양상을 보인다. 물체를 통과한 X선은 필름이나 형광 스크린에 기록되고 결함부 위치에

서 이미지는 보통 더 어둡게 나타난다. 필름에 기록된 X선의 이미지는 영구적 기록으로 남게 되며 결함의 크기와 형태를 2차원으로 나타낼 수 있다.

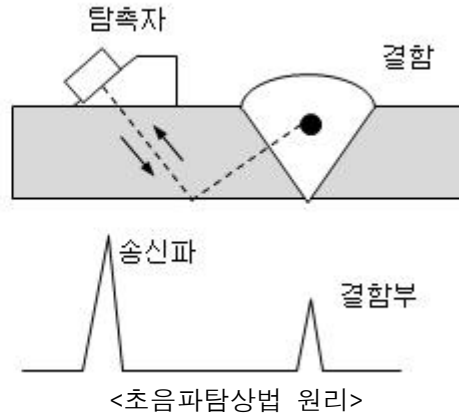
- 방사선투과법으로 용접 또는 주조(Casting)의 슬래그 함침(Slag Inclusion)이나 간극과 같은 결함은 비교적 쉽게 찾아낼 수 있다. 균열과 같은 2차원 결함도 탐지할 수 있으나 결함이 X선의 축에 거의 평행한 방향일 경우에만 가능하다. X선에 수직인 균열 또는 2차원결함은 X선 흡수를 크게 변화시키지 않으므로 탐지되지 않는다. 방사선투과법의 가장 큰 장점은 내부결함의 크기 및 형태 등 결함의 성질을 판단하기가 쉽고, 이미지로 얻은 결과가 양호하며 결과를 거의 영구적으로 보관 가능하다는 것이다.
- 방사선투과법의 단점으로는 결함부위의 공간적인 정보를 얻을 수 없다는 것이다. 현재 결함부위의 공간적인 정보를 알기 위해서는 여러 각도에서 촬영한 결과를 분석하는 방법이 널리 활용되고있다. 앞에서 언급한 것과 같이 단점으로는 결함의 깊이를 추정하기 어렵고 방향성이 좋지 않은 2차원 결함을 검출하기 어렵다는 것이다. 또한 방사선을 투과하는 장비는 인체에 유해한 방사선을 방출하기 때문에, 전문가 이외에는 사용이 제한되고 있다.
- 방사선투과기의 크기로 인하여 경우에 따라서는 현장에서는 사용이 어려울 수도 있으며, 탐색속도가 느리고, 탐색비용이 상당히 고가이다. 따라서 방사선투과법을 효과적으로 적용하기 위해서는 육안점검 및 다른 비파괴시험법을 조합적으로 적용하는 방안이 필요하다.



<방사선투과법 원리>

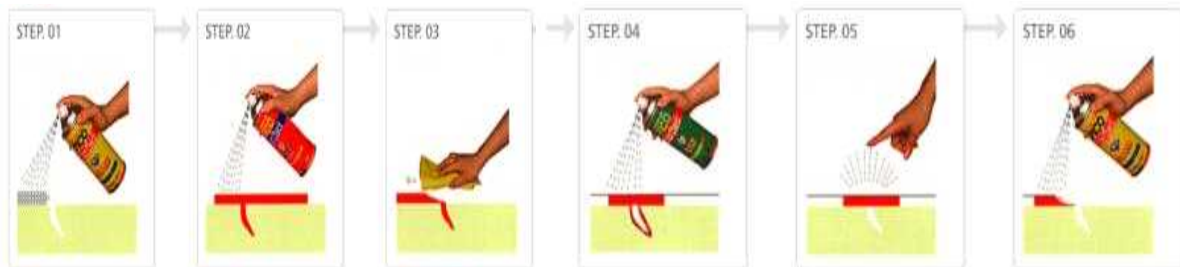
• 초음파탐상법

- 초음파탐상법은 내부결함을 검출하기 위해서 물체 내에서 발생하는 소리의 파동 특성을 이용한다. 기계진동 형태의 고주파 음파를 시험할 부분으로 주사하면 재료를 통과하는 음파는 결함부 또는 경계면에 부딪치게 된다. 그러면 음향진동은 반사가 되고 반사된 신호를 분석하면 결함 또는 경계면의 위치와 형태를 파악 할 수 있게 된다. 초음파탐상법은 강부재의 두께, 균열의 위치, 용접결함 및 공극의 위치 조사에 적용된다.
- 표준 측정 장비는 음파생성기, 수신장치(보통 한 기구 내에 조립됨)와 초기파 및 반사파가 나타나는 화면 등으로 구성된다. 화상 표시장치는 결함부의 위치(깊이) 및 결함의 성질을 추정할 수 있게 하고, 기구의 감지부(탐지부)를 조사할 부분을 따라 이동함으로써 결함의 크기 측정을 가능하게 한다. 조사 민감도는 음향 진동수, 탐지부의 설계, 기계의 조작, 반사신호의 전기적 처리기술과 같은 여러 가지 시험변수에 영향을 받는다.
- 초음파탐상법의 장점은 휴대성, 민감성이 높고 균열의 위치 또는 결함의 공간적인 정보를 얻을 수 있다는데 있으며, 방사선투과법에 비하여 안전하고 경제적인 비파괴검사법이다. 최근에는 현장 측정 자료를 컴퓨터 처리와 보고서 작업에 적당한 형식으로 저장할 수 있는 디지털 장비가 보급되어 있다. 단점으로는 초음파탐상을 통하여 표면결함을 효과적으로 찾아낼 수 없다는 것이다.
- 초음파탐상을 하기 위해서는 피검사체에서의 초음파 모드변환, 속도, 감쇄 등과 같은 기본적인 초음파 특성을 파악하고 있어야 한다. 초음파가 각도를 가지고 입사하면 초음파의 모드변환이 일어나며, 초음파의 모드변환에 따라 초음파의 속도 및 감쇄도 변하게 된다. 이 특성들은 초음파탐상을 하는 경우 탐촉자 선정 및 표준 시험편 선정 등에 영향을 준다.



• 염료침투법

- 염료침투법(Liquid Penetrant Testing)은 그 원리가 비교적 간단하면서도 표면의 균열, 결함, 불연속 등의 검출에 효과적인 비파괴검사법이다. 염료침투법은 적용범위가 넓고, 경제적이며 전문적인 기술이 필요없는 시험법이다. 염료침투법의 단점은 물체표면에 있는 결함 또는 불연속면의 검출 이외에 결함의 공간적인 정보를 얻기는 어렵다는 것이다.
- 염료침투법에 의한 표면결함 검출방법의 원리와 검사법은 다음과 같다.
- (1) 침투액이 결함부위에 잘 스며들 수 있도록 조사할 물체 표면을 기계적 또는 화학적인 제거제를 사용하여 기름, 수분, 다른 오염물질을 청소한다.
- (2) 분무기를 사용하여 침투액을 조사 위치에 분사하고 침투액이 모세관현상 또는 표면 습윤 현상에 의해 결함부에 스며들도록 한다.
- (3) 일정 시간이 경과한 후 침투액을 닦아내고 현상제를 물체표면에 분사한다. 침투액을 제거 하는 방법으로는 수세법, 유화제법, 용제법 등을 적용한다.
- (4) 물체표면이 건조되면 결함이 있는 부위에 스며든 침투액과 현상제의 반응으로 인하여 결함 부위를 육안으로 확인 가능하게 된다.



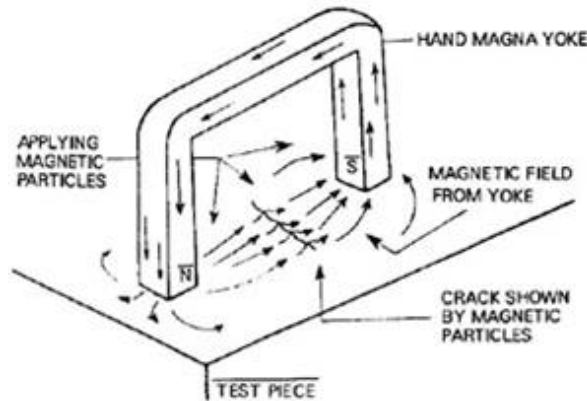
<염료침투법 방법>

• 자분탐상법

- 자분탐상법(Magnetic Particle Examination) 은 염료침투시험과 같이 물체의 표면이나 표면 부근의 결함검출에 적용된다. 자분탐상법의 원리는 물체표면에 있는 불연속면으로 인한 자기장의 변화를 결함검출에 이용하는 기술이다. 이 검사법은 비교적 복잡한 형상을 갖는 강구조물의 구조상세를 조사할 수 있으며, 작은 결함 또는 균열의 검출이 가능하고 경제적인 비파괴
- 검사법이다. 단점으로는 자기장을 형성하기 위하여 고압의 전류가 필요하며, 물체표면 아래에 있는 작은 결함은 검출하기 어렵다는 것이다.
- 자분탐상법에 의한 결함 검출방법은 다음과 같다.
- (1) 조사할 물체의 표면을 자분이 자유롭게 움직일 수 있도록 청소한다. 조사할 물체표면에 자기장을 발생시키고 미세한 분말 상태의 자분을 뿌리거나 붙여낸다.
- (2) 균열을 탐지하기 위해서는 균열이 자기장에 대해 거의 횡방향으로 정렬되어 있어야 한다. 이러한 이유로 자기장을 예상되는 결함형성 방향에 수직방향, 또는 여러 방향으로 정렬시켜야 한다.
- (3) 시험부의 표면에 위치시킨 두 개의 전류-전달 구리막대를 사용하여 국부적으로 자성화 시킨

다. 이 막대는 각 접촉점에 원형 자장을 형성하고, 이들 사이에 전류가 흐를 때 자기장에 수직한 표면결함을 자분을 사용하여 탐지한다. 막대를 조사할 구조물 또는 일부분으로 이동시키면, 어느 방향에서의 결함도 발견이 가능하다.

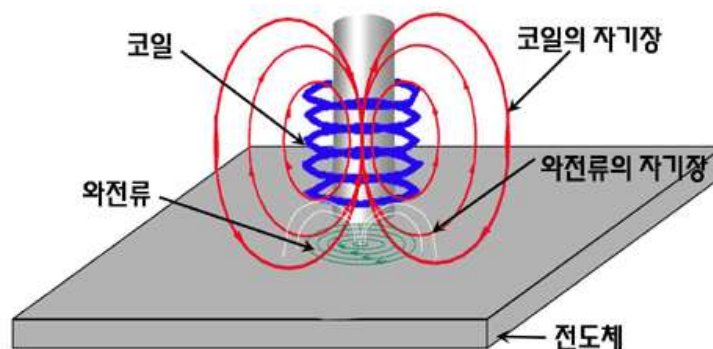
- 자분탐상법의 장점은 휴대성이 좋고 시험에 최소한의 기술이 요구되며, 미세균열도 발견할 수 있다는 점이다. 물론 적용할 수 있는 재료 및 발견할 수 있는 결함의 형태는 한정된다. 또한 국부적으로 적용하는 경우, 조사 부분에 자성 상태를 남긴다는 추가적인 제약사항이 있는데 일반적인 강구조물에서는 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 용접과 같은 후속작업에 방해가 될 수도 있기 때문에 상당한 시간과 비용을 통하여 검사부위의 자성을 제거시켜야 하는 경우가 있다. 자분탐상법에 의한 결함 검출방법은 한국산업규격인 KS D 0213에 규정되어 있다.



<자분탐상 원리>

• 와상전류법

- 와상전류법(Eddy Current Examination)은 그 원리가 자분탐상법과 매우 유사하며, 정밀한 자기장의 변화를 감지할 수 있는 센서의 개발과 함께 비교적 최근에 실용화된 비파괴검사법이다. 와상전류시험법은 조사하고자 하는 물체에 자기장이 아닌 전기장을 교란시켜 결함을 검출하는 것이 자분탐상법과 다른 점이다.
- 이 방법에는 교류를 전달하는 코일이 전도체 주위에 와상전류(Eddy Current)를 발생시킨다. 전도체 와상전류는 여자(Exciting) 또는 독립 탐지 코일에서 전도체 및 여자 코일의 성질, 전류의 주파수 및 크기, 전도체의 불연속성 유무에 따라 달라지는 임피던스를 발생시킨다. 따라서 이 방법은 조사하려는 물체의 표면에 코일을 장치하며, 결함은 계측장치가 읽어 들이는 임피던스의 변화를 통해 조사하며, 조사결과는 일반적으로 도표화한다.
- 와상전류법의 결과는 물체의 기하학적 형상에 크게 영향을 받으므로 간단한 형상에 대해서만 조사할 수 있다는 것이 이 방법의 단점이다. 복잡한 형상은 임피던스값 자체를 변화시키기 때문에 유용성이 제한될 뿐만 아니라 자분탐상법처럼 전도체만을 조사대상으로 할 수 있으며, 페인트와 같은 여러 가지 표면조건에 둔감하다는 단점이 있다. 그러나 물체표면으로부터 깊은 곳에 존재하고 있는 결함을 검출할 수 있으며, 진동수를 적절히 조절함으로써 표면조사만을 할 수도 있다. 결함의 크기 또한 조사 지역의 결과로부터 측정될 수 있다.



<Eddy Current 원리>

(3) 비파괴검사 기준 및 차별성

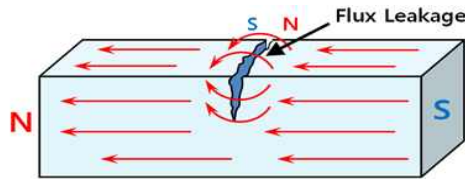
- 우리나라의 강구조물 비파괴검사 기준은 본고에서 언급한 바와 같이 한국산업규격(KS규격)에 일부 규정되어 있으나, 이는 외국의 기준을 거의 원용하고 있는 실정이다. 과거에 비하여 비파괴검사의 필요성이 높아지면서 다양한 비파괴검사에 세부적인 기준도 마련되리라 생각된다. 본고에서는 강구조물 비파괴시험법에 관련된 미국 ASTM의 비파괴시험법을 소개하였다.

검사방법	기본원리	검출대상 및 적용	특징
자분탐상 검사(MT)	자기흡인작용 철강 재료와 같은 강자성체를 자화시키면 결함누설 자장이 형성되며, 이 부위에 자분을 도포하면 자분이 흡착	강자성체 재료 (용접부, 주강품, 단강품 등)의 표면 및 표면 직하 결함 검출	강자성체에만 적용 가능, 장치 및 방법이 단순, 결함의 육안식별이 가능, 비자성체에는 적용불가, 신속하고 저렴함
	차별성 MFL방식은 자화시킨 강재표면에서 발생하는 누설자속을 측정하여 손상을 검출하는 비파괴검사방법으로, 자분을 도포하여 형상을 관찰하는 자분탐상검사와 차별화된다.		
방사선투과 검사(RT)	투과성 방사선을 시험체에 조사하였을때 투과한 방사선의 강도의 변화 즉, 건전부와 결함부의 투과선량의 차에 의한 필름상의 농도차로부터 결함을 검출	용접부, 주조품 등의 내부 결함 검출	반영구적인 기록가능, 거의 모든 재료에 적용 가능, 표면 및 내부 결함 검출가능. 방사선 안전관리 요구
	차별성 본 연구의 MFL방식은 강자성체의 손상검사를 간편하고 빠르게 하여 광범위 검사가 가능한 기술로, 비파괴검사 결과에 대한 신뢰성 향상이 가능하다. 이에 반해 방사선 투과 검사는 거의 모든 재질에 검사할 수 있으나, 높은 검사비용으로 국부적 검사만 실시하고 있으며, 안전관리의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구의 MFL은 내부 손상의 형상을 확인할 수 없으나, 안전하고 저렴하게 광범위 조사가 가능하다.		
초음파탐상 검사(UT)	펄스반사법 시험체 내부에 초음파펄스를 입사시켰을 때 결함에 의한 초음파 반사 신호의 해독	용접부, 주조품, 압연품, 단조품 등의 내부 결함 검출, 두께측정	균열에 높은 감도, 표면 및 내부 결함 검출가능. 높은 투과력, 자동화 가능
	차별성 MFL방식은 사전준비 없이 강자성체에 바로 적용가능하나 초음파탐상검사는 탐촉자(Probe) 표면에 접촉 매질을 도포해야하며, 용접부가 작거나 판이 얇을 경우 탐상이 어려운 문제가 있다. 또한 표준시편으로 초음파를 교정해야하는 문제를 갖고 있다.		
와류탐상 검사(ET)	전자유도작용 시험체 표층부의 결함에 의해 발생한 와전류의 변화 즉 시험 코일의 임피던스 변화를 측정 하여 결함을 식별	철강, 비철재료의 파이프, 와이어 등의 표면 또는 표면근처의 결함 검출, 박막두께측정, 재질식별	금비접촉탐상, 고속탐상, 자동탐상 가능, 표면결함 검출능력 우수, 표피효과, 열교환기 튜브의 결함 탐지
	차별성 MFL방식은 마그네틱을 활용한 방법으로 코일에 전류를 흘려보내 자장을 발생시키는 와전류방법과 차별화된다. 또한 와전류방법은 전류발생을 위해 별도의 배터리가 필요하여 Portable 장비 개발에 어려움이 있다.		

2. 마그네틱 기반 강구조물 및 용접부 손상검출 알고리즘 개발

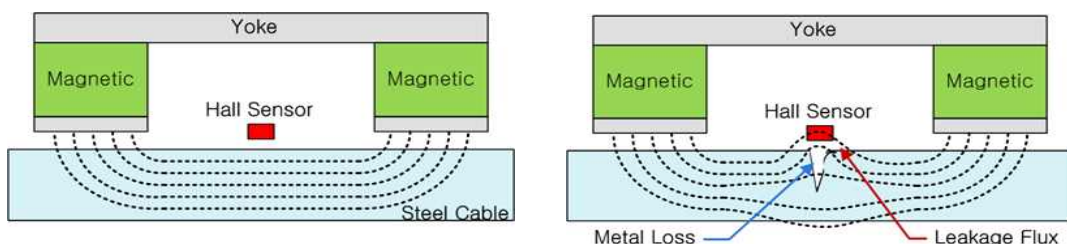
가. 누설자속의 발생 원리 및 감지 방법

- 본 연구 개발의 1차적인 목적은 강구조에 발생하는 균열과 같은 국부적인 손상 검색이다. 따라서 다양한 자기센서를 이용한 비파괴 검사법 중 국부적 손상(local fault)의 검색에 우수한 성능을 보이는 누설자속법(MFL)을 이용하여 강부재의 손상을 검색하고자 하였다.
- 강자성체인 강부재를 충분히 자화하게 되면 강부재는 자석과 같은 특성을 띄게 되는데, 이때 강부재 시편과 자화 요크는 자기 폐회로(static magnetic field)를 형성하게 된다.
- 이러한 강부재에 내·외부의 균열, 단면적의 변화 등 국부적으로 손상이 발생했을 때 결함 부분에서 자기장의 통과 단면적이 줄어들게 된다. 그런데 손상 틈의 공기는 자석만큼의 자기장 밀도를 가지지 못하기 때문에 아래 그림과 같이 자기 폐회로 내의 통과자속이 손상부분에서 주위의 공간으로 누설된다.



<손상부의 누설 자속 발생>

- 자속이 누설되는 현상은 'detour flux dipole'에 의해 설명된다. 결함의 자기저항에 의해 우회한 자속은 결함 주위에 집중하게 되어 결과적으로 유효 자기장의 세기를 증가시키고 결함 주변에 투자율이 증가한다. 따라서 검사체 주변에 흐르는 자기력선은 투자율이 증가한 결함부위에 집중되어 흐르게 되고, 이 작은 영역에서 자기력선은 magnetic line dipole같이 거동한다. 이 dipole을 'detour flux dipole'이라 한다. 이 dipole은 강관 내의 교란된 자기장과 같은 방향을 갖고, 결함 내의 누설자속과 반대 방향을 갖는 자기장을 생성시킨다.
- 이러한 원리에 기초하여 자속의 누설을 자기센서를 이용하여 비접촉 방식으로 계측함으로써 강부재의 국부손상을 검색 할 수 있다. 자속누설의 측정을 위한 센서헤드는 아래 그림과 같이 크게 시편을 자화시키는 자화부와 누설되는 자속을 계측하는 계측부로 두 부분으로 나눌 수 있다.



정상시편의 자속 분포

손상부의 누설자속 측정 원리

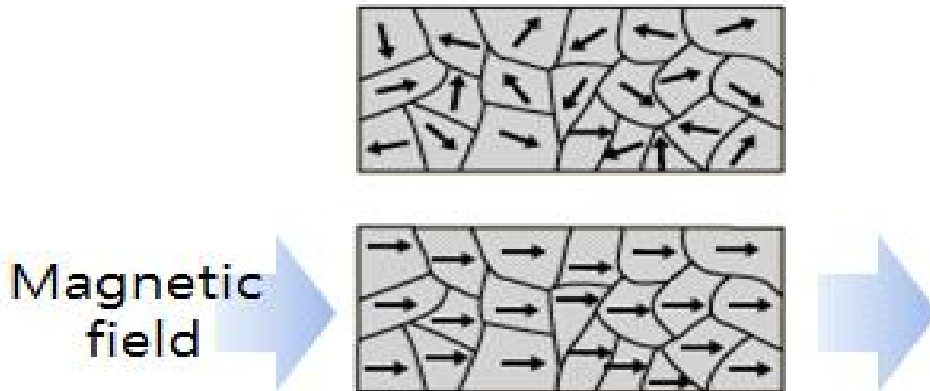
<누설자속의 발생 및 측정 방법>

- 자기장에 놓이는 시편의 자화는 자기이력곡선을 따르게 되는데, 일관성 있는 시험 결과를 얻기 위한 방법으로, 포화자화구간의 자화강도로 자화부를 구성하고 시편을 충분히 자화시키게 된다. 따라서 시편을 충분히 포화 자화시킬 수 있는 자기장 강도를 가지는 강력한 영구자석 또는 전자석을 이용하게 된다.
- 이때 손상부에서 누설되는 자속신호는 (1) 홀센서(Hall sensor)를 이용한 방법과 (2) 코일과 적분 회로(integrator circuit)를 이용한 방법으로 계측할 수 있는데 본 연구 개발에서는 홀센서를 이용하여 자속을 측정하였다. <손상부의 누설자속 측정 원리> 그림과 같이 누설되는 자속을 근거리 떨어진 홀센서를 사용하여 비접촉 계측할 수 있는데, 이는 홀 센서가 자기장에 놓였을 때 전류와 자기장의 방향에 수직하는 홀 전압이 발생하는 홀효과로 인해 계측되어 진다. 따라서 비파괴검사장비에서 수집되는 홀 전압 신호를 통해 누설자속을 감지함으로써 강부재에 발생한 국부 손상을 검색 할 수 있다.

나. 강부재 시험체 자화를 위한 자화부 설계

(1) 자화의 원리 및 방법

- 국부적인 손상부에서 누설자속을 발생시키기 위해서는 강자성체인 강부재 시편을 자석과 같은 성질을 가지도록 변화시키는 과정이 필요하다. 이를 위해 강자성체를 자기장(magnetic field)에 두면 자기적인 변화를 일으켜 자석과 같은 특성을 나타내는데 이때의 자기변화를 자화(Magnetization)라 한다. 이는 즉 자기장 내에 물체를 두면 그 물체 내의 각 부분은 자석이 되고, 그 결과로 물체의 양끝에 양음(+, -)의 자극(magnetic pole)이 나타나는 현상을 말한다. 자화의 원인은 영구 자기 쌍극자(magnetic dipole)가 외부 자기장의 작용으로 아래 그림과 같이 규칙 배열을 이루어 이른바 자기유도(magnetic induction)를 일으키는 점이며, 그 의미에서 자화를 유도 자화(induced magnetization)라고 부르는 경우가 있다.



<자기장의 작용에 따른 자기 배열 변화>

- 이와 같이 시험 대상체에 자기장을 인가시키기 위해서 다음과 같은 방법들이 사용될 수 있다. (1) 자화된 요크(yoke)를 대상체에 붙이는 방법, (2) 대상체에 직접 전류를 흘리는 방법, (3) 코일 또는 바(bar)를 대상체에 감아 자기장을 유도(induction)키는 방법 등이 있다.
- 인가시키는 자기장의 방향은 결함에 수직하게 하는 것이 누설자속의 크기를 증가시키는데 유리하다. 대상체의 형상이 복잡할 경우에는 단순한 방법으로 는 곤란하며 자석의 형상을 특수하게 고안할 필요가 있으며 또한 이상이 발생 되는 부위에 충분한 (수십 0e) 자기장을 인가시키기 곤란한 경우가 많다. 이 경우 특수하게 교류와 직류자기장을 적당하게 혼합한 형태의 자기장을 인가시키는 경우도 있다.
- 일반적으로 자기장을 연속적으로 인가한 상태에서 누설자속을 측정하는 방법을 사용하나, 경우에 따라서는 잔류자기 방법을 사용하기도 한다. 대상체를 자기장에 노출시킨 후에 자기장이 사라지게 되어도 대상체에 보자력(retentivity)만큼의 일정한 잔류자기가 남게 되고, 이것에 의해 결함주위에서 누설자속이 발생 하는 현상을 이용한다.
- 또한 자화를 위한 자석의 종류는 전자석과 영구자석을 대상체의 종류와 진단 목적에 따라 사용할 수 있다. 전자석을 이용할 경우 자화강도 및 주파수의 설정이 용이하고 큰 자기장을 발생시킬 수 있다는 장점이 있으나, 전류의 공급을 위해 별도의 전원 및 장비가 필요하므로 시스템이 무거워지는 단점이 있다. 반면 안정적으로 직류자기장을 형성하기에 용이한 영구자석을 이용할 경우 상대적으로 큰 자기장을 발생시키지는 못하지만 네오디뮴과 같은 강한 자석을 이용하게 되면 비파괴검사에 활용 가능한 충분한 강도의 자기장을 형성시킬 수 있으며, 전자석과는 달리 별도의 전원이 필요하지 않아 시스템이 간단해지고 가벼운 구성이 가능하다.
- 영구자석을 이용한 요크(yoke)에는 높은 보자력을 가지는 물질(Nd-Fe-B, Al-Ni-Co 합금 등)을 재료로 한 자석을 이용하며, 진단을 위해 시편에 설치되었을 때 자기적으로 페루프를 형성할 수 있는 구조로 요크를 제작한다. 본 연구에서는 네오디뮴(Neodymium) 영구자석을 이용하여 자화 요크를 구성하였다.

(2) 자화의 원리 및 이론

- 일반적으로 아주 작은 부분의 자기모멘트(magnetic moment)는 부피에 비례하므로, 단위 부피당의 자기 모멘트를 자화의 세기로 나타낼 수 있다.
- 자유공간 내에서 외부자기장이 자기모멘트 μ 에 가해지면 토크의 크기는 $\tau = \mu \times B$ 가 된다. 그러므로 자기모멘트는 아래 식과 같이 주어진다.

$$|\mu| = \frac{|\tau|}{|B| \sin \theta} \quad (2.1)$$

- 여기에서 θ 는 μ 와 B 의 사이각이다. $1\text{A}\cdot\text{m}^2$ 의 자기모멘트가 1T 의 자기유도에 수직인 방향으로 존재하면 최대크기 1Nm 의 토크를 갖는다. 막대자석의 경우에는 $\mu = p \cdot l$ 이 된다. p 는 Am 로 나타낸 자극의 세기이고 l 은 양극사이의 거리이다. 자극의 세기는 자기홀극(magnetic monopole)에서 나오는 자속(자기선속)의 항 Φ 로 정의된다. 이때 $p = \Phi / \mu_0$ 로 주어지며 따라서 다음의 관계식을 갖는다.

$$\mu = \frac{\Phi l}{\mu_0} \quad (2.2)$$

- 이 식에서 자속은 막대자석을 통과하는 것으로 단위가 웨버(Wb)이며 μ_0 는 진공투자율을 나타낸다. 막대자석에서의 자기모멘트 벡터 μ 에는 B 에 나란하도록 토크가 작용한다.
- 외부 자기장에 대한 고체의 응답을 정의하기 위해서는 자화라는 새로운 양 M 을 고체의 단위체적당 자기모멘트로 다음과 같이 정의 한다.

$$M = \frac{\mu}{V} \quad (2.3)$$

- 양극 사이의 길이가 l 이고 단면적 A 를 가지고 있는, 중심에서의 자속밀도가 Φ 인 막대자석은 자기모멘트가 $\mu = \Phi l / \mu_0$ 로 주어지고 $B = \Phi / A$ 이므로 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$M = \frac{\Phi}{\mu_0 A} = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.4)$$

- 따라서 자기화 M 과 H 가 유사한 방법으로 자기유도에 영향을 미침을 확인할 수 있다. 만약 자기화와 외부자기장이 둘다 존재한다면 두 개를 합한 것이 자기유도에 기여하는 값이 된다. 자유공간에서의 자기장에 의한 자기유도는 $\mu_0 H$ 이고 물질의 자기화에 의한 자기유도는 $\mu_0 M$ 이다. 따라서 자기유도는 이 두 항의 벡터 합으로 아래식과 같다.

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (2.5)$$

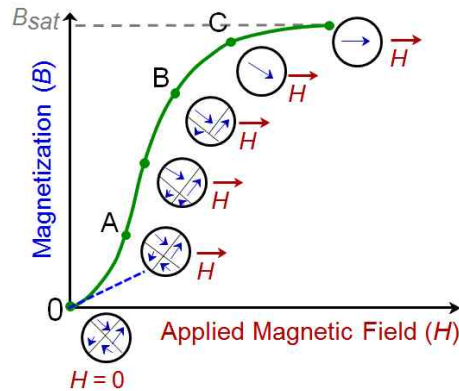
- 위 식에서 자화 B 는 단위가 T이고 H 와 M 은 A/m이다. 이는 SI단위계의 표현식이며 CGS단위계에서는 아래와 같이 표현된다.

$$B = \mu_0 H + 4\pi I \quad (2.6)$$

- 이때의 고체에 흐르는 자속 밀도는 $B = \mu_0 H + 4\pi I$ 가 되며 이때 자기장의 강도 H 는 0e (에르스텝)이며, 자속 밀도 B 의 단위는 Gauss(G)이다.
- 위 식과 같이 자화된 시편내의 자속밀도 B 는 $B = \mu H$ 의 관계를 가지게 되는데 μ 는 자화율 또는 투자율(permeability)이라고 하며, 이것은 자화의 세기와 그때의 외부자기장(자화력) 사이의 비이며, 상자성체나 반자성체에서는 자기장의 세기와 관계가 없는 물질 고유의 상수이지만, 강자성체

에서는 자기장의 세기와 자화과정에 따라 그 값이 복잡하게 변한다.

- 그런데 강부재는 철로 이뤄진 강자성체 이므로 변화하는 투자율을 가지고 이에 따라 아래와 같은 자기이력 곡선을 따라 자화가 이뤄진다.

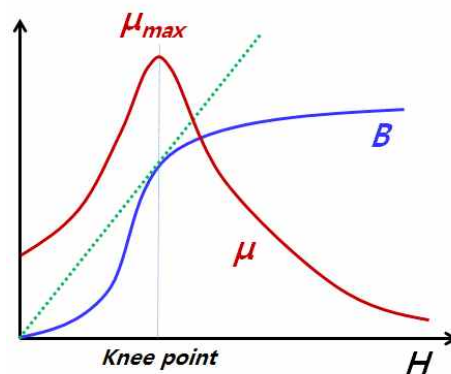


<자기이력곡선 (B-H loop)>

- 전혀 자성을 가지지 않은, 즉 자기소거상태인 강자성체에 외부자기장 H 을 가하고 이것을 차차 세게 하면, 자화는 일반적으로 위의 그림과 같이 진행된다. 즉, 처음에는 초기자화율 μ_i 을 가지는 범위에서는 파란점선과 같이 자기장의 세기와 거의 비례하여 자화가 진행되지만, 자기장의 세기가 어느 정도에 이르면 자화가 급격히 증가하고(A→B), 자기장을 더 강화하여 일정한 한계를 넘게 되면 그 이상은 자화가 진행되지 않는 자기포화상태(C→ ∞)에 이른다. 이와 같은 곡선을 일반적으로 처녀곡선이라고 하며 누설 자속을 위한 자화는 위와 같은 자기 이력 곡선을 따라 이뤄진다.

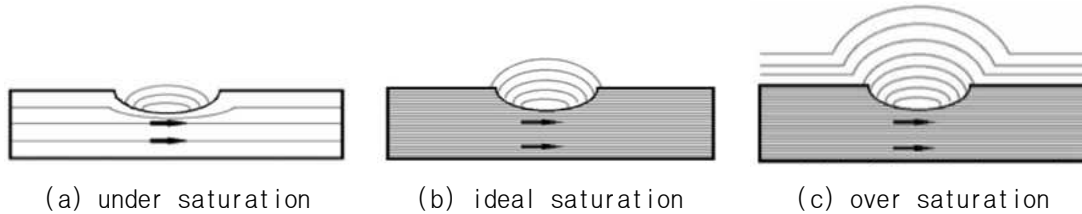
(3) 강부재 손상 진단을 위한 자화 강도의 선정

- 이때 임의의 한 점의 투자율은 이 점과 원점을 연결하는 직선의 기울기로서 나타내며 아래와 같은 관계를 가진다.



<자기이력곡선과 투자율의 이력곡선>

- 원점에서 상승하는 경사를 초투자율, 초투자율의 범위를 초과하여 자화 곡선 위를 되돌아가지 않는 부분의 경사를 가역적 투자율, 곡선상의 각 점과 원점을 연결하는 직선의 경사를 전투자율, 전투자율의 최대값을 최대 투자율이라고 한다. 이때 최대투자율은 무릎점(Knee point)이라고 하며 기존의 자기비파괴검사에서는 자화의 정도를 초기자화곡선의 무릎점 정도로 선택하였는데 그 이유는 일반적으로 무릎점에서 최대검출능이 얻어지는 것으로 알려졌기 때문이다. 아래의 그림에 자화 강도에 따른 자속의 분포를 나타내었다.

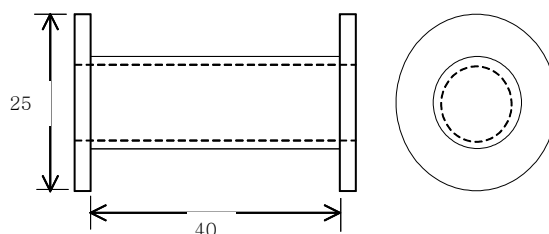


자화강도에 따른 자속의 분포

- 그림 (a)와 같이 자화강도가 무릎점보다 낮을 경우(under saturation) 자화가 약하여 손상에 의해 자속이 발생하여도 누설이 되지 않아 센서에서 감지하기가 힘들어 진다. 반면 (b)와 같이 무릎점의 자화강도로 자화(ideal saturation) 하게 되면 표면이 충분히 자화되었지만 표면위로 자속이 넘어오지 않고 손상부에서만 누설자속이 발생하게 되어 원하는 누설자속 신호만 낮은 신호잡음비(S/N ratio)로 획득할 수 있다.
- 한편 그림 (c)와 같이 무릎점을 넘어 포화자화 영역에서 자화(over saturation) 하게 되면 누설되는 자속의 양은 무릎점에서 자화 했을 때 보다 커지게 된다. 하지만 손상이 발생하지 않은 표면에서도 자기장이 더 클 경우에는 표면조도 등의 다른 요인에 의한 자속이 검출되어 수집한 신호의 신호잡음비가 나빠지게 된다. 이와 같은 사실은 누설자속기법의 기초가 되는 비파괴 검사법인 자분탐상법을 위해서는 표면의 손상만을 대상으로 검사하였고 자분이 손상부에서만 모이는 것이 진단의 성능에 큰 영향을 미쳤기 때문에 무릎점의 자화강도에서 검사하는 것이 중요하였다.
- 하지만 자기센서를 이용한 누설자속법에 있어서는 자화강도의 설정이 목적에 따라 달라질 수 있다. 대상 부재의 표면만을 탐상하는 것이 아니라 표면하부의 결함을 탐상하고자 할 경우 적당히 큰 자기장을 인가함으로써 표면부위는 충분히 포화시켜 자기투자율을 감소시키는 대신에, 표층하부에서는 자기장이 감소함에 따라 자기투자율이 적당히 큰 값이 되게 함으로써 선택적으로 표층하부의 결함에 민감한 구조를 만들 수 있으며, 이를 통해 부재 내부의 손상이 검출 될 수 있어 누설자속기법의 강부재 진단법의 효용성을 한층 끌어올릴 수 있다. 또한 자분탐상과는 달리 홀센서와 같은 자기센서로 계측한 신호는 신호잡음비가 높더라도, 적절한 신호처리를 통해 노이즈를 감소시키고 누설자속 신호만 분류하는 기법들이 적용 가능하다. 이러한 기술적 해결방법의 존재와 표면하부의 손상진단이 가능한 장점의 이유로, 최근 연구되는 누설자속기법의 경우 포화자화 영역까지 자화 강도를 높여서 대상물의 내·외부를 진단하는 경우가 많다.

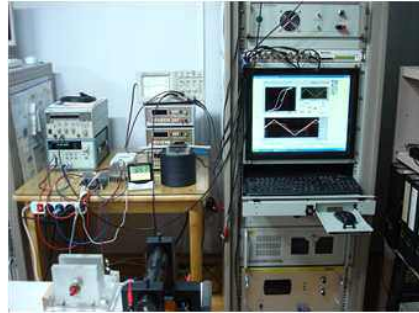
(4) 강부재 시편의 자기특성 측정

- 자기특성 측정 방법
 - 누설자속 센서헤드 자화부의 최적화된 설계를 위하여 B-H loop 측정 시스템을 이용하여 강부재 시편의 자기특성을 측정하였다.
 - 강자성체의 B-H loop를 측정하려면 시편에 자기장을 인가하는 자화 코일(1차 코일)과 시편의 자속 밀도를 측정하기 위한 서치코일(2차 코일)을 권선하여야 하며, 이를 위해 그림 7와 같은 코일 포머를 제작하였다. 제작된 포머는 크기는 내경 12 mm ϕ , 외경 25 mm ϕ , 길이 40 mm이며 재료는 아크릴을 사용하였다.
 - 제작된 코일 포머에 1차 코일을 직경이 0.6 mm ϕ 의 에나멜 동선을 131 회 권선하였으며, 2 차 코일을 직경이 0.3 mm ϕ 의 에나멜 동선을 230 회 권선하였다.



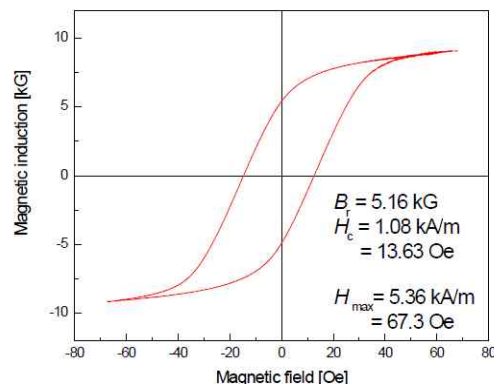
<B-H curve를 측정하기 위한 코일 포머>

- 자기 페루프 (magnetic closed loop) 형성을 위해서 요크를 제작함. 요크의 재질은 탄소강을 사용하여 폭 44 mm, 높이 25 mm, 깊이 45 mm, 두께 13 mm 로 ㄷ 자 형태로 두 개를 제작하였으며 시편이 접촉하는 부분은 곡률반경 10 mm로 와이어커팅 (wire cutting) 방법으로 제작하고 아노다이징 표면 처리를 하였다.
- B-H loop 및 투자율 측정의 자동화를 위해서는 자화(magnetizing) 신호를 DA converter를 이용하여 프로그램적으로 발생 시키며 B, H 신호 처리 보드에서 출력되는 신호를 AD converter를 이용하여 디지털 신호로 변환하는 시스템이 필요하다.
- DA, AD conversion을 위한 conversion rate는 1.25 Ms/s 이며, bit resolution이 16 bit인 NI사의 PCIE-6251을 사용하였다.
- 각 장치간의 연결 편의를 위해서 NI사의 BNC-2090A 터미널 블록을 사용하였고, 그림 8은 각각 본 연구에서 제작한 B-H loop 및 투자율 측정 장치의 사진이다.



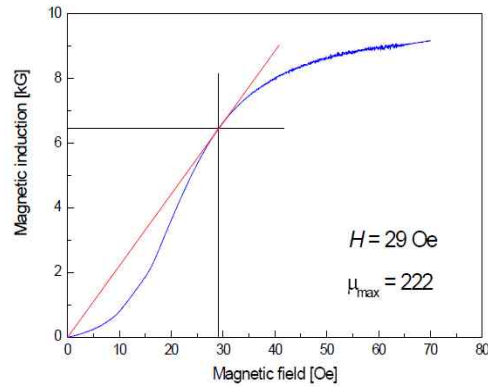
<B-H loop 측정>

- 투자율 및 자기이력곡선이 의미 있게 측정되기 위해서는 먼저 재료의 탈자가 적절히 이루어져야한다. 시편의 탈자를 위해서 신호의 크기가 90초 동안 점점 감쇄하다가 소멸되는 삼각파를 컴퓨터에 내장된 DA convertor에서 발생시켜 전력 증폭기(power amplifier)로 전달하고 전력 증폭기에 연결된 1차 코일에 전류를 인가하여 시편이 자기적으로 탈자 상태(demagnetized state)가 되도록 하였다.
 - 탈자가 완료된 후 B-H loop 측정을 시작하면 DAQ system의 DA 변환기에서 자화 신호를 전력 증폭기로 보내고 전력 증폭기는 이 신호를 받아 1차 코일에 전류를 인가하였고, Shunt 양단의 전압을 연산 앰프를 통해 신호 증폭을 한 후 DAQ system의 AD 변환기를 통해 컴퓨터로 가져와 인가된 자기장 값을 계산하였다.
 - 2차 코일에서 유도되는 기전력은 적분기를 통해 적분 한 후 DAQ system의 AD 변환기를 통해 컴퓨터로 전달되어 시편의 B 값을 계산하고 데이터는 ASCII 포맷으로 저장하도록 하였다.
- 강부재 시편의 자기 특성 측정 결과
- 아래 그림은 측정 장치를 이용하여 직경이 10 mm인 강부재 시료의 B-H loop를 측정한 결과로, 보자력은 13.63 Oe (1.08 kA/m), 잔류자속밀도는 5.16 kG 이며, 인가 자기장 50 Oe에서 포화되기 시작하여 70 Oe 정도에서 충분히 자기포화 되는 것을 확인하였다.



<강부재 시편의 B-H loop>

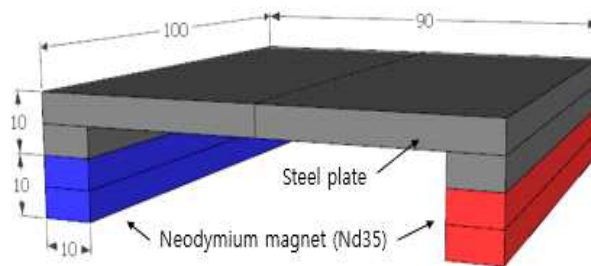
- 아래 그림은 투자율 측정 결과로 최대 투자율(max)은 외부 자기장 29 0e일 때 222 (cgs unit)임을 확인하였다.



<강부재 시편의 투자율>

(5) 강부재 시편의 자기특성 측정

- 본 연구에서 자화부의 구성은 아래 그림과 같이 35N 등급의 네오디뮴 영구자석(Neodymium magnet)과 이를 연결하는 탄소강(carbon steel)을 이용해 요크(yoke) 형태로 제작하여 말굽자석형태의 요크 하단으로 자기장이 형성되게 하였다.



<자화 요크 설계안>

- ANSOFT사의 Maxwell 프로그램을 이용하여 설계된 자화 요크의 자기장분포를 시뮬레이션해본 결과, 강부재 시편이 위치하게 될 하단부 중심에서 186 0e의 충분한 자기장이 형성됨을 확인하였고, 이를 토대로 아래 그림과 같이 자화 요크를 제작하였다.



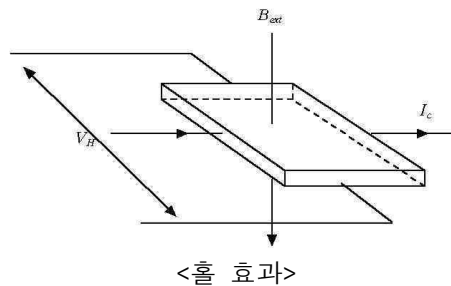
<제작된 자화 요크>

- 자화 요크의 제작을 위해 5mm 두께의 가로 90mm x 세로 100mm 너비를 가지는 강판을 이용하였으며, 강판의 양단 끝에 각각 길이 100mm x 너비 10mm x 높이 20mm의 네오디뮴 자석을 부착하여 하나의 자화 요크를 제작하였고, 이는 양극을 가지는 하나의 큰 말굽자석과 같은 형태를 가진다.
- 제작 후 가우스미터를 이용하여 이의 중심부 자기장세기를 측정하였고 강부재 시편을 포화자화 시키기에 충분한 160 0e 크기의 자기장이 자화 요크의 하단부에 형성됨을 확인할 수 있었다.

다. 홀센서 기반의 누설자속 계측부 설계

(1) 홀센서의 자속 측정 원리

- 홀 효과(Hall effect)는 1879년 미국의 물리학자 에드윈 홀(E. H. Hall)에 의해서 발견된 효과로, 자기장 속의 도체에서 자기장의 직각방향으로 전류가 흐르면, 자기장과 전류 두가지 모두에 수직하는 방향으로 전기장이 나타나는 현상이다.
- 그림과 같이 x방향으로 전류 I_y 가 흐르는 가느다란 금속 또는 반도체 판에 수직으로 자계 B_z 를 작용시키면, 로렌츠의 힘(Lorentz force)에 의해 전기를 운반하는 캐리어가 전류와 자계에 직각인 방향으로 그 운동이 굽혀지게 된다. 이로 인해 B_z , I_y 에 수직인 방향으로 기전력 E_x 가 발생하여 전류와 자장에 수직한 방향의 양단이 전하를 띠게 되고, 내부에는 전장이 형성된다. 이때 로렌츠의 힘과 형성된 전장에 의하여 받는 힘이 평형을 이루게 되면 양단에 생성된 전압은 자장에 비례하게 된다. 이것을 홀효과 또는 전류자기효과라고 한다.



- 전류가 시료의 왼편에서 오른편으로 흐르고 시료에 수직으로 자기장이 걸려있고, 시료 내에 전류로 흐를 수 있는 전하로서 단위 체적당 n 개의 단위 전하가 있다면, 자기장에 의해 전하(charge)는 로렌츠 힘(Lorentz force)을 받고 전류와 자기장 모두에 수직한 아래 방향으로 점점 몰리게 된다.
- 하전입자가 전자기장에서 받는 힘. 전기장의 세기를 E , 자기력선속밀도를 B , 전자의 전하량과 속도를 각각 e , v 라고 하면 전자가 받는 로렌츠의 힘 F 는 아래 식과 같이 나타낸다.

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.7)$$

- 로렌츠의 힘은 이와 같은 전기장 E 에 의한 힘 eE 와 자기력선속밀도 B 에 의한 힘 $e\vec{v} \times \vec{B}$ 의 합으로 성립된다. 전하의 분포가 균일한 상태에서 벗어나 한쪽으로 몰리면 축적된 전하가 생성하는 전위차로 인해 전기장이 생겨나 더 이상 전하가 쌓이는 것을 방해 하는데 이때 나타나는 전위차를 홀(Hall) 전압이라고 부른다. 자기장이 강할수록 전자들은 힘을 더 많이 받게 되고 따라서 위아래 금속판의 전위차도 더욱 커진다. 결국 충분한 시간 ($10^{-6} \sim 10^{-11}$ sec)이 지나면 전기력과 자기력은 같은 크기의 평형 상태가 된다. 평형 상태에서 $\vec{F} = 0$ 이 되므로 식 (2.7)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_y &= -eE_y + evB_z \\ E_y &= v_x B_z \end{aligned} \quad (2.8)$$

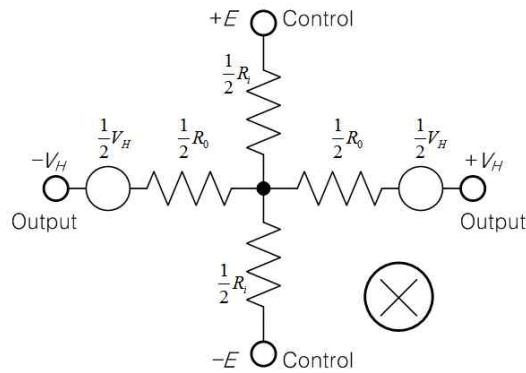
- 이때 시료의 두께를 d , 폭을 b , 길이를 c 라 하면 전류는 다음과 같다.

$$I = nevdb \quad (2.9)$$

- $I(\text{전류}) = n(\text{전하의 갯수}) \times A(\text{도선단면적}) \times q(\text{전하량}) \times v(\text{속도})$

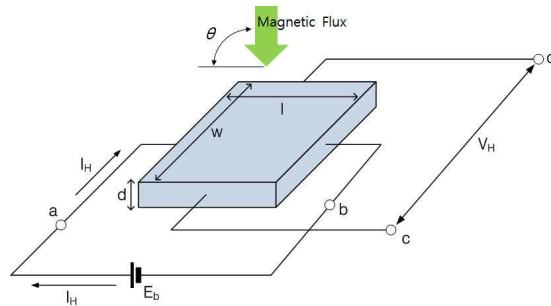
- 이때 전위차는 판사이의 거리에 비례하므로 양측의 전압계에 걸리는 전압은 $V = E_y b$ 이 되고 외부 자기장과 전압과의 관계는 $V = vbB$ 로 주어진다. 즉 외부 자속 밀도에 비례하는 출력 전압을 홀효과를 통해 얻을 수 있다.

- 여기서 $V = \frac{1}{n \cdot e} \frac{1}{d} IB$ 이므로 홀전압은 전류와 자기장에 비례한다. 이때 $\frac{1}{n \cdot e}$ 은 $[m^3/C]$ 의 단위를 가지는 홀계수(Hall coefficient)이며 일반적으로 R_H 로 표기 한다. 이때 $\frac{1}{n \cdot e}$ 은 $[m^3/C]$ 의 단위를 가지는 홀계수(Hall coefficient)이며 일반적으로 R_H 로 표기 한다. 또한 이를 판의 두께로 나눈 $\frac{R_H}{d}$ 는 적감도 K_H 이며 홀센서의 특성을 나타내는 값이 된다.
- 홀센서는 이러한 홀 효과를 이용하여 자계의 방향이나 강도를 측정하기 위한 자기센서이다. 자장 측정용 홀소자로는 일반적으로 홀전압이 큰 반도체가 주로 사용되고 있으며, 특히 온도계수가 비교적 작은 인듐과 안티몬의 화합물(InSb), 갈륨과 비소의 화합물(GaAs)등을 사용하여 제작되며, 되도록 두께가 작은 평판형으로 만든다. 홀효과를 이용하여 일반적으로 측정할 수 있는 자장의 범위는 $1 \times 10^{-5} \sim 30T$ 정도이며, 분해능은 $1 \times 10^{-7}T$ 정도이다. 홀소자는 대량생산이 용이하고, 홀탐침의 크기가 작기 때문에 좁은 장소에서 측정이 유리하다.
- 선형적인 홀센서는 4개의 터미널로 하우징되어 패키지형태로 사용된다. 홀센서의 등가회로는 그림 15와 같이 교차로 연결된 저항과 출력 터미널에 직렬로 두 개의 전압원이 연결된 형태이다. 정전류를 제어하기 위한 2개의 터미널은 컨트롤 터미널(control terminal)로 불리고 그 저항은 컨트롤 저항 R_i 라고 한다. 2개의 터미널은 출력전압을 측정하는 차동출력(differential output) 터미널이며 저항 R_0 는 차동출력 저항이다.



<홀센서의 등가회로 >

- 위 그림에서 홀센서의 입력단자 a-b간에 일정한 정전류 I_H 를 흘려주면 출력단 c-d간에는 기전력이 발생하여 아래와 같이 자속밀도 B 에 비례하는 V_H 의 홀 전압이 발생된다. 홀센서는 자속의 수직성분만을 측정하게 되므로 자속의 값에 $\cos \theta$ 를 곱하여 수직성분만을 반영한다.



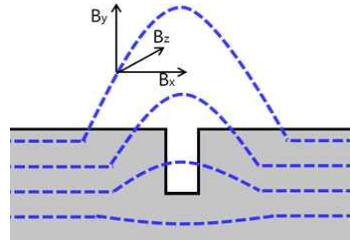
<홀센서의 구조 및 흐름 >

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

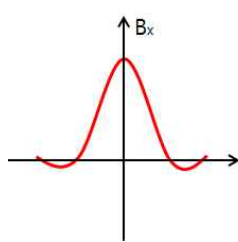
$$V_H = \frac{R_H}{d} \cdot I_H \cdot B \cos \theta \quad \left[\frac{m^3}{A \cdot s} \right] \times \left[\frac{1}{m} \right] \times [A] \times \left[\frac{V \cdot s}{m^2} \right] = [V] \quad (2.10)$$

(2) 누설 자속 측정을 위한 홀센서의 구성 방법

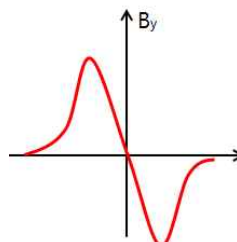
- 홀 센서는 홀센서의 설치 방법에 따라 센서 헤드의 진행방향을 기준으로 총 3개의 방향에 대한 자속을 측정하게 된다. 즉 시험체의 진행방향과 동일한 축 (axial) 방향, 진행방향과 수직이고 단면과 수평방향인 반경 (radial)방향, 축 방향 및 반경방향과 수직이며 시험체의 원주에 따라 정의되는 원주 (circumferential) 방향으로 누설자속을 측정하여 결함의 크기를 추정하게 된다. 아래 그림에 결함영역에서 각 방향에 대한 누설자속의 분포를 나타내었다.



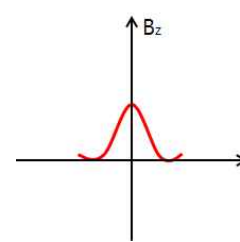
<손상지점의 누설자속 발생 및 좌표 방향>



(a) 축방향 (B_x)



(b) 반경방향 (B_y)



(c) 원주방향 (B_z)

<홀센서 방향에 따른 누설자속 신호>

- 축방향 신호는 결함의 시작부분부터 신호의 크기가 증가하고 결함의 중심영역에서 그 크기가 최대를 이루는데, 결함의 중심영역을 지나게 되면 신호의 크기가 다시 줄어드는 패턴을 보여준다. 반경방향 신호는 결함의 시작과 끝 부분에서 신호의 크기가 최대를 이루게 되면서 서로 반대 극성으로 나타나게 된다. 원주방향 신호는 결함의 시작에서 원주방향 양쪽으로 자기선속이 발생하여 끝 부분에서 자기선속이 다시 모여 드는 형태이다. 따라서 원주방향의 신호는 결함의 길이와 폭 정보를 모두 가지고 있지만 신호의 크기가 작아 극히 사용성이 떨어지게 된다.
- 이러한 신호는 공통적으로 손상부에서 아래와 같은 특성을 나타내어 상대적인 손상의 정량화를 가능하게 한다. 먼저 손상의 길이가 길어질수록 계측되는 자기누설 신호의 폭은 넓어지고 진폭은 작아지는 특성을 보인다. 손상의 폭 역시 자기누설 신호의 크기와 형태에 영향을 미치게 되는데 축방향 신호를 원주방향으로 나타낼 경우 손상이 발생한 영역에서 손상의 폭이 넓어질수록 자속량은 증가함을 보이지만 신호폭의 변화는 미비하다. 이는 자기장이 시험체에 남으려는 경향이 있고 원주방향으로 번지는 특성을 가지기 때문이다. 실제로 자기 신호를 분석해보면 블루밍 현상 (blooming effect)에 의해 실제 손상의 형상에 비해 원주방향으로 번져 보이는 경향이 있다. 손상의 깊이 역시 자기누설신호에 영향을 미치는데 손상의 깊이에 비례하여 누설자속의 크기가 커진다.

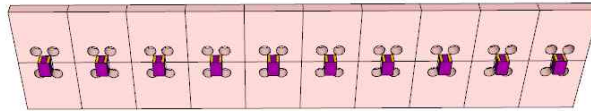
(3) 강부재 진단을 위한 홀센서의 배열구조 설계

- 홀센서를 활용한 누설자속 측정기법의 경우 축방향으로는 매우 높은 해상도를 가지는 대신 하나의 홀센서가 감지할 수 있는 원주방향의 영역은 제한적이다. 이는 누설 자속의 세기는 거리에 따라 급격히 감소하고, 홀센서의 경우 자속의 수직성분을 계측하기 때문에 그 감지영역은 상대적으로 좁은 편이다.
- 이 때문에 여러 개의 홀센서를 대상 시편의 구조에 적합하게 배열, 어레이를 구성하여 사용하는 방법으로 일정 너비의 강부재를 동시에 감지할 수 있는데, 이때 배열되는 센서의 개수는 너비방향의 해상도에 영향을 미친다. 따라서 일정 폭 범위의 강부재 동시 진단을 위해 센서어레이에 필요

한 홀센서의 개수 N 은 개별 홀센서의 감지능을 고려하여 아래식과 같이 구할 수 있다.

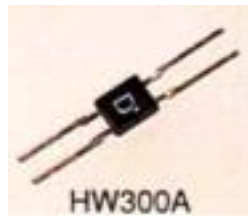
$$N \geq \frac{W_{SH}}{R_h} \quad (2.11)$$

- 여기서 R_h 는 홀센서 하나의 진단 가능 범위를 나타낸다. 손상의 위치가 홀센서에서 $1/2R_h$ 만큼 너비의 방향으로 떨어져 있을 때 감지할 수 있는 최대 범위를 나타낸다.
- 본 구성과 유사한 선행적인 실험적 연구를 통해 홀센서 한 채널을 통해 $\pm 8\text{mm}$ 떨어진 손상까지 감지 가능함을 확인하였다. 따라서 100mm 폭의 강부재를 동시진단하기 위해서는, 홀센서 하나의 진단 범위인 16mm를 기준으로 최소 7개 이상의 홀센서가 등간격으로 배열되어야 한다. 이에 본 연구에서는 100mm의 너비를 가지는 센서헤드의 설계를 위해, 너비 방향으로 10개의 홀센서를 아래 그림과 같이 평행하게 배열하여, 1회의 진단으로 강부재의 100mm 너비 구간을 동시에 진단할 수 있게 하였다.



<홀센서 어레이 설계안 >

- 본 연구에서는 하니웰에서 생산되는 InSb 홀 센서 (HW300A) 10개를 위와 같이 10mm의 간격으로 배열하였다. HW300A의 경우 정전류 (constant current), 정전압 (constant voltage)구동이 가능하며 정전류 구동시 최대 허용 전류는 20 mA이며 입력 출력 임피던스는 550 Ohm이다. 그림은 본 연구에 사용된 홀센서이며, 표는 사용한 홀 센서의 전기적 사양이다.



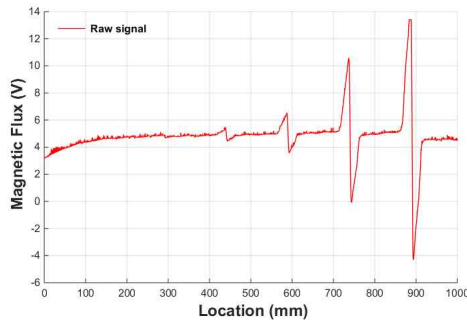
<HW300A 홀센서>

•Electrical Characteristics($T_a=25^\circ\text{C}$)						
Item	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
Output Hall Voltage	V_H	Const. Voltage Drive $B=50\text{mT}$, $V_C=1\text{V}$	122		320	mV
Input Resistance	R_{in}	$B=0\text{mT}$, $I_C=0.1\text{mA}$	240		550	Ω
Output Resistance	R_{out}	$B=0\text{mT}$, $I_C=0.1\text{mA}$	240		550	Ω
Offset Voltage	V_{OS}	$B=0\text{mT}$, $V_C=1\text{V}$	-7		+7	mV
Temp. Coefficient of V_H	αV_H	$B=50\text{mT}$, $I_C=5\text{mA}$		-1.8		%/ $^\circ\text{C}$
Temp. Coefficient of R_{in}	αR_{in}	$B=0\text{mT}$, $I_C=0.1\text{mA}$		-1.8		%/ $^\circ\text{C}$
Dielectric Strength		100V D.C	1.0			M Ω

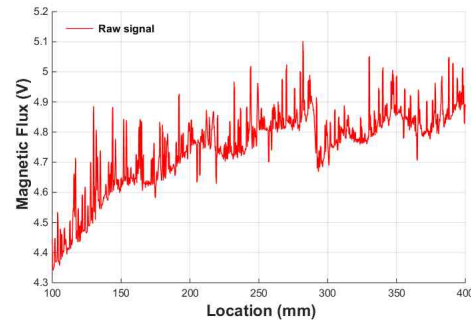
<HW300A의 전기적 특성>

라. 랜덤 노이즈 제거를 위한 신호처리 기법

- 홀센서로부터 계측되는 자속신호는 장비, 실험환경과 같은 다양한 요인에 의한 노이즈를 포함하고 있다. 이러한 노이즈로 인해 본 기법에서 활용하고자 하는 누설자속 신호가 검출되지 않을 수도, 노이즈가 누설자속 신호로 오인식 될 가능성을 가져 손상판단에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 이러한 노이즈를 최소화하는 동시에, 진단에 유용한 신호에 왜곡을 발생시키지 않는 신호처리 과정이 필요하다.
- 아래 그림에 홀센서로부터 수집된 원신호(Raw signal)를 나타내었고 일부구간(250~400mm)을 확대하여 오른쪽 그림(b)에 나타내었다.



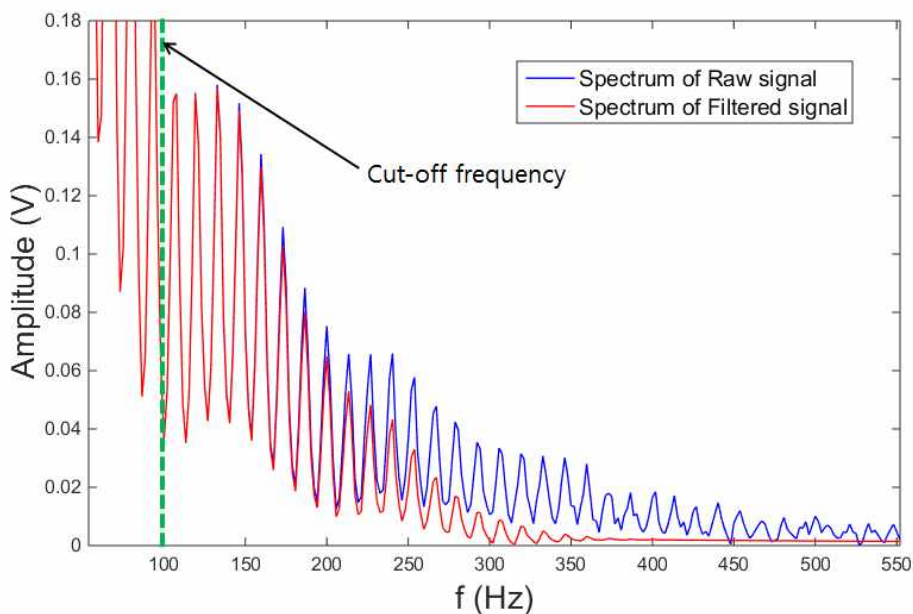
(a) 전체 신호



(b) 250-400mm 구간 확대

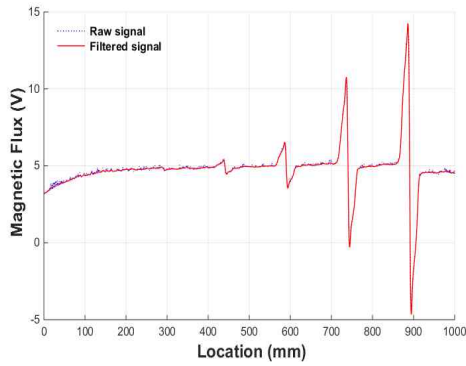
<홀센서로부터 수집된 원신호(Raw signal)>

- 먼저 (a)에서 살펴보면 신호전체가 평균 4V 정도로 오프셋이 발생하였고, 시작점과 끝점 사이에 드리프트가 존재한다. 이들은 아래 절에서 이어질 신호의 정량화를 위한 신호처리 및 손상인덱스 추출 프로세스에 영향을 미친다.
- 또한 (b)에서 보면 장비의 전기적 요인에 의한 고주파 노이즈가 포함되어 있음을 확인 할 수 있다. 이는 누설자속을 이용한 미세한 손상 감지 시 노이즈 신호가 손상으로 오인식 될 가능성이 존재하여 임계값을 상향 시키게 되고, 이로 인해 손상진단의 민감도를 저해하는 요인이 된다.
- 이러한 고주파 노이즈를 제거하고자 본 연구에서는 1차적으로 Low pass filtering을 수행하였다. 이를 위해 FIR 필터를 사용하였고 Kaiser window를 사용하는 100Hz의 컷오프 주파수를 가지는 Low pass filter를 설계하였다.
- 아래 그림에 주파수 영역에서의 필터링 전 · 후의 신호를 나타내었다.

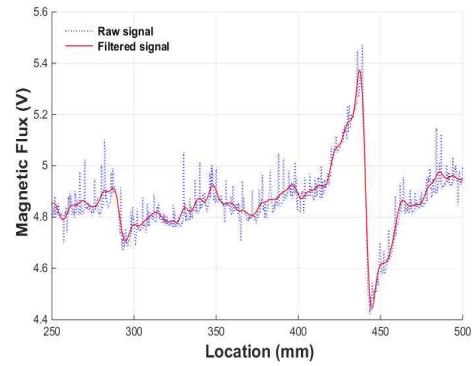


<주파수 영역에서의 필터 전 · 후 신호>

- 아래 그림에 시간 영역에서의 신호 변화를 나타내었다.



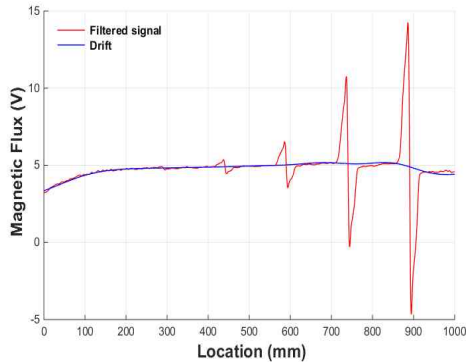
(a) 전체 신호



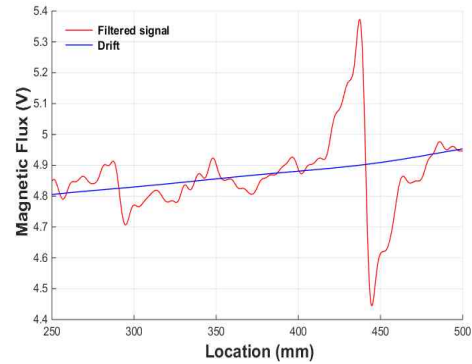
(b) 250-400mm 구간 확대

<Low Pass Filter 적용 전 · 후의 자속 신호 변화>

- 이어서 드리프트의 제거를 위해 아래 그림의 파란선과 같은 원신호의 최고 저차 모드의 파형을 필터링을 통해 생성하였고, 이를 고주파 노이즈가 제거된 신호로부터 빼 주었다.



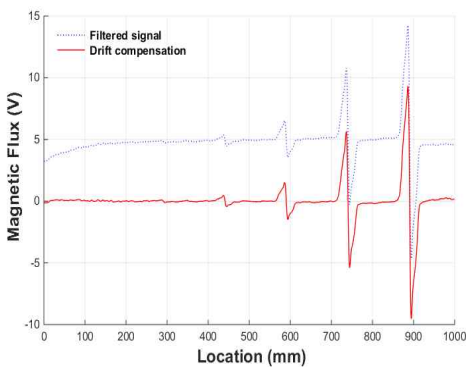
(a) 전체 신호



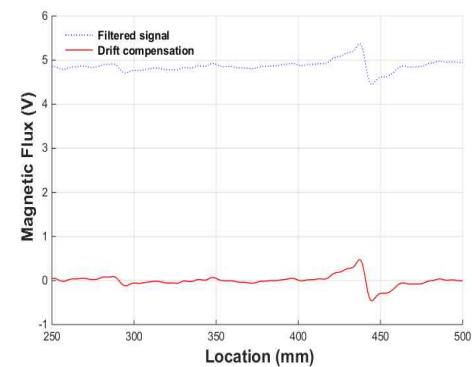
(b) 250-400mm 구간 확대

<자속신호와 드리프트 제거를 위한 저차 모드의 파형>

- 아래 그림에 드리프트 제거 전의 신호와 제거 후의 신호를 나타내었다.



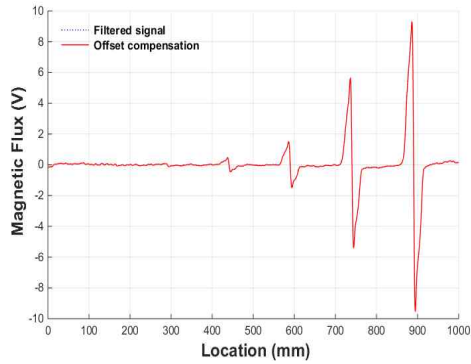
(a) 전체 신호



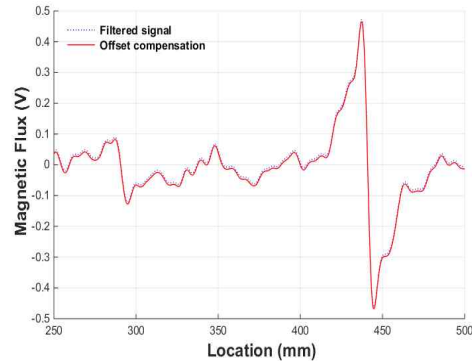
(b) 250-400mm 구간 확대

<드리프트 보정 전 · 후의 자속 신호 변화>

- 상기와 같이 신호의 드리프트가 제거되었음을 확인할 수 있었는데, 아래 그림과 같이 오프셋도 함께 대부분 제거되는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만 일부 오프셋이 여전히 남아있기 때문에 신호에서 전체신호의 평균값을 빼는 방법을 통해 잔여 오프셋을 제거해 주었다.



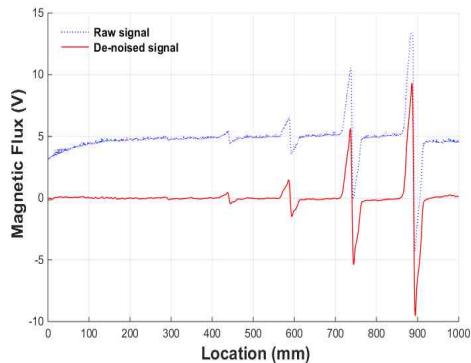
(a) 전체 신호



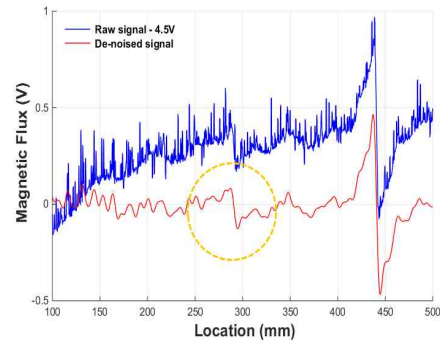
(b) 250-400mm 구간 확대

<오프셋 보정 전 · 후의 자속 신호 변화>

- 아래 그림에는 처음 계측된 원 신호와 최종 신호 처리된 MFL 신호를 하나의 그래프에 나타내었다. 그림 (b)에는 효과적인 비교를 위해 원신호의 경우 원신호에서 4.5V를 뺀 값으로 플롯하였다.



(a) 전체 신호



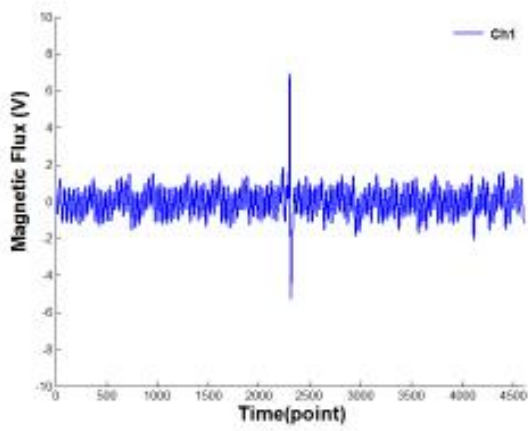
(b) 100-500mm 구간 확대

<신호처리 전 · 후의 자속 신호 변화>

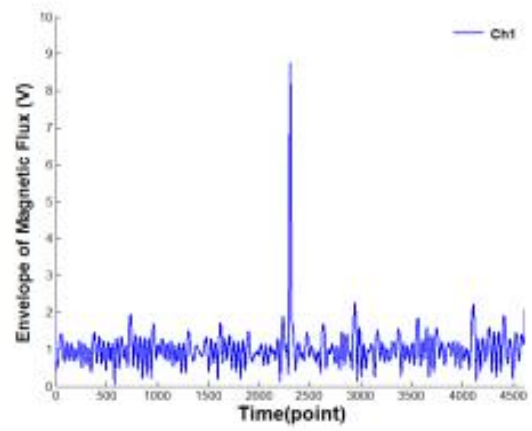
- 상기 그림 (a)에서 전체 신호의 변화를 보면 먼저 전체적인 오프셋이 제거 되었고, 시작점과 끝점 사이의 드리프트도 제거되어 신호처리 후 플랫한 형태의 베이스라인이 0에 가까운 신호로 가공되었다. 또한 확대한 그림에서 보면 고주파 노이즈가 제거되었고 이를 통해 원신호에서 확인되지 않던 290mm 지점의 미세한 누설 자속이 검출되는 것을 확인할 수 있었다.
- 이와 같은 일련의 신호 처리 과정을 통해 원 자속신호의 신호잡음비(S/N ratio)를 낮춤으로써 자속신호의 해상도를 높일 수 있었다. 이를 통해 이어서 수행되는 자속신호의 정량화 및 시각화 프로세스에 오류를 감소시키고 손상진단의 정확도를 높일 수 있다.

마. 손상 진단 성능 향상을 위한 신호 가공 알고리즘

- 본 연구에서는 힐버트변환(Hilbert transform)을 통해 순간진폭을 계산하고, 이를 이용한 포락선(Envelope)을 구하여 자속신호를 가공하였다.
- 본 방법은 진단 속도 및 샘플링 레이트와 무관하게 자속신호의 에너지양만을 추출하여 사용하는 방법으로, $\pm$ 로 대칭 형태를 가진 원신호에 비해 엔벨로프의 경우 변환을 통해 별도의 절차 없이 양수화 되기 때문에 하나의 임계값으로 손상여부를 판단 할 수 있게 되고 이를 다시 하나의 평면에 시각화하기에 용이하다.



측정된 자속 신호



힐버트변환을 이용한 엔벨로프 신호

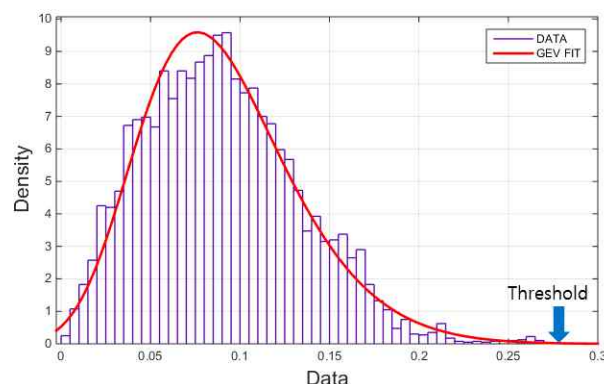
바. 통계학적 기법 기반의 자동 손상 진단 기법 개발

(1) GEV 분포 기반 임계값 설정

- 계측된 신호를 활용하는 비파괴 진단기법에서 가장 중요한 것은 대상물의 손상 여부를 신뢰성 있게 판단하는 것이다. 따라서 자동화된 손상의 진단을 위해서는 자속신호에서 누설자속 신호를 판별하여 구분해줄 수 있는 객관적인 판단기준의 설정이 반드시 필요하다. 진단 대상물에 손상이 발생한 경우 손상에 의해 발생하는 누설자속과 같은 신호특성은 정상상태의 데이터 집단과 동떨어진 특성을 가지는 외치(outlier)이기 때문에 자속 신호 분포의 꼬리 부분에 나타날 가능성이 높다. 이러한 성질 때문에, 최근 극치 통계(extreme value distribution) 이론이 손상여부의 객관적인 판단을 위해서 활용되고 있다.
- 극치 통계 이론에 의하면 임의의 독립 항등 모분포를 따르는 표본들의 극치들은 극치를 취하는 표본크기가 무한대로 커지게 되면 겔렐(Gumbel), 와이불(Weibull), 프레셰(Frechet)의 세 가지 이론적 극치분포 중 하나를 따르게 된다 (Fisher 1928). 이러한 현상을 극치분포의 점근적 수렴성(asymptotic convergence of domain of attraction)이라고 한다. Jenkinson은 세 가지 이론적 극치분포 식을 누적 분포 함수의 형태를 가지는 식 1과 같은 하나의 식을 통해 일반화된 극치분포(generalized extreme value distribution)로 나타낼 수 있음을 보였다.

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp - [1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)]^{-1/\xi} \quad (1)$$

- 여기서 F 는 일반화된 최대 극치 분포를 나타내고 $1 + \xi(x - \mu)/\sigma > 0$ 이고, $\mu \in R$ 은 위치 변수, $\sigma > 0$ 은 스케일 변수, $\xi \in R$ 은 형상 매개 변수이다. 아래 그림 8에 정상상태의 강부재에서 1회 측정된 자속 신호의 극치분포를 예시로 나타내었다.

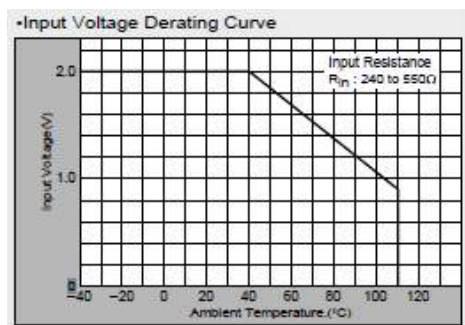


<자속신호의 극치분포 및 임계값 설정>

- 본 연구에서는 위와 같은 일반극치분포를 이용해 99.99% 신뢰도의 임계값을 설정하였다.
- 위와 같은 과정을 통해 통계학적으로 설정된 임계값을 객관적인 손상 판정의 기준으로 하며, 이를 초과하는 자속값은 누설자속으로 판단되어진다.
- 임계값을 구하기 위해서는 정상상태의 강재를 대상으로 반복 수집한 데이터를 이용하게 되며 일반 극치분포를 이용해 99.9%, 95%등의 다양한 신뢰도 레벨의 임계값의 설정이 가능하다.
- 설정된 임계값의 신뢰도가 높을수록 손상판정의 정확도는 높아지지만 미세한 손상의 진단이 누락 될 수 있으며, 신뢰도가 낮을 경우 정상상태의 노이즈를 손상으로 오진단할 수 있는 확률이 높아진다. 따라서 진단 대상의 중요도 및 상황에 따라 적절한 레벨의 임계값을 설정하여 적용하는 것이 요구되어진다.

사. 손상 진단 가능 온도범위에서 손상 진단 결과의 일관성을 가지는 마그네틱 센서헤드 및 신호 수집 시스템 구성

- 목표 작동온도에서 성능 유지 가능한 진단 시스템의 구성을 위해 센서헤드에 사용되는 홀센서 및 영구 자석의 스펙을 분석하여 작동온도 $-15^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 의 구간에서 일관성을 가지며 작동하도록 시스템 구성하였다.



(a) 홀센서의 Data sheet

Temperature Ratings

(Please note - your application will affect the performance available)

Magnet Type Suffix	Rev. Temp. Coef. of Induction (B), a, %/°C (20-100°C)	Rev. Temp. Coef. of Intrinsic Coercivity (Hc), b, %/°C (20-100°C)	Max. Working Temperature (based on a High working point)
	-0.120	-0.70	80 °C = 176 °F *
M	-0.115	-0.65	1000°C = 212 °F *
H	-0.110	-0.60	1200°C = 248 °F *
SH	-0.105	-0.55	150 °C = 302 °F *
UH	-0.100	-0.55	180 °C = 356 °F *
EH	-0.095	-0.50	200 °C = 392 °F *
VH / AH	-0.090	-0.49	230 °C = 446 °F *

* Please note that N52, N50, and N50M are rated to a maximum of 60°C (140°F).

(b) 영구자석의 Data sheet

<홀센서 및 영구자석의 Datasheet>

- 신호수집을 위한 터미널보드 및 DAQ 역시 정상작동 온도범위를 고려, 장비를 선정하여 진단시스템의 신호수집 장치를 구성하였다.



<Compact DAQ module>

<Compact DAQ의 주요 사양>

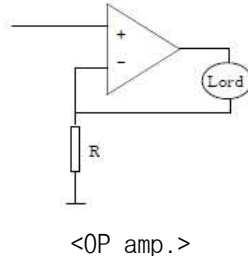
구분	내용	
충격 및 진동	작동 충격	30 g
	임의 작동 주파수 범위	5 Hz - 500 Hz
	임의 진동	0.3 g
물리적 스펙	길이	19.4 cm
	폭	8.87 cm
	높이	3.36 cm
	작동 온도	$-15^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$
	최고 고도	5000m

3. 강구조물 진단을 위한 휴대용 마그네틱 점검 장비 개발

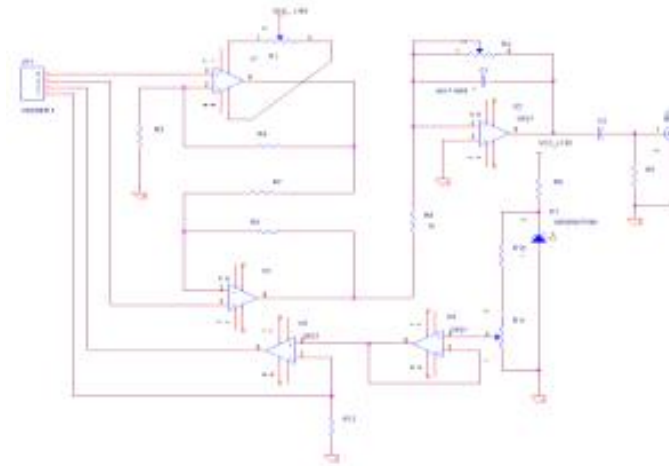
가. 홀센서를 이용한 자속 계측용 PCB 설계

(1) 홀(Hall) 센서 구동회로 설계

- 본 연구에서는 정전류(constant current)방법으로 홀 센서를 구동하였다. 이를 위하여 OP amp.를 활용한 정전류 소스(constant current source)를 활용하였다. OP amp.의 비반전 입력단에 정전압을 입력하면 Load 저항 변화에 관계없이 Load에는 일정한 전류가 흐르는 정전류 소스이다.



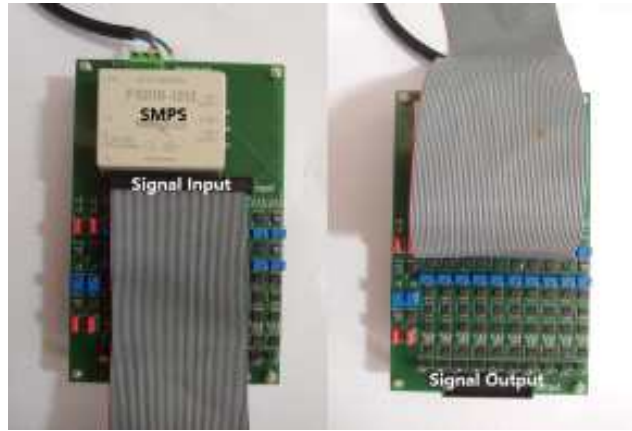
- 입력 전압이 불안정 할 경우 전류 소스의 출력이 불안정해지기 때문에 본 연구에서는 National Semiconductor의 voltage reference LM336-5를 활용하여 5V의 안정적인 전압을 유도해 내고 트리머 저항을 이용하여 voltage divider를 구성한 후 OP amp.를 활용하여 voltage follower를 구성하고 voltage follower의 출력전압을 정전류 소스의 입력 전압으로 활용하여 홀 센서에 안정적인 5 mA의 전류가 인가되도록 하였다. 홀 센서의 출력 전압은 고 입력 임피던스를 위해서 OP amp. 사용하여 계측증폭기(instrumentation amp.)를 구성하였다. 단일 칩으로 생산되는 계측증폭기의 경우 offset 조절의 어려움이 있고 OP amp. 세 개를 사용하는 계측증폭기의 경우 본 연구의 최종 목표 중 하나인 다채널 이면서 소형의 구동회로를 디자인하는데 애로사항이 있어 OP amp. 두 개를 활용한 계측증폭기를 구성하였다. 계측증폭기의 출력은 이득 조절과 1st order LPF(Low Pass Filter)를 거쳐 최종 출력 신호를 측정 하였다. 아래 그림은 연구에서 사용한 홀 센서 구동회로이다.



<Circuit diagram for hall sensor driving>

(2) 홀 센서 구동을 위한 터미널보드 제작

- 신호처리 보드는 Surface mount device를 이용하여 크기 160 mm × 80 mm 의 보드에 10채널의 센서 구동 회로와 전원 공급 장치를 장착할 수 있도록 소형화 하여 설계 되었다.
- 홀센서 구동 터미널 보드는 10채널의 홀센서 신호를 받을 수 있게 구성하여 자속 신호를 동시 수집 가능하게 구성 하였다.
- 터미널보드에는 전원공급을 위한 교환방식 전원 공급장치 (Switching mode power supply, SMPS)가 탑재되어 있다. 이 교환방식 전원 공급장치는 AC 220V를 DC ±12V로 바꿔주는 역할을 한다. 교환방식 전원 공급장치 이외에도 각 채널의 신호를 받는 시그널 입력단자와 시그널 출력단자 등으로 구성되어있다.



<홀센서 구동 Terminal Board>

(3) 데이터 획득장치(DAQ) 구성

- 데이터 획득 장치는 향후 실제 현장 적용을 고려하여 16 bit resolution, 250 kS/s scan speed, 32 single analog input 기능을 갖는 NI 9205를 사용하였다.
- 실제 장비를 운용할 경우 유/무선 통신이 가능하며 진동이 발생해도 안정적으로 신호를 측정 및 전송할 수 있는 통신 모듈이 필요하고, 이를 위해 본 연구에서는 NI cDAQ-9191 모듈을 이용하였다. 아래는 데이터 획득 장치 및 무선 통신 모듈이며 표 3은 통신 모듈의 물리적 사양이다.



충격 및 진동	
작동 충격	30 g
임의 작동 주파수 범위	5 Hz - 500 Hz
임의 진동	0.3 g
물리적 스펙	
길이	19.4 cm
폭	8.87 cm
높이	3.36 cm
작동 온도	0℃ ~ 55℃
최고 고도	5000 m

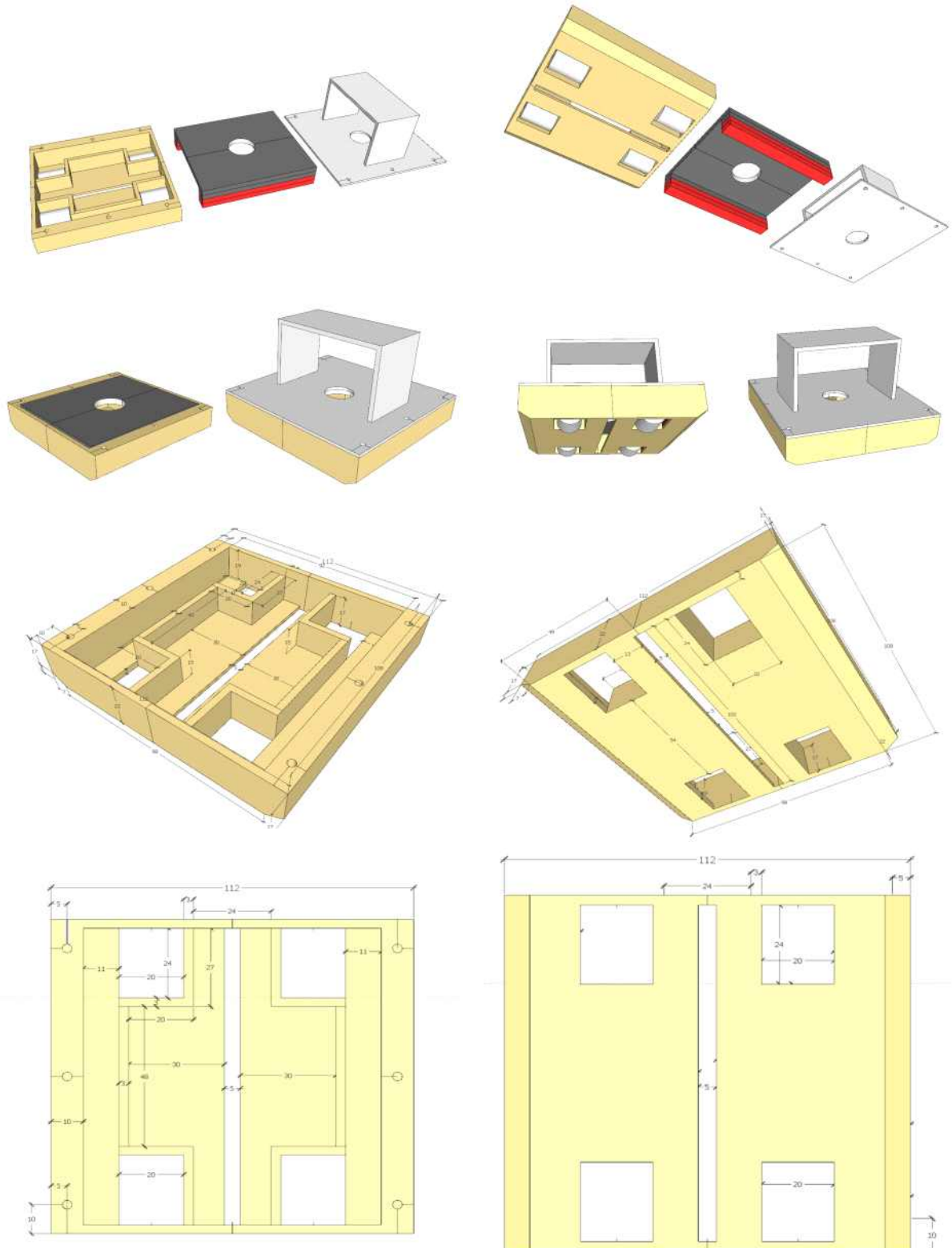
<TCPIP Interface and DAQ module>

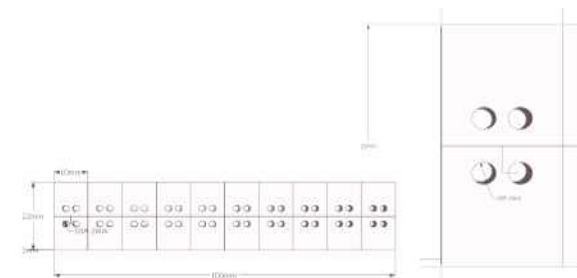
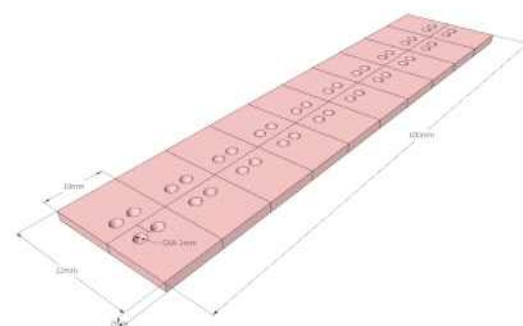
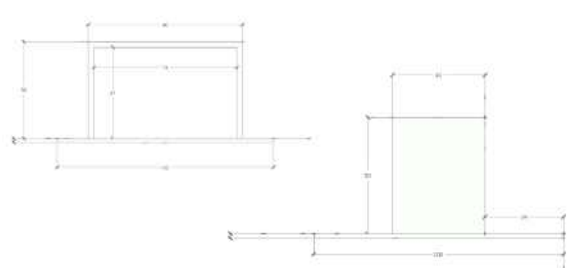
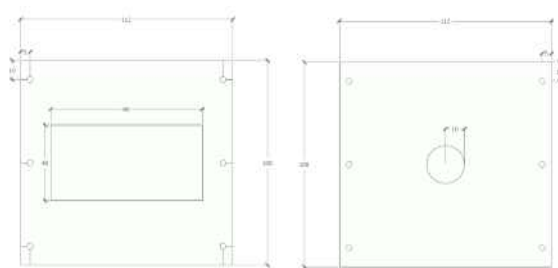
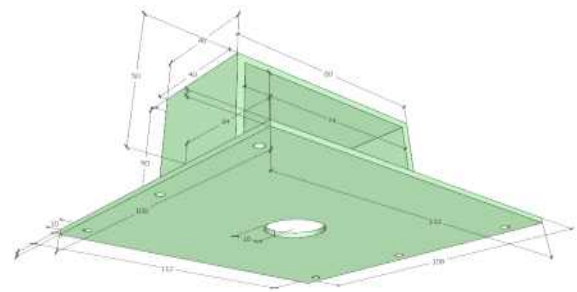
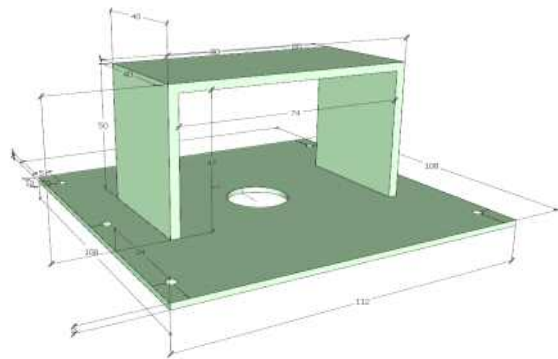
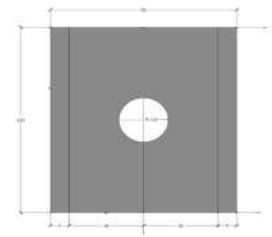
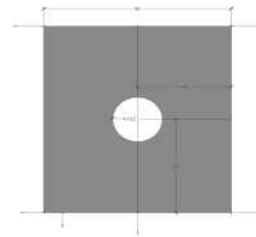
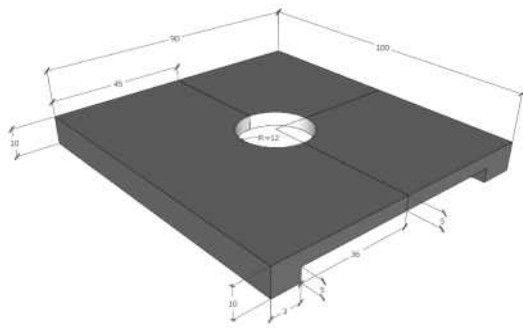
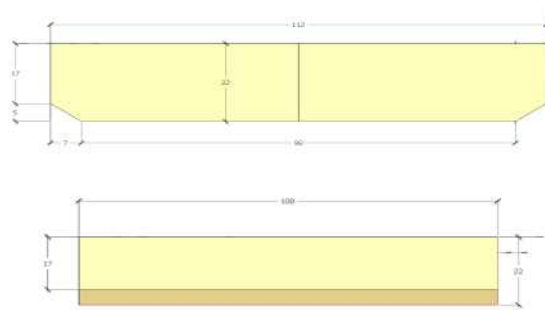
나. 1차 년도 휴대용 마그네틱 점검 H/W 개발(1차 시작품)

- 강구조물을 육안검사 하듯이 용이하게 점검하면서 구조물의 안전성에 대한 신뢰성을 확보할 수 있도록 구조물을 전체적으로 간편하게 신속히 정밀조사 할 수 있는 강재 및 용접부 휴대용 마그네틱 점검 H/W를 개발하였다.
- 강구조물에 발생하는 균열을 주기적으로 점검하여 피로균열 같은 미세한 균열을 초기에 확인하는 것은, 균열이 확대되기 전에 보강할 수 있도록 하며, 취성파괴와 같이 예측 불가능한 사고를 미연에 방지하고 큰 손상을 보강함에 따른 유지관리 비용 증가를 방지하기 위해 필요하기 때문에 마그네틱 센싱기반 안전장비를 개발하였다.
- 마그네틱 센싱 기반 안전장비란 금속재료의 대상물을 자석(Magnet)을 이용하여 자화시키면 자기장이 형성되는데, 이때 시편의 결함 부분에서 자속이 누설되고 이러한 누설을 홀 센서로 계측하여 결함을 탐지해내는 원리이다. 누설되는 자속의 세기는 홀 센서로 계측 할 수 있으며, 홀 센서가 자기장에 위치했을 때, 자기장과 전류의 수직하는 방향으로 홀 전압이 발생하며 이러한 원리를 홀 효과(Hall Effect)라 하며, 이를 이용하여 계측 되어진 전압 값을 통해 손상 위치와 크기를 추정할 수 있고, 마그네틱 기반의 시각화된 이미지를 이용한 디스플레이 표시와 손상 확인시 알람을 발생하여 상황인지가 즉각적으로 이루어질 수 있다.
- 이를 통한 점검자의 신속한 판단 및 대응을 도움으로써 강구조물 및 용접부 손상 유지관리의 효율성 향상된다. 휴대용(Portable) 마그네틱 손상검출 장비 개발을 통해 국부적인 조사가 아닌 전체적인 강구조물의 비파괴조사가 가능하며, 객관적인 DATA 축적 및 시간과 비용절감 효과를 가진 새로운 점검방식의 제안이 필요에 의해 다음과 같은 장비를 개발하였다.

(1) 맞대기용접부 및 강재 평판부

- 강구조물에 대한 검사는 육안검사(VT)를 위주로 하고 균열의심부 등에 대해서는 비파괴검사를 수행하도록 하고 있는데, 강박스 거더는 내부가 어두워 잘 보이지 않는 데 이곳에서 약간의 조명으로 균열을 육안으로 확인하고 있어 충분한 신뢰성을 확보하지 못 한다. 또한 강박스 거더 내부에서 조사자가 육안검사로 피로균열 같은 미세한 균열을 확인하는 것은 어려운 실정이며, 정밀점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라 일부분에 대한 비파괴검사를 근거로 전체 구조물의 안전성을 판단하는 것은 상당한 오류가 있고, 현재 시행하고 있는 비파괴검사 장비 및 인력만으로 강구조물을 전체적으로 안전점검하는 것은 시간적, 공간적으로 불가능한 실정이다. 이러한 이유로 맞대기용접부 및 강재의 평판부를 점검할 수 있는 휴대용 마그네틱 점검 H/W를 설계하였다. 설계한 휴대용 마그네틱 점검 H/W 운용시험을 통해 손상부에서 홀 효과로 손상부가 검출되는 것을 알 수 있었다.

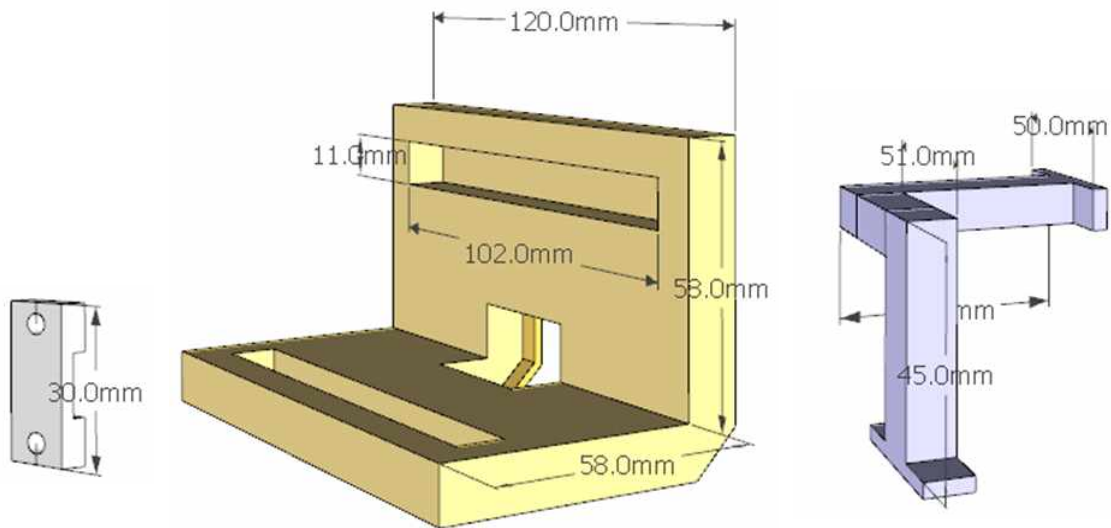
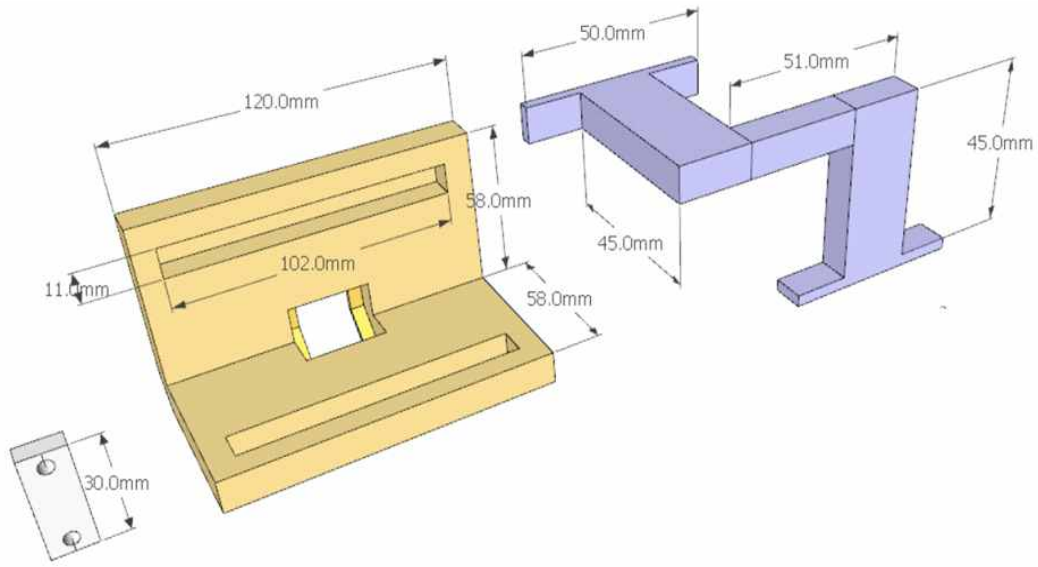




<맞대기용접부 및 강재 평판부 휴대용 마그네틱 점검 H/W 설계>

(2) 필렛용접부 등 강재 모서리부

- ‘맞대기용접부 및 강재 평판부’ 에서 제기한 문제점과 같은 이유로 강구조물에 대한 용이한 점검을 위해 강재의 형상 등을 고려해 절곡부에서 용이하게 운용될 수 있도록 설계하였다.

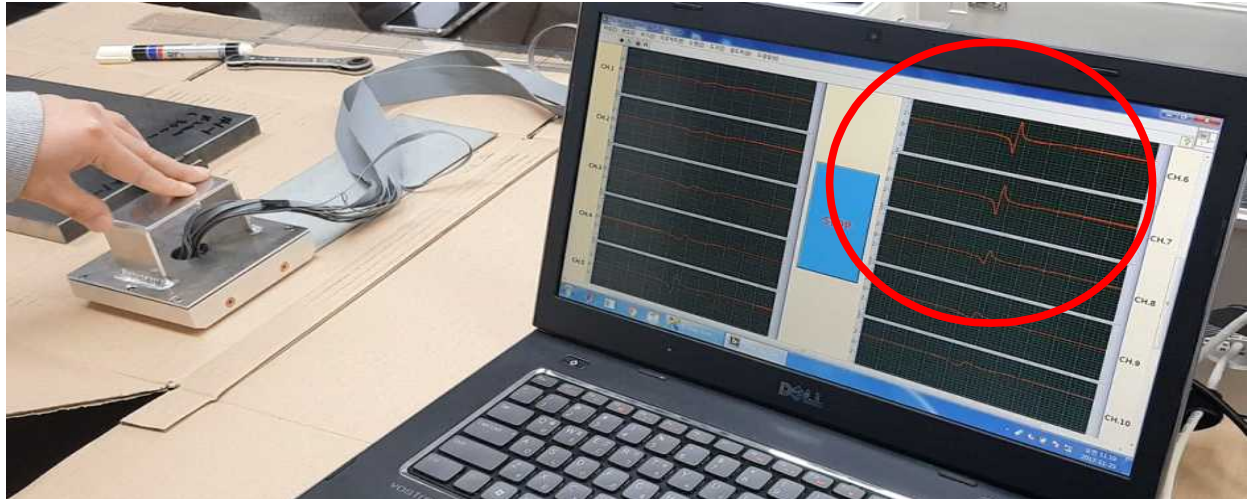


<필렛용접부 등 강재 모서리부 휴대용 마그네틱 점검 H/W 설계>

(3) 1차 시작품 제작 및 자체시험

- 제작된 1차 시작품으로 자체시험을 실시하였다. 강판에 불규칙한 손상을 입력하고 측정했을 때 검출가능여부를 확인하는 방식으로 자체시험을 실시하였다. 시험 결과 강판의 손상위치에서 자속신호가 변화하는 것을 확인하였다.

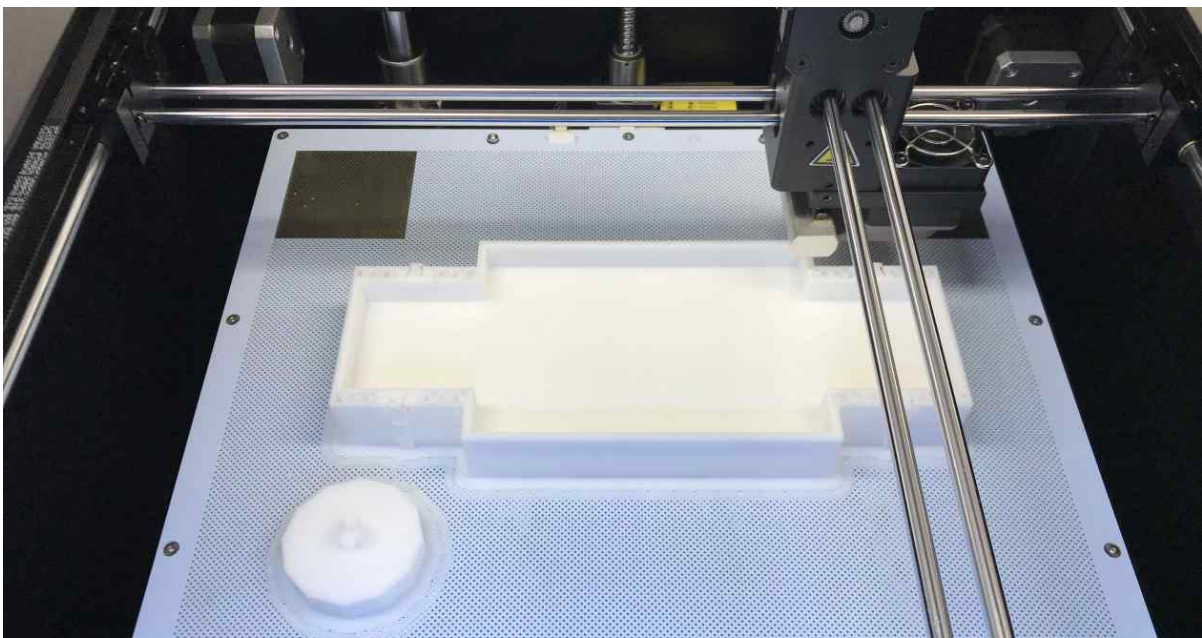




<휴대용 마그네틱 점검 H/W 운용 시험>

다. Prototype 제작 및 자체시험을 통한 Portable장비 최적(안) 도출

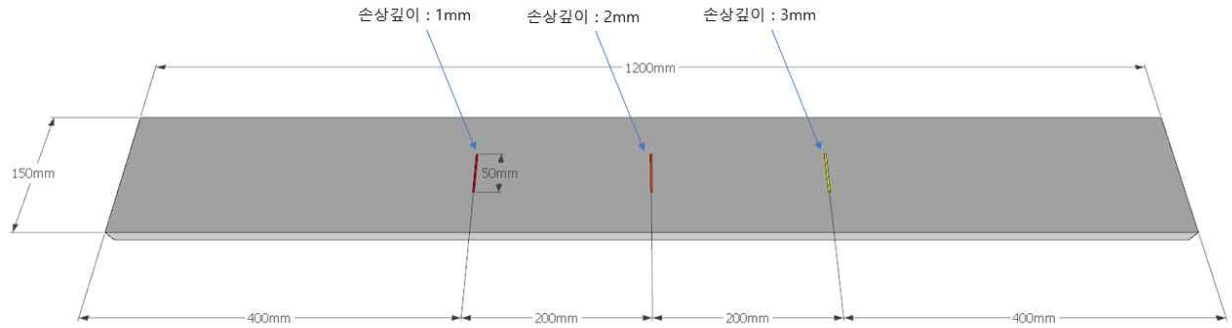
- 1차 년도 시작품을 자체시험 한 결과 강재에 발생한 손상을 검출하였다. 2차 년도는 강구조물 손상검출 장비의 현장적용을 위해 다양한 환경에서 시험을 실시할 필요가 있다. 따라서 2차 시작품 제작을 위해 Prototype의 장비를 3D프린터를 이용하여 자체 제작하고, 자석강도, 시편두께, 손상 깊이 등 다양한 변수를 시험하였다. 또한, 자화방법에 있어 마그네틱 방식이외에 전자석 방식을 도입하여 Prototype 제작하고 시험하여 자화방식을 비교하였다.



<3D프린트를 이용한 휴대용 마그네틱 점검 H/W모형 제작>

(1) 시험환경

- Prototype 시험을 위해 홀센서 및 마그네틱, 전자석이 장착될 케이스를 3D프린터를 이용해 자체 제작하였다. 또한 이를 시험하기 위한 2mm, 5mm, 10mm, 20mm의 시편을 제작하고 각 시편에 1mm, 2mm, 3mm의 손상을 입력하여 다양한 환경에 적용가능한지 시험을 통해 확인하고자 하였다. (※ 2mm 시편에는 0.5mm, 1mm, 1.5mm의 손상을 입력하여 정밀검출이 가능한지 확인하였다.)



<2mm>



<5mm>



<10mm>



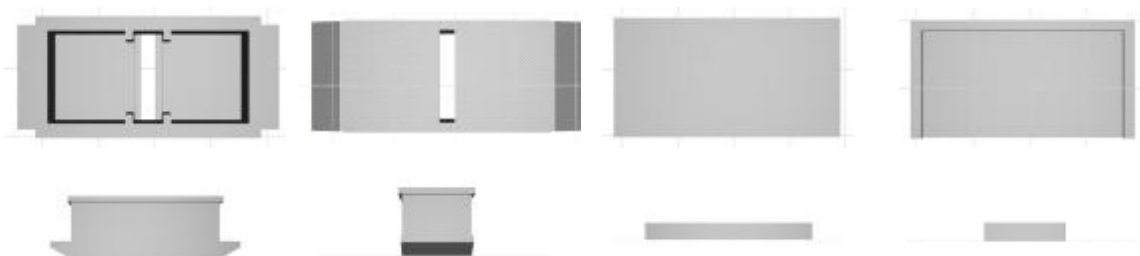
<20mm>

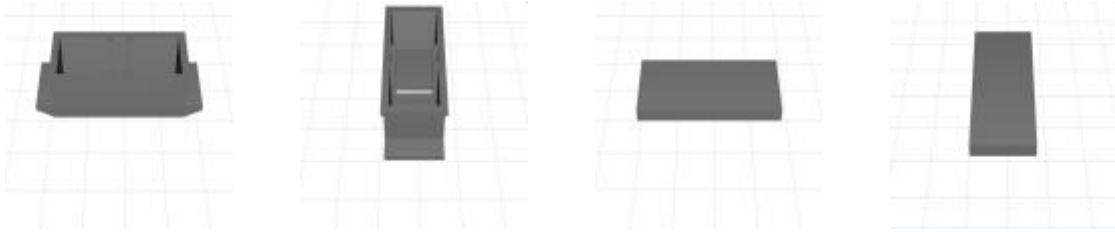
- 아래 사진과 같이 손상시편을 Prototype으로 스캔하여 손상 검출여부를 확인하는 방식으로 시험을 진행하였으며, 시편과 Prototype 간의 마찰로 인한 오차를 줄이기 위해 손상시편 위에 별도의 처리를 하여 시험을 실시하였다.



(2) MFL Prototype 제작

- 마그네틱 Prototype 시험을 위해 홀센서와 마그네틱이 장착될 head와 upper를 3D프린터를 이용해 자체 제작하였다. 또한 마그네틱 Prototype에 들어갈 마그네틱 강도를 3단계로 구분하여 시험을 실시하였다.





<MFL Prototype head 및 upper>



<자석강도 1>



<자석강도 2>

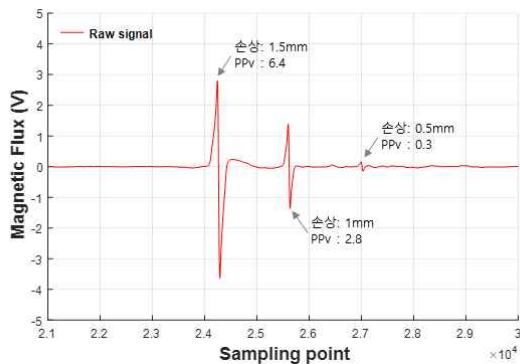


<자석강도 4>

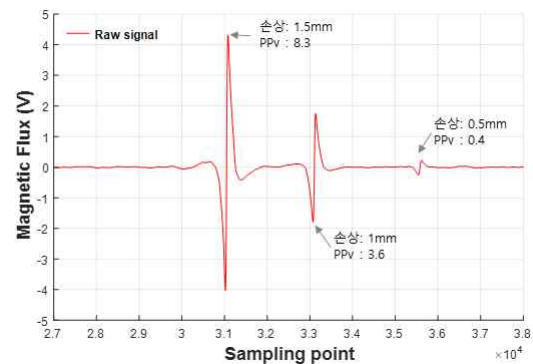
<MFL Prototype 자석강도>

(3) MFL Prototype 시험결과

- 2mm 손상시편에서 마그네틱 Prototype 스캔 시험결과 자석강도1과 자석강도2 모두에서 0.5mm, 1mm, 1.5mm의 손상을 검출할 수 있었으며, 자석강도가 강해질수록 Magnetic flux 값이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 손상깊이별 P-Pv(Peak to Peak value)값 역시 자석강도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다.

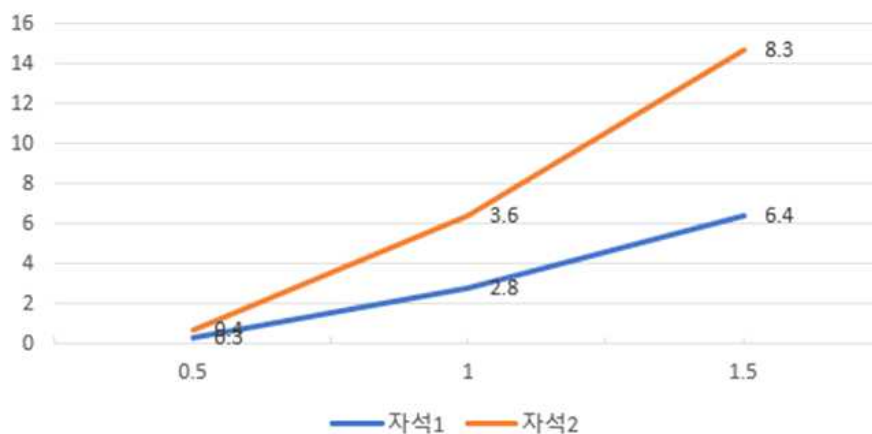


<자석강도1>



<자석강도2>

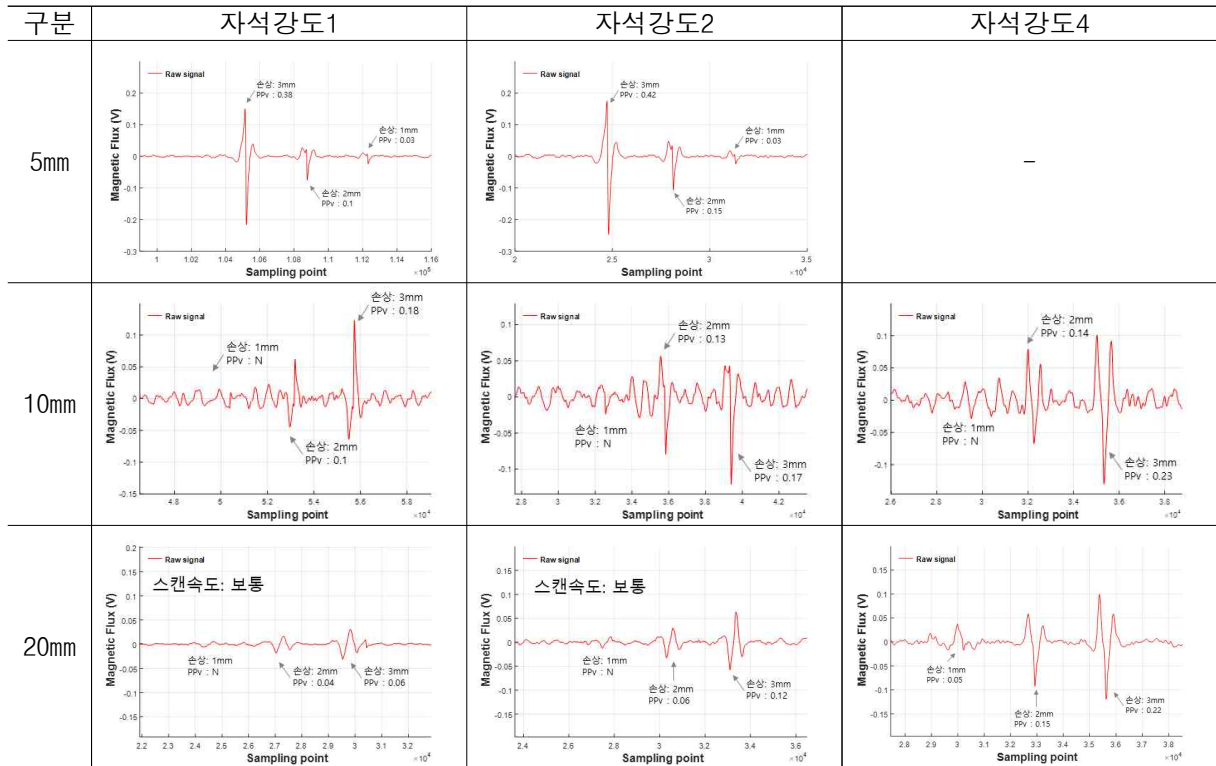
손상깊이별 P-Pv



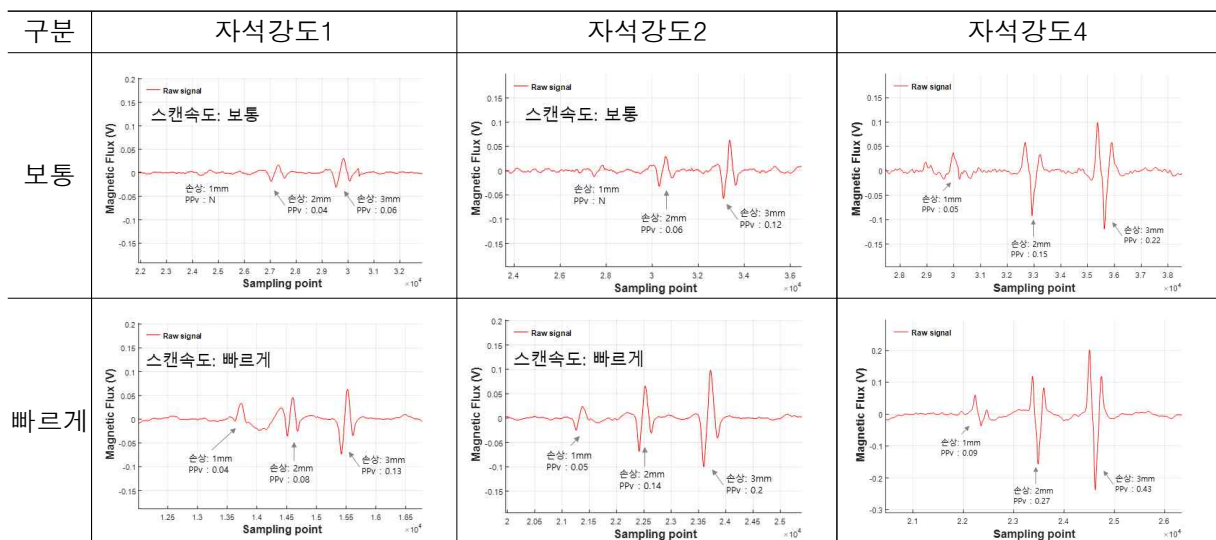
<손상깊이별 P-Pv>

<2mm 손상시편 손상검출 확인>

- 5mm, 10mm, 20mm의 손상시편에 대한 MFL Prototype 스캔 시험결과이다. 동일한 자석강도에서 시편 두께가 두꺼워질수록 Magnetic flux 값이 작아지는 것을 확인할 수 있었으며, 동일한 시편두께에서 자석강도가 강해질수록 Magnetic flux 값이 커지는 것을 확인할 수 있었다.



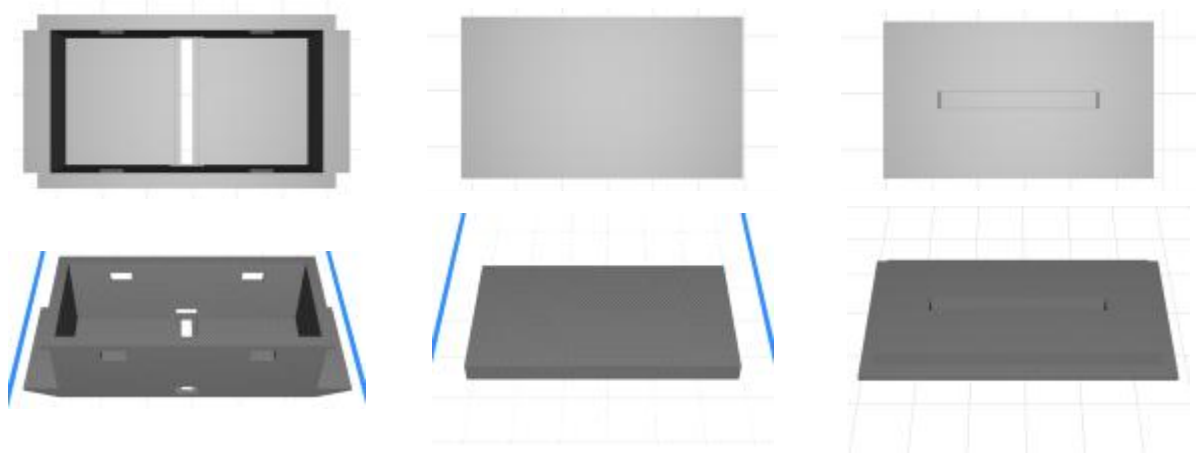
- 추가적으로 시험 진행 중 스캔속도에 따라 동일한 환경조건에서 데이터 값이 큰 폭으로 달라지는 경우가 있어 스캔속도에 따른 변화를 시험하였다. 스캔속도는 작업자가 Prototype으로 시편을 스캔하는 속도를 말하며, 보통 속도와 빠르게 스캔한 결과 값을 비교하였다. 아래와 같이 시편두께 20mm에서 비교한 결과 빠르게 스캔한 Magnetic flux가 보통 속도로 스캔한 Magnetic flux보다 크게 나타났다.



(4) 전자석 Prototype 제작

- 상기 마그네틱 Prototype 시험을 통해 자력이 강해질수록 손상검출이 잘되는 것을 확인하였다. 따라서 마그네틱을 추가하려 했으나 부착력에 의해 장비 운용이 힘든 문제가 발생하였다. 따라서 확실한 손상검출을 위해 마그네틱을 추가하는 것보다 전력을 통해 자기장을 형성하는 방법을 고안하였으며, 이에 전자석 Prototype을 제작하게 되었다.
- 전자석 Prototype 시험을 위해 홀센서와 전자석이 장착될 body와 upper, cover를 3D프린터를 이용

해 자체 제작하였다. 전자석은 $\varnothing 90 \times 60$ mm 규격의 보빈전자석에 코어를 결합하여 자기장이 형성되도록 하였으며, 일반 코어 이외에 자기장이 집중될 수 있도록 원뿔형 코어를 별도로 제작하여 시험을 실시하였다. 또한 컨트롤러 설치를 통해 전자석에 인가될 AC전력을 DC전력으로 변환하였으며, DC전력의 노이즈를 감소하기 위하여 노이즈필터를 추가로 설치하였다. 컨트롤러를 통해 6V, 9V의 전력을 인가하여 다양한 환경에서 시험을 실시하였다.



<전자석 Prototype body, upper, cover>



<보빈전자석>



<코어>



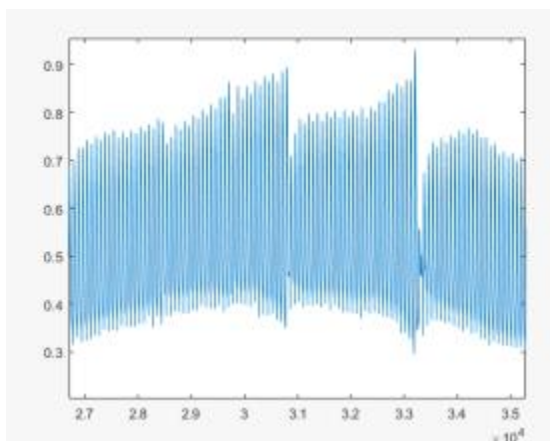
<컨트롤러>



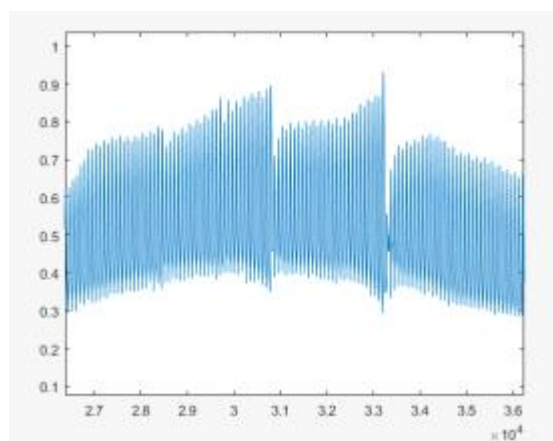
<전자석 Prototype>

(5) 전자석 Prototype 시험결과

- 전자석 Prototype 시험결과 손상부위에서 미세한 변화가 보이긴 하나 노이즈 레벨이 크게 나타나 판단이 어려운 실정이다. 이는 교류전원에 의한 진동 및 소음 발생으로 상당한 노이즈가 발생한 것으로 판단된다.



<6V>



<9V>

<전자석 Prototype 시험 결과>

(6) Prototype 시험 비교결과

- 본 시험은 다양한 환경변화에서 손상검출이 용이한지 확인하기 위하여 MFL Prototype으로 시편의 손상을 확인하였다. 시험결과 동일한 자석강도에서 손상시편 두께가 두꺼워질수록 손상검출이 어려웠으며, 동일한 손상시편 두께에서 자석강도가 강해질수록 손상검출이 잘되는 것으로 확인되었다. 강거더 및 강교각 등 실제 강재 시설물에 적용하기 위해서는 강도가 높은 자석을 사용해야 하

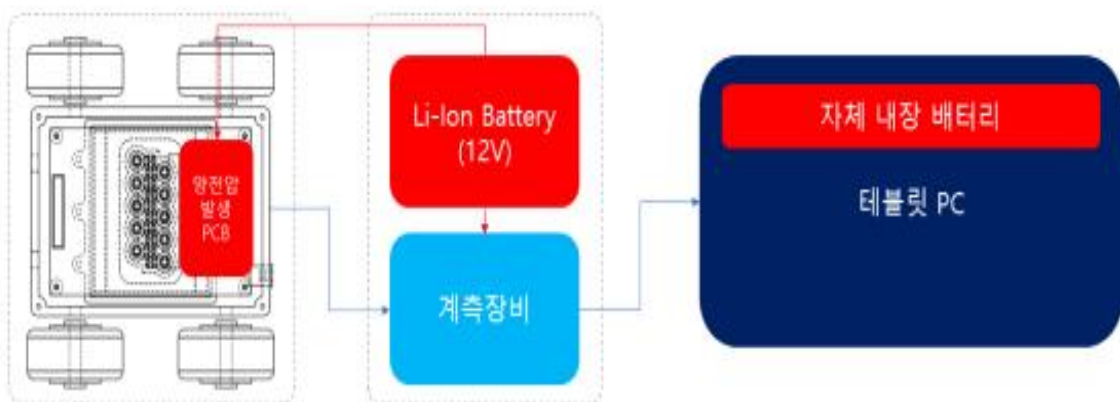
며, 이는 강제와 장비의 부착력에 의해 장비운용 문제가 발생할 것으로 판단된다.

- 따라서 전력을 통해 가변적으로 자력을 줄 수 있는 전자석 시험을 추가로 실시하였다. 추가 시험을 위해 전자석 Prototype 장비를 제작하였으며, 전자석은 $\varnothing 90 \times 60\text{H}$ 규격의 보빈전자석에 코어를 결합하여 자기장이 형성되도록 하였다. 전자석에서 발생하는 최대 가우스 값은 4,000G로 MFL Prototype에서 발생된 가우스 값이 3,000G보다 높은 것으로 측정되었다. 전자석 Prototype으로 시험을 실시한 결과 노이즈 레벨이 크게 나타나 손상검출이 어려운 것으로 결과가 나타났다. 이러한 문제는 교류전원에 의한 진동 및 소음 발생으로 상당한 노이즈가 발생한 것으로 판단된다.
- MFL Prototype 장비와 전자석 Prototype 장비를 단순 비교했을 때 전자석의 크기가 마그네틱 보다 약 4배정도 크고 무거우며, 전자석에 전력을 조절할 수 있는 컨트롤러가 별도로 있어야하는 문제가 있다. 따라서, 손상검출 정확도 및 무게, 운용방법 등 Portable한 장비개발을 고려하여 기존 MFL원리를 적용한 2차 시작품을 제작하고자 한다.

라. 2차 년도 휴대용 마그네틱 점검 H/W 개발(2차 시작품)

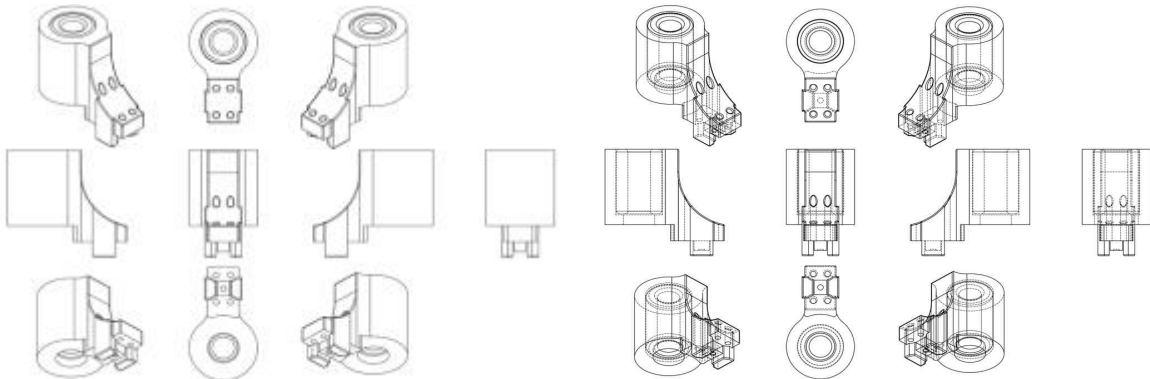
(1) 2차 시작품 설계

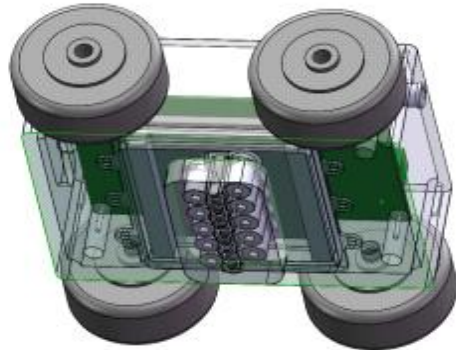
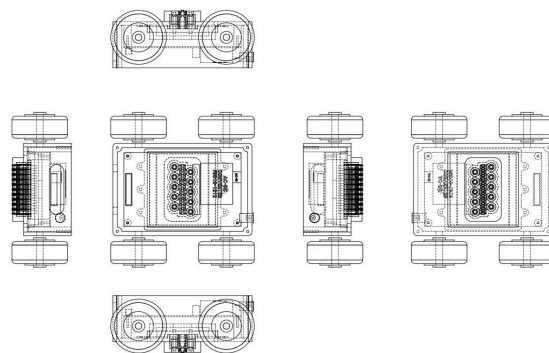
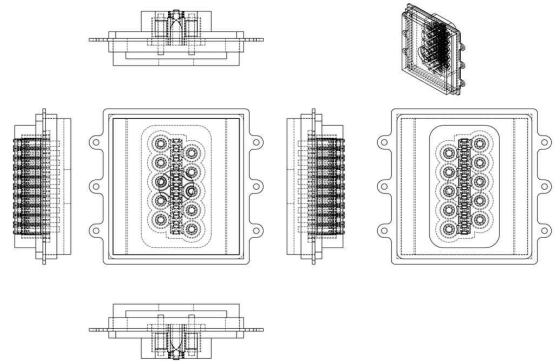
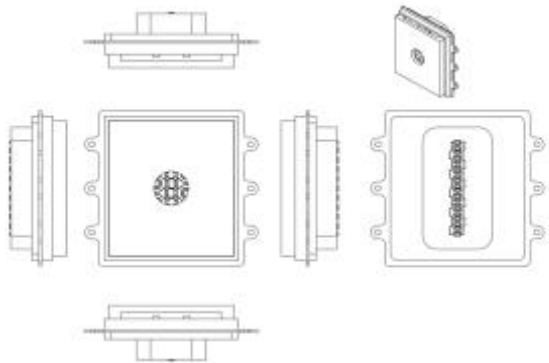
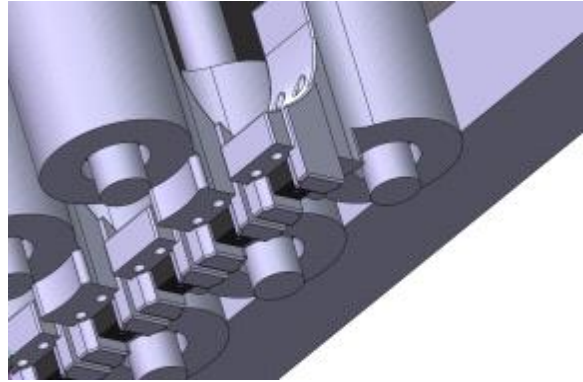
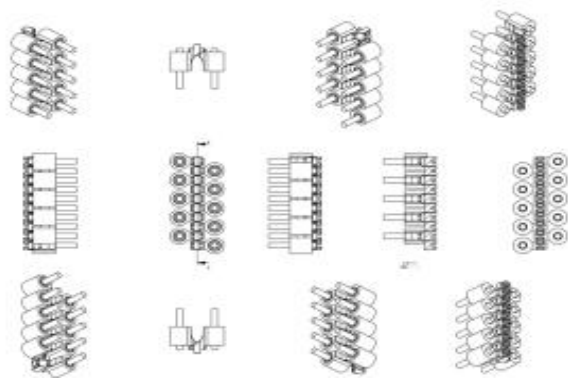
- 마그네틱 Prototype 장비와 전자석 Prototype 장비를 비교를 통해 손상검출 정확도 및 무게, 운용방법 등 Portable한 장비개발을 고려하여 기존 마그네틱 원리를 적용한 2차 시작품을 제작
- 2차 시작품은 헤드부, 전력 및 처리부, 시각화부로 구분할 수 있다.



<시스템 블록도>

- 1차 시작품과 달리 2차 시작품의 경우 용접부의 불규칙한 표면조건에서 일정한 데이터를 획득하기 위해 센서 헤드가 측정대상과 일정 간격을 유지할 수 있도록 Life-off 기능을 추가 하였다.

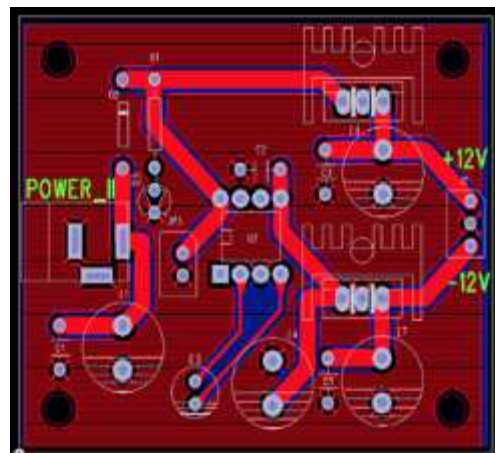
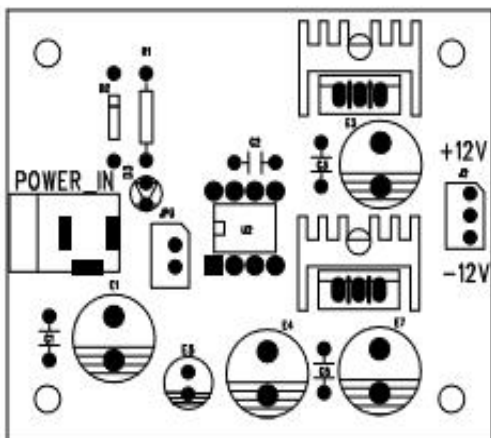




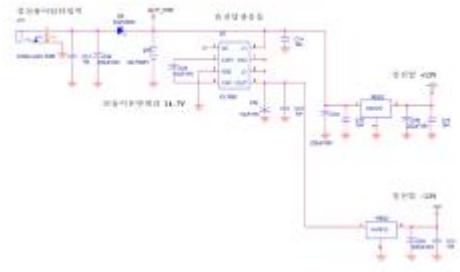
<2차 시작품 모델링>

(2) Portable 장비를 위한 정류필터 도입

- 또한 처리부에 필요한 전력을 기존에는 AC방식을 사용했으나 Portable 장비 개발을 위해 DC전력으로 변경하였다. 기존 직류전력을 교류전력인 DC전력으로 변경함에 따라 이를 정류할 필터가 필요하며, 본 연구 장비에 맞게 정류필터를 설계하고 PCB보드로 제작하였다.



<정류필터 PCB보드>



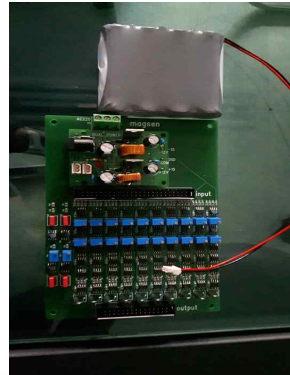
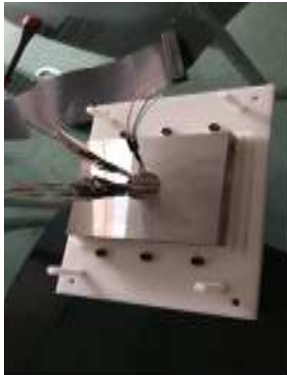
<정류필터 회로도>



<정류필터 PCB보드 홀센서 PCB보드 적용>

(3) 2차 시작품 제작

- 마그네틱 기반 강구조물 진단장비 2차 시작품 제작은 장비 무게를 고려하여 아크릴 및 3D프린터를 활용 제작하였다.



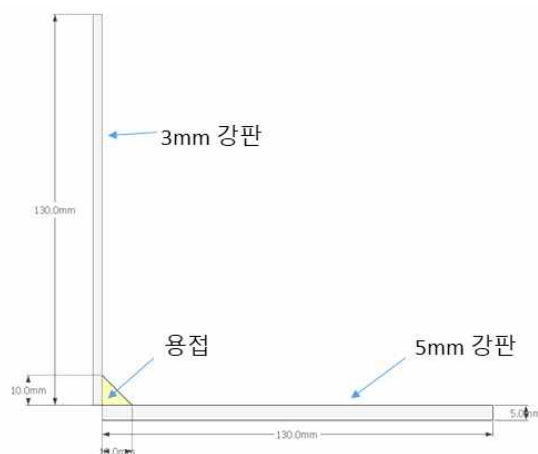
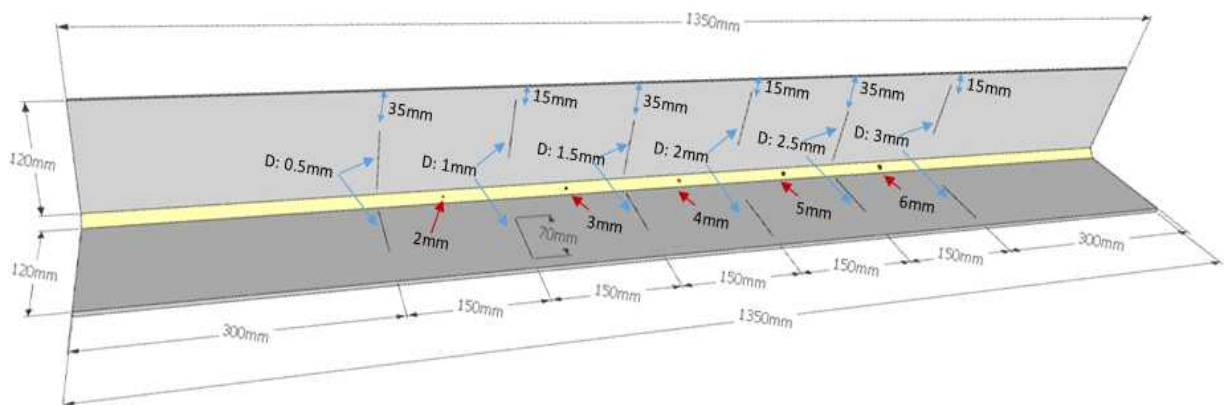
<2차 시작품>

(4) 2차 시작품 자체시험

- 1차 년도 시작품을 자체시험 한 결과 강재에 발생한 손상을 검출하였다. 2차 년도에서는 진단결과를 분석하여 수집된 신호자료를 바탕으로 시각화 시스템 UI를 개발하기 위해 우선 마그네틱 신호의 시각화기법을 개발해야 한다.. 따라서 제작된 2차 시작품의 성능 검증 및 신호의 가시화를 위해 자체 실험을 진행하였다.

(5) 시험환경

- 제작된 2차 시작품의 성능을 검증하기 위해 1350mm 길이에 130mm 너비, 3mm 두께의 강판시편과 같은 길이와 너비에 5mm 두께의 강판 시편을 제작하였다. 각 시편의 한쪽 면에 300mm부터 시작하여 150mm 간격으로 길이 70mm, 너비 1mm의 6가지 깊이를 가지는 손상을 주었다.
- 손상은 0.5mm를 시작으로 3mm까지 0.5mm만큼 점차적으로 깊어지는 손상을 가공하여 손상 깊이 변화에 따른 신호를 확인하고, 수집되는 손상의 이미지화를 통하여 손상 깊이에 따른 신호의 변화를 확인하였다. 또한 손상을 중심에서부터 오른쪽과 왼쪽으로 지그재그로 가하여 손상의 위치별로 신호를 수집 및 분석하였다. 이를 바탕으로 누설자속 신호를 이미지로 변환했을 시 손상의 위치 구분이 가능한지 확인하였다.
- 또한 각 손상부별로 지나가는 채널과 지나가지 않는 채널을 구분하여 신호를 확인하였다. 모든 손상을 지나가지 않는 채널 1번, 손상 #2, #4, #6을 지나가지 않는 채널 2, 3번, 손상 #1, #3, #5를 지나가지 않는 채널 8, 9, 10번과 모든 손상을 지나가는 채널 4, 5, 6, 7번을 두어 예측되는 신호를 비교분석 하였다.



<시|편 연면>

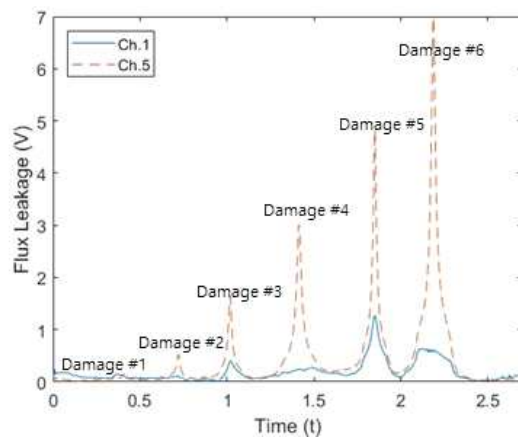
Diagram illustrating a 10-channel bus system. The bus is divided into 10 channels (CH.1 to CH.10). The channels are grouped into five pairs, labeled #1 through #5, representing the bus structure.

손상 (#)	#1	#2	#3	#4	#5	#6
깊이 (mm)	0.5	1	1.5	2	2.5	3

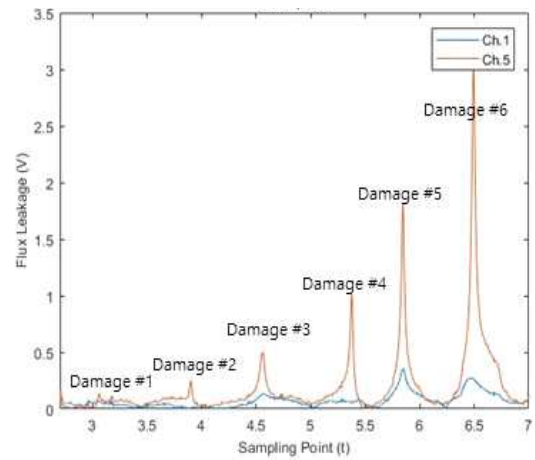
<채널별 지나가는 손상 위치 및 손상 깊이>

(6) MFL 2차 시작품 시험결과

- MFL 2차 시작품 스캔 시험결과 제작된 시편의 손상 모두에서 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, 2.5mm, 3mm의 손상을 검출할 수 있었으며, 손상의 깊이가 깊어질수록 Magnetic flux 값이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 손상깊이별 P-Pv(Peak to Peak value)값 역시 자석강도에 비례하여 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- 또한 모든 손상을 지나가지 않는 채널 1번, 손상 #2, #4, #6을 지나가지 않는 채널 2, 3번, 손상 #1, #3, #5를 지나가지 않는 채널 8, 9, 10번과 모든 손상을 지나가는 채널 4, 5, 6, 7번을 두어 계측되는 신호를 비교분석 하였다.

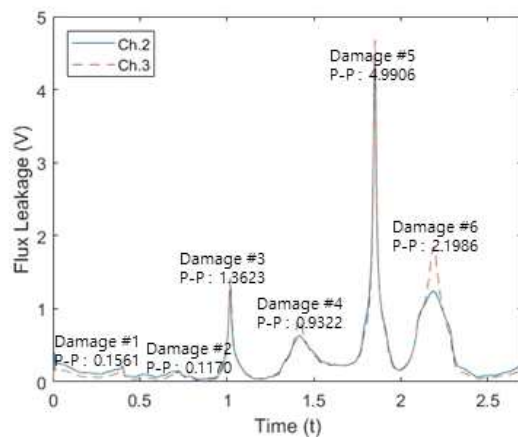


3mm 시편

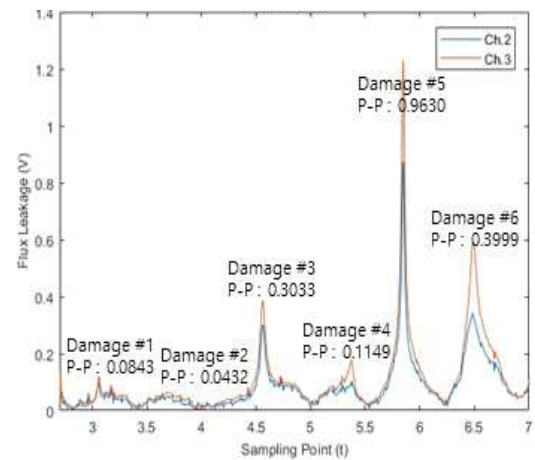


5mm 시편

<모든 손상을 지나가지 않는 채널1번과 모든 손상을 지나가는 채널5번과의 비교>

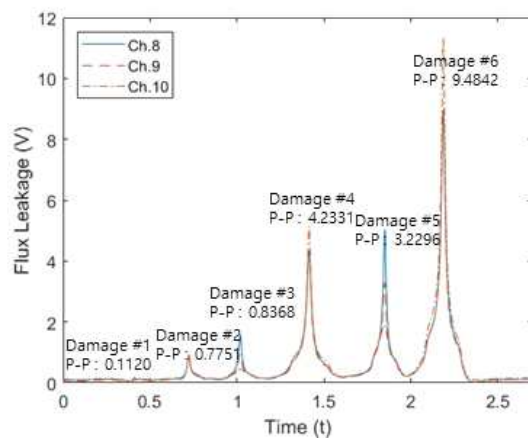


3mm 시편

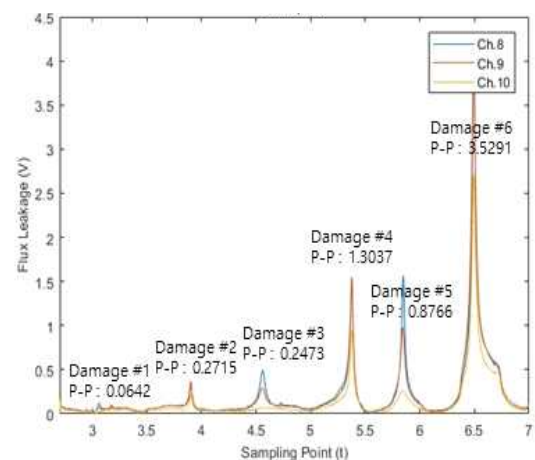


5mm 시편

<손상 #2, #4, #6을 지나가지 않는 채널 2,3번>

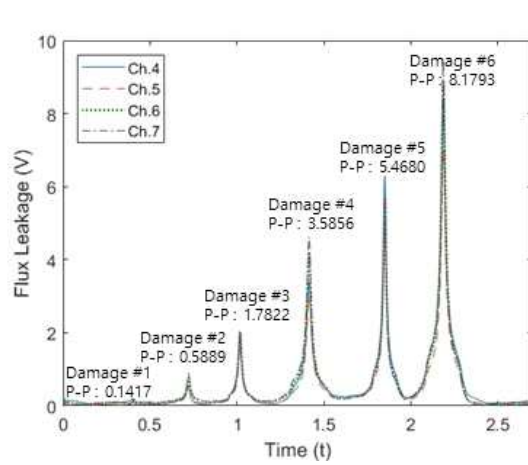


3mm 시편

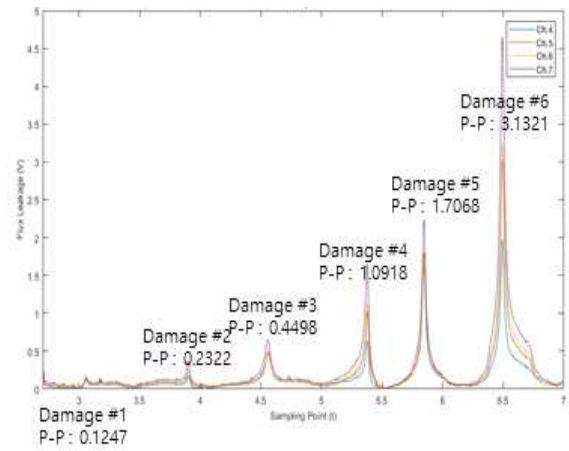


5mm 시편

<손상 #1, #3, #5를 지나가지 않는 채널 8,9,10번>



3mm 시편

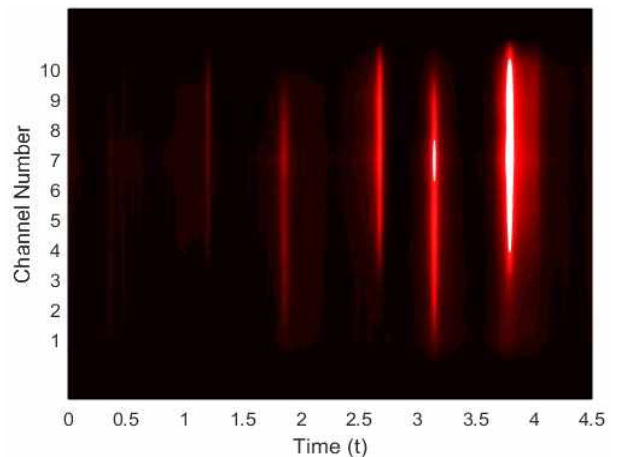
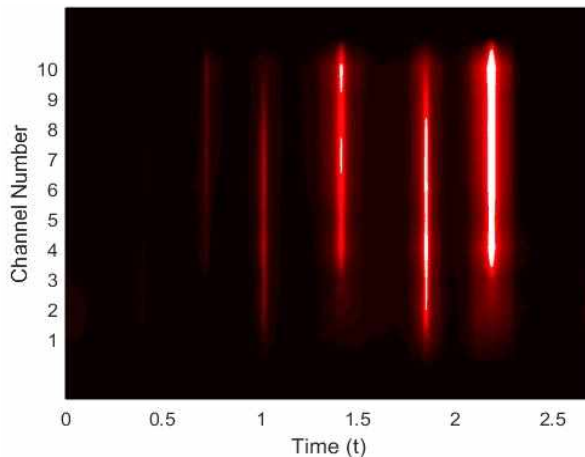


5mm 시편

<모든 손상을 지나가는 채널 4,5,6,7번>

- 각 채널별로 발생하는 자속신호를 비교하였을 때, 3mm 시편에서 생긴 신호와, 5mm 시편에서 생긴 신호의 양상이 비슷함을 확인하였다. 특히 손상 #1, #3, #5를 지나가는 채널과 손상 #2, #4, #6을 지나가는 채널에서의 신호는 손상이 지나가지 않을 때는 누설되는 자속량이 약한 것을 확인하였다. 다만 손상의 깊이가 깊어질수록 약간의 자속이 발생하는데, 이는 누설되는 자속량이 많아져 주변에서도 확인이 가능한 것으로 보인다.

(7) 자속신호의 이미지화



<모든 손상을 지나가지 않는 채널1번과 모든 손상을 지나가는 채널5번과의 비교>

- 신호를 가시화 시켰을 경우 손상을 지나가는 채널과 지나가지 않는 채널에서 수집된 신호가 다를 수 있었다. 손상의 채널별로 지나가는 손상부를 다르게 하여 시편을 제작하였는데, 이를 이미지로 변환하였을 때 손상부의 위치가 실제 시편과 유사함을 확인할 수 있었다. 또한 손상을 지나가는 채널에서 색의 변화가 더 짙어져 구분이 가능하였다. 다만 손상의 깊이가 깊어질수록 누설되는 자속이 증가해 손상을 지나가지 않는 채널에서도 색의 변화를 확인할 수 있었다.

(8) 2차 시작품 공인시험

- 마그네틱 기반 강구조물 진단장비 2차 시작품 성능 확인을 위해 공인시험기관인 한국산업기술시험원(KTL)에서 테스트를 진행하였다. 시험결과 진단가능최대속도, 휴대성, 조사가능지속시간 성능을 모두 만족하는 것으로 확인되었으며, 특히, 강판에 입력한 손상 3종(깊이1.5mm×폭0.5mm, 깊이1.0mm×폭0.5mm, 깊이0.5mm×폭0.5mm)을 모두 검출한 것으로 나타나 최종 개발 목표인 2mm이하의 손상 크기 검출 가능성을 확인하였다.

구분	지표	공인시험 결과
진단 가능 최대 속도	0.5m/sec	0.5m/sec에서 검출 가능
휴대성	3kg	2.0kg
조사가능 지속시간	3Hr	3시간 이상 점검 가능

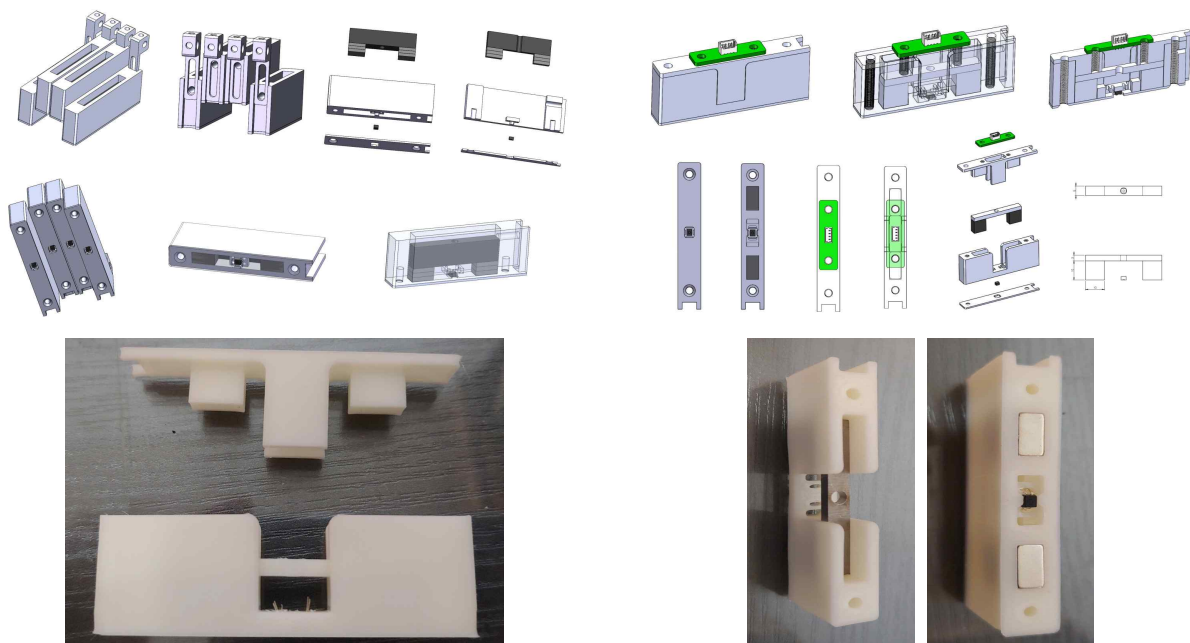


<공인시험 성적서>

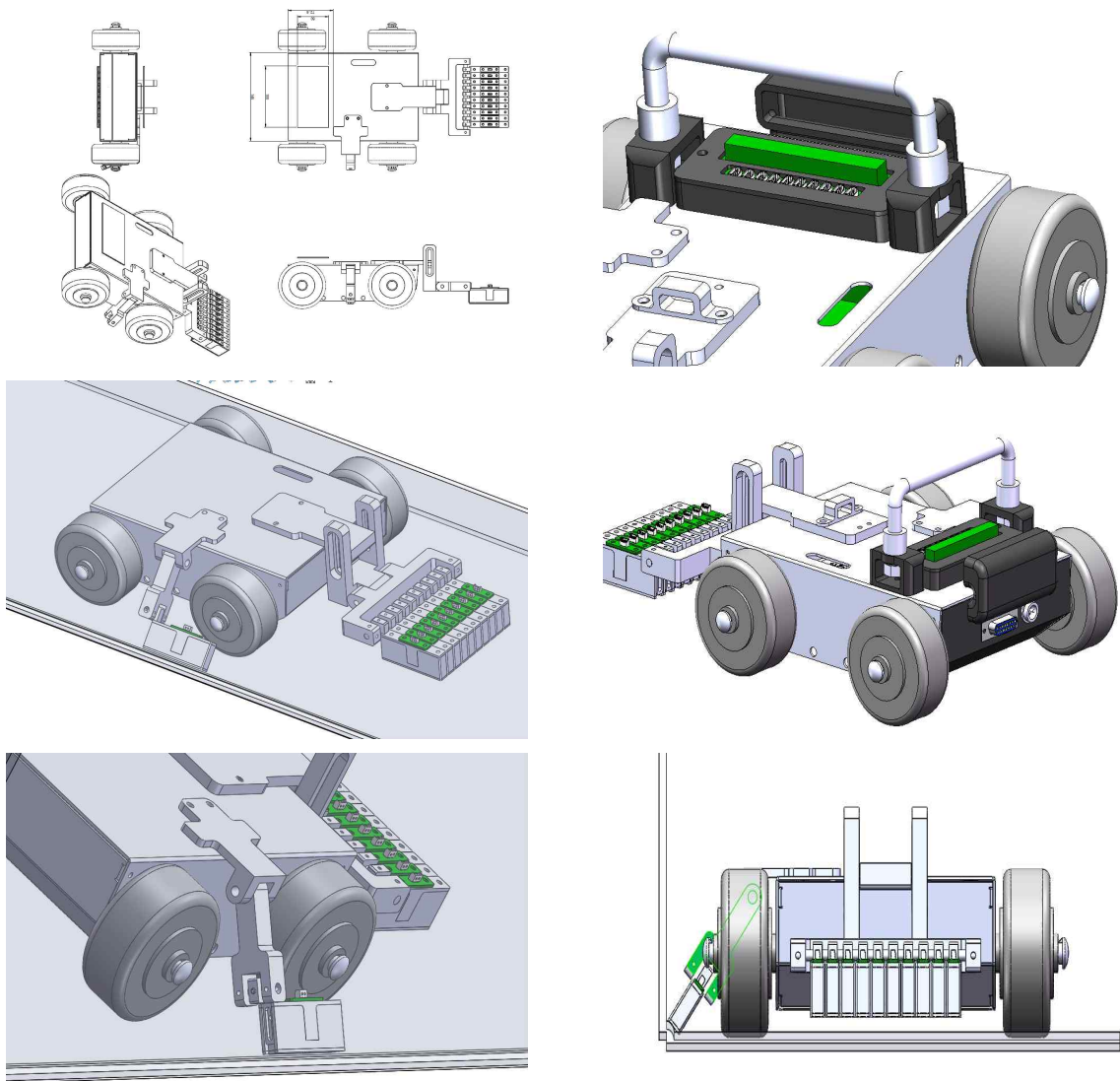
마. 3차 년도 휴대용 마그네틱 점검 H/W 개발(3차 시작품)

(1) 3차 시작품 설계

- 기존 시작품은 평판 및 맞대기 용접부에 발생한 결함을 검출하기 위한 장비로 필렛 용접부와 같은 강재에 적용하기 어려웠다. 이에 따라 3차 년도 시작품은 필렛 용접부 적용이 가능하도록 H/W를 설계 하였으며, 시작품 후면 상단에 손잡이를 적용하여 사용자 친화적으로 H/W를 보강하였다.
- 또한, 기존 시작품의 경우 10개의 홀센서가 하나의 센서부로 결합되어 있어 데이터 오류 인한 점검 시 센서부 전체를 분해하여 교체하는 문제가 있었으며, Lift-off기능이 2mm 이내로 미세한 높이조절만 가능하여 평판과 용접부 검사 시 개별적으로 측정해야하는 문제가 있었다. 이에 3차 년도 시작품은 10개의 홀센서를 각각 모듈화 하여 개별적으로 높이조절이 가능하도록 하였으며, 센서가이드와 센서모듈이 분리·결합될 수 있도록 하여 전방 센서가이드에 설치된 센서 모듈을 분리하여 측면 센서가이드에 결합하여 다양한 변수가 존재하는 현장에서 사용성을 향상시켰다.

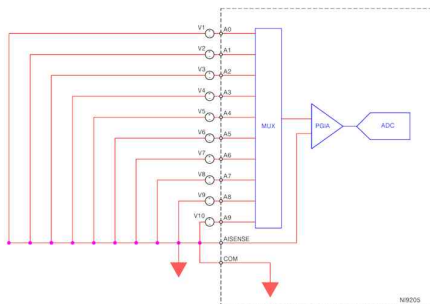


<센서 모듈 모델링>

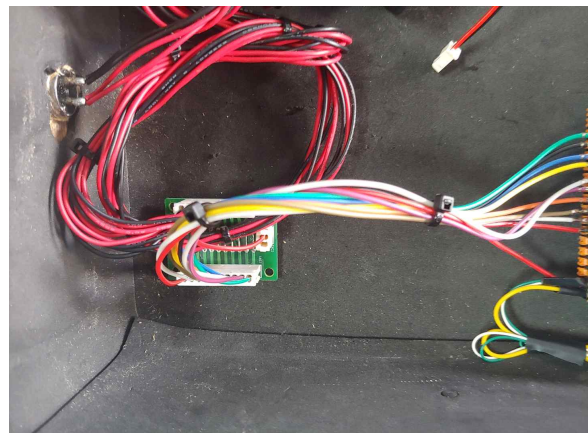


<3차 시작품 모델링>

- 처리부에 DC 전원을 사용하여 센싱 신호 확인 시 오프셋 에러와 노이즈가 발생(60Hz, AC성분)하였는데, DC-DAQ 회로 구성 시 접지 참조 시스템을 사용하여 신호를 측정하였기 때문에 접지 루프 노이즈가 발생한 것으로 확인되었다. 따라서, 정격출력 신호대비 접지 루프로 인한 측정 노이즈 오류를 감소시키기 위하여 신호 접지 회로를 재구성하고 DAQ에서 데이터 측정 방식을 비참조 방식(NRSE:Single-Ended-Nonreferenced)으로 설정함으로써 센싱 신호와 DAQ사이의 오프셋 에러성분을 감쇠시킨 정상적인 출력 신호 획득이 가능하였다.



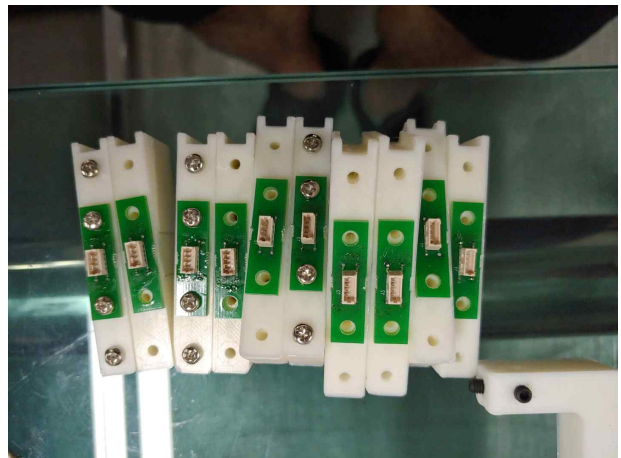
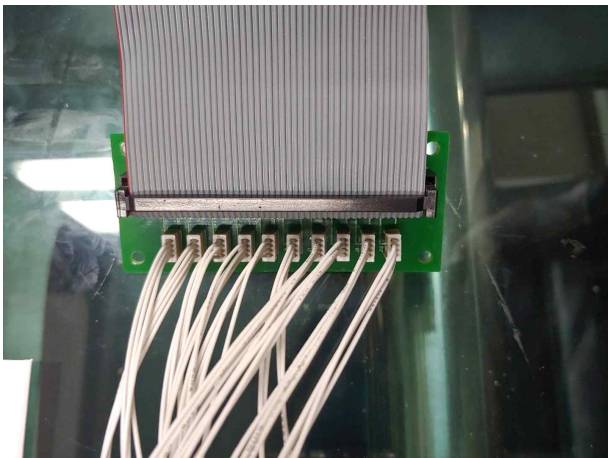
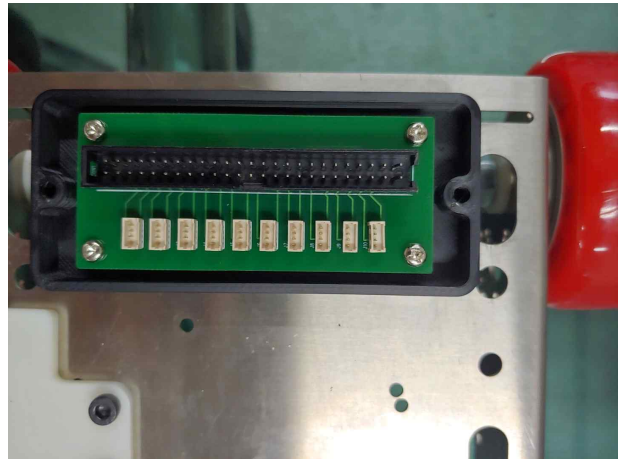
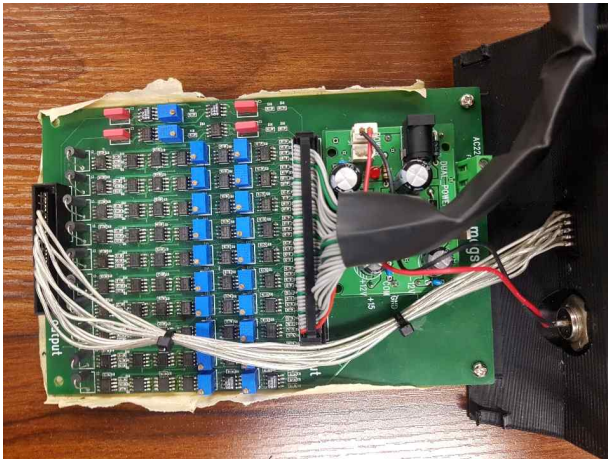
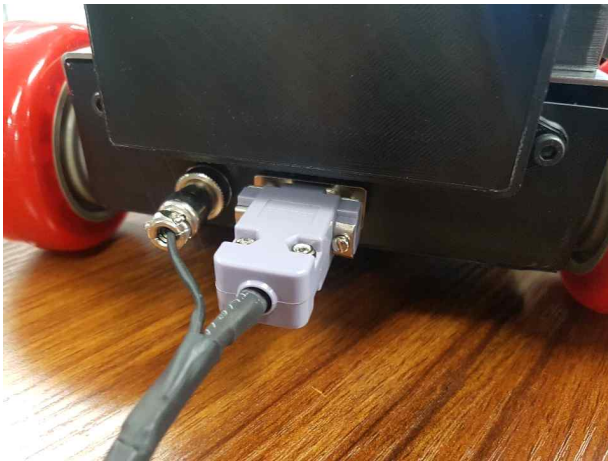
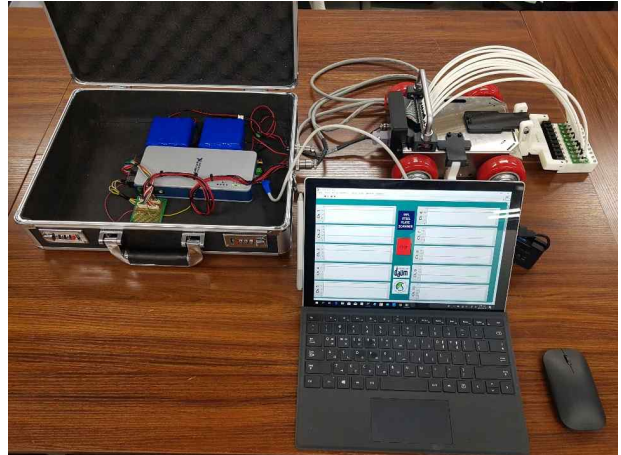
<Analog DC 입출력 회로도>



<DAQ 입출력 모듈 적용>

(2) 3차 시작품 제작

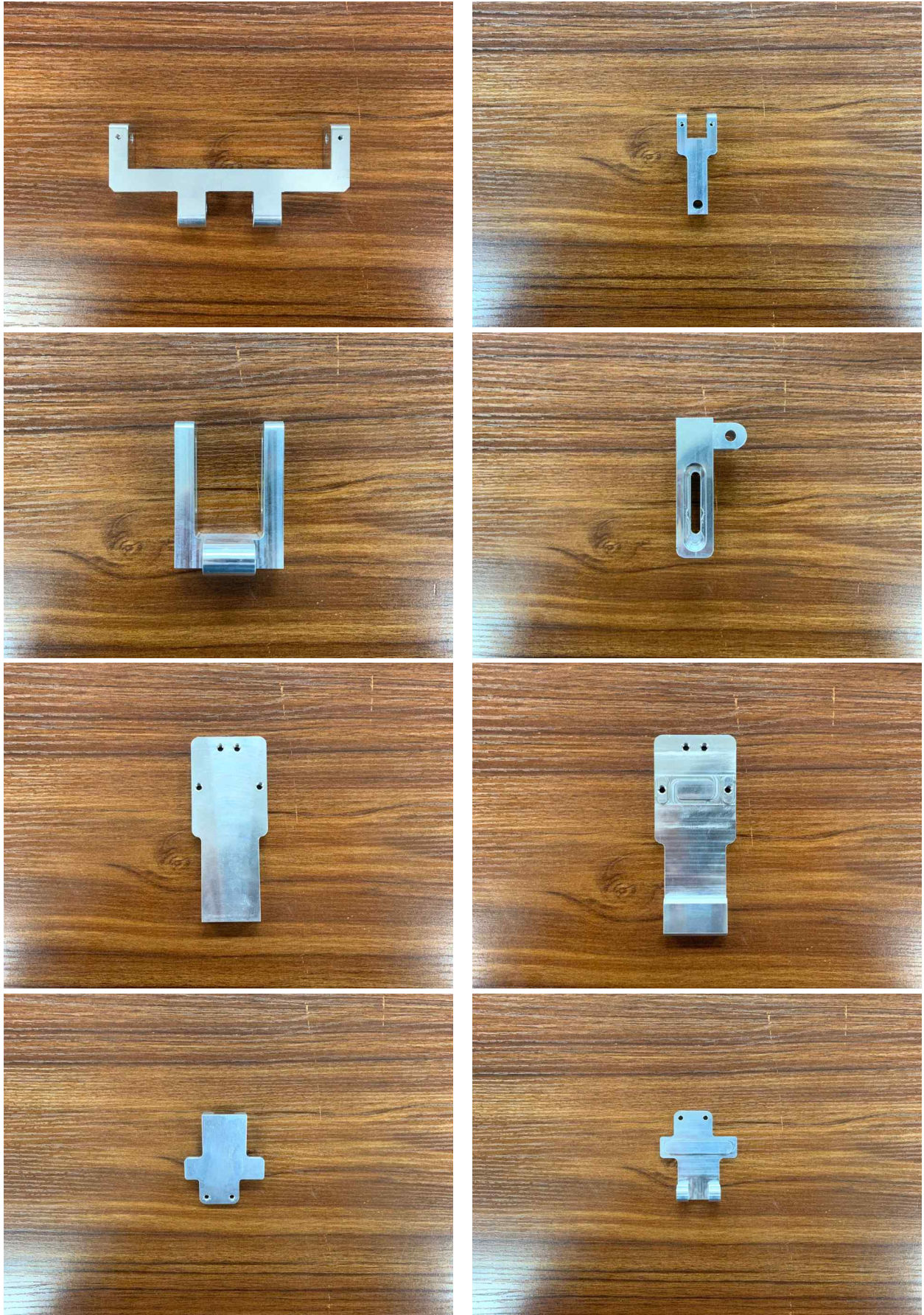
- 마그네틱 기반 강구조물 진단장비 3차 시작품 센서부와 계측부로 구분되어 있으며, 계측부는 별도의 케이스를 통해 휴대할 수 있도록 제작하였다.



<3차 시작품>

(3) 3차 시작품 보완제작

- 마그네틱 기반 강구조물 진단장비 3차 시작품은 휴대성을 향상시키기 위해 센서지그(Sensor Jig)를 3D프린터로 제작하였다. 그러나 자체 테스트 중 내구성이 약한 3D프린터가 반복적으로 파손되었다. 이에 무게는 가볍고 3D 프린터보다 강도가 강한 알루미늄으로 센서지그를 제작하였다.



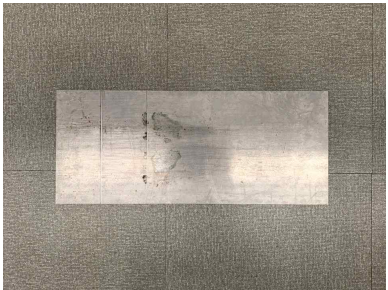
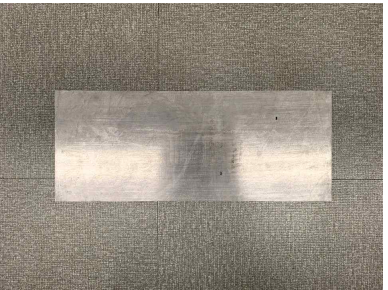
<알루미늄 Sensor Jig 제작>

(4) 3차 시작품 공인시험

- 마그네틱 기반 강구조물 진단장비 3차 시작품 성능 확인을 위해 공인시험기관인 (주)KES에서 아래와 같은 시험을 실시하였다.

시험항목	시험기준	시험방법
작동가능 온도 범위	-15℃ ~ 50℃	저온(-15℃)과 고온(50℃)에서 10분 방치 후 손상검출 유무 확인
탐지가능 손상 크기	2mm 이하 손상 검출	시편의 2mm 이하의 손상검출 유무 확인
진단 가능 폭	10cm 이상	시편의 손상 검출 유무 확인 (센서헤드 폭 10cm)
진단가능 단면 손실률	3% 이하	시편의 3% 이하의 손상검출 유무 확인

- 시험항목 중 작동가능 온도 범위는 (주)KES에서 보유한 Temp. & Humid. Chamber를 사용하였으며, 다른 시험항목은 자체 제작한 시편을 사용하였다.

Temp. & Humid. Chamber	제작 시편	
	2mm 이하 손상	3% 이하 손상
		

- 시험결과 작동가능 온도 범위, 탐지가능 손상 크기, 진단 가능 폭, 진단가능 단면 손실률 모두 만족하는 것으로 확인되었다.

주식회사 케이 이 에스
경기도 양주시 용인구 시민로36번길 48, 2F(15호) (온양동)
Tel. +82-31-425-4200 / Fax. +82-31-424-0450
www.kes.co.kr

발급번호 : KES-RE-1910336
제일지 : (3. 31. 15)

No.	관리번호	장비명	제조사	모델명	Serial #	교정일자	유효기간	교정 주기	비고
1	KES-RE-1098	DIT Verifier Calipers	Mitutoyo	305 mm	0010463	2019.01.07	2020.01.07	1년	-
2	KES-RE-111	Standard Tape Rule	ROMELON	KMC-86	NONE	2019.04.05	2020.04.05	2년	-
3	KES-RE-114	Temp. & Humid. Chamber	ESPEC CORP.	ESEC-6245W 62T45-360A	301500893	2019.06.28	2020.06.28	1년	비행 (m) : 4.0 X 3.0 X 3.0 (W X D X H)

제품명	모델명	제조번호(No.)	비고
마그네틱 센싱 장비	마그네틱 센싱 장비	N/A	#1

순번	시험명	시험방법	시험기준	시험결과
1	작동가능 온도 범위		-15℃ ~ 50℃	중적 이상 없음
2	탐지가능 손상 크기(폭)	신장자 제시 방법	2 mm 이하 손상 검출	적 합
3	진단 가능 폭		10 cm 이상	적 합
4	진단가능 단면 손실률		3 % 이하	적 합

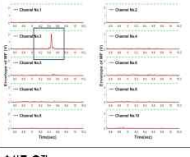
이 시험장치는 (주)케이 이 에스의 사전 동의없이 무단 전제 및 복제를 할 수 없습니다.
이 시험장치의 결과는 시험을 실시한 목적에 한합니다.
이 시험장치에 대한 문의사항, 확인의 필요성 등 문의사항은 다음 이메일로 문의 바랍니다.
www.kes.co.kr

KES-GP-7081-05 Rev. 6 KES A4

주식회사 케이 이 에스
경기도 양주시 용인구 시민로36번길 48, 2F(15호) (온양동)
Tel. +82-31-425-4200 / Fax. +82-31-424-0450
www.kes.co.kr

발급번호 : KES-RE-1910336
제일지 : (3. 31. 15)

4. 진단가능 단면 손실률			
1) 시험조건			
시험항목	시험기준	시험결과	비고
진단가능 단면 손실률	손상 시편의 진단 폭 대비 손상 단면의 폭 측정값의 3 % 이하인 손상 단면 검출 할 것	손상시편 진단 폭 대비 3 % 이하인 손상 단면 검출함	손실률 = 2.495 % (4.99/200)*100

진단가능 단면 손실률 측정

이 시험장치는 (주)케이 이 에스의 사전 동의없이 무단 전제 및 복제를 할 수 없습니다.
이 시험장치의 결과는 시험을 실시한 목적에 한합니다.
이 시험장치에 대한 문의사항, 확인의 필요성 등 문의사항은 다음 이메일로 문의 바랍니다.
www.kes.co.kr

KES-GP-7081-05 Rev. 6 KES A4

4. 진단결과 분석 및 수집된 신호자료 시각화 시스템 UI 개발

가. 강교량 점검자용 UI 개발

- 강교량 점검 시스템을 시제품화하기 위해서는 사용자가 최소한의 조작으로 원하는 강재의 진단을 수행하고, 그로부터 취득된 필요한 정보를 직관적으로 확인할 수 있는 그래픽 기반의 User Interface(UI)를 필요로 한다.
- 이에 복잡한 진단 및 분석과정보다는 점검자에게 필요한 정보만을 효과적으로 전달 가능한, 사용자 친화적 관리자 모니터링 UI를 개발하고자 하였고, ‘강교량 점검자의 실시간 마그네틱 수집 신호 확인을 위한 모니터링 프로그램’ 제작하였다.
- 제작된 점검용 UI는 LabView 기반으로 개발되었으며, 마그네틱 센싱 시스템의 온/오프 제어와 파라미터 설정이 가능 하도록 개발하였으며, 10채널에서 동시 수집되는 마그네틱 신호 데이터의 실시간 모니터링 및 신호 후처리를 위한 저장 기능을 탑재하였다.
- 이와 함께 손상 감지시 채널별 인디케이터의 점멸 및 소리 알람을 통해 점검자가 실시간으로 손상을 인지할 수 있도록 제작하였다.
- 점검용 UI는 기능별 탭으로 구분되었으며 ‘채널별 누설자속신호 디스플레이’, ‘채널별 자속 차분 값 디스플레이’와 ‘3D 시각화 MFL 신호 디스플레이’, 그리고 ‘진단용 UI 파라미터 세팅’의 총 4개의 탭으로 구성되었다.

나. 채널별 누설자속신호 디스플레이 탭 구성

- 아래 그림에 UI의 첫 번째 탭인 ‘채널별 누설자속신호 디스플레이’ 탭을 나타내었다.



<채널별 누설자속신호 디스플레이 탭 화면>

- 진단을 시작하는 ‘Start’ 버튼 및 진단을 종료하는 ‘Stop’ 버튼을 화면 상단에 배치하였고, 그 옆으로 세팅을 위한 ‘Setting’ 버튼을 두었다. 화면에는 각 10개 채널의 자속신호를 동시에 확인할 수 있도록 채널별 자속 그래프를 배열하였다.
- 좌측에 1~5번, 우측에 6~10번 채널의 그래프를 배열하였고, 중앙부에 손상 감지시 빨간색으로 점멸하는 채널별 인디케이터를 배치하였다.
- 아래에 작동중인 점검용 UI를 캡처하여 나타내었다. 각 채널별로 감지되는 누설자속 신호를 확인할 수 있도록 하였으며, 손상이 발생한 시점에 가운데에 위치한 해당채널의 인디케이터가 빨간색으로 점멸된다.
- 각 그래프의 스케일은 기본적으로 오토스케일로 설정되어있으나, 목적에 따라 지정값으로 설정 가능하다.



<채널별 누설자속신호 디스플레이 탭을 이용한 신호 모니터링>

다. 채널별 자속 차분값 디스플레이 탭 구성

- 각 채널별 자속신호를 이용한 점검시, 자속의 형태 및 크기를 파악하기에는 용이 하지만, 작은 누설자속의 판단시 노이즈에 의해 손상의 유무 인지가 어려울 수 있다.
- 이에 직관적인 손상의 유무 판단의 편의성을 높이기 위해, 누설자속신호 픽의 순간변화량이 큰 특성을 이용하여 자속신호의 차분 값을 구하였고, 이를 이용하여 ‘채널별 자속 차분값 디스플레이 탭’을 구성하였다.
- ‘채널별 자속 차분값 디스플레이 탭’은 ‘채널별 누설자속 신호탭’과 유사하게 제작되었다. 좌우로 채널별 자속 차분값 실시간 그래프가 배열되었고, 중심부엔 손상 인디케이터가 배치되었다.



<채널별 자속 차분값 디스플레이 탭 화면>

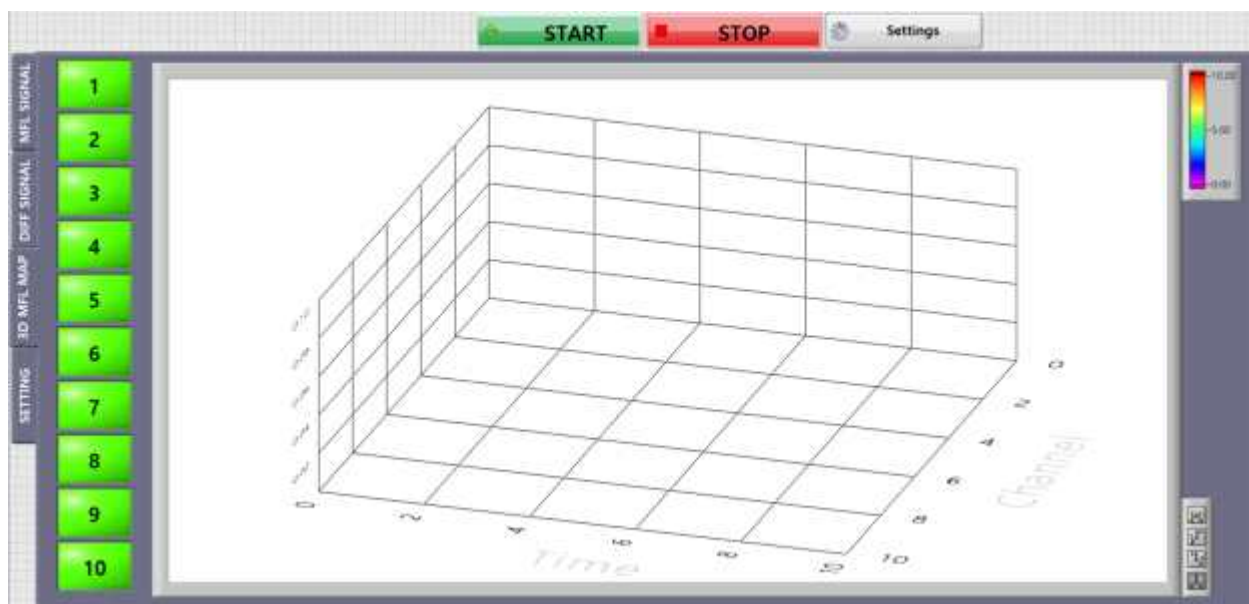
- 아래 작동시 화면을 살펴보면 일반 자속신호를 감지할때와 비교하여, 손상부에서 명확하게 픽이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 손상의 발생여부의 판단에 있어 직관성 향상에 도움이 된다. 이와 함께 상하 대칭형의 누설자속신호와 달리 양의 값을 가지는 신호로 구성하여 하나 기준치를 기준으로 손상유무를 판단할 수 있다.
- 본 그래프들은 일정한 기준으로 손상의 판단을 빠르게 확인하기 위해, 지정값으로 스케일이 설정되어 있으나, 필요시 오토스케일로 변환이 가능하다.



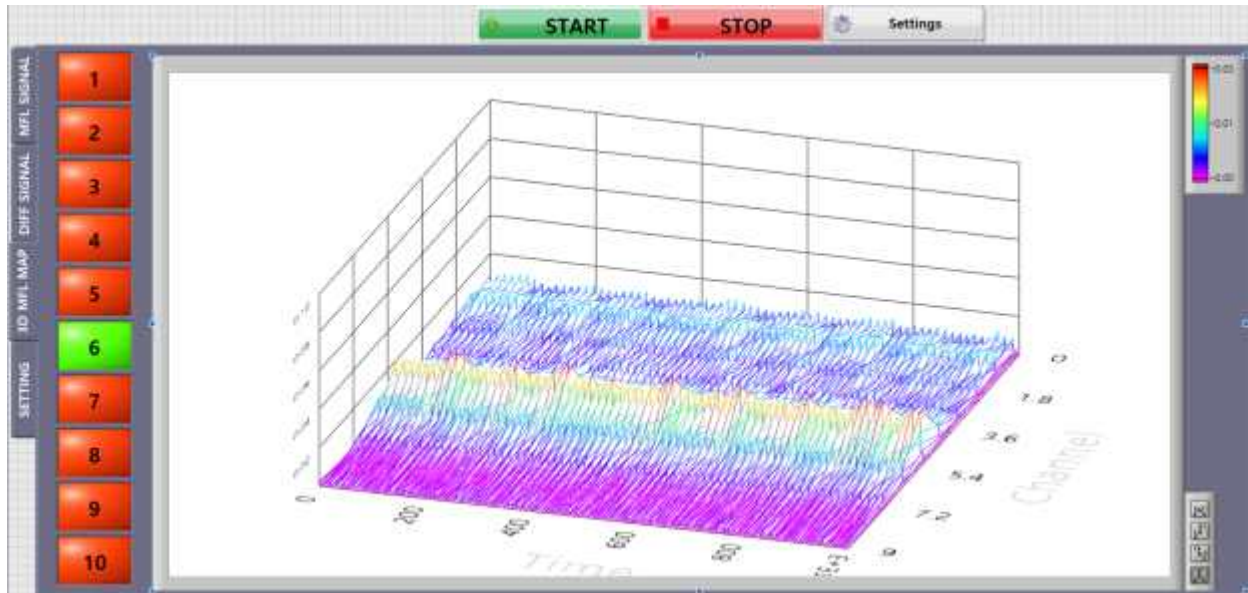
<채널별 자속 차분값 디스플레이 탭을 이용한 신호 모니터링>

라. 3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭 구성

- 위 두 가지 유형의 그래프로 손상의 발생 유무를 판단하기에는 용이하지만, 각 채널별로 나뉘어져 있어 전반적인 손상의 위치 및 형상을 판단하는데에 어려움이 있다.
- 이에 10개의 센싱채널로 이루어진 센서헤드의 특성을 이용, 10개 채널의 신호를 3D평면에 배열하여 자속분포를 3차원으로 시각화 하였다.
- 3D 그래프의 X축은 센싱채널 번호, Y축은 샘플번호(Time)로 구성하였고, Z축은 신호의 크기를 나타내었다. 그래프의 신호는 손상 유무의 판단이 용이하도록 양수화된 각 채널의 차분값을 이용하였고, 신호의 크기별로 컬러맵을 적용하여 높은 신호 발생시 손상부가 부각되어 보이도록 시각화 하였다.



<3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭 화면>

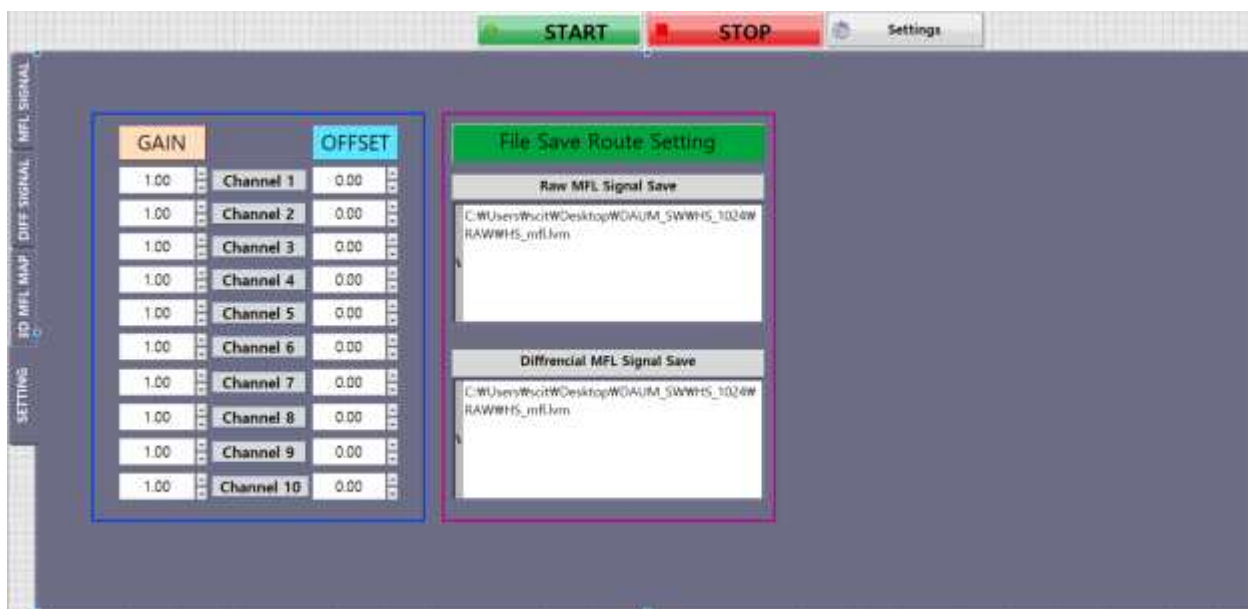


<3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭을 이용한 모니터링 결과>

- 위 그림에 동작중인 점검용 UI의 3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭을 나타내었다. 위와 같이 스캔한 시편의 자속분포를 3D 이미지로 확인할 수 있고, 디스플레이된 이미지는 조작을 통해 회전 및 확대/축소가 가능하다. 이를 통해 손상의 유무뿐만 아니라 형상 및 크기를 한눈에 확인할 수 있다.
- 이와 함께 손상 감지 시 채널별 인디케이터를 이용하여 직관적으로 손상발생 유무를 확인할 수 있도록 탭을 제작하였다.

마. 진단용 UI 파라미터 세팅 탭 구성

- 본 진단용 UI의 파라미터 설정을 위한 'Setting' 탭을 아래와 같이 구성하였다.

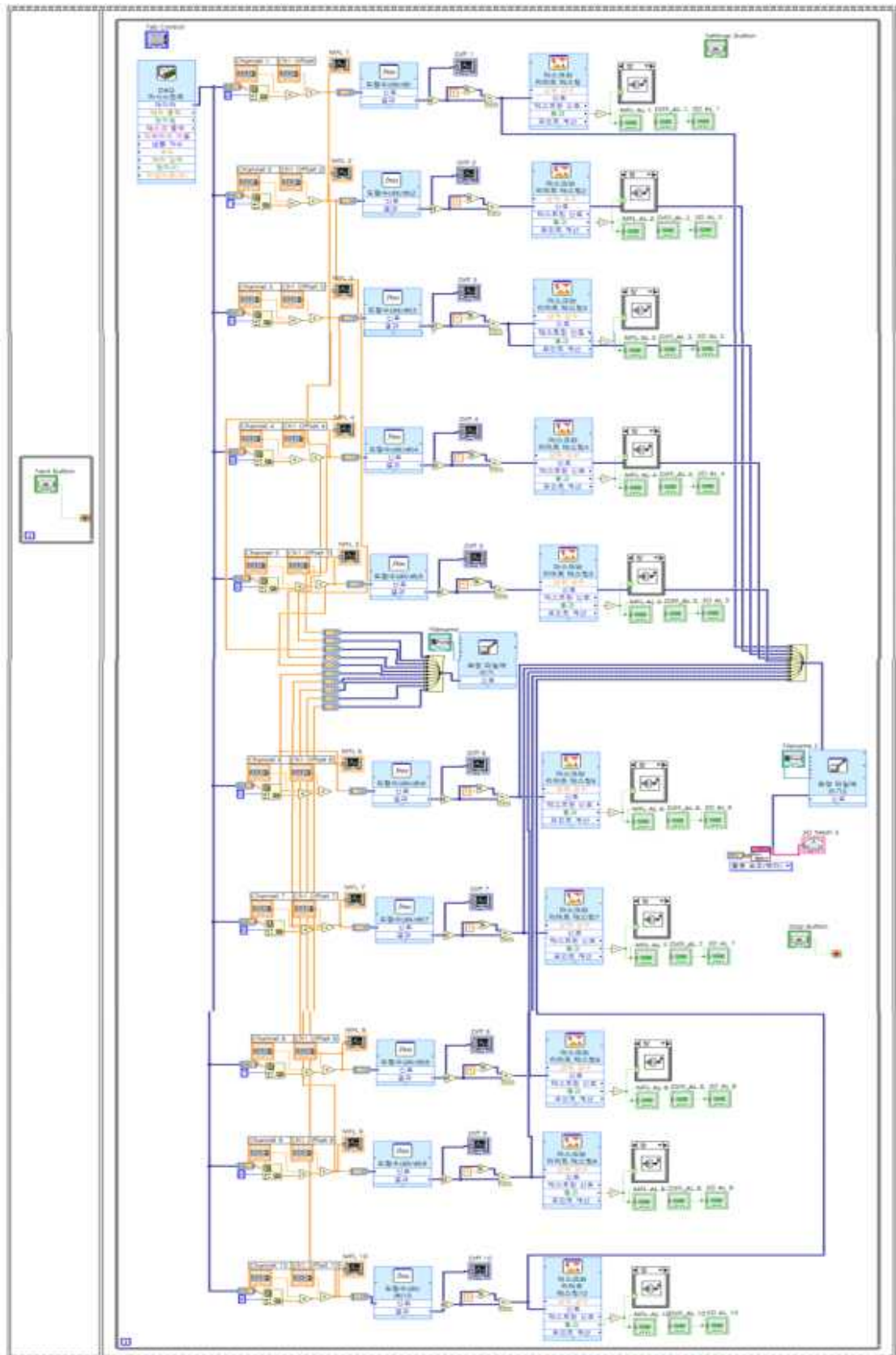


<진단용 UI 파라미터 세팅 탭 화면>

- 진단용 UI의 세팅을 위해, 각 센싱채널의 게인(Gain) 값 설정 컨트롤러를 배치하였고, 이와 함께 채널별 오프셋(Offset) 값을 변경/설정할 수 있도록 하였다.
- 이와 함께 원자속 및 차분값 수집신호의 저장 경로 및 파일명을 지정할 수 있도록 세팅 컨트롤러를 배치하였다.

바. 진단용 UI의 블록다이어그램

- 아래에 본 점검용 UI의 구성을 위한 블록 다이어그램을 나타내었다.



<점검자 모니터링 프로그램 블록다이어그램>

5. 강 구조물 유지관리 지침서 및 매뉴얼

가. 지침서

(1) 목적

- 이 「손상검출 시스템 지침서」(이하 “지침서”)는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」(이하 “법”이라 한다) 제21조 및 같은 「법」시행령(이하 “령”이라 한다) 제17조에 따라 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 등에 관한 지침」(국토교통부 고시 제2018-45호, 이하 “지침”이라 한다)을 참고하였으며, 제1종시설물, 제2종시설물 및 제3종시설물의(교량) 안전점검 및 정밀안전진단 재료시험(강재 구조물) 시 손상검출 시스템의 실시방법·절차 등에 관한 필요사항을 제시하는 것을 목적으로 한다.

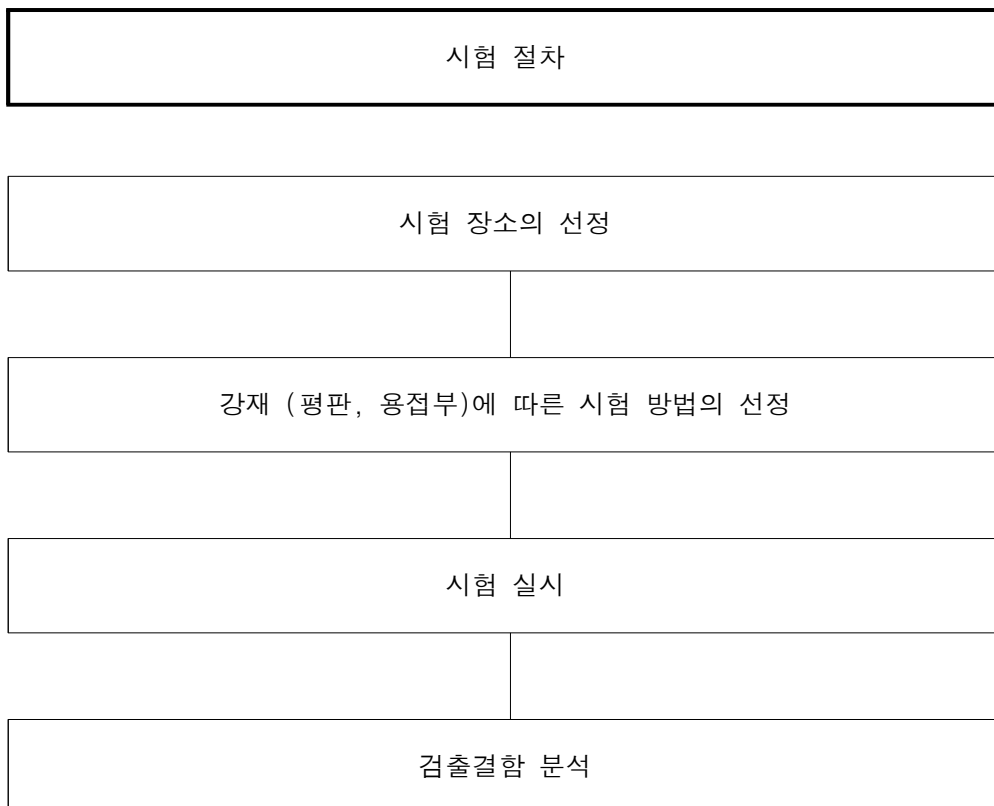
(2) 적용 범위 및 절차

(가) 적용 범위

- 손상검출 시스템은 강재에 발생한 결함을 검출하기 위하여 강재를 자화시켜 결함부에서 자기장의 변화를 센서로 계측하는 비파괴검사 방법으로, 강재 표면 및 표면부근에 있는 균열, 용접이음부, 기타 흠 등의 결함 검출에 적용한다.
- 손상검출 시스템은 자화된 강재의 불연속지점에서 발생하는 누설자속인 가우스(Gauss; G)를 홀센서(Hall sensor)로 측정하여 전압의 변화량을 가시적으로 보여주는 기술이다. 따라서 자화강도에 따라 강재 적용 범위가 달라진다.

구분	강판		용접	
	두께	손상크기	목두께	손상크기
1,000G	3T	1mm 이상	-	-
4,000G	20T	1mm 이상	5	2mm 이상

(나) 손상검출 시스템 절차



(3) 적용 기준 및 수량

(가) 교량 구조물

• 재료시험 항목

구 분		기존 재료시험	손상검출 시스템
정밀안전점검	기본과업	-	◦용접부 및 균열의식부
	선택과업	◦용접부 결함조사	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)
정밀안전진단	기본과업	◦용접부 결함탐사	◦용접부 및 균열의식부
	선택과업	◦용접부 결함탐사	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)

• 평가방법

구 분		기존 재료시험		손상검출 시스템	
		재료시험 항목	평가 방법	재료시험 항목	평가 방법
정밀안전점검	기본과업	-	-	◦손상검출 시스템	◦용접부 및 균열의식부
	선택과업	◦자분탐상 ◦초음파탐상	◦용접부 결함 탐상	◦손상검출 시스템	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)
정밀안전진단	기본과업	◦초음파탐상 (맞대기용접부)	◦용접부 비파괴시험 ◦필요시 방사선투과	◦손상검출 시스템	◦용접부 및 균열의식부
	선택과업	◦방사선투과 (맞대기용접부) ◦자분탐상 (균열의식부)	◦용접부 비파괴시험 ◦균열의식부 필요시 염료침투탐상 실시	◦손상검출 시스템	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)

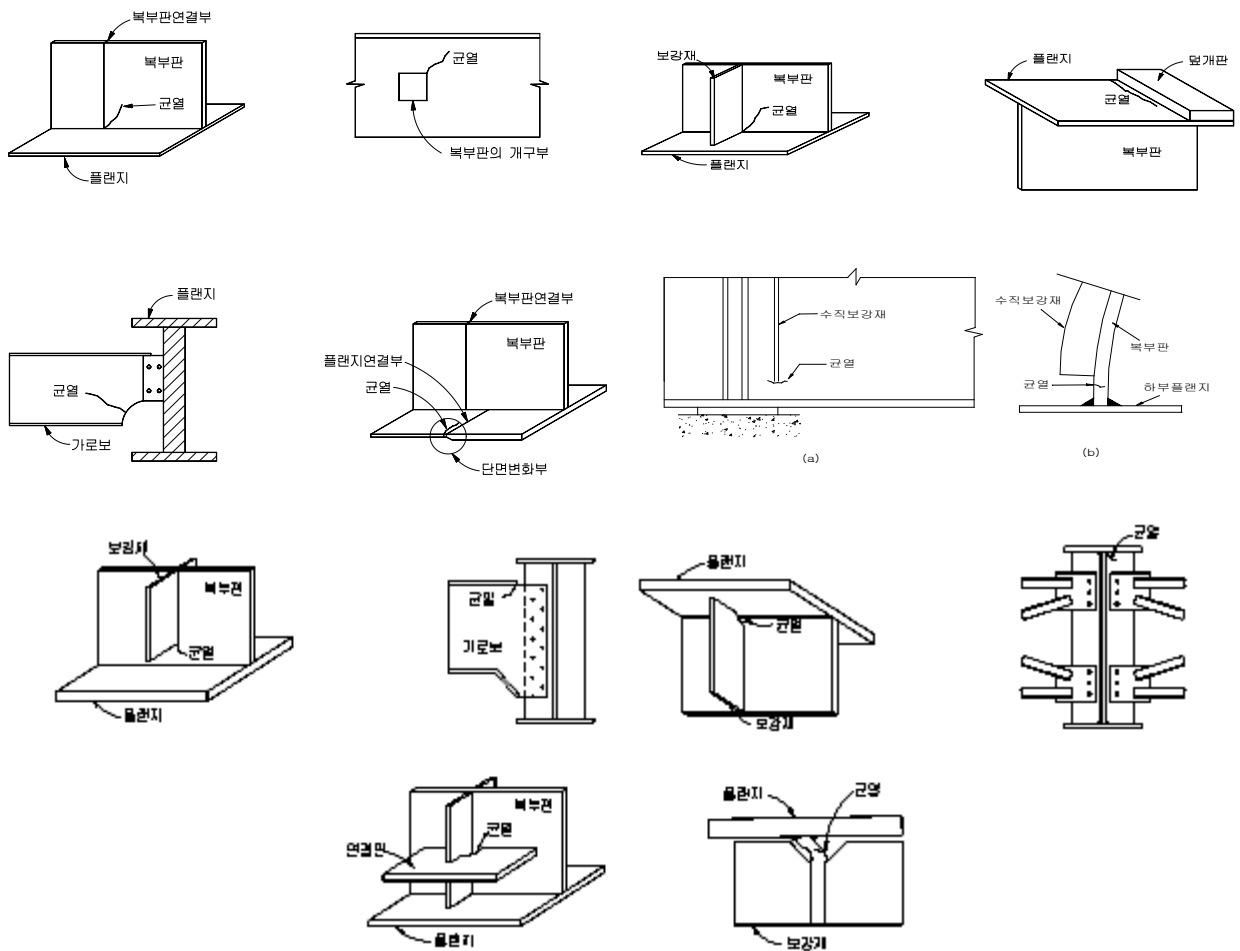
• 기준수량

구분		기존 재료시험			손상검출 시스템		
		항목	기준수량	비고	항목	기준수량	비고
정밀안전점검	기본과업	-	-	-	손상검출 시스템	◦전체 용접부 및 균열 의식부 대비 50%	◦용접부 및 균열 의식부
	선택과업	자분탐상 초음파탐상	◦과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정	◦용접부 결함	손상검출 시스템	◦과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)
정밀안전진단	기본과업	초음파탐상	◦플레이트거더교 : 1개소/경간별 거더 ◦박스거더교 : 2개소/경간별 거더	◦맞대기용접부	손상검출 시스템	◦전체 용접부 및 균열 의식부 전수조사	◦용접부 및 균열 의식부
	선택과업	방사선투과 자분탐상	◦과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정	◦균열의식부 ◦맞대기용접부	손상검출 시스템	◦과업 내용에 의해 조사 및 수량 결정	◦플랜지 인장부 조사 (맞대기 용접부)

(4) 교량 시설물의 점검부위 및 결함·손상 종류

(가) 강 바닥판, 강 거더 및 강 교각(강 주탑)

점 검 부 위	손 상 종 류
▷ 피로강도등급 낮은 용접상세부(D, E급)	◦ 피로균열
▷ 받침부	◦ 지점보강재 하단 용접부 균열
▷ 중앙부	◦ 맞대기 용접부, 덮개판 덧댐부 끝부분 균열
▷ 보수부위	◦ 용접부 및 용접부 주변 균열
▷ 부재연결판	◦ 트러스교, 아치교의 현재, 사재, 수직재 연결판의 부식, 균열 및 변형 ◦ 사장교, 현수교의 케이블 정착부 연결판의 부식, 균열 및 변형



<피로균열이 발생하기 쉬운 구조상세>

① 강 바닥판

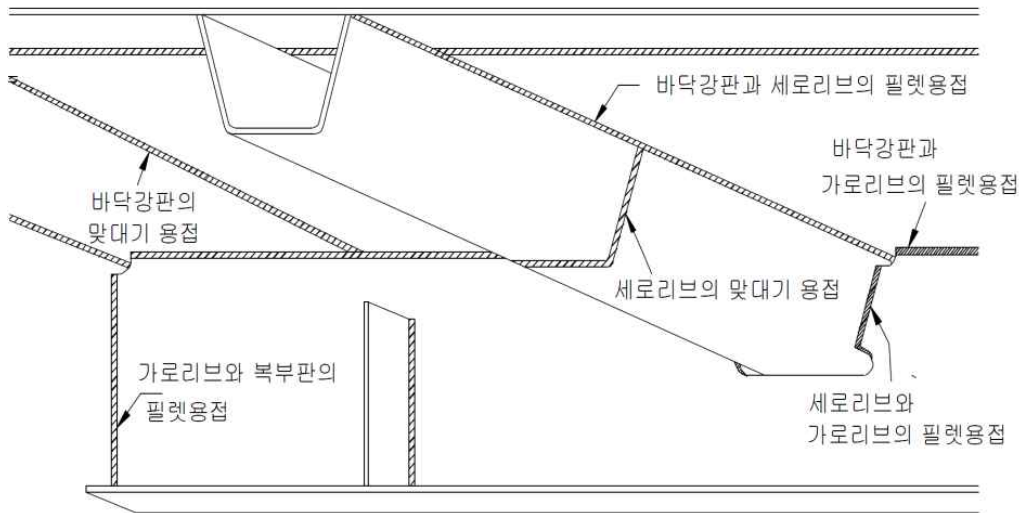
▷ 점검방법

- 도보접근이 불가능한 구간은 점검 장비를 이용하여 근접 점검한다.
- 박스거더 형식의 강바닥판은 박스내부 점검시 가벼운 사다리를 활용하여 근접 점검한다.
- 강바닥판은 강재의 연결 및 용접으로 구성되므로 강거더의 점검요령을 참고한다.

▷ 점검시 유의사항

- 강바닥판의 경우 교면포장 손상이 발견된 경우 해당부위의 강바닥판 하면에도 균열이나 파손 등의 손상이 발생할 수 있으므로 확인 점검한다.
- 피로균열의 경우 도장에 가려 발견하기 어려우므로 도장의 들뜸, 부풀음, 산화물부착 및 이상음 발생 등의 징후에 유의하여 점검한다.

- 균열이 미세할 경우 불결하게 문질러 지워지지 않도록 하고 점검 후 균열 상황을 재검토하기 위해 균열부위를 청결한 상태로 유지한다.
- 정밀한 조사가 필요하면 와이어 브러쉬(wire brush), 그라인딩(grinding) 등으로 도장제거 후 확대경 혹은 침투탐상시험에 의해 조사한다.



<강바닥판 용접부 점검 부위 및 점검사항>



a. 용접부 균열



b. 볼트손상



c. 용접교차부 균열

<강바닥판 주요 손상유형>

② 플레이트 I형 거더

▷ 점검방법

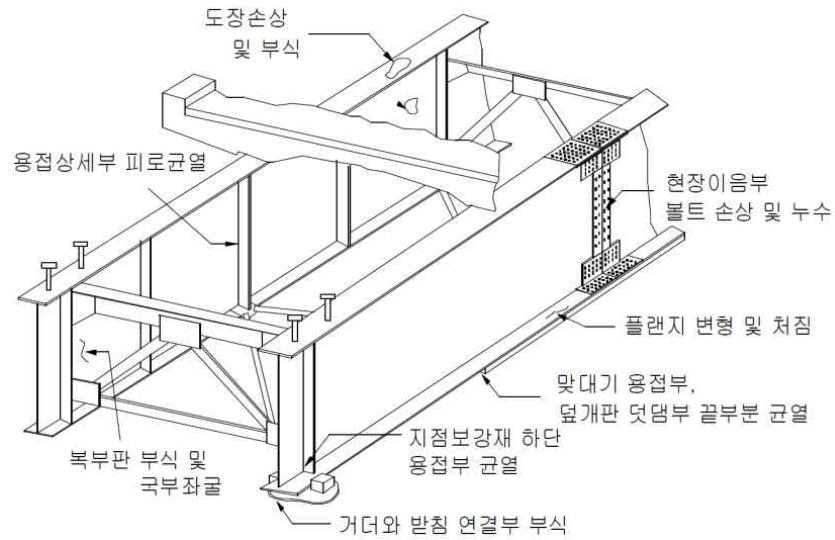
- 도보접근이 불가능한 구간은 점검 장비를 이용하여 근접 점검한다.
- 복부판의 국부좌굴이 의심스러운 경우는 복부에 수직으로 막대기를 밀착시킨 후 막대기와 복부판의 떨어진 거리를 측정하여 변형정도를 기록한다.
- 부식된 부분은 부식정도를 파악하기 위하여 브러쉬 등으로 표면을 긁어낸 후 단면결손 정도를 확인(받침부 : 복부판, 중앙부 : 플랜지)하고 단면결손이 심한 경우 초음파탐상에 의해 강재 두께를 측정한다.
- 게르버의 핀연결부와 같이 손상발견이 어려운 경우 초음파 탐상 등의 기법으로 건전 도를 확인한다.
- 강교의 균열은 눈에 잘 띄지 않으므로 거세트판 용접 끝부분이나 하중 집중점의 용접부 등 취약 부에는 분명히 균열이 있을 것으로 생각해야 발견할 수 있으며, 특히 용접부의 도장 부풀음, 쇠파우 부착, 이상음 발생 등의 징후가 있는 부분을 중점적으로 점검한다. 이때, 오염부는 브러쉬, 깨끗한 형검으로 닦고 점검을 실시한다.
- 하부플랜지의 두께 변화부(변단면부)에서는 테이퍼처리 유무와 용접부 표면결함을 육안 확인한다.

▷ 점검시 유의사항

- 균열은 경우에 따라 도장 표면에서 얇은 녹 흔적으로 나타나므로 주변 도장을 조심스럽게 제거한 후 확대경을 사용하여 면밀하게 점검하고 특히 균열이 미세할 경우 불결하게 문질러 지워지지 않도록 하여야 하며 점검 후에도 균열 상황을 재검토하기 위하여 균열부위는 청결한 상태를 유지해

야 한다.

- 균열은 밝은 날 낮 추운 날씨에 더 잘 보이며, 균열을 발견하면 이와 유사한 조건의 다른 부위 (교량의 전후좌우가 대부분 대칭임)에도 균열이 발생한 것으로 간주하고 점검에 임해야 함.



<플레이트 I 거더 주요점검 부위 및 점검사항>



a. 복부판 부식



b. 상부플랜지 부식



c. 거세트판 부식



d. 받침부 복부판부식



e. 거더 외측 부식



f. 신축이음 하단 거더 부식



g. 도장손상



h. 맞대기 용접부 용접불량



i. I형 거더 부식



j. 가로보 연결보강재 균열



k. 수직보강재 균열



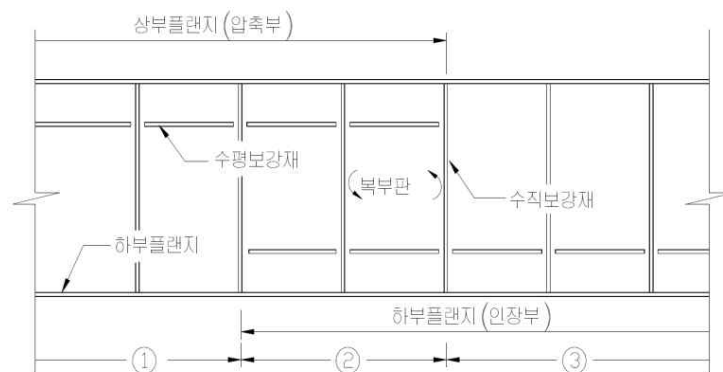
l. 거세트판 연결 복부판 균열

<플레이트 I 거더 주요 손상유형>

③ 강박스 거더

▷ 점검방법

- 도보접근이 불가능한 구간은 점검 장비를 이용하여 근접 점검한다.
- 복부판의 국부좌굴이 의심스러운 경우는 복부에 수직으로 막대기를 밀착시킨 후 막대기와 복부판의 떨어진 거리를 측정하여 변형정도를 기록한다.
- 부식된 부분은 부식정도를 파악하기 위하여 브러쉬 등으로 표면을 긁어낸 후 단면결손 정도를 확인(받침부 : 복부판, 중앙부 : 플랜지)하고 단면결손이 심한 경우 초음파탐상에 의해 강재 두께를 측정한다.
- 강교의 균열은 눈에 잘 띄지 않으므로 거세트판 용접 끝부분이나 하중 집중점의 용접부 등 취약부에는 분명히 균열이 있을 것으로 생각해야 발견할 수 있으며, 특히 용접부의 도장 부풀음, 쇳가루 부착, 이상음 발생 등의 징후가 있는 부분을 중점적으로 점검한다. 이때, 오염부는 브러쉬, 깨끗한 헝겊으로 닦고 점검을 실시한다.
- 박스내부 점검시 연속교의 경우 어느 부분까지 점검했는지 혹은 인장부위가 어느 부분인지 구분이 어려울 때, 복부에 붙어있는 수평보강재의 위치가 위에 있는지 혹은 아래·위에 동시에 있는지, 아래에만 있는지를 확인하여 자신의 위치를 알 수 있다. 왜냐하면 보강재는 좌굴방지용으로 압축측에 설치하기 때문이다. 예를 들어 ①구역은 수평보강재가 위에 있으므로 상부플랜지는 압축, 하부플랜지는 인장구역으로 정모멘트 구간임을 알 수 있다.



<강박스 거더 내부의 보강재 배치>

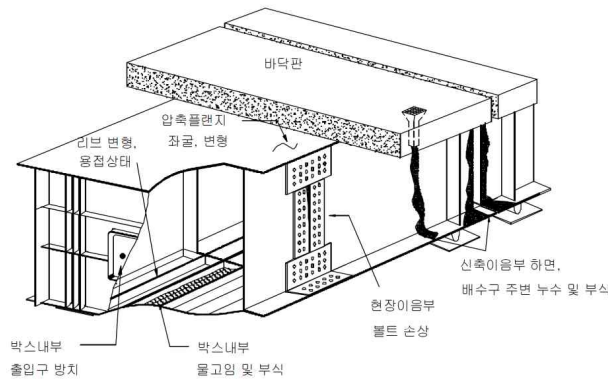
- 곡선교의 경우 다이아프램이 주부재이므로 다이아프램과 거더 연결부에 피로균열이 발생할 가능성이 높으므로 점검이 필요하다.
- 다이아프램 하부와 받침장치의 중심축과의 일치여부 및 받침장치의 앵커볼트 체결 여부 및 수직보강재와의 간섭여부를 확인하도록 한다.
- 고장력볼트 이음부의 볼트 Hole 확공 여부를 확인한다.

▷ 점검시 유의사항

- 균열은 경우에 따라 도장 표면에서 얇은 녹 흔적으로 나타나므로 주변 도장을 조심스럽게 제거한

후 확대경을 사용하여 면밀하게 점검하고 특히 균열이 미세할 경우 불결하게 문질러 지워지지 않도록 하여야 하며 점검 후에도 균열 상황을 재검 토하기위하여 균열부위는 청결한 상태를 유지하여야 한다.

- 균열은 밝은 날 낮 추운 날씨에 더 잘 보이며, 균열을 발견하면 이와 유사한 조건의 다른 부위(교량의 전후좌우가 대부분 대칭임)에도 균열이 발생한 것으로 간주하고 점검에 임해야 한다.
- 박스내부 출입구 잠금장치가 망가져 있는 경우 부랑인들이 거주하고 있는 경우가 있으므로 2인 이상이 1조가 되어 내부 점검을 실시한다.
- 박스내부에 환기부족으로 유해가스가 있을 수 있으므로 환기를 시킨 후 점검하고 인화성 물질을 휴대하지 않도록 하며 특히 흡연은 삼가하여야 한다.



<강박스 거더 주요점검 부위 및 점검사항>



a. 현장이음부 부식



b. 용접불량



c. 볼트누락



d. 박스 내부 물고임



e. 조류 배설물



f. 박스 충격 파손

<강박스 거더의 주요 손상유형>

④ 트러스

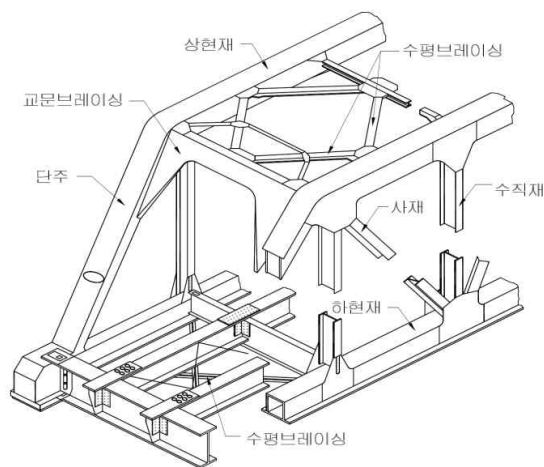
▷ 점검방법

- 도보접근이 불가능한 구간은 점검 장비를 이용하여 근접 점검한다.
- 교대 옆 혹은 교량에서 조금 떨어진 거리에서 상·하현재, 수직재, 사재의 전체적인 선형을 점검하며 중앙부 처짐은 점검로에서 하현재 정도로 눈높이를 낮추어 점검한다.
- 차량통과시 삐걱거리는 소리 등 이상음이 들리면 소음발생 부위를 추정하여 기록한다.
- 사재의 국부좌굴이 의심스러운 경우는 부재면에 막대기를 밀착시킨 후 막대기와 복부판의 떨어진 거리를 측정한다.

- 부식된 부분은 부식정도를 파악하기 위하여 브러쉬 등으로 표면을 긁어낸 후 단면결손 정도를 확인(받침부 : 사재, 중앙부 : 현재)하고 단면결손이 심한 경우 초음파 탐상에 의한 강재두께를 측정한다.
- 게르비교의 핀연결부와 같이 손상발견이 어려운 경우 초음파 탐상 등의 기법으로건 전도를 확인한다.
- 강교의 균열은 눈에 잘 띄지 않으므로 거세트판 용접 끝부분이나 하중 집중점의 용접부 등 취약부에는 분명히 균열이 있을 것으로 생각해야 발견할 수 있으며, 특히 용접부의 도장 부풀음, 쇳가루 부착, 이상음 발생 등의 징후가 있는 부분을 중점적으로 점검한다. 이때, 오염부는 브러쉬, 깨끗한 형검으로 닦고 점검을 실시한다.
- 상·하현재 및 복부재가 박스단면일 경우 내부의 부식 정도로 우려될 만한 수준이면 Hand-hole을 통하여 내시경 등 장비로 상세점검을 실시한다.

▷ 점검시 유의사항

- 눈에 띄지 정도의 처짐이나 충돌에 의한 손상으로 추가손상이 우려되거나 주행안전성에 지장을 초래할 경우 즉시 보고하여 대책을 수립한다.
- 고소작업차 등 접근장비에 의한 근접접근시 안전간판 설치 등 교통을 안전하게 유도 후 점검을 실시한다.



<트러스 부재분류 및 점검부위>



a. 받침부 부식



b. 사재 휨



c. 사재 변형



d. 거세트판 부식



e. 거세트판 균열



f. 상부 브레이싱 변형

<트러스교의 주요손상유형>

⑤ 강주탑

▷ 점검방법

- 주탑 내·외면 및 다이아프램 등은 변색 및 퇴색을 주의깊게 관찰하여야 한다.
- 연결부에 발생하기 쉬운 볼트의 파손, 누락, 풀림 등의 유무를 조사한다.
- 콘크리트 구조용 정착타기부 위에 강구조의 주탑을 올릴 경우 앵커프레임과 앵커볼트로 체결하고 앵커볼트에 프리스트레스를 도입하는데 이때 P.S Anchor의 볼트풀림, 균열 및 단면결손 등을 주기적으로 관찰하고, 점검용 망치로 두들겨 반발음으로 상태를 관측한다.
- 주탑 외면은 곤도라, 고소차 등을 이용해 접근한다.

▷ 점검시 유의사항

- 곤도라 사용시는 안전에 주의한다.
- 주탑외부 점검시에는 일몰 후나 농무, 강풍, 강우등 악천 후시에는 추락의 위험이 있으므로 주탑 외부 점검을 하지 않아야 하며, 반드시 안전벨트를 착용한다.
- 주탑 내부 출입문 주변으로 우수유입 여부를 관측하고 물고임이 발생하지 않도록 방지조치가 필요하다.



a. 주탑하부 볼트 부식



b. 게르버 핀연결부 부식

<강주탑 및 게르버 연결부의 주요 손상유형>

⑥ 강교의 피로취약부

▷ 취약부위의 진단 및 평가

- 점검자는 교량의 취약부가 어디에 있는지를 알아두어야 한다. 열화는 상판의 배수구, 이물질이 퇴적한 곳, 노출된 부위에서 많이 발생하는 반면, 균열은 응력이 집중되는 부위에 많이 발생하게 된다. 따라서, 손상될 가능성이 있는 취약부위의 위치 및 상세도를 정확히 이해하는 것이 진단에 도움이 된다.

▷ 피로균열의 발생징후

- 가장 두드러진 현상으로는 균열이 발생한 부위에 부식, 산화물 또는 분말가루가 나타난다. 이러한 산화물 밑으로는 균열이 발생할 수 있다.
- 흔하지는 않으나 두 부재간에 서로 다른 작은 처짐에 의해서도 균열이 발생한다. 두개의 부재가 서로 마찰함으로서 매우 작은 미진(Oxide Particles)이 나타나게 된다.
- 작은 균열 부근이 자주 움직이게 되면 잘 보이지 않는 미진(Oxide Particles)이 생기게 되는데 이러한 미진이 수분과 습도에 의하여 "녹이 흘러내리는 현상(Bleeding)" 으로 나타난다.

▷ 피로파괴의 발생과정

- 균열의 발생 : 일반적으로 응력이 집중되는 부위에서 생기기 쉬우며 초기징후로는 도막이 벗겨지고 미세균열 발생부위를 따라 녹물이 발생된다. 이러한 징후가 발견되는 경우점검자는 발생부위를 면밀히 관찰하고 필요시 비파괴검사를 수행하여 균열발생여부를 확인한다.
- 균열의 진전 : 일단 균열이 발생하면 반복하중으로 인해 부재의 단면을 가로질러 크게 진전되며 결국 부재가 붕괴할 정도로 위험한 크기에 도달된다.
- 파단 : 파단이란 진전된 균열이 확대되어 부재가 두 쪽으로 갈라지는 현상으로 여유도가 없는 붕괴유발부재의 경우 경간의 일부 또는 전체가 붕괴된다.

▷ 4. 피로균열부의 점검

- 현장조사를 하기 전에 도면을 검토하여 응력범주가 낮은 부위와 상세도를 선택하여 예상 균열부

를 미리 숙지하는 것이 좋다.

- 육안검사를 통하여 피로균열의 발생여부를 확인하고 의심나는 곳이 있을 경우에는 확대경이나 비파괴 시험을 하여 재확인 한다. 이때 부식 또는 균열로 인하여 페인트에 변색이 되었는가를 확인 한다.
- 균열의 방향과 의심나는 곳을 발견한 후에는 다른 비파괴검사를 수행하여 균열의 정도를 분석 평가하여야 하며 동시에 이와 비슷한 상세도를 갖는 부위도 면밀히 점검하여야 한다.
- 피로균열에 대한 비파괴 검사는 다음과 같은 여러 가지 방법이 있다.

액체탐상
Dye Penetrant Test
(DT)

자분탐상
Magnetic Test
(MT)

초음파검사
Ultrasonic Test
(UT)

방사선투과검사
Radiographic Test
(RT)

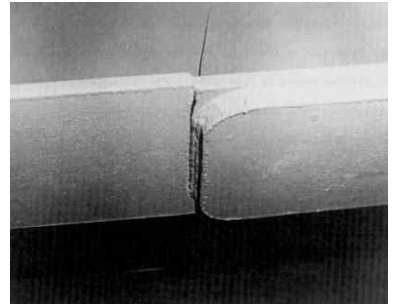
- 특히 균열이 작을 경우에는 균열을 불결하게 문질러 지워지는 일이 없도록 하여야한다. 페인트를 제거하기 전후에 그리스를 제거하는 화학제를 사용하면 균열을 발견하는데 도움이 된다.



a. 지점보강재 하단



b. 맞대기 용접부(하부플랜지)



c. 덮개판 용접부 끝부분



d. 플랜지와 수직보강재 용접부



e. 거셋판 용접부



f. 수직보강재 맞대기 용접부

<강교의 피로균열 사례>

(나) 강 가로보와 세로보

점 검 부 위	손 상 종 류
▷ 피로강도등급 낮은 용접상세부(D, E급)	○ 피로균열
▷ 2차부재	○ 가로보, 세로보, 브라켓 및 브레이싱 변형 ○ 하중집중점, 가로보와 세로부 교차부 균열 ○ 거셋판 용접부 끝부분 균열
▷ 보수부위	○ 용접부 및 용접부 주변 균열

▷ 점검방법

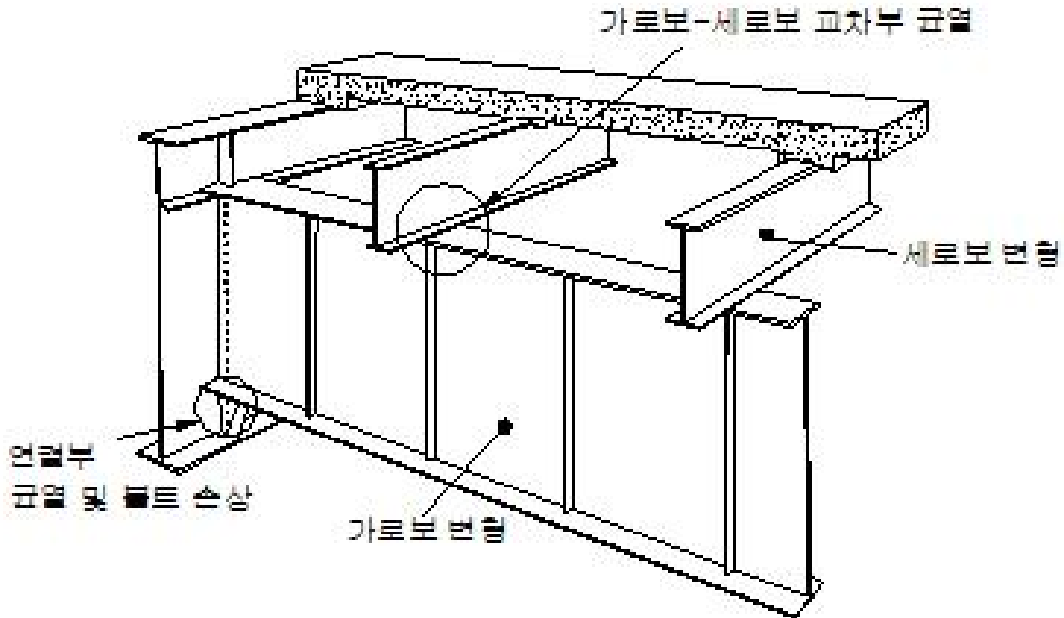
- 강가로보와 강세로보는 2차부재로서 강재의 연결 및 용접에 의해 부재를 형성하므로 기본적으로 강거더의 점검요령을 따른다.
- 세로보는 상부하중을 가로보에 전달하므로 가로보와 세로보의 연결부에 균열 등의 손상이 발생하기 쉽다. 접합부의 국부적인 손상으로 인하여 하중전달에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 유의하

여 점검한다.

- 가로보와 거더의 연결부는 용접 또는 볼트 연결이므로 볼트 풀림 및 용접부 균열을 점검한다. 또한 연결부는 피로에 대한 취약부임을 생각하여 점검을 실시한다.
- 가로보의 처짐은 거더와의 연결부에서 2차응력을 발생시킬 수 있으므로 과도한 처짐이 발생한 경우는 이를 점검하고 기록한다.

▷ 점검시 유의사항

- 강교량의 거더를 연결하는 2차부재의 구성은 세로보와 가로보로 연결된 경우, 가로보로 연결된 경우, 브레이싱을 사용하는 경우로 나눌 수 있으므로 구성부재에 유의하여 점검을 실시한다.
- 강교량의 2차부재들이 준공시 설계변경이나 부재 간섭 등으로 준공도면과 상이하게 설치되었는지를 확인한다.



<강가로보 , 강세로보의 점검부위 및 점검사항>



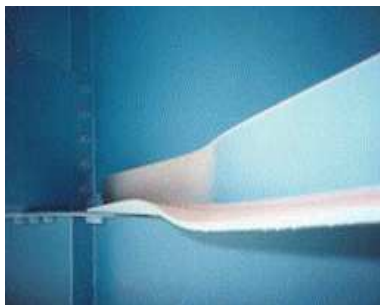
a. 거셋판 용접부 균열



b. 거더-가로보 연결부 균열



c. 연결 절취부 균열



d. 브레이싱 변형



e. 가로보 연결부 들뜸



f. 수평브레이싱 부식

<강가로보, 강세로보의 주요손상유형>

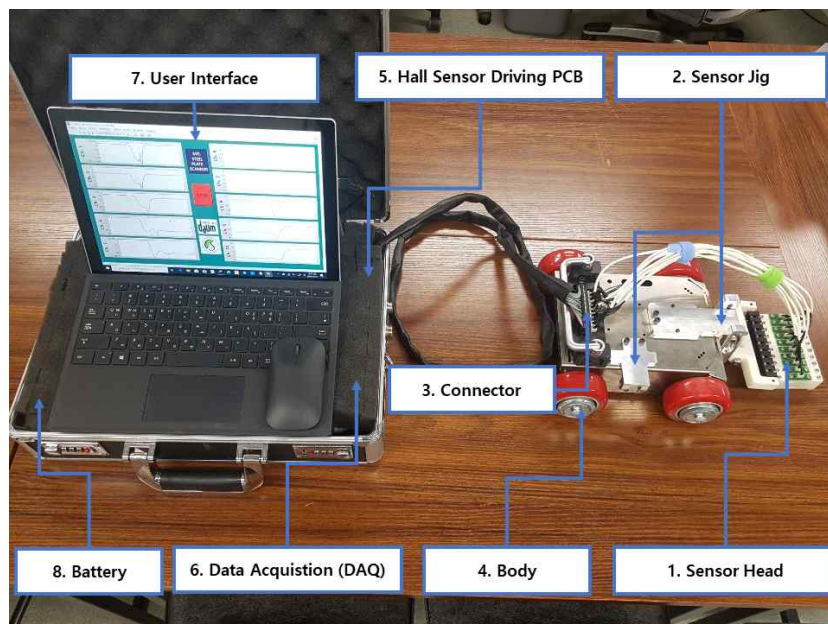
나. H/W 매뉴얼

(1) H/W 구성

- 마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템은 계측부와 제어부로 구분된다. 계측부는 자석 (Magnetic)과 홀센서(Hall Sensor)로 구성된 센서헤드(Sensor Head)와 이를 고정하는 센서지그 (Sensor Jig), 제어부와 연결되는 커넥터(Connector), 계측몸통(Body)으로 구성된다.
- 제어부는 홀센서구동회로(Hall Sensor Driving PCB), 데이터수집장치(DAQ), User Interface(UI), Battery로 구성된다.

<마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 구성>

계측부	제어부
센서헤드 (Sensor Head)	홀센서구동회로(Hall Sensor Driving PCB)
센서지그 (Sensor Jig)	데이터수집장치(DAQ)
커넥터 (Connector)	User Interface(UI)
계측몸통 (Body)	Battery

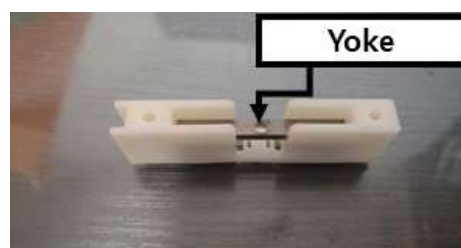
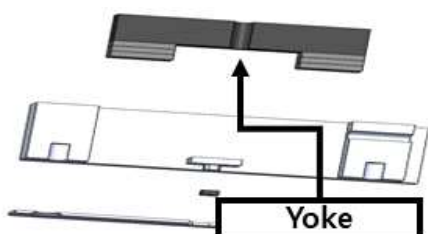


<마그네틱 기반 Portable 강구조물 손상검출 시스템 구성>

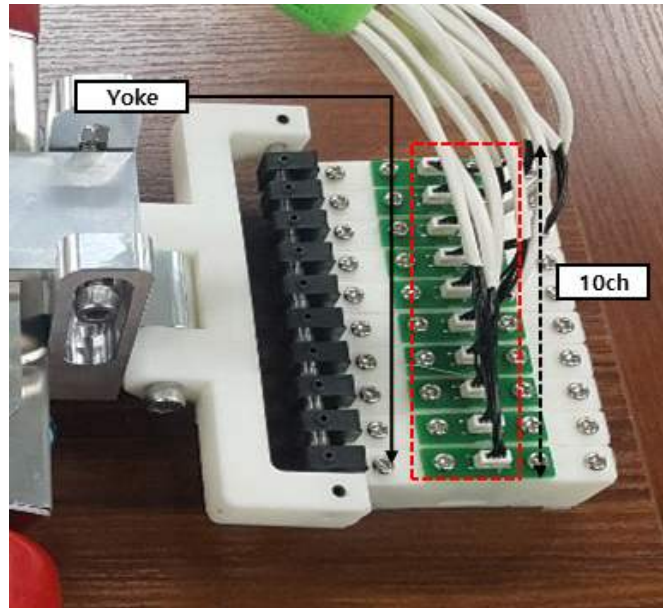
(2) 계측부

(가) 센서헤드(Sensor Head)

- 센서헤드(Sensor Head)는 영구자석을 이용한 요크(Yoke)와 홀센서(Hall sensor)로 구성되며, 요크가 강구조물 표면에 자기장을 형성하면 센서헤드 중앙에 위치한 홀센서가 손상부의 누설자속(MFL)을 측정하는 방식이다.
- 요크는 네오디뮴 영구자석(neodymium magnet)과 이를 연결하는 탄소강(Carbon steel)을 이용하여 말굽자석형태의 자기장이 형성된다.

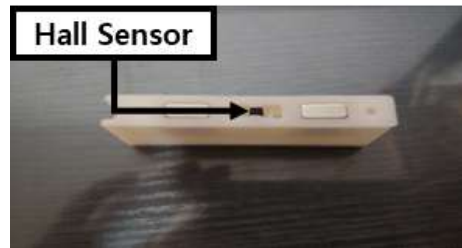
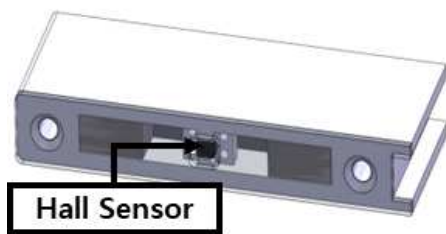


<요크(Yoke)>



<센서헤드의 요크>

- 홀센서는 자속의 크기 및 그 변화를 측정하는 센서로 정전류(constant current), 정전압(constant voltage) 구동이 가능한 HW300A를 사용하여 정전류 구동 시 최대 허용 전류는 20mA, 입/출력 임피던스는 550 Ω이다.



<홀센서 (Hall Sensor)>

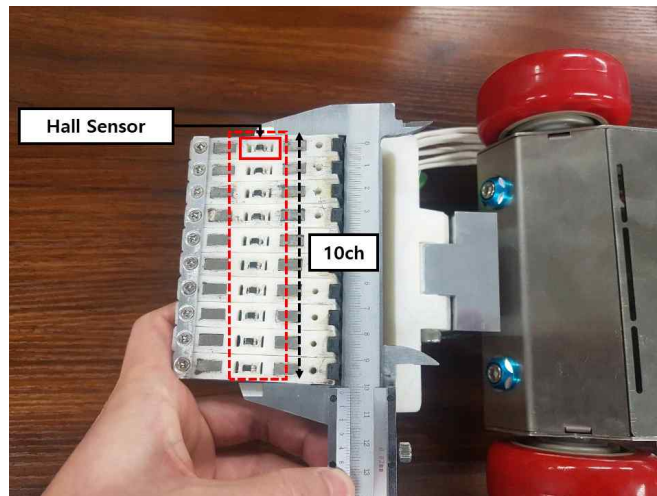
<홀센서 HW300A의 전기적 허용 절대치>

Item	Symbol	Conditions	Limit	Unit
Max. Input Current	Ic	Const. Current Drive	20	mA
Operating Temp. Range	Topr.	-	-40 to +110	° C
Storage Temp. Range	Tstg.	-	-40 to +125	° C

<홀센서 HW300A의 전기적 상세 사양>

Item	Symbol	Conditions	Min	Typ.	Max.	Unit
Output Hall Voltage	VH	Const. Voltage Drive B = 50mT, Vc = 1V	122		320	mV
Input Resistance	Rin.	B = 0mT, Ic = 0.1mA	240	° C		Ω
Output Resistance	Rout	B = 0mT, Ic = 0.1mA	240	° C		Ω
Offset Voltage	VOS.	B = 0mT, Vc = 1V	-7		+7	mV
Temp. Coefficient of VH	α Vin.	B = 50mT, Ic = 5mA		-1.8		%/° C
Temp. Coefficient of Rin	α Rin.	B = 0mT, Ic = 0.1mA		-1.8		%/° C
Dielectric Strength		100V D.C	1.0			MΩ

- 센서헤드는 10ch의 홀센서로 구성되어 진행방향에 대하여 10cm의 범위 내에서 진단이 가능하다.



<10ch Hall Sensor>

(나) 센서지그(Sensor Jig)

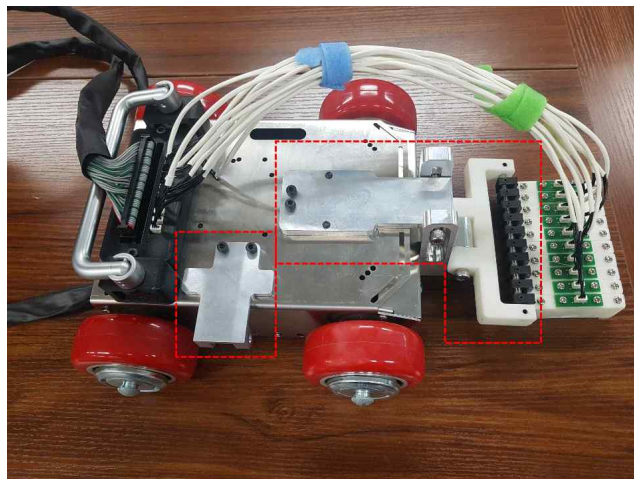
- 센서지그(Sensor Jig)는 센서헤드와 계측몸통(Body)을 고정하는 역할로 평판 및 맞대기용접, 필렛용접의 손상검출이 가능하도록 지그를 개발하였다. 지그는 알루미늄으로 개발하여 기존 3D프린터보다 강도가 높고, 일반적인 강재보다 무게가 가볍다.



<평판 및 맞대기용접 센서지그>



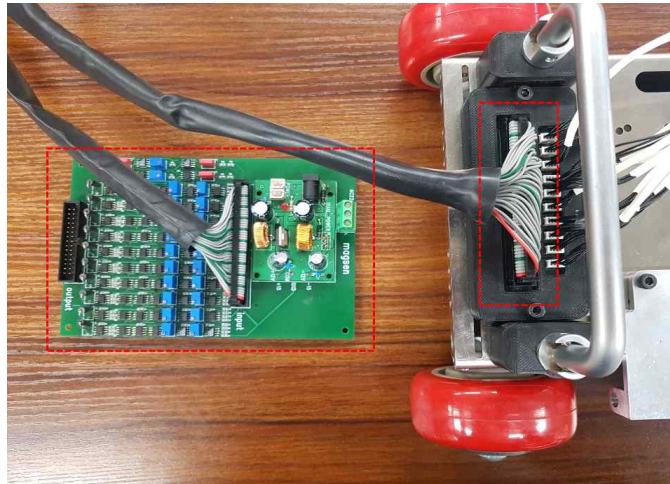
<필렛용접 센서지그>



<센서지그 적용 위치>

(다) 커넥터(Connector)

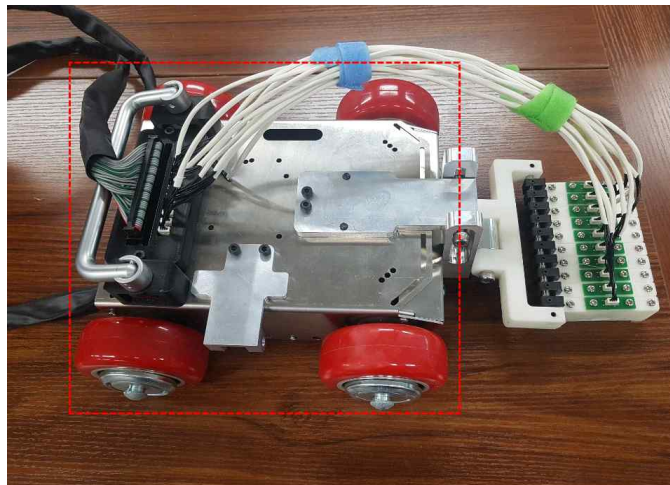
- 커넥터(Connector)는 계측부의 PCB와 제어부의 홀센서구동회로(Hall Sensor Driving PCB)를 연결하는 역할로 약 1m의 케이블을 사용하여 계측부의 구동이 편리하도록 하였다.



<홀센서구동회로(좌)와 커넥터(우)>

(라) 계측몸통(Body)

- 계측몸통(Body)은 센서헤드, 센서지그, 커넥터가 부착되어 계측부를 형성하도록 하는 최소구성으로 손상검출을 용이하게 할 수 있도록 하는 바퀴와 손잡이를 부착하였다.

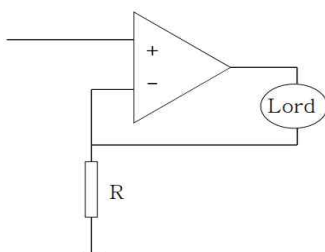


<계측몸통>

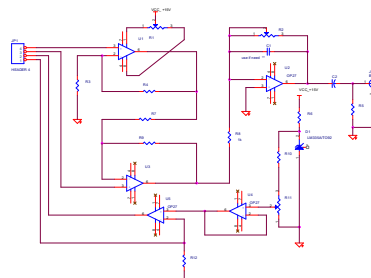
(3) 처리부

(가) 홀센서구동회로(Hall Sensor Driving PCB)

- 홀센서구동회로는 고 임피던스의 홀센서 출력 전압을 위하여 두 개의 연산증폭기(Operation Amplifier)를 활용한 계측증폭회로로 구성된다. 정전류(Constant current)의 방법으로 센서가 구동하며 계측증폭기의 최종 출력 신호는 Gain 값 조절과 LPF(Low Pass Filter)를 거쳐 측정된다.



<연산증폭기(Operation Amplifier)>



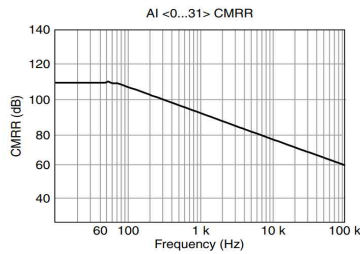
<홀센서구동회로(Schematic)>



<홀센서구동회로(H/W)>

(나) 데이터수집장치(DAQ)

- 홀센서로부터 출력된 전압 데이터를 수집하기 위한 데이터수집장치로 National Instrument사의 NI 9205를 사용하였다. 동작 온도는 -40°C 에서 70°C 이며 16개의 차동/32개의 단일 종단형 채널로부터 데이터 수집이 가능하다.



<공통 모드 제거비(CMRR;
Common-Mode Rejection Ratio)>



<데이터 수집장치(DAQ)>

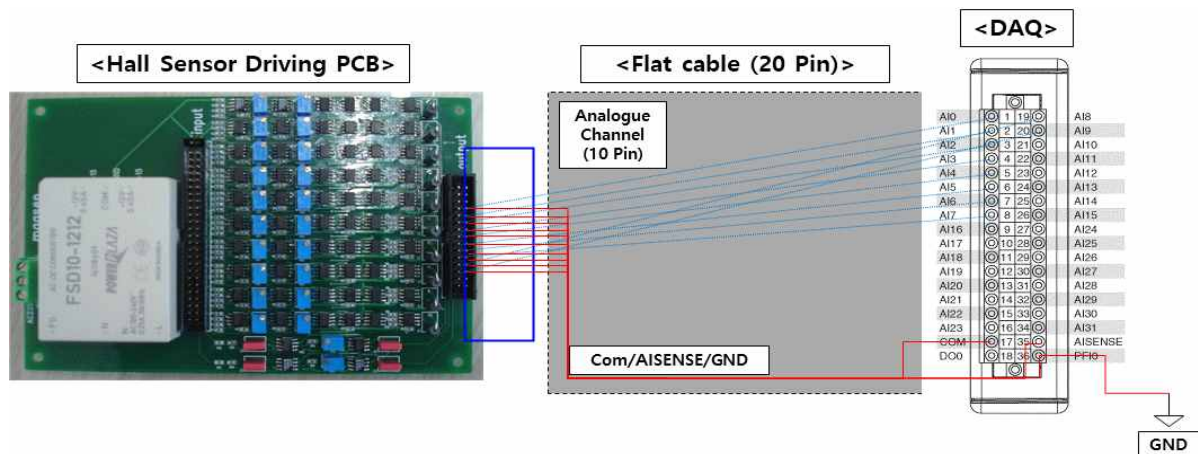


<플랫케이블(20ch)>

<데이터수집장치 NI 9205의 상세 사양>

Item	
Numner of channels	16 differential/32 Single-ended channels
Input Voltage(Max)	$\pm 30\text{ V DC}$
ADC resolution	16 bits
Input coupling	DC
Nominal input ranges	$\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 1\text{ V}$, $\pm 0.2\text{ V}$
Maximum working voltage for analog inputs	Each channel must remain within $\pm 10.4\text{ V}$ of COM
Operating temperature (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)	-40°C to 70°C
Input impedance (AI-to-COM)	
Powered on	$>10\text{ G}\Omega$ in parallel with 100 pF
Powered off/overload	$4.7\text{ k}\Omega$ minimum
Input bias current	$\pm 100\text{ pA}$

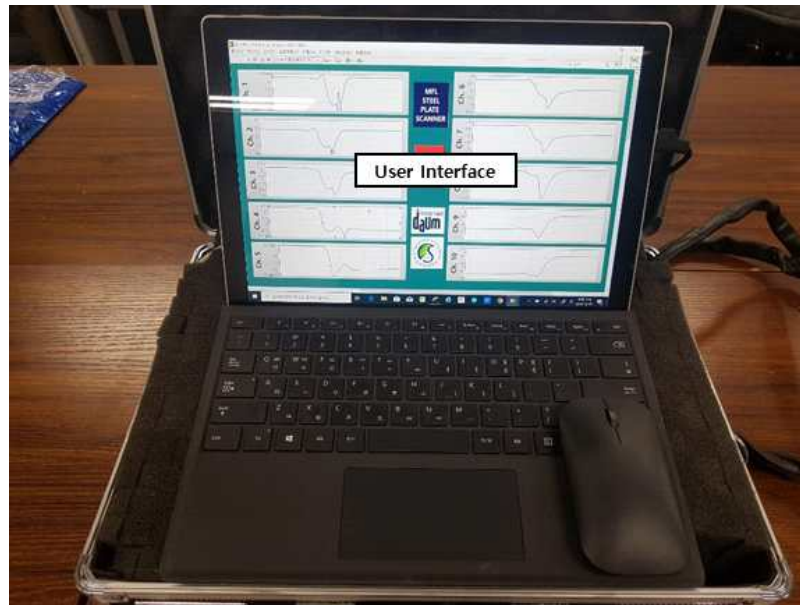
- 홀센서구동회로로부터 출력된 10채널의 아날로그 전압데이터를 수집받는 회로는 다음과 같다.



<홀센서구동회로 - 데이터수집장치 연결 구성>

(다) User Interface(UI)

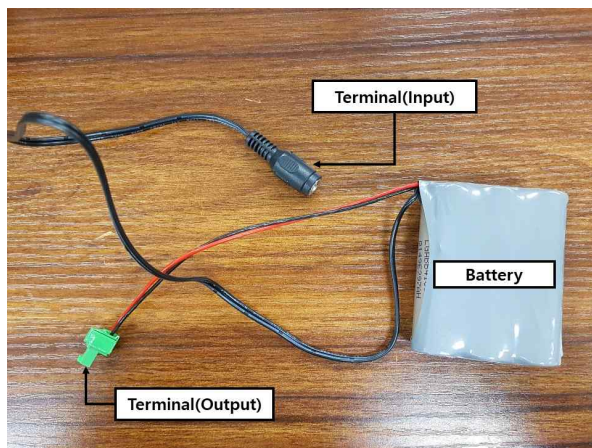
- 모니터에 표시되는 User Interface(UI)의 경우 Labview 기반으로 제작되었으며, 이를 이용하여 장비 설정 및 구동하고 계측된 데이터를 실시간으로 확인할 수 있다.



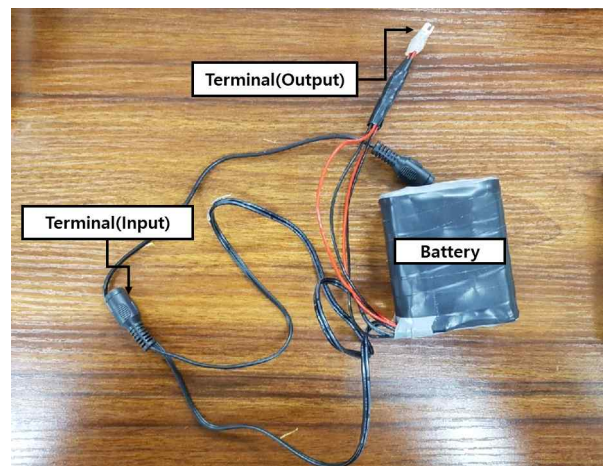
<User Interface (UI)>

(라) Battery

- 데이터 수집장치인 NI 9205의 정격구동전압의 범위는 $\pm 30\text{ V DC}$ 로써 발열에 대한 내구성과 원활한 전원공급을 위하여 12 V DC 배터리를 인가한다. 홀센서구동회로 내 연산증폭기의 원활한 동작을 위하여 $+12\text{ V/DC}$ 와 -12 V/DC 의 양전압 배터리를 인가한다.



<데이터 수집 장치 (DAQ) 배터리>

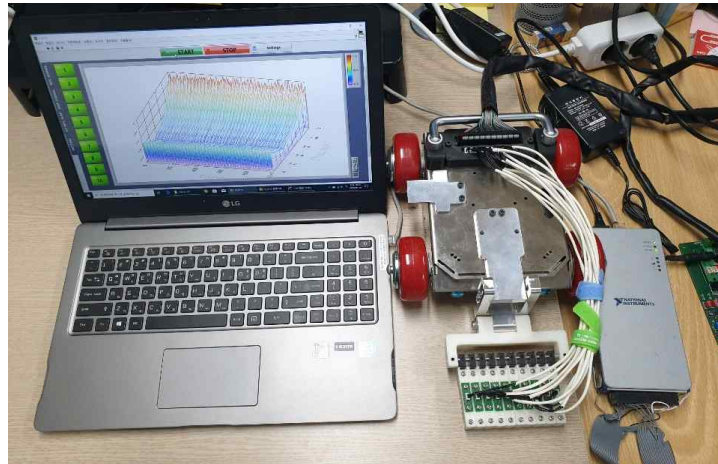


<홀센서구동회로 (PCB) 배터리>

나. S/W 매뉴얼

(1) 강구조물 점검용 S/W 개요

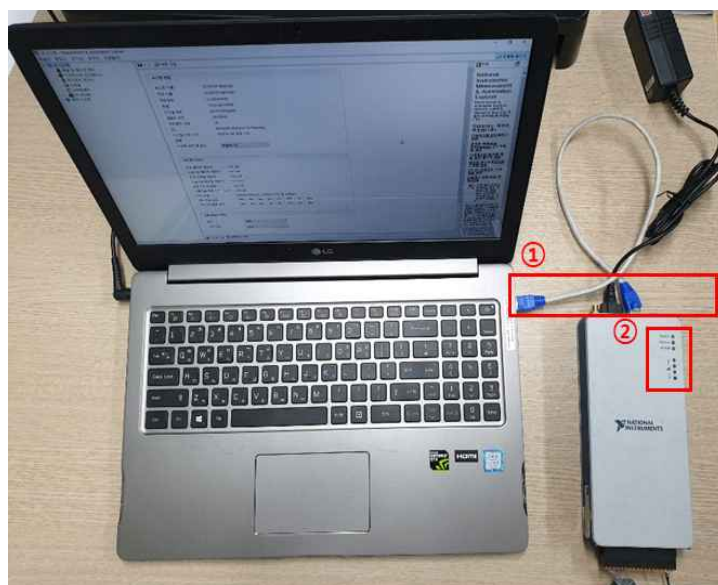
- 강교량 점검 시스템을 시제품화하기 위해서는 사용자가 최소한의 조작으로 원하는 강재의 진단을 수행하고, 그로부터 취득된 필요한 정보를 직관적으로 확인할 수 있는 그래픽 기반의 User Interface(UI)를 필요로 한다.
- 이에 복잡한 진단 및 분석과정보다는 점검자에게 필요한 정보만을 효과적으로 전달 가능한, 사용자 친화적 관리자 모니터링 UI를 개발하고자 하였고, ‘강교량 점검자의 실시간 마그네틱 수집 신호 확인을 위한 모니터링 프로그램’ 제작하였다.
- 제작된 점검용 UI는 LabView 기반으로 개발되었으며, 마그네틱 센싱 시스템의 온/오프 제어와 파라미터 설정이 가능 하도록 개발하였으며, 10채널에서 동시 수집되는 마그네틱 신호 데이터의 실시간 모니터링 및 신호 후처리를 위한 저장 기능을 탑재하였다.
- 이와 함께 손상 감지 시 채널별 인디케이터의 점멸 및 소리 알람을 통해 점검자가 실시간으로 손상을 인지할 수 있도록 제작하였다.
- 점검용 UI는 기능별 탭으로 구분되었으며 ‘채널별 누설자속신호 디스플레이’, ‘채널별 자속 차분 값 디스플레이’와 ‘3D 시각화 MFL 신호 디스플레이’, 그리고 ‘진단용 UI 파라미터 세팅’의 총 4개의 탭으로 구성되었다.



(2) 강구조물 점검용 S/W 환경 설정

(가) S/W 구동을 위한 DAQ & Controller 연결

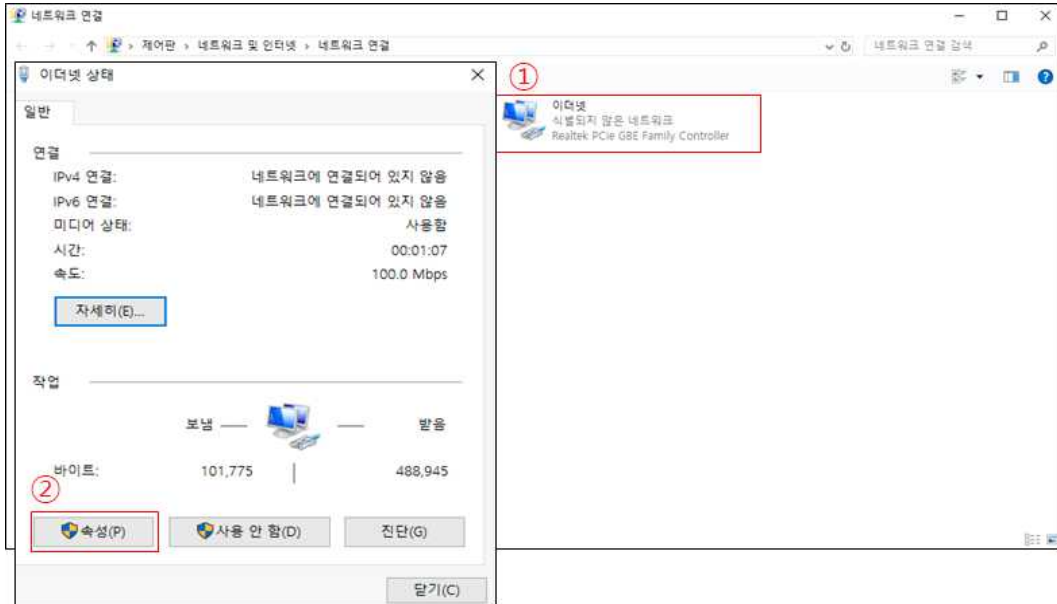
- 개발된 강구조물 MFL 진단 시스템은 제어 및 신호 수집을 위해 LAN 연결을 이용한 Ethernet 통신을 이용하므로 컨트롤러의 역할을 하는 PC의 Network를 아래와 같이 연결 및 설정 해주어야 한다.



DAQ & Controller 연결

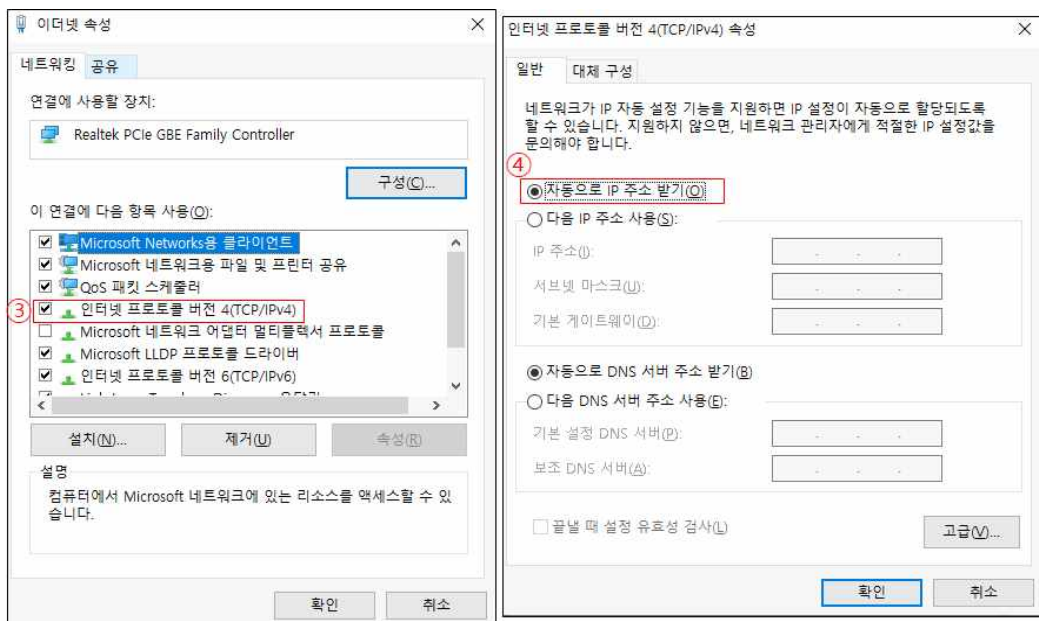
- ① Controller 와 NI cDAQ를 이더넷 케이블로 위 그림과 같이 서로 연결한다.
- ② ‘POWER’ , ‘STATUS’ , ‘ACTIVE’ 에 푸른색 빛이 들어오면 모든 연결이 완료되었다는 표시이니 다음 단계로 넘어가면 된다.

(나) S/W 구동을 위한 통신 환경 설정



<네트워크 연결 설정창>

- ① [제어판] -> [네트워크 및 인터넷] -> [네트워크 연결] 설정창에서 이더넷을 더블클릭 한다.
- ② 이더넷 상태 설정창에서 속성 버튼을 눌러 속성창을 띄운다.

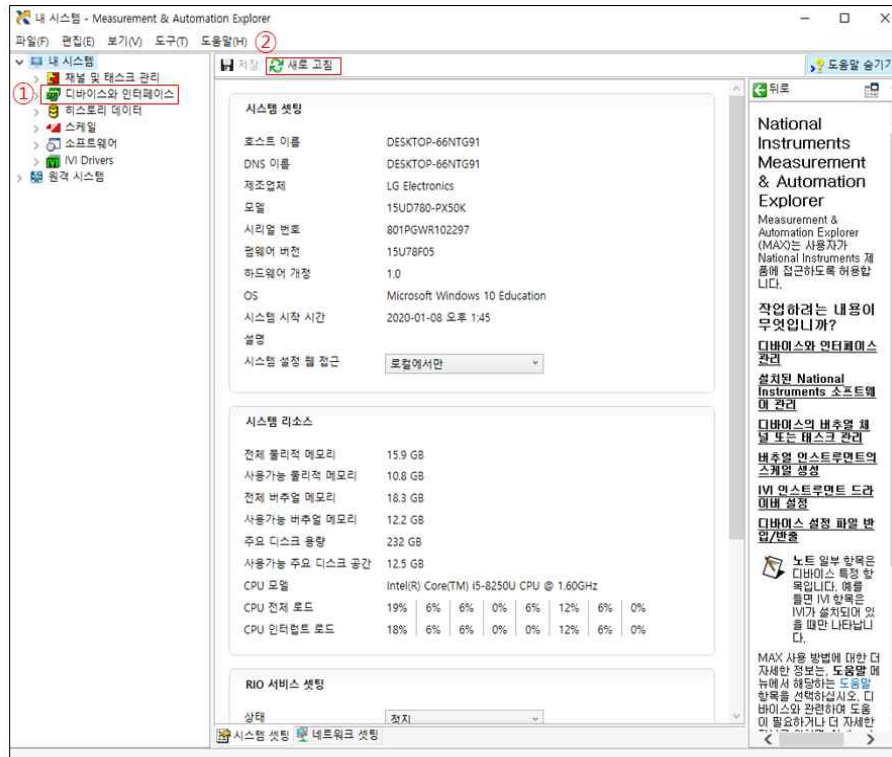


<네트워크 IP 설정창>

- ③ 네트워크 설정창을 열어 ‘인터넷 프로토콜버전 4(TCP/IPv4)’ 를 선택하고 속성 버튼을 눌러 속성 창을 세팅한다.
- ④ 속성창에서 ‘자동으로 IP 주소 받기’ 설정 후 확인 버튼을 누른다.

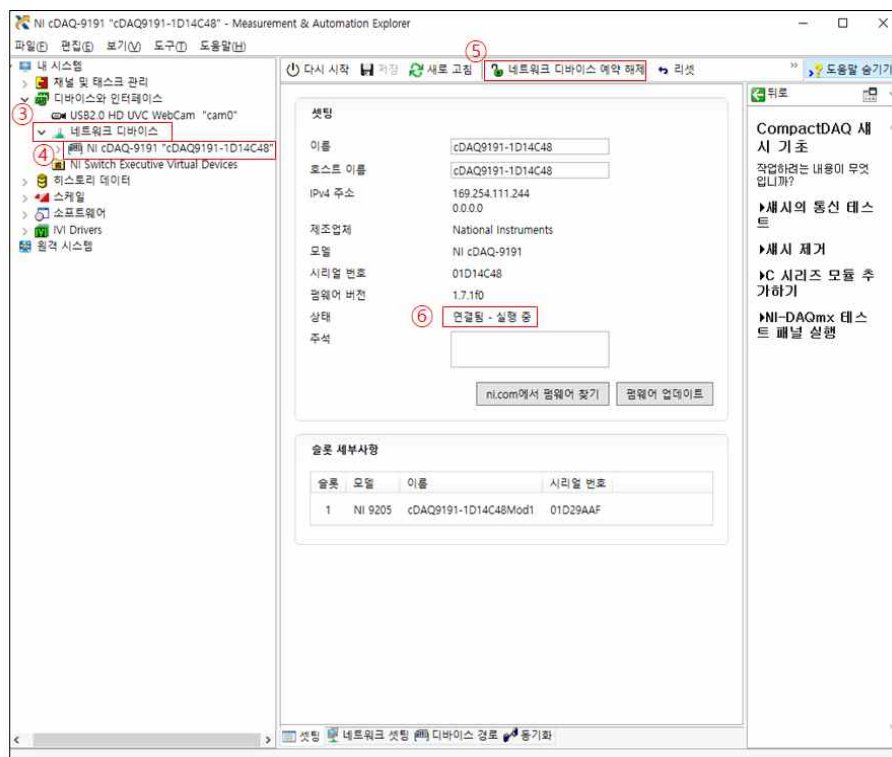
- ⑤ 본 Tool이 포함되어 있는 폴더를 열어  아이콘을 더블클릭하여 파일을 실행한다.

(다) S/W 구동을 위한 NI MAX 설정



<NI MAX Measurement & Automation Explorer>

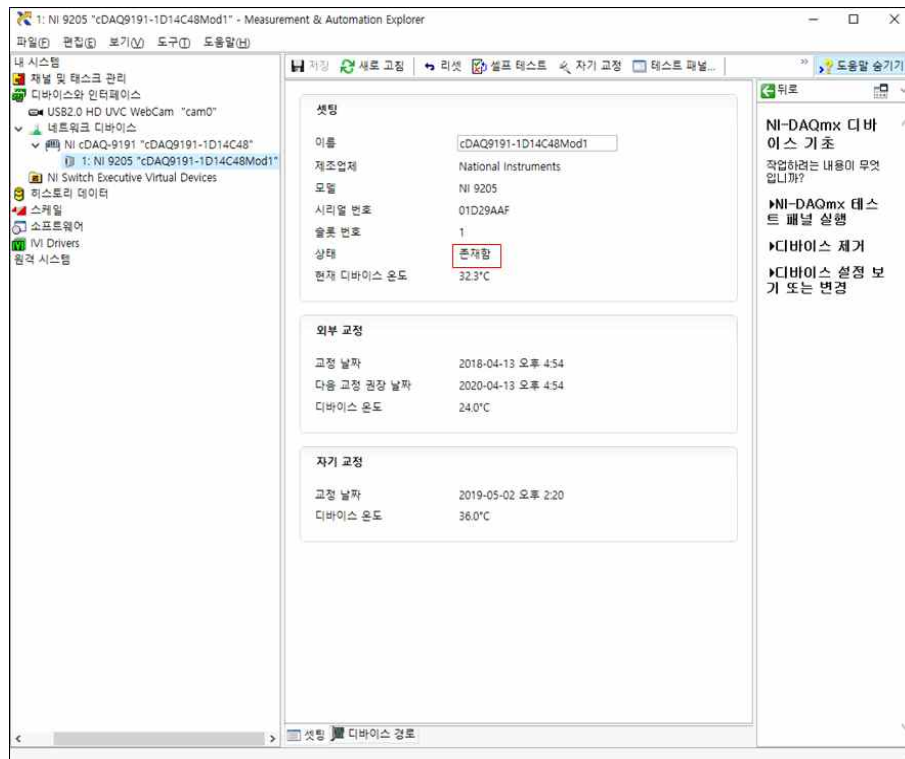
- ① NI MAX를 실행하면 위의 창이 뜨는데, ‘디바이스와 인터페이스’ 옆의 ‘>’를 클릭한다.
- ② 만약 시스템 셋팅 창에 아무것도 보이지 않는다면, 새로 고침을 누른다.



<NI 네트워크 디바이스 연결 확인>

- ③ ‘디바이스와 인터페이스’를 누르고 ‘네트워크 디바이스’ 옆 ‘>’을 누른다.
- ④ 네트워크 디바이스 아래에 현재 연결되어 있는 NI cDAQ 장비 이름이 뜨는데, 해당 버튼을 누른다.

- ⑤ 그러면 위 그림과 같은 창이 뜨는데, 셋팅창에 상태가 ‘연결됨 - 실행 중’ 이라는 말이 떠있는지 확인한다.
- ⑥ 해당 칸에 ‘연결 끊김’ 이 떠있으면 네트워크 연결이 안 된 것이니 ‘네트워크 디바이스 예약 해제’ 를 클릭하고, 다시 한 번 더 눌러 네트워크 디바이스를 예약한다.
- ⑦ 그래도 연결이 안 되면 (1) Network Setting을 처음부터 다시 해보거나 이더넷 연결을 끊었다가 다시 연결해본다.
- ⑧ 연결이 되었다면 ④번 DAQ 장비 명 옆 ‘>’ 를 클릭한다.



<NI 네트워크 디바이스 연결 확인>

- ⑨ 해당 버튼을 클릭하면 나오는 아이콘을 클릭하면 위와 같은 창이 뜬다.
- ⑩ 위의 창안에 ‘상태’ 에 ‘존재함’ 이 떠있다면 모든 연결이 완료 되었으니 본 Tool을 실행하면 된다.

(3) 강구조물 점검용 S/W 구성

(가) 강구조물 점검용 S/W의 탭 구성

- 점검용 UI는 기능별 탭으로 구분되었으며 ‘채널별 누설자속신호 디스플레이’, ‘채널별 자속 차분 값 디스플레이’와 ‘3D 시각화 MFL 신호 디스플레이’, 그리고 ‘진단용 UI 파라미터 세팅’의 총 4개의 탭으로 구성되었다.

① 채널별 누설자속(MFL)신호 디스플레이 탭 구성

- 아래 그림에 UI의 첫 번째 탭인 ‘채널별 누설자속신호 디스플레이’ 탭을 나타내었다.



<채널별 누설자속신호 디스플레이 탭 화면>

- 진단을 시작하는 ‘Start’ 버튼 및 진단을 종료하는 ‘Stop’ 버튼을 화면 상단에 배치하였고, 그 옆으로 세팅을 위한 ‘Setting’ 버튼을 두었다. 화면에는 각 10개 채널의 자속신호를 동시에 확인할 수 있도록 채널별 자속 그래프를 배열하였다.
- 좌측에 1~5번, 우측에 6~10번 채널의 그래프를 배열하였고, 중앙부에 손상 감지 시 빨간색으로 점멸하는 채널별 인디케이터를 배치하였다.

② 채널별 자속 차분 값 디스플레이 탭 구성

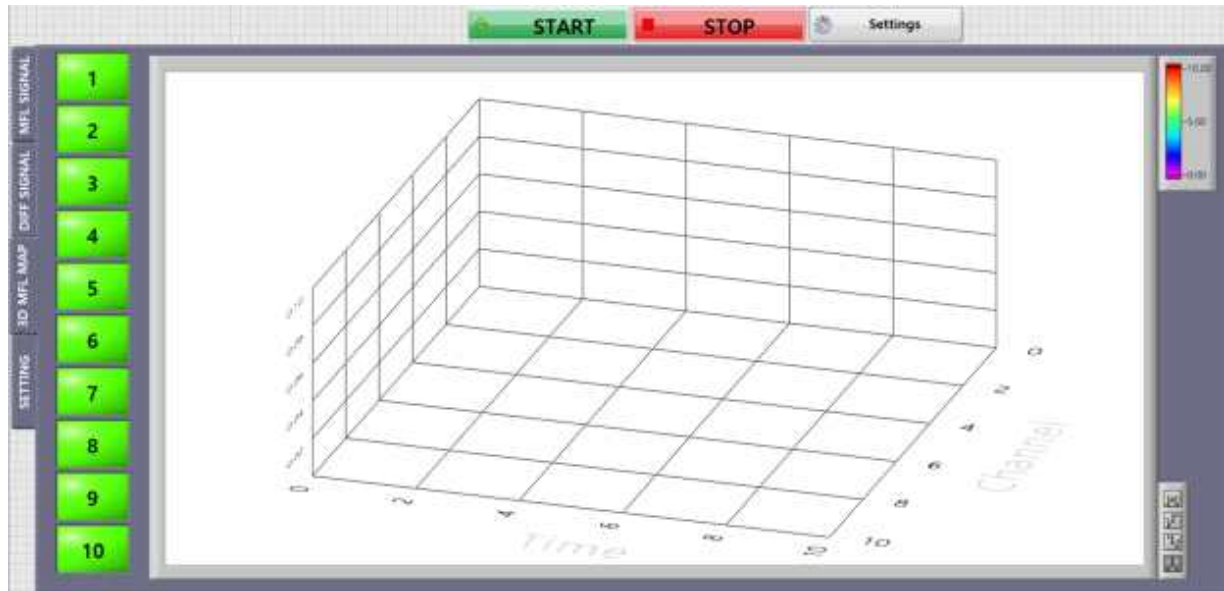
- 각 채널별 자속신호를 이용한 점검 시, 자속의 형태 및 크기를 파악하기에는 용이 하지만, 작은 누설자속의 판단 시 노이즈에 의해 손상의 유무 인지가 어려울 수 있다.
- 이에 직관적인 손상의 유무 판단의 편의성을 높이기 위해, 누설자속신호 픽의 순간변화량이 큰 특성을 이용하여 자속신호의 차분 값을 구하였고, 이를 이용하여 ‘채널별 자속 차분 값 디스플레이 탭’을 구성하였다.
- ‘채널별 자속 차분 값 디스플레이 탭’은 ‘채널별 누설자속 신호 탭’과 유사하게 제작되었다. 좌우로 채널별 자속 차분 값 실시간 그래프가 배열되었고, 중심부엔 손상 인디케이터가 배치되었다.



<채널별 자속 차분 값 디스플레이 탭 화면>

③ 3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭 구성

- 2D 그래프에서는 파악이 어려운 손상의 전반적인 위치 및 형상을 판단할 수 있도록 3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭을 구성하였다.
- 이에 10개의 센싱채널로 이루어진 센서헤드의 특성을 이용, 10개 채널의 신호를 3D평면에 배열하여 자속분포를 3차원으로 시각화 하였다.
- 3D 그래프의 X축은 센싱채널 번호, Y축은 샘플번호(Time)로 구성하였고, Z축은 신호의 크기를 나타내었다. 그래프의 신호는 손상 유무의 판단이 용이하도록 양수화 된 각 채널의 차분 값을 이용하였고, 신호의 크기별로 컬러맵을 적용하여 높은 신호 발생 시 손상부가 부각되어 보이도록 시각화한다.



<3D 시각화 MFL 신호 디스플레이 탭 화면>

④ 진단용 UI 파라미터 세팅 탭 구성

- 본 진단용 UI의 파라미터 설정을 위한 'Setting' 탭을 아래와 같이 구성하였다.

GAIN	Channel	OFFSET
1.00	Channel 1	0.00
1.00	Channel 2	0.00
1.00	Channel 3	0.00
1.00	Channel 4	0.00
1.00	Channel 5	0.00
1.00	Channel 6	0.00
1.00	Channel 7	0.00
1.00	Channel 8	0.00
1.00	Channel 9	0.00
1.00	Channel 10	0.00

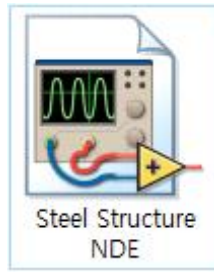
<진단용 UI 파라미터 세팅 탭 화면>

- 진단용 UI의 세팅을 위해, 각 센싱채널의 게인(Gain) 값 설정 컨트롤러를 배치하였고, 이와 함께 채널별 오프셋(Offset) 값을 변경/설정할 수 있도록 하였다.
- 이와 함께 원자속 및 차분값 수집신호의 저장 경로 및 파일명을 지정할 수 있도록 세팅 컨트롤러를 배치하였다.

(4) 강구조물 점검용 S/W 구동 및 작동 방법

(가) 마그네틱 신호 수집을 위한 점검용 S/W 실행 및 설정

① 마그네틱 신호 수집을 위한 점검용 S/W 실행



< 'Steel Structure NDE.vi' 파일 >

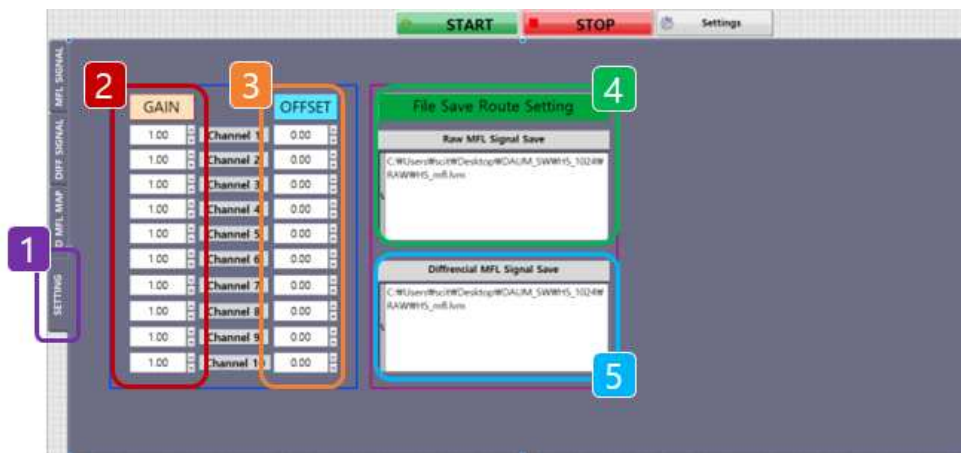
- 'Steel Structure NDE.vi' 파일을 더블 클릭하면, 기반 프로그램인 LabVIEW의 구동과 함께 마그네틱 신호 수집을 위한 점검용 S/W가 실행된다.



<점검용 S/W 실행 시 LabView 구동 화면>

② 마그네틱 신호 수집을 위한 점검용 S/W 파라미터 설정

- 마그네틱 신호의 수집에 앞서 강구조물 점검용 S/W의 'SETTING' 탭 이용을 통해, 필요에 따라 'GAIN', 'OFFSET' 및 '파일저장경로/파일명'의 파라미터 설정이 가능하다.



<강구조물 점검용 S/W 파라미터 설정 방법>

1 좌측의 'SETTING' 을 클릭하여 SETTING 탭으로 이동

2 각 센싱채널별 신호의 증폭 및 감소를 위해 GAIN 값의 조절이 필요한 경우, 각 채널별 설정값을 직접입력 또는 상하 화살표 클릭을 이용하여 조절. 프로그램 구동 시 기본 값은 '1.00' 으로 설정되어 있음

- 3 신호의 오프셋 조절을 위해 각 채널별 OFFSET 값 설정하여 수집 신호의 상하이동 가능
- 4 'Raw MFL Signal Save' 창에 수집된 원 자속신호를 저장하고자 하는 폴더의 위치 및 파일명을 직접 입력하여 원신호의 저장 설정
- 5 'Differential MFL Signal Save' 창에 수집된 자속신호의 차분 값을 저장하고자 하는 폴더의 위치 및 파일명을 직접 입력하여 차분 값 저장 설정

(나) 강구조물 점검용 S/W 구동 및 결과 확인 방법

① MFL SIGNAL Tab - MFL 원신호 수집 및 디스플레이



<MFL SIGNAL Tab을 이용한 채널별 누설자속신호 모니터링>

- 'MFL SIGNAL' 탭을 이용하여 MFL 원신호(Raw signal) 수집을 위한 On/Off 제어 및 실시간 신호 확인이 가능하며 아래와 같은 방법을 통해 작동된다.

- 1 'MFL SIGNAL' 을 클릭하여 MFL 원신호 수집 및 확인을 위한 MFL SIGNAL 탭으로 이동
- 2 초록색의 'START' 버튼을 클릭하여 자속(Magnetic flux)신호 수집 시작
- 3 좌/우 총 10개의 그래프를 통해 각 센싱채널별 수집되는 자속신호의 실시간 디스플레이
각 그래프의 스케일은 기본적으로 오토스케일로 설정되어있으나, 목적에 따라 X축 및 Y축의 더블클릭을 통해 지정 값을 입력하여 디스플레이 범위 설정 가능
- 4 중앙부에 10개의 채널별 인디케이터가 배치되어 있음. 누설자속(MFL)이 발생한 시점에 해당채널의 인디케이터가 빨간색으로 점멸됨. 인디케이터를 통해 각 채널별로 감지되는 누설자속 신호를 확인함으로써 대상 시편의 손상 유무 확인
- 5 빨간색의 'STOP' 버튼을 클릭하여 자속신호 수집 종료
- 6 'DIFF SIGNAL' 및 '3D MFL MAP' 탭을 클릭하여 다른 디스플레이 모드로 전환

② DIFF SIGNAL Tab - 자속 신호의 차분 값 수집 및 디스플레이

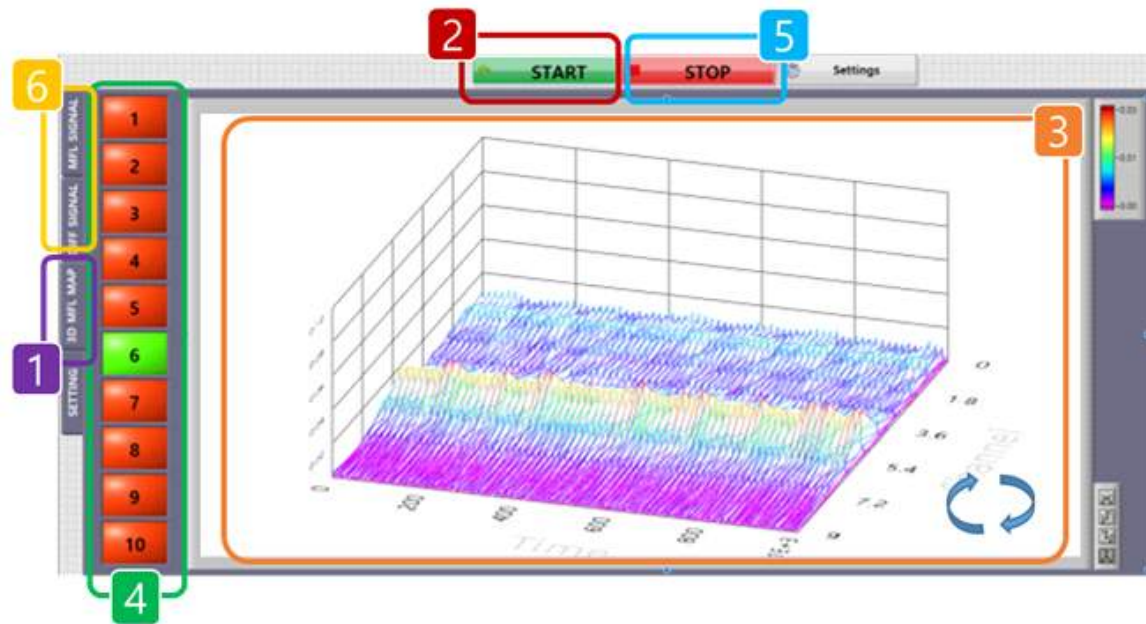


<DIFF SIGNAL Tab을 이용한 채널별 자속 차분 값 신호 모니터링>

- 본 시스템을 이용한 손상의 직관적인 유무 판단의 편의성을 높이기 위해, 누설자속 신호 픽(Peak)의 순간변화량이 큰 특성을 이용하여 자속신호의 차분 값(Differential value)을 구하였고, 이를 ‘DIFF SIGNAL’ 탭을 통해 나타냄.
- ‘DIFF SIGNAL’ 탭을 이용하여 ‘MFL SIGNAL’ 탭과 마찬가지로, 차분 값 수집을 위한 On/Off 제어 및 실시간 자속 차분 값 그래프의 확인이 가능하며 아래와 같이 구동한다.

- 1 ‘DIFF SIGNAL’ 을 클릭하여 자속의 차분 신호 수집 및 확인을 위한 DIFF SIGNAL 탭으로 이동
- 2 초록색의 ‘START’ 버튼을 클릭하여 자속의 차분 신호 수집 시작
- 3 좌/우 총 10개의 그래프를 통해 각 센싱채널별 수집되는 차분 신호의 실시간 디스플레이
- 4 중앙부에 10개의 채널별 인디케이터가 배치되어 있음. 손상에 의해 차분 값이 임계값을 넘는 시점에 해당채널의 인디케이터가 빨간색으로 점멸됨. 인디케이터를 통해 각 채널별 시편의 손상 유무 확인 가능
- 5 빨간색의 ‘STOP’ 버튼을 클릭하여 신호 수집 종료
- 6 ‘MFL SIGNAL’ 및 ‘3D MFL MAP’ 탭을 클릭하여 다른 디스플레이 모드로 전환

③ 3D MFL MAP - 실시간 3D MFL 이미지 디스플레이



<3D MFL MAP Tab을 이용한 실시간 3D MFL 이미지 모니터링>

- 본 탭을 통해 스캔한 시편의 자속분포를 3D 이미지로 확인할 수 있고, 디스플레이 된 이미지는 마우스의 드래그 및 스크롤 조작을 통해 회전 및 확대/축소가 가능하다. 이를 통해 손상 발생 유무 뿐만 아니라 손상의 형상, 분포 및 크기를 한눈에 직관적으로 확인할 수 있다.

1 좌측 ‘3D MFL MAP’ 을 클릭, 실시간 3D MFL 이미지 확인을 위한 3D MFL MAP 탭으로 이동

2 초록색의 ‘START’ 버튼을 클릭하여 자속의 3D 이미지 수집 시작

3 10개 센서 어레이의 자속 측정 값을 이용한 3D 그래프를 통해 실시간으로 스캔한 시편의 자속 분포를 3D 이미지화하여 디스플레이.

마우스의 드래그 및 스크롤 조작을 통해 3D MFL 이미지의 회전 및 확대/축소 가능

4 좌측에 10개의 채널별 인디케이터가 배치되어 있음. 채널별 그래프 탭들과 마찬가지로 손상 발생 시 해당채널의 인디케이터가 빨간색으로 점멸되어 즉시 손상의 확인이 가능.

5 빨간색의 ‘STOP’ 버튼을 클릭하여 신호 수집 종료

6 ‘MFL SIGNAL’ 및 ‘’ 탭을 클릭하여 다른 디스플레이 모드로 전환

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

핵심 성과물	단위 성과물	질적성과		양적성과	달성치
		질적 성과지표	목표치	목표치	
강구조물 진단을 위한 휴대용 마그네틱 점검 장비 개발	휴대용 마그네틱 점검 H/W 최적 설계	손상 유형 분석	1식		달성
		하드웨어 설계	1식	특허출원 1건	달성
		PCB 설계	1식		달성
	휴대용 마그네틱 센싱 장비	진단 가능 최대 속도	0.5m/sec	특허출원 1건	달성
		휴대성	3 kg	특허등록 1건	달성
		조사 가능 지속시간	3 Hr	시제품 1건	달성
마그네틱 기반 강구조물 및 용접부 손상검출 알고리즘 개발	휴대용 마그네틱 센싱 알고리즘 설계	자속(MFL) 측정 시스템 설계	1식	논문 1건	달성
		다채널 홀센서 어레이 구조 자속 계측부 설계	1식	S/W 1건	달성
	환경 영향에 따른 보정 알고리즘 개발	작동가능 범위	-15℃ ~ 50℃	논문 1건	달성
진단결과 분석 및 수집된 신호자료 시각화 시스템 UI 개발	휴대용 마그네틱 센싱 모니터링 시스템 및 UI제작	UI 개발	1식	시제품 1건	달성
		데이터 수집장치	1EA	S/W 1건	달성
	시각화 기반 점검자 친화적 점검 시스템 개발	손상 시각화 알고리즘	1식	논문 1건	달성 (2건)
		점검자 모니터링 프로그램	1식	S/W 1건	달성
강구조물 및 용접부 손상별 유지관리 매뉴얼 정립	시스템 구축 및 매뉴얼 작성	매뉴얼	1식		달성
		지침서	1식		달성
	실내 및 현장 실험을 통한 시스템 안정화 및 검증	진단 가능 단면 손실율	3% 이하	논문 1건	달성
		탐지가능 손상 크기	2mm 이하	시제품 1건	달성
		진단 가능 폭	10cm 이상		달성

2. 관련 분야 기여도

가. 기술적 측면

- 복잡하고 신뢰성 및 재현성이 적은 기존 비파괴방법을 탈피하여 진단의 정확도 및 신뢰성이 향상됨과 동시에, 손상의 위치뿐만 아니라 손상형상 및 크기의 추정이 가능하여 보다 정밀하고 구체적인 진단이 가능
- 시간적 공간적으로 제약되었던 실제 안전점검 현장에서 외부영향요소에 대해 휴대용 마그네틱 장비를 이용함으로써 현장조건에 구애받지 않고 상시적이고 정량적 진단결과 도출 가능
- 마그네틱 기반 시각화된 이미지를 이용한 점검자 친화적 진단결과 표시로 상황인지가 즉각적이고 직관적으로 이루어짐, 이를 통한 점검자의 신속한 판단 및 대응을 도움으로써 강구조물 및 용접부 손상 유지관리의 효율성 증가
- 본 기술은 강구조물 및 용접부 손상검출을 위한 마그네틱 기반 휴대용 장비개발을 목적으로 두고 있어 기존 구조물의 국부적인 손상검출이 아닌 구조물의 전체적인 검사가 가능하여 안전점검의 효율성 및 신뢰성 향상에 기여할 것으로 기대됨

나. 경제적·산업적 측면

- 본 기술의 적용을 통해 강구조물의 안전성 확보가 가능하여, 근로자의 인적/물적 사고를 예방함과 동시에 비파괴조사의 신뢰성 확보로 구조물의 건전성 증대
- 휴대용 손상 검출 시스템을 통한 객관적이고 정량적인 자동 진단 결과 제시로 국부 조사에서 전수 조사가 가능해짐.
- 지진, 폭풍과 같은 재난 발생 직후, 구조물의 안전성이 확보된 상황에서 신속한 시설물의 내구성 평가가 가능하며 업무단절로 인한 경제적 피해 절감 가능
- 해외기술에 의존해왔던 비파괴 안전진단 기술의 국산화로 외화유출 방지 및 국내 안전진단 시장 확대가 가능함. 뿐만 아니라 시장선도 기술로써의 완제품의 해외시장 경쟁력 확보가 가능

다. 사회적 측면

- 본 기술의 적용을 통해 강구조물 및 용접부의 안전성 확보가 가능하여, 안전점검 시 점검자의 인적/물적 사고를 예방함과 동시에 강구조물 및 용접부 안전점검의 신뢰성 확보로 현장 효율성 증대
- 복잡하고 제한적인 기존 비파괴 안전진단 기술과 달리 마그네틱 기반 휴대용 장비 운영을 통해 신속한 점검 및 대응이 가능하여 안전점검 시 인력/장비에 소모되는 비파괴 안전진단 비용 절감 가능
- Portable 마그네틱 기반 자동 진단 시스템을 통해 객관적이고 정량적인 자동 진단 결과 제시로 전문가의 주관적 견해가 반영되었던 방식에서 탈피하여 정기점검 시 전체적인 구조물의 점검 가능
- 지진이나 폭풍과 같은 재난 발생 직후에 신속한 시설물의 안전검점을 통해 업무단절로 인한 경제적 피해 절감 가능

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

가. 후속연구의 필요성

- 본 연구는 마그네틱 Portable 강구조물 손상검출 시스템으로 강구조물의 균열과 같은 손상을 검출하는 장비를 개발하였고, 성실히 연구를 진행하여 계획한 목표치를 모두 달성할 것으로 판단됩니다. 본 연구와 관련하여 용접부 손상 DB를 지속적으로 축적하여 자력선의 변화 형태를 통해 손상 유형을 판단할 수 있는 연구를 지속적으로 실시할 계획입니다. 또한 현재 손상의심부 스캔을 인력에 의해 실시하고 있으나 이를 기계장치 또는 로봇으로 자동화 연구를 지속적으로 실시할 계획입니다.

제5장. 연구개발성과의 활용 계획

1. 생산계획

구분		(2020 년) 개발 종료 후 1년	(2021 년) 개발 종료 후 2년	(2022 년) 개발 종료 후 3년
국 내	시장점유율(%)	1 %	5 %	10 %
	판매량(단위: EA)	5	10	25
	판매 단가(원)	10,000,000	10,000,000	10,000,000
	매출액(백만원)	50	100	250
해 외	시장점유율(%)	-	-	-
	판매량(단위: EA)	-	-	5
	판매 단가(달러)	-	-	10,000
	매출액(백만달러)	-	-	50,000
당사 생산 능력		20%	50%	100%

2. 투자계획

- 본 연구개발 완제품은 디바이스 및 DAQ 등을 제외한 모든 부분을 당사 및 컨소시엄의 인력과 자원으로 제품화할 예정이며, 초기 시제품 제작 시 HW는 외주제작에 의한 제작을 수행하고, 향후 주문량이 늘어나면 하드웨어의 경우 OEM방식을 활용하여 제품 개발에 투자할 계획이다.
- 손상검출 시스템은 강구조물 비파괴검사 뿐만 조선, 원자력, 플랜트 등 산업 전 분야에서 사용될 수 있도록 국내외 실정에 맞도록 지속적으로 사용성 평가 및 시스템 업그레이드를 통해 확장해 나갈 계획이다.

(단위 : 백만원)

항목		(2020 년) 개발 종료 후 1년	(2021 년) 개발 종료 후 2년	(2022 년) 개발 종료 후 3년
매출원가		15	30	75
판매관리비		5	10	25
자본적 지출	토지	-	-	-
	건물/건축물	-	-	-
	기계 장치 등	5	10	25
자본적 지출 합계		5	10	25

* 매출원가 : 재료비, 노무비, 제조경비 등 매출원가 총액

* 판매관리비 : 인건비, 감가상각비, 기타경비 등 판매관리비 총액

3. 사업화 전략

구분	구체적인 내용
형태/규모	• 상용화형태 - OEM 생산에 의한 제품화 • 수요처공기업 - 공 기 업 : 한국가스공사, 한국수자원공사, 한국도로공사 등 - 민간건설사 : 삼성엔지니어링, 포스코건설, GS 건설 등 • 예상단가 - 10,000,000원 / SET • 개발 투입 인력 및 기간 - 컨소시엄 인력과 자원으로 제품 상용화(개발 종료 후 2년 이내) - 제품 상용화 성공 후 영업(5인), 생산(3인) 추가 투입으로 양산 개시
상용화 능력 및 자원 보유	• 신사업 창출을 위한 대표이사의 의지 • 안전진단 전문기가관 종합 면허 보유 • 토목구조 전문가 보유 • KOICA ODA 사업 참여 경험 및 해외 인적네트워크 보유
상용화 계획 및 일정	• 개발 종료 후 1차년도(2020년) - 연구개발 및 MOU를 맺은 경기도건설본부의 Test-bed 검증 후 사업 개시 - 당사 운영 안전진단 및 점검 용역에 적용 방안 모색 - 지자체 영업 및 홍보 • 개발 종료 후 2차년도(2021년) - 시공사 대상으로 DEMO 지원 등 홍보영업 전개 - 발주 공공기관 대상 집중 홍보 및 한국도로협회를 통한 홍보 - 건설신기술 신청 - 국내, 해외 전시회 참여를 통한 홍보 • 개발 종료 후 3차년도(2022년) - 건설신기술 등록으로 품셈 등록 • 개발 종료 후 4차년도(2023년) - 추가연구개발 재투자로 지속적인 추가기능 탑재로 고객만족을 통한 매출증대 - 지속적인 국내, 해외 전시회 참여를 통한 홍보 - 인도네시아 인적네트워크와 KOICA 해외지원 사업으로 해외 시장 진출 모색 • 개발 종료 후 5차년도(2024년) - 향후 국내 내수 포화상태를 대비한 해외 시범사업 진행

4. 사업화 모형 제시

가. 사업화 모형 수립(BM) 배경

- 최근들어 구조물이 장대화, 장경간화 됨에 따라 중량 감소를 위해 장대교량에 강거더가 주로 적용되고 있다. 강구조물 절단부나 단면급변부에서 발생하는 모재의 균열뿐만 아니라 용접부에 균열이 발생하여 구조물의 수명을 단축하는 경우가 발생하고 있다. 그러나 강구조물의 균열과 같은 손상을 검출하는 비파괴검사가 방법이 복잡하고 시간이 많이 걸리기 때문에 구조물 위험부 전체를 검사하지 못하고 제한적으로만 검사가 수행하고 있으며, 시방서에서도 구조물 전체 중에서 일부 개소만 선정하여 검사하도록 인정하고 있다.

- 따라서 공용 중에 있는 구조물에서 일부분에 균열이 발생하더라도 안전점검 시에 검출될 확률이 아주 낮아 구조물 유지관리에 문제가 되고 있는바, 구조물 위험부 전체를 간편하고 신속하게 비파괴검사 할 수 있는 장비의 개발이 시급히 요구되고 있는 상황이다.
- 비파괴검사에 간편하고 신속하게 수행할 수 있는 방법으로 마그네틱을 이용한 비파괴검사가 적합하며, 이를 기반으로 하여 portable 손상검출 장비를 개발하게 되면 강구조물 제작사와 시공시 감리뿐만 아니라 특히 안전점검 시에 강구조물의 안전성을 폭 넓게 확인하여 성수대교 붕괴와 같은 재난을 방지하고 (구)당산철교 철거와 같은 불편을 방지할 수 있을 것이다.

나. 사업화 모형의 목표 및 핵심 경쟁 요인

- 본 개발기술의 목표는 장비를 개발하여 장비를 판매하고, 장비를 활용하여 안전점검 서비스를 판매하는 것이다.
- 마그네틱 기반 portable 손상검출 장비는 구조물의 안전을 확인하는데 있어 안전진단 분야에 꼭 필요한 장비로 안전진단 전문기관과 비파괴검사 사업자에게 장비를 판매하고, 구조물 전체의 안전성 확인과 점검시간 단축 및 점검비용 감소를 경쟁력으로 하여 장비를 활용한 안전진단 서비스를 각 지자체와 구조물 관리주체에 수행하여 수익을 창출한다.
- 본 마그네틱 기반 portable 손상검출 기술은 전기·전자·기계 등 과학기술분야의 기술발전에 따른 것으로 비파괴검사 방법을 획기적으로 개선하여 기존의 복잡하고 제한적이던 검사방법을 간편하고 전체적으로 실시 가능하게 하여 안전성 확보와 점검비용 감소를 가능하게 하는 경쟁력을 갖는다.

다. 목표 시장 구조

(1) 경쟁 기업 현황

- 본 기술의 경쟁 기업은 기존 비파괴검사를 수행하는 기업이 될 것이나, 기존의 비파괴검사를 수행하던 회사도 본 장비를 구입하여 비파괴검사를 수행함으로써 인건비 절감과 점검의 신뢰성 향상으로 오히려 이익이 증가하게 될 것이다.

(2) 시장 진입 장벽

- 본 장비의 안전진단 시장 진입에 있어 문제점은 기존의 비파괴검사의 문제점으로 인해 제한적인 부분에 대해서만 비파괴검사를 수행하도록 하는 시방서 기준으로 향후 안전에 대한 의식이 발전하고 유지관리의 중요성이 부각됨에 따라 강구조물 전체에 대한 비파괴검사의 필요성이 대두될 것이며, 이를 통해 비파괴검사의 신속성과 간편성 및 손상검출 신뢰성을 확보하여 시장을 확보하도록 할 것이다.
- 주관연구기관인 (주)다음기술단은 안전진단 전문기관으로 현재 안전진단 업무를 진행하고 있으며, 본 기술의 개발 필요성을 관련자로서 절실히 느끼고 있다. 본 기술이 개발되면 안전진단에 있어 점검 업무의 편리성과 신속성을 직접 적용하고 홍보하게 될 것이다.

라. 수익 확보 전략

(1) 주요 고객군

- 안전진단 전문기관 (2015년 기준 등록업체 763개사)
- 한국시설물안전진단협회 (2017년 기준 회원사 879개사)
- 비파괴검사 사업자 (2017년 기준 비파괴검사업 등록 업체 53개사)
- 시공사 (2012년 기준 종합건설업체 11,304개사)
- 감리사 (2017년 기준 한국건설기술관리협회 회원사 428개사)
- 한국시설안전공단

(2) 사업화 모형(BM)을 통한 수익 창출 방안

- 안전진단 전문기관과 비파괴검사 사업자에게 장비 판매
- 안전진단시에 장비를 이용한 효율적인 안전진단 서비스를 수행하여 수익 향상
- 강구조물 제작과 설치에 관련된 제작공장, 시공사, 감리사에게 장비 판매

5. 사업화 추진계획

가. 사업화 프로세스 맵

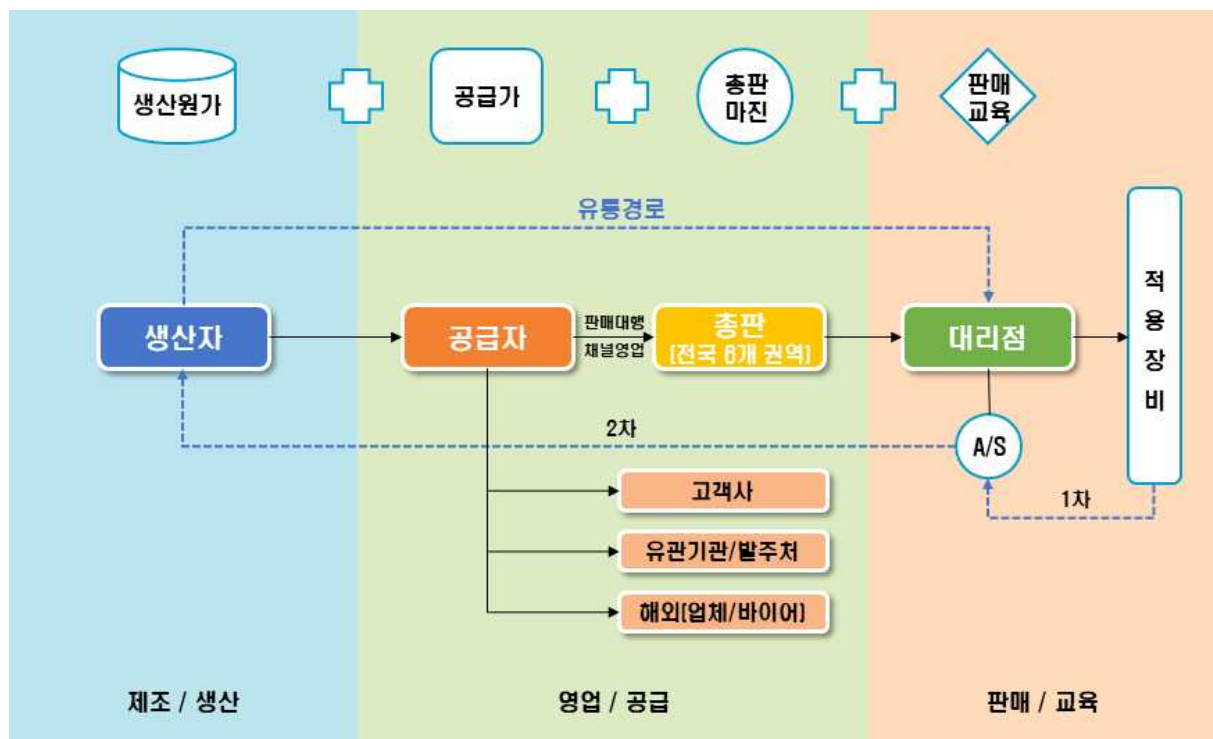
- 연구개발에서 생산 공급, 마케팅까지 책임담당관제를 도입하여 역할과 임무를 명확히 관리하고 성공적인 사업화를 위한 사업화 프로세스 구축



< 사업화를 위한 프로세스 맵 >

나. 생산공급망 확충

- 자체생산품과 외주가공품을 구분하여 관리하고 전국 6개 권역별로 총판을 확충하여, 국내 어떠한 산업현장 이라도 공급이 가능하도록 생산공급망 확충



< 사업화를 위한 생산공급망 맵 >

6. 홍보 및 마케팅 전략

구분	내용
미디어 마케팅	○ 동영상 제작 - 당사 홈페이지 - 유튜브 시현 영상
언론 마케팅	○ 언론매체를 통한 홍보 기사 - 경제신문, 산업기계 신문 - 고객사를 통한 대외 홍보 지원 - 일간지, 월간지 등 게시
이벤트 마케팅	○ 산업기계 및 전시회 참석 - 산업기계 및 기타 전시회 참석 - 당사 현장 우선 적용 고객사 관심 유발
제휴 마케팅	○ 행사 참여 - 협회 및 학회를 통한 제품홍보 - 관공서(한국도로공사, 한국시설안전공단)를 통한 홍보 지원

가. 홍보 및 글로벌 판매처 확보방안

- 비파괴검사를 실시하는 고객사에 실증제안과 CRM(Customer Relationship Management)을 통해 프로 모션 진행
- 개발 서비스/제품과 관련된 국제 박람회 및 전시회에 적극 참여함으로써 개발 서비스/제품 및 기술의 우수성을 홍보하고 해외 판매처를 확보

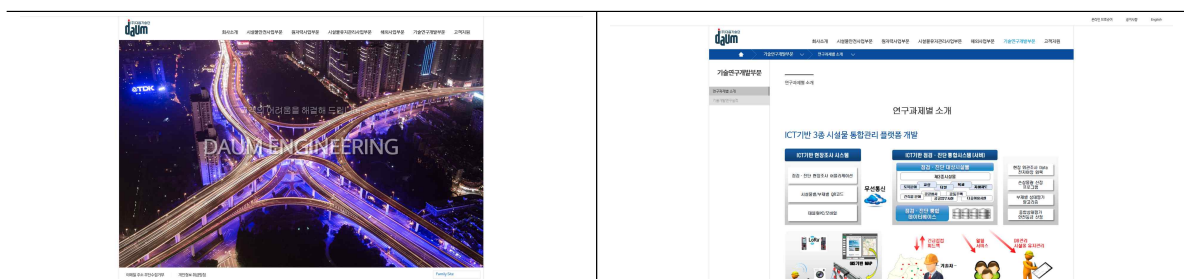
산업박람회	건설장비박람회	월드오브콘크리트
		

나. 산업단지 안전관리자 협의체를 통한 제품홍보



<지역별 안전관리자 협의체>

다. 본 대상 기술에 대한 지속적인 홍보를 위하여 주관기관인 ㈜다음기술단 홍보사이트를 활용 (<http://www.daumeng.com/>)



<웹사이트를 통한 홍보>

7. 사전 준비성

가. 기술 연구개발 주도능력

- 주관기관의 시설물 안전점검·진단, 공동기관의 토목 및 기타 분야 신기술의 조화로 최적의 기술 개발 가능
- 다양한 안전점검·진단 기술 및 서비스 유형 보유

나. 상용화 경험 및 사업화 추진의지

- 발주기관, 고객사, 유관기관 등 다양한 인적 네트워크 확보
- 비파괴검사는 (주)다음기술단의 시설물 안전점검·진단 사업의 한 분야로 시스템을 적용하는데 최적의 조건을 가지고 있음
- (주)다음기술단과 성균관대학교는 다양한 고객사와 기술개발 상용화 경험을 가지고 있음

다. 연구개발 및 기술 검증 전략

- 본 대상기술 SW를 실제 환경에서 구현하여 기술적 완성도에 대한 성능검증
- 과제 종료 후 사업화를 위해 신기술 인증을 추진



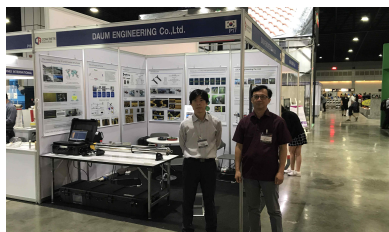
<GS 인증>



<신기술/신제품 인증>

라. 홍보실적

No.	참가시기	전 시 회 명	비 고
1	2018.09	Concrete Asia in Bangkok	기술홍보
2	2018.10	국토교통 해외기술로드쇼	기술홍보
3	2018.10	Intertraffic Indonesia	기술홍보
4	2018.11	World of Concrete in SHANGHAI	기술홍보
5	2019.01	World of Concrete in LASVEGAS	기술홍보
7	2019.11	스마트 건설기술안전 EXPO	기술홍보



<Concrete Asia in Bangkok>



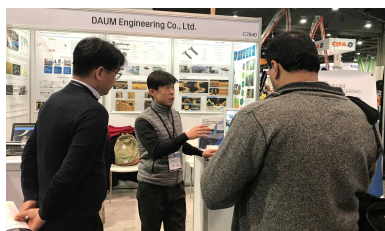
<국토교통 해외기술로드쇼>



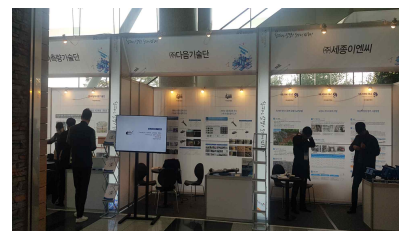
<Intertraffic Indonesia>



<World of Concrete in SHANGHAI>



<World of Concrete in LASVEGAS>



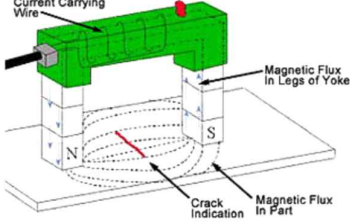
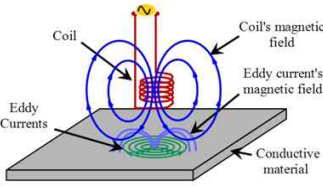
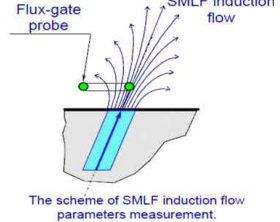
<스마트 건설기술안전 EXPO>

8. 사업화를 위한 시장환경 및 경쟁력 분석(SWOT 분석)

SWOT 분석	
강점 (Strength)	1. MFL 손상 검출 Core 기술 보유 2. MFL 비파괴 검출 개발 인력 보유 : (주)다음기술단 2명 3. (주)다음기술단 구조기술사 및 특급기술자 : 80명 (안전진단 전문가) 4. 간편하고 빠른 손상 검출 프로세스
약점 (Weakness)	1. 실적 및 현장경험 부족 2. 안전진단 세부지침에 미반영 기술
기회 (Opportunity)	1. 노후 교량의 증가 2. 현재 안전진단 세부지침으로는 강재 용접부 전수조사 불가 3. 스마트 선진화 기술 도입 확산 4. ICT 기술과 MFL 기술 융합을 통한 기술 변화
위협 (Threat)	1. 건설분야 외 조선, 기계, 플랜트 분야의 기술 2. 데이터의 신뢰성 확보 및 기술의 홍보 3. 유사제품 출현 및 경쟁 심화에 따른 가격경쟁력

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 비파괴검사 방식 비교

구분	자분탐상검사(MT)	와류탐상검사(ET)	금속자기기억탐상검사(MMM)
센서종류	홀센서, GMR센서	와전류센서(유도코일센서)	Fluxgate 센서
감도	105 white noise	1 at 1kHz for 1cm ²	3 at 1 kHz
스캔범위	1 μ T < B < 1T	0.1T < B < 100T	0.1nT < B < 0.01T
연속동작	0	X	0
기본원리	자기흡인작용 철강재료와 같은 강자성체를 자화시키면 결함누설자장이 형성되며, 이 부위에 자분을 도포하면 자분이 흡착	전자유도작용 시험체 표층부의 결함에 의해 발생한 와전류의 변화 즉, 시험 코일의 임피던스 변화를 측정하여 결함을 식별	금속자기기억법 시험체 내부에 존재하는 구조적 변화에 의해 소재 자체에서 생성되는 누설자장의 변화를 감지하여 응력집중부 결함을 검출
개념도			
적용	강자성 재료(용접부, 주강품, 단강품 등)의 표면 및 표면 직하 결함 검출	철강, 비철재료의 파이프, 와이어 등의 표면 또는 표면근처의 결함 검출, 박막두께측정, 재질식별	제작 과정에서 금속제품과 용접부에 대한 정성적 검사, 배관계통 압력용기, 장비, 형태와 종류에 상관없는 자성체에 대하여 제작과정, 수리과정, 운영과정 판별, 재료의 기계적 특성 조사
특징	강자성체에만 적용 가능, 장치 및 방법이 단순, 결함의 육안식별이 가능, 비자성체에는 적용불가, 신속하고 저렴함	금비접촉탐상, 고속탐상, 자동탐상 가능, 표면결함 검출능력 우수, 표피효과, 열교환기 튜브의 결함 탐지	미소조직변화 감지로 결함으로 진행되기 전 초기 손상 상태를 진단 가능, 수명 평가 시 시료 채취 위치 식별 가능, 손상 발생 원인 판별, 응력집중구간에 있는 전이 상태에서 발생하는 자체 누설자장 측정
주 개발국가	대한민국 포함	대한민국 포함	러시아
검사표준	KS D 0213-1994 철강재료의 자분탐상시험방법 및 결함 자분모양의 등급분류 KS W 4041-1984 항공 우주용 자기탐상검사 방법 외 다수	KS D 0074-1994 티타늄관의 와류탐상검사 방법 KS D 0214-1991 동 및 동합금 관의 와류탐상시험 방법 KS D 0232-1995 강의 와류탐상시험 방법 KS D 0251-1979 강관의 와류탐상검사 방법 외 다수	KS B ISO24497-3 비파괴시험 금속 자기 기억법(2014.12.26. 폐지) KS B ISO9934-2 비파괴검사 자분탐상검사(대체표준) -다만, MMM 방식에 대한 설명은 없음 INTERNATIONAL STANDARD ISO 24497 Non-destructive testing-Metal magnetic memory(국제 표준)

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	과제 수행중에 개발된 성과는 특허출원을 통해 지적재산권을 보호할 예정 보안등급 및 공개 가능여부는 2차 평가위원회에서 확정할 예정	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

1. 연구실 안전조치 기본 계획

- 「연구실 안전환경 조성에 관한 법률」 및 「산업안전보건법」 등 관련 법령에 따라 연구실 안전조치 이행

2. 안전 확보 대책

- 공동연구기관인 성균관대는 1회/월 기관 종사자를 대상으로 실험실 안전관리 교육을 실시하고 있음
- 주관 연구기관에도 본 연구에 종사하는 연구자 및 실험보조원의 안전교육을 실시할 것을 유도함
- 연구자 및 실험자에 대한 이상의 실험실 안전을 위하여 보호장구, 안전 보조 장치 구매를 연구실 안전관리비에 계상하고 집행
- 이상의 안전대책은 주관, 공동연구기관 동일하게 적용함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	강구조물 진단을 위한 누설자속 기반 강판 손상의 이미지화	성균관 대	주저 자	한국구조물 진단유지관 리공학회 논문집	-		단독	
2	논문	PSC 내부 텐던의 긴장력 관리를 위한 저전압 EM 센싱 기법	성균관 대	주저 자	한국전산구 조공학회 논문집	-	2019.4	중복 사사	
3	논문	누설자속 기법 기반 강판두께별 국부 손상 진단 감도 분석	성균관 대	주저 자	한국방재 안전학회 논문집	-	2018.12	단독	
4	논문	Improvement of MFL sensing- based damage detection and quantification for steel bar NDE	성균관 대	주저 자	Smart Structures and Systems	-	2018.8	중복 사사	SCI(E)
5	학술발 표	MFL METHOD BASED LACAL DAMAGE DETECTION BY DAMAGE TYPES FOR THE STEEL WIRE ROPE NDE	성균관 대	주저 자	NDE for Safety 2018	-	2018.11	중복 사사	
6	특허	강재 용접부위 손상 검출장치	(주)다음 기술단		특허청	-	2018.11	단독	
7	특허	누설자속 측정에 의한 비파괴 검사 장치	성균관 대		특허청	-	2017.12	단독	
8	특허	강구조물 및 용접부 결함 진단장치	(주)다음 기술단		특허청	-	2017.11	단독	등록
9	프로 그램	강구조 점검용 누설자속 GUI	성균관 대	개발 자	대한민국	-	2019.11	단독	
10	프로 그램	강교량 점검자 모니터링 프로그램	성균관 대	개발 자	대한민국	-	2018.11	단독	
11	프로 그램	평판 MFL 3D plot	성균관 대	개발 자	대한민국	-	2018.11	단독	
12	프로 그램	강판 10채널 누설자속 스캐너	성균관 대	개발 자	대한민국	-	2017.12	단독	

5. (학술발표) MFL METHOD BASED LACAL DAMAGE DETECTION BY DAMAGE TYPES FOR THE STEEL WIRE ROPE NDE



MFL method based local damage detection by damage types for the steel wire rope NDE
Ju-Min KIM, Jihwan PARK*, Jungyeon LIM*, Sanghee PARK**
* School of Civil, Architectural Engineering and Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon 206, Korea,
** Department of Convergence Engineering for Future City, Sungkyunkwan University, Suwon 206, Korea
Contact e-mail: spk@sjk.skku.ac.kr

Abstract:
To distinguish the various types of local damages of the steel wire ropes, magnetic flux leakage (MFL) method that is known as a non-destructive detection (NDE) method for structural deterioration inspection was applied to the study. For experimental study, three types of virtual artificial damages, such as fatigue, corrosion, and transverse wire breakage on the wire rope specimen. To measure the magnetic flux signals from the damaged wire rope specimens, a multi-channel MFL sensor was used. The magnetic flux signals obtained by using multi-channel sensor were used to detect the local damage types. The capability of damage detection according to damage type was verified from the measured MFL signals from the damaged specimens. First, the characteristics of the measured MFL signals for each damage type were compared and analyzed for type of damage.

Keywords: wire rope inspection, Magnetic flux leakage, Damage types, MFL, Virtual sensor model

6. (특허) 강재 용접부위 손상 검출장치

출원번호통지서

페이지 1 / 3

관인생략

출원번호통지서

출원일자 2018.11.15
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2018-0140962 (접수번호 1-1-2018-1138487-16)
출원인명칭 (주)다음기술단(1-2006-029310-4)
대리인성명 특허법인인더브레인(9-2017-100001-6)
발명자성명 최상식 이흥수 김영석 정해용 이종화
발명의명칭 강재 용접부위 손상 검출장치

특허청장

<< 안내 >>

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

<http://www.patent.go.kr/jsp/kiponet/ir/receipt/online/app/NoOffcAct.so>

2018-11-15

7. (특허) 누설자속 측정에 의한 비파괴 검사 장치

출원번호통지서

페이지 1 / 3

관인생략 출원번호통지서

출원일자 2017.12.26
특기사항 심사청구(무) 공개신청(무) 참조번호(17617)
출원번호 10-2017-0179127 (접수번호 1-1-2017-1287631-11)
출원인명칭 상관대학교산학협력단(2-2005-001360-4)
대리인성명 특허법인아주(9-2001-100005-9)
발명자성명 박승희 김주원 임정현 박민수
발명의명칭 누설자속 측정에 의한 비파괴 검사 장치

특허청장

<< 안내 >>

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

<http://www.patent.go.kr/jsp/kiponet/ir/receipt/online/app/NoOffcAct.so>

2017-12-26

8. (특허) 강구조물 및 용접부 결함 진단장치

특허증 CERTIFICATE OF PATENT

특허 제 10-1843890 호
Patent Number

출원번호 제 10-2017-0146892 호
Application Number
출원일 2017년 11월 06일
Filing Date
등록일 2018년 03월 26일
Registration Date

발명의명칭 Title of the Invention
강구조물 및 용접부 결함 진단장치

특허권자 Patentee
(주)다음기술단(131111-*****)
경기도 성남시 분당구 판교역로 240, 에이동 309호 (상평동, 삼한하이텍스)

발명자 Inventor
등록사항안내에 기재

위의 발명은 「특허법」에 따라 특허등록원부에 등록되었음을 증명합니다.
This is to certify that, in accordance with the Patent Act, a patent for the invention has been registered at the Korean Intellectual Property Office.

특허청
Korean Intellectual Property Office

2018년 03월 26일

특허청장
COMMISSIONER
KOREAN INTELLECTUAL PROPERTY OFFICE

성준모

9. (프로그램) 강구조 점검용 누설자속 GUI

제 C-2019-032619 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	강구조 점검용 누설자속 GUI
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	성균관대학교 산학협력단 경기도 수원시 장안구 서부로
4. 생년월일(법인등록번호)	110171-0029501
5. 창작연월일	2019년 10월 16일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2019년 11월 07일
8. 등록사항	저작자 : 성균관대학교 산학협력단, 창작 : 2019.10.16

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2019년 11월 07일

한국저작권위원회

10. (프로그램) 강교량 점검자 모니터링 프로그램

제 C-2018-033957 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	강교량 점검자 모니터링 프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	성균관대학교 산학협력단 경기도 수원시 장안구 서부로
4. 생년월일(법인등록번호)	110171-0029501
5. 창작연월일	2018년 11월 01일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2018년 11월 20일
8. 등록사항	저작자 : 성균관대학교 산학협력단, 창작 : 2018.11.01

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2018년 11월 22일

한국저작권위원회

11. (프로그램) 평판 MFL 3D plot

제 C-2018-033956 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	평판 MFL 3D plot
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	성균관대학교 산학협력단 경기도 수원시 장안구 서부로
4. 생년월일(법인등록번호)	110171-0029501
5. 창작연월일	2018년 11월 02일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2018년 11월 20일
8. 등록사항	저작자 : 성균관대학교 산학협력단, 창작 : 2018.11.02

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2018년 11월 22일

한국저작권위원회

12. (프로그램) 강판 10채널 누설자속 스캐너

제 C-2017-032926 호

저작권 등록증

1. 저작물의 제호(명칭)	강판 10채널 누설자속 스캐너
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	성균관대학교 산학협력단 경기도 수원시 장안구 서부로
4. 생년월일(법인등록번호)	110171-0029501
5. 창작연월일	2017년 11월 15일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2017년 12월 11일
8. 등록사항	저작자 : 성균관대학교 산학협력단, 창작 : 2017.11.15

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2017년 12월 20일

한국저작권위원회

제12장. 참고 문헌

1. Afzal, M. and Udpa, S., Advanced signal processing of magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline, NDT & E International, Vol. 35, pp. 449-457, 2002.
2. Boat, M., Pearson, N., Lieb, R., Davies, J., James, R. and Woodhead, B., The factors that affect the defect sizing capabilities of the Magnetic Flux Leakage Technique, 53rd Annual Conference of the British Institute of Non-Destructive Testing, 2014.
3. Bo-Suk Yang, Support Vector Machine for Machine Fault Diagnosis and Prognosis, Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, 2007.
4. Chen, Z., Xuan, J., Wang, P. and Wang, H., "Simulation on high speed rail magnetic flux leakage inspection", Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 1-5, 2011.
5. Coktepe, M., Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field, Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 91, No. 1-2, pp. 70-72, 2011.
6. Fan, F., Wang, F. and Koh, J., The missing data of far-field pattern reconstructed by using Hilbert Transform, Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information, pp. 339-340, 2014.
7. Feng J., Zhang J., Lu, S., Wang, H., and Ma, R., "Three-axis magnetic flux leakage in-line inspection simulation based on finite-element analysis", Chinese Physics B, 22(1), 2013.
8. Hwang, K., 3-D defect profile reconstruction from magnetic flux leakage signatures using wavelet basis function neural networks, 2000.
9. Huang Z., Que P. and Chen L., 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method, NDT & E International, Vol. 39, No. 1, pp. 61-66, 2006.
10. Ji, F., Wang, C., Sun S. and Wang W., Application of 3-D FEM in the simulation analysis for MFL signals. Insight, Vol. 51, No. 1, pp. 32-35, 2009.
11. Jin, T., Que, P. and Tao, Z., Designing and Signal Processing of Intelligent Inspection Pig Applying Magnetic Flux Leakage Methods, Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronic and Automation Chengdu China, 2004.
12. Kim, J. .W., Lee, J. H., Lee, C., Park, S., .Kim, D. J., and .Lee J. J., "Local damage evaluation technique using elasto-magnetic sensors operated on a cable climbing robot," Advanced Science Letters, Vol.13, No.1, pp.105-109, 2012.
13. Kopp, G., and Willems, H., "Sizing limits of metal loss anomalies using tri-axial MFL measurements_A model study", NDT & E International, 55, pp. 75-81, 2013.
14. Lee, J. J. Hwang, J. Jun and S. Choi, "Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array," Journal of Mechanical Science and Technology, 2009 Vol. 22, pp.2310-2317.
15. Lenz, J. and Edelstein, A., E., Magnetic Sensors and Their Applications, IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 3, pp. 631-649, 2006.
16. Li, Y., Wilson, J. and Tian, G., Y., Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation, NDT & E International, Vol. 40, pp. 179-184, 2007.
17. Lukyanetsa, S., Snarskiib, A., Shamoninc, M. and Bakaevc, V., Calculation of magnetic leakage field from a surface defect in a linear ferromagnetic material: an analytical approach, NDT&E International, Vol. 36, pp. 51-55, 2003.
18. Mandache, C., Shiari, B., and Clapham, L., Defect separation considerations in magnetic flux leakage

-
- inspection, *Insight*, Vol. 47, No. 5, pp. 289-293, 2005.
19. Mironenko, A and Kumar, V., Non-destructive Inspection of Wire Ropes is Wise Mean to Provide Safety and Cost savings, Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18-22, 2013.
 20. Mukherjee, D., Saha, S. and Mukhopadhyay, S., An adaptive channel equalization algorithm for MFL signal, *NDT & E International*, Vol. 45, No. 1, pp. 111-119, 2012.
 21. Mukherjee, D., Saha, S. and Mukhopadhyay, S., Empirical structure for characterizing metal loss defects from radial magnetic flux leakage signal, *NDT & E International*, Vol. 43, pp. 507-512, 2010.
 22. Mukhopadhyay, S. and Srivastava, G., P., Characterisation of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform, *NDT&E International*, Vol. 33, pp. 57-65, 2000.
 23. Mukhopadhyay, S. and Srivastava, G., P., Detection of leakage magnetic flux from near-side and far-side defects in carbon steel plates using a giant magneto-resistive sensor, *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 2008.
 24. Park, J., Kim, H., and Park, G., A Study on the Signal Correction for Multiple Defects in MFL Type Nondestructive Testing System, *Journal of the Korean Magnetics Society*, Vol. 26, No. 1, pp. 24-30, 2016.
 25. Park, S., Kim, J.-W., Lee, C., and Lee, J.-J., Magnetic Flux Leakage Sensing-Based Steel Cable NDE Technique, *Shock and Vibration*, Vol. 2014, Article ID 929341, 2014.
 26. Ramuhalli, P., Udpa, L. and Udpa, S.S., Neural network-based inversion algorithms in magnetic flux leakage nondestructive evaluation, *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, pp. 8274-8276, 2003.
 27. Sharatchandra Singh, W., Rao, B., P., C., Thirunavukkarasu, S. and Jayakumar, T., Flexible GMR Sensor Array for Magnetic Flux Leakage Testing of Steel Track Ropes, *Journal of Sensors*, Vol. 2012, 2012.
 28. Shi, Y., Zhang, C., Li, R., Cai, M and Jia G., Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection, *Sensors*, Vol. 15, No. 12, pp. 31036-31055, 2015.
 29. Sumitro, S., A. Jarosevic and M. L. Wang, "Elasto-magnetic sensor utilization on steel cable stress measurement," *Proc. 1st fib Congress*, 2002. pp.79-86.
 30. Tian, J and Wang, H., Research on magnetic excitation model of magnetic flux leakage for coal mine hoisting wire rope, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 11, pp. 1-11, 2015.
 31. Wang, M. L., Wang, G. and Zhao, Y., Sensing issues in civil structural health monitoring, Springer, Dordrecht, Netherlands, 2005.
 32. Weischedel, H. R., The inspection of wire ropes in service: a critical review, *Materials Evaluation* Vol. 43, No. 13, pp. 1592-1605, 1985.
 33. Weischedel, H. R. and Chaplin, C. R., Inspection of wire ropes for offshore applications, *Materials Evaluation*, Vol. 49, No.3, pp.362-367, 1991.
 34. Wu, J., Sun, Y., Kang, Y., and Yang, Y., "Theoretical Analyses of MFL Signal Affected by Discontinuity Orientation and Sensor-Scanning Direction", *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, Vol. 51, No. 1, 2015.
 35. Xue, H., Yang, K. and Yang, S., Quantitative Inspection of Broken Wire in Wire Ropes: Method and Apparatus, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 2, No. 1, pp. 35-40, 1996.
 36. Yang, L., Zhang, G., Liu, G. and Gao, S., Effect of Lift-off on Pipeline Magnetic Flux Leakage Inspection, 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China, 2008.
 37. Zatsepin N. N. and Shcherbinin, V. E., "Calculation of the magnetostatic field of surface defects, II. Experimental verification of the principle theoretical relationships", *Defektoskopiya*, 1966.
 38. Zhang, J. and Tan, X., Quantitative Inspection of Remanence of Broken Wire Rope Based on Compressed Sensing, *Sensors*, Vol. 16, No. 9, 1366, 2016.
 39. Zhong, X. and Zhang X., Non-Destructive Testing of Steel Wire Rope Using Magnetic Flux Leakage: Principle, Sensor Design and Signal Wavelet Analysis, *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, Vol. 17, No. 26, 2000.
 40. Zuoying, H., Peiwen, Q. and Liang, C. "3D FEM analysis in magnetic flux leakage method", *NDT & E International*, Vol. 39, pp. 61-66, 2006.
-

주 의

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