최종보고서(일반과제용)

보안등급
일반[✔], 보안[ ]

중앙행정기관명	국토교통부	사업명	사업명	국토교통기술촉진연구사업	
전문기관명	국토교통과학기술진흥원		내역사업명	국토교통기술혁신연구(사회이슈해결 유형)	
공고번호	공고-제00호	연구개발과제번호		19CTAP-C153035-01-000000	
국가과학기술 표준분류	EI1101 시설물 점검/진단기술	45%	ED0705 안전감시/진단 계측제어기	25%	EA0109 신뢰성/비파괴평가	10%
연구주제	(대분류)걱정없는 안심사회		(중분류)생활안전, 재난재해, 에너지, 주거, 교통		(소분류)불량 주택 및 시설물	

연구개발과제명	국문	PSC 구조물 내부 텐던 손상검출을 위한 음향방출 기반 안전 진단 및 실시간 모니터링 기술 개발			
	영문	Development of acoustic emission-based safety diagnosis and real-time monitoring technology for tendon damage detection of PSC structure			
주관연구개발기관	기관명	㈜ 렉 터 슨		사업자등록번호	220-81-92122
	주소	(우)51756 경남 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1		법인등록번호	.110111-2018665
주관연구책임자	성명	김 동 현		직위	이사
	연락처	직장전화	055)231-3333	휴대전화	010-9332-8115
		전자우편	dhkim@rectuson.com	국가연구자번호	1086 9326
연구개발기간	전체	2019. 04. 19 - 2021. 12. 31(2년 9개월)			
	1년차	2019. 04. 19 - 2019. 12. 31(0년 9개월)			
	2년차	2020. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년 0개월)			
	3년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31(1년 0개월)			

연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체		기타( )					
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	600,000	30,000	170,000	-	-	-	-	630,000	170,000	800,000	-
1년차	134,000	6,700	37,967	-	-	-	-	140,700	37,967	178,667	-
2년차	155,000	7,750	43,917	-	-	-	-	162,750	43,917	206,667	-
3년차	311,000	15,550	88,116	-	-	-	-	326,550	88,116	414,666	-

공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고	
						역할	기관유형
공동연구개발기관	한국건설기술연구원	서동우	수석	010-2054-4510	dwseo@kict.re.kr	공동	정부출연연
위탁연구개발기관	-	-	-	-	-	-	-
연구개발기관 외 기관	-	-	-	-	-	-	-

연구개발담당자 실무담당자	성명	홍 윤 기		직위	과장
	연락처	직장전화	055-231-3333	휴대전화	010-3013-7481
		전자우편	ykhong@rectuson.com	국가연구자번호	1118 5173

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

2022년 3월 18일

연구책임자 : 김 동 현 (직인)

주관연구개발기관의 장 : ㈜ 렉 터 슨 김 동 률 (직인)

공동연구개발기관의 장 : 한국건설기술연구원 김 병 석 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요 약 문 >

<table>
<tr><td colspan="2">사업명</td><td colspan="2">국토교통기술촉진연구사업</td><td colspan="2" rowspan="2">연구개발과제번호</td><td colspan="2" rowspan="2">19CTAP-C153035-01-000000</td></tr>
<tr><td colspan="2">내역사업명</td><td colspan="2">국토교통기술혁신연구</td></tr>
<tr><td colspan="2">국가과학기술표준분류</td><td>EI1101
시설물 점검/진단기술</td><td>45%</td><td>ED0705
안전감시/진단 계측제어기</td><td>25%</td><td>EA0109
신뢰성/비파괴평가</td><td>10%</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구주제</td><td colspan="2">(대분류)걱정없는 안심사회</td><td colspan="2">(중분류)생활안전, 재난재해, 에너지, 주거, 교통</td><td colspan="2">(소분류)불량 주택 및 시설물</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제명</td><td colspan="6">PSC 구조물 내부 텐던 손상검출을 위한 음향방출 기반 안전 진단 및
실시간 모니터링 기술 개발</td></tr>
<tr><td colspan="2">전체 연구개발기간</td><td colspan="6">2019. 04. 19 - 2021. 12. 31 (2년 9개월)</td></tr>
<tr><td colspan="2">총 연구개발비</td><td colspan="6">총 800,000천원
(정부지원연구개발비 : 600,000천원, 기관부담연구개발비 : 200,000천원,
지방자치단체 : 0천원, 그 외 지원금 : 0천원)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발단계</td><td colspan="3">기초[ ] 응용[✔] 개발[ ]
기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]</td><td>기술성숙도</td><td colspan="2">착수시점 기준(3단계)
종료시점 목표(8단계)</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 유형</td><td colspan="6">지정공모 [ ] 자유공모 [✔]</td></tr>
<tr><td colspan="2">연구개발과제 특성</td><td colspan="6">사회이슈 해결</td></tr>
<tr><td rowspan="8">연구
개발
목표
및
내용</td><td>최종 목표</td><td colspan="6">PSC 구조물의 안전성 평가를 위한 음향방출 기반 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발</td></tr>
<tr><td>전체 내용</td><td colspan="6">○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1년차</td><td>목표</td><td colspan="6">○ PSC 거더교 내부 텐던 실험 환경 구축
○ PSC 거더교 내부 텐던 진단을 위한 음향방출 기술 정립 및 검사 장비 설계</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">○ PSC 거더교 내부 텐던 실험 환경 구축
1) 실내에서 실험이 가능한 소형 PSC 실험체 제작 및 불량 사례 재현
2) 음향방출 모니터링이 가능하도록 센서와 계측장비를 구성
3) PSC 실험체에서 탄성파 신호를 유도하기 위한 외부 신호 가진 장비 구축
○ PSC 거더교 내부 텐던 진단을 위한 음향방출 기술 정립 및 검사 장비 설계
1) 실험 결과 비교 분석을 통한 탄성파 신호 유도 방안 수립
2) 음향방출기반 내부 텐던 검사 방안 정립 및 진단 알고리즘 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2년차</td><td>목표</td><td colspan="6">○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축
○ PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축
○ 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증
○ PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가</td></tr>
<tr><td>내용</td><td colspan="6">○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
1) PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축
1) 노후 교량 또는 이상의심 교량에 대한 집중관리를 위한 음향방출 기반 모니터링 시스템 구축
2) 상시 모니터링을 위한 센서 설치 위치 선정 및 설치 방안 수립
3) 상시 모니터링을 위한 현장 전원 수급 대책 및 데이터 관리 방안 수립
○ PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축
1) PSC 거더교 불량 사례별 신호 수집을 위한 데이터베이스 구현
2) PSC 거더교 불량 사례별 음향방출신호 특징 추출 및 분석</td></tr>
</table>

			3) 음향방출신호 특징에 따른 이상상태 정의 및 PSC 거더교 불량사례와의 비교검증 ○ 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증 1) 손상 유형별 소형 시험체 제작 및 음향방출 기술을 활용한 검사 장비 블라인드 테스트 2) PSC 노후 교량의 내부 텐던 파단에 따른 음향방출 신호판별을 위한 실험 3) PSC 실험체 내부 텐던 파단에 따른 음향방출 신호판별을 위한 실험 4) 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증을 위한 텐던 손상 실험체 제작 ○ PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가 1) 해외의 PSC 박스거더교 유지관리 체계 및 매뉴얼 분석
	3년차	목표	○ 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행 ○ 테스트베드 교량 내부 텐던 검사 및 진단 수행 ○ PSC 거더교 상태진단 기준 수립 ○ PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가 ○ 테스트베드 교량 현장 적용성 평가 및 보완 ○ PSC 구조물 안전진단 관련 정책 반영 추진
		내용	○ 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행 1) 현장 답사 및 시스템 설치 2) 통합 웹 모니터링 시스템 구축 ○ 테스트베드 교량 내부 텐던 검사 및 진단 수행 1) 검사 위치 선정 및 진단 수행 2) 계측 결과 분석 ○ PSC 거더교 상태진단 기준 수립 1) 음향방출 특징신호 정의 2) 음향방출 특징신호 대비 예상 결함 특정 3) 예상 결함 대비 유지관리 Action Plan 수립 ○ PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가 1) 테스트베드 부식 과속화 실험 2) 테스트베드 블라인드 테스트 3) 외산 장비와의 비교 검증 및 품질 시험 수행 ○ 테스트베드 교량 현장 적용성 평가 및 보완 1) 교량 적용 결과 보완 2) 개발 제품 보완 ○ PSC 구조물 안전진단 관련 정책 반영 추진
연구개발성과			PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비, 실시간 모니터링 시스템, 진단 데이터베이스, 유지관리 매뉴얼
연구개발성과 활용방안 및 기대효과			● 활용계획 1) PSC 구조물의 균열 및 붕괴를 사전에 감지하는 건전도 평가 및 예측 진단 기술 활용 2) 교량 관리 주체(정부, 지자체 등)와 관련 보수보강 업체 등에서 합리적인 보수보강 시기 및 공법 의사 결정 시스템으로 활용 3) 노후 교량 장수명화 통합 관리 체계 마련 4) 유지보수·유지관리·보수보강 전문업체의 기술자 교육 자료로 활용 5) 정량적 데이터 및 실증을 바탕으로 노후 교량 유지관리 및 장수명화 ● 기대효과 1) 유사 구조물 안전 진단 시스템 수입대체효과 및 진단 용역 시장창출 기대 2) 세계 최고의 기술과 동등 이상의 기술수준을 유지하면서 국내 최초로 적용된 기술로의 노후 PSC 교량의 선제적 사고 예방기술 확보 3) 교량 보수·보강분야 R&D 실증연구 및 기술개발에 활용함으로써 국가예산의 효율적 투자 가능

<table>
<tr><td></td><td colspan="12">4) 국가 SOC 시설물(교량)의 유지보수 예산 절감에 크게 기여
5) 교량 안전성 확보를 통한 국민의 안전 인식도 향상 및 교량의 수명연장을 통한 국민안전과 복지 실현</td></tr>
<tr><td>연구개발성과의
비공개여부 및 사유</td><td colspan="12">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구개발성과의 등록·기탁 건수</td><td rowspan="2">PSC structure</td><td rowspan="2">Internal tendon</td><td rowspan="2">Damage detection</td><td rowspan="2">Acoustic emission</td><td rowspan="2">Safety diagnosis</td><td rowspan="2">소프트웨어</td><td rowspan="2">표준</td><td colspan="2">생명자원</td><td rowspan="2">화합물</td><td colspan="2">신품종</td></tr>
<tr><td>생명정보</td><td>생물자원</td><td>정보</td><td>실물</td></tr>
<tr><td>5</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>-</td><td>3</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황</td><td>구입기관</td><td>연구시설·장비명</td><td>규격 (모델명)</td><td>수량</td><td>구입 연월일</td><td>구입가격 (천원)</td><td>구입처 (전화)</td><td>비고 (설치장소)</td><td>ZEUS 등록번호</td></tr>
<tr><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>국문핵심어
(5개 이내)</td><td colspan="3">PSC 구조물</td><td colspan="3">내부텐던</td><td colspan="3">손상검출</td><td colspan="3">음향방출</td><td colspan="3">안전진단</td></tr>
<tr><td>영문핵심어
(5개 이내)</td><td colspan="3">PSC structure</td><td colspan="3">Internal tendon</td><td colspan="3">Damage detection</td><td colspan="3">Acoustic emission</td><td colspan="3">Safety diagnosis</td></tr>
</table>

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용 ····· 4

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 ····· 99

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성) ····· 119

5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도 ····· 120

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 ····· 121

7. 참고 문헌 ····· 122

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발
- PSC 거더교 상태 진단 기준 수립
- PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가
- PSC 박스거더교 내부 텐던 유지관리 매뉴얼 개발

○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
- 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증

○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축
- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축
- PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축
- 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행

2) 연구개발과제의 연차별 목표

○ 1차년도
- PSC 거더교 내부 텐던 실험 환경 구축
- PSC 거더교 내부 텐던 진단을 위한 음향방출 기술 정립 및 검사 장비 설계

○ 2차년도
- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발
- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축
- PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축
- 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증
- PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가

○ 3차년도
- 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행
- 테스트베드 교량 내부 텐던 검사 및 진단 수행
- PSC 거더교 상태진단 기준 수립
- PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가
- 테스트베드 교량 현장 적용성 평가 및 보완
- PSC 구조물 안전진단 관련 정책 반영 추진

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내・외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2019)	PSC 거더교 내부 텐던 실험 환경 구축	검사장비 측정 범위	-	5m	콘크리트 감쇠 특성 고려	10%
		검출 신뢰도	-	70%	알고리즘 개발 초기 목표	12%
		특징추출 알고리즘	10개	5개	주요 변수 선행 개발	24%
	PSC 거더교 내부 텐던 진단을 위한 음향방출 기술 정립 및 검사 장비 설계	검출 신뢰도	-	70%	알고리즘 개발 초기 목표	14%
		특징추출 알고리즘	10개	5개	주요 변수 선행 개발	10%
		위치추정 알고리즘	최대 측정거리 10% 이내	최대 측정거리 20% 이내	알고리즘 개발 초기 목표	10%
		불량 사례 분류	-	2개	알고리즘 개발 초기 목표	20%
2년차 (2020)	음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발	검사장비 측정 범위	-	5m	콘크리트 감쇠 특성 고려	6%
		검사장비 응답 시간	-	1분 이내	알고리즘 연산 시간 고려	6%
		검출 신뢰도	-	90%	알고리즘 개발 최종 목표	8%
		특징추출 알고리즘	10개	10개	알고리즘 개발 최종 목표	16%
	음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축	게이트웨이 당 최대 채널 수	16채널	16채널	세계 최고 수준 동등 이상	6%
		샘플링 주파수	5MSPS	5MSPS	세계 최고 수준 동등 이상	6%
		검출 신뢰도	-	90%	알고리즘 개발 최종 목표	9%
		특징추출 알고리즘	10개	10개	알고리즘 개발 최종 목표	7%
		위치추정 알고리즘	최대 측정거리 10% 이내	최대 측정거리 10% 이내	세계 최고 수준 동등 이상	7%
	PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축	불량 사례 분류	-	5개	알고리즘 개발 초기 목표	13%
	PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가	기존 방식 대비 점검 효율성 및 경제성	-	10% 이상 절감	기존 방식 대비 손상 검출 유무 및 생애주기 비용 비교	16%

3년차 (2021)	테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행	게이트웨이 당 최대 채널 수	16채널	16채널	세계 최고 수준 동등 이상	5%
		샘플링 주파수	5MSPS	5MSPS	세계 최고 수준 동등 이상	5%
		검출 신뢰도	-	90%	알고리즘 개발 최종 목표	7%
		특징추출 알고리즘	10개	10개	알고리즘 개발 최종 목표	5%
		위치추정 알고리즘	최대 측정거리 10% 이내	최대 측정거리 10% 이내	세계 최고 수준 동등 이상	5%
	PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축	불량 사례 분류	-	5개	알고리즘 개발 초기 목표	10%
		현장 실증 데이터 누적 기간	-	3개월	진단 평가를 위한 최소 수집 기간	10%
	테스트베드 교량 내부 텐던 검사 및 진단 수행	검사장비 측정 범위	-	5m	콘크리트 감쇠 특성 고려	5%
		검사장비 응답 시간	-	1분 이내	알고리즘 연산 시간 고려	5%
		검출 신뢰도	-	90%	알고리즘 개발 최종 목표	6%
		특징추출 알고리즘	10개	10개	알고리즘 개발 최종 목표	12%
		진동 내구성	IEC-60068-2 만족	IEC-60068-2 만족	옥외 장비 일반	7%
		검사절차 적성성	-	적정함	실사용처 의견 수렴	5%
		검사 필요 인원	-	2명	실사용처 의견 수렴	1%
	PSC 거더교 상태진단 기준 수립	기존 방식 대비 점검 효율성 및 경제성 (유지관리 매뉴얼)	-	30% 이상 절감	기존 방식 대비 손상 검출 유무 및 생애주기 비용 비교	12%

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

2-1. 연차별 연구개발과제 수행 과정 및 수행 내용

○ 1차년도

- PSC 거더교 내부 텐던 실험 환경 구축

1) 실내에서 실험이 가능한 소형 PSC 실험체 제작 및 불량 사례 재현

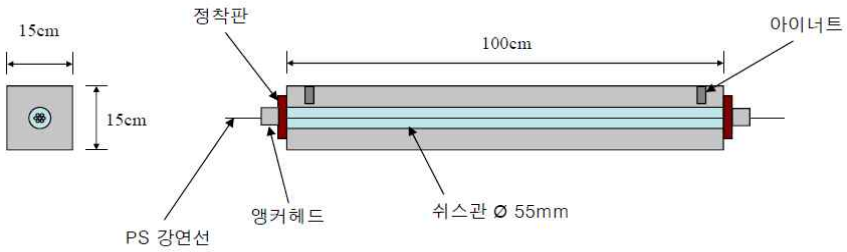


그림 1 소형 PSC 실험체 제작

표 1 소형 PSC 실험체 제원

실험체 명칭	단면 제원 [mm]			손상종류
	길이	폭	높이	
PSC-1	1000	150	150	무손상
PSC-2	1000	150	150	강연선 손상1
PSC-3	1000	150	150	강연선 손상2
PSC-4	1000	150	150	그라우팅 공극
PSC-5	1000	150	150	강연선 부식
PSC-6	1000	150	150	강연선 무보강

AE 진단 시스템 성능평가를 위하여 위와 같은 사양으로 실험체를 제작 하였다

2) 음향방출 모니터링이 가능하도록 센서와 계측장비를 구성

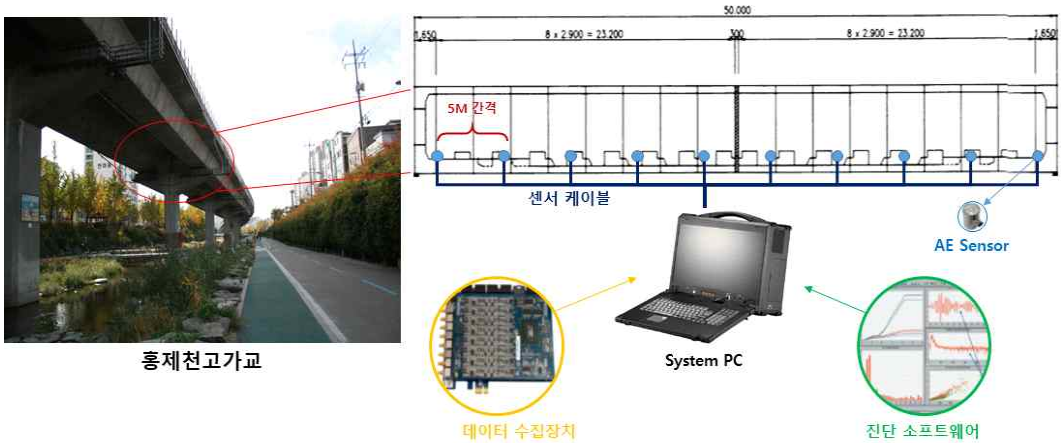


그림 2 음향방출 모니터링 시스템 개요

음향방출계측 시스템은 기본적으로 고속데이터 수집장치(PCI 카드 타입)와 이를 사용하기 위한 PC, AE센서로 구성된다.

AE센서의 경우 별도의 Pre-Amplifier를 필요로 하는 타입도 있으나 본 연구에서 구성한 시스템에서는 센서 내장형을 기본으로 한다. PC의 경우 PCI 카드를 장착할 수 있다면 특별히 제약되는 사양은 없으나, 음향방출 데이터를 실시간으로 수집하고 분석할 수 있는 기본적인 연산능력과 메모리 용량이 요구된다(아래 상세 사양 참조).

표 2 AE 시스템용 PC 상세 사양

기본 요구 사양	PCI Express 슬롯 : 1개 이상 CPU : 2GHz 이상, 쿼드코어, 동등 이상 RAM : 8GB 이상
추가 요구 사양	SSD 포함 고사양 그래픽 카드 (그래프 실시간 출력) PCI Express 16배속
선택 사양	1TB 이상의 저장 공간 상시 운용 시 RACK 타입의 산업용 PC 사용 추천

표 3 고속데이터 수집장치 상세 사양

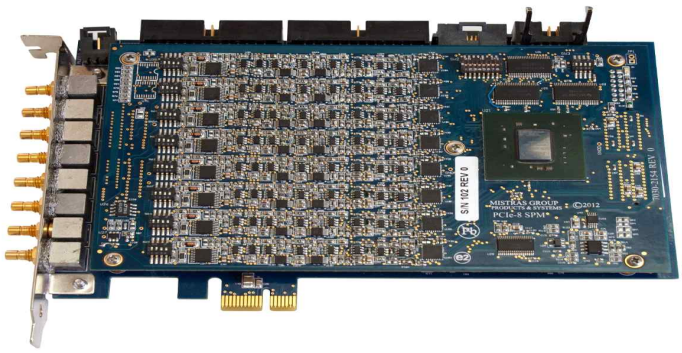
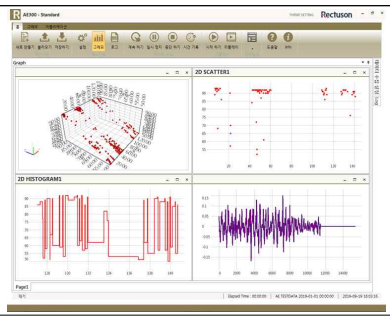
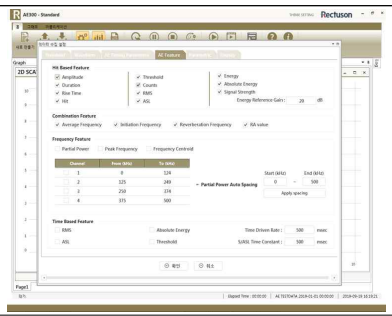
AE채널	8채널(SMB 커넥터) 대역폭 : 1kHz ~ 1.2MHz 분해능 : 16bit 샘플링 속도 : 10MSPS 18bit 256tap digital FIR Filter Waveform Streaming(연속적인 RAW Data 수집) 기능 포함
PARAMETRIC	8채널 입력범위 : ±10V 분해능 : 16bit 샘플링 속도 : 10kSPS Digital I/O : 각 8채널 Analog Output : 4채널(0~10V)
제품 형상	

표 4 진단 소프트웨어 상세 사양

소프트웨어 형상	 
소프트웨어 기능	▪ 하드웨어 컨트롤 기능 ▪ 실시간 데이터 수집 기능 ▪ 실시간 그래프 출력 기능 ▪ 리플레이 및 추가 분석 기능 ▪ 데이터 출력 기능

3) PSC 실험체에서 탄성파 신호를 유도하기 위한 외부 신호 가진 장비 구축



그림 3 유도 초음파를 이용한 PSC 구조물 실험

PSC 실험체에서 탄성파 신호를 유도하기 위한 외부 신호 가진 장비를 구축하기에 앞서 외부 신호 가진에 의해 AE 센서에서 의미 있는 신호가 계측되고, 이 신호가 내부 텐던 결함에 따른 분명한 차이를 가지는가를 확인하기 위해 기초 실험을 진행하였다.

PSC 구조물 실험체는 내부 긴장재 타입의 PSC보이며, 총3개의 실험체 중 텐던 내부에 파단이 있는 손상 PSC보와 무손상 PSC보 2개에 대한 비교실험을 수행하였다. 유도 초음파를 인가하였을 때와 외부에서 해머를 이용해 타격을 가했을 때의 음향방출 신호 특성을 분석하고 이를 통해 이미 손상이 발생한 텐던에 대한 검출이 가능성을 확인하였다.

표 5 PSC 구조물 실험체 제원

실험체 명칭	단면 제원			텐던 배치			손상종류
	길이	폭	높이	무손상	손상	소계	
PSC-1	6,350	300	600	2	0	2	-
PSC-2	6,350	300	600	0	2	2	기계손상*
PSC-3	6,350	300	600	0	2	2	부식**

PSC 구조물 실험체의 상세 제원은 위와 같다. 이중 1번과 2번 PSC 구조물에 대하여 실험을 진행하였다.



그림 4 센서 설치 위치 및 유도 초음파 발생 위치, 해머 타격 위치

결함이 예상되는 위치 주변을 사각형 형태로 센서를 배치하고, 유도 초음파 발생 및 해머를 이용한 타격을 위 그림과 같은 배치로 실시한다.

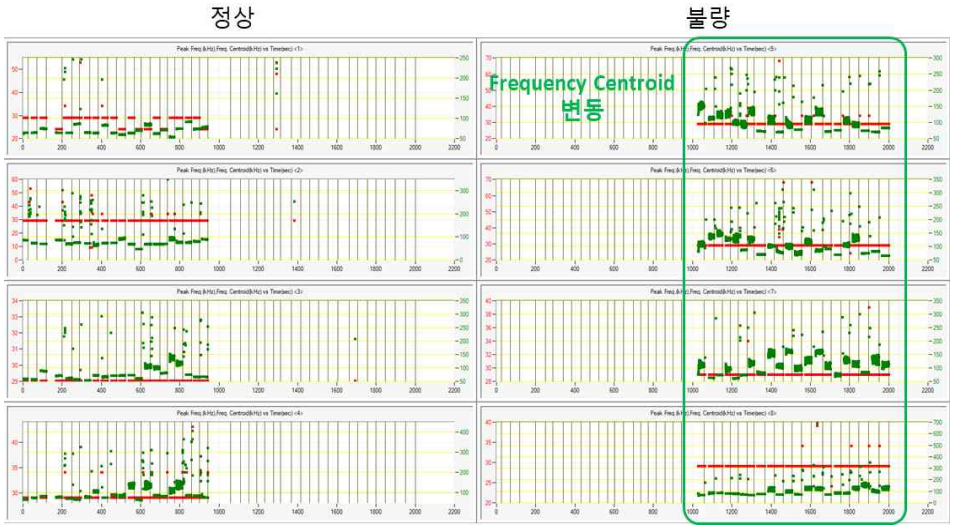


그림 5 결함 영역 집중 실험 - Frequency Centroid

Frequency Centroid는 주파수 스펙트럼을 하나의 도형으로 가정하였을 때, 무게 중심점에 해당하는 지점의 주파수를 나타낸다. 위 그래프와 같이 측정된 Frequency Centroid가 대체로 50kHz 부근에서 고르게 분포하는 채널은 무손상 PSC 실험체에 설치된 채널이고, 반대로 Frequency Centroid가 100kHz 이상의 고주파 대역에서 약 50kHz에 걸쳐 넓게 흩어져 분포하는 채널은 손상 PSC 실험체에 설치된 채널이다.



그림 6 센서 설치 위치 및 유도 초음파 발생 위치

유도 초음파 발생 장치를 윗면, AE 센서를 아랫면에 위의 그림과 같이 설치한다. 서로 PSC 구조물을 사이에 두고 마주 보는 형태로 설치한다. 해당 실험은 손상 PSC 구조물만을 대상으로 하며, 유도 초음파 발생 장치와 센서를 등 간격으로 이동시키면서 결함 예상 위치와 그 외의 위치에서의 신호 특성 차이를 확인한다.

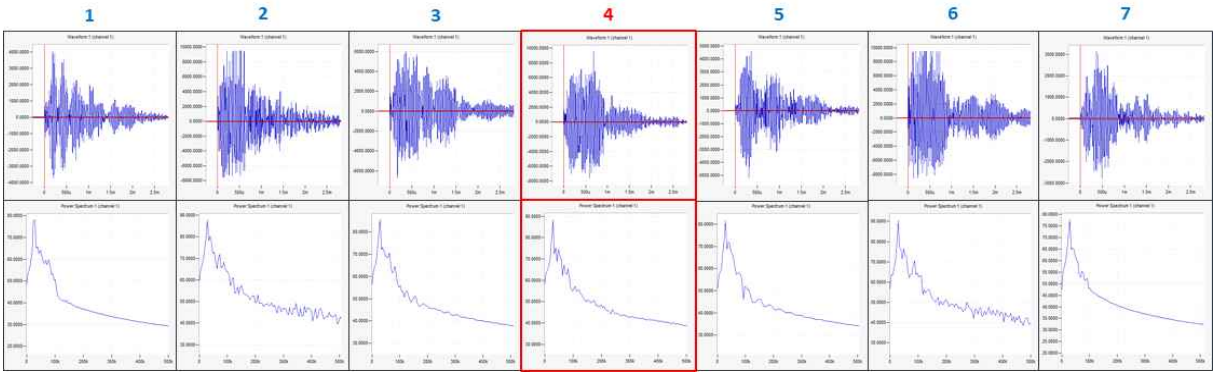


그림 7 센서 설치 위치 별 AE 신호

7개의 센서 설치 위치 모두 세부적인 신호 특징에서 차이는 가지고 있으나 신호 크기나 특징 주파수에서 눈에 띄게 두드러지는 특징 없는 것으로 판단되었다. 1차 실험에서 무손상 PSC 실험체와 손상 PSC 실험체를 비교하였을 때 Frequency Centroid에서 차이를 보인 것은 콘크리트 자체 매질 때문으로 추정되며, 결함에 의한 신호 변동은 아니었다고 판단된다.

실험 결과에 따라 외부에서의 새로운 신호를 인가하고, 이 신호가 결함에 의해 왜곡이 되는 것을 계측함으로써 내부 텐던의 결함을 찾아내겠다는 관점은 잘못된 것으로 판단되었으며, 내부 텐던 결함 검출 방법을 다른 측면에서 재검토하였다.

- PSC 거더교 내부 텐던 진단을 위한 음향방출 기술 정립 및 검사 장비 설계

1) 실험 결과 비교 분석을 통한 탄성파 신호 유도 방안 수립

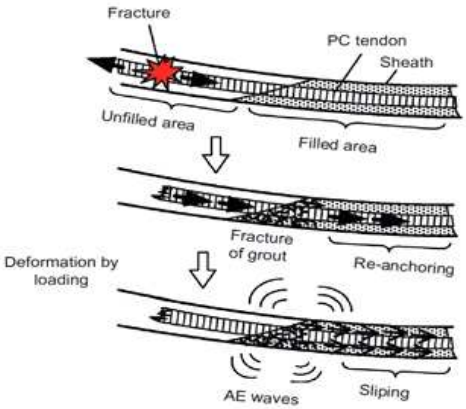


그림 8 Tendon 내부 Sencondary AE Activity 발생 원리

외부 신호 가진을 이용해 탄성파 신호를 임의로 유도하는 방법은 강재 덕트 안에 위치한 내부 텐던에 적용하기 어렵다는 판단하에 내부 텐던의 손상을 감지하기 위한 새로운 방법을 도출하였다.

Tendon 내부에 케이블 손상이 발생하였을 경우, 이로 인해 주변 그라우트 손상 또는 공극 부위에 대해 외부 하중으로 따른 케이블과 그라우트의 마찰 및 미세 손상 발생하고, 손상 발생 후 추가 외력 발생에 따라 2차 손상 발생 또는 발생된 손상에서의 마찰음에 의해 Secondary AE Activity가 발생한다.

따라서 Secondary AE Activity의 발생 유무를 일정 기간 동안 관찰함으로써 신규 결함이 아닌 기존의 발생한 결함의 존재 유무까지도 진단이 가능할 것으로 예상된다.

2) 음향방출기반 내부 텐던 검사 방안 정립 및 진단 알고리즘 개발

2-1) 음향방출기반 내부 텐던 검사 방안 정립

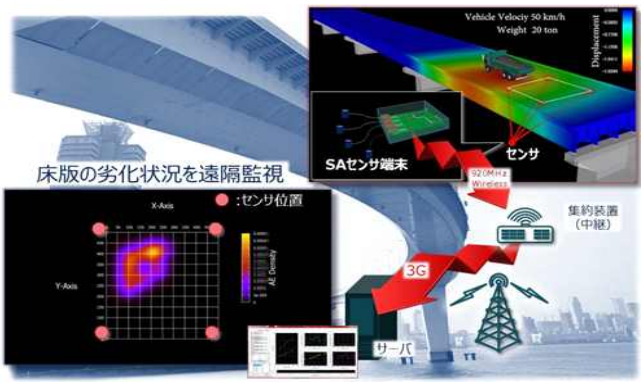


그림 9 Bridge Monitoring using Super AE sensor (Japan)

위 그림은 일본에서 실제 교량에 적용하기 위해 개발 중인 Super AE Sensor의 사례이다. 센서와 계측장치를 일체형으로 개발한 이 장치는 교량에 설치되어 차량 하중 변화 등에 의한 환경요인에 의한 물리적 거동을 계측하여 이상상태를 판별한다.

이와 같이 센서와 데이터 계측 장비가 일체형으로 또 소형화된 장치를 구현하여 검사가 필요한 PSC 교량에 설치하여 차량 하중 변화 등에 의한 환경요인에 의해 발생하는 신호를 계측할 뿐만 아니라 Secondary AE Activity의 발생 유무를 판별하여 PSC 교량 Tendon 내부에 결함의 유무를 판단한다.

본 과제를 통해 개발되는 내부 텐던 검사 장비의 상세 설계 및 기능 시험에 관련해서는 2-4)에서 보다 상세하게 기술한다.

2-2) 음향방출 특징추출 알고리즘

기본적인 음향방출 변수를 다음과 같이 정의하고, 이를 검사 장비 및 모니터링 시스템에 적용될 수 있도록 프로그램 언어로 구현하였다.

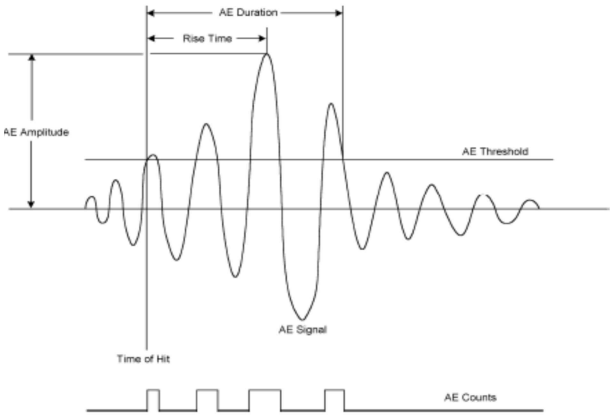


그림 10 AE Hit Driven Features Descriptions

(1) Time of Hit

하드웨어를 통해 검출되는 시간으로 AE 신호의 도달 시간. AE 신호가 Threshold 전압 레벨을 넘어서는 순간으로 정의된다. Threshold Crossing Time으로 명명되기도 한다.

(2) Amplitude

AE 신호의 Hit 1회 중 최대 Peak를 나타내는 것. 최대 Peak가 dB 스케일로 표현되므로 양의 전압인가, 음의 전압인가와는 상관없이 온전히 신호의 Peak 크기만을 나타낸다.

ex) Pre-Amplifier 40dB, AE 신호의 최대 Peak가 1V, Amplitude 80dB

(3) RMS

Root Mean Square Value. AE 신호 전압을 실효치로 나타낸 변수. 연속 특성을 가지는 신호의 크기 변화를 확인하기에 용이하다.

(4) ASL

Average Signal Level. 위의 RMS 항목을 dB 스케일로 표현한 변수. 작은 변화를 크게 확인할 수 있는 dB 스케일의 특성 상 미세한 신호 크기 변화를 비교하기에 용이하다.

(5) Energy

AE 신호 크기를 1회 Hit에 대한 전기적 에너지로 표현한 변수. 단위는 aJ. 1회 Hit에 해당하는 AE 신호 전압의 절대치를 적분한 결과. 최대 변수 크기가 2Byte로 제한되므로 최대 표현 가능한 값은 65536[aJ].

(6) Count

AE 신호 전압이 1회 Hit 동안 Threshold를 넘어선 횟수. 신호 유지 시간(Duration) 또는 신호 에너지(Energy)와 연관성을 가진다.

(7) Rise Time

Time of Hits(혹은 Threshold Crossing Time)로부터 AE 신호의 최대 Peak에 도달하는데 걸리는 시간을 나타내는 변수. 단위는 usec.

(8) Duration

AE 신호의 신호 유지 시간을 나타내는 변수. 단위는 usec. Time of Hits(혹은 Threshold Crossing Time)로부터 AE 신호 1회 Hit가 종료에 이르기까지의 시간으로 정의된다.

(9) Count to Peak

Rise Time 동안 AE 신호가 Threshold 전압을 넘은 횟수.

(10) Average Frequency

kHz 단위로 기록되는 이 변수는 AE 신호 1회 Hit에 포함되어 있는 모든 주파수 성분의 평균 주파수로 정의된다. 이는 다음 두 변수의 관계식으로 유도된다.

(Count) / (Duration)

(11) Initiation Frequency

kHz 단위로 기록되는 이 변수는 AE신호 중 Rise Time까지의 신호에 포함된 주파수 성분의 평균 주파수로 정의된다. 이는 다음 두 변수의 관계식으로 유도된다.

(Count to Peak) / (Rise Time)

(12) Reverberation Frequency

kHz 단위로 기록되는 이 변수는 AE신호 중 Rise Time을 제외한 나머지 시간에 포함된 주파수 성분의 평균 주파수로 정의도니다. 이는 다음 변수들의 관계식으로 유도된다.

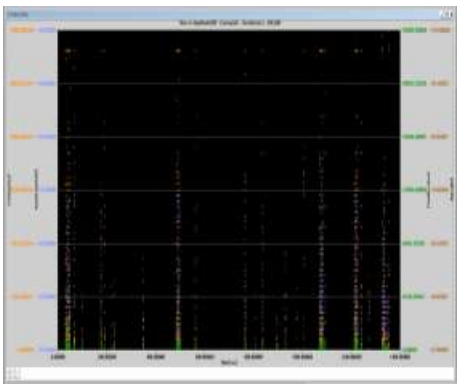
(Count - Count to Peak) / (Duration - Rise Time)

(13) Signal Strength

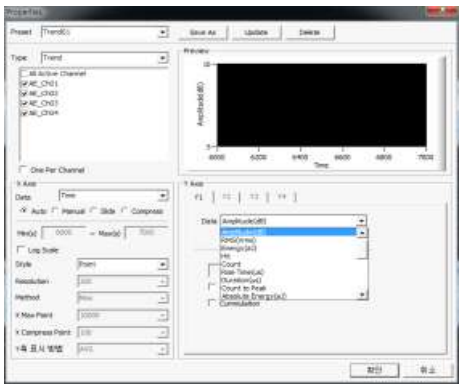
AE 신호 전압을 정류한 파형을 수학적으로 적분한 것으로 정의된다. 증폭비에 독립적이라는 점을 제외하면 Energy와 유사한 변수이다.

(14) Peak Frequency

Power Spectrum(신호의 주파수 변환 그래프)의 Peak 지점의 주파수를 수치로 나타낸 변수.



Trend 그래프



그래프 출력 데이터 설정

Ch	Time	Amplit	RMS(Vrms)	Energy(aJ	Hit	Count	Rise Time(us)	Duration(us)	Absolute	Signal Str	ASL(dB)	Average	Reverberation	Initiati
2	0.018437	110	1.1	65535	1	4552	32889	196373	1.18E+10	2.97E+09	83	23	24	
1	0.02059	109	1.24	65535	1	4540	28117	186147	1.6E+10	3.59E+09	84	24	20	
1	0.208681	85	1.28	3200	1	26	1867	4850	14752810	20355090	85	5	4	
1	0.215411	85	1.3	2500	1	16	2764	3919	11471455	16077160	85	4	4	
2	0.216701	89	1.16	15400	1	137	9687	22602	71551616	96511456	84	6	6	

특징 변수 저장 데이터 포멧

그림 11 분석 소프트웨어에서의 특징 변수

그림과 같이 Trend 그래프를 통해 실시간으로 특징 변수들을 확인할 수 있다. 또한 위와 같이 AE 변수들을 별도의 데이터 포맷으로 저장하고 있고, 이를 프로그램에서 다시금 불러와 분석하거나, 별도의 후처리 분석 프로그램에의 데이터 전달 또한 가능하다.

2-3) 음향방출 위치추정 알고리즘

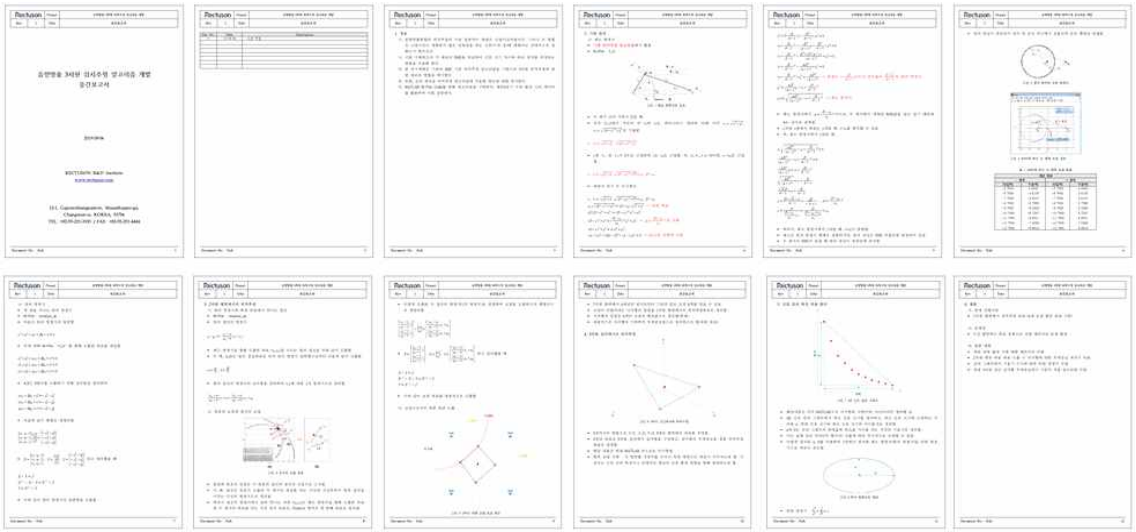


그림 12 위치추정 알고리즘 개발 보고서

음향방출방법의 위치추정의 가장 일반적이 방법은 도달시간차법이다. 그러나 이 방법은 도달시간이 명확하지 않은 연속성을 띠는 신호(누설 등)에 대해서는 상대적으로 정확도가 떨어진다.

이를 극복하고자 각 채널의 RMS를 비교하여 신호 크기 차이에 따라 위치를 추정하는 방법을 사용해 왔다. 해당 알고리즘은 기존의 RMS 기반 위치추정 알고리즘을 기반으로 음향방출 위치추정에 대한 새로운 방법을 제시한다.



그림 13 위치추정 알고리즘 검증 실험

위 사진은 개발된 위치추정 알고리즘에 대한 검증 실험 장면이다. 가로 230mm, 세로 130mm의 콘크리트 블록에 아래와 같이 4개의 AE 센서를 설치하고, 총 4지점에서 PLB(Pencil Lead Break) 테스트 시행한다. 1지점 당 총 10회의 PLB 테스트를 수행하여 결과를 비교한다.

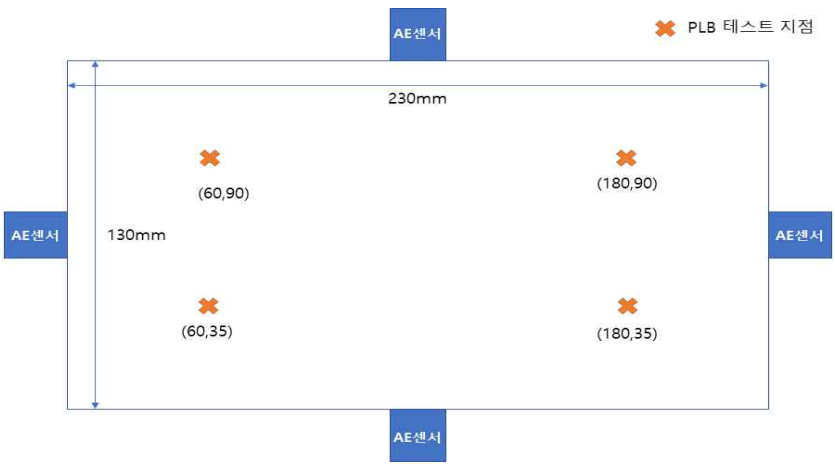


그림 14 위치추정 알고리즘 검증 실험을 위한 센서 배치 및 PLB 실행 지점

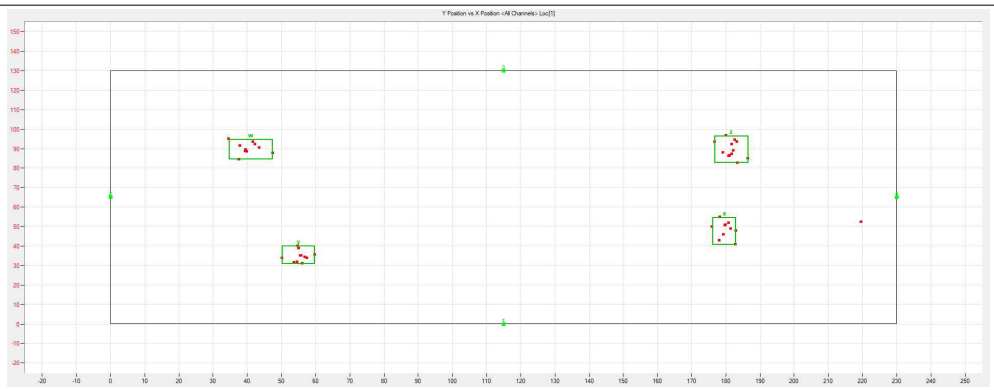


그림 15 소프트웨어 화면 상의 위치추정 결과 화면 표시

다음은 4개 지점, 10회에 대한 계측 결과와 실제 PLB 지점과의 오차를 나타낸다. 오차율은 센서 간 최대 거리의 5%(11.5㎜) 이하를 기준으로 하고 있으며, 목표 오차 범위를 벗어난 결과에 대해서는 진단 실패로 간주한다.

표 6 위치추정 알고리즘 검증 결과1 (단위:㎜)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	180.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)	60.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)
1	181.90	1.90	38.97	3.97	56.97	-3.03	33.02	-1.98
2	186.90	6.90	50.00	15.00	55.95	-4.05	32.18	-2.82
3	183.90	3.90	42.44	7.44	199.4	139.40	69.4	34.40
4	189.40	9.40	38.84	3.84	57.37	-2.63	31.29	-3.71
5	182.90	2.90	35.95	0.95	57.07	-2.93	31.8	-3.20
6	188.80	8.80	34.10	-0.90	56.14	-3.86	33.78	-1.22
7	189.80	9.80	34.30	-0.70	65.79	5.79	26.88	-8.12
8	184.60	4.60	41.84	6.84	68.16	8.16	34.33	-0.67
9	187.50	7.50	38.33	3.33	58.85	-1.15	34.46	-0.54
10	185.80	5.80	44.94	9.94	57.54	-2.46	30.88	-4.12
검출 신뢰도	9/10회 검출, 90%				9/10회 검출, 90%			

표 7 위치추정 알고리즘 검증 결과2 (단위:㎜)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	60.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)	180.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)
1	56.7	-3.30	91.48	1.48	180.20	0.20	87.04	-2.96
2	52.69	-7.31	81.74	-8.26	181.60	1.60	88.32	-1.68
3	17.04	-42.96	90.09	0.09	179.40	-0.60	89.19	-0.81
4	35.22	-24.78	76.03	-13.97	188.00	8.00	82.88	-7.12
5	54.35	-5.65	90.67	0.67	182.30	2.30	92.61	2.61
6	48.36	-11.64	89.28	-0.72	183.00	3.00	82.49	-7.51
7	57.95	-2.05	88.18	-1.82	183.50	3.50	90.88	0.88
8	65.13	5.13	90.52	0.52	186.50	6.50	84.01	-5.99
9	56.89	-3.11	86.96	-3.04	185.10	5.10	93.66	3.66
10	63.02	3.02	92.86	2.86	184.20	4.20	86.25	-3.75
검출 신뢰도	7/10회 검출, 70%				10/10회 검출, 100%			

4개 지점에 대한 실제 신호 발생 대비 검출 신뢰도는 각각 90, 90, 70, 100%이며, 평균 87.5%의 검출 신뢰도를 가진다.

해당 결과는 실험실 조건의 임의 신호(PLB)에 대한 검출 결과이므로 차년도 연구개발에서는 실제 PSC 텐던의 결함 신호에 대한 검출 신뢰도를 높여나가고, 검증할 필요가 있다.

2-4) 내부 텐던의 강연선 파단 신호 판별을 위한 하중 실험

(1) 실험개요



그림 16 PSC 구조물 하중 실험

2019년 9월 26일 국립경상대학교 가좌캠퍼스(경남 진주)에 구비된 UTM 설비를 이용하여 PSC 실험체에 대한 하중 실험을 진행하였다. PSC 실험체에 대한 반복 하중 시험과 인장 파괴 시험, 두 단계에 걸쳐 시험을 수행하고, 하중 변화에 따른 PSC 구조물의 물리적 거동을 관측하였다. 본 시험은 PSC 구조물의 텐던(긴장재)을 구성하는 강연선의 파단의 발생 유무를 AE를 이용해 계측, 진단하는 것을 목적으로 한다.

(2) PSC 구조물 실험체 및 센서 설치 사진

표 8 PSC 구조물 실험체 제원 (단위 : mm)

실험체 명칭	단면 제원			텐던 배치			손상종류
	길이	폭	높이	무손상	손상	소계	
PSC-1	6,350	300	600	2	0	2	-
PSC-2	6,350	300	600	0	2	2	기계손상*
PSC-3	6,350	300	600	0	2	2	부식**

PSC 구조물 실험체의 상세 제원은 위와 같다. 이 중 이번 실험에서는 2번 기계손상 실험체에 대하여 실험을 진행하였다.



그림 17 AE 센서 설치 사진

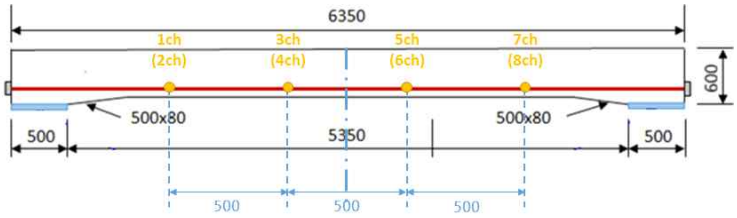


그림 18 AE 센서 설치 레이아웃

PSC 구조물 실험체에 대한 AE 센서는 위와 같이 설치되며, 상세 설치 사진은 다음과 같다.

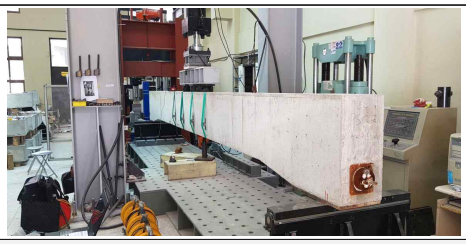
<table>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>전체 설치 사진1</td><td>전체 설치 사진2</td></tr>
<tr><td>  </td><td>  </td></tr>
<tr><td>세부 센서 설치 사진 (정면/1,3,5,7채널)</td><td>세부 센서 설치 사진 (후면/2,4,6,8채널)</td></tr>
</table>

그림 19 상세 AE 센서 설치 사진

(3) 실험 절차

(3-1) 반복 하중 시험

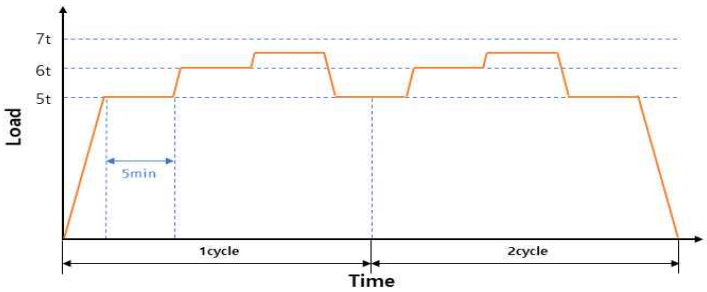


그림 20 반복 하중 시험 계획

- 5톤 → 6톤 → 6.5톤(한계 하중 13톤의 50%) 순으로 하중 증가
  (한계 하중의 50% 수준에서부터 콘크리트 균열 발생 예상)
- 각 하중 구간에서는 5분간 상태 유지
- 6.5톤 → 5톤으로 하중 제거 후 5분간 상태 유지
- 다시 한 번 하중 증가 사이클을 반복하고, 하중 제거 후 5톤에서 5분간 상태 유지
- 하중을 완전히 제거하고, 시험 종료

(3-2) 인장 파괴 시험

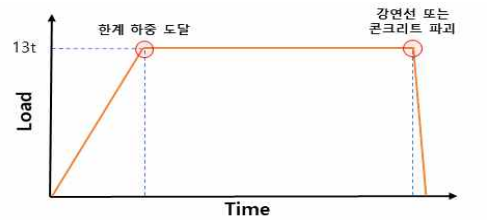


그림 21 인장 파괴 시험 계획

- 한계 하중(13톤)까지 하중을 증가
- 강연선 파단 또는 콘크리트 파괴가 발생할 때까지 하중 유지
- 강연선 파단 또는 콘크리트 파괴 발생 시 시험 종료

(4) 실험결과

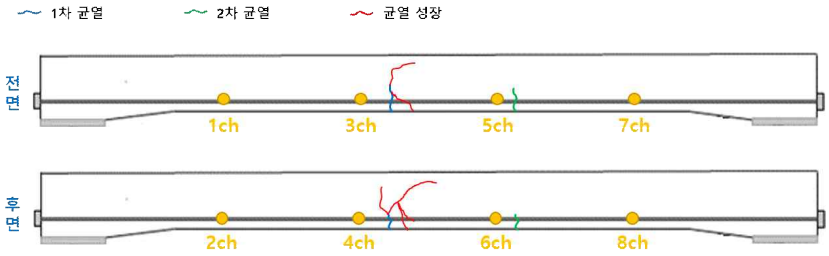


그림 22 콘크리트 균열 발생 경향

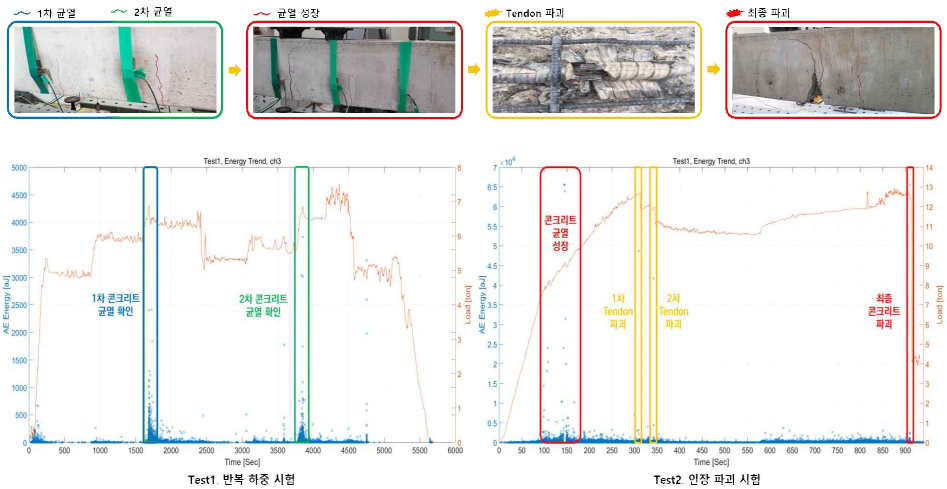


그림 23 하중 변화에 따른 AE Energy Trend

반복 하중 시험 중 최대 하중(6.5ton) 도달 시 2차례에 걸쳐 콘크리트 표면 균열이 확인되었고, 해당 시점에서 노이즈 레벨 대비 1000aJ 이상 큰 AE Energy가 계측되었다.

인장 파괴 시험 시 약 8ton 하중에서부터 콘크리트 균열이 급격하게 성장하기 시작하였고, AE Energy는 10000aJ 이상의 매우 큰 값이 계측되었으며, 하중이 13ton에 도달했을 때, Tendon 내부 강연선이 파단되면서 약 50000aJ의 AE Energy가 돌발적으로 계측되었다.

이후 한 차례 더 강연선이 끊어진 시점과 최종적으로 콘크리트 파괴가 발생한 시점에서도 유사하게 큰 AE Energy를 확인할 수 있었다.

(4-1) AE Energy Trend

(4-1-1) 반복 하중 시험

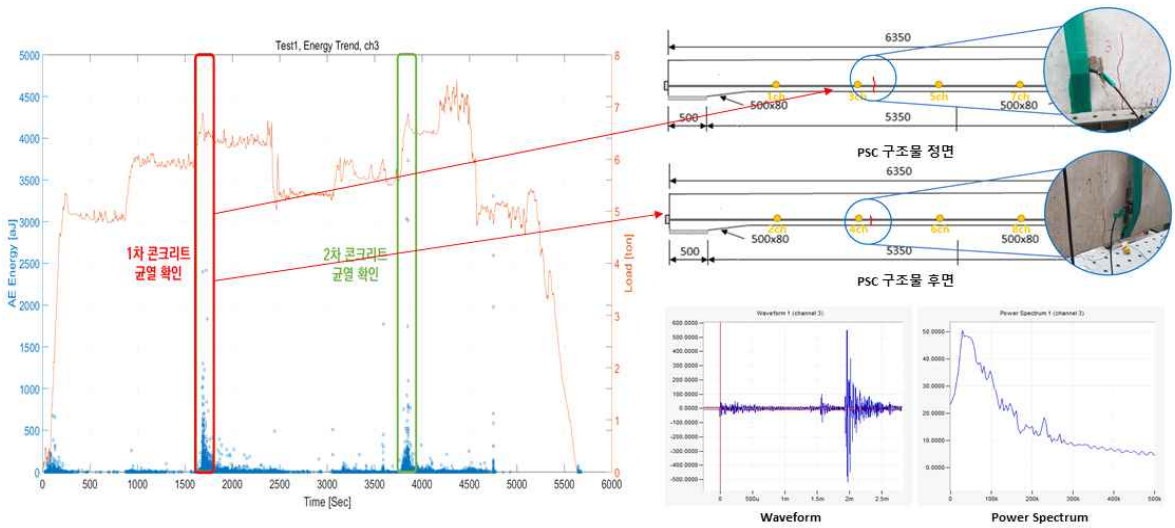


그림 24 AE Energy Trend 및 1차 콘크리트 균열 시점 Waveform (3ch)

최초 콘크리트 균열 발생은 하중이 6.5ton에 도달한 시점에서 발생하였으며, 한계 하중(13ton)의 50% 지점이다. 콘크리트 균열 발생 시 1000aJ 이상의 AE Energy의 다수 확인되었다. 시험 중 AE 신호는 전체적으로 30kHz 대역에 주 성분을 가지고 있으며, 콘크리트 균열 발생 시 100kHz 대역의 신호가 증가하는 것으로 확인되었다.

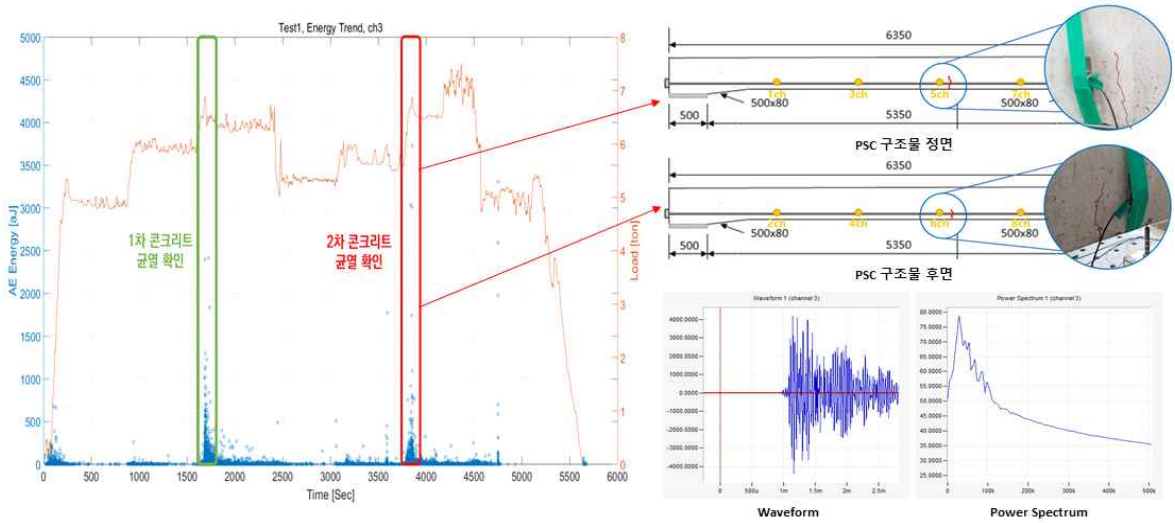
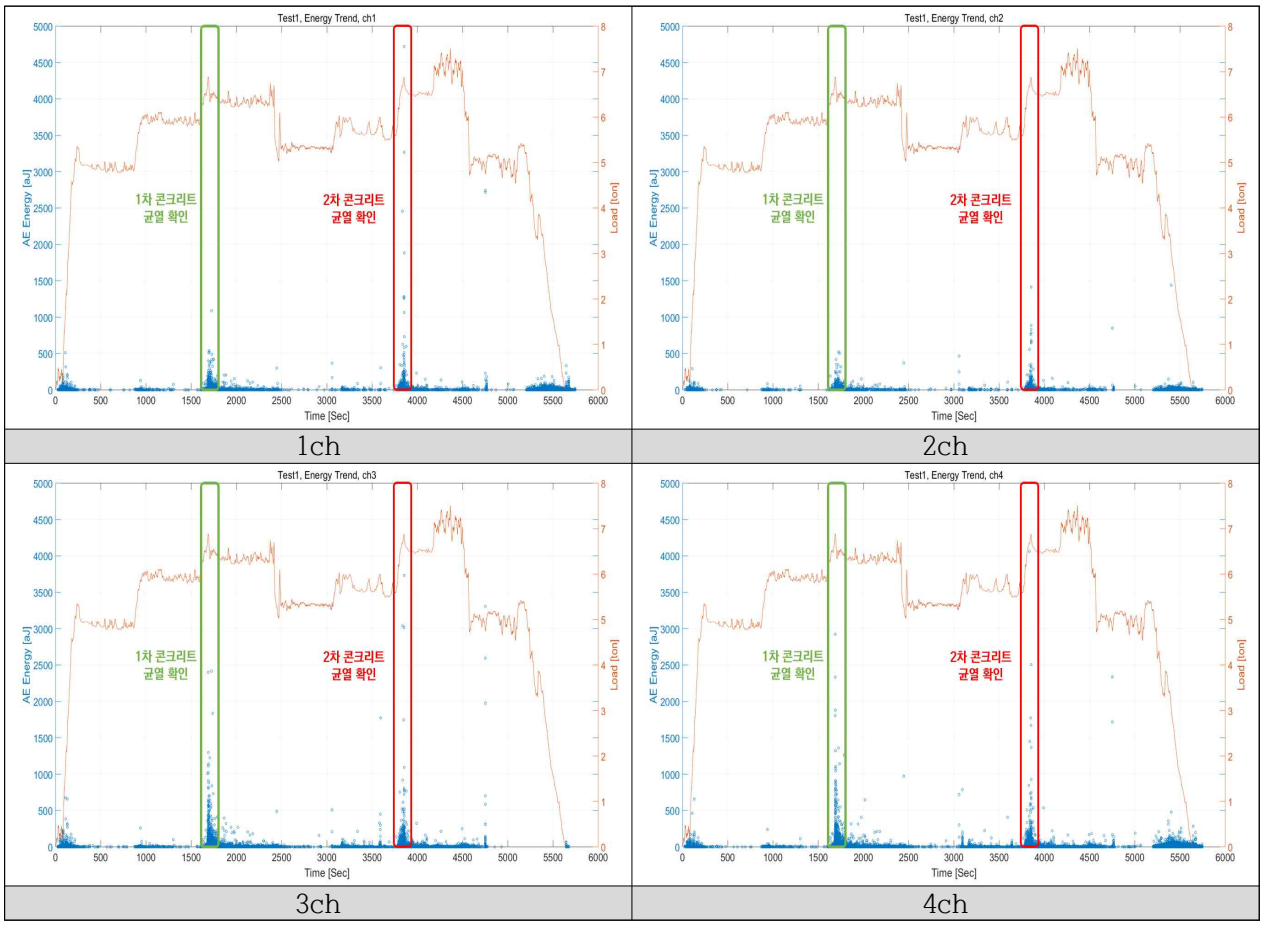


그림 25 AE Energy Trend 및 2차 콘크리트 균열 시점 Waveform (3ch)

2차 콘크리트 균열 발생은 2번째 사이클의 6.5ton에 도달한 시점에서 발생하였다. 콘크리트 균열 발생 시 1000aJ 이상의 AE Energy의 다수 확인되었으며, 최초 균열에 비해 신호의 크기나 빈도가 소폭 증가하였다. 콘크리트 균열 발생 시 100kHz 대역 외 60kHz와 80kHz에서의 추가 Peak가 확인되었다.



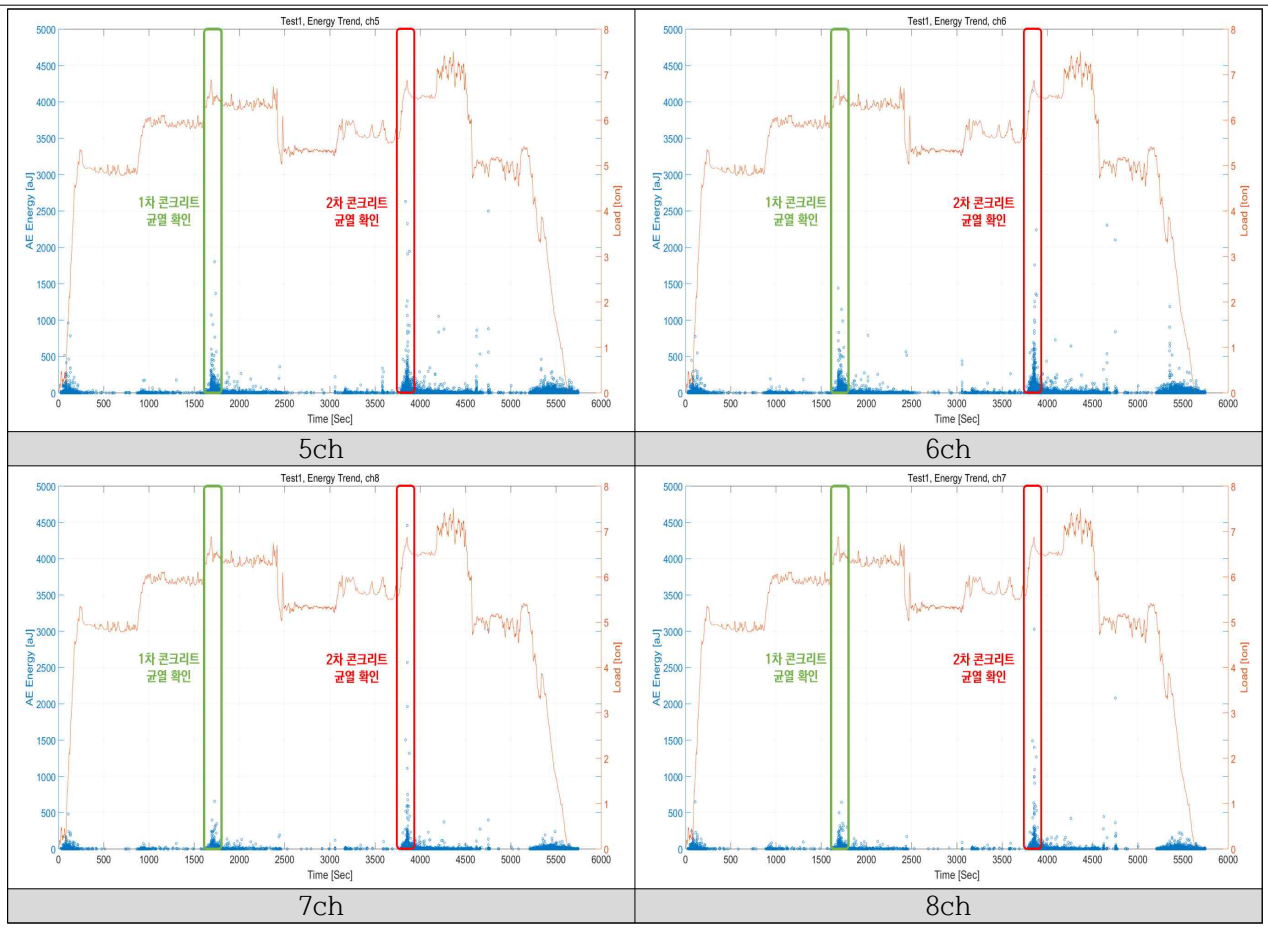


그림 26 반복 하중 시험 - AE Energy Trend

(4-1-2) 인장 파괴 시험

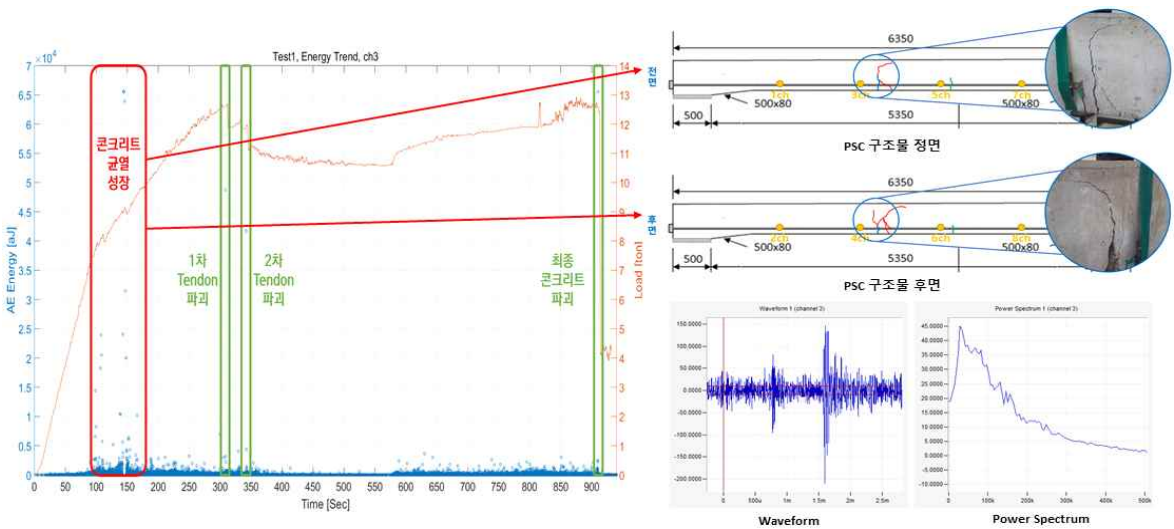


그림 27 AE Energy Trend 및 콘크리트 균열 성장 시점 Waveform (3ch)

2차 시험의 하중 증가 구간에서 콘크리트의 추가 균열 및 균열 성장 발생 시점에 대한 데이터이다. AE Energy가 10000aJ 이상으로 크게, 연속적으로 나타나는 경향을 보였으며, 이론상의 최대치(약65000aJ)를 기록하였다. 주파수 성분은 60~100kHz 구간의 주파수 성분이 평균적으로 증가하는 경향을 확인하였다.

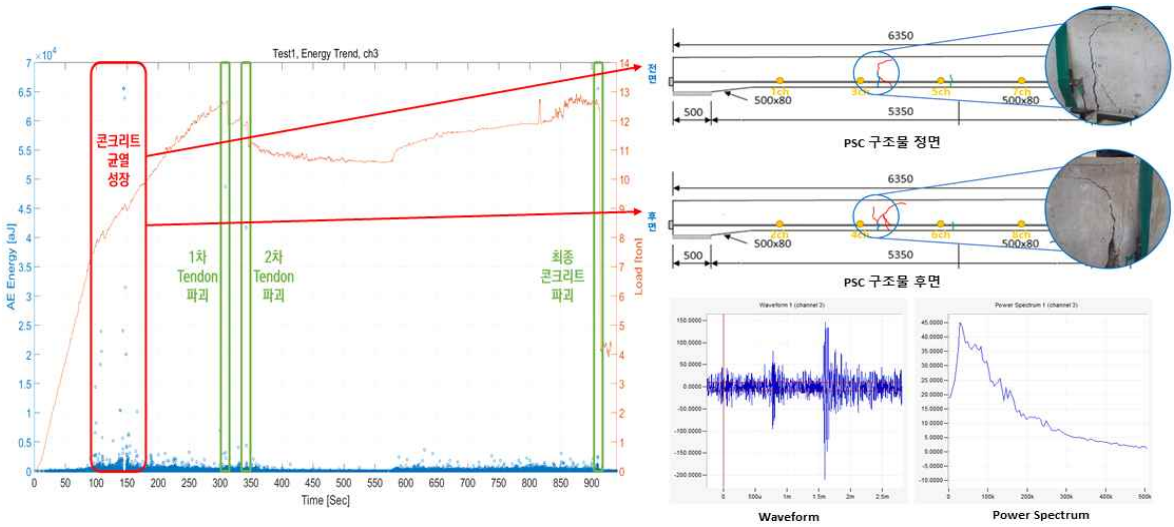


그림 28 AE Energy Trend 및 Tendon 파괴 시점 Waveform (3ch)

최대 하중(한계 하중) 도달 시 2차례에 걸쳐 Tendon 내 강연선 파단이 일어났다(사람의 귀에 소리가 들림). AE Energy는 콘크리트 균열 성장 시점에 비해 상대적으로 낮게(50000aJ) 나타났으나, 노이즈 레벨 대비 확연히 구분될 정도로 크게 나타났다. 주파수 성분은 강연선파단 시험과 유사하게 60kHz에서 Peak가 확인되었고, 200kHz이상의 고주파 영역에서 반복적인 Peak가 분포하였다.

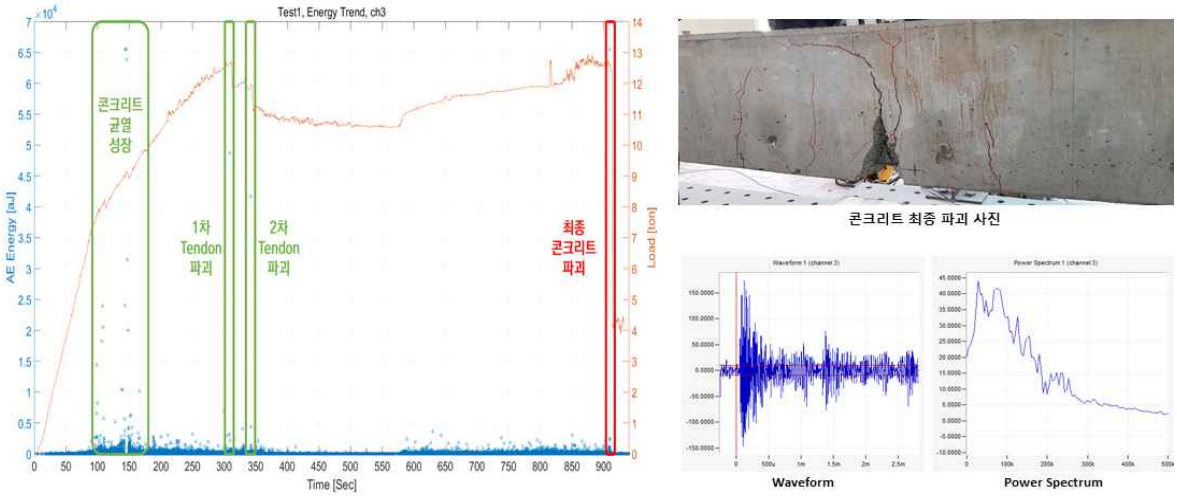


그림 29 AE Energy Trend 및 최종 콘크리트 파괴 시점 Waveform (3ch)

최종적으로 콘크리트 일부가 부서져 시험을 중단한 시점의 데이터이다. AE Energy는 이론상의 최대치(약 65000aJ)를 기록하였다. 주파수 성분은 80kHz 대역의 Peak가 두드러지게 나타나고, 120kHz, 150kHz에서 추가적인 피크가 확인되었다.

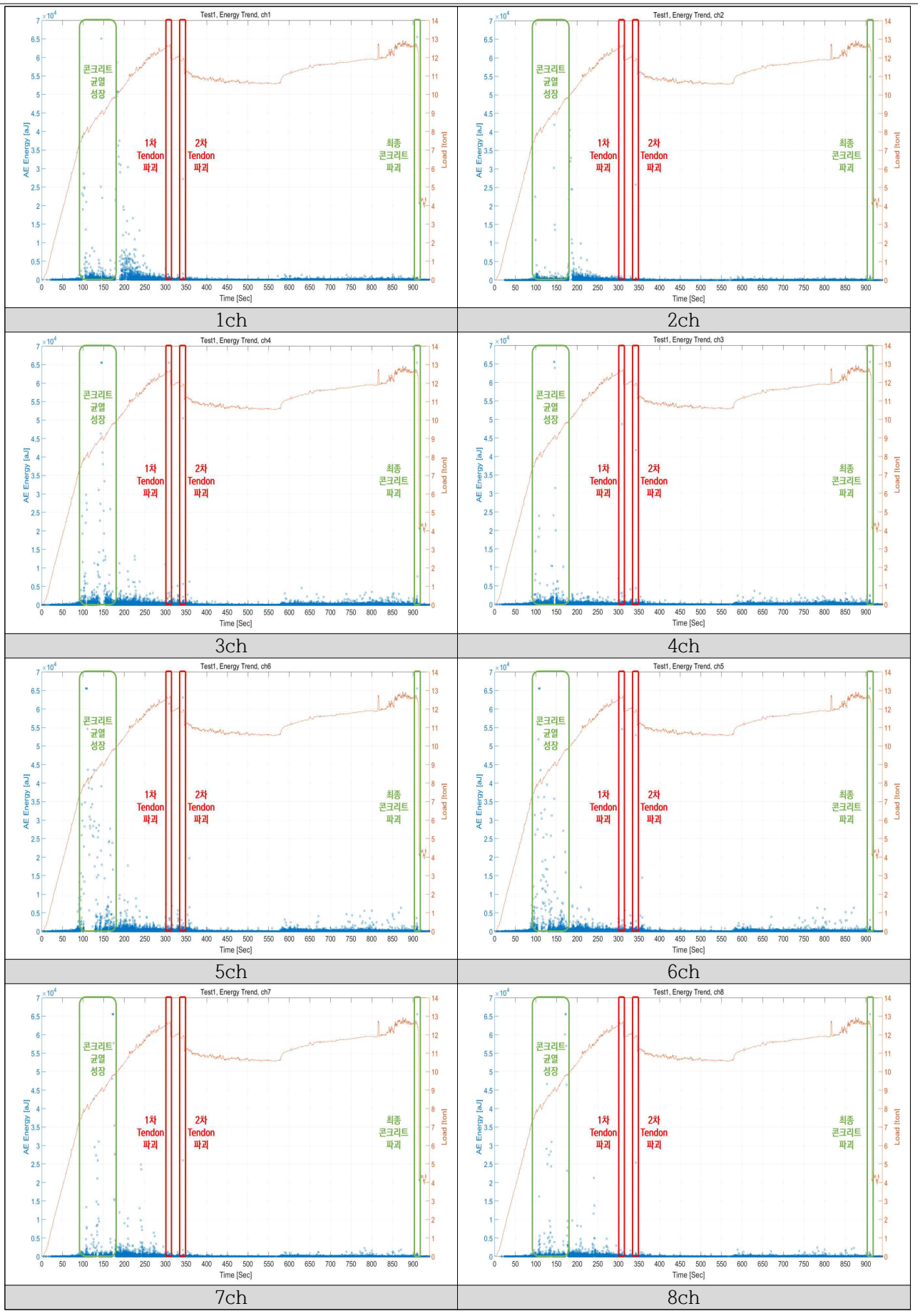


그림 30 인장 파괴 시험 - AE Energy Trend

(4-2) AE Energy Trend vs Ib value

(4-2-1) 반복 하중 시험

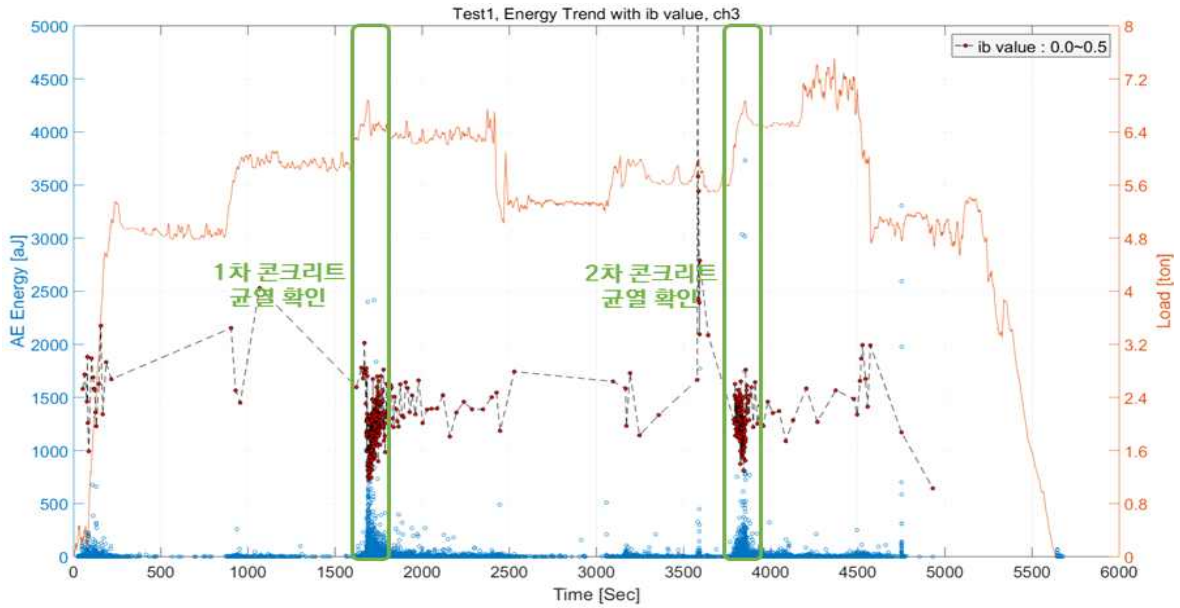
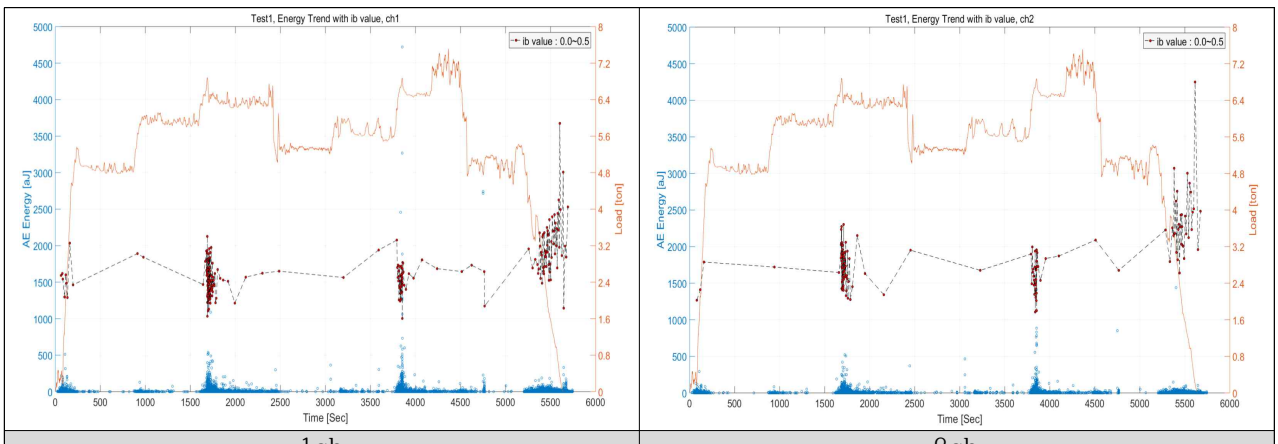


그림 31 반복 하중 시험 - AE Energy Trend vs Ib value (3ch)

Improved b value(이하 Ib value)는 일반적으로 암반의 붕괴 이전의 선제적인 거동이 있을 때, 0.04~0.06 이상의 증가 또는 감소하는 형태로 나타난다.

반복 하중 시험에서, 인가 하중이 6.5ton에 도달하여 콘크리트 균열이 발생하기 시작하는 시점에서 Ib value는 0.05~0.1 가량 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이는 콘크리트 표면 균열은 물론 내부로의 추가 균열 성장을 나타내는 것으로 판단된다.



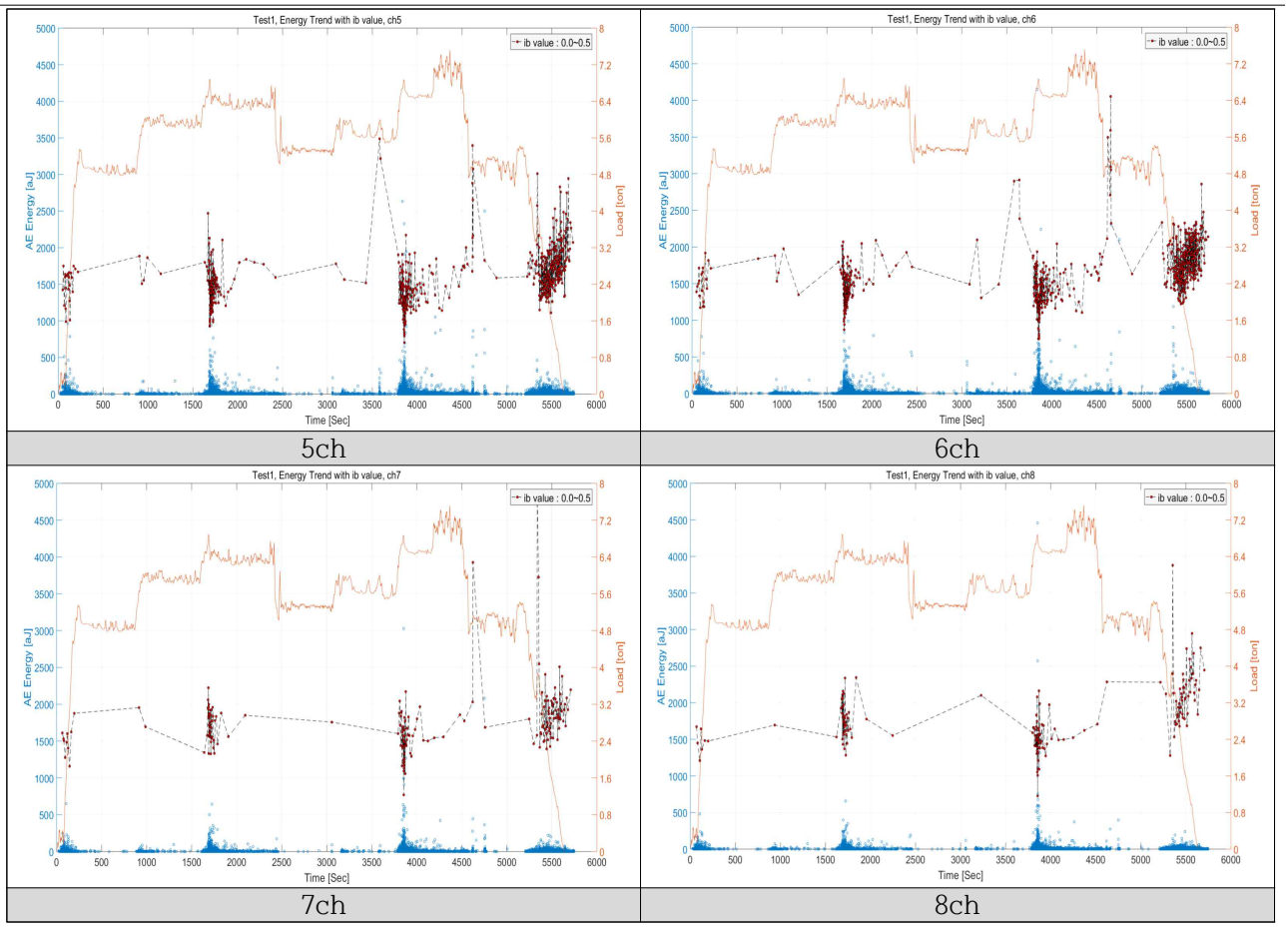


그림 32 반복 하중 시험 - AE Energy Trend vs Ib value

(4-2-2) 인장 파괴 시험

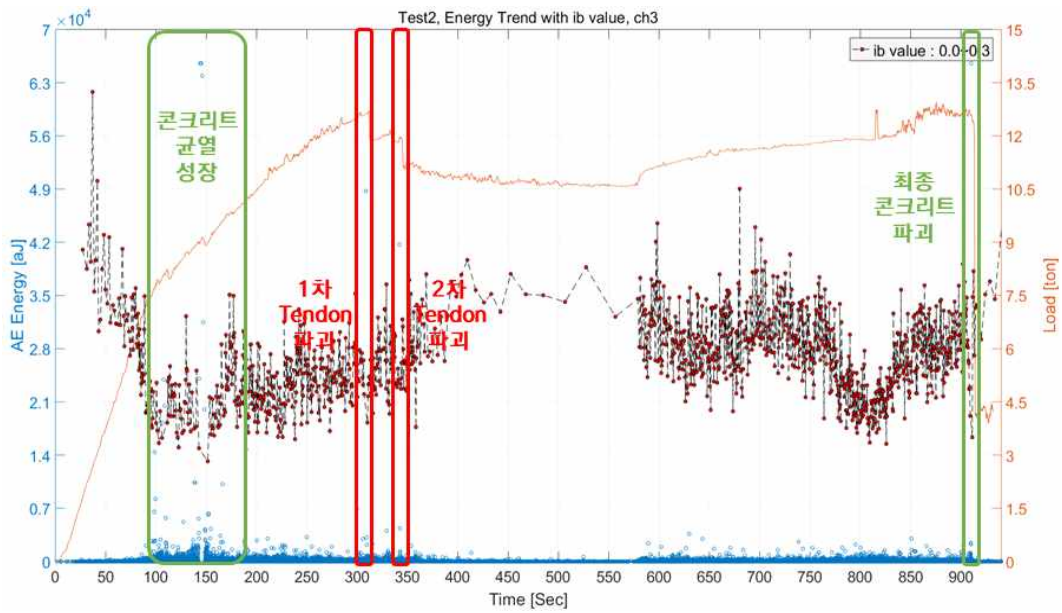
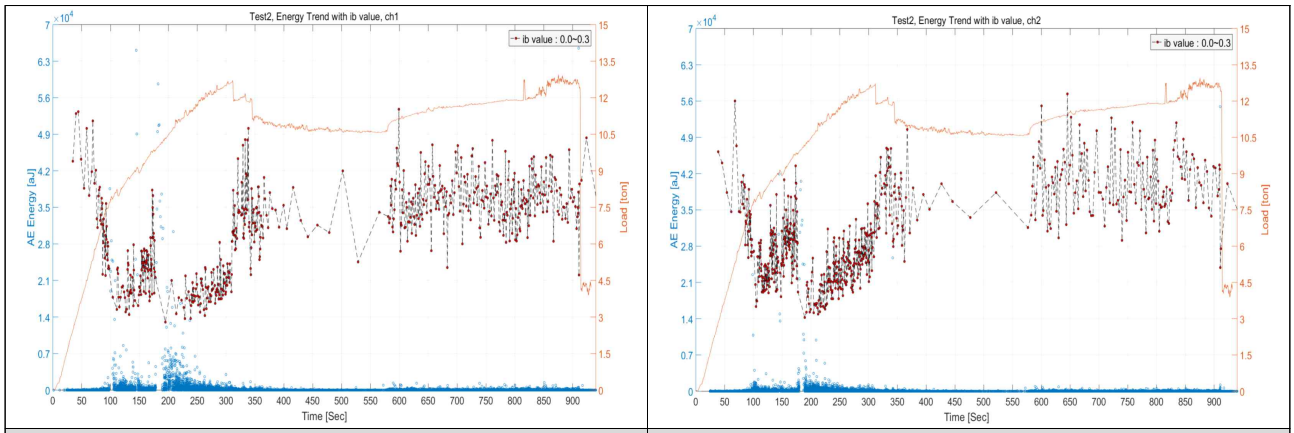


그림 33 인장 파괴 시험 - AE Energy Trend vs Ib value (3ch)

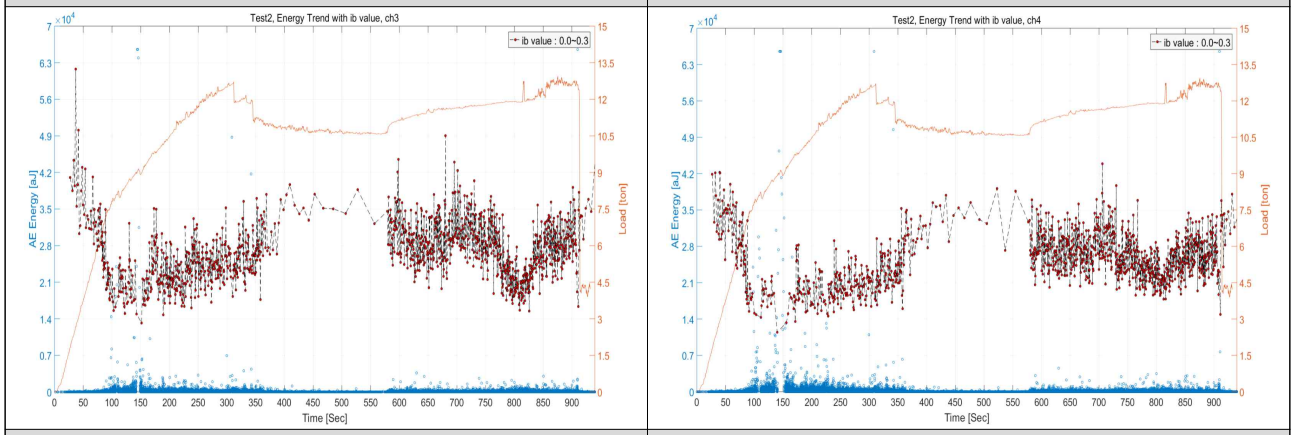
인장 파괴 시험에서는 하중이 인가되기 시작하면서 Ib value가 지속적으로 감소하는 경향을 보이며, 콘크리트 균열이 눈에 띄기 성장하기 시작하는 시점까지 최대 0.15 가량 감소하였다. 이후 대체로 일정한 값이 유지되다가 다시 최종 콘크리트 파괴 시점 직전에 약 0.06 정도 감소되는 경향이 확인되었다.

본 시험에서는 Tendon 내 강연선이 끊어지는 순간에는 특별한 변동을 보이지 않았다. Ib value는 콘크리트 균열 발생에 대해서는 진단 가능할 것으로 판단되나, 강연선 파단과는 무관하다고 판단된다.



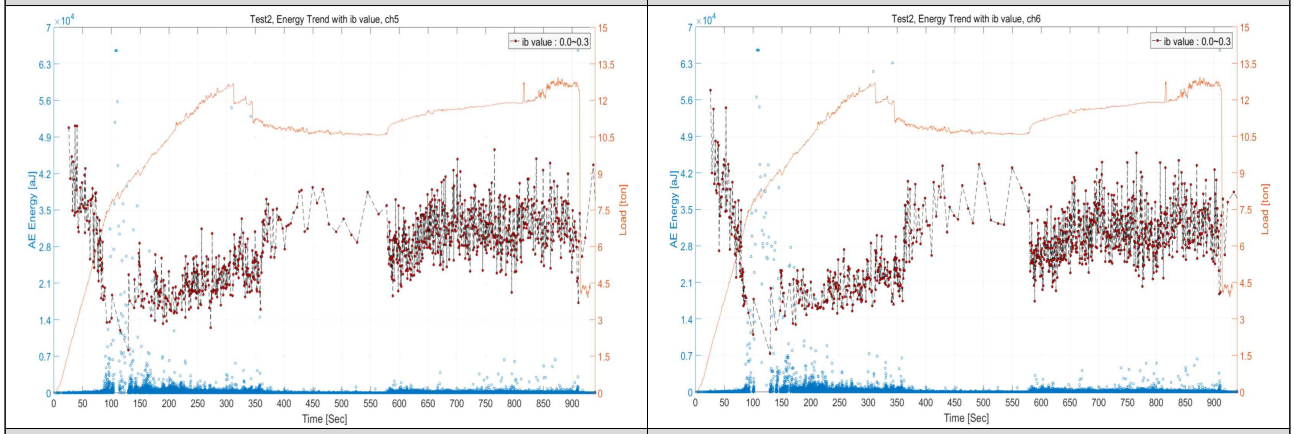
1ch

2ch



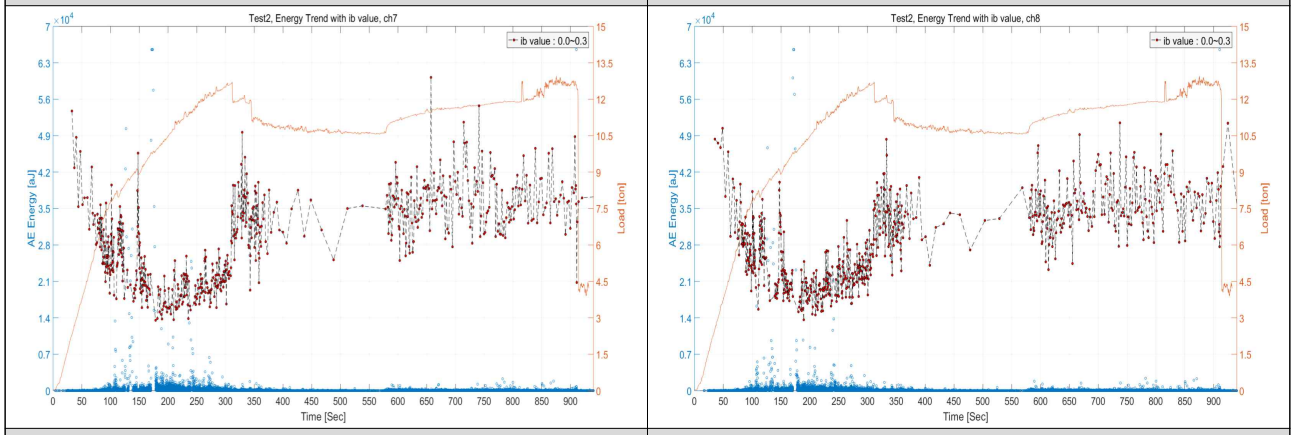
3ch

4ch



5ch

6ch



7ch

8ch

그림 34 인장 파괴 시험 - AE Energy Trend vs Ib value

(4-3) RA value vs Average Frequency

(4-3-1) 반복 하중 시험

RA value와 Average Frequency 상관관계 해석 결과는 대부분의 신호가 인장 파괴 영역에서 나타남을 확인하였다.

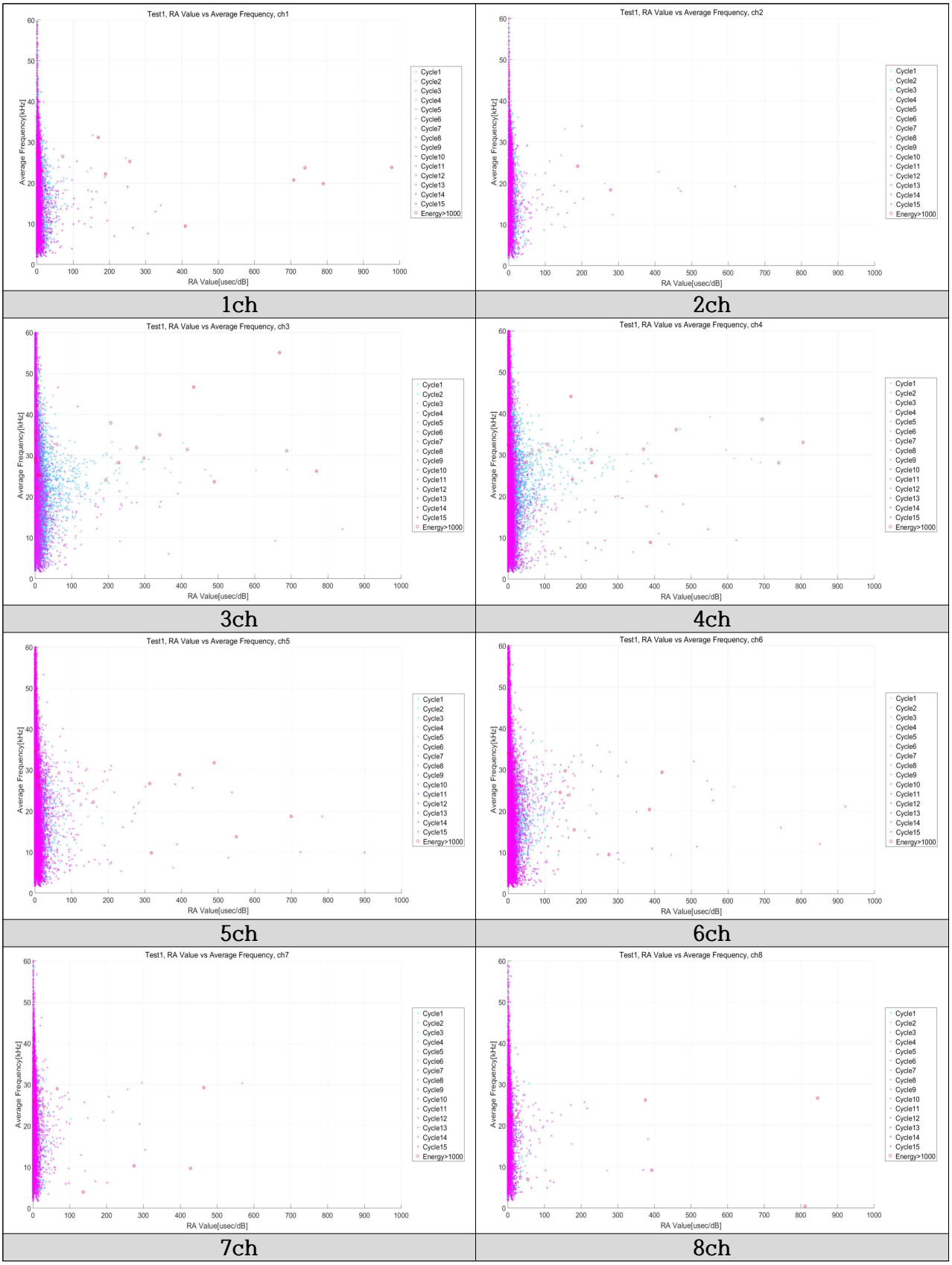


그림 35 반복 하중 시험 - RA value vs Average Frequency

(4-3-2) 인장 파괴 시험

인장 파괴 시험에서는 신호가 다소 기타 파괴 또는 전단 파괴 영역으로 신호가 이동하는 것이 보이나, 대부분은 인장 파괴 영역에 신호가 위치함을 확인할 수 있다. Tendon 파단 신호는 확실히 인장 파괴 영역에 존재하며, 콘크리트 파괴 신호는 일부 전단 영역으로 이동함을 확인할 수 있다.

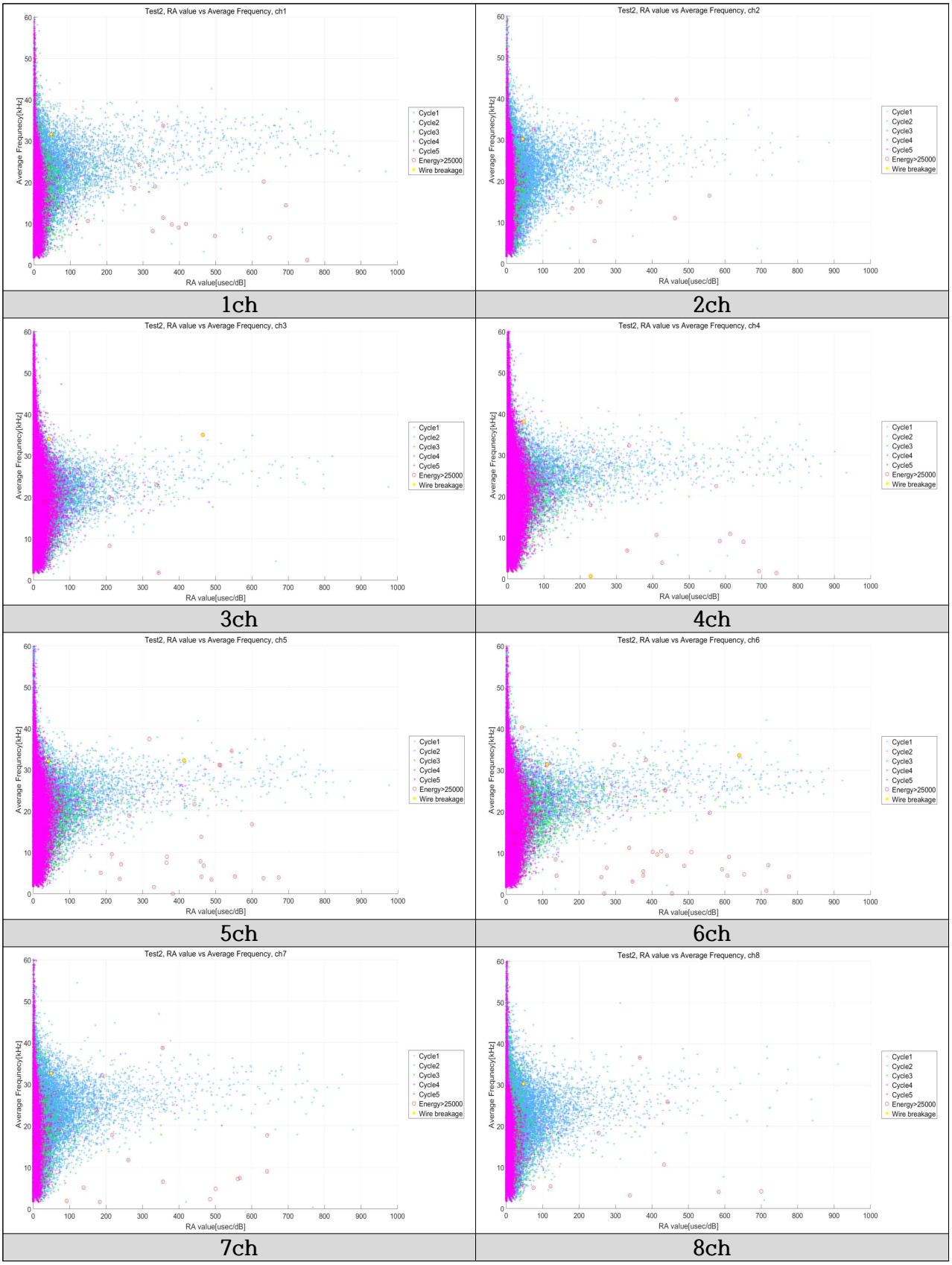
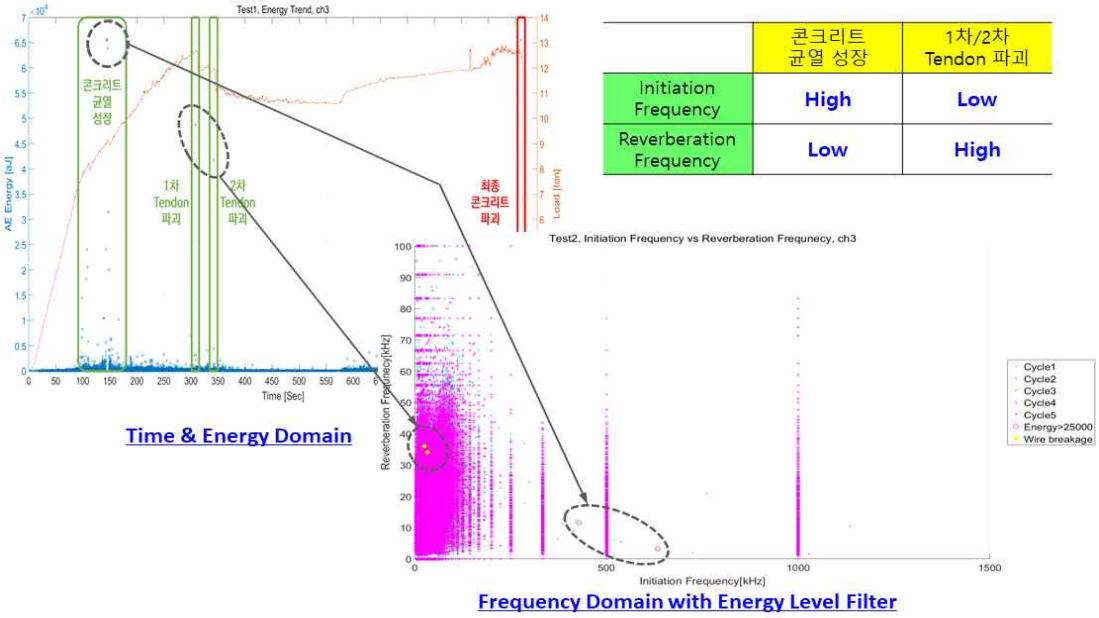


그림 36 인장 파괴 시험 - RA value vs Average Frequency

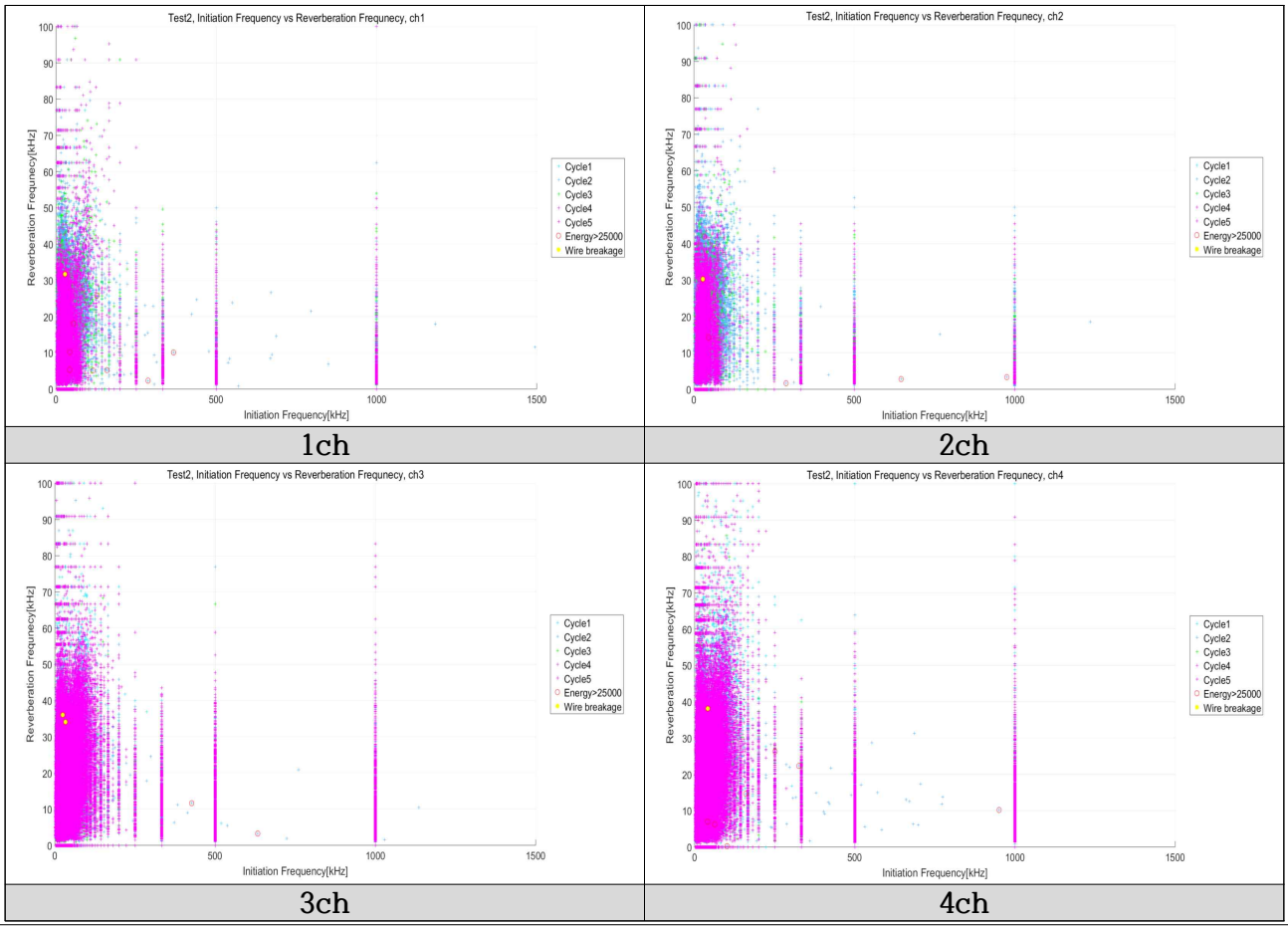
(4-4) 초기 주파수 vs 잔향 주파수



	콘크리트 균열 성장	1차/2차 Tendon 파괴
Initiation Frequency	High	Low
Reverberation Frequency	Low	High

그림 37 인장 파괴 시험 - Initiation Frequency vs Reverberation Frequency (3ch)

초기 주파수(Initiation Frequency)와 잔향 주파수(Reverberation Frequency)의 상관관계 해석에서 콘크리트 균열과 강연선 파단이 구분되었다. 강연선 파단 시 Initiation Frequency는 콘크리트 균열보다 낮게 나타나고, Reverberation Frequency는 반대로 높게 나타났다. 강연선 파단 시점의 두 주파수 성분의 상관관계 그래프에서 AE Energy가 충분히 큰 시점을 위와 같이 표시했을 때, 서로 다른 영역으로 구분되었다.



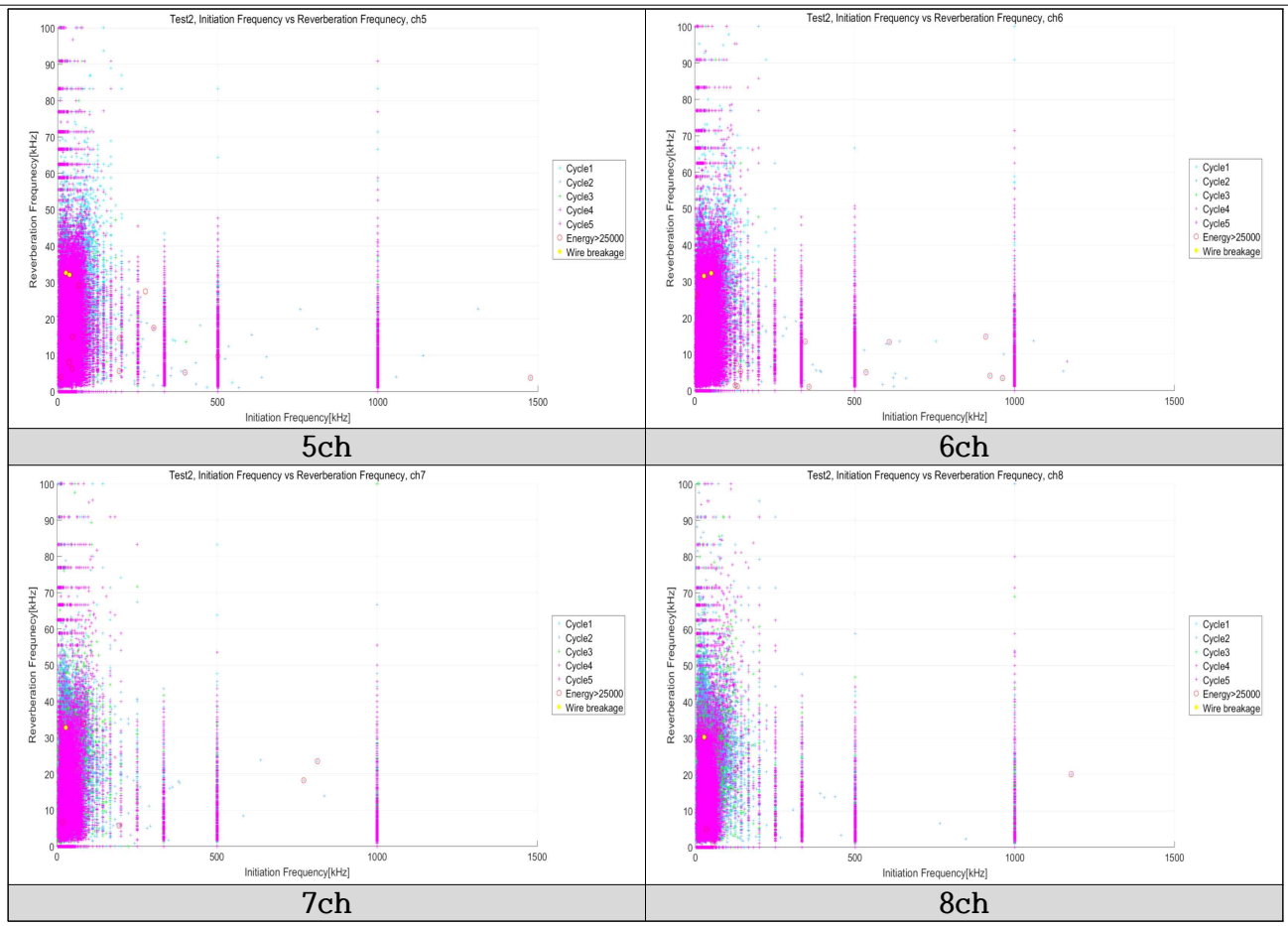


그림 38 인장 파괴 시험 - Initiation Frequency vs Reverberation Frequency

(4-5) 결론

콘크리트 균열 또는 강연선 파단 발생 시 정상 상태 대비 확연하게 큰 AE Energy가 발생함을 확인하였다. 실제 현장 적용 시, 어느 정도 주변 노이즈(일반적으로 AE Energy 1000 미만)가 발생하더라도 구분이 가능할 정도(AE Energy 25000 이상)로 판단된다.

콘크리트 균열 발생 시점에서는 주로 100kHz의 영역에서 주파수 Peak가 확인되었으나, 60kHz와 80kHz에서의 추가적인 Peak 또한 확인되었으므로 콘크리트 균열 주파수를 특정 짓기는 어렵다. 다만, 강연선 파단 시점의 주된 주파수 성분이 60kHz이고, 콘크리트 균열 시점에 Tendon(과 내부의 강연선) 또한 스트레스를 받고 있었을 것으로 추정되므로, 콘크리트 균열 시점에서 다른 주파수 성분이 함께 발생했을 것이라 미루어 짐작할 수 있다.

Initiation Frequency(초기 주파수)와 Reverberation Frequency(잔향 주파수)의 상관관계 해석에서 강연선 파단 시 Initiation Frequency는 콘크리트 균열보다 낮게 나타나고, Reverberation Frequency는 반대로 높게 나타났다. 따라서 이와 같은 주파수 변수를 통해 강연선 파단 신호와 콘크리트 균열 신호를 구분할 수 있다고 판단된다.

2-5) 1회 측정 수행범위 확인

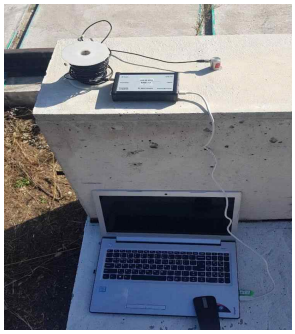
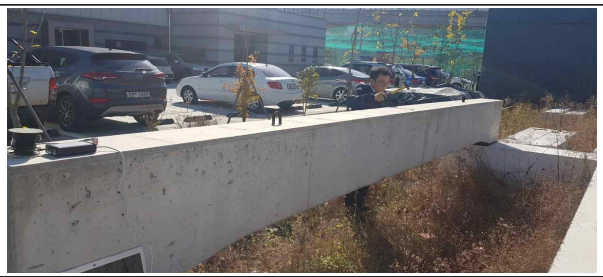
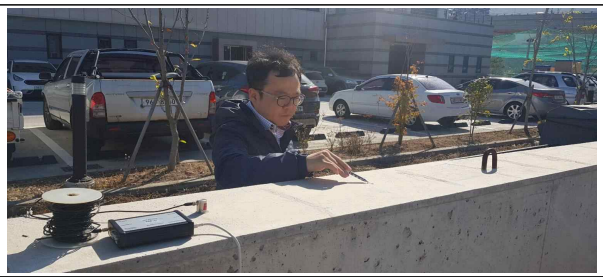


그림 39 AE 계측 시스템

1회 측정 수행범위 5m 조건을 만족하는가를 확인하기 위해 음향방출센서 1개 채널에 대해 1회 측정 시 측정 가능한 유효거리를 다음과 같은 방법으로 확인하였다.



해머 타격



PLB(Pencil Lead Break)

그림 40 AE 임의 신호 발생 방법



그림 41 센서 설치 위치 및 신호 발생 위치

약 6m 길이의 PSC 구조물 실험에 상부에 AE 센서 1채널을 설치하고, 0.5m 간격으로 해머 타격 및 PLB 실험을 수행하여 신호의 계측 유무와 신호의 감쇠 특성을 확인하였다.

표 9 거리 별 AE 신호 감쇠 특성 - 해머 타격

(단위 : dB)

거리[m] / 회	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
1	98	96	97	91	92	89	91	90	88	90
2	97	96	89	85	87	90	85	86	86	79
3	97	96	98	93	88	95	88	89	89	89
4	88	82	83	85	77	72	74	73	77	76
5	91	87	84	81	79	86	76	82	74	73

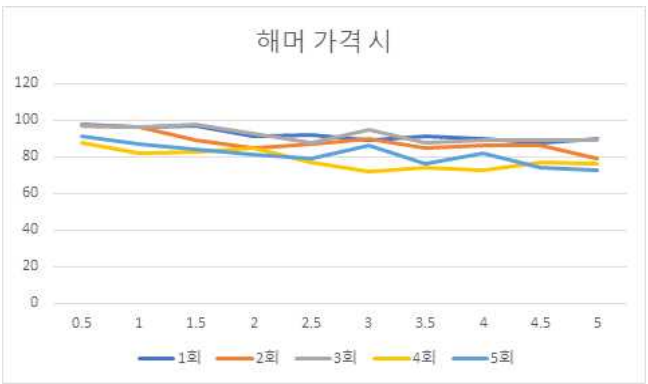


그림 42 거리 별 AE 신호 감쇠 특성 - 해머 타격

표 10 거리 별 AE 신호 감쇠 특성 - PLB 실험

(단위 : dB))

거리[m] / 회	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
1	66	59	57	51	51	49	47	45	50	48
2	70	65	60	61	61	59	54	41	50	50
3	65	63	61	52	50	51	52	51	46	44
4	74	67	69	61	61	59	56	49	50	51
5	67	69	63	55	60	55	41	50	50	47

해머 타격과 PLB 실험 모두 최대와 최소의 감쇠 폭은 약 30dB로 나타났으며, 아주 미세한 신호인 PLB, 즉 샤프심 파단음 조차도 5m 거리에서 최소 계측 기준인 40dB 이상으로 계측되었으므로 1회 측정 수행범위 5m 조건을 충분히 만족한다.

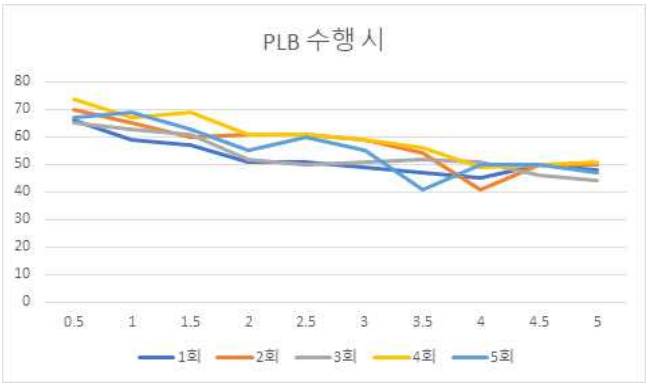


그림 43 거리 별 AE 신호 감쇠 특성 - PLB 실험

3) PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 설계

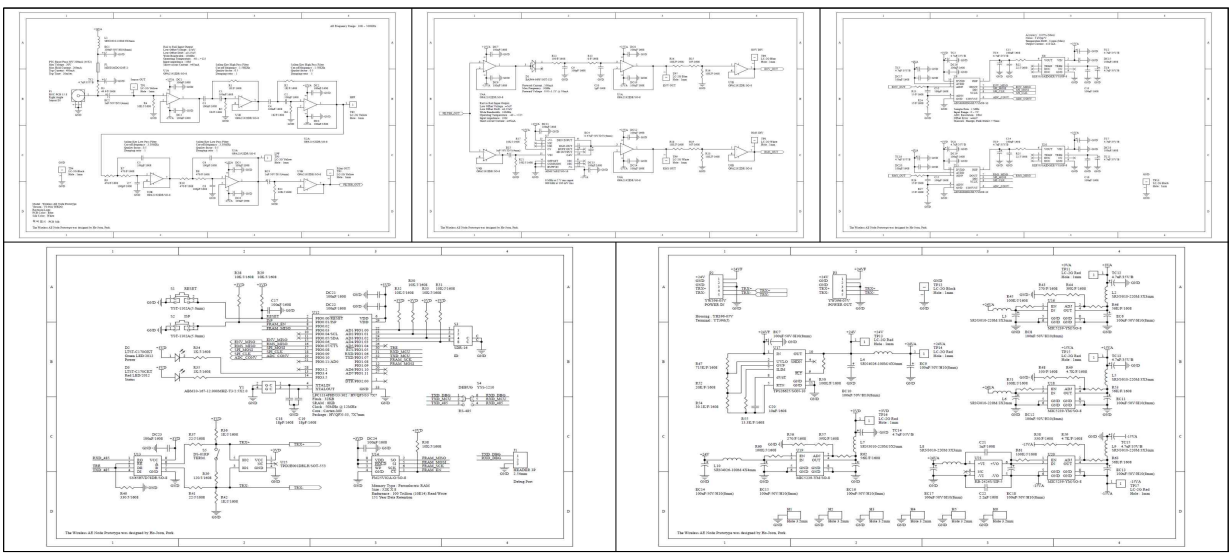


그림 44 내부 텐던 검사 장비 회로도

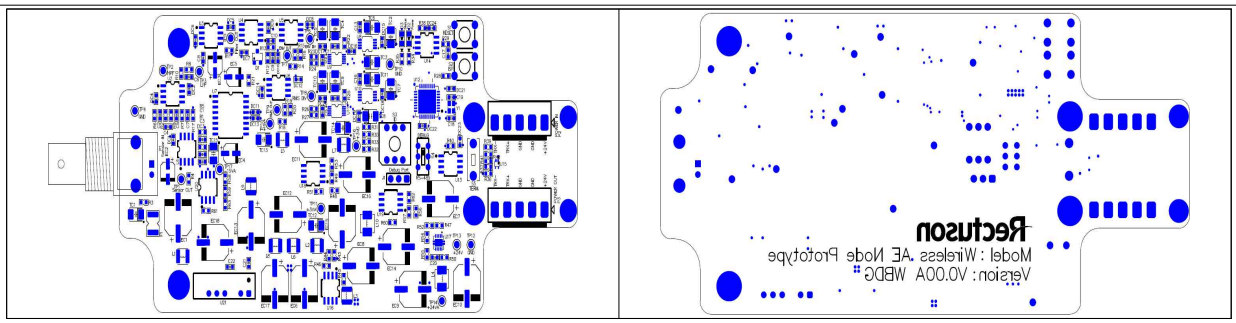


그림 45 내부 텐던 검사 장비 PCB 설계 결과

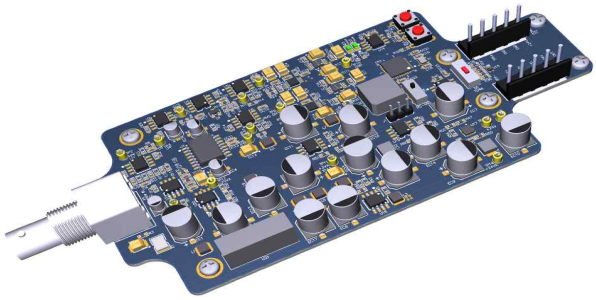


그림 46 내부 텐던 검사 장비 PCB 설계 결과(3D)

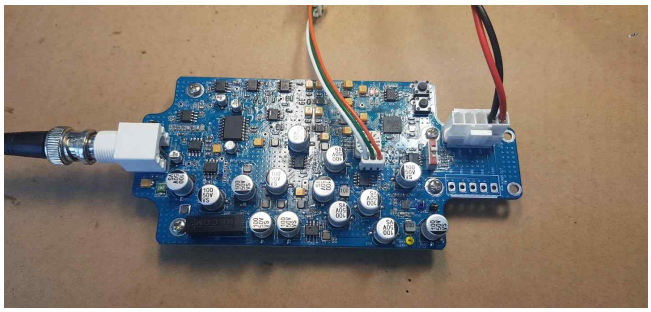


그림 47 내부 텐던 검사 장비 테스트용 조립 사진

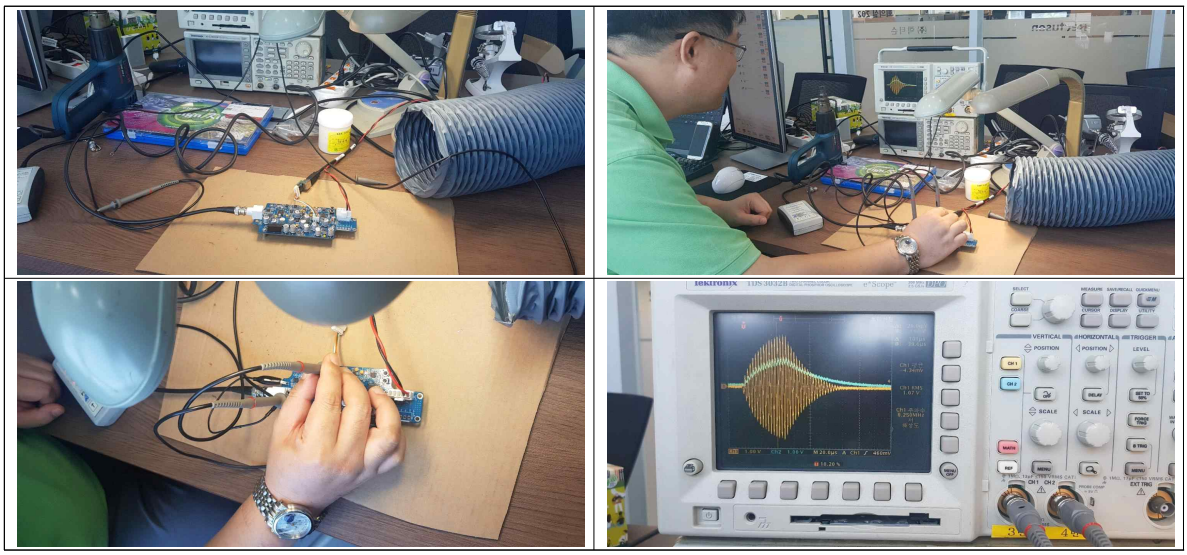


그림 48 내부 텐던 검사 장비 기초 동작 테스트

○ 2차년도

- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발

1) PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발

1-1) 설계 개선 사항 도출

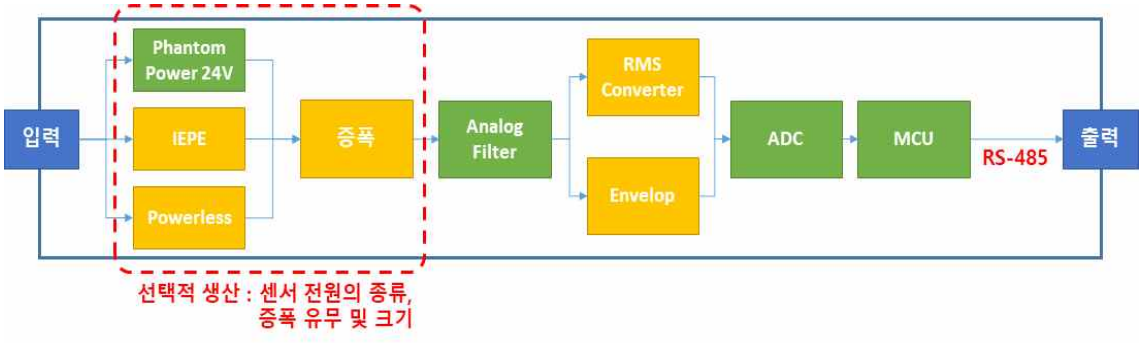


그림 49 검사장비 내부 블록다이어그램

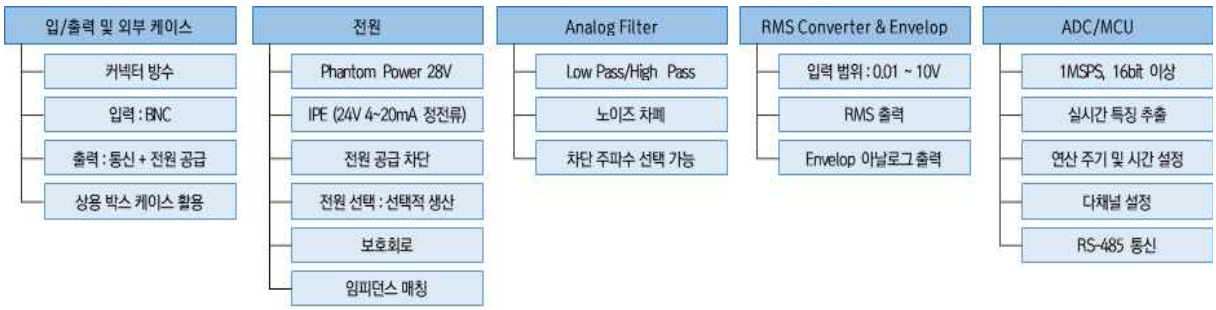


그림 50 검사장비 주요 구성요소

(1) 일반사항

▪ 옥외 설치를 기본적으로 상정하여 방수 사양으로 제작되어야 한다. (호우 수준)

▪ 해당 제품은 짧게는 수개월에서 길게는 수년간의 장기 모니터링을 목적으로 한다. 최소 10년 사용을 목표로 내구성 설계가 필요하다.

▪ 다양한 구조물에 설치가 용이하도록 가급적 소형화, 경량화가 필요하다.

▪ 교량 등에 설치 시 전력선이나 통신선과의 거리가 인접할 수 있기 때문에 이에 대한 전기적 노이즈 차폐를 고려하여야 한다.

(2) PSC 박스 거더교

▪ PSC 박스 거더교 설치 시 내부 환경은 아래 사진과 같다.

▪ 위 일반사항 외 내부에 누적된 먼지가 많은 환경임을 고려해야 한다.



그림 51 PSC 거더교 현장 사진

(3) 제약 사항

▪ 크기 : PCB 기준, 70mm X 160mm

▪ 중량 : TBD

▪ 정해진 프로토콜(또는 소프트웨어)가 아니면 데이터를 읽을 수 없도록 보안 조치

1-2) 기구 설계 및 제품 제작

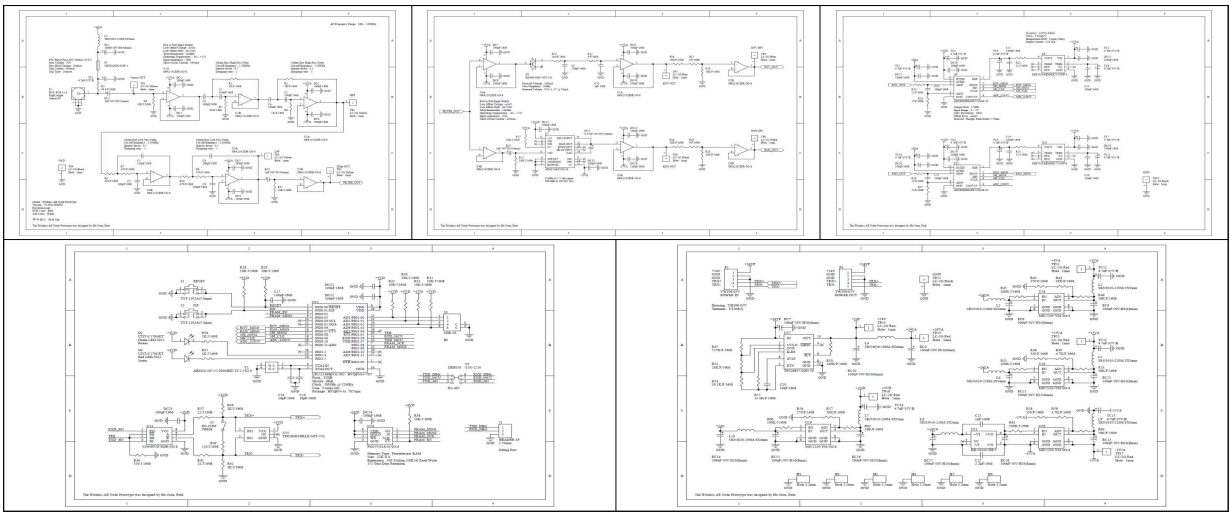


그림 52 내부 텐던 검사 장비 회로도

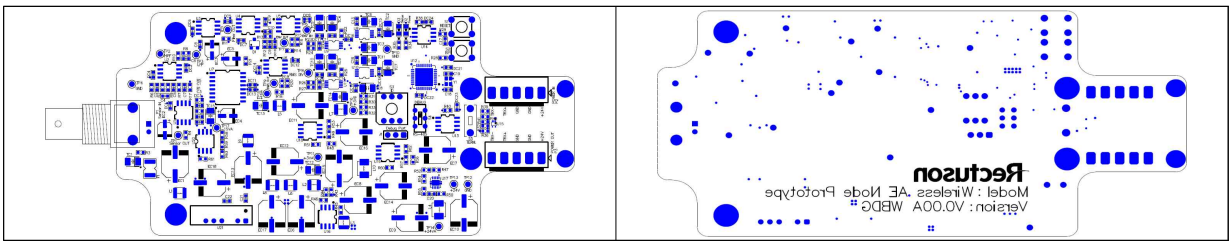


그림 53 내부 텐던 검사 장비 PCB 설계 결과

기본적인 회로 구성이나, PCB 형상 1차년도와 비교하였을 때 변동이 없으며, 세부 회로 수정 및 전원장치 개선, 내부 연산 알고리즘이 업그레이드되었다.

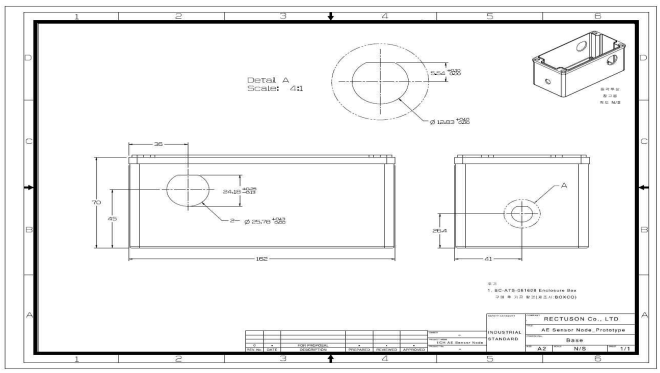


그림 54 외부 케이스 설계

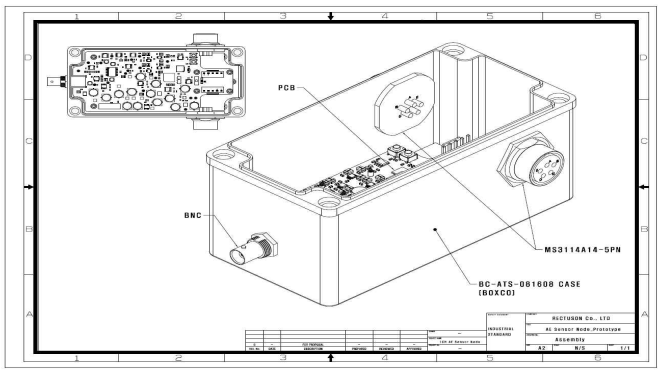


그림 55 제품 조립 도면

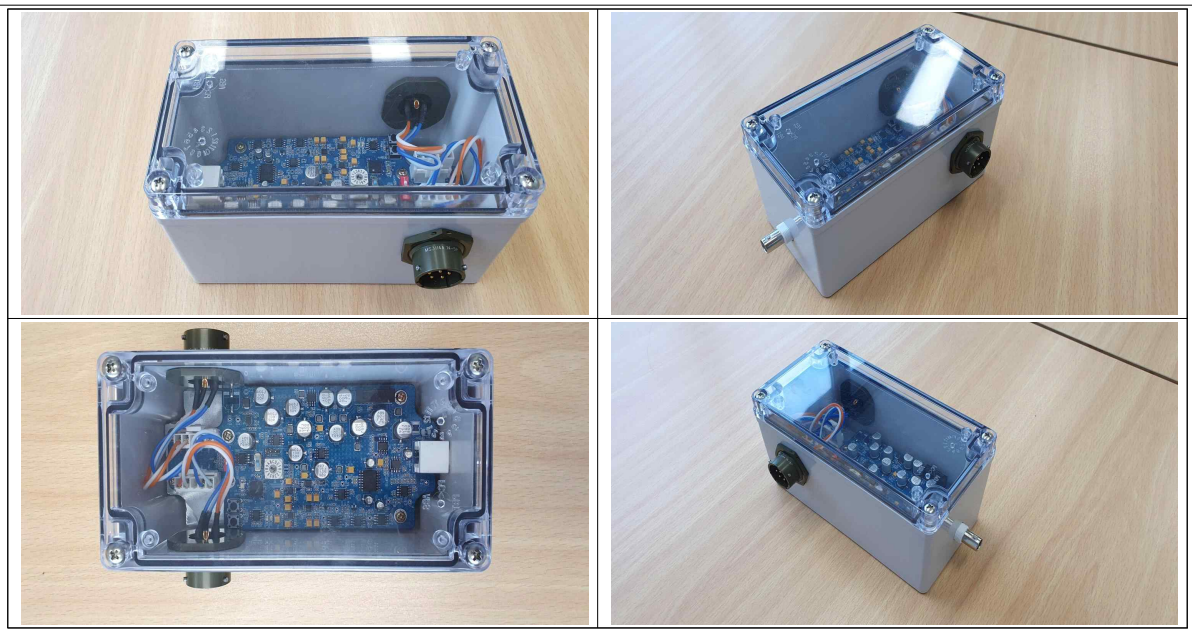


그림 56 내부 텐던 검사 장비 완성품

- 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축

1) 노후 교량 또는 이상의심 교량에 대한 집중관리를 위한 음향방출 기반 모니터링 시스템 구축

1-1) 시스템 구성도

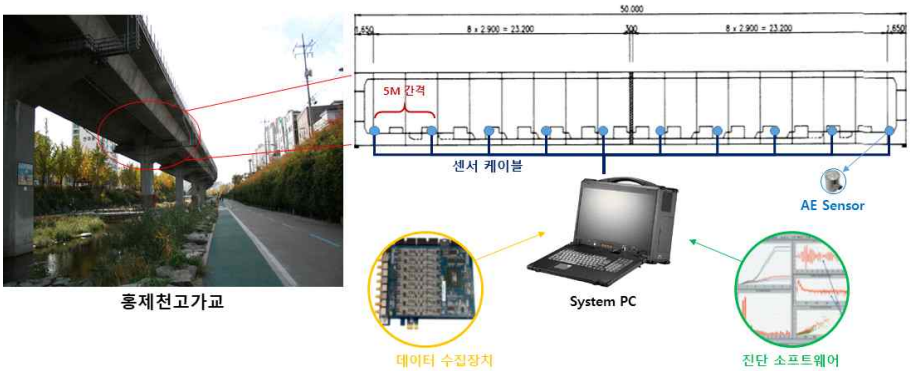


그림 57 음향방출 모니터링 시스템 개요

음향방출계측 시스템은 기본적으로 고속데이터 수집장치(PCI 카드 타입)와 이를 사용하기 위한 PC, AE센서로 구성된다.

AE센서의 경우 별도의 Pre-Amplifier를 필요로 하는 타입도 있으나 본 연구에서 구성한 시스템에서는 센서 내장형을 기본으로 한다. PC의 경우 PCI 카드를 장착할 수 있다면 특별히 제약되는 사양은 없으나, 음향방출 데이터를 실시간으로 수집하고 분석할 수 있는 기본적인 연산능력과 메모리 용량이 요구된다(아래 상세 사양 참조).

1-2) 주요 구성품 사양

표 18 산업용 PC 사양

기본 요구 사양	PCI Express 슬롯 : 1개 이상 CPU : 2GHz 이상, 쿼드코어, 동등 이상 RAM : 8GB 이상
추가 요구 사양	SSD 포함 고사양 그래픽 카드 (그래프 실시간 출력) PCI Express 16배속
선택 사양	1TB 이상의 저장 공간 상시 운용 시 RACK 타입의 산업용 PC 사용 추천

표 19 고속데이터 수집장치 사양

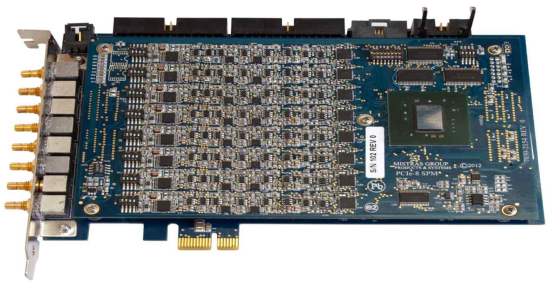
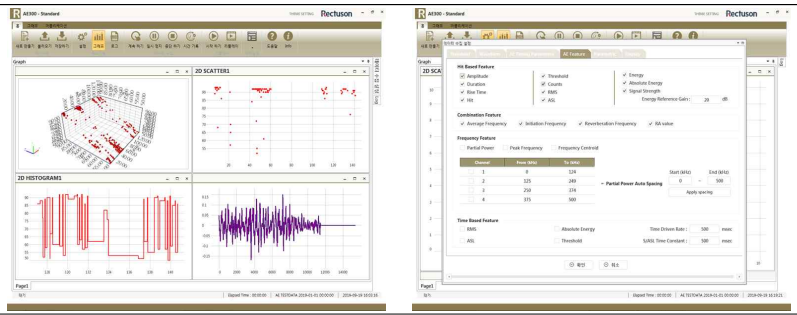
AE채널	8채널(SMB 커넥터) 대역폭 : 1kHz ~ 1.2MHz 분해능 : 16bit 샘플링 속도 : 10MSPS 18bit 256tap digital FIR Filter Waveform Streaming(연속적인 RAW Data 수집) 기능 포함
PARAMETRIC	8채널 입력범위 : ±10V 분해능 : 16bit 샘플링 속도 : 10kSPS Digital I/O : 각 8채널 Analog Output : 4채널(0~10V)
제품 형상	

표 20 진단 소프트웨어 사양

소프트웨어 형상	
소프트웨어 기능	▪ 하드웨어 컨트롤 기능 ▪ 실시간 데이터 수집 기능 ▪ 실시간 그래프 출력 기능 ▪ 리플레이 및 추가 분석 기능 ▪ 데이터 출력 기능

1-3) 실제 모니터링 시스템 구축 사례

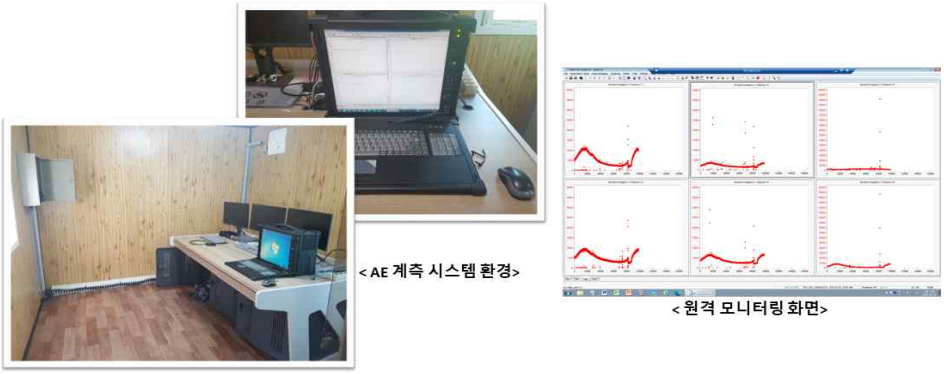
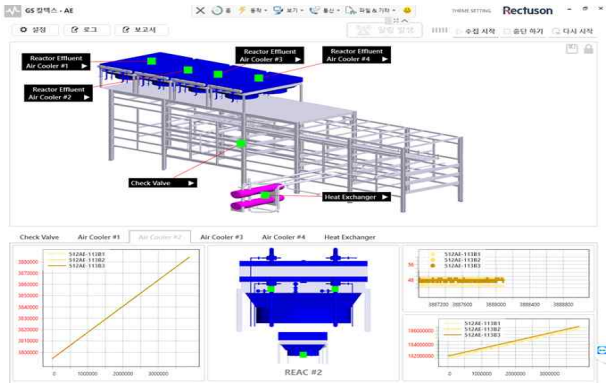


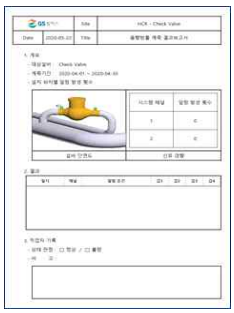
그림 58 부식 가속화 실험을 위한 상시 계측 시스템 구축



그림 59 HCR 설비 및 구조물 모니터링 AE 시스템



프로그램 메인 화면





자동 보고서 생성 기능　　알람 발생 실시간 문자 전송

그림 60 HCR 설비 및 구조물 모니터링 AE 시스템 - 소프트웨어



그림 61 화태대교 케이블 손상 모니터링 AE 시스템

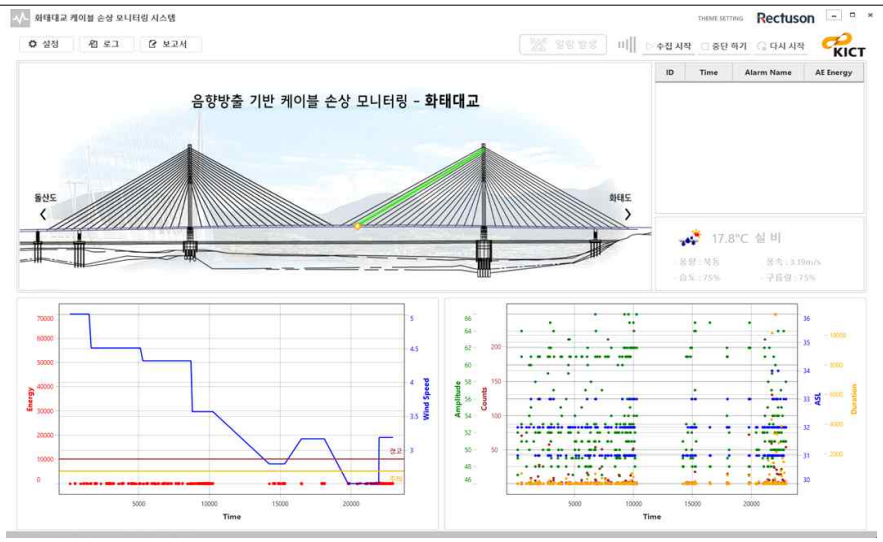


그림 62 화태대교 케이블 손상 모니터링 AE 시스템



그림 63 비탈사면 웹 기반 통합 모니터링 - AE 시스템 적용

1-4) 모니터링 시스템 성능 평가

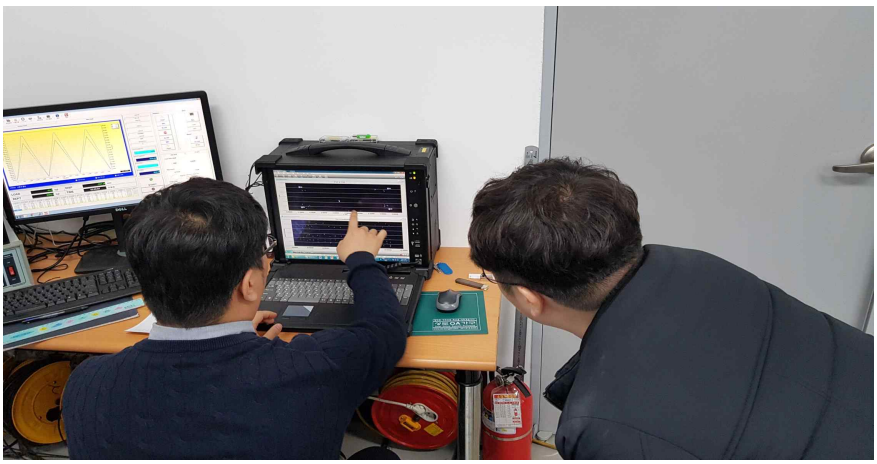


그림 64 모니터링 시스템 성능 평가

음향방출계측 시스템 중 현재 부식 가속화 시험 중 상시 모니터링을 수행하고 있는 시스템에 대하여 외부 기관의 기술자문을 통해 자체 검증을 수행하였다. 시스템이 계측 능력과 결함 탐지 능력 2가지 항목에 대해 동시 계측 가능 채널 수, 샘플링 주파수, 결함 탐지 유무, 결함 위치 추정 능력에 대해 평가하였고 이에 대한 성능을 만족함을 확인하였다.

(1) 동시 수집 가능 채널 수

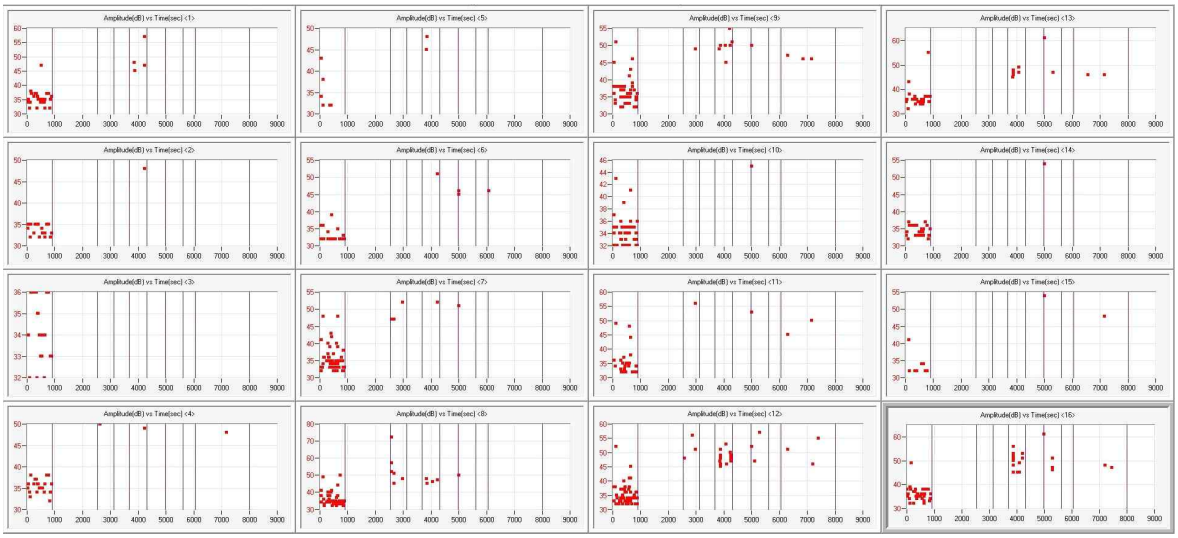


그림 65 16채널 데이터 동시 수집 화면

(2) 샘플링 주파수 검증

● 검증 방법

- 모니터링 시스템 입력에 함수발생기를 연결하고, 100kHz, 1Vpp의 정현파 신호를 입력한다.
- 10주기 동안의 Zero Crossing 데이터를 기록하고 데이터 간의 시간차로부터 샘플링 주파수를 도출한다.

● 계측 장비

- PM6654C : Timer/Counter
- HP8116A : Pulse/Function Generater

● 계측 장비 설정 및 계측 데이터 (입력신호 정의)

- 함수발생기 출력 설정 : f_{ref} = 100kHz
- 카운터로 측정한 함수발생기 출력 주파수 : f_{input} = 102.13kHz
- 입력 신호의 10주기 시간 : $T_{input10}$ = 0.0979msec

● 시험 장비(개발 시스템) 계측 결과

- 시험장비 Sampling Interval : T_{samp}=0.0002msec
- Zero crossing data (Unit:msec)

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
t_zero crossing	0.0004	0.0052	0.0102	0.0150	0.0198	0.0248	0.0296	0.0346	0.0394	0.0444	0.0492

No	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	-
t_zero crossing	0.0542	0.0590	0.0640	0.0688	0.0738	0.0786	0.0836	0.0884	0.0934	0.0982	-

- Zero crossing 10 주기 시간 : $T_{zero\_crossing10}$ = 0.0982 - 0.0004 = 0.0978msec
- 10주기 샘플 수 : n_{samp10} = $T_{zero\_crossing10}$ / T_{samp} = 0.0978 / 0.0002 = 489
- **Sampling rate : f_{samp} = n_{samp10} / $T_{input10}$ = 489 / 0.0979 = 4,995kHz ≃ 5MHz**

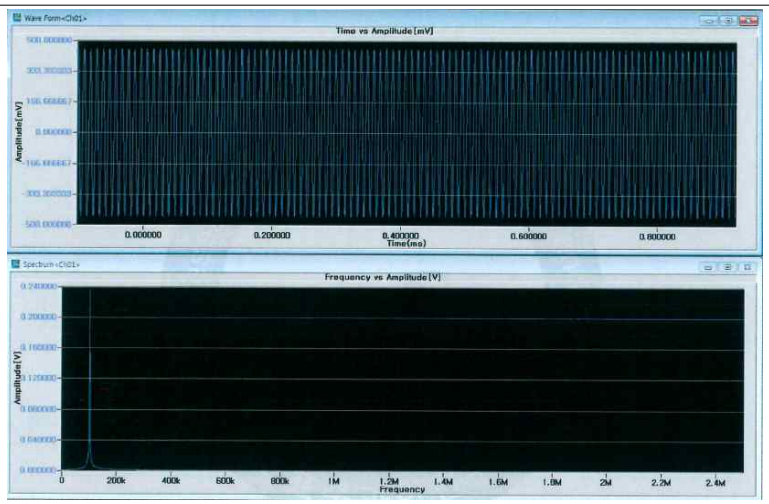


그림 66 입력 Waveform 및 Spectrum 측정 결과

(3) 위치추정 오차 및 결함 탐지 능력 검증

위치추정 알고리즘은 신호 크기를 비교하여 위치추정을 수행한다는 컨셉은 유지하되, 상대적으로 RMS보다 명확한 차이를 나타내는 AE Energy를 활용하여 크기를 비교하고 위치추정을 하는 방법으로 개선하였다. 다음은 1차년도에 수행했던 검증 결과이다.

표 21 위치추정 알고리즘 검증 결과1(단위:mm) (개선 전)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	180.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)	60.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)
1	181.90	1.90	38.97	**3.97**	56.97	-3.03	33.02	**-1.98**
2	186.90	6.90	50.00	15.00	55.95	-4.05	32.18	**-2.82**
3	183.90	3.90	42.44	**7.44**	199.4	139.40	69.4	34.40
4	189.40	9.40	38.84	**3.84**	57.37	-2.63	31.29	**-3.71**
5	182.90	2.90	35.95	**0.95**	57.07	-2.93	31.8	**-3.20**
6	188.80	8.80	34.10	**-0.90**	56.14	-3.86	33.78	**-1.22**
7	189.80	9.80	34.30	**-0.70**	65.79	5.79	26.88	**-8.12**
8	184.60	4.60	41.84	**6.84**	68.16	8.16	34.33	**-0.67**
9	187.50	7.50	38.33	**3.33**	58.85	-1.15	34.46	**-0.54**
10	185.80	5.80	44.94	**9.94**	57.54	-2.46	30.88	**-4.12**
검출 신뢰도	**9/10회 검출, 90%**				**9/10회 검출, 90%**			

표 22 위치추정 알고리즘 검증 결과2(단위:mm) (개선 전)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	60.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)	180.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)
1	56.7	**-3.30**	91.48	**1.48**	180.20	**0.20**	87.04	**-2.96**
2	52.69	**-7.31**	81.74	**-8.26**	181.60	**1.60**	88.32	**-1.68**
3	17.04	-42.96	90.09	0.09	179.40	**-0.60**	89.19	**-0.81**
4	35.22	-24.78	76.03	-13.97	188.00	**8.00**	82.88	**-7.12**
5	54.35	**-5.65**	90.67	**0.67**	182.30	**2.30**	92.61	**2.61**
6	48.36	-11.64	89.28	-0.72	183.00	**3.00**	82.49	**-7.51**
7	57.95	**-2.05**	88.18	**-1.82**	183.50	**3.50**	90.88	**0.88**
8	65.13	**5.13**	90.52	**0.52**	186.50	**6.50**	84.01	**-5.99**
9	56.89	-3.11	86.96	-3.04	185.10	**5.10**	93.66	**3.66**
10	63.02	**3.02**	92.86	**2.86**	184.20	**4.20**	86.25	**-3.75**
검출 신뢰도	**7/10회 검출, 70%**				**10/10회 검출, 100%**			

다음은 최근 개선한 알고리즘에 동일한 데이터를 적용하였을 때 도출된 결과이다.

표 23 위치추정 알고리즘 검증 결과1(단위:㎜) (개선 후)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	180.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)	60.00	11.50 (이하)	35.00	11.50 (이하)
1	181.40	1.40	38.97	3.97	55.69	-4.31	37.02	2.02
2	183.80	3.80	36.00	1.00	57.10	-2.90	31.98	-3.02
3	183.90	3.90	32.66	-2.34	60.10	0.10	32.55	-2.45
4	182.10	2.10	38.84	3.84	56.33	-3.67	37.13	2.13
5	182.80	2.80	35.95	0.95	58.06	-1.94	34.09	-0.91
6	180.90	0.90	34.10	-0.90	59.11	-0.89	33.12	-1.88
7	179.80	-0.20	34.30	-0.70	62.22	2.22	30.92	-4.08
8	178.90	-1.10	37.26	2.26	58.84	-1.16	34.66	-0.34
9	177.50	-2.50	38.33	3.33	55.66	-4.34	34.09	-0.91
10	179.20	-0.80	34.94	-0.06	54.12	-5.88	32.88	-2.12
검출 신뢰도	10/10회 검출, 100%				10/10회 검출, 100%			

표 24 위치추정 알고리즘 검증 결과2(단위:㎜) (개선 후)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	60.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)	180.00	11.50 (이하)	90.00	11.50 (이하)
1	58.88	-1.12	90.58	0.58	180.10	0.10	88.16	-1.84
2	55.73	-4.27	85.74	-4.26	180.60	0.60	88.02	-1.98
3	57.04	-2.96	90.02	0.02	180.40	0.40	90.00	0.00
4	55.33	-4.67	96.12	6.12	185.00	5.00	91.22	1.22
5	54.65	-5.35	90.61	0.61	182.02	2.02	92.00	2.00
6	58.16	-1.84	89.88	-0.12	181.00	1.00	85.00	-5.00
7	63.95	3.95	87.28	-2.72	181.50	1.50	90.08	0.08
8	64.13	4.13	86.52	-3.48	179.00	-1.00	86.02	-3.98
9	63.11	3.11	89.04	-0.96	182.12	2.12	93.00	3.00
10	58.02	-1.98	91.28	1.28	184.00	4.00	85.00	-5.00
검출 신뢰도	10/10회 검출, 100%				10/10회 검출, 100%			

또한 시스템 검증 시 보다 넓고, 큰 시편에서 추가로 위치추정 알고리즘 검증하였다. 해당 시편의 크기가 기존보다 크기 때문에 단위가 [㎜]에서 [m]로 변경되었다.

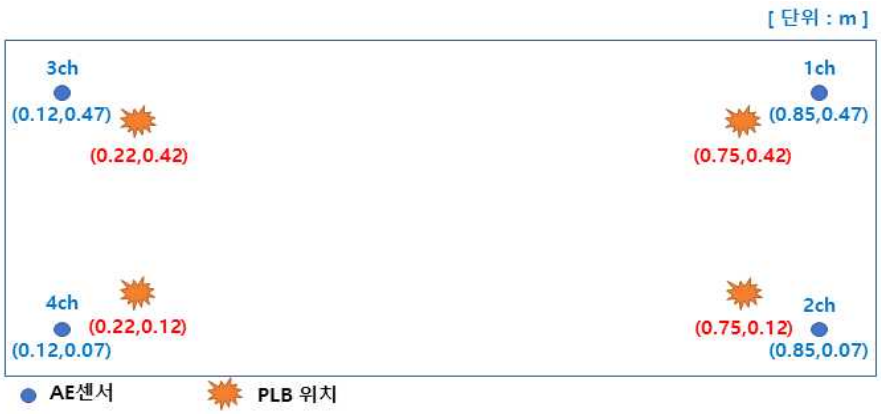


그림 67 센서 설치 위치 및 PLB 위치



그림 68 실험용 시편 및 실제 센서 설치 사진

표 25 위치추정 알고리즘 검증 결과1(단위:㎜) (추가 검증)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	0.75	0.045 (이하)	0.42	0.045 (이하)	0.75	0.045 (이하)	0.12	0.045 (이하)
1	0.79	0.04	0.43	0.01	0.78	0.03	0.09	0.03
2	0.78	0.03	0.41	0.01	0.79	0.04	0.16	0.04
3	0.79	0.04	0.40	0.02	0.76	0.01	0.13	0.01
4	0.79	0.04	0.38	0.04	0.79	0.04	0.16	0.04
5	0.77	0.02	0.39	0.03	0.79	0.04	0.16	0.04
6	0.78	0.03	0.41	0.01	0.79	0.04	0.16	0.04
7	0.79	0.04	0.40	0.02	0.79	0.04	0.16	0.04
8	0.73	0.02	0.43	0.01	0.76	0.01	0.13	0.01
9	0.79	0.04	0.42	0.00	0.78	0.03	0.09	0.03
10	0.79	0.04	0.42	0.00	0.76	0.01	0.13	0.01
검출 신뢰도	10/10회 검출, 100%				10/10회 검출, 100%			

표 26 위치추정 알고리즘 검증 결과1(단위:㎜) (추가 검증)

	x	x오차	y	y오차	x	x오차	y	y오차
기준	0.22	0.045 (이하)	0.42	0.045 (이하)	0.22	0.045 (이하)	0.12	0.045 (이하)
1	0.20	0.02	0.42	0.00	0.23	0.01	0.14	0.02
2	0.20	0.02	0.42	0.00	0.22	0.00	0.16	0.04
3	0.20	0.02	0.42	0.00	0.22	0.00	0.13	0.01
4	0.19	0.03	0.41	0.01	0.22	0.00	0.16	0.04
5	0.20	0.02	0.39	0.03	0.21	0.01	0.10	0.02
6	0.19	0.03	0.41	0.01	0.21	0.01	0.10	0.02
7	0.18	0.04	0.43	0.01	0.21	0.01	0.12	0.00
8	0.19	0.03	0.41	0.01	0.25	0.03	0.09	0.03
9	0.19	0.03	0.41	0.01	0.20	0.02	0.12	0.00
10	0.19	0.03	0.41	0.01	0.20	0.02	0.12	0.00
검출 신뢰도	10/10회 검출, 100%				10/10회 검출, 100%			

2) 상시 모니터링을 위한 센서 설치 위치 선정 및 설치 방안 수립

2-1) 센서 간 최소 간격 설정을 위한 감쇠 특성 실험

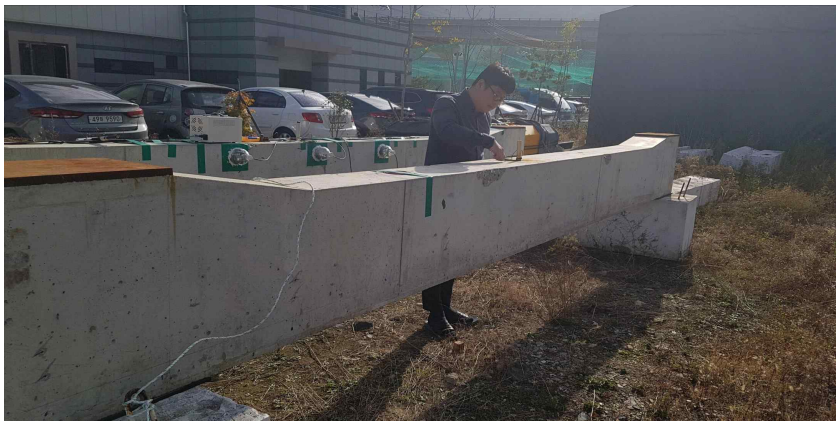


그림 69 측정 유효거리 계측 실험 - PLB 실험

1차년도와 마찬가지로 PSC 보 실험체를 활용하여 Hammer 이용한 직접 타격과 PLB(Pencil Lead Break)를 이용한 미세 균열 신호 발생 방법을 통해 감쇠 특성 실험을 수행하였다.

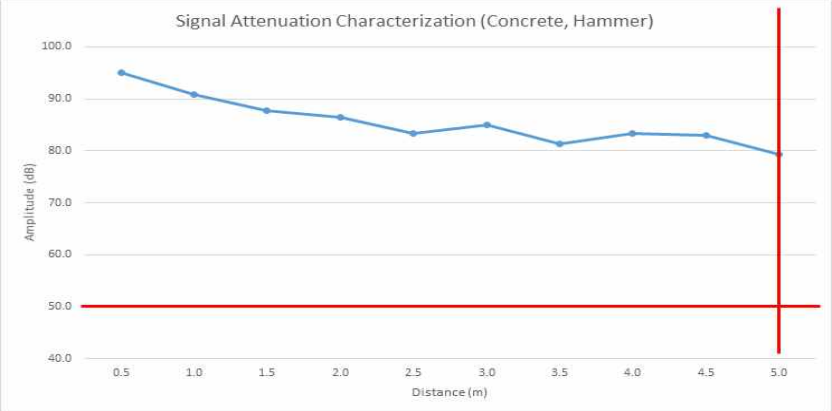


그림 70 거리별 AE 신호 감쇠와 평가 Threshold 비교 - Hammer

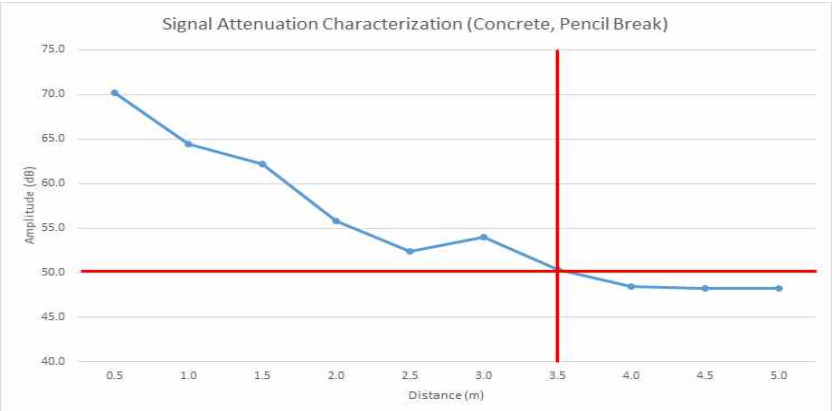


그림 71 거리별 AE 신호 감쇠와 평가 Threshold 비교 - PLB

Hammer 타격의 경우 목표 성능인 5m 거리까지도 신호 감쇠가 거의 없을 만큼 매우 큰 신호원이므로 평가 Threshold(유의미하다고 판단할 수 있는 AE 신호 크기의 기준)와 비교하는 것이 무의미하였다. PLB의 경우 평가 Threshold에 도달하는 거리가 3.5m로 확인되었다. 보통 센서와 센서 사이의 최대 간격은 이 Threshold Distance의 1.5배이므로, 센서 간 최대거리는 5.5m로 판단할 수 있다. 본 과제에서의 센서 간 최대 계측 거리는 5m를 목표로 하고 있으며, 충분히 만족하는 것으로 판단된다.

2-2) PSC 박스 거더 1개 경간을 기준으로 한 센서 배치 설계

(1) 내부 긴장재 타입

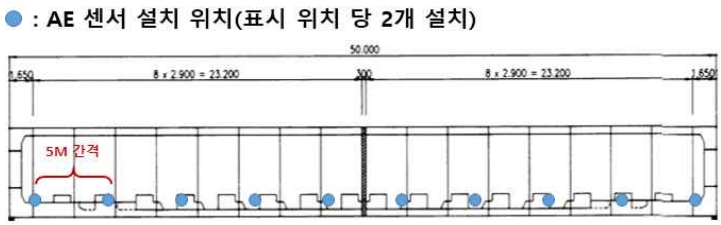


그림 72 내부 긴장재 타입 센서 배치도

내부 긴장재 타입은 케이블이 콘크리트에 매립되어 있으므로 콘크리트 표면에 센서를 설치한다. 센서는 긴장재가 배치되어 있는 구간을 따라 5m 간격으로 설치한단다.

상기와 같은 1개 PSC 박스를 기준으로 했을 때, 총 20채널 AE 센서 적용 필요하다. 실제 적용 시에는 현장 조건에 따라 세부적인 센서 설치 위치 및 센서 설치 수는 변경될 수 있다.

(2) 외부 긴장재 타입
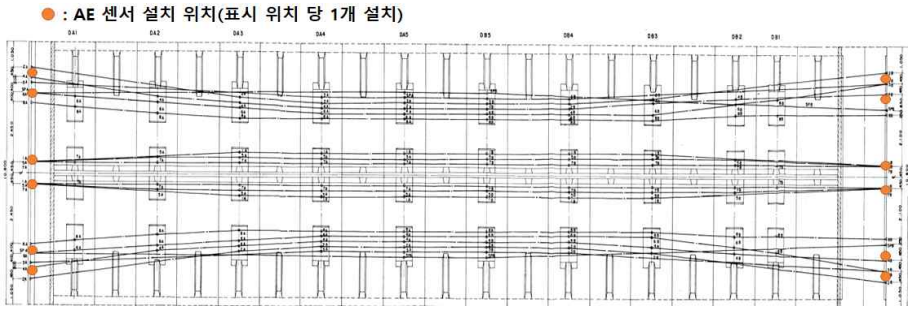


그림 73 외부 긴장재 타입 센서 배치도

케이블 종단에 1개, 케이블 당 최소 2개 채널을 설치하는 것을 기본으로 한다. 그러나 이와 같이 설치했을 때 BOX 1개 당 18개 케이블, 총 36채널 AE 센서 적용 필요하므로 현실적으로 지나치게 채널수가 증대되므로 케이블이 밀집하는 지점에 3개의 케이블 당 1개소 설치, BOX 1개 당 12채널 적용한다. 실제 적용 시에는 현장 조건에 따라 세부적인 센서 설치 위치 및 센서 설치 수는 변경될 수 있다.

2-3) 센서 설치 방안

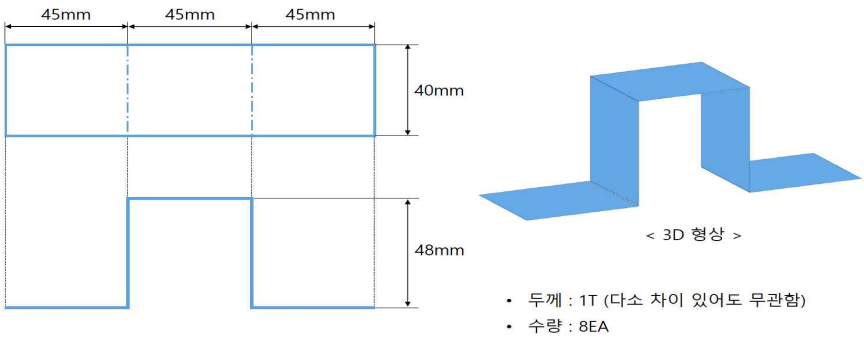


그림 74 AE센서 고정용 지그

AE 센서는 기본적으로 마그네틱 베이스를 이용해 설치되지만 이럴 경우 접촉면이 금속이어야 한다는 한계가 발생한다. 위 그림과 같은 간단한 금속 기구물을 콘크리트에 접착제를 이용해 직접 부착하고, 기구물과 콘크리트 사이에 센서를 삽입하여 고정한다. 이와 같은 방식은 센서가 다른 매질을 통하지 않고 콘크리트에 직접 부착된다는 장점이 있으나, 마그네틱 방식과 달리 탈부착이 용이하지 않다는 단점이 있다.

다음은 실제 제작된 센서 현장 설치용 치구와 설치 모습이다.

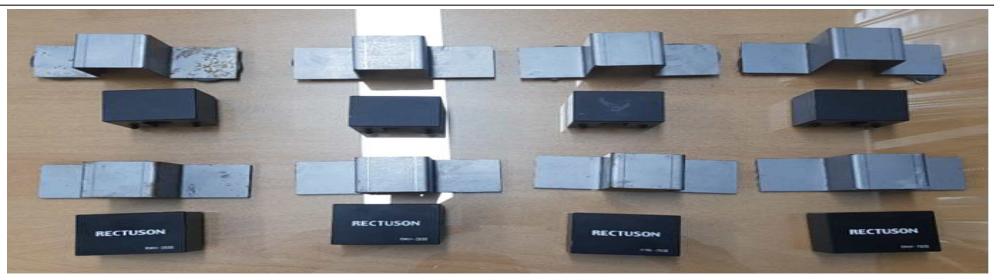


그림 75 제작된 센서 현장 설치용 치구



그림 76 실제 AE 센서 설치 예시

3) 상시 모니터링을 위한 현장 전원 수급 대책 및 데이터 관리 방안 수립

3-1) 현장 전원 수급 대책

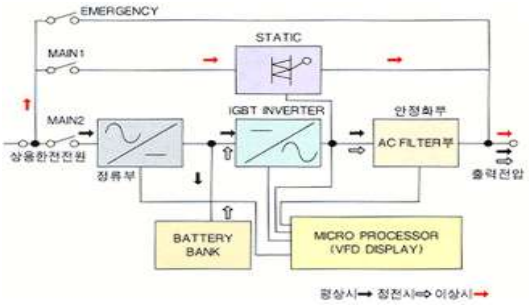


그림 77 무정전전원장치 개념도

PSC 교량 내에는 교량 점검등이나 내부 통신 단말 등을 위한 상시 전원망이 존재하고 있어 상대적으로 저전력으로 동작이 가능한 AE 시스템을 위한 전원을 수급하는데 문제가 발생하지 않는다. 하지만 모니터링 시스템은 외부 전력에 의존하지 않고도 일정 기간 유지되어야 하고, 독립적으로 동작하여 재난 상황에서도 역할을 다해야 하므로 내부에 위와 같은 무정전전원장치를 추가로 도입할 필요가 있다.

3-2) 데이터 관리 방안

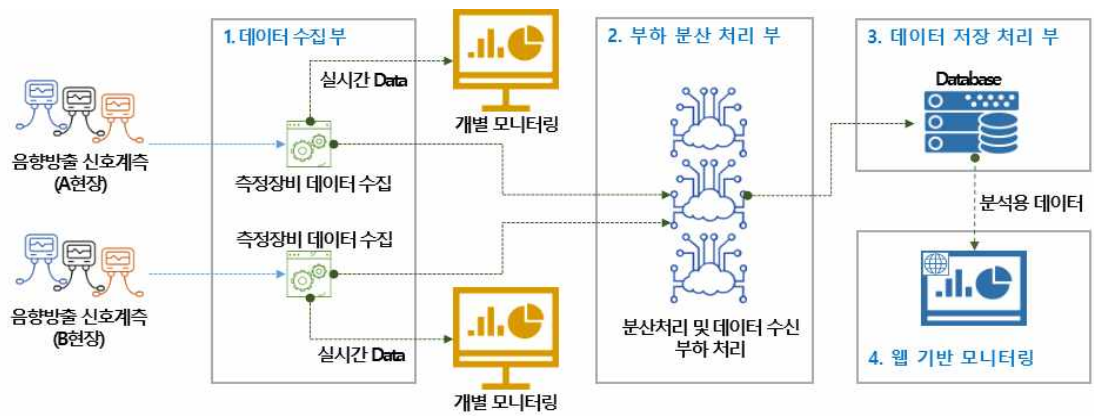


그림 78 데이터 관리 방안

1개의 개별 모니터링 시스템으로 커버할 수 있는 범위는 1~2개 경관에 불가하며, 또한 모든 경관을 동시에 모니터링하는 것은 비용적인 측면에서 비효율적이다. 검사장비를 이용한 단기간(3개월) 모니터링을 수행하여 집중 관리 대상으로 판정되는 일부 경관에 대해서만 상시 모니터링 시스템을 도입하여 관리하는 것이 본 과제의 목표이다.

이렇게 개별 시스템에 의해 계측된 데이터는 사람에 의해 사후 통합 관리하기에 데이터량의 방대함으로 인해 쉽지 않다. 따라서 개별 계측 시스템으로부터 상시 데이터를 공유받는 클라우드 서버를 마련하고 검사장비 및 상시 모니터링 시스템의 데이터가 하나의 클라우드로 관리되도록 시스템을 구성한다. 또한 클라우드 데이터는 다시 웹 기반의 모니터링 환경에서 모니터링이 가능하도록 구성한다. 관리자는 웹에 접속할 수 있는 환경이라면 PC나 노트북, 모바일 기기를 가리지 않고 해당 시스템을 모니터링 할 수 있다.

3차년도 현장 검증 시 시범적용되는 소수 경관에 대해서도 해당 시스템 구성을 시범적으로 적용하고자 한다.

- PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축

1) PSC 거더교 불량 사례별 신호 수집을 위한 데이터베이스 구현

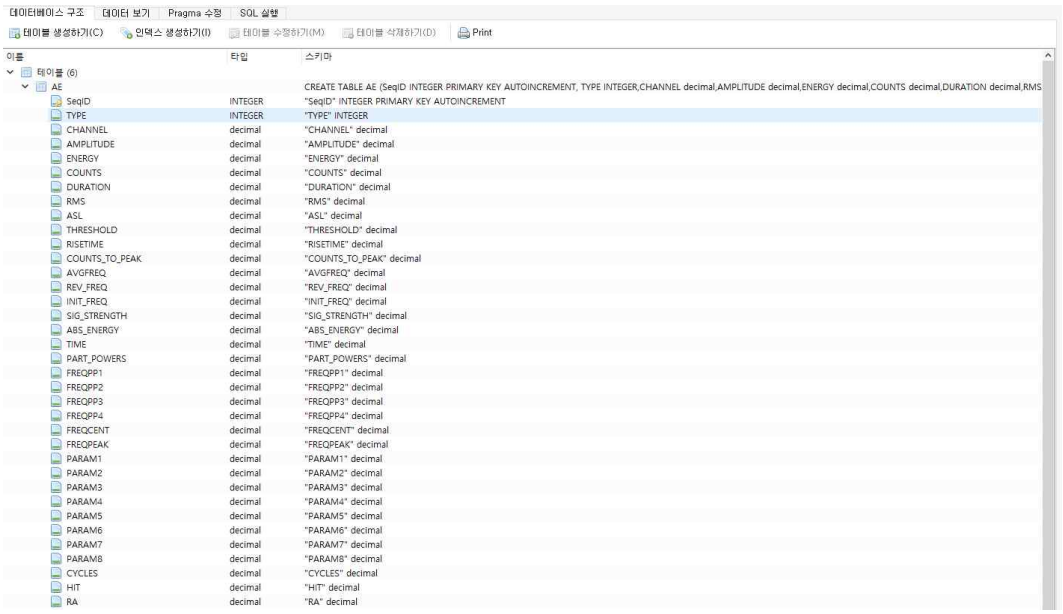


그림 79 데이터베이스 구조

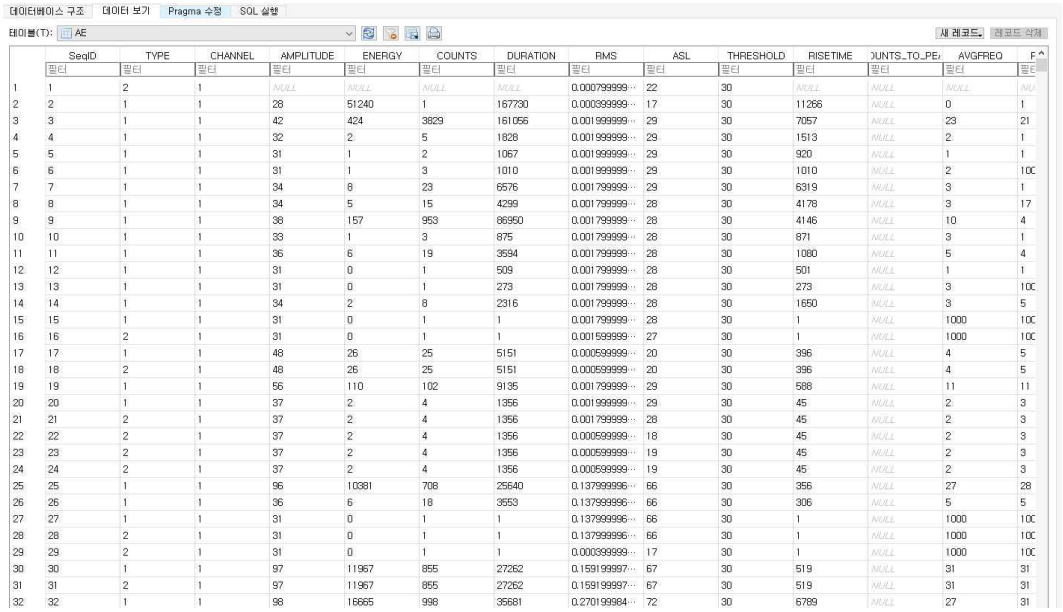


그림 80 데이터베이스에 저장된 음향방출 데이터

2) PSC 거더교 불량 사례별 음향방출신호 특징 추출 및 분석

각 개별 실험에 대한 상세 내용은 아래 공동연구기관의 개발내용과 중복되는 내용이 존재하기 때문에 기존의 내부 분석 결과 자료 이미지로 대신하고, 아래 내용에서 다시금 상세히 기술한다.

2-1) 소형 실험체

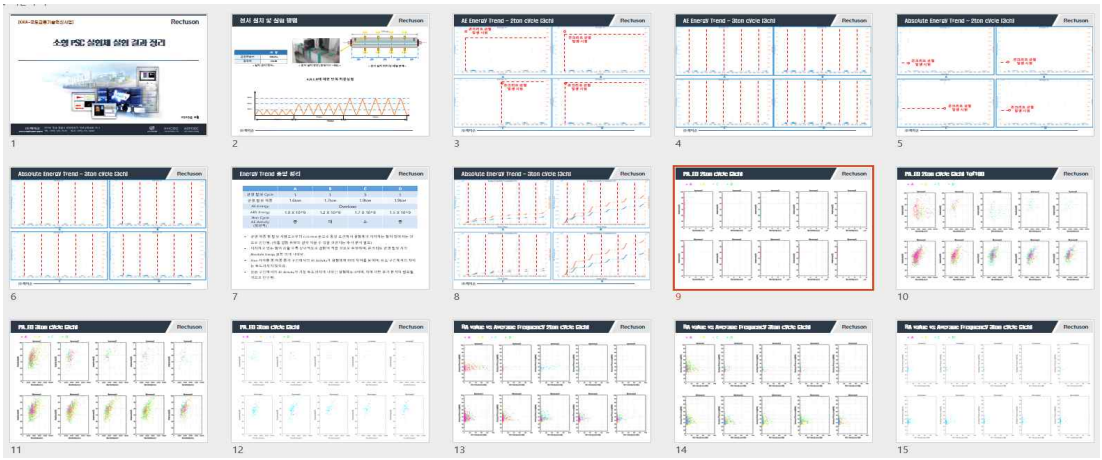


그림 81 소형 실험체 분석 결과 (일부 발췌)

2-2) 폐교량 실험



그림 82 폐교량 실험 분석 결과 (일부 발췌)

2-3) 부식 가속화 실험

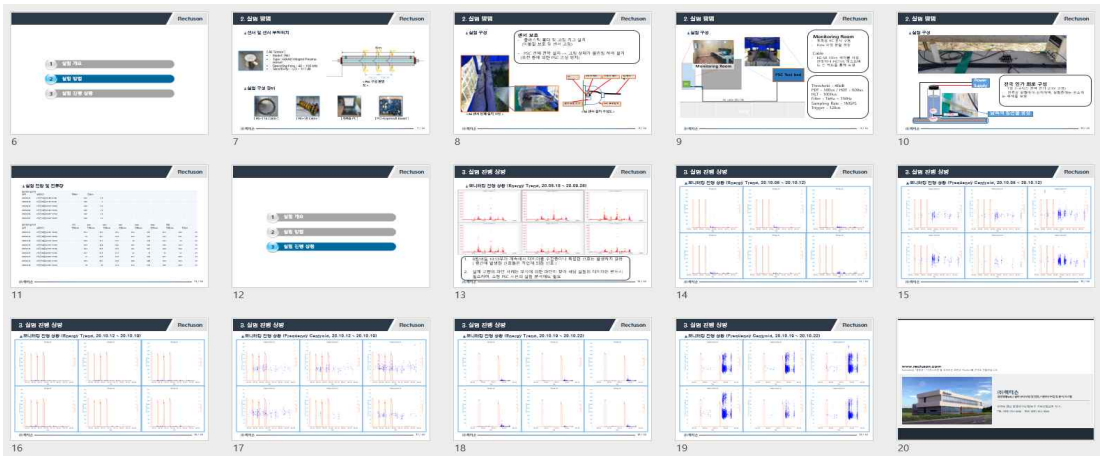


그림 83 부식 가속화 실험 중간 보고 자료(일부 발췌)

해당 실험은 현재진행형으로 수행 중이며, 최종 부식에 의해 강연선 파단이 일어날 때까지를 목표로 하고 있다. 현재 강연선은 콘크리트와 쉬스관 속에 매립된 상태로 육안 확인이 어려워 측정 전류량을 통해 부식 정도를 추정하고 있으나 실제 부식 정도를 정량적으로 파악하기는 어려운 상태이다.

3) 음향방출신호 특징에 따른 이상상태 정의 및 PSC 거더교 불량사례와의 비교검증

표 27 이상상태 별 음향방출신호 특징

분류			AE Feature 구분				
			Energy	Abs. Energy	Rise Time	Average Frequency	Ib value
소형 실험체	콘크리트 최초 균열	단면 결손	Overload	1.0 X 10^9	20,000	30kHz	1.0 감소
		일부 절단	Overload	1.2 X 10^9	48,000	30kHz	1.0 감소
		부식	Overload	1.7 X 10^9	40,000	30kHz	1.0 감소
		정상	Overload	1.5 X 10^9	45,000	30kHz	1.0 감소
		공극	Overload	1.3 X 10^9	47,000	30kHz	1.0 감소
	반복 하중 (3톤)	단면 결손	1,000 미만	1.0 X 10^7 미만	1,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		일부 절단	2,500 미만	2.5 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		부식	1,000 미만	1.0 X 10^7 미만	500 미만	20-40kHz	변동 없음
		정상	2,000 미만	2.5 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		공극	2,000 미만	2.0 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
폐교량 실험	콘크리트 균열(인장부)		1,000 이상	5.0 X 10^7	규정하기 어려움	20-30kHz	1.5 감소
	콘크리트 균열(압축부)		8,000	5.0 X 10^7	35,000	30kHz	1.0 증가
	강연선 파단		20,000	5.0 X 10^8	250	30kHz	변동 없음
	공극에의 강연선 슬립		40,000	7.3 X 10^8	4,000	50kHz	변동 없음
	강연선 파단 후 2차 신호		10,000	2.0 X 10^8	10,000	30kHz	변동 없음
부식 가속화 실험	실시간 계측		100-1,000	1.0 X 10^7 미만	1,000 미만	70kHz	변동 없음
	강연선 파단						
	부식 의심 신호						

- 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증 / PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가

1-1) 손상 유형별 소형 시험체 제작 및 음향방출 기술을 활용한 검사 장비 블라인드 테스트

(1) 실험개요

PSC 구조물에서 다양한 유형의 내부 텐던 손상이 발생할 것으로 판단하였고, 현장 적용에 앞서 아래에 제시된 손상 유형에 대한 음향방출 신호 특성을 확보하기 위하여 소형 시험체를 제작하여 실내 실험을 실시하였다. 추가로, 음향방출을 활용한 내부 텐던 검사 장비 성능검증을 위하여 손상유형에 대해서 블라인드 테스트로 수행하였다.

(2) 소형 실험체 제원 및 센서 설치

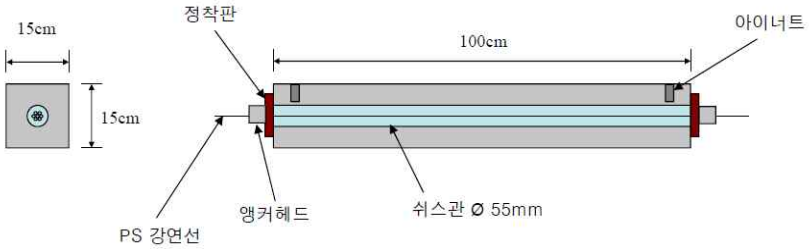


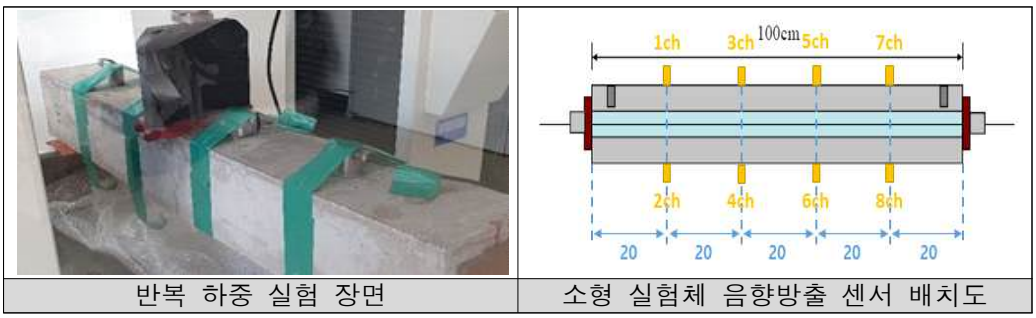
그림 84 소형 PSC 실험체 제작

표 28 소형 PSC 실험체 제원

실험체 명칭	단면 제원 [㎜]			손상종류
	길이	폭	높이	
PSC-1	1000	150	150	무손상
PSC-2	1000	150	150	강연선 손상1
PSC-3	1000	150	150	강연선 손상2
PSC-4	1000	150	150	그라우팅 공극
PSC-5	1000	150	150	강연선 부식
PSC-6	1000	150	150	강연선 무보강

(3) 실험절차

음향방출 센서는 그림에서 보는 바와 같이 실험체의 윗면과 하면에 각각 20cm 간격으로 균일하게 4개씩 설치한 후, 반복 하중 실험으로 실시하였다.



반복 하중 실험 장면 | 소형 실험체 음향방출 센서 배치도

그림 85 소형 실험체의 반복 하중 실험

반복 하중은 1ton, 2ton, 3ton에 걸쳐 아래와 같이 각 5회씩 반복하여 실험하였다. 사전 실험을 통해 콘크리트 균열이 2ton 부근에서 발생함을 확인하였고, 이를 기준으로 ±1ton의 사이클에 대해 반복 실험을 수행하였다.

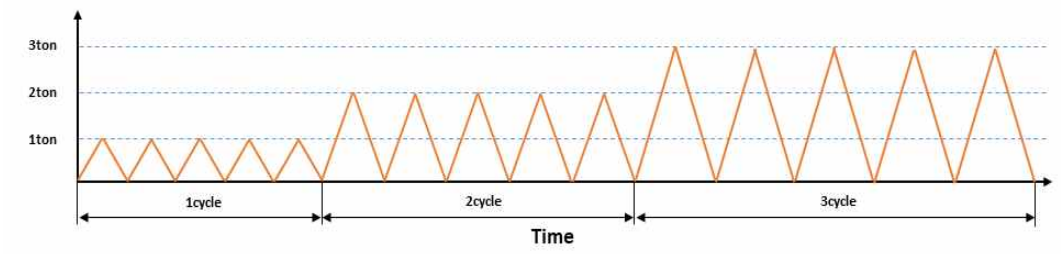


그림 86 반복 하중 시험 계획

(4) 실험결과

1ton cycle에서는 유의미한 데이터를 취득하기가 어려웠기 때문에 2ton과 3ton cycle에 대한 Absolute Energy Trend로 정리한다. A,B,C,D 시편에 대해 비교하였으며, E 시편과 강연선 무보강(콘크리트 시편)에 대해서는 별도로 기술한다.

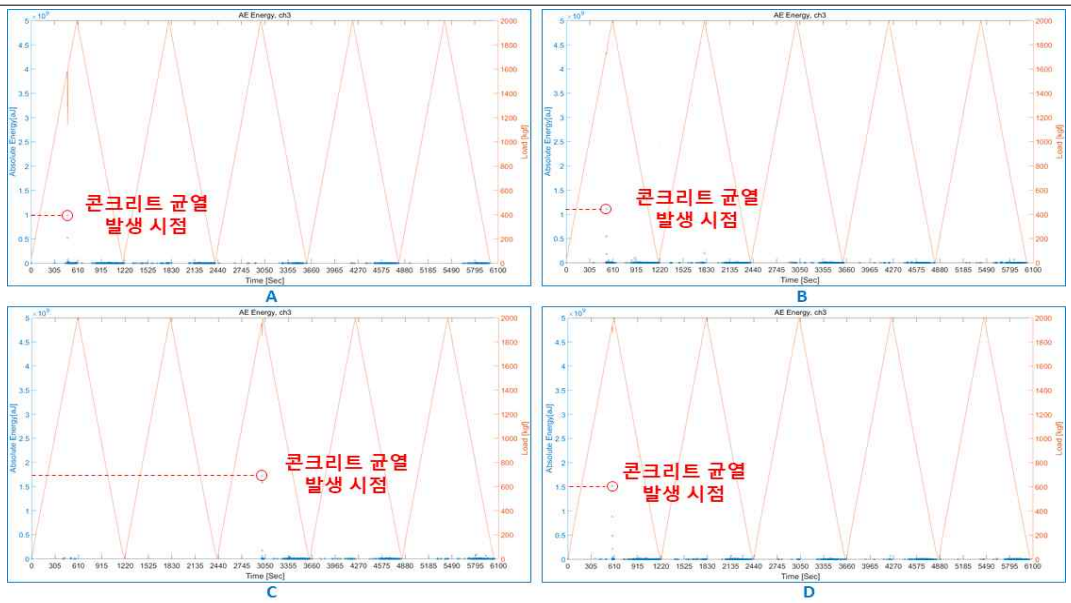


그림 87 Absolute Energy Trend - 2ton Cycle

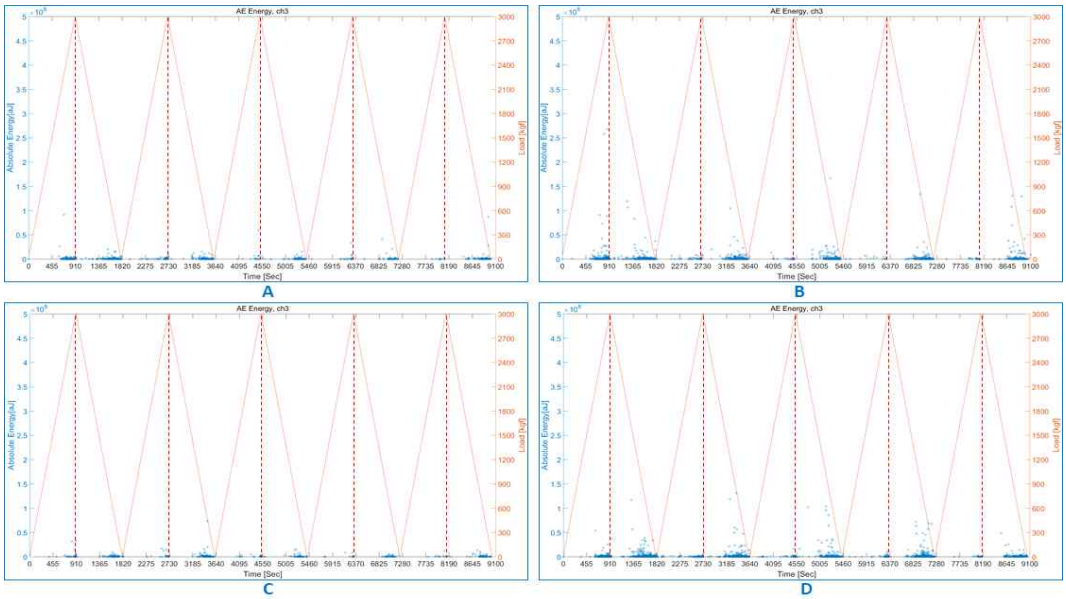


그림 88 Absolute Energy Trend - 3ton Cycle

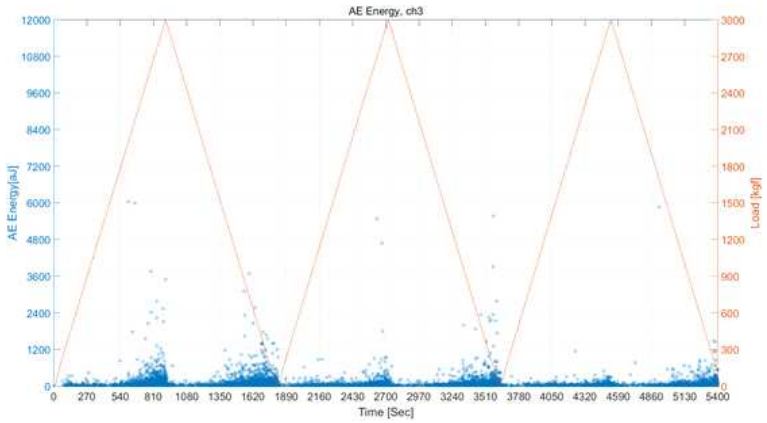


그림 89 AE Energy Trend - 3ton Cycle, E Type

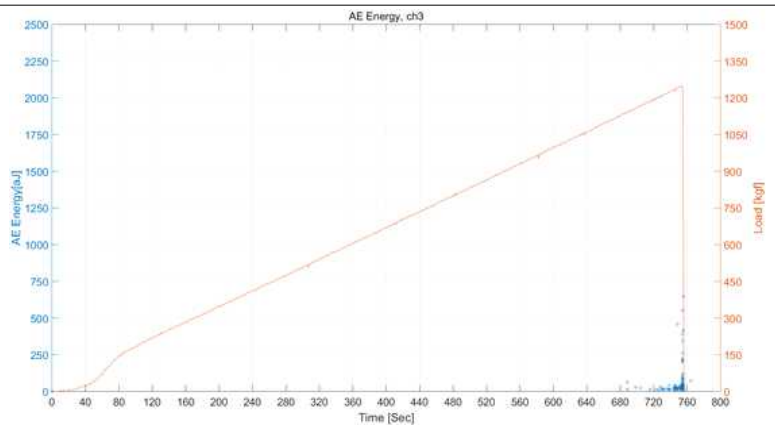


그림 90 AE Energy Trend - 무근 콘크리트(파괴 시점)

표 29 소형 실험체 결과 분류

	A	B	C	D	E	무근
균열 발생 Cycle	1	1	3	1	1	1
균열 발생 하중	1.6ton	1.7ton	1.9ton	1.9ton	1.7ton	1.2ton
AE Energy	Overload					720
ABS Energy	1.0 X 10^9	1.2 X 10^9	1.7 X 10^9	1.5 X 10^9	1.3 X 10^9	7.0 X 10^4
3ton Cycle AE Activity (정성적)	중	대	소	중	대	-
실제 결함	단면 결손	일부 절단	부식	정상	공극	-

해당 실험 결과만으로 PSC 구조물 내부 텐던의 이미 발생한 결함에 대해 반복 하중에 의한 Secondary AE Activity를 검증했다고 보기에는 무리가 따른다. 그러나 반복 하중 조건에서 AE Activity의 발생 정도의 차이가 육안으로 확인이 가능하고, 시편별로 이에 따른 차이가 있음을 확인할 수 있다. 다만 의문사항은 가장 Activity가 낮게 나타나는 것이 정상 시편이 아닌 부식 시편이라는 점에 있다. 이에 대해서는 향후 분석 및 실험을 통해 원인을 규명해야 할 것으로 판단된다.

1-2) PSC 노후 교량의 내부 텐던 파단에 따른 음향방출 신호판별을 위한 실험

(1) 실험개요



그림 91 PSC 노후 교량 내부 텐던 파단 실험

PSC 노후 교량, 산성우천교에서의 내부 텐던 파단 실험을 2020년 7월 31일 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 실시하였다. PSC 노후 교량의 지점부와 중앙부의 내부텐던을 각각 2단계로 파단 후 하중에 의해 발생되는 음향방출 신호 DB를 확보하는데 주목적으로 한다.

(2) PSC 노후 교량 제원 및 센서 설치

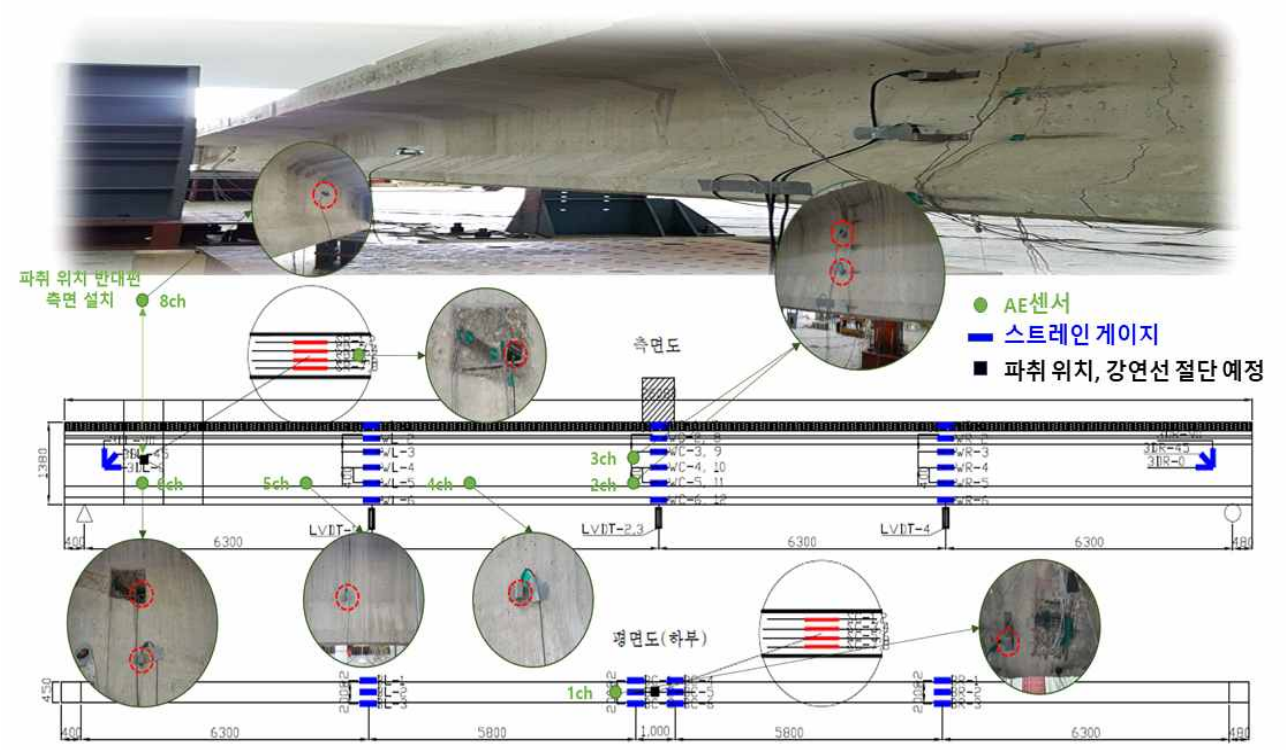


그림 92 PSC 노후 교량 제원 및 센서 설치

(3) 실험절차



그림 93 PSC 노후 교량 내부 텐던 파단 실험절차

(4) 실험결과

● 사전 하중 실험

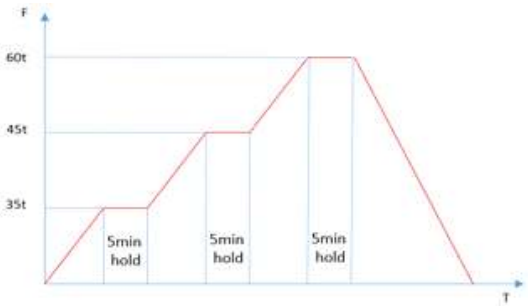


그림 94 사전 하중 실험의 하중 사이클

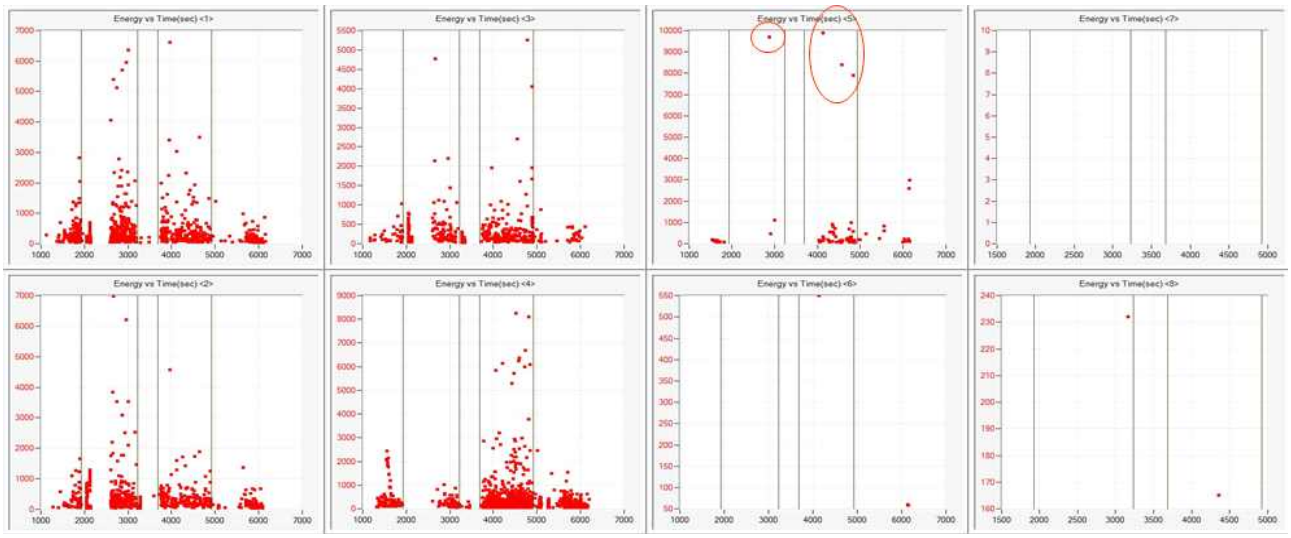


그림 95 사전 하중 실험의 AE Energy Trend

하중 증가 구간에서 1번, 2번, 3번, 4번 센서에서 발생한 신호는 모두 콘크리트 표면 균열로부터 발생한 신호이다. 다만 45t 도달 직전, 45t에서 60t으로 증가하는 구간에서 AE Energy가 순간적으로 크게 증가한 5번 센서 인근에서는 콘크리트 균열이 확인되지 않았다. 콘크리트와 텐던 덕트 사이의 계면 분리 또는 콘크리트 내부 균열이 의심된다.

● 우측 상부 내부텐던 절단 후 하중 실험

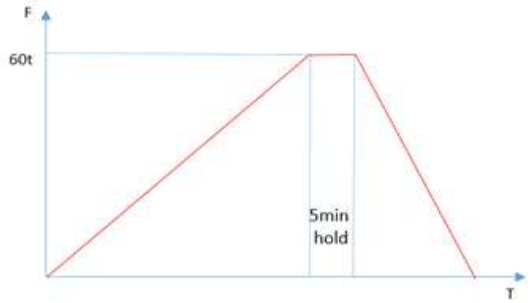


그림 96 우측 상부 내부텐던 절단 후 하중 실험의 하중 사이클

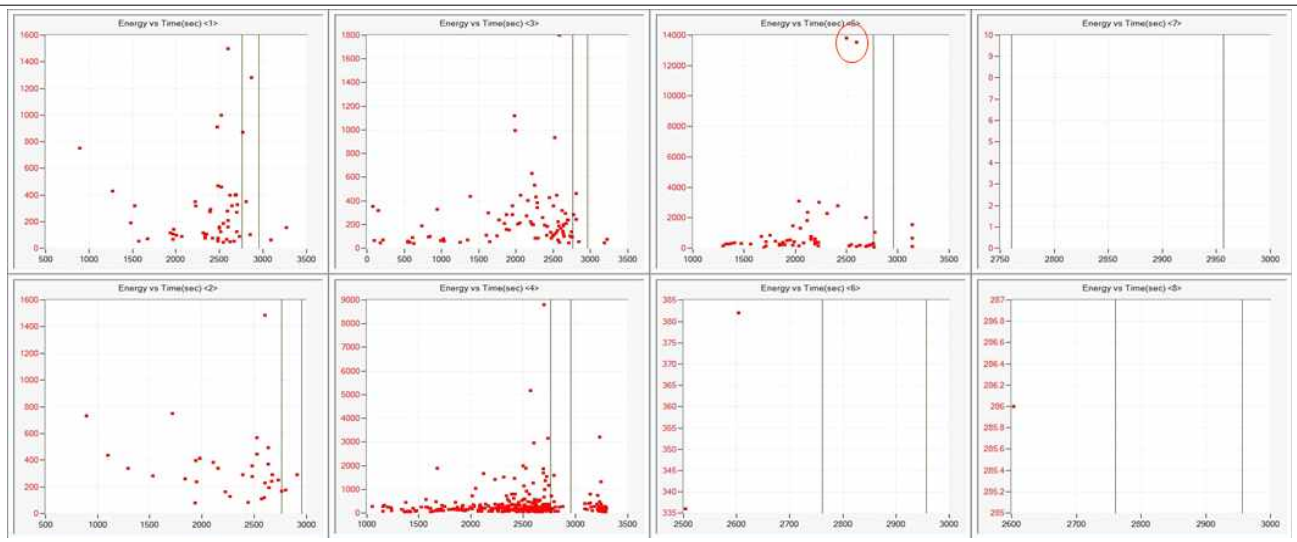


그림 97 우측 상부 내부텐던 절단 후 하중 실험의 AE Energy Trend

하중 증가 구간에서 1번, 2번, 3번, 4번 센서에서 발생한 신호는 콘크리트 표면 균열의 성장 또는 신규 발생으로 확인된다. 5번 센서의 경우 60t 도달 직전에 또 다시 AE Energy의 급격한 증가가 확인되었으며, 주변 표면에서는 콘크리트 균열이 발견되지 않았고, 신규 균열이 발생한 4번 채널 주변에서 전달된 것으로 판단하기에는 5번 채널의 Energy가 더 크게 계측되었다.

● 우측 상부 내부텐던 추가 절단 후 하중 실험

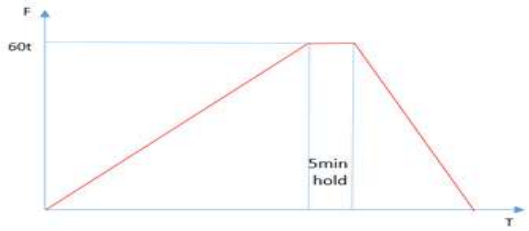


그림 98 우측 상부 내부텐던 추가 절단 후 하중 실험의 하중 사이클

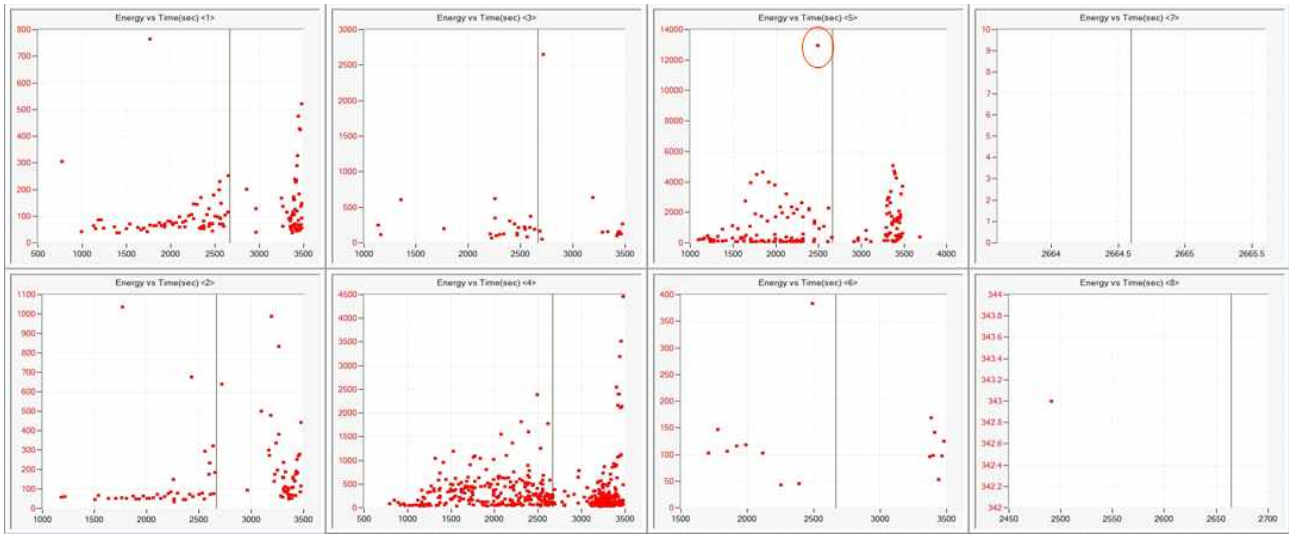


그림 99 우측 상부 내부텐던 추가절단 후 하중 실험의 AE Energy Trend

하중 증가 구간에서 1번, 2번, 3번, 4번 센서에서 오히려 하중 감소 구간에서 더욱 활발한 신호 발생 경향을 확인하였다.(균열이 닫히면서 신호 발생) 5번 센서의 경우 동일하게 60t 도달 직전에 또 다시 AE Energy의 급격한 증가가 확인되었다. 텐던 내부에 공극이 있을 경우 하중 변화에 의해 강선이 움직이면서 신호원이 발생할 수 있다고 조심스럽게 추정하기 시작하였다.

● 하부 내부텐던 절단 후 하중 실험

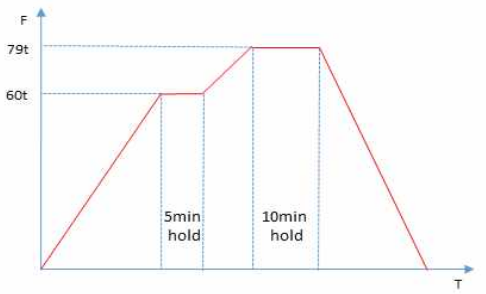


그림 100 하부 내부 텐던 절단 후 하중 실험의 하중 사이클

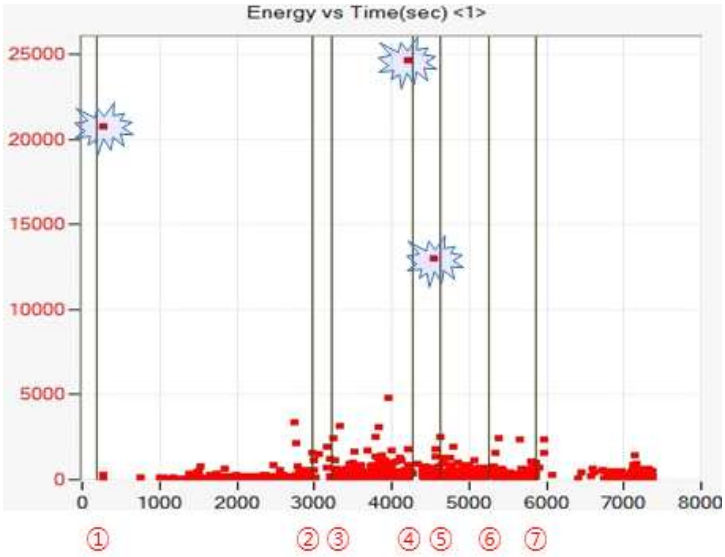


그림 101 실험 중 주요 이벤트 시점 표시

① 1차 강선 파단 시점
② 60t 도달, 이후 5분간 하중 유지
③ 하중 증가 시작 (한계 하중까지)
④ 2차 강선 파단 시점
⑤ 3차 강선 파단 시점
⑥ 압축부(구조물 상단) 콘크리트 균열 (소음大)
⑦ 한계 하중 도달 (79t), 이후 10분간 하중 유지 후 하중 제거

표 30 주요 이벤트 시점의 AE Energy [aJ]

이벤트 시점	1번 채널	2번 채널	3번 채널	4번 채널	5번 채널
①	20,743	15,680	10,853	12,285	9,346
④	24,574	13,947	5,838	29,560	40,181
⑤	12,988	9,118	5,079	21,673	33,620
⑥	-	2,798	8,182	8,744	13,479

2차, 3차 강선 파단 시점에는 끊어진 강선 사이의 간격이 넓은 것으로부터 5번 채널 인근의 공극 부위로 강선이 밀려 들어가면서 큰 신호가 발생한 것으로 추정된다.

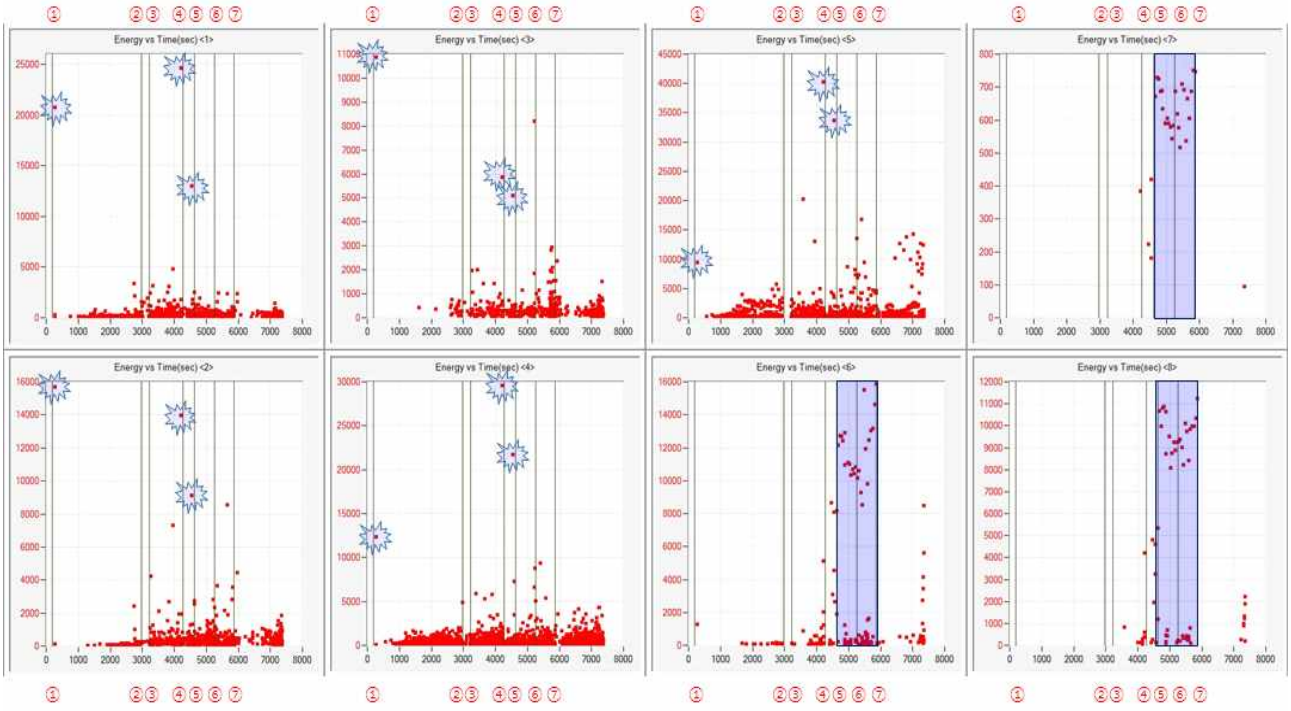


그림 102 하부 내부 텐던 절단 후 하중 실험의 AE Energy Trend

콘크리트 균열에 의해 발생하는 신호 대비 강선 파단 시 발생하는 신호의 AE Energy가 크게 나타났다.(콘크리트 균열 시 AE Energy 10,000 이하, 텐던파단 시 근접 센서 기준 20,000 이상)

[추정] 5번 채널 부근의 텐던 내 공극이 있었고, 하중 변화에 따라 공극 부위에서 신호원이 발생하였다. 텐던의 강선을 절단한 후 실험에서 강선이 끊어진 순간 공극으로 강선이 밀려 들어가면서 5번 채널에서 강선 파단 근접 센서보다 더욱 큰 AE Energy가 계측되었을 것으로 추정된다.

[추정] 3차례의 강선 파단 후 6번, 7번, 8번 센서에서 지속적인 AE Activity가 발생하는 것은 텐던 내 강선이 힘을 잃고 슬립이 일어나기 시작하였기 때문으로 추정되며, 일종의 Secondary AE Activity로 판단된다.

1-3) PSC 실험체 내부 텐던 파단에 따른 음향방출 신호판별을 위한 실험

(1) 실험개요

PSC 구조물에서 내부 텐던 파단을 강연선의 손상에 따른 급작스러운 파단과 강연선 부식에 의한 파단을 구분 해 볼 수 있다. 1차년도 연구에서는 인위적으로 손상된 강연선 파단에 의한 음향방출 신호특성을 확보하였다. 하지만, 부식에 의한 파단이 실제 PSC 구조물의 내부 텐던 파단 유형에 더 가깝기 때문에 이에 대한 음향방출 신호 특성을 확보할 필요가 있다. 본 실험에서는 PSC 실험체에 인위적으로 전기를 가하여 내부 텐던(긴장재)의 부식 촉진 과정에서 발생될 수 있는 음향방출 신호 및 부식에 의한 긴장재 파단 시 발생될 수 있는 음향방출 신호를 검사장비를 이용해 계측 및 진단하는 것을 목적으로 하고 있으며, 금년내에 부식에 의한 강연선 파단 신호 특성을 확보할 예정에 있다. 부식 촉진 실험 개념도는 아래와 같다.

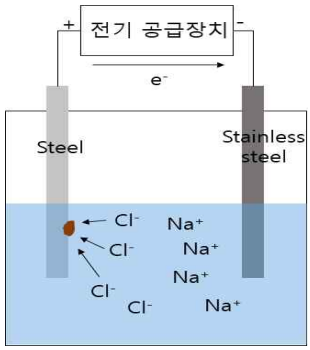


그림 103 PSC 실험체 내부텐던 부식 촉진 실험 개념도

(2) PSC 실험체 제원 및 센서 설치

PSC 실험체(길이: 6,350㎜, 높이: 600㎜, 폭: 300㎜)로 내부 텐던 부식 촉진을 위한 전처리 작업 사진은 다음과 같다.

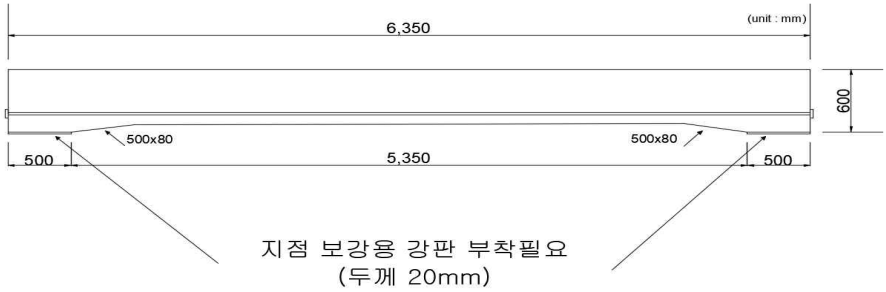


그림 104 부식 촉진 PSC 실험체 제원

	
쉬스관 노출	강연선 노출
	
강연선 전선 연결 및 수분 주입구 설치	세부 센서 설치 사진

그림 105 부식 촉진 실험의 전처리 작업

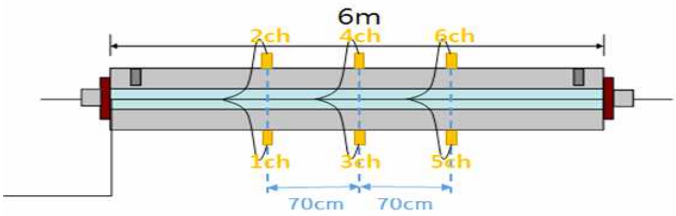


그림 106 음향방출 센서 배치도

부식 촉진 PSC 실험체에서 음향방출 센서는 위와 같이 설치되었으며, 상세 설치 사진은 다음과 같다.

	
전체 설치 사진	세부 센서 설치 사진

그림 107 상세 음향방출 센서 설치 사진

(3) 실험절차

부식 촉진을 위해서 Anode (양극)과 Cathode (음극)로 구성된 두 전극이 존재해야 하는데, 본 PSC 실험체에서는 PSC 내부 텐던을 Anode로 하고, 부식 저항성이 높은 재료인 스테인레스를 Cathode로 하여 일정한 전압 (2.5V)를 간헐적으로 가하였고 있다. NaCl 수용액을 사용하여 전류의 흐름을 원활하게 함과 동시에 전기를 가하였을 때, 염화물 이온의 분극 현상을 이용하여 양극(내부 텐던)의 부식을 가속 시키게 하였다.



그림 108 부식 촉진 실험체 및 AE 모니터링

(4) 실험결과

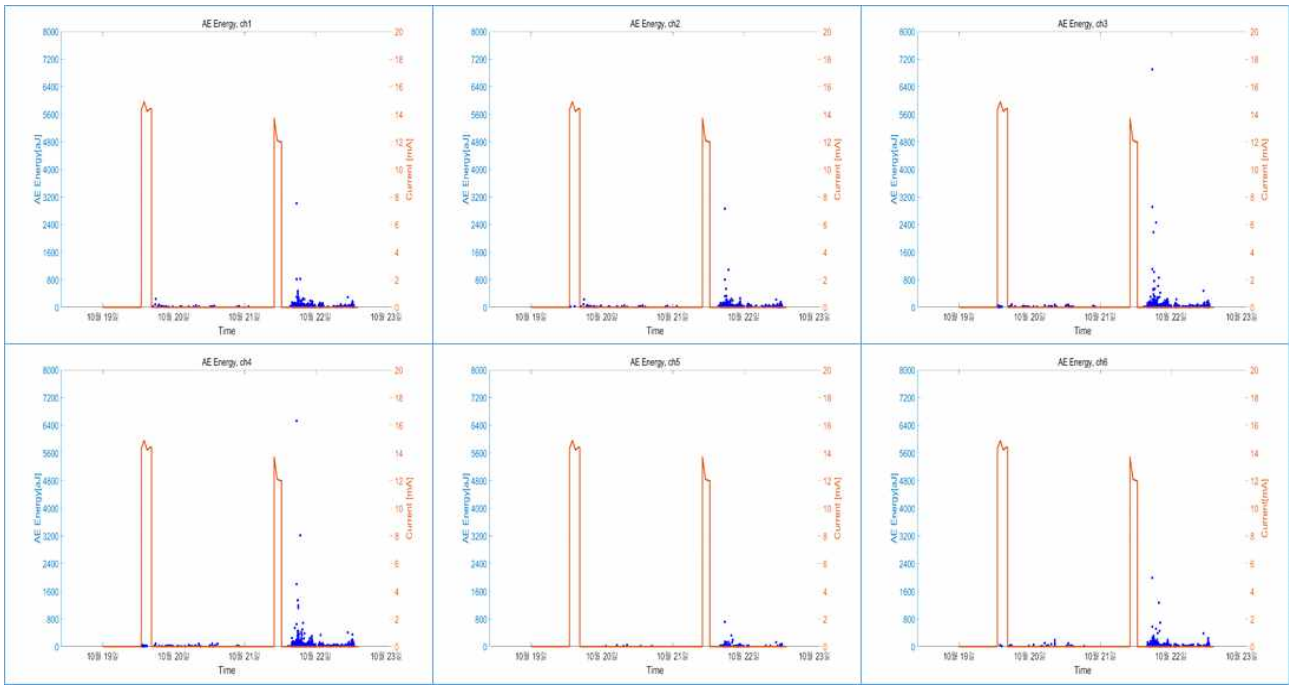


그림 109 전류 인가량 대비 AE Energy Trend

최근 100[aJ] 이상의 AE Energy를 갖는 AE 신호가 발생하는 경향이 보이기 시작하였다. 일시적으로 신호가 1000[aJ] 이상 발생한 시점이 관측되기도 했는데, 현재로서는 빗방울로의 영향으로 판단하고 있다. (실험장소가 해안가 인근이다 보니 바람의 영향으로 천막을 일시적으로 철거한 상태이다.) 해당 실험에 대해서는 추후 경과를 지켜본 후 추가 분석이 필요할 것으로 판단하고 있다.

2) 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증을 위한 텐던 손상 실험체 제작

2-1) PSC 실험체 내부 텐던의 공극 발생에 따른 음향방출 신호판별을 위한 실험

(1) 실험개요

PSC 노후 교량의 내부 텐던 파단 실험에서 파단 신호 이외에 내부 텐던의 공극으로 추정부분에서 추가적인 음향방출 신호가 측정되었으며, 내부 텐던의 공극은 PSC 구조물의 주 취약 부분 중 하나이다. 이를 모사하여 내부 텐던 공극에서 발생될 수 있는 음향방출 신호를 확보하기 위하여 PSC 실험체의 내부 텐던에 인위적인 공극을 발생시키고, 하중 실험시 발생 공극의 존재에 의해 발생될 수 있는 음향방출신호를 계측, 진단하는 것을 목적으로 한다. 현재 11월중에 실험이 예정되어 있으며, 결과분석을 12월까지 완료할 것이다.

(2) PSC 실험체 상세설명 및 센서 설치 방안

PSC 실험체(길이: 10,000㎜, 높이: 600㎜, 폭: 400㎜)로 긴장력 도입을 위한 덕트가 2개 배치되며, 각각 2개의 정착구 및 직경 15.2mm 강연선 3개 적용하였다. 덕트에 그라우트를 충진하며, 그라우트의 손상(공극)을 인위적으로 인가하였다. 덕트에 그라우트를 충진시 시멘트풀의 물/시멘트비를 0.6이상으로 하였으며, 추가로 콘크리트용 기포제를 그라우트에 첨가하여 다량의 공극을 발생하도록 유도하였다.

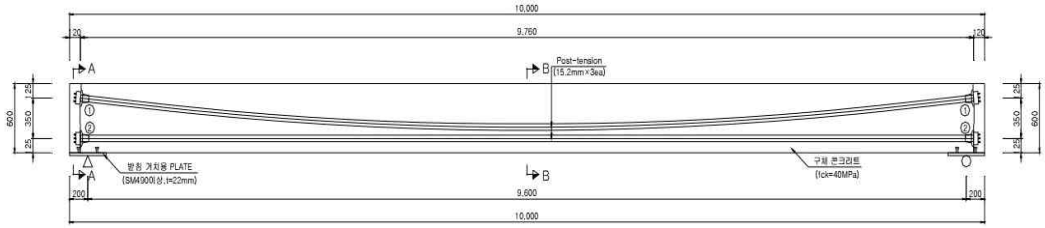


그림 110 내부텐던 공극 발생 PSC 실험체 제원



그림 111 내부텐던 공극 발생 PSC 실험체 제작 장면

(3) 실험절차

실험체에 대한 하중 가력은 2,000 kN 용량의 엑추에이터를 사용하여 변위제어 방식으로 0.12mm/min의 속도로 수행되며, 가력 프레임 상에 양단 단순 지지된다. 하중 가력 시, 실험체의 응답 및 내부텐던 공극에서 발생하는 신호를 계측하기 위하여 AE 센서 및 변위계, 각종 변형률 센서가 실험체에 설치된다. 설치된 센서 및 계측기는 데이터로거를 통해 매초마다 수집되어 컴퓨터에 저장되며 동시에 AE 센서에서 수집되는 신호를 DAQ를 통해 저장한다.

3) 해외의 PSC 박스거더교 유지관리 체계 및 매뉴얼 분석

3-1) 해외의 PSC 박스거더 유지관리 매뉴얼 요약

(1) FDOT, 2003(미국)

- FDOT(Florida Department Of Transportation, 플로리다 교통국)에서는 Fort Lauderdale -Hollywood 국제공항의 인터체인지에 위치한 Ramp D교량이 공항의 확장으로 철거되면서 내부텐던의 상태평가를 실시하였고 이를 통해 PSC 교량의 포스트텐셔닝 시스템의 상태 점검을 위한 절차를 제시

(2) FHWA, 2013(미국)

- FHWA(Federal Highway Administration, 미연방도로국)에서는 2013년 PSC교량 PT텐던의 신뢰성있는 조사를 위한 그라우트 샘플링 수량, 위치, 채취, 검사, 복구에 관한 가이드라인을 제시

(3) CS465, 2020(영국)

- 영국(잉글랜드-Highways England, 스코틀랜드-Transport Scotland, 웨일즈-Llywodraeth Cymru Welsh Go

vernment, 북아일랜드-Department for Infrastructure)에서는 기존에 발표되었던 BD 54/15를 대체하는 CS465를 2020년 발표하였으며, 이는 PSC교량의 위험성 검토, 위험성 평가, 위험성 관리 프로세스를 제시

3-2) 내부 텐던 점검 및 보수에 대한 해외 매뉴얼 및 가이드라인 비교

- 점검 방법에 대한 매뉴얼 비교

표 31 국가별 내부텐던 검사 방법

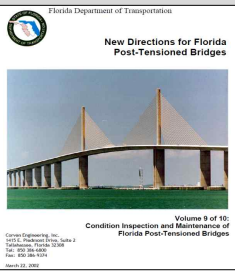
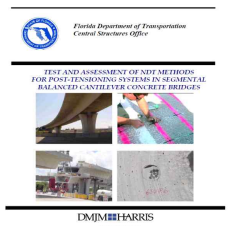
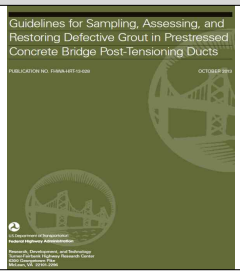
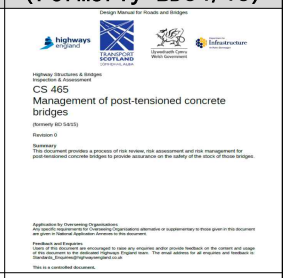
구 분		미 국		영 국
		FDOT 2003	FHWA 2013	CS465 2020
사전검사		계약도면, 시공도, 준공 및 검사보고서 등 검토	계약도면, 시공도, 준공 및 검사보고서 등 검토	계약도면, 시공도, 준공 및 검사보고서 등 검토 Risk Rating을 통한 위험등급 산정
육안검사		균열, 열화, 누수, 처짐, 박리, 신축이음, 교량받침등 결함 조사	균열, 열화, 누수, 처짐, 박리, 신축이음, 교량받침등 결함 조사	균열, 열화, 누수, 처짐, 박리, 신축이음, 교량받침등 결함 조사
세부조사 대상선정	조사위치	육안검사 결함부 / 전략적 위치	육안검사 결함부 / 전략적 위치	육안검사 결함부 / 위험단면(Critical Point) 선정
	조사개소	결함부 전수 / 구조적 중요부 10%	Risk Matrix 통계적 방법 결정	통계적 방법 결정, 위험포인트에 따라 종방향 3~30% 횡방향 1~10%
	비파괴 검사	GPR, IE, MFL	GPR, 내시경	덕트 위치 확인 공극 여부 확인
천공		덕트 손상방지 특수 드릴 사용(19mm)	덕트 손상 주의하여 드릴링(25mm)	덕트 손상 주의하여 드릴링(25mm), 덕트 상단을 천공
그라우트 샘플링		-	염화물 분석	염화물, 황산염, pH. 수분함량 분석

3-3) 내부텐던 유형별 건전성 조사 샘플링 기준

(1) 내부텐던 샘플링 관련 해외기준 분석

- 미국과 영국의 샘플링 기준 및 관련문헌

표 32 미국과 영국의 내부텐던에 대한 샘플링 기준

구분	미국			영국
	FDOT 2002*	FDOT 2003**	FHWA 2013***	CS465 2020**** (Formerly BD54/15)
관련 문헌				
샘플링 수량 산출 기준	• 공용년수 10년 이상 교량 대상으로 최대 5% 제시	• SBCCB(Segmental Balanced Cantilever Concrete Bridge) 교량(공용년수 10년 이상) 대상으로 최대 10% 제시	• Risk Matrix 개념에 의한 확률 통계적 샘플링 수량 산정 • 텐던 위험도 수준과 샘플링에 의해 구조물에 미치는 영향 정도를 평가하여 각 신뢰도별 결함 발생 비율 수준에 따른 샘플링 수량 제시	• 임계점(Critical Point) 비율에 기초한 통계적 방법으로 산정 • 종방향 텐던 CL = 3.57 CPL0.36 (30%~2.75%이하) • 횡방향 텐던 CT = 1.21 CPT0.36 (10%~0.95%이하)
조사 범위	• NDT 조사 • 내시경 조사 (Invasive Inspection) • 엔지니어링적 판단 필요	• NDT 조사 • 내시경 조사 (Invasive Inspection) • 심각한 결함 발견시 전수조사 권고 • 엔지니어링적 판단에 의해 진행	• NDT 조사 • 내시경 조사 (Using a borescope) • 심각한 결함여부에 따라 파쇠조사	• NDT 조사 • 내시경 조사 (Use of an endoscope) • 심각한 결함여부에 따라 파쇠조사

*	New Direction for Florida Post-Tensioned Bridges(Volume 9 • Condition Inspection and Maintenance of Florida Post-Tensioned Bridge), Florida Department of Transportation(FDOT), 2002
**	Test and Assessment of NDT Methods for Post-Tensioning System in Segmental Balanced Cantilever Concrete Bridges, Florida Department of Transportatio n(FDOT), 2003
***	Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts, Federal Highway Administration(FHWA), 2013
****	Management of Post-Tensioned Concrete Bridges, Highwys England, 2020

3-4) 내부텐던 장기 모니터링 유지관리 LCC 분석(기간, 예산, 인력 등)

(1) 장기 모니터링 LCC(Life Cycle Cost, 생애주기비용) 개요

- AE 장기모니터링 시스템 구축 시 LCC 분석

• LCC 분석 프로그램 예시인 ProLCC 프로그램에 의한 LCC 분석 예정

• ProLCC는 단일 교량에 대한 LCC 비용예측 시스템이며, 교량 제원과 유지관리비용 및 유지관리시기를 입력하면 관리자 비용과 사용자 비용의 계산이 가능

• 유지관리 시기를 확정적 및 확률적으로 설정이 가능하며, 이에 따라 확정적 및 확률적 LCC 비용예측이 가능

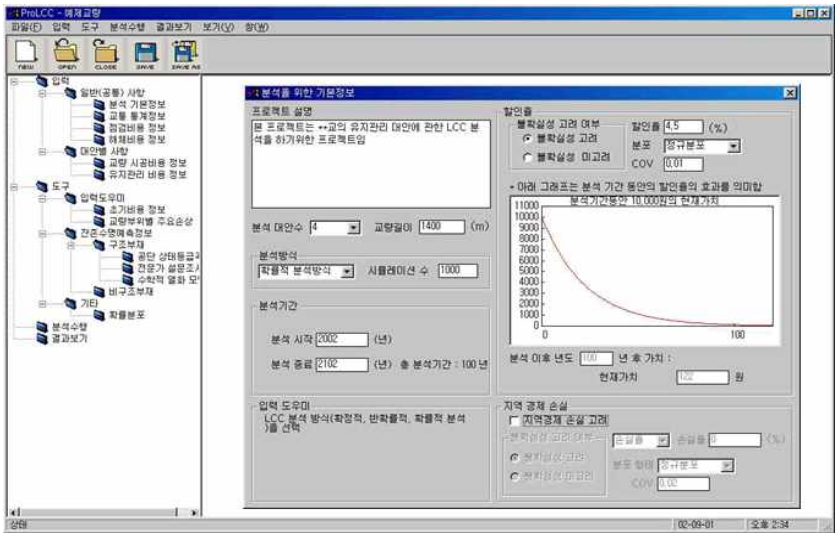


그림 112 ProLCC 기본정보 입력창

• 주요기능은 유지관리 대안분석을 통한 보수 보강공법의 선정이며, 각 유지관리 대안 별 LCAP(Life Cycle Activity Profile)를 설정하여 유지관리시기, 보수, 보강공법 및 보수, 보강효과를 가정하고 이에 따른 생애주기비용을 예측

• 대안을 선정하기 위해서 현재의 상태등급에 따라 사용할 수 있는 조치로 주형의 보수, 하부구조 보수·보강 방안 등을 선정함. 현재의 조치에 따른 유지관리 Profile은 상태등급에 따라 발생가능한 모든 조치를 구성한 이후, 이 중에서 가장 적합하다고 판단되는 Profile을 각각의 대안에 대하여 구성

• 개별 유지관리 대안에 대한 LCAP 설정이 완료된 이후 분석 과정을 거치면 분석 기간 동안 누적되는 생애주기비용이 제시

(2) 내부텐턴 장기 모니터링을 위한 LCC 분석 및 최적화

- 확산을 위해서는 경제성 확보가 필수이므로 PSC박스거더교 내부텐던 파단 검출 시스템(저가형) 및 손상정보(위치, 유형 등) 실시간 모니터링 시스템(고가형)의 two-track 전략으로 기술 적용 추진

- 서울시 PSC박스거더교(12개소) 개별교량의 장기 모니터링 기간 및 예산 산정

표 33 ProLCC 주요 입력 변수(예시)

입력항목	주요 입력 변수	FMS내 데이터 존재 여부
기본 정보	• 할인율, 교량 길이, 준공년도 등 기본 제원 • 확률적 위험도 변수(평균 및 변동계수) • 불확실성 고려여부	부분 존재
교통 정보	• 교통량추정방식(선형, 지수형) • 교통량 분포형태, 변동계수 • 5종 교통량(업무용구성비, 재차인원), 유류비 • 보수 공사 조건(평균속도, 지체시간 등)	없음
유지 관리 대안별 일반정보	• 상부 및 하부 구조, 초기 공사 비용 • 각 형식별 부재별 조치 물량(초기조치, 유지관리조치, 각 대안별로 각각 입력)	없음
유지 관리 비용 정보	• 각 형식별 부재별 조치 단위비용(초기조치, 유지관리조치, 각 대안별로 각각 입력) • 이용자비용 고려여부 및 공사조건 • 항목에 따른 적용 공법 및 적용비율, 유지관리 조치 시작년도 • 보수주기(분포형태), 공사기간, 단위비용	없음
조사 정보	• 보수 · 보강 이력정보 • 외관상태 결과(바닥판, 주형, 하부구조)	부분 존재
점검비용 정보	• 불확실성 고려 여부 • 정기점검, 정밀점검, 정밀안전 진단에 해당하는 비용에 대한 입력	부분 존재
해체비용 정보	• 콘크리트와 강재의 해체 · 폐기비용, 변동계수의 입력 • 분포형태의 선택	없음

표 34 LCC 분석 결과(예시)

구분	대안1	대안2	대안3
	무조치	무조치 (바닥판 교체)	바닥판보강/주형보수 (성능개선)
기대 LCC	1292.055	1536.939	1039.867
대안 1 대비 상대기대 LCC	100	118.95	80.48
상대 절감액	0	-244.884	252.188

○ 3차년도

- 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행

1) 설치 전 현장 답사

1-1) 개요

현장 답사는 건설기술연구원의 사전 답사 결과를 참조하여 부식이 발견된 구간을 전후로 수행하였다. 홍제천고가교, 성동 방향 MP70~MP100(70D~100U) 구간을 수행하였으며, 육안검사를 통해 녹(부식 흔적)이나 백태, 누수 흔적, 균열 등을 확인하고 AE 센서의 설치 위치를 식별하였다.

1-2) 답사 결과

사전조사에서 확인된 것처럼 주로 세그먼트 접합부에서 결함 흔적이 확인되었다. 총 5개 지점에 대해 센서를 설치하기로 하였으며, 이 중 Gateway와 가까운(전원 위치와 가까운) 구간에 외산 시스템을 추가로 설치하여 비교 검증을 수행하고자 한다. 다음 그림 2.10은 AE 시스템 및 센서의 설치 위치를 표시한 개략도이고, 표 2.2는 각 센서 설치 위치별 센서 수량과 선정 사유(육안으로 확인된 결함흔적)이다.

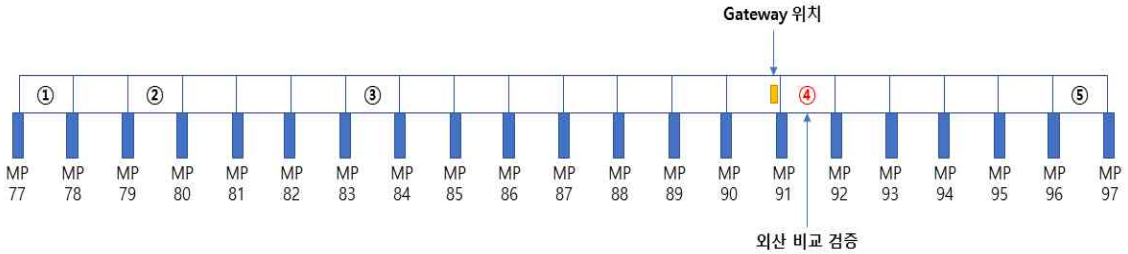


그림 113 AE 시스템 및 센서 상세 설치 위치

표 35 센서 설치 위치별 상세

	설치 위치	센서 수량	선정 사유
①	77N9D-78N9U	4	Keyseg 위치, 백태 및 녹 확인
②	79N9D-80N9U	3	Keyseg 위치, 백태 확인
③	83N7D-83N8D 84N7U-84N8U	4	코너 구간, 백태 확인 물이 흘러들어와 바닥에 고여있음을 확인 (수분 침투) 취약 위치로 판단됨
④	91N2D-91N3D	3	백태와 녹 확인 콘크리트 들뜸 확인
⑤	96N9D-97N9U 97N7U-97N8U	4	Keyseg 위치, 백태 및 녹 확인
	총 계	18	

2) AE 시스템 및 센서 설치 위치

2-1) ①번 위치 : 77N9D-78N9U

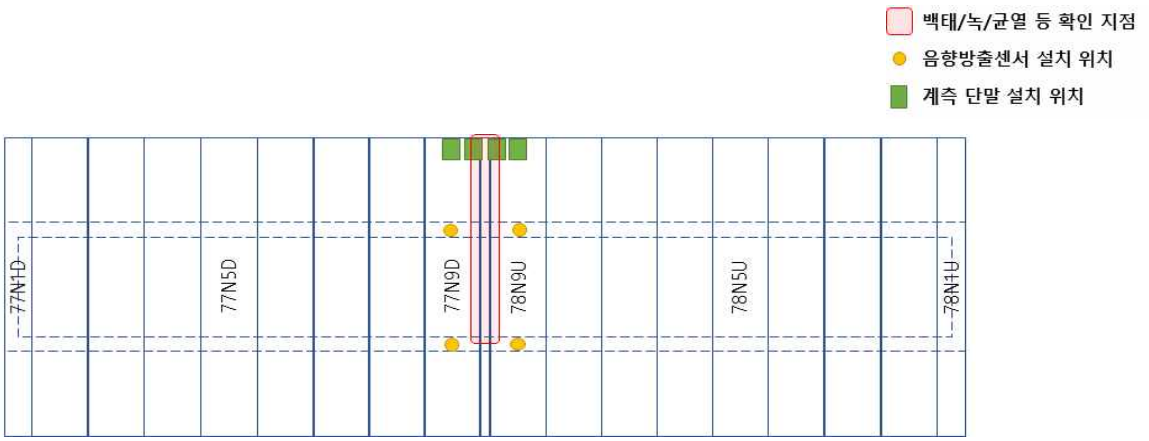


그림 114 77N9D-78N9U, AE 센서 설치 위치



그림 115 77N9D-78N9U, 상태 사진

2-2) ②번 위치 : 79N9D-80N9U



그림 116 79N9D-80N9U, AE 센서 설치 위치



그림 117 79N9D-80N9U, 상태 사진

2-3) ③번 위치 : 83N7D-83N8D, 84N7U-84N8U

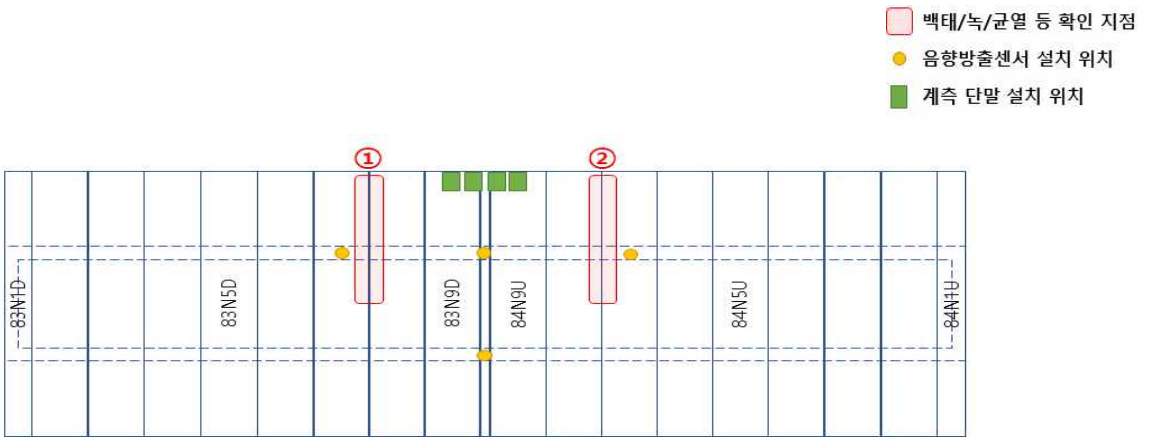
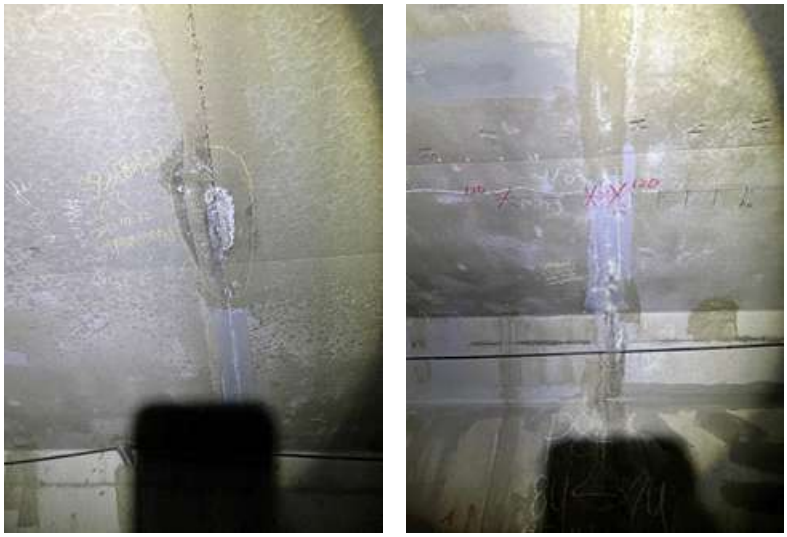


그림 118 83N7D-83N8D, 84N7U-84N8U, AE 센서 설치 위치



83N7D-83N8D, 상태 사진 84N7U-84N8U, 상태 사진

그림 119 83N7D-83N8D, 84N7U-84N8U, 상태사진

2-4) ④번 위치 : 91N2D-91N3D

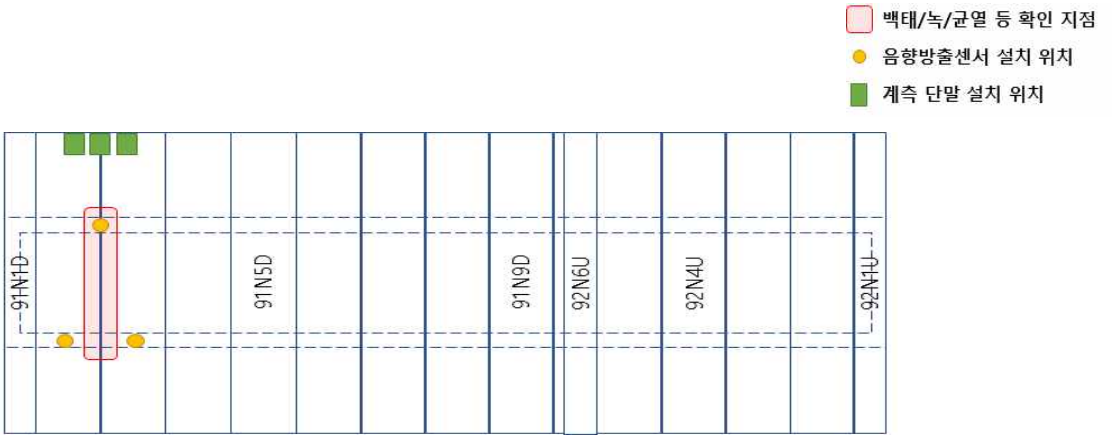


그림 120 91N2D-91N3D, AE 센서 설치 위치



그림 121 91N2D-91N3D, 상태 사진

2-5) ⑤번 위치 : 96N9D-97N9U, 97N7U-97N8U

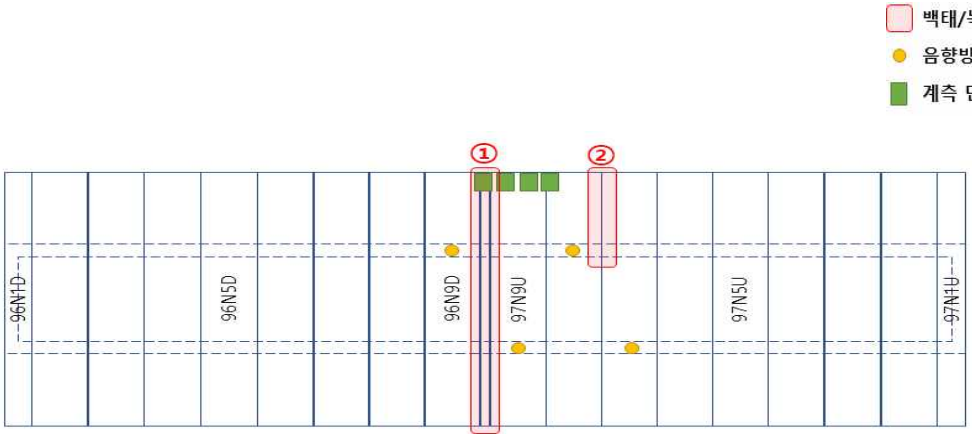


그림 122 96N9D-97N9U, 97N7U-97N8U, AE 센서 설치 위치



96N9D-97N9U, 상태 사진 97N7U-97N8U, 상태 사진

그림 123 96N9D-97N9U, 97N7U-97N8U, 상태 사진

3) 시스템 구성 및 주요 자재

3-1) 시스템 구성

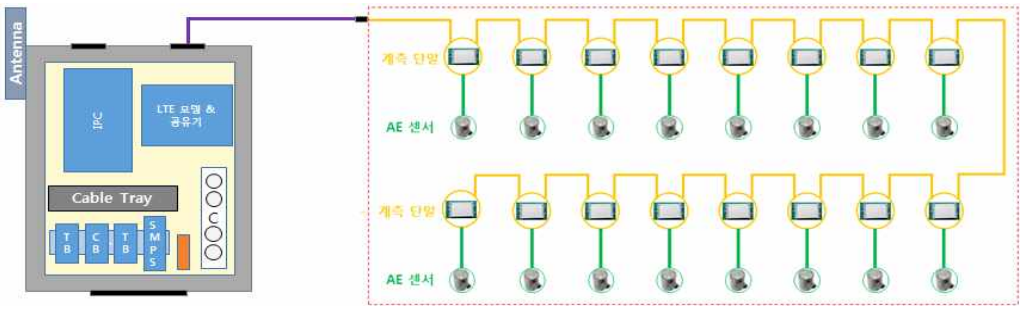


그림 124 AE 시스템 구성도

별도의 UPS 설치하여 정전 상황 대비, UPS의 전원 공급 시간은 최소 8시간 가능하도록 별도의 배터리 설치한다. (배터리 용량 : 3800mA/h x 2) 판넬 설치 위치가 교량 내부에 위치하기 때문에 통신망 수신을 원활하게 하기 위해 별도의 안테나를 부착한다.



<판넬 설치 위치>



< 거더 사이 틈 >



<거더 전원>

그림 125 AE 시스템 전원 위치 및 Gateway 설치 위치 표시

시스템 판넬은 LTE 모듈의 수신률 향상을 위해 거더 사이의 틈새 공간 인근에 설치하였으며, 거더 내부의 전원반 위치를 확인하여 전원을 끌어올 수 있는 위치에 설치하였다.

3-2) 주요 자재

표 36 AE 시스템 주요 자재 목록

ID	품 명	규 격	수량	비고
1	음향방출 센서	60kHz 공진형	18EA	
2	계측 단말	1CH, RS-485	18EA	
3	판넬	500(W)*600(H)*250(D)	1EA	속판 취부
4	임베디드 PC	Intel Celeron Quad core	1EA	
5	무정전전원공급기	220VAC/220VAC/10A	1EA	
6	UPS 배터리	38Ah	2EA	
7	LTE 모뎀	-	1EA	
8	공유기	고정 ip할당	1EA	
9	SMPS	120W, 24DC	2EA	
10	MCCB	정격 전류 10A 이상	1EA	
11	센서 케이블	RG-58	120m*3roll 220m*3roll	
12	신호(통신) 케이블	2C18 + 2C22	800m	
13	파워 케이블	3C 2.5SQ	400m	
14	플렉시블 전선관	∅28	1100m	
15	플렉시블 전선관	∅22	400m	
16	Software1	게이트웨이 운용 S/W	1식	
17	Software2	웹 기반 모니터링 S/W	1식	교량 외부 데이터센터

4) 현장 설치

4-1) 자재 반입

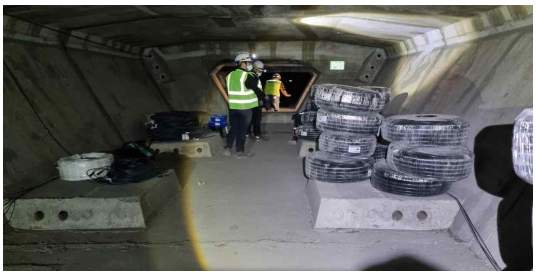
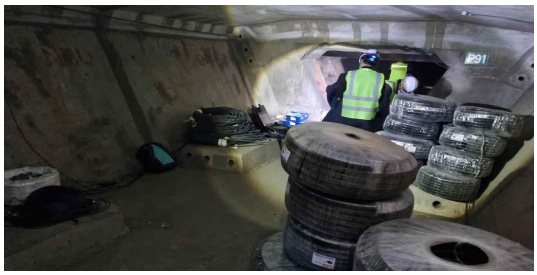



그림 126 거더 내부 자재 반입 사진

4-2) 센서 설치 위치 마킹

(1) 센서 위치 마킹은 콘크리트 표면에 페인트 마커를 이용해 표기한다.

(2) 페인트 마커는 형광 노란색 색상 또는 유사 색상을 사용한다.

(3) PSC 박스거더 내 콘크리트 표면은 먼지가 쌓여 있는 경우가 많으므로 솔이나 헝겊 등을 이용해 사전에 이를 제거할 필요가 있다.

(4) 마킹은 센서 설치 위치를 “ae”로 표기하고, 옆에 예정된 채널 번호를 기입한다.




그림 127 센서 설치 위치 사전 마킹

4-2) 케이블 포설

(1) 현장에 포설되는 모든 케이블은 후렉시블로 보호된 상태여야 한다.

(2) 센서 고정 치구나 시스템 판넬에는 후렉시블 커넥터가 직접적으로 연결될 수 있는 상태여야 하며, 외부의 충격이나 수분 등의 영향에 케이블이 직접적으로 노출되지 않도록 밀폐되어야 한다.

(3) 후렉시블은 외력에 의해 쉽게 움직일 수 없도록 고정되어 있어야 한다.



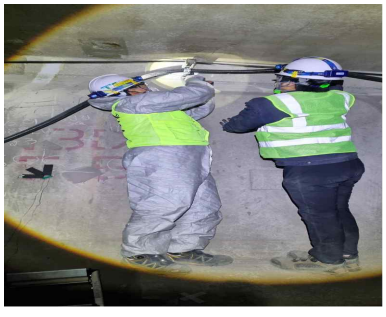



그림 128 케이블 포설 작업 중 사진

4-3) AE 계측 단말 설치

(1) 센서 계측 단말 역시 에폭시를 이용해 벽면이나 바닥에 고정한다.

(2) 센서와의 거리는 최대 5m 이내로 제한한다.

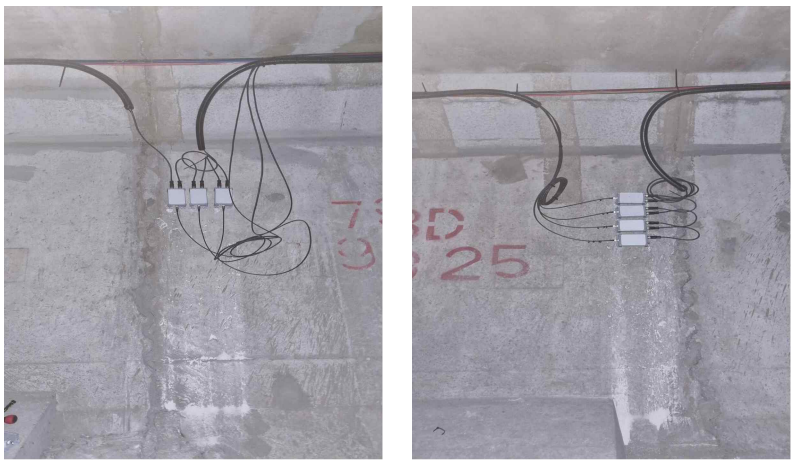


그림 129 AE 계측 단말 설치 사진

(3) 센서와 계측 단말 간의 사양 상 최대거리는 200m이다. 다만, 센서와 계측 단말 사이에 거리가 멀어지면 계측 단말에서 소모되는 전력량이 증가한다. 따라서 보다 효율적인 시스템 구성을 위해 특수한 상황을 제외하고는 센서와 계측 단말 간의 거리를 최대 5m로 제한한다.

4-4) AE 센서 설치

(1) 설치 대상 표면을 정리한다. 먼지를 제거하고, 표면의 거칠기를 확인한다. 표면이 거칠다면 끌이나 사포를 활용하여 평탄화 작업을 수행한다. 최소한 센서의 바닥면이 콘크리트와 직접 닿는 지점은 평탄하고 매끄러워야 한다.

(2) 센서의 바닥면에 커플런트를 도포한다.

(3) 센서의 바닥면이 콘크리트 표면에 닿도록 하고, 고정 치구로 감싸 누른다. 이 때, 고정 치구와 콘크리트는 에폭시 접착제를 활용하여 서로 고정되도록 한다.

(4) 고정 치구의 에폭시가 경화될 때까지 센서를 임시로 고정한다. 임시 고정에는 청테이프를 활용한다.

(5) 에폭시가 경화되는 과정에서 센서의 바닥면과 콘크리트 사이에 공극이 생기지 않도록 유의한다.



그림 130 현장 센서 설치 사진

(6) 센서 설치 시 대상 표면이 고르지 않은 상태에서 센서를 설치하면 대상과 센서의 바닥면 사이에 공극이 생기기 쉽다. 또한 거친 표면이 센서의 바닥면을 손상시키는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 음향방출 센서는 설치 전 대상 표면을 고르게 하는 작업이 필수적이다.



그림 131 콘크리트 표면 다듬기 (예시)

(7) 커플런트는 일반적으로 실리콘 재질에 그리스를 주로 사용한다. 커플런트의 조건은 점성을 가지고 있으면서도 공극(기포)를 포함하지 않는 반고체 상태의 물질이다. 또한 시간의 경과나 온도 변화에 의해 쉽게 경화되지 않아야 한다. 수분이 빠져나가면서 커플런트가 경화되면 공극이 발생하기 쉬워 신호 전달 특성이 떨어지고, 경화된 커플런트에 의해 센서의 바닥면이 손상될 수 있다. 일반적으로 음향방출센서에 널리 사용하는 커플런트 제품은 다음과 같다.



그림 132 실리콘 그리스 - 커플런트 예시

(8) 커플런트가 경화되었을 때의 센서 파손 우려나 공극에 의한 신호 감쇠 우려가 있기 때문에 센서는 직접적인 고정방식보다는 치구와 에폭시를 이용해 간접적으로 고정한다. 이 때 사용하는 에폭시에 대한 특별한 제약사항은 없으나 가급적 석재나 콘크리트용으로 개발된 제품을 사용하는 것이 좋다.



그림 133 석재용 에폭시(예시)



그림 134 센서 설치 완료 후 사진

4-5) AE 시스템 판넬 설치

(1) 시스템 판넬은 현장이 아닌 자재 준비 과정에서 사전에 조립되어 있어야 한다.

(2) 시스템 판넬은 공급 전원을 연결하기 용이한 장소에 설치한다.

(3) LTE를 이용하여 외부와 통신을 수행하므로, 설치장소가 LTE 연결에 문제가 없는지 확인이 필요하다.

(4) 시스템 판넬은 벽면에 앵커볼트 등을 이용하여 단단히 고정한다.

(5) 전원을 결선하고 기본적인 동작 확인을 수행한다.

(6) 센서 케이블을 연결하고 기본적인 동작 확인 수행한다.

(7) 외부전원 차단 시 UPS 동작을 확인한다.



그림 135 시스템 판넬 설치 및 테스트 사진

4-6) 시스템 통합 시험

(1) 원격으로 Gateway 내 임베디드 PC에 접속하여 조작한다.

(2) 데이터 수집 프로그램을 실행하고, 동작 유무를 체크한다.

(3) 웹 서버에 원격으로 접속하여 데이터베이스 동작 유무를 확인한다.



그림 136 시스템 통합 시험 (신호 수신 확인)

5) 통합 웹 모니터링 시스템

5-1) 시스템 구성



그림 137 통합 웹 모니터링 시스템 구성도

통합 웹 모니터링 시스템은 그림과 같이 구성된다. 현장에 설치된 게이트웨이로부터 LTE 통신으로 서버로 데이터를 보낸다. 서버는 ㈜렉터슨에서 운영하는 데이터 센터에서 통합된다. 서버에 보내진 데이터는 실시간으로 웹 환경에서 모니터링할 수 있다. 이 때 사용되는 웹 환경은 다음 장절에서 보다 상세히 설명하도록 하겠다. 웹 환경에서 실시간 모니터링을 수행할 수 있기 때문에 사용자는 노트북이나 스마트폰 등 다양한 환경에서 별도의 프로그램 설치 없이 시스템에 접근할 수 있다. 물론 아이디/패스워드를 부여하여 자격을 갖춘 사용자만이 해당 웹에 접근할 수 있도록 관리된다.

해당 통합 웹 모니터링 시스템은 일종의 플랫폼으로 확장성을 고려해 개발되었으며, 향후 추가 구간이나 다른 교량에 AE 시스템이 적용되더라도 동일한 환경에서 통합 모니터링을 수행할 수 있다. 또한 웹 모니터링 환경은 데이터만 서버에 전송된다면 현장의 영상이나 이종 센서(가속도, 기울기, GPS 등)의 데이터 또한 동시에 모니터링 할 수 있다.

5-2) PSC 교량 텐던 손상 감시 프로그램

5-2-1) 프로그램 실행 (웹 사이트 접속)

(1) 브라우저 실행 후 사이트에 접속한다.

(2) 접속 시 아래 그림 4.2와 같은 로그인 화면이 표시된다.

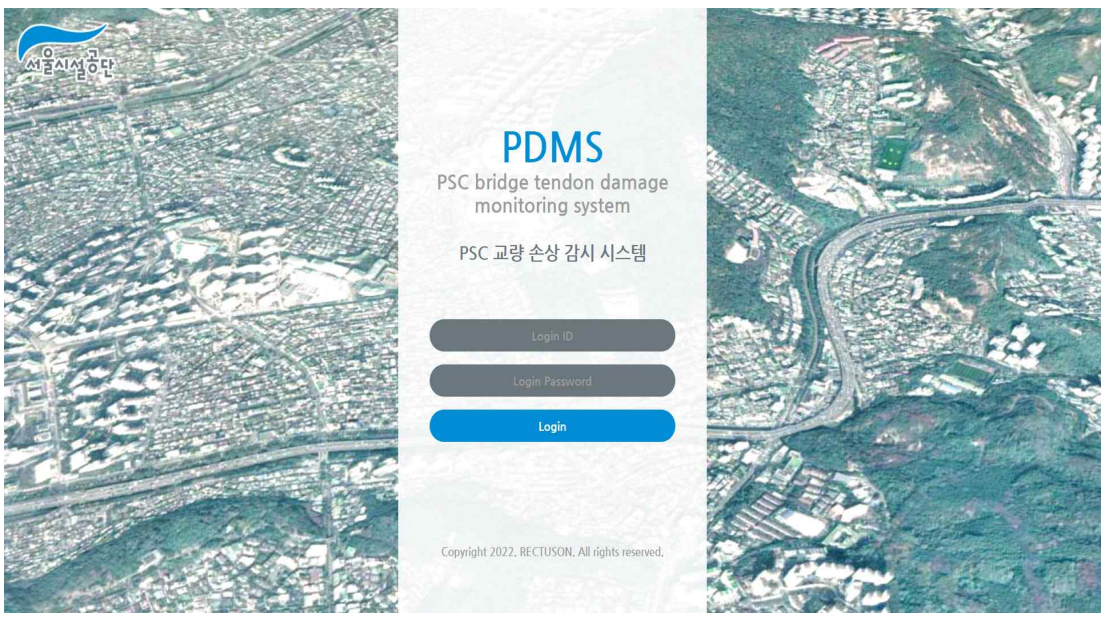


그림 138 로그인 화면

(3) 로그인에 성공하면 다음 그림 4.3과 같은 화면이 나타난다.

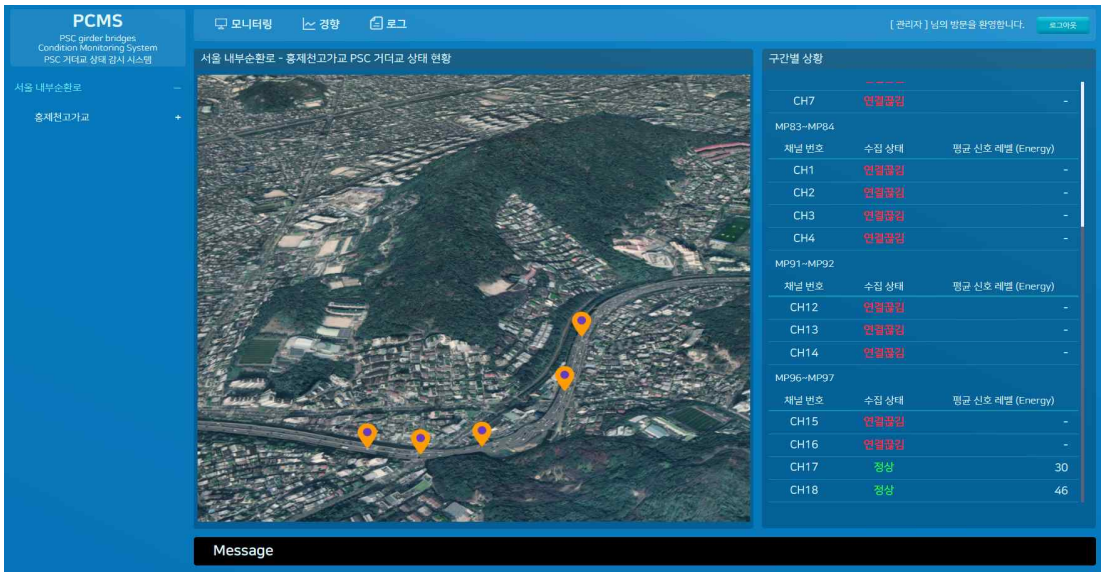


그림 139 메인 페이지

5-2-2) 모니터링 페이지

그림 4.3의 메인 화면에서 좌측의 “사이드 메뉴”를 이용하거나 “메인 지도”의 위치 표시를 클릭하여 데이터를 보고자 하는 지역 선택하면 해당 지역의 모니터링 페이지로 이동한다.



그림 140 모니터링 페이지

(1) 각 지역에 해당하는 PSC 박스의 센서 위치와 센서별 AE Energy를 확인할 수 있다. (결함 발생 시) 우측 탭 버튼을 이용하여 결함의 위치추정 결과를 확인할 수 있다. (현재 미구현)

(2) 해당 PSC 박스의 알람 발생 시 알람 내역을 나타낸다.

(3) 우측의 "범례"에서 확인하고자 하는 센서를 체크하면 좌측의 "경향 그래프" 칸에서 실시간 그래프를 확인할 수 있다.

(4) 전 지역의 주의, 경보 알람 발생 시 실시간으로 표시하며, 해당 항목은 모든 페이지에서 확인할 수 있다.

5-2-3) 경향 페이지

상단 탭에서 "경향" 버튼을 클릭하면 그림 4.5와 같은 화면이 나타난다.



그림 141 경향 페이지

경향 페이지에서는 원하는 지역의 과거 데이터 기록들을 조회할 수 있다.

(1) 확인하고자 하는 데이터 옵션들을 선택후 3에서 해당 데이터 그래프를 조회할 수 있다. “조회 시작일”과 “조회 종료일” 옆의 날짜가 표시되는 하늘색 네모 박스를 클릭 후 조회하고자 하는 날짜와 하단의 옵션들을 선택 후 [데이터 조회] 버튼을 클릭하면 3의 리스트에 있는 채널 데이터가 화면에 나타난다. 조회된 데이터는 [데이터 다운로드] 버튼을 클릭하여 CSV 파일로 다운로드 받을 수 있으며, [레포트 출력] 버튼을 클릭하여 보고서 형식으로 바로 출력할 수 있다.

(2) 좌측 체크박스를 클릭하여 3에 나타난 그래프를 채널 별, Feature 별로 표시할 수 있다.

(3) 1과 2에서 선택한 데이터 옵션별로 그래프를 보여준다.

5-2-4) 로그 페이지

화면 상단의 메뉴에서 “로그” 버튼을 클릭하면 그림 4.6과 같은 화면이 나타난다.



그림 142 로그 페이지

(1) “조회 시작일” 과 “조회 종료일” 에서 조회하고자 하는 데이터의 날짜를 설정한 후 [데이터 조회] 버튼을 클릭한다. 조회한 데이터들은 [데이터 다운로드] 버튼을 클릭하면 CSV 파일로 다운로드할 수 있다.

(2) 1에서 선택한 지역의 데이터들을 나타낸다. “현장명”, “알람 이름”, “발생 시간”, “발생 채널”, “알람 조건”, “값1”, “값2”, “값3”, “값4” 별로 분류된다. 하단의 [<], [>] 버튼으로 조회된 데이터의 페이지를 앞뒤로 이동할 수 있으며, [<<], [>>] 버튼을 클릭하면 10페이지씩 이동할 수 있다.

- 테스트베드 교량 내부 텐던 검사 및 진단 수행

1) 검사 대상 구간 위치 : MBR11, MP90~MP91

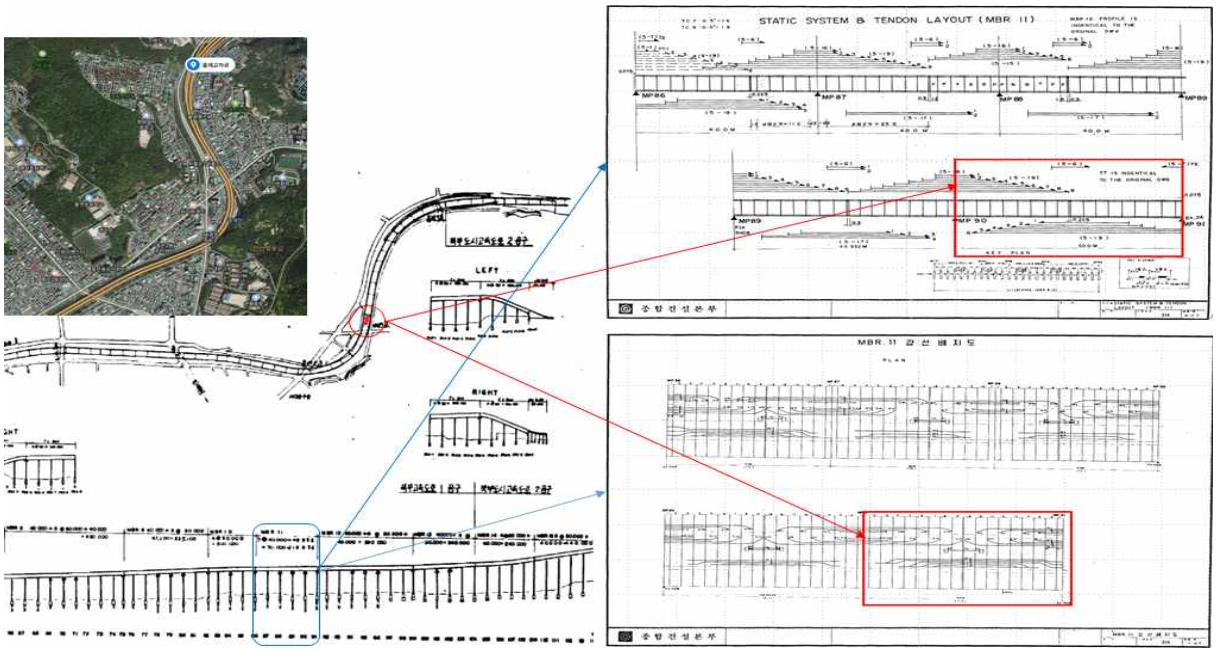


그림 143 검사 대상 구간 위치

서울시, 내부순환로, 홍제천고가교, 성동방향 1개 구간에 대해 3개월 간의 단기(시범) 설치를 통해 해당 구간의 내부 텐던 상태를 검사하였다.

2) 센서 및 시스템 설치 위치

2-1) 시스템 구성

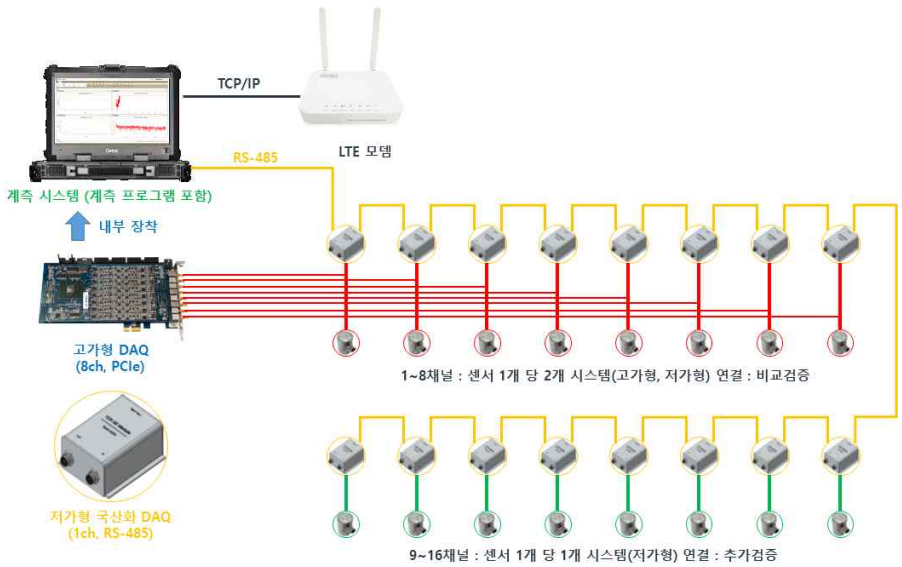


그림 144 내부 텐던 검사를 위한 시스템 구성

2-2) 시스템 설치 위치

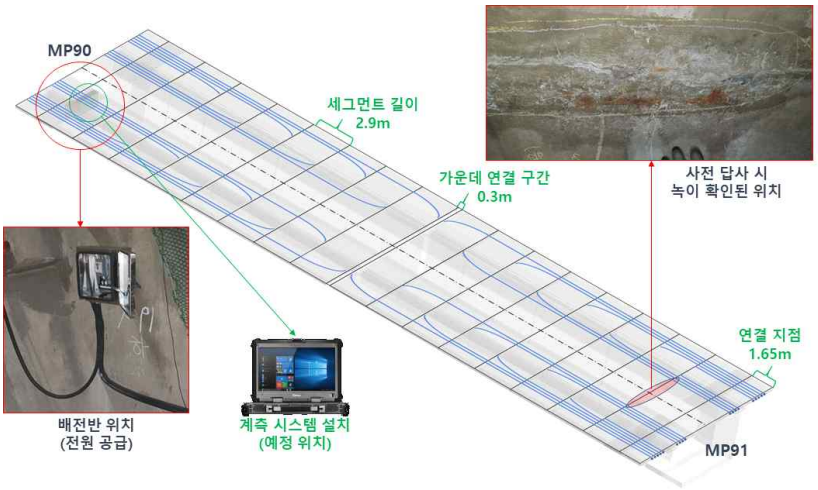


그림 145 검사 시스템 설치 위치

2-3) 센서 설치 위치

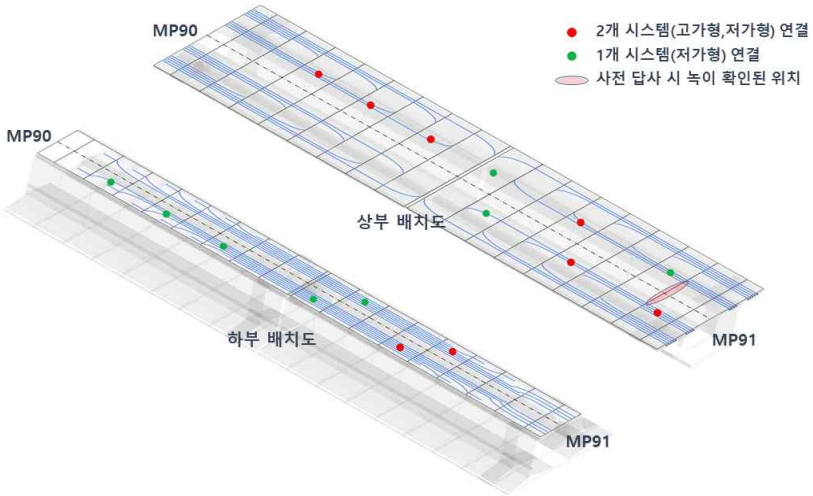


그림 146 AE 센서 설치 위치

3) 현장설치

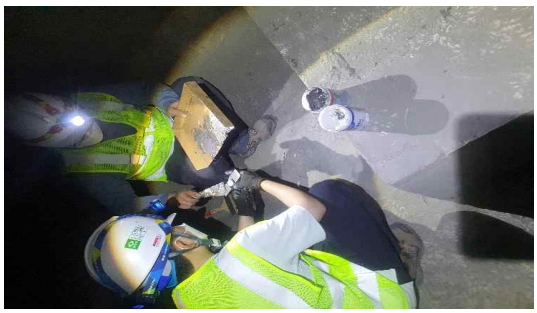


전원 배선 작업



배선 작업 완료된 배전반





전원선 연결



에폭시를 이용한 센서 설치 1



센서 설치 사진 2

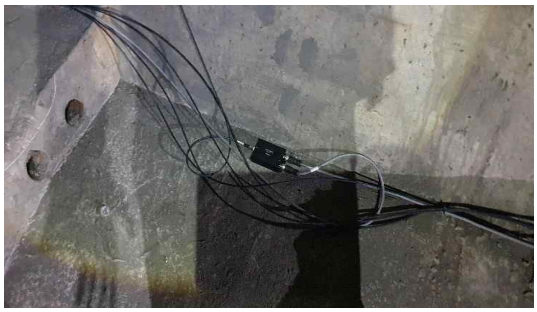


계측 시스템 및 LTE 모뎀

에폭시를 이용한 센서 설치 1



센서 설치 사진 1



1ch Module



센서 설치 사진 3

그림 147 현장 설치 사진

4) 계측 결과

4-1) 현장 계측 화면

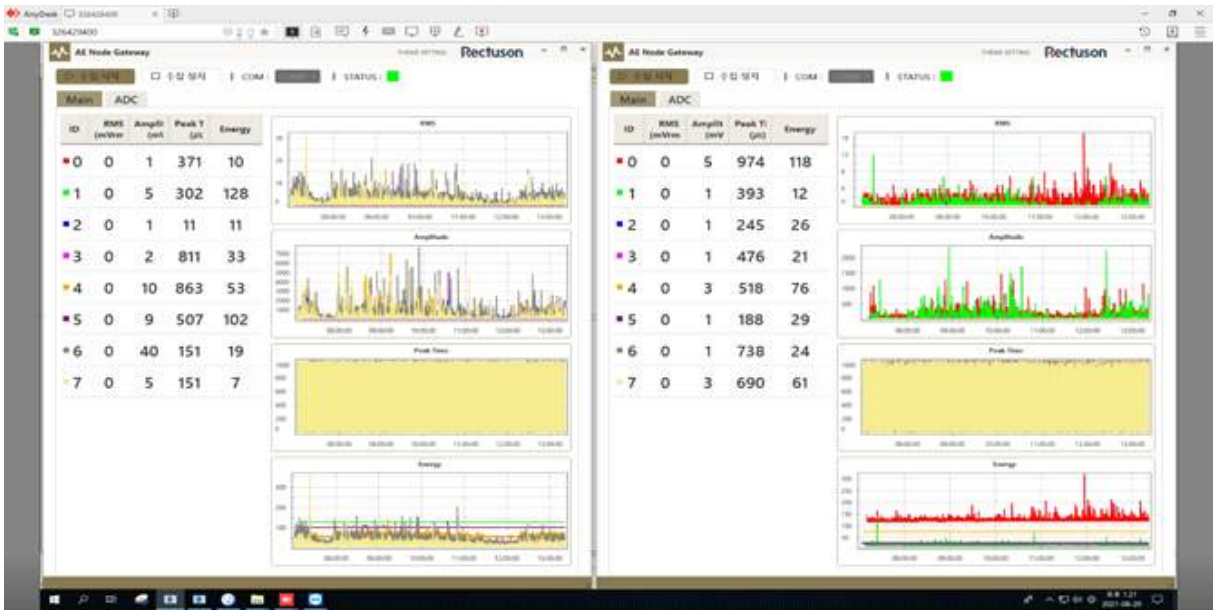


그림 148 현장 계측 화면 (원격 접속 확인)

4-2) 후처리 화면

8월경부터 12월까지의 약 4개월 동안의 설치하였으며, 중간에 정전으로 인한 데이터 누락을 제외하고도 3개월 이상의 데이터를 수집하였다. 현재 특이신호가 없는 상태이므로 텐던의 상태는 건전한 것으로 판단하고 있다.

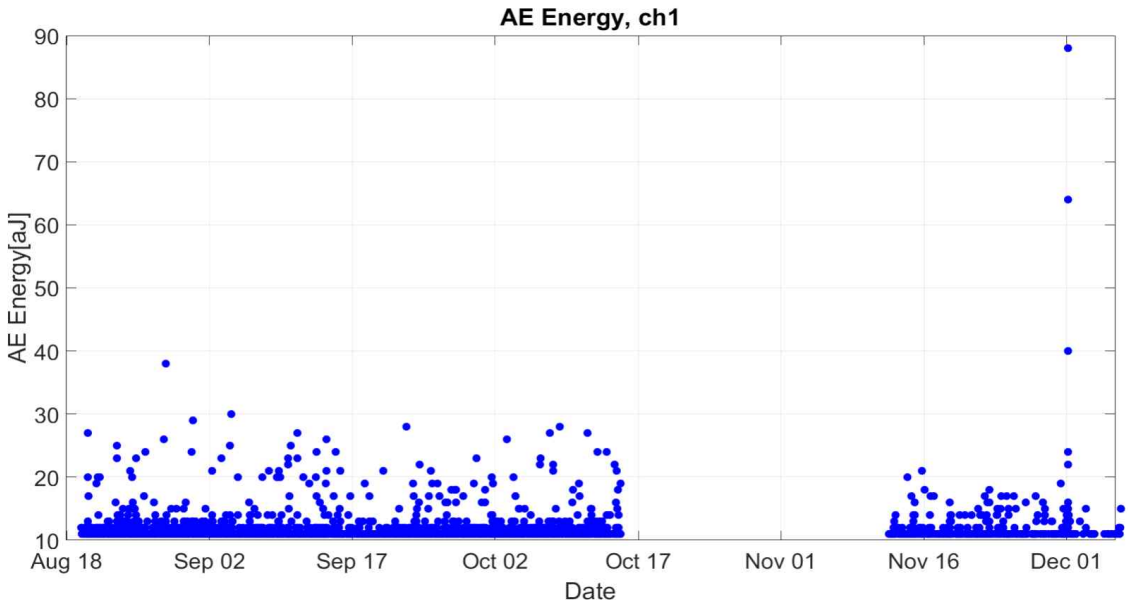


그림 149 1번 채널 데이터 수집 기록

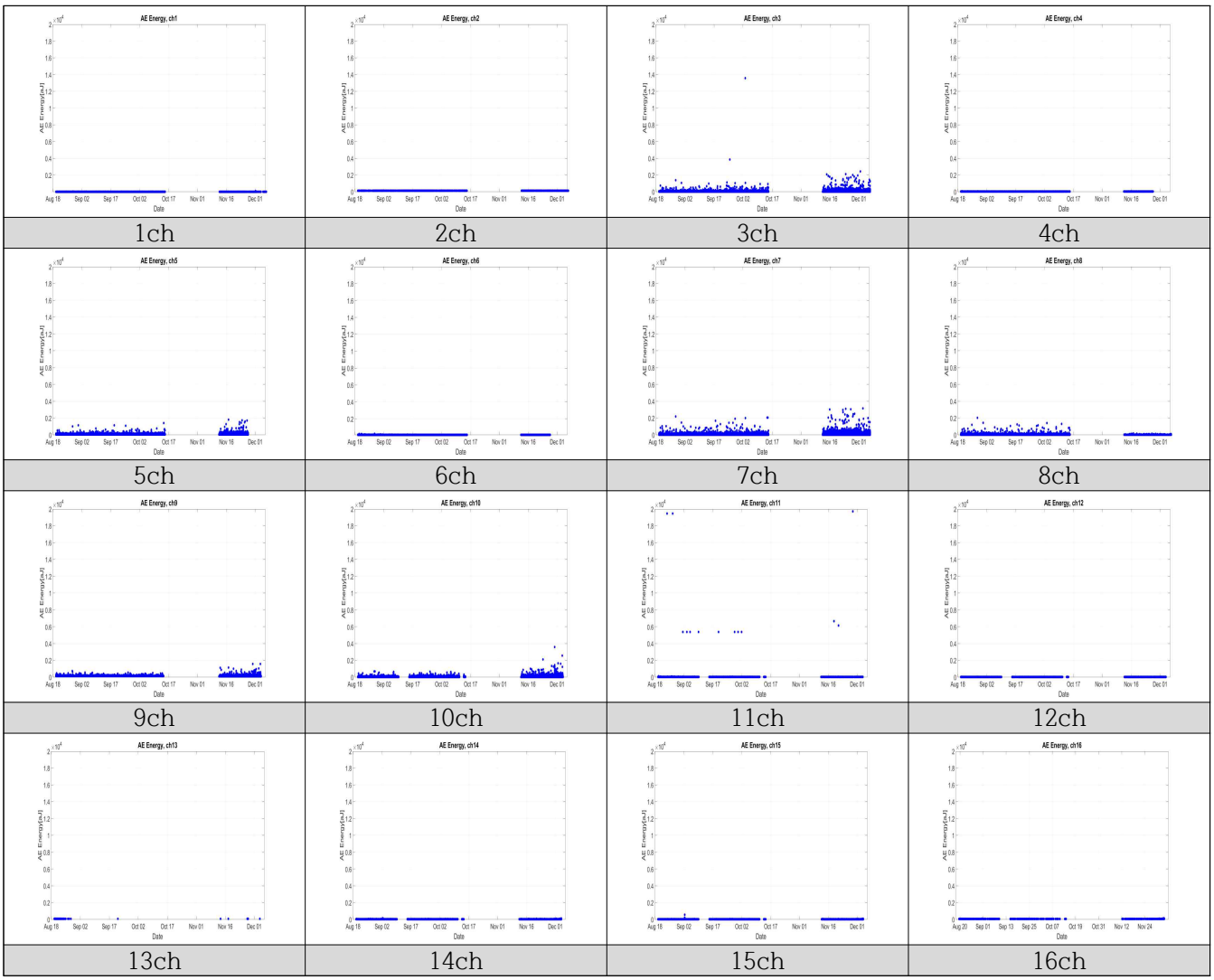


그림 150 전체 채널 수십 데이터 기록

- PSC 거더교 상태진단 기준 수립

1) 음향방출 특징신호 정의

음향방출 기술은 순간적으로 발생한 고주파 신호에 대해, 다음과 같이 신호의 특징을 정의해 판별한다.

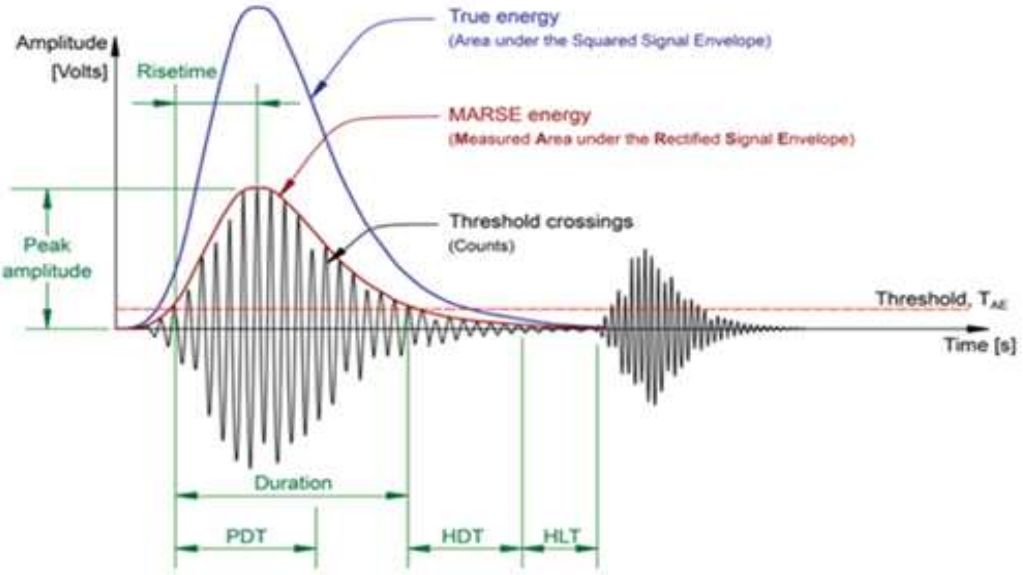


그림 151 음향방출 특징신호 정의

(1) Amplitude

- AE 신호의 Hit 1회 중 최대 Peak를 나타내는 것. 최대 Peak가 dB 스케일로 표현되므로 양의 전압인가, 음의 전압인가와는 상관없이 온전히 신호의 Peak 크기만을 나타낸다.
  : ex) Pre-Amplifier 40dB, AE 신호의 최대 Peak가 1V, Amplitude 80dB

(2) RMS

- Root Mean Square Value. AE 신호 전압을 실효치로 나타낸 변수. 연속 특성을 가지는 신호의 크기 변화를 확인하기에 용이하다.

(3) Energy

- AE 신호 크기를 1회 Hit에 대한 전기적 에너지로 표현한 변수. 단위는 aJ. 1회 Hit에 해당하는 AE 신호 전압의 절대치를 적분한 결과. 최대 변수 크기가 2Byte로 제한되므로 최대 표현 가능한 값은 65,536[aJ] 이다.

2) 음향방출 특징신호 대비 예상 결함

특징변수의 크기 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

표 37 음향방출 특징신호 대비 예상 결함 정의

	전기 노이즈	환경 노이즈	콘크리트 미세 균열	콘크리트 균열	*강연선 소선 파단*
Peak [mV]	1,000 이상	1,000 이하	100 이상	330 이상	*1,000 이상*
RMS [mV]	10 이하	100 이하	100 이상	100 이상	*100 이상*
AE Energy [aJ]	100 이하	1,000 이상	1,000 ~ 10,000	10,000 이상	*10,000 이상*

AE 신호 발생 경향 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

(1) 다음 신호가 1시간에 100회 이상 확인되는 경우
: 공극 또는 그라우트 파괴에 의한 2차 신호

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	-
AE Energy [aJ]	1,000 이상

(2) 다음 신호의 발생 누적 빈도가 1개월 동안 10,000회를 초과하는 경우
: 활발한 부식의 진행 가능성 의심.

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	100 이상
AE Energy [aJ]	-

(3) 노이즈 신호 평가 : 음향방출센서는 타 비파괴 센서에 비해 민감도가 높은 편이며, 항상 노이즈에 노출되어 있다. 따라서 기본적인 계측 경향에는 항상 크고 작은 노이즈가 포함되어 있음을 감안하고 평가해야 한다. 본 지침에서 별도로 표기한 노이즈 성분은 비전문가에 의해 이벤트 신호로 오인될 수 있는 대표적인 항목을 표시한 것이며, 예외적인 환경 노이즈가 추가로 확인될 수 있음을 주의해야 한다. 일반적으로 Peak가 높거나 AE Energy가 큰 경우 이벤트 신호로 오인될 수 있다. 그러나 Peak가 높으나 지속성이 길지 않는 단발성 신호는 전기 노이즈일 가능성이 크고, (Peak만 높고, 평균신호레벨(RMS)나 AE Energy는 작은 경우) AE Energy는 높으나 Peak가 RMS가 낮은, 낮은 레벨의 신호가 지속성만 긴 경우 환경 노이즈일 가능성인 큰 것으로 평가한다.

(4) 콘크리트 균열 신호 : 미세 균열과 일반 균열로 구분지었으나, AE에 의한 진단은 정량적이지 않기 때문에 물리적인 크기와는 일치하지 않을 수 있다. 해당 구분은 오히여 균열의 길이보다 폭과 연관성이 많으며, 균열의 심각성과 연관지어 생각할 수 있다. 미세 균열은 균열이 진전되었으나 심각도가 상대적으로 떨어지고, 일반 균열은 해당 위치의 육안검사가 필요한 심각한 수준으로 정의하였다.

(5) 음향방출 신호의 발생 경향 평가 : 음향방출신호는 단발성 신호의 특징변수 비교분석도 가능하지만, 일정 기간 신호의 발생 경향을 통해서도 결함에 대해 정의가 가능하다. 일반적으로 특정 기간의 이벤트 발생 수를 기준으로 상태를 정의하는데, 이때의 이벤트는 위에서 정의한 바와 같이 특정 기준을 만족하는 신호의 발생을 가리킨다.

3) 예상 결함 대비 유지관리 Action Plan

(1) 본 장에서는 음향방출 신호에서 정의된 결함이 발생하였을 때, 각 상태별 어떠한 현장 조치를 취할 것인가를 정의한다.

(2) 노이즈 발생
- 기본적으로 실제 현장에의 노이즈는 100% 필터링이 불가능하기 때문에 노이즈가 발생하였다고 해서 꼭 조치가 필요치는 않다.
- 다만, 전기적 노이즈로 의심되는 신호가 1일 이상 지속적으로 발생할 경우 현장 센서 점검이 필요하다.

(3) 콘크리트 균열
- 미세 균열에 대해서는 기본적으로 현장 점검을 권장하지 않는다. 다만, 발생 빈도가 잦아진다면 해당 채널에 대해 주의가 필요할 수 있다.
- 일반 균열, 시스템에서 심각하다고 판단할 수 있는 수준의 균열 발생 시 현장 점검을 통해 콘크리트 표면을 확인한다.

(4) 강연선의 소선 파단
- 현장 점검 및 보수 가 필요하다.

(5) 공극 또는 그라우트 파괴에 의한 2차 신호

- 이벤트의 지속성 유무에 따라 점검 유무를 결정한다.
- 1회성으로 발생한 경우 해당 위치에 대해 주의는 하되 직접적인 점검은 권하지 않는다.
- 해당 신호가 1일 이상 지속된다면 해당 위치의 현장 점검 및 보수가 필요하다.

(6) 활발한 부식의 진행 가능성 의심

- AE 신호에 의한 부식 평가는 아직까지 높은 신뢰도를 가지고 있지 못하다.
- 따라서 이와 같은 의심 경향이 나타난다면 최대한 빨리 타 비파괴검사 방법으로 해당 위치에 대한 재확인이 필요하다.

- PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가

1) 테스트베드 부식 과속화 실험

1-1) 실험 방법

실험에 사용되는 시편은 콘크리트 블록으로 크기는 길이: 6,350mm, 단면 높이: 600mm, 단면 폭: 300mm이며, 내부 Tendon을 보강하고 긴장력을 주어 PSC의 형태로 제작되었다. 내부 Tendon은 2개의 강연선을 그라우트가 감싸는 형태로 구성되어 있으며, 강연선은 각각 7개의 소선을 꼬아 제작되었다. 부식 가속화를 위해 강선에 직접 NaCl용액을 투여할 수 있도록 실험체의 중앙에서 Tendon과 가장 가까운 콘크리트 표면을 천공하여 강연선이 드러나도록 하였고, 강연선에 전위차를 이용하여 부식을 촉진하기 위해 1개 강연선에 전선을 부착하여 실험체의 외부와 연결될 수 있도록 구성되었다.

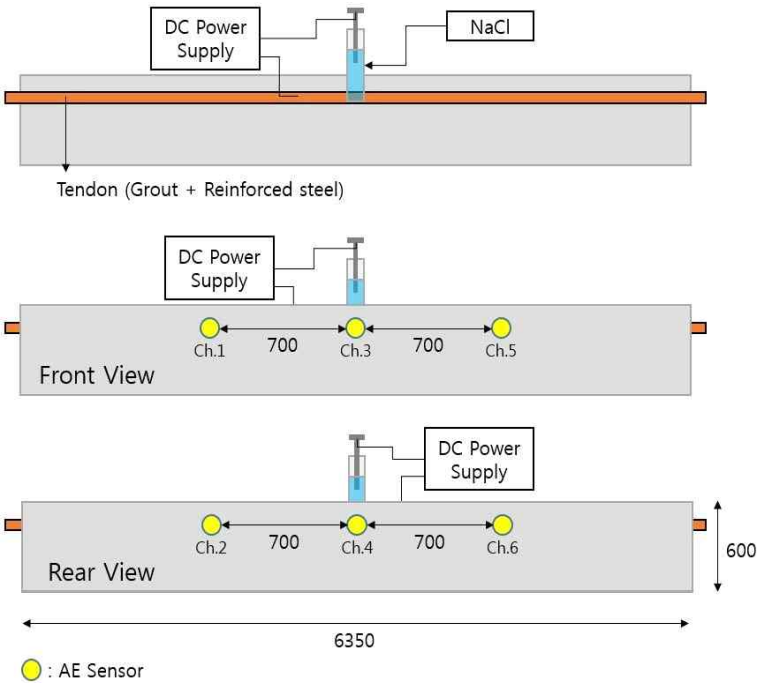


그림 152 부식 가속화 실험 구성

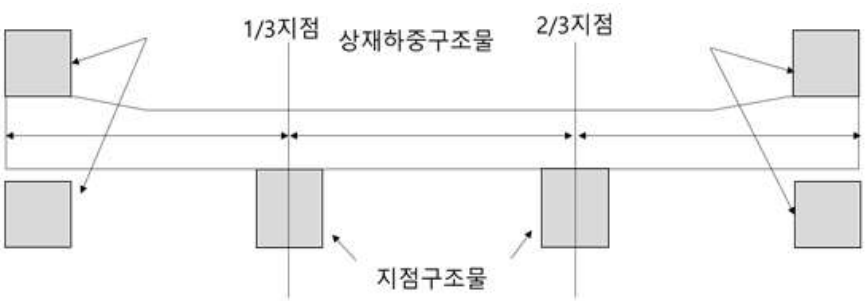


그림 153 역-휨 실험 하중구조물 구성도



그림 154 역-휨 실험 하중구조물 구성 실제 적용 사진

실험체 내부 Tendon의 부식은 국부적인 영역에서 부식이 진행되도록 구성하였으며, AE센서를 해당 부근에 집중 부착하여 계측을 진행하였다. 부식을 집중시킬 위치에 소금물 용액 투여, 통전 작업을 일 8시간 수행하면서 부식을 가속화시켰다. 또한 부식가속화 실험의 편의성을 위해 구조물을 뒤집어 놓은 만큼 하중이 반대로 작용하는 것을 방지하기 위해 역-휨 형태의 하중이 인가되도록 위와 같이 하중구조물을 추가로 구성하여 실제 PSC 구조물과 동일한 방향으로 하중이 작용하도록 하였다.

소금물 투여 후 스테인리스 강봉과 강선에 부착된 전선을 DC power supply에 연결시켜 NaCl 용액의 염소이온이 강선으로의 이동을 유도하고, 염소에 의한 철의 산화를 통한 부식을 진행시켰다. NaCl 용액의 농도는 RC빔의 강선 부식에 의한 AE진단 사례를 참조하여 3.5~5%의 소금물 용액을 사용하였으며, 아래 그림과 시간이 경과함에 따라 용액의 농도를 점차 상승시켜 포화 농도인 26.4% 까지 상승시켜 부식 진행 속도를 빠르게 하였다. 인가된 전압은 초기 2.5V에서 시작하여 부식 진행 속도를 향상시키기 위해 20V까지 상승 시키며 진행하였다.

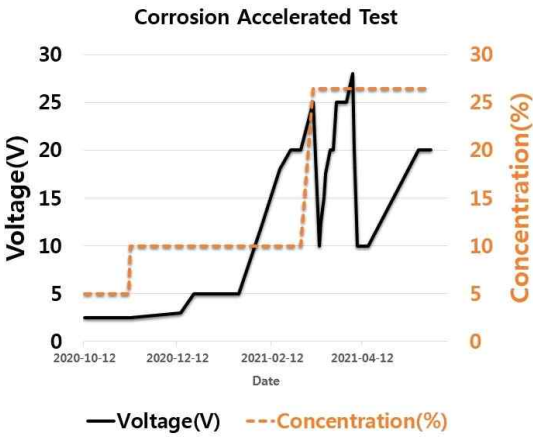


그림 155 인가 전압 대비 부식 진행도

실험 종료 후 각 AE Feature별 그래프 분석 진행 시 외부 잡음에 대한 필터링을 1차적으로 거쳤다. 시편이 외부에 노출되어 있어 비에 의한 신호가 그대로 계측이 되었고, 비에 의한 신호와 부식에 의한 신호 구분을 위해 PA-ED 상관관계 해석을 진행하였다. PA-ED 해석이란 계측된 신호의 길이 대비 신호 크기를 하나의 그래프로 표기하여 4분면으로 분할하여 신호를 해석한다.

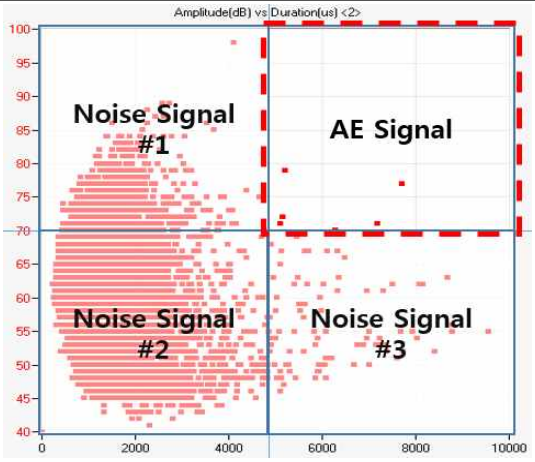


그림 156 PA-ED 해석에 의한 신호 필터링 기법

신호의 길이와 크기가 모두 높은 신호는 내부 변형에 의한 탄성파 신호로 파단 신호 및 부식 신호가 해당 구간에 속하며, 높은 신호 크기 대비 짧은 신호 길이를 가진 신호들은 비에 의한 잡음 신호로 해당 신호들을 필터링하여 최종적으로 시편에 대한 부식 신호 Trend를 확인한다. 그 결과 Cumulative AE Energy trend에서 명확하게 부식의 성장단계를 확인할 수 있는 점을 확인하였으며, 부식 위치와 근접한 센서 일수록 높은 Hit수 및 Energy값이 계측됨을 확인하였다.

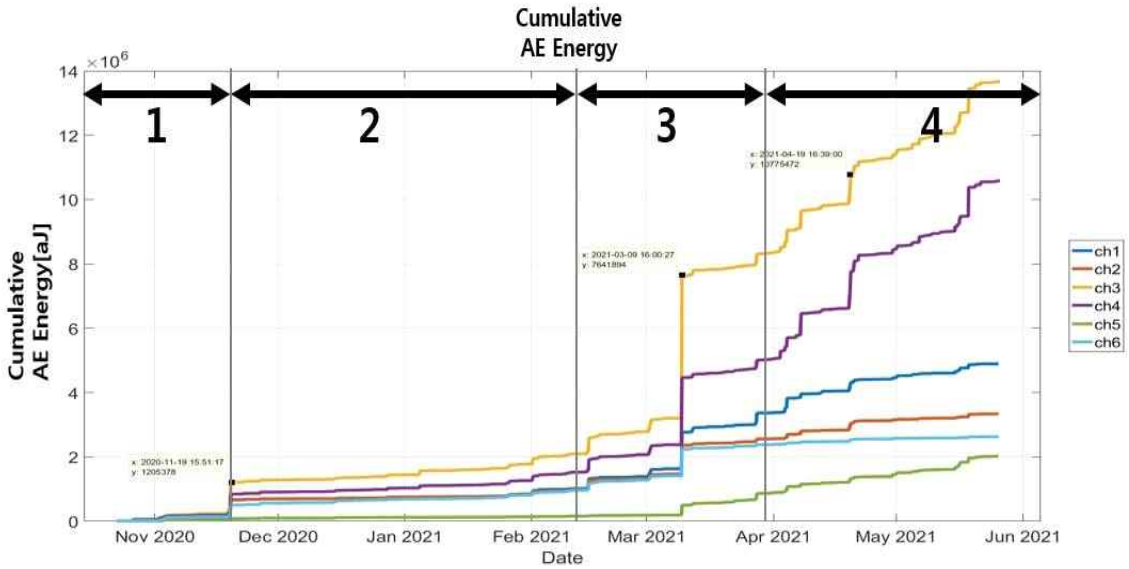
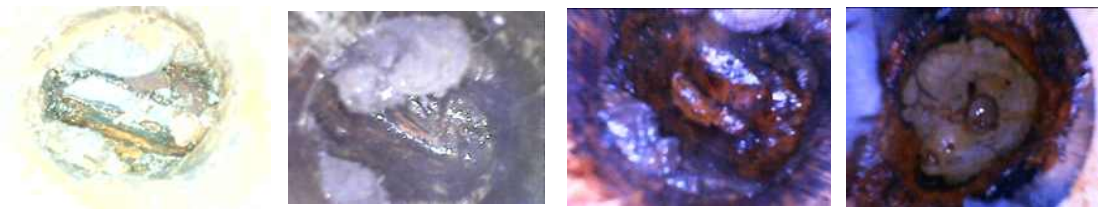


그림 157 Cumulative AE Energy trend 대비 부식 진행 단계 구분



(a) After 120 days (b) After 150 days (c) After 180 days (d) After 228 days

그림 158 부식 진행 단계 텐던 내부 강연선 부식 진행 상황

2) 테스트베드 블라인드 테스트

21년 7월 12일, 한국건설기술연구원 구조실험동에서 다음 3가지 실험체에 대한 블라인드 테스트를 실시하였다. 이를 통해 음향방출기술로 결함을 검출할 수 있음을 확인하고, 검출된 결함의 위치추정 결과의 정확도를 검증하였다.

(1) 공극 모사 실험체 : 임의의 구역에 공극을 만들어 제작한 시편. 공극 발생 유발을 위해 텐던 내 그라우트 제작 시 물을 정상보다 많이 함량시키고 임의의 버블을 생성하여 주입하였음.

(2) 부식 실험체 : 상기 장절에서 약 1년간 부식 가속화 실험을 실시하여 부식의 진행 단계가 최종 단계에 이른 실험체.

(3) 기계적 결함 실험체 : 텐던 내부 강연선에 그라인더로 임의의 손상을 가한 실험체.



그림 159 실험을 위한 계측기 및 센서 설치 사진

2-1) 공극 모사 실험체

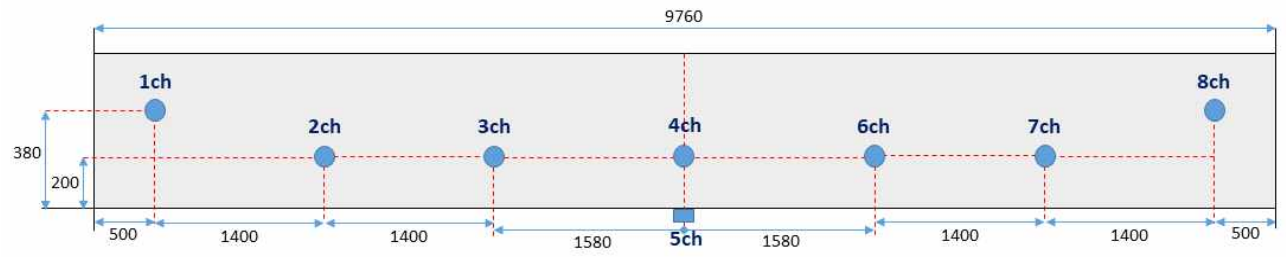


그림 160 실험을 위한 센서 배치도

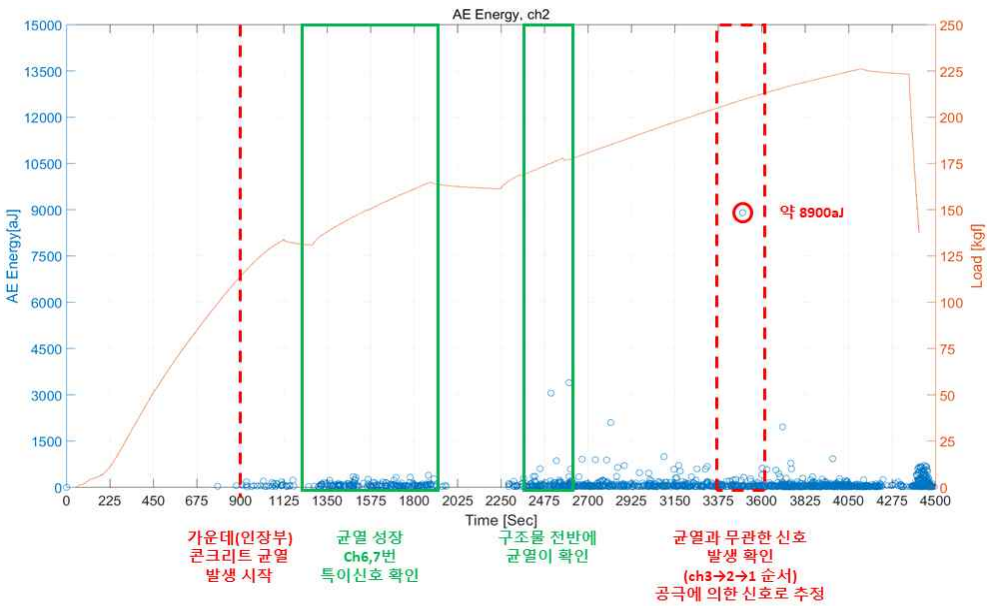


그림 161 공극 의심 신호 계측 - 2번 채널

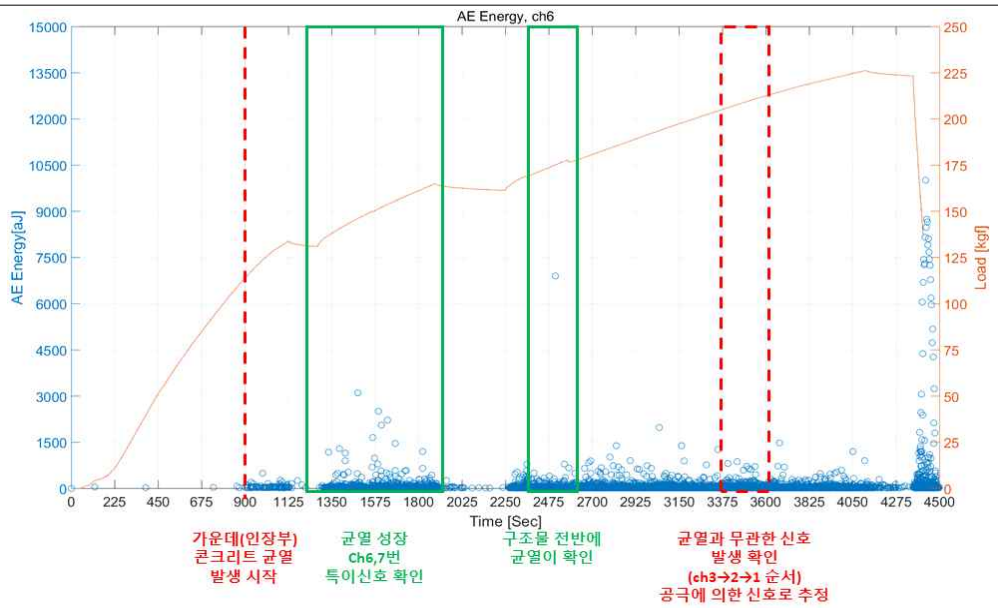


그림 162 공극 의심 신호 계측 - 6번 채널

2번의 공극 의심 신호와 1번의 콘크리트 균열 신호(외부 관측 가능)가 확인되었다. 공극 의심 신호는 6번과 7번 채널에서 처음으로 신호가 활발하게 계측되는 것으로 확인되었고, 이후 3번과 2번, 1번 채널에서 균열과 무관한 추가 신호가 확인되었다.

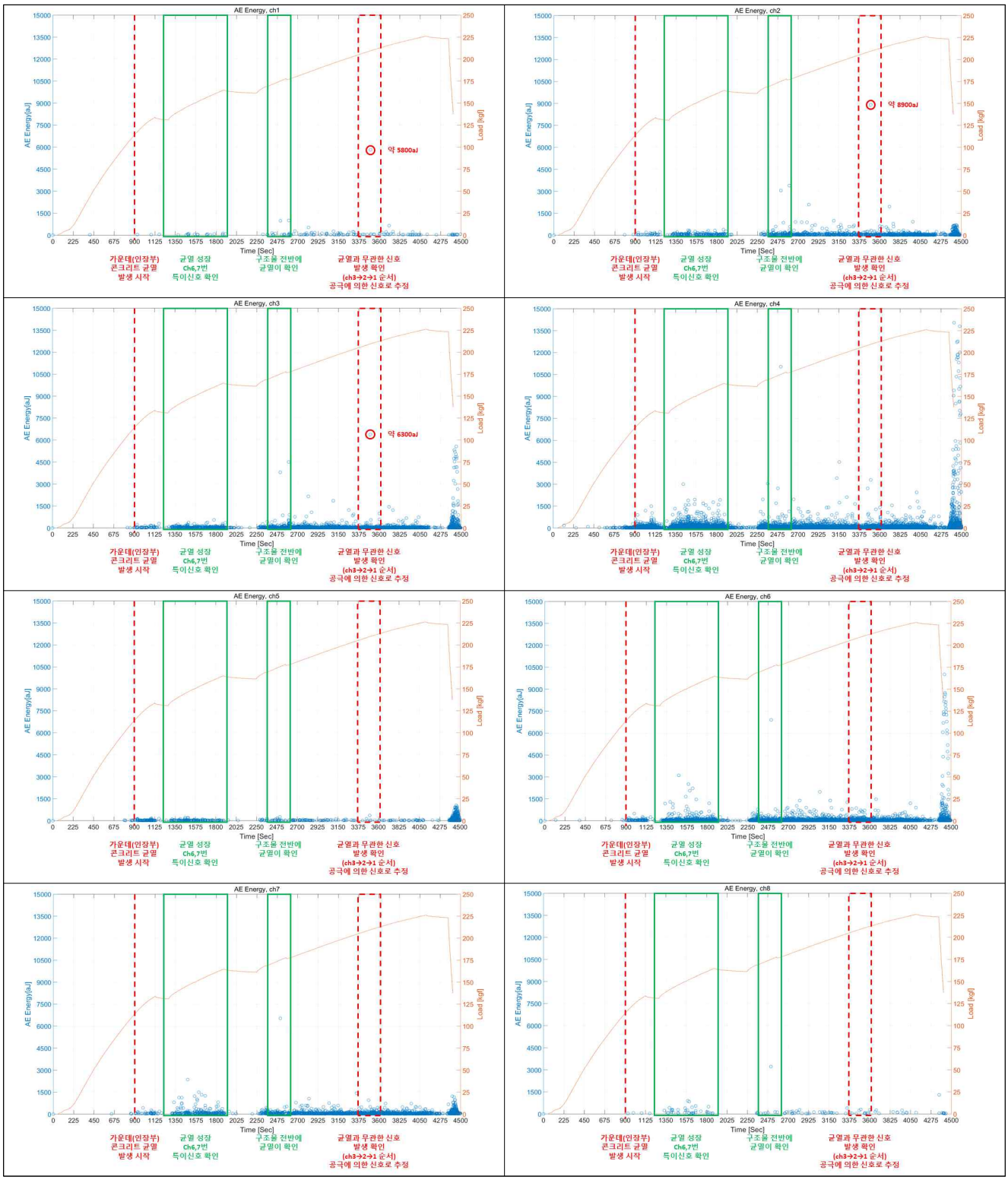


그림 163 공극 모사 실험체 하중 대비 AE Energy Trend

2-2) 부식 실험체

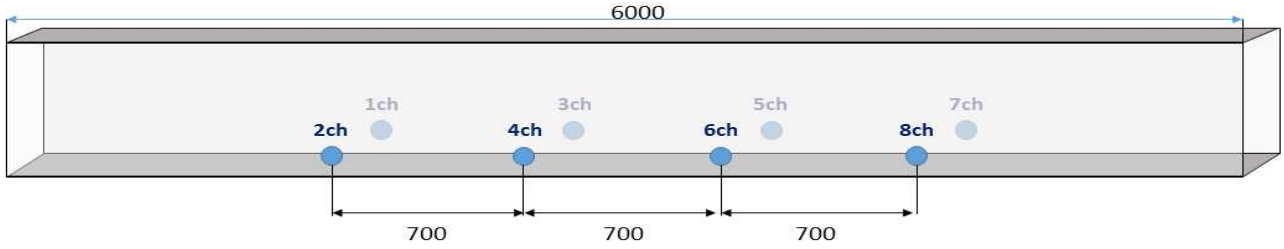


그림 164 실험을 위한 센서 배치도

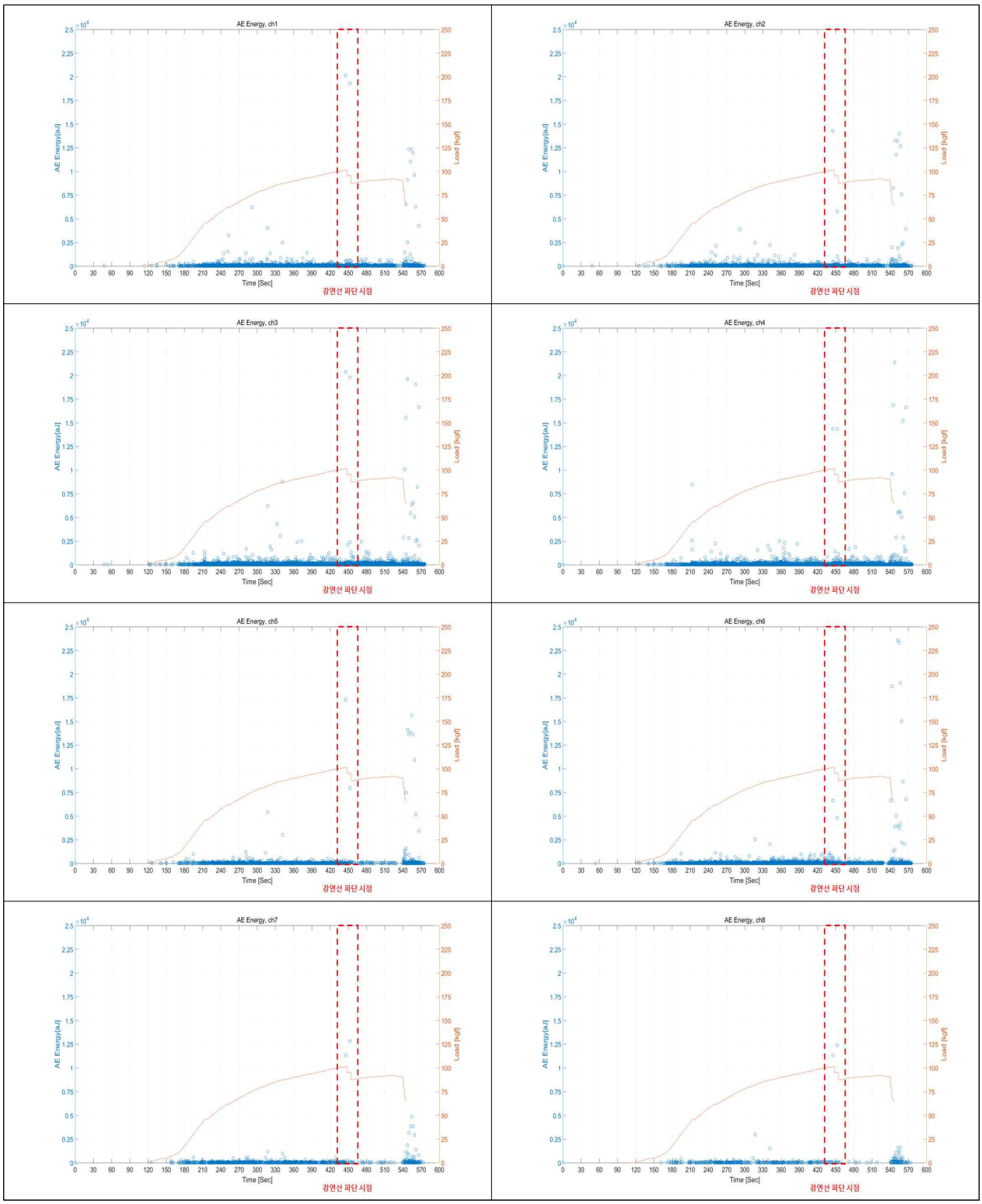


그림 165 부식 실험체 하중 대비 AE Energy Trend

하중 인가 초기부터 AE Activity(신호 활성도)가 높은 편이다. 이는 이미 부식으로 인해 끊어진 강연선이 내부에 존재하기 때문에 이로 인한 2차 신호로 추정된다. 부식에 의해 남은 강연선도 충분히 약해진 상태이므로 공극 모사 실험체와 달리 낮은 하중에서 강연선 파단이 2회 발생하였다. 이후 실험체가 지지를 잃고 하중이 감소하며, 변위 변화 대비 하중 증가량이 확연하게 감소하였으므로 구조물의 급작스러운 붕괴가 우려되어 실험을 종료하였다.

2-3) 기계적 결함 실험체

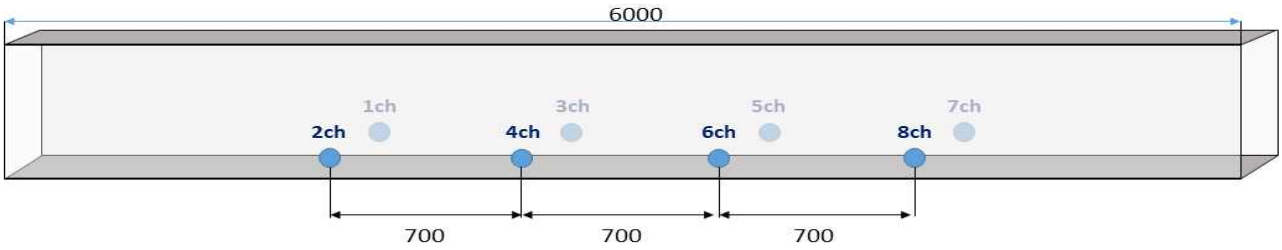


그림 166 실험을 위한 센서 배치도

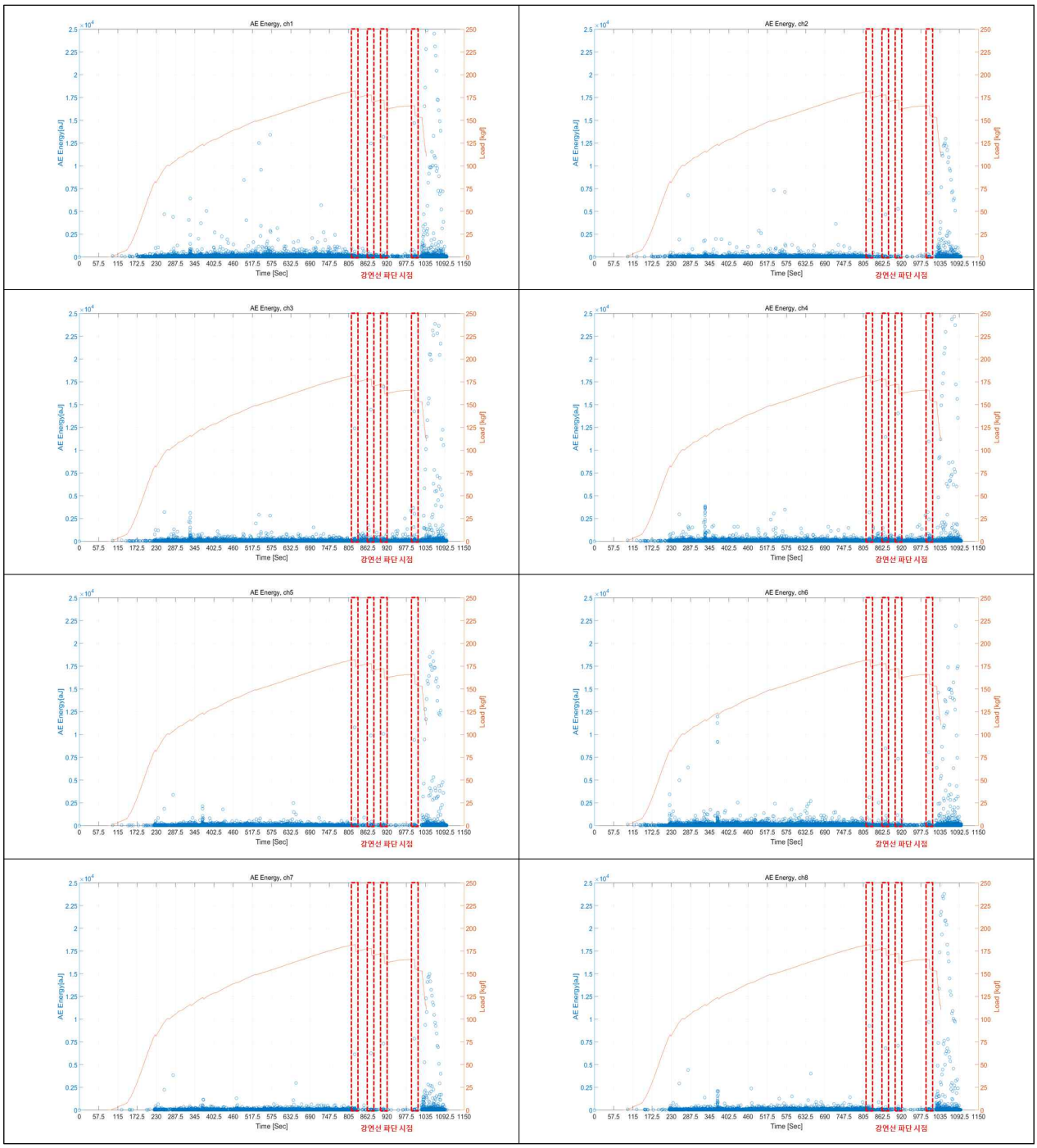


그림 167 기계적 결함 실험체 하중 대비 AE Energy Trend

일정 하중에 도달하였을 때, 4번의 강연선 파단이 확인되었다. 공극 모사 실험체와 달리 이미 손상이 일어난 상태이기 때문에 강연선 파단이 쉽게 유도되었다.

2-4) 결함 탐지 및 위치추정 결과

2-4-1) 결함별 위치추정 결과

(1) 공극 모사 실험체

센서 배치가 실험체 측면에 1열로 배열되어 있어서 X축 방향의 1차원 위치추정을 수행하고, Y축은 실험체의 중심점을, Z축은 센서가 설치된 높이로 결정하였다.

- 공극 신호1 : (X,Y,Z)=(7062,150,200)[㎜]

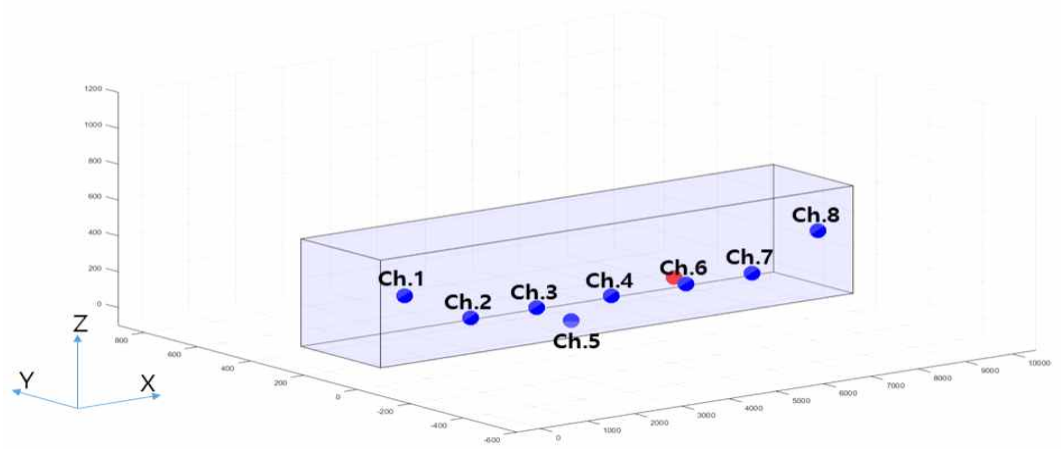


그림 168 공극 신호1에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 콘크리트 균열 : (X,Y,Z)=(5487,150,200)[㎜]

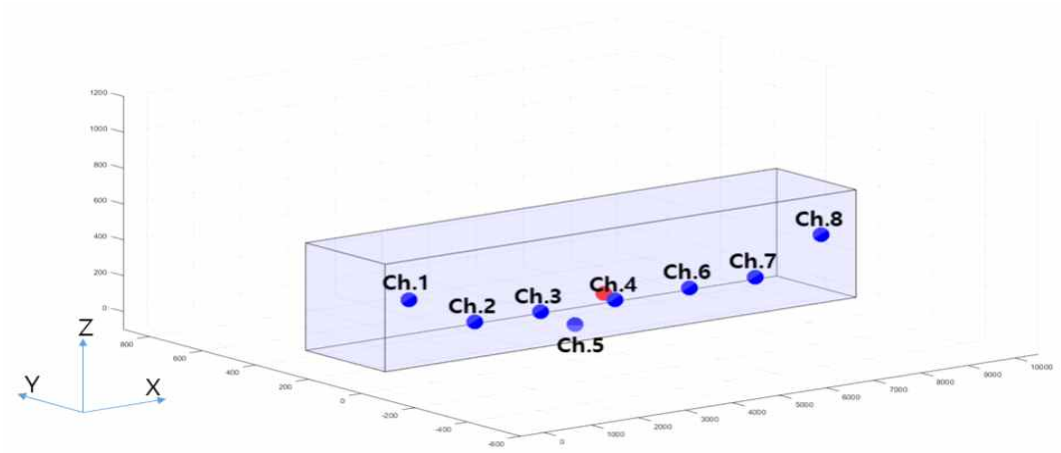


그림 169 콘크리트 균열에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 공극 신호2 : (X,Y,Z)=(2484,150,200)[㎜]

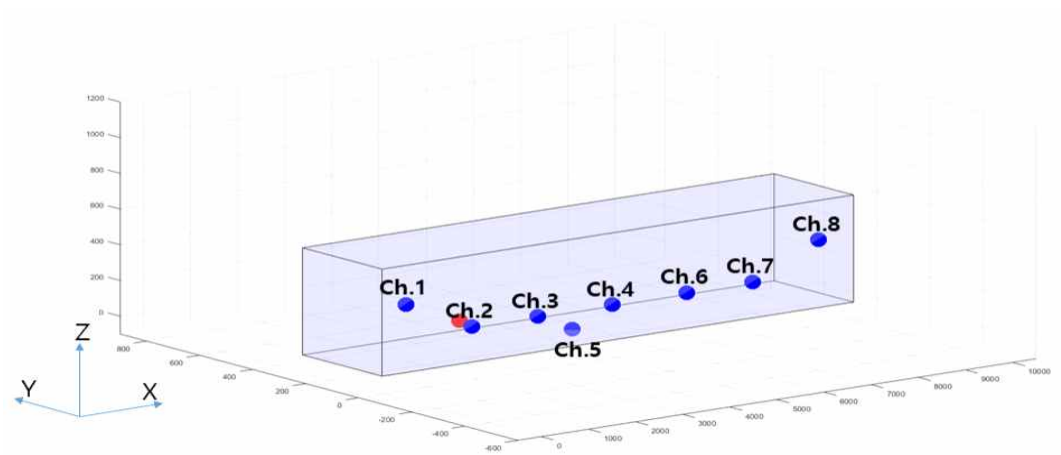


그림 170 공극 신호2에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

(2) 부식 실험체

센서 배치가 Z축 방향으로 동일한 높이에 설치되어 있어 2차원 위치추정 결과에 따라 X,Y 좌표를 결정하고, Z축 좌표는 센서 높이와 동일하게 설정하였다.

- 부식 파단1 : (X,Y,Z)=(2301,175,200)[㎜]

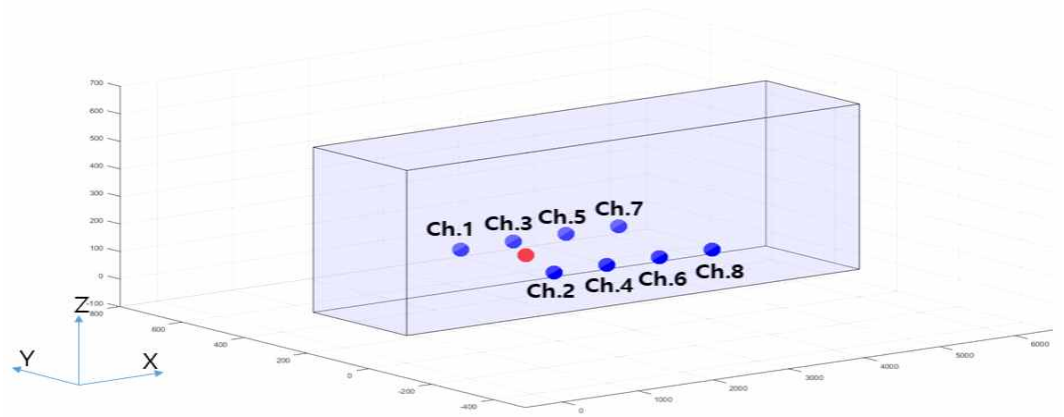


그림 171 부식 파단1에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 부식 파단2 : (X,Y,Z)=(2376,202,200)[㎜]

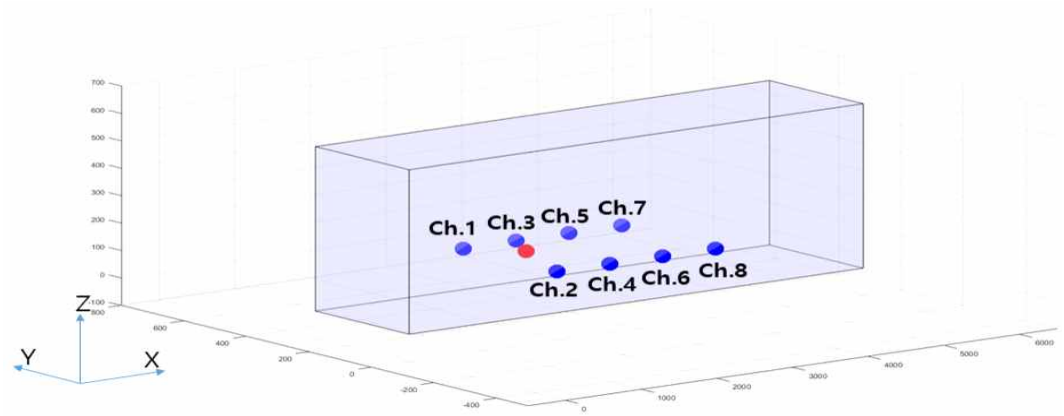


그림 172 부식 파단2에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

(3) 기계적 결함 실험체

센서 배치가 Z축 방향으로 동일한 높이에 설치되어 있어 2차원 위치추정 결과에 따라 X,Y 좌표를 결정하고, Z축 좌표는 센서 높이와 동일하게 설정하였다.

- 기계적 파단1 : (X,Y,Z)=(2401,238,200)[㎜]

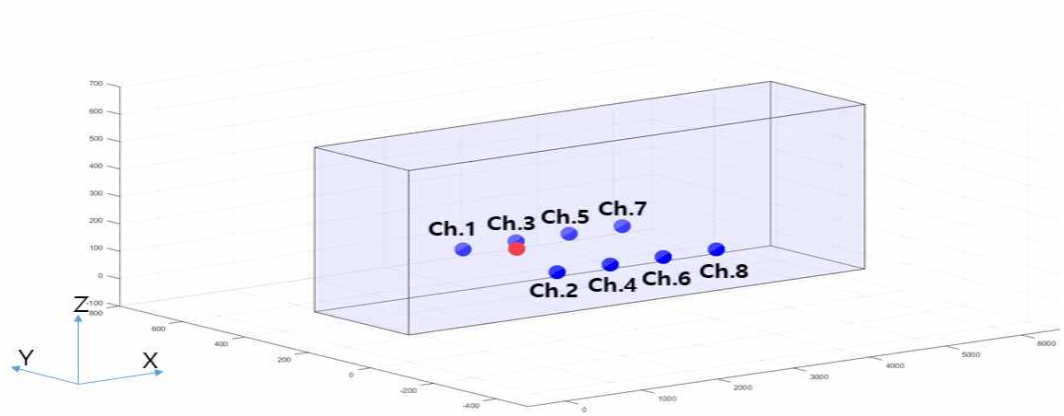


그림 173 기계적 파단1에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 기계적 파단2 : (X,Y,Z)=(2386,192,200)[㎜]

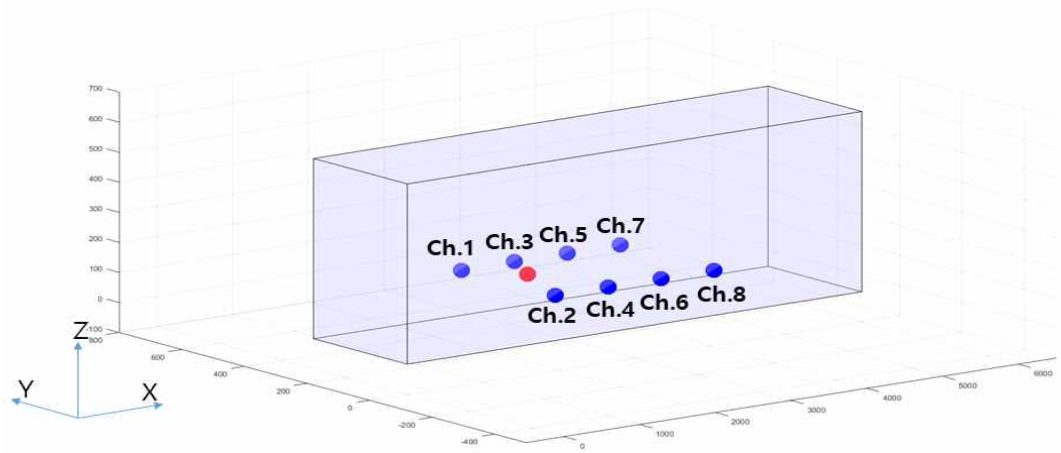


그림 174 기계적 파단2에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 기계적 파단3 : (X,Y,Z)=(2401,189,200)[㎜]

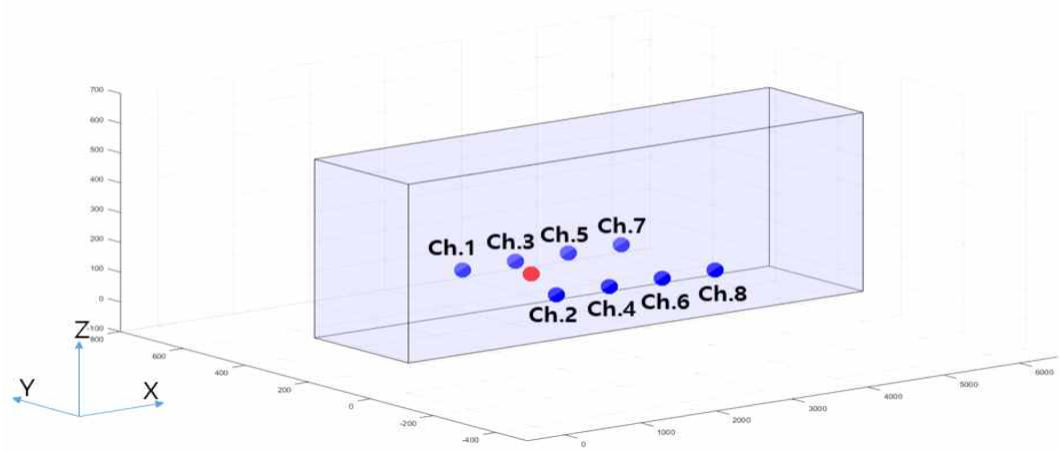


그림 175 기계적 파단3에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

- 기계적 파단4 : (X,Y,Z)=(2259,192,200)[㎜]

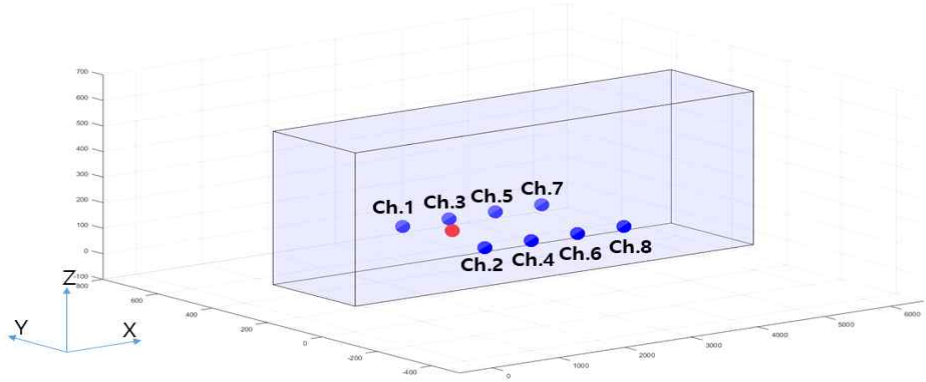


그림 176 기계적 파단4에 대한 위치추정 결과 (단위:㎜)

2-4-2) 실험체 파취를 통한 실제 결함 확인



그림 177 실험체 파취를 통한 실제 결함 확인

2-4-3) 결과 비교

표 38 결함별 검출 신호 기반 위치추정 결과 및 실측 결과 비교분석(단위:㎜)

결함 분류	계측			실측			오차					허용 범위 (센서 간 최대거리의 10%)	
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	오차율	Y	오차율	Z	X	Y
공극1	7062	150	200	7150	150	220	-88	-1.00%	0	-	0	876	-
균열	5487	150	200	4980	150	180	507	5.79%	0	-	0	876	-
공극2	2484	150	200	2520	150	220	-36	-0.41%	0	-	0	876	-
부식1	2301	175	200	2490	160	200	-189	-2.16%	15	0.71%	0	210	210
부식2	2376	202	200	2550	175	200	-174	-1.99%	27	1.29%	0	210	210
기계적1	2401	238	200	2450	210	200	-49	-0.56%	28	1.33%	0	210	210
기계적2	2386	192	200	2580	170	200	-194	-2.21%	22	1.05%	0	210	210
기계적3	2401	189	200	2590	165	200	-189	-2.16%	24	1.14%	0	210	210
기계적4	2259	192	200	2400	175	200	-141	-1.61%	17	0.81%	0	210	210

- 9개의 결함에 대한 검출은 100% 확인.
- 9개 결함 중 위치추정 결과가 모두 오차범위(센서 간 최대거리의 10%)를 만족함.
- 모든 결함의 위치추정이 오차범위 이내이므로, 모든 결함을 검출하였다고 판단
  검출 신뢰도 = 100% 확인 (블라인드 테스트, 테스트베드 기준)

3) 외산 장비와의 비교 검증

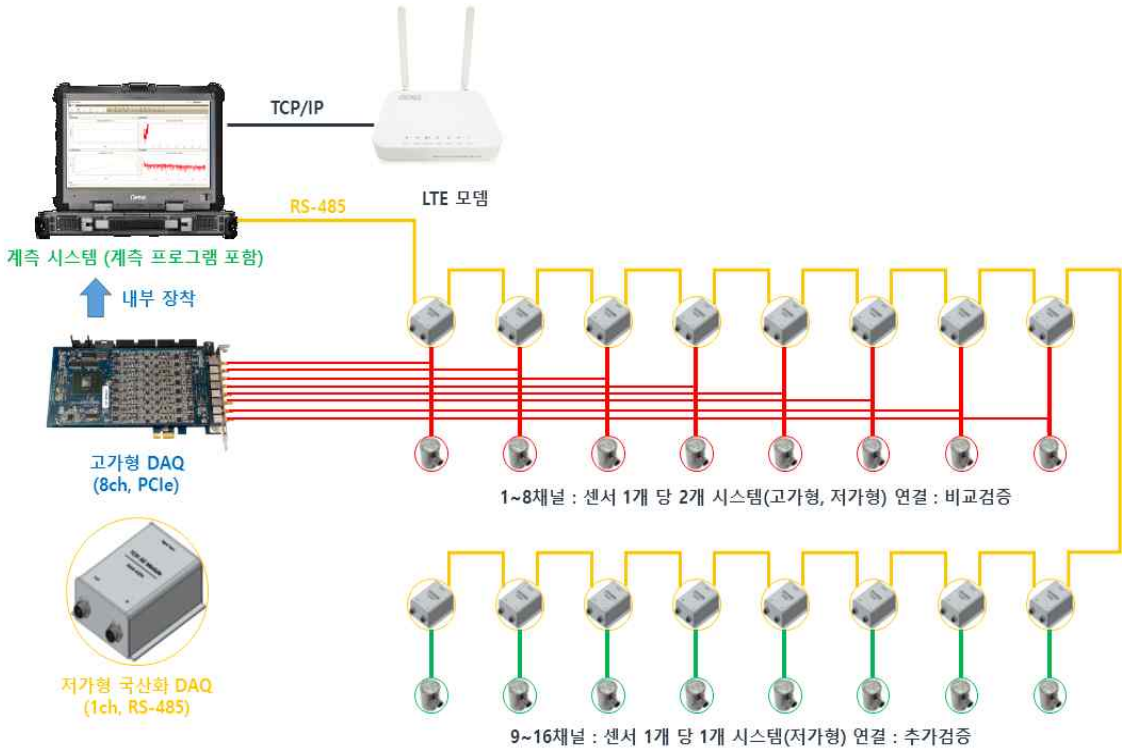
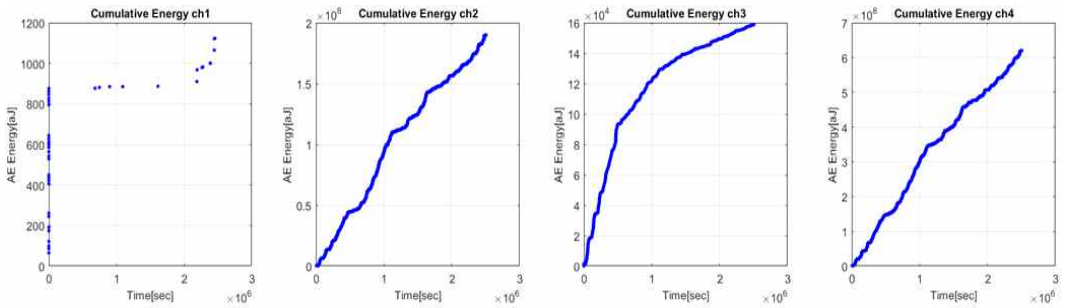
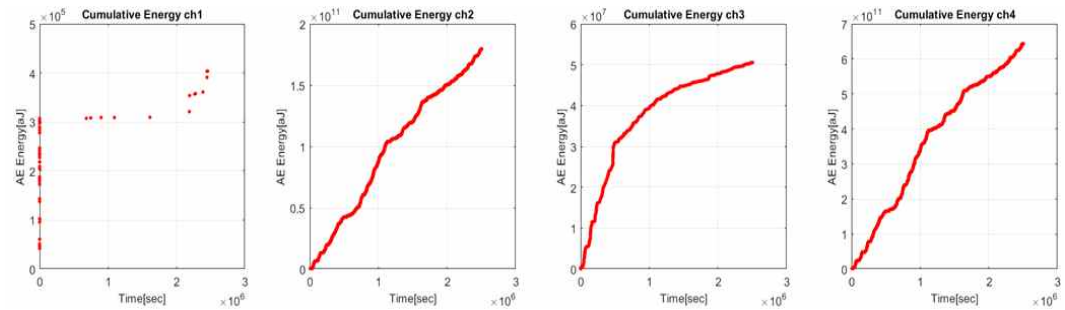


그림 178 외산 장비와의 비교 검증을 위한 시스템 구성

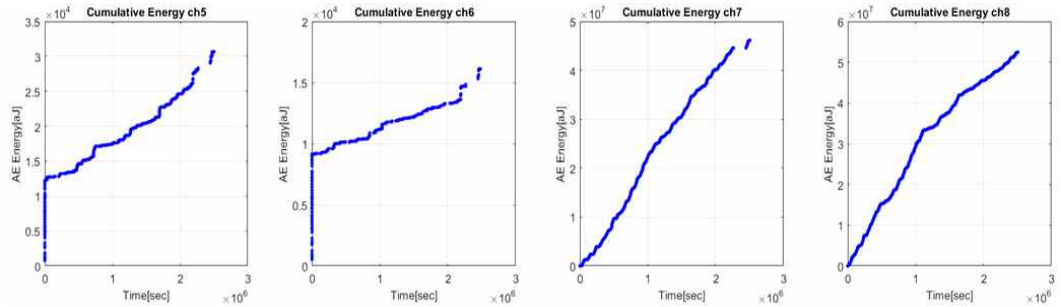
시범 설치(홍제천고가교, 성동방향, MP90~MP91구간)를 통해 수집된 데이터이다. 위와 동일한 시스템 구성으로 총 8개 채널에 대해 같은 센서의 데이터를 외산장비와 국산화 제품으로 계측하였다. 설치 기간은 21년 8월경부터 21년 11월경까지 총 4개월이며, 이 중 9월 15일부터 10월 15일까지의 1개월 간의 데이터를 비교한 결과가 다음과 같다. 파란색으로 표시된 그래는 국산화 제품으로 계측한 데이터이고, 빨간색으로 표시된 그래프는 외산장비로 계측한 데이터이다.



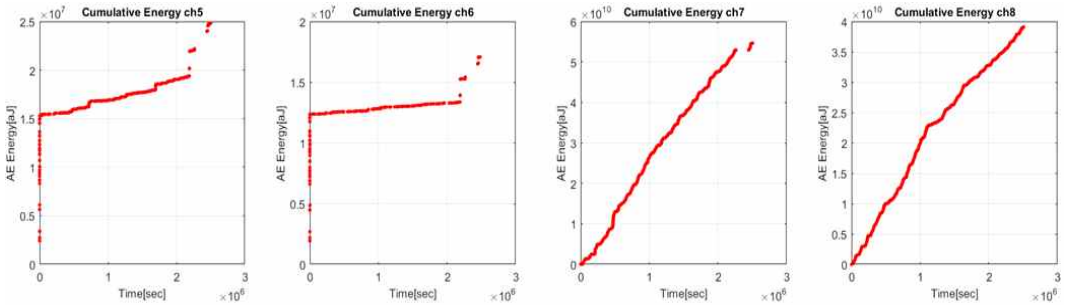
국산화 제품(AE 계측 단말) Ch1~Ch4



외산 장비(PCIe) Ch1~Ch4



국산화 제품(AE 계측 단말) Ch5~Ch8



외산 장비(PCIe) Ch5~Ch8

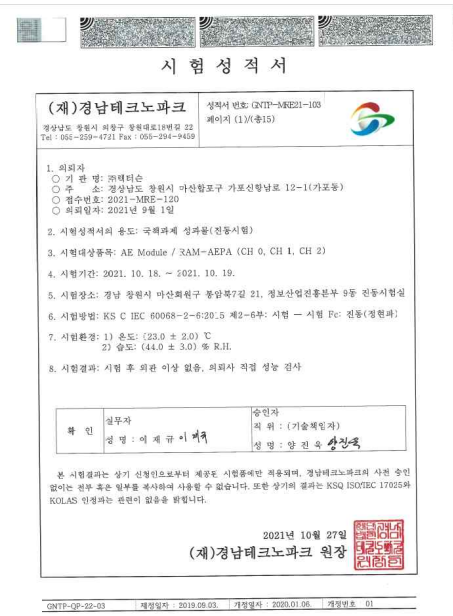
그림 179 외산 장비와의 비교 검증 그래프

위 그림의 그래프에서 두 장비에서 계측된 결과 그래프가 거의 유사한 경향의 결과를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한 Energy의 발생 경향이 일정하므로 노이즈 신호 외 텐던의 손상으로 인한 신호 발생은 현재로서는 확인되지 않았다. (일부 채널의 특이점에 대해서도 실제 분석 결과 Amplitude가 낮은 관계로 노이즈성 신호로 판단하고 있다.)

4) 품질시험

4-1) 내환경시험(진동/온도), [증빙2], [증빙3] 참조

진동내구성과 3가지 온도내구성(고온/다습, 저온동작, 열충격)에 대해 공인기관의 시험을 의뢰하여 성적을 다음과 같이 득하였다.



시 험 성 적 서

(재)경남테크노파크

성적서 번호: GNTP-MRE21-103
페이지 (1)/(총15)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: ㈜텍터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MRE-120
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 국책과제 성과물(진동시험)

3. 시험대상품목: AE Module / XAM-AEPA (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 10. 18. ~ 2021. 10. 19.

5. 시험장소: 경남 창원시 마산회원구 봉암북7길 21, 정보산업진흥본부 9동 진동시험실

6. 시험방법: KS C IEC 60068-2-6:20□5 제2-6부: 시험 — 시험 Fc: 진동(정현파)

7. 시험환경: 1) 온도: (23.0 ± 2.0) ℃
2) 습도: (44.0 ± 3.0) % R.H.

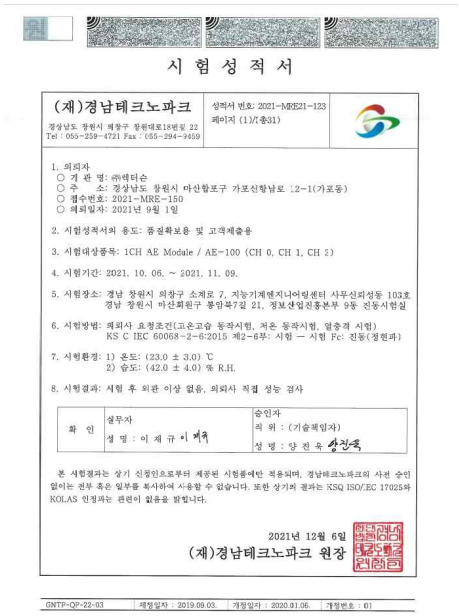
8. 시험결과: 시험 후 외관 이상 없음, 의뢰사 직접 성능 검사

확 인	실무자	승인자
	성 명 : 이 재 규	직 위 : (기술책임자) 성 명 : 양 진 욱

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 10월 27일
(재)경남테크노파크 원장

GNTP-QP-22-03 | 제정일자 : 2019.09.03. | 개정일자 : 2020.01.06. | 개정번호 : 01



시 험 성 적 서

(재)경남테크노파크

성적서 번호: 2021-MRE21-123
페이지 (1)/(총31)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: ㈜텍터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MRE-150
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 품질확보용 및 고객제출용

3. 시험대상품목: 1CH AE Module / AE-100 (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 10. 06. ~ 2021. 11. 09.

5. 시험장소: 경남 창원시 의창구 소계로 7, 지능기계엔지니어링센터 사무신뢰성동 103호
경남 창원시 마산회원구 봉암북7길 21, 정보산업진흥본부 9동 진동시험실

6. 시험방법: 의뢰사 요청조건(고온고습 동작시험, 저온 동작시험, 열충격 시험)
KS C IEC 60068-2-6:2015 제2-6부: 시험 — 시험 Fc: 진동(정현파)

7. 시험환경: 1) 온도: (23.0 ± 3.0) ℃
2) 습도: (42.0 ± 4.0) % R.H.

8. 시험결과: 시험 후 외관 이상 없음, 의뢰사 직접 성능 검사

확 인	실무자	승인자
	성 명 : 이 재 규	직 위 : (기술책임자) 성 명 : 양 진 욱

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 12월 6일
(재)경남테크노파크 원장

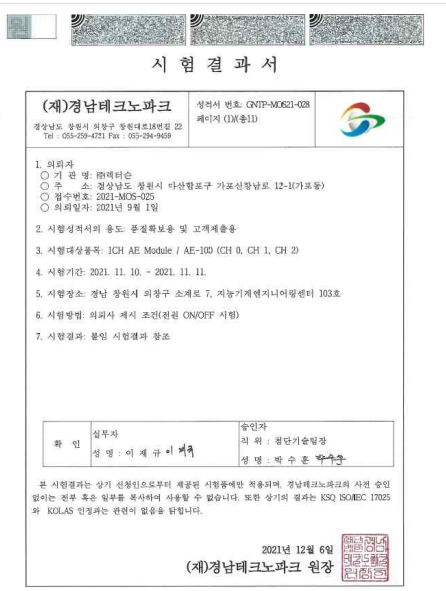
GNTP-QP-22-03 | 제정일자 : 2019.09.03. | 개정일자 : 2020.01.06. | 개정번호 : 01

진동내구성 성적서 온도내구성 성적서

그림 180 내환경시험 공인시험 성적서

4-2) 전원 동작 시험(on/off 테스트), [증빙4] 참조

제품의 전원 내구성 테스트를 위해 반복적인 전원 on/off 동작에도 제품의 건전성이 유지됨을 확인하였다.



시 험 결 과 서

(재)경남테크노파크

성적서 번호: GNTP-MOS21-028
페이지 (1)/(총11)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: ㈜에버터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MOS-025
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 품질확보용 및 고객제출용

3. 시험대상품목: 1CH AE Module / AE-100 (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 11. 10. ~ 2021. 11. 11.

5. 시험장소: 경남 창원시 의창구 소계로 7, 지능기계연지니어링센터 103호

6. 시험방법: 의뢰사 제시 조건(전원 ON/OFF 시험)

7. 시험결과: 붙임 시험결과 참조

확 인	실무자	승인자
	성 명 : 이 제 규	직 위 : 첨단기술팀장
		성 명 : 박 수 훈

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 12월 6일
(재)경남테크노파크 원장

그림 181 전원 동작 시험 성적서

4-3) KC 인증(전자파 인증) , [증빙5] 참조

제품의 전자파 영향성 시험은 KC 인증 취득으로 대신하였다.



방송통신기자재등의 적합등록 필증

Registration of Broadcasting and Communication Equipments

상호 또는 성명 Trade Name or Registrant	㈜에버터슨
기자재명칭(제품명칭) Equipment Name	배아벽 수질 및 분석시스템(1채널 AE 모듈)
기기부호/추가 기기부호 Equipment code /Additional Equipment code	IMI61
기본모델명 Basic Model Number	AE-100
파생모델명 Series Model Number	
등록번호 Registration No.	R-R-eTS-AE-100
제조자/제조국가 Manufacturer/County of Origin	㈜에버터슨 / 한국
등록연월일 Date of Registration	2021-11-18
기타 Others	

위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.
It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2021년(Year) 11월(Month) 19일(Day)

국립전파연구원장

Director General of National Radio Research Agency

※ 적합등록 방송통신기자재는 반드시 "적합성평가표시" 등 부착하여 유통하여야 합니다.
위반시 과태료 처분 및 등록이 취소될 수 있습니다.

그림 182 KC 인증, 인증서

- 테스트베드 교량 현장 적용성 평가 및 보완

1) 교량 적용 결과 보완 사항

(1) 박스거더 내부 벽면 등에 설치하기 용이하고, 내구성이 확보되는 외장 케이스

(2) 게이트웨이로부터 충분히 긴 통신 거리를 확보할 방안

(3) 통신 안정성 확보

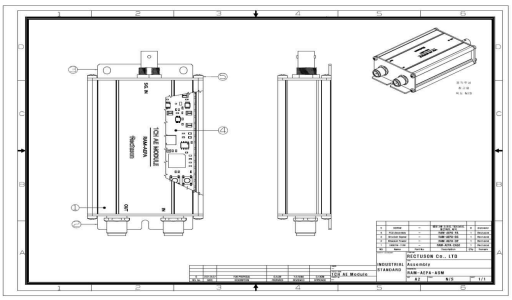
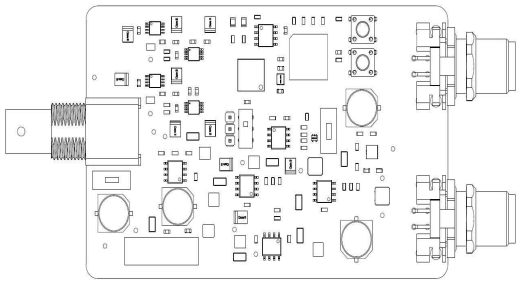
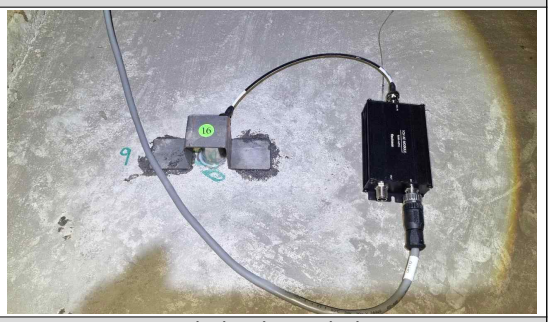
(4) 불가피한 정전(외부 공사 등)에 대응하기 위한 방안 및 전원 충격에 대한 내구성 확보

: UPS 도입으로 정전에 대응할 수 있으나, 제품(계측 단말) 자체가 갑작스러운 전원 차단 등에도 고장을 일으키지 않는 내구성 확보 필요

2) 1차 개발 제품

최초에 테스트베드 교량에 적용한 제품. 8월~12월 간 만 4개월 간 홍제천고가교 성동방향 1개 구간에서 16채널을 운영하였다. 결과 위와 같은 개선점을 도출하였다.

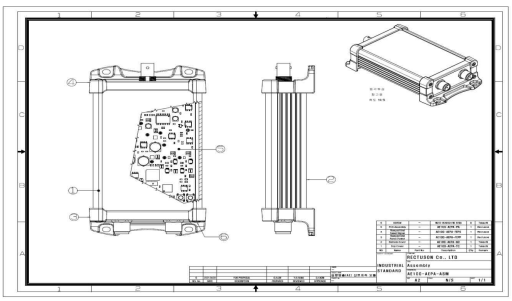
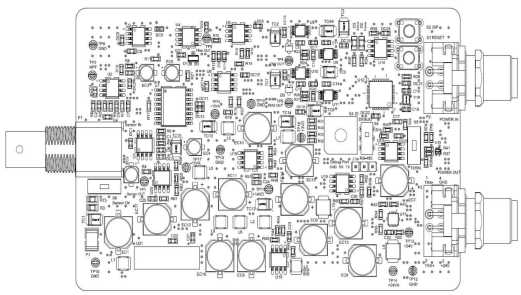
표 39 AE 계측 단말 1차 개발 제품 사진

	
기구 설계	PCB 도면
	
실제 제품 사진	현장 적용 사진

3) 2차 개발 제품(최종, 보완품)

위 개선점을 반영하여 최종 제작한 제품으로 내환경시험 및 전자파 인증 등을 취득하였다. 12월에 설치한 장기 모니터링용 시스템에는 해당 제품이 적용되었다.

표 40 계측 단말 2차(최종) 개발 제품 사진

	
기구 설계	PCB 도면
	
실제 제품 사진	현장 적용 사진

- PSC 구조물 안전진단 관련 정책 반영 추진

: PSC 박스거더교 내부텐던 유지관리개선 용역 수주(한국건설기술연구원)

1) 발주처: 서울시설공단
2) 용역기간: 2021.05.17.~2022.05.30.
3) 용역금액: 2,388,800,000원
4) 과업내용:
(1) 국내외 자료수집 및 분석
(2) 내부텐던 상태조사 및 위험수준평가
(3) 구조물 건전성 모니터링 시스템 구축
(4) 장기 유지관리 체계수립
(5) 주요과제 성과 기록물 확보 및 홍보



그림 183 PSC 박스거더교 내부텐던 유지관리개선 용역 과업내용서

5) 연구성과 반영 내용:
- 과업내용 (3) 구조물 건전성 모니터링 시스템 구축(AE 모니터링 시스템 구축)
▪ 3차년도 : “테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행” 내용 참조

- 과업내용 (4) 내부텐던 장기 모니터링 유지관리 LCC 분석 및 사용 매뉴얼
▪ LCC 분석 결과 요약
ㅇ 생애주기 최적화 경제성 분석은 아래와 같은 특징을 갖게되며 분석 결과, 연구안이 더 경제적인 것으로 나타남
ㅇ 공법 최적화 경제성 분석은 타 공법과 비교하여 분석하였으며 연구안이 더 경제적인 것으로 분석됨
ㅇ 생애주기 최적화 LCC 분석 결과, 기존안 대비 연구안이 7.6% 비용 절감이 되며, 공법 최적화 LCC 분석은 기존안 대비 연구안이 30.1% 비용 절감되는 것으로 나타남
ㅇ 2가지 방법 모두 연구안을 적용하는 것이 경제적인 것으로 분석됨

생애주기 최적화 경제성 분석 특징 정리

구분			기존안	연구안	특징	경제성요인
직접비	초기공사비		-	+센서설치비	비용증대	-
	유지관리비용	점검	정밀안전점검 2년에 1회 정밀안전진단 4년에 1회	정밀안전점검 2년에 1회 정밀안전진단 5년에 1회	센서설치로 인한 상태등급 향상으로 점검횟수 감소	+
		보수	-	C → B 반복	손상예측 가능하여 보수 가능	-
		보강	D → B 반복	-	손상예측 불가하여 보강 수행	+
		교체	-	센서교체 필요	15년 주기	-
	해체폐기비용		-	-	동일	
간접비	도로이용자비용		보강 수행	-	보강 수행 시, 통행제한 발생	+

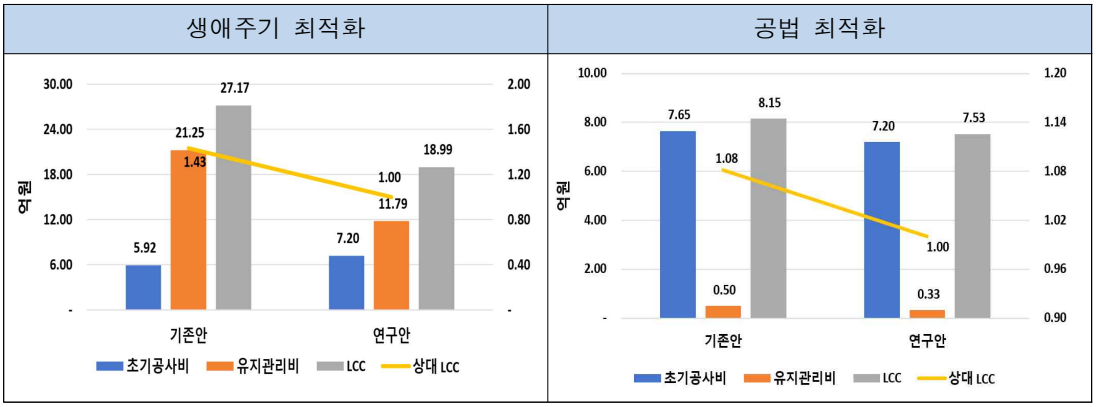


그림 184 공법 최적화 LOC 분석 결과

▪ 사용자 매뉴얼 : “최종 불량 사례 정의” 내용 발췌

특징변수의 크기 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

표 42 음향방출 특징신호 대비 예상 결함 정의

	전기 노이즈	환경 노이즈	콘크리트 미세 균열	콘크리트 균열	*강연선 소선 파단*
Peak [mV]	1,000 이상	1,000 이하	100 이상	330 이상	*1,000 이상*
RMS [mV]	10 이하	100 이하	100 이상	100 이상	*100 이상*
AE Energy [aJ]	100 이하	1,000 이상	1,000 ~ 10,000	10,000 이상	*10,000 이상*

AE 신호 발생 경향 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

(1) 다음 신호가 1시간에 100회 이상 확인되는 경우

: 공극 또는 그라우트 파괴에 의한 2차 신호

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	-
AE Energy [aJ]	1,000 이상

(2) 다음 신호의 발생 누적 빈도가 1개월 동안 10,000회를 초과하는 경우
: 활발한 부식의 진행 가능성 의심.

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	100 이상
AE Energy [aJ]	-

(3) 노이즈 신호 평가 : 음향방출센서는 타 비파괴 센서에 비해 민감도가 높은 편이며, 항상 노이즈에 노출되어 있다. 따라서 기본적인 계측 경향에는 항상 크고 작은 노이즈가 포함되어 있음을 감안하고 평가해야 한다. 본 지침에서 별도로 표기한 노이즈 성분은 비전문가에 의해 이벤트 신호로 오인될 수 있는 대표적인 항목을 표시한 것이며, 예외적인 환경 노이즈가 추가로 확인될 수 있음을 주의해야 한다. 일반적으로 Peak가 높거나 AE Energy가 큰 경우 이벤트 신호로 오인될 수 있다. 그러나 Peak가 높으나 지속성이 길지 않는 단발성 신호는 전기 노이즈일 가능성이 크고, (Peak만 높고, 평균신호레벨(RMS)나 AE Energy는 작은 경우) AE Energy는 높으나 Peak가 RMS가 낮은, 낮은 레벨의 신호가 지속성만 긴 경우 환경 노이즈일 가능성인 큰 것으로 평가한다.

(4) 콘크리트 균열 신호 : 미세 균열과 일반 균열로 구분지었으나, AE에 의한 진단은 정량적이지 않기 때문에 물리적인 크기와는 일치하지 않을 수 있다. 해당 구분은 오히여 균열의 길이보다 폭과 연관성이 많으며, 균열의 심각성과 연관지어 생각할 수 있다. 미세 균열은 균열이 진전되었으나 심각도가 상대적으로 떨어지고, 일반 균열은 해당 위치의 육안검사가 필요한 심각한 수준으로 정의하였다.

(5) 음향방출 신호의 발생 경향 평가 : 음향방출신호는 단발성 신호의 특징변수 비교분석도 가능하지만, 일정 기간 신호의 발생 경향을 통해서도 결함에 대해 정의가 가능하다. 일반적으로 특정 기간의 이벤트 발생 수를 기준으로 상태를 정의하는데, 이때의 이벤트는 위에서 정의한 바와 같이 특정 기준을 만족하는 신호의 발생을 가리킨다.

(6) PSC 구조물 손상 규정 범위의 한계 : 해당 신호 정의는 실험 조건에서의 데이터를 바탕으로 하고 있으므로 콘크리트 균열과 텐던 파단 및 이와 유관된 2차 신호들에 대해서만 정의하고 있다. PSC 구조물 인장 파괴 실험을 진행하게 되면, 콘크리트 균열 발생 -> 균열 성장 -> 텐던 파단으로 진행되고, 구조물이 완전히 파괴되기 직전에서야 철근 항복 및 파단이 발생한다. 실험 중 구조물의 완전 파괴까지 하중을 인가하는 것은 많은 위험이 따르기 때문에 텐던 파단이 확인된 시점에서 실험을 중단하였다. 따라서 본 불량 사례 정의에서는 콘크리트 균열과 텐던 파단과 관련한 결함에 대해서 손상 범위를 한정지음을 밝힌다.

2-2. 연구개발 추진 전략 및 방법

가. 연구개발 추진방법

○ 외부 기관 및 수요기업 협력

- 국내 주요 기반 시설 및 산업 플랜트 적용을 위해 이를 운용하는 수요처와의 연계가 필요함. 주관기관 렉터슨의 현재 고객층과 한국건설기술연구원의 인프라를 활용하여 다양한 수요처의 협력을 구함.
- PSC 교량에 대해 서울시 및 서울시설공단의 도움을 구하여 서울 시내 고가교 및 한강 교량, 대형 특수교 등의 PSC 구조물 진단 실태와 현장 요구도 등을 수집하여 검사 장비 개발 및 모니터링 시스템 구축에 활용하고자 함.
- 이와 같은 실제 수요처의 요구도를 기반으로 특징추출 및 이상상태 분류 등 PSC 교량 내부 텐던 검사 및 진단기술을 개발하여 최종적으로 완성된 시스템을 수요처에 재적용할 수 있도록 기술제안을 수행함.

○ 과제참여기관 간 협력

- 검사 장비 및 진단 기술 개발을 담당하는 주관기관 렉터슨과 이에 대한 검증 및 보완을 담당하는 건설기술연구원 간의 유기적인 협력을 도모하고 상호간의 기술적 이해와 교류가 이루어질 수 있도록 정기적/비정기적인 기술교류 세미나 및 개발 회의를 개최함.
- 각종 협의체를 구성하여 사전 관리 체계를 구축하고, 기관별 담당자를 지정하여 서로 간의 의사소통이 상시 이루어질 수 있도록 관리함. 또한 관리 시스템에 의해 의사소통 내용에 대해 추적관리가 이루어질 수 있도록 함.
- 물리적인 거리와 시간제약으로 인해 발생할 수 있는 소통의 제한을 최소화하기 위해 텔레컨퍼러스 또는 화상회의 시스템을 갖추고 정기적/비정기적 회의가 보다 쉽게 원활하게 이루어질 수 있도록 함.
- 정기적인 보고/회의 수행을 통해 개발 현안에 대해 충분한 공유가 이루어질 수 있도록 하며, 기술개발 진행 중 발생할 수 있는 모든 문제/현안/위험요소에 대해 별도의 임시 협의체를 구성하여 즉각적으로 대응할 수 있는 시스템을 갖춤.

○ 자료 수집 및 해외 업체 협력

- 산업설비 및 구조물의 상태감시를 위해 사용되는 다양한 센서들은 대부분 수입제품에 의존되고 있는 상황임. 기성품을 구매해서 사용하기 때문에 실제 현장 시스템 구축 시 적절한 커스터마이징이 이루어지기 어렵고, 추가 기능을 요구하기 어려움. 해외 센서 제조사와의 협업을 통해 현장에 최적화된 센서 개발을 요청하고자 함.
- PSC 거더교의 내부 텐던 검사 및 진단 기술의 신뢰성 향상을 위해 다양한 산업분야(제조설비, 건축·토목, 항공우주, 군사 분야 등)의 기술 자료를 수집/분석하고, 구조물 검사 및 진단에 관한 주요 기술에 대해 해외 전문가 활용 및 학회 참석 등을 통하여 집중적으로 분석함.

○ 연구 성과물 활용성 강화

- 개발 결과의 사업화를 염두에 두고, 과제 수행을 통해 생산된 원천/핵심 기술 및 독창적인 성과물에 대한 국내외 특허 출원 및 프로그램 등록을 적극적으로 시도하고, 개발 기술의 수출에 대비함.

나. 연구개발 SWOT 분석

○ 강점(Strength)

- 주관기관 ㈜렉터슨은 음향방출기술 전문기업으로 주요 화력발전소 및 제주 풍력 단지, 일반 산업 플랜트에 대한 설비 진단 서비스 제공하고 있으며, 이와 관련된 많은 노하우를 보유하고 있음.
- 또한 설비 진단을 위한 데이터레코더 및 관련 신호처리 장치 개발에 대한 다양한 경험을 보유하고 있음.
- 이를 바탕으로 국내 주요 산업 플랜트 설비 및 발전소 현장에 대한 높은 이해도와 시스템 현장 운용에 대한 노하우를 가지고 있음.

○ 약점(Weakness)

- 주관기관 ㈜렉터슨은 음향방출기술의 콘크리트 구조물 진단과 관련한 경험이 연구 용역 수준에 머물러 있음.
- 또한 PSC 거더교 또는 유사 사례에 대한 실제 현장 적용 경험이 미흡함.

○ 기회(Opportunity)

- 기존에 보유하고 있던 음향방출기술을 새로운 구조물 진단 분야에 적용함으로써 진단 경험을 축적하고 PSC 거더교에 적합한 신규 알고리즘 개발을 통해 신기술을 확보할 수 있음.
- 본 개발의 결과물을 활용하여 국내 PSC 구조물 진단이라는 새로운 시장 개척의 기회로 삼음.

○ 위협(Treat)

- PSC 거더교에 대한 음향방출 진단 기술은 해외 선진사에서 상용 제품으로서 서비스되고 있으며 해외 시장에서 높은 신뢰도를 확보하고 있음.
- 국산화 신규 제품은 단순한 가격경쟁력만으로 시장 진입이 어렵고 안전진단 설비의 특성상 기존의 신뢰도 있는 제품을 쉽게 대체하기 어려움.



그림 185 SWOT 분석 요약

○ 약점(Weakness)과 위협(Treat)에 대한 극복방안

- 참여기관 간의 연구개발 협력
  - 음향방출기술 및 데이터 계측 경험을 다수 보유하고 있는 렉터슨과 PSC 거더교에 대한 높은 이해도와 구조물 진단에 대한 신뢰성 평가 능력을 보유한 한국건설기술연구원 간의 긴밀한 협력 구조를 형성하여 기술개발을 수행함.
  - 이를 통해 기술적 개념정립 단계(TRL2) 수준의 PSC 거더 내부 텐던 검사 및 진단 기술을 실제 환경 시작품 데모 단계(TRL7) 수준까지 끌어올리는 것이 당 과제의 목표임.

- 국내 산학기관 및 전문가 활용
  - 참여기관 내에서 부족한 기술은 국내 산학기관의 협력을 구하거나 관련 외부 전문가를 활용하는 방법을 통해 확보함.
  - 관련 연구를 수행하고 있는 국내 연구기관 또는 대학을 섭외하여 기술개발에 대한 자문이나 기술개발 결과에 대한 평가를 받음으로써 기술개발에 대한 신뢰도를 높임.

- 해외 선진사 교육 및 관련 학회 참가, 해외 전문가 초빙
  - 해외 선진사에서 실시하는 진단 기술에 대한 교육 및 세미나에 적극적으로 참여하고, 기술개발기간 동안 관련 국제 학회에 참석하여 최신 기술 트렌드에 대한 감각과 신기술에 대한 탐구 기반으로 활용함.
  - 관련 해외 전문가를 초빙하여 개발에 적극적으로 활용하고, 필요시 관련 기술에 대한 기술이전 또한 고려함.

- 실제 현장 또는 유사 환경 검증을 통한 고객 신뢰도 확보
  - 실제 PSC 거더교 현장 또는 유사 테스트베드 교량에 개발 시스템을 설치하여 진단 성능 및 제품과 서비스의 신뢰도를 검증 받음.
  - 개발 제품이 충분한 신뢰도를 가지고 있으며, 해외 선진사에 비해 가격 경쟁력이나 현장 커스터마이징, 유지관리 서비스에 있어 강점을 가지고 있음을 어필함.

2-3. 연구개발 추진 체계

연구개발과제		총 참 여 연 구 원
과제명	PSC 구조물의 안전성 평가를 위한 음향방출 기반 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발	주관연구책임자 (김동현)외 총 10명

기 관 별 참 여 현 황		
구 분	연구기관수	참여연구원수
대 기 업	-	-
중견기업	-	-
중소기업	1	6
대 학	-	-
국공립(연)	1	3
출 연 (연)	-	-
기 타	-	-

주관연구기관 : ㈜렉터슨
(과제명) PSC 구조물 내부 텐던 손상검출 검사 장비 및 실시간 모니터링 기술 개발
연구책임자 (김동현)외 7명
담당기술개발내용
▪ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 설계 및 개발 ▪ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축 ▪ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발

공동연구기관 : 한국건설기술연구원
(과제명) PSC 구조물 내부 텐던 손상검출 기술 검증 및 유지관리 매뉴얼 개발
연구책임자 (서동우)외 2명
담당기술개발내용
▪ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 성능 검증 ▪ 개발 기술의 현장 적용성 평가 및 보완

2-4. 연구개발 추진 일정

1차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		-	-	-	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	실내 실험을 위한 소형 PSC 실험체 제작													18,000	김동현 (㈜렉터슨)
2	음향방출 모니터링 시스템 구축													39,000	김동현 (㈜렉터슨)
3	외부 신호 가진 방법에 따른 음향방출 신호 특성 연구													40,000	김동현 (㈜렉터슨)
4	내부 텐던 검사 방법 및 분석 알고리즘 개발													31,000	김동현 (㈜렉터슨)
5	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발 요구사항 정의													10,000	김동현 (㈜렉터슨)
6	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 설계													25,000	김동현 (㈜렉터슨)
7	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 설계 검토 및 수정 보완													15,000	김동현 (㈜렉터슨)

2차년도															
일련번호	연구내용	추진 일정												연구개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발													86,000	김동현 (㈜렉터슨)
2	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 분석 프로그램 개발													29,000	김동현 (㈜렉터슨)
3	PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 자체 검사													10,000	김동현 (㈜렉터슨)
4	상시 모니터링을 위한 센서 설치 위치 선정 및 설치 방안 수립													10,000	김동현 (㈜렉터슨)
5	음향방출 기반 모니터링 시스템 구축													88,000	김동현 (㈜렉터슨)
6	음향방출진단 데이터베이스 설계 및 구현													10,000	김동현 (㈜렉터슨)
7	PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축													15,000	김동현 (㈜렉터슨)
8	텐던 손상 PSC 실험체 제작													35,000	서동우 (KICT)

9	블라인트 테스트 수행 및 성능 검증													25,000	서동우 (KICT)
3차년도															
일련 번호	연구내용	추진 일정												연구 개발비 (단위: 천원)	책임자 (소속 기관)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
1	**개발 기술 신뢰성 평가 계획 및 절차 수립**													**11,000**	**김동현 (㈜렉터슨)**
2	**PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 신뢰성 평가**													**18,000**	**김동현 (㈜렉터슨)**
3	**PSC 거더교 내부 텐던 모니터링 기술 신뢰성 평가**													**18,000**	**김동현 (㈜렉터슨)**
4	**실제 교량에서의 매질에 따른 AE 특성 확인**													**11,000**	**김동현 (㈜렉터슨)**
5	테스트베드 교량 시범 모니터링													150,000	김동현 (㈜렉터슨)
6	테스트베드 교량 내부 텐던 검사 수행													68,000	김동현 (㈜렉터슨)
7	테스트베드 교량 개선사항 도출 및 적용													11,000	김동현 (㈜렉터슨)
8	PSC 거더교 상태진단 기준 수립													22,000	김동현 (㈜렉터슨)
9	**PSC 거더교 전체 교량에 대한 효율적 검사 방안 수립**													**11,000**	**김동현 (㈜렉터슨)**
10	진단 기술 신뢰성 평가													20,000	서동우 (KICT)
11	테스트베드 적용													45,000	서동우 (KICT)
12	정책 반영 추진													25,000	서동우 (KICT)

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발

- 검사장비용 AE 계측 단말
  - 소형화 및 간소화되어 시스템의 현장 설치 용이
  - 기존 제품 대비 확장된 설치 가능 거리 (최대 500m)
  - 멀티 체인 방식으로 케이블 설치가 효율적으로 축소
  - RS-485 방식으로 데이터 전송, 전용 소프트웨어 또는 게이트웨이 없이 사용이 가능



그림 186 검사장비용 AE 계측 단말 사진

- 검사장비용 AE 계측 단말 상세 제원
  - 신호입력 : 1채널 (게이트웨어1대당 최대 16채널)
  - 입력 주파수 범위 : 1 ~ 1000 [kHz]
  - 데이터 전송주기 : 1[sec]
  - 출력변수 : Amplitude, Energy, RMS
  - 입력전원 : 20~30[V] @ 최대 100[mA]
  - 센서전원 : Phantom Power 20~30 [V]
  - 사용온도 : -40~60[℃]
  - 크기 : L84 X W155 X H38[mm]
  - 진동 내구성 : IEC-60068-2 인증
  - 기타 : KC(전자파 인증) 인증

- 검사장비용 AE 계측 단말 활용 형태

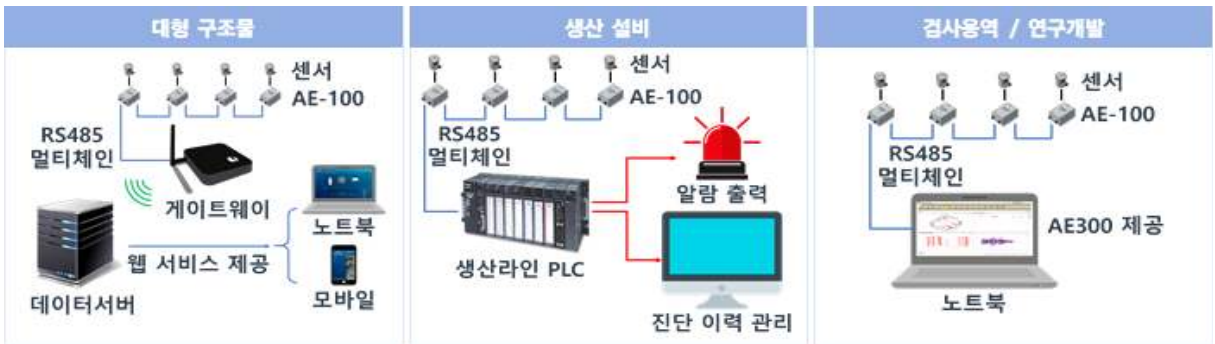


그림 187 검사장비용 AE 계측 단말 활용 형태

- 관련 카달록 제작

AE-100

Rectuson

음향방출(Acoustic Emission) 신호 계측 모듈



• AE-100이란?

AE100은 구조물 상태 감시 모니터링을 위해 개발된 혁신적인 제품입니다. 기존의 복잡한 음향방출 시스템을 대신해 현장에 쉽게 적용할 수 있도록 소형화, 간소화되었습니다. 또한 충분한 신뢰도와 내구성으로 다양한 현장의 요구도를 충족할 수 있도록 만들어졌습니다.

본 제품은 멀티 체인 방식으로 1개의 Gateway에 대해 최대 16채널을 지원합니다. 기존의 AE 시스템은 센서 하나 하나에 케이블 연결해야 했기에 케이블 소모가 많고, 설치에 오랜 시간이 필요했습니다. 멀티 체인 방식은 1개의 라인에 다수의 장치를 연결할 수 있기 때문에 케이블 소모가 획기적으로 줄어듭니다.

또한 RS-485 방식으로 데이터를 제공하기 때문에 전용 소프트웨어나 전용 게이트웨이 없이도 신호 측정에 활용할 수 있습니다.

본 제품은 다양한 현장에서 활용될 수 있습니다. 석유 화학 플랜트, 발전소, 공장의 품질 검사, 압력용기 검사, 교량의 케이블, 콘크리트 구조물, 비탈사면 등 음향방출 기술이 요구되는 대부분의 장소에서 활용될 수 있습니다.

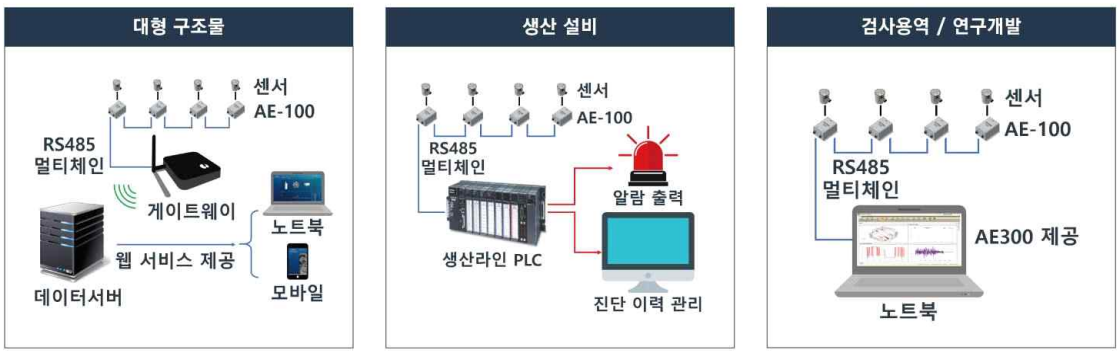
• 주요 특징

- 소형화 및 간소화되어 시스템의 현장 설치 용이
- 기존 제품 대비 확장된 설치 가능 거리 (최대 500m)
- 멀티 체인 방식으로 케이블 설치가 효율적으로 축소
- RS-485 방식으로 데이터 전송
  전용 소프트웨어 또는 게이트웨이 없이 사용이 가능
- 멀티 체인 방식으로 케이블 설치가 효율적으로 축소

• 제품의 사양

신호입력 : ····· 1채널 (게이트웨어 1대당 최대 16채널)
입력 주파수 범위 : ····· 1 ~ 1000[kHz]
데이터 전송주기 : ····· 1[sec]
출력변수 : ····· Amplitude, Energy, RMS
입력전원 : ····· 20~30[V]
@ 최대 100[mA]
센서전원 : ····· Phantom Power 20~30 [V]
사용온도 : ····· -40~60[℃]
진동 내구성 : ····· IEC-60068-2 인증
크기 : ····· L84 × W155 × H38[mm]

• 시스템 구성



(주)렉터슨 | AE-100 www.rectuson.com

그림 188 AE-100(AE 계측 단말) 카달록

- 내환경시험(진동/온도) 및 KC 인증 취득 : [증빙2]~[증빙5] 참조

- 제품 가격 경쟁력

▪ 구성요소별 비용 (단위 : 천원)

품명	스펙	단가		비고
		국산화 제품	해외 제품	
AE 센서	1개 채널 기준	-	1,000	해외제품 의존
AE계측 단말	1개 채널 기준	3,000	3,000	
게이트웨이	16채널 당 1대	15,000	15,000	
소프트웨어	1개 채널 기준	30,000	30,000	
설치 비용	1개 채널 기준	1,000	1,000	설치 자재 포함

▪ 1개 구간 기본 비용 (30개 채널)

적용 방안	수량	단가		금액		비고
		국산화 제품	해외 제품	국산화 제품	해외 제품	
AE 센서	30	-	1,000	30,000	30,000	해외제품 의존
AE계측 단말	30	3,000	6,000	90,000	180,000	
게이트웨이	2	15,000	20,000	30,000	40,000	
소프트웨어	1	30,000	50,000	30,000	50,000	
설치 비용	30	1,000	5,000	30,000	150,000	설치 자재 포함
총 액				210,000	450,000	

▪ 1개소 관심 영역 비용 (3채널 기준)

적용 방안	수량	단가		금액		비고
		국산화 제품	해외 제품	국산화 제품	해외 제품	
AE 센서	3	-	1,000	3,000	3,000	해외제품 의존
AE계측 단말	3	3,000	6,000	9,000	18,000	
게이트웨이	1	15,000	20,000	15,000	20,000	
소프트웨어	1	30,000	50,000	30,000	50,000	
설치 비용	3	1,000	5,000	3,000	15,000	설치 자재 포함
총 액				54,000	106,000	

▪ 소프트웨어와 게이트웨이는 16채널을 기준으로 발생하므로, 실제 적용 시에는 최소 16채널 이상 구성하는 것이 비용 측면에서 경제적임

▪ 국산화 제품의 게이트웨이 1대당 적용 가능 범위는 반경 500m이고, 해외제품의 적용 가능 범위는 200m이므로 실제 적용 시 가능 범위가 좁아 해외 제품의 도입 비용은 더욱 높아질 것으로 추정되며, 해외 엔지니어의 인건비는 추정 금액보다 높아질 수 있음

▪ 국산화 제품 도입 시 해외 제품 대비 최소 50% 이상의 비용 절감이 가능할 것으로 추정

▪ 이후 유지관리를 위한 추가 엔지니어링 비용 및 데이터 관리 등의 위에는 표기되지 않은 발생 비용들까지 감안한다면 국산화 제품이 충분한 가격 경쟁력을 가질 것으로 판단됨.

○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축

- 전체 시스템 구성도

실제 시스템 설치 사진 등에 대해서는 상기 수행 내용의 현장 설치 장절 참조



그림 189 통합 웹 모니터링 시스템 구성도

- 통합 웹 모니터링 화면

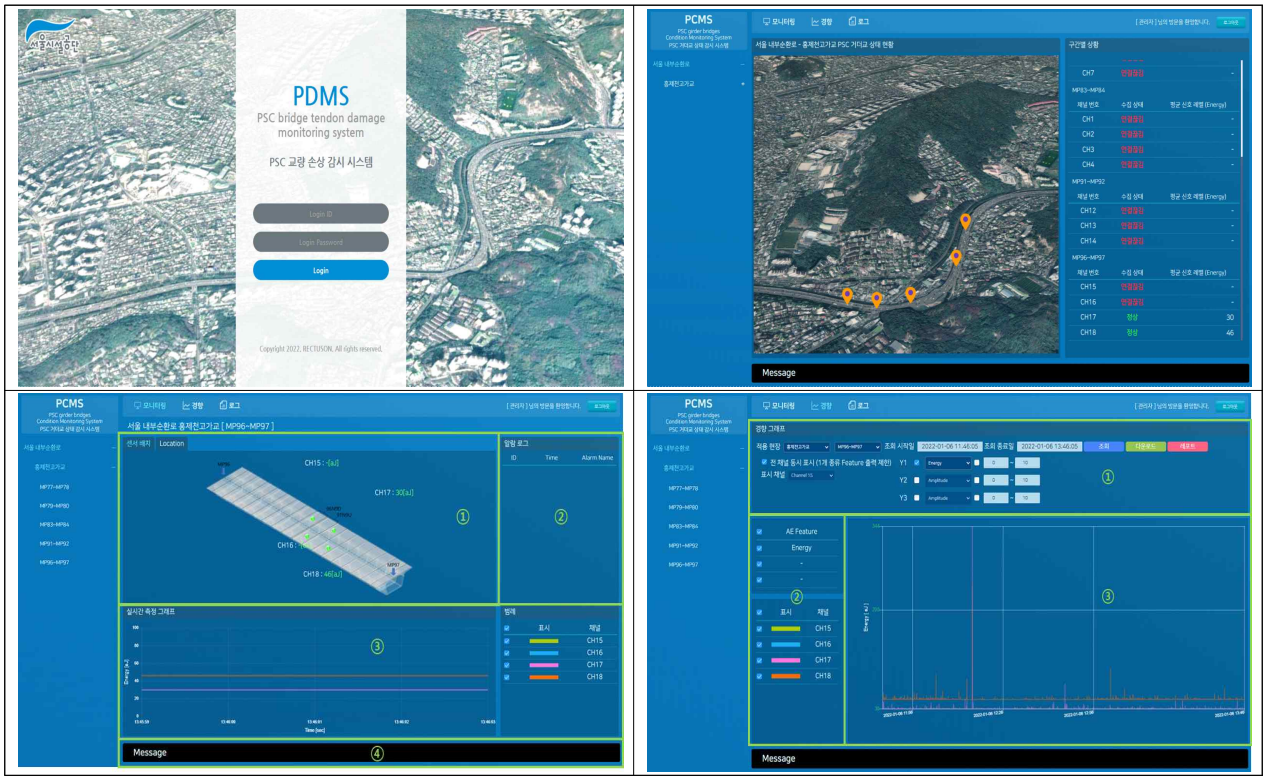


그림 190 통합 웹 모니터링 화면

○ PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축

- 실험 결과 종합

표 49 이상상태 별 음향방출신호 특징

분류			AE Feature 구분				
			Energy	Abs. Energy	Rise Time	Average Frequency	Ib value
소형 실험체	콘크리트 최초 균열	단면 결손	Overload	1.0 X 10^9	20,000	30kHz	1.0 감소
		일부 절단	Overload	1.2 X 10^9	48,000	30kHz	1.0 감소
		부식	Overload	1.7 X 10^9	40,000	30kHz	1.0 감소
		정상	Overload	1.5 X 10^9	45,000	30kHz	1.0 감소
		공극	Overload	1.3 X 10^9	47,000	30kHz	1.0 감소
	반복 하중 (3톤)	단면 결손	1,000 미만	1.0 X 10^7 미만	1,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		일부 절단	2,500 미만	2.5 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		부식	1,000 미만	1.0 X 10^7 미만	500 미만	20-40kHz	변동 없음
		정상	2,000 미만	2.5 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
		공극	2,000 미만	2.0 X 10^7 미만	2,000 미만	30-50kHz	변동 없음
폐교량 실험	콘크리트 균열(인장부)		1,000 이상	5.0 X 10^7	규정하기 어려움	20-30kHz	1.5 감소
	콘크리트 균열(압축부)		8,000	5.0 X 10^7	35,000	30kHz	1.0 증가
	강연선 파단		20,000	5.0 X 10^8	250	30kHz	변동 없음
	공극에의 강연선 슬립		40,000	7.3 X 10^8	4,000	50kHz	변동 없음
	강연선 파단 후 2차 신호		10,000	2.0 X 10^8	10,000	30kHz	변동 없음
부식 가속화 실험	실시간 계측		100-1,000	1.0 X 10^7 미만	1,000 미만	70kHz	변동 없음
	강연선 파단						
	부식 의심 신호						

- 최종 불량 사례 정의

특징변수의 크기 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

표 50 음향방출 특징신호 대비 예상 결함 정의

	전기 노이즈	환경 노이즈	콘크리트 미세 균열	콘크리트 균열	***강연선 소선 파단***
Peak [mV]	1,000 이상	1,000 이하	100 이상	330 이상	***1,000 이상***
RMS [mV]	10 이하	100 이하	100 이상	100 이상	***100 이상***
AE Energy [aJ]	100 이하	1,000 이상	1,000 ~ 10,000	10,000 이상	***10,000 이상***

AE 신호 발생 경향 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

(1) 다음 신호가 1시간에 100회 이상 확인되는 경우
: 공극 또는 그라우트 파괴에 의한 2차 신호

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	-
AE Energy [aJ]	1,000 이상

(2) 다음 신호의 발생 누적 빈도가 1개월 동안 10,000회를 초과하는 경우
: 활발한 부식의 진행 가능성 의심.

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	100 이상
AE Energy [aJ]	-

(3) 노이즈 신호 평가 : 음향방출센서는 타 비파괴 센서에 비해 민감도가 높은 편이며, 항상 노이즈에 노출되어 있다. 따라서 기본적인 계측 경향에는 항상 크고 작은 노이즈가 포함되어 있음을 감안하고 평가해야 한다. 본 지침에서 별도로 표기한 노이즈 성분은 비전문가에 의해 이벤트 신호로 오인될 수 있는 대표적인 항목을 표시한 것이며, 예외적인 환경 노이즈가 추가로 확인될 수 있음을 주의해야 한다. 일반적으로 Peak가 높거나 AE Energy가 큰 경우 이벤트 신호로 오인될 수 있다. 그러나 Peak가 높으나 지속성이 길지 않는 단발성 신호는 전기 노이즈일 가능성이 크고, (Peak만 높고, 평균신호레벨(RMS)나 AE Energy는 작은 경우) AE Energy는 높으나 Peak가 RMS가 낮은, 낮은 레벨의 신호가 지속성만 긴 경우 환경 노이즈일 가능성인 큰 것으로 평가한다.

(4) 콘크리트 균열 신호 : 미세 균열과 일반 균열로 구분지었으나, AE에 의한 진단은 정량적이지 않기 때문에 물리적인 크기와는 일치하지 않을 수 있다. 해당 구분은 오히여 균열의 길이보다 폭과 연관성이 많으며, 균열의 심각성과 연관지어 생각할 수 있다. 미세 균열은 균열이 진전되었으나 심각도가 상대적으로 떨어지고, 일반 균열은 해당 위치의 육안검사가 필요한 심각한 수준으로 정의하였다.

(5) 음향방출 신호의 발생 경향 평가 : 음향방출신호는 단발성 신호의 특징변수 비교분석도 가능하지만, 일정 기간 신호의 발생 경향을 통해서도 결함에 대해 정의가 가능하다. 일반적으로 특정 기간의 이벤트 발생 수를 기준으로 상태를 정의하는데, 이때의 이벤트는 위에서 정의한 바와 같이 특정 기준을 만족하는 신호의 발생을 가리킨다.

(6) PSC 구조물 손상 규정 범위의 한계 : 해당 신호 정의는 실험 조건에서의 데이터를 바탕으로 하고 있으므로 콘크리트 균열과 텐던 파단 및 이와 유관된 2차 신호들에 대해서만 정의하고 있다. PSC 구조물 인장 파괴 실험을 진행하게 되면, 콘크리트 균열 발생 -> 균열 성장 -> 텐던 파단으로 진행되고, 구조물이 완전히 파괴되기 직전에서야 철근 항복 및 파단이 발생한다. 실험 중 구조물의 완전 파괴까지 하중을 인가하는 것은 많은 위험이 따르기 때문에 텐던 파단이 확인된 시점에서 실험을 중단하였다. 따라서 본 불량 사례 정의에서는 콘크리트 균열과 텐던 파단과 관련한 결함에 대해서 손상 범위를 한정지음을 밝힌다.

- 실제 DB 설계 결과

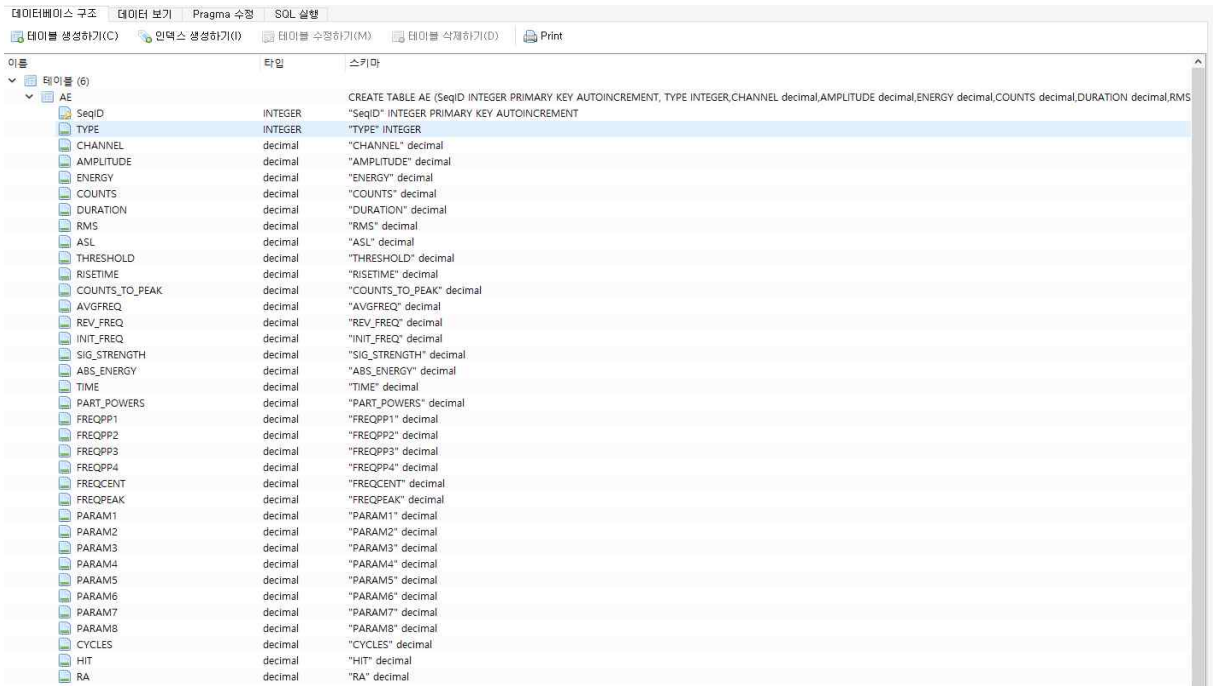
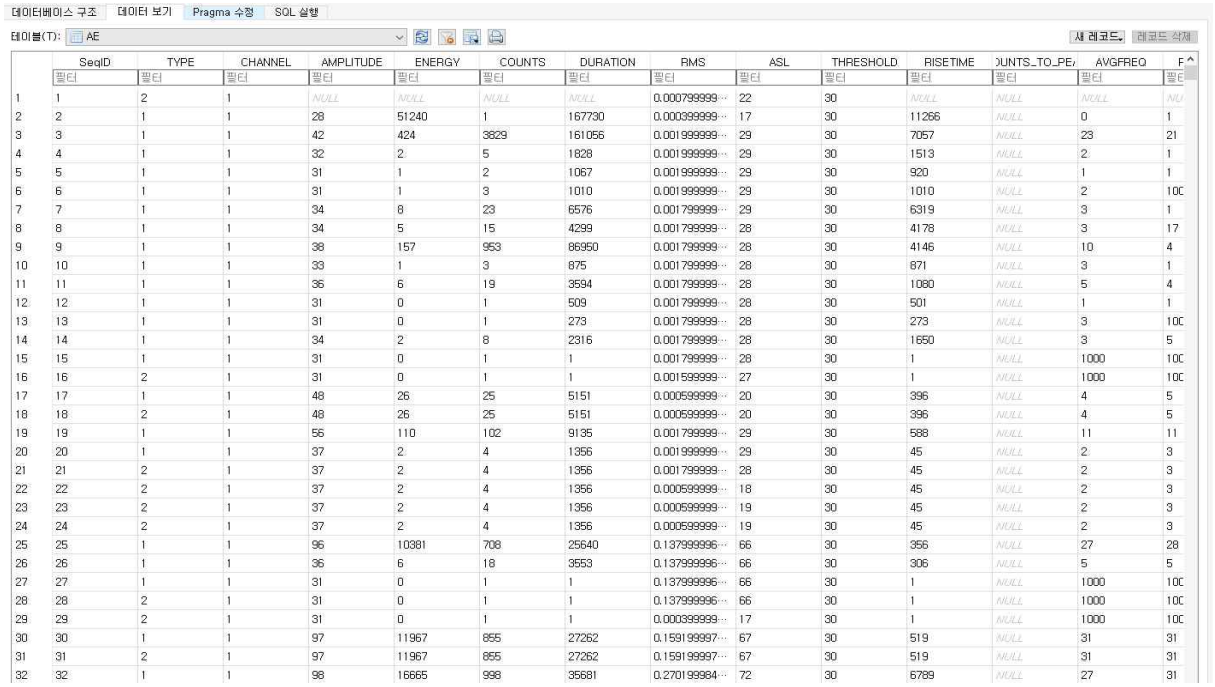


그림 191 데이터베이스 구조



	SeqID	TYPE	CHANNEL	AMPLITUDE	ENERGY	COUNTS	DURATION	RMS	ASL	THRESHOLD	RISETIME	OUNTS_TO_PE/	AVGFREQ	F
	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터	필터
1	1	2	1	NULL	NULL	NULL	NULL	0.000799999…	22	30	NULL	NULL	NULL	NU
2	2	1	1	28	51240	1	167730	0.000399999…	17	30	11266	NULL	0	1
3	3	1	1	42	424	3829	161056	0.001999999…	29	30	7057	NULL	23	21
4	4	1	1	32	2	5	1828	0.001999999…	29	30	1513	NULL	2	1
5	5	1	1	31	1	2	1067	0.001999999…	29	30	920	NULL	1	1
6	6	1	1	31	1	3	1010	0.001999999…	29	30	1010	NULL	2	100
7	7	1	1	34	8	23	6576	0.001799999…	29	30	6319	NULL	3	1
8	8	1	1	34	5	15	4299	0.001799999…	28	30	4178	NULL	3	17
9	9	1	1	38	157	953	86950	0.001799999…	28	30	4146	NULL	10	4
10	10	1	1	33	1	3	875	0.001799999…	28	30	871	NULL	3	1
11	11	1	1	36	6	19	3594	0.001799999…	28	30	1080	NULL	5	4
12	12	1	1	31	0	1	509	0.001799999…	28	30	501	NULL	1	1
13	13	1	1	31	0	1	273	0.001799999…	28	30	273	NULL	3	100
14	14	1	1	34	2	8	2316	0.001799999…	28	30	1650	NULL	3	5
15	15	1	1	31	0	1	1	0.001799999…	28	30	1	NULL	1000	100
16	16	2	1	31	0	1	1	0.001599999…	27	30	1	NULL	1000	100
17	17	1	1	48	26	25	5151	0.000599999…	20	30	396	NULL	4	5
18	18	2	1	48	26	25	5151	0.000599999…	20	30	396	NULL	4	5
19	19	1	1	56	110	102	9135	0.001799999…	29	30	588	NULL	11	11
20	20	1	1	37	2	4	1356	0.001999999…	29	30	45	NULL	2	3
21	21	2	1	37	2	4	1356	0.001799999…	28	30	45	NULL	2	3
22	22	2	1	37	2	4	1356	0.000599999…	18	30	45	NULL	2	3
23	23	2	1	37	2	4	1356	0.000599999…	19	30	45	NULL	2	3
24	24	2	1	37	2	4	1356	0.000599999…	19	30	45	NULL	2	3
25	25	1	1	96	10381	708	25640	0.137999996…	66	30	356	NULL	27	28
26	26	1	1	36	6	18	3553	0.137999996…	66	30	306	NULL	5	5
27	27	1	1	31	0	1	1	0.137999996…	66	30	1	NULL	1000	100
28	28	2	1	31	0	1	1	0.137999996…	66	30	1	NULL	1000	100
29	29	2	1	31	0	1	1	0.000399999…	17	30	1	NULL	1000	100
30	30	1	1	97	11967	855	27262	0.159199997…	67	30	519	NULL	31	31
31	31	2	1	97	11967	855	27262	0.159199997…	67	30	519	NULL	31	31
32	32	1	1	98	16665	998	35681	0.270199984…	72	30	6789	NULL	27	31

그림 192 데이터베이스에 저장된 음향방출 데이터

○ PSC 내부 텐던 유지 관리 매뉴얼

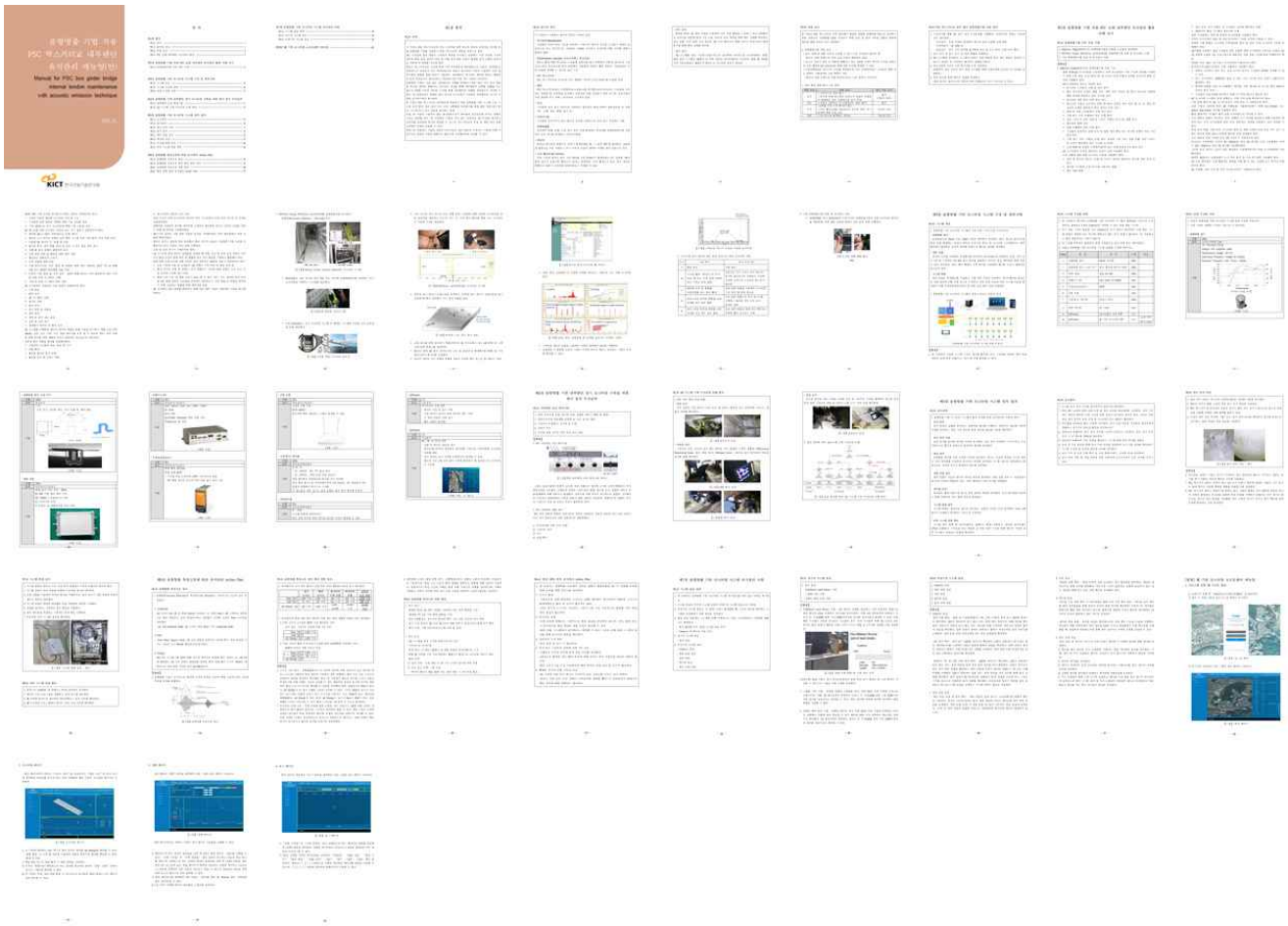


그림 193 PSC 내부 텐던 유지 관리 매뉴얼

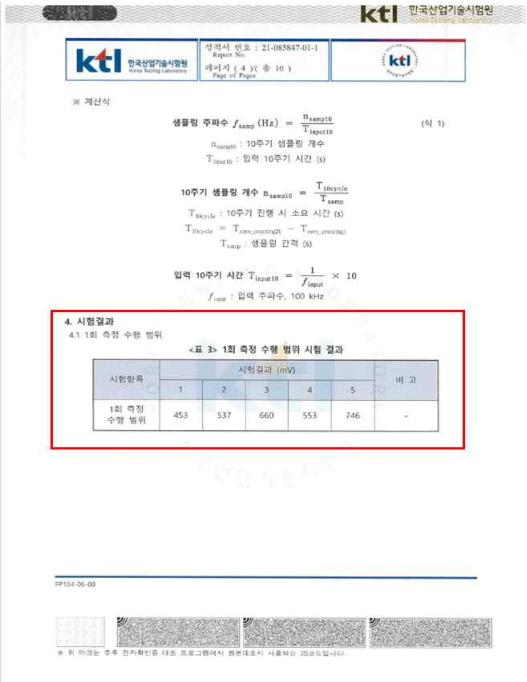
(2) 정량적 연구개발성과

A. PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발

A-1. PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비

① 1회 측정 수행범위

- 목표치 : 반경 5m
- 달성치 : 반경 5m
- 검증방법 : 공인기관 성적서, [증빙1] 참조



4. 시험결과

4.1 1회 측정 수행 범위

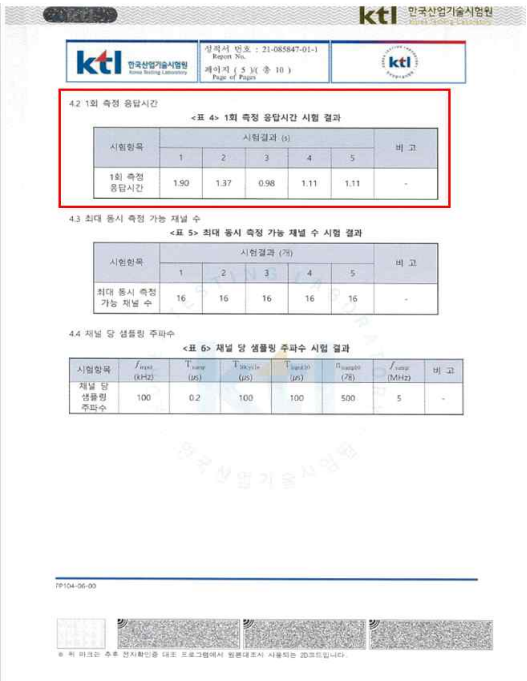
<표 3> 1회 측정 수행 범위 시험 결과

시험항목	시험결과 (mV)					비 고
	1	2	3	4	5	
1회 측정 수행 범위	453	537	660	553	746	-

그림 194 공인기관 성적서 - 성능시험

② 1회 측정 응답시간

- 목표치 : 1분 이내
- 달성치 : 1분 이내
- 검증방법 : 공인기관 성적서, [증빙1] 참조



4.2 1회 측정 응답시간

<표 4> 1회 측정 응답시간 시험 결과

시험항목	시험결과 (s)					비 고
	1	2	3	4	5	
1회 측정 응답시간	1.90	1.37	0.98	1.11	1.11	-

4.3 최대 동시 측정 가능 채널 수

<표 5> 최대 동시 측정 가능 채널 수 시험 결과

시험항목	시험결과 (개)					비 고
	1	2	3	4	5	
최대 동시 측정 가능 채널 수	16	16	16	16	16	-

4.4 채널 당 샘플링 주파수

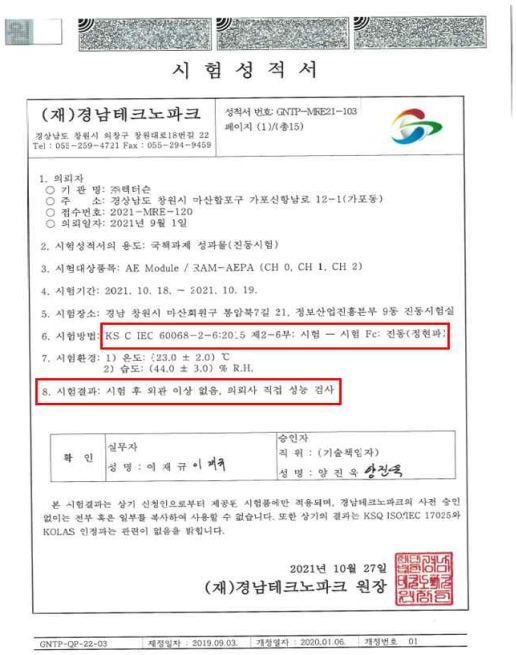
<표 6> 채널 당 샘플링 주파수 시험 결과

시험항목	f_{input} (kHz)	T_{samp} (μs)	$T_{10cycle}$ (μs)	$T_{input10}$ (μs)	n_{samp10} (개)	f_{samp} (MHz)	비 고
채널 당 샘플링 주파수	100	0.2	100	100	500	5	-

그림 195 공인기관 성적서 - 성능시험

③ 진동 내구성

- 목표치 : IEC-60068-2 조건 만족
- 달성치 : IEC-60068-2 조건 만족
- 검증방법 : 공인기관 성적서, [증빙2] 참조



시 험 성 적 서

(재)경남테크노파크

경상남도 창원시 의창구 창원대로18번길 22
Tel : 055-259-4721 Fax : 055-294-9459

성적서 번호: GNTP-MRE21-103
페이지 (1)/(총15)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: 주)택터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MRE-120
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 국책과제 성과물(진동시험)

3. 시험대상품목: AE Module / XAM-AEPA (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 10. 18. ~ 2021. 10. 19.

5. 시험장소: 경남 창원시 마산회원구 봉암북7길 21, 정보산업진흥본부 9동 진동시험실

6. 시험방법: KS C IEC 60068-2-6:20_5 제2-6부: 시험 — 시험 Fc: 진동(정현파)

7. 시험환경: 1) 온도: (23.0 ± 2.0) ℃
2) 습도: (44.0 ± 3.0) % R.H.

8. 시험결과: 시험 후 외관 이상 없음, 의뢰사 직접 성능 검사

확 인	실무자 성 명 : 이 재 규 이재규	승인자 직 위 : (기술책임자) 성 명 : 양 진 욱 양진욱

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 10월 27일
(재)경남테크노파크 원장

GNTP-QP-22-03 | 제정일자 : 2019.09.03. | 개정일자 : 2020.01.06. | 개정번호 : 01

그림 196 공인기관 성적서 - 내환경시험 성적서

A-2. PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 분석용 S/W

① 텐던 손상 여부 검출 신뢰도

- 목표치 : 90% 이상
- 달성치 : 100%
- 검증방법 : 블라인드 테스트 결과, [증빙6] 참조

결함별 검출 신호 기반 위치추정 결과 및 실측 결과 비교분석 (단위:㎜)

결함 분류	계측			실측			오차					허용 범위 (센서 간 최대거리의 10%)	
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	오차율	Y	오차율	Z	X	Y
공극1	7062	150	200	7150	150	220	-88	-1.00%	0	-	0	876	-
균열	5487	150	200	4980	150	180	507	5.79%	0	-	0	876	-
공극2	2484	150	200	2520	150	220	-36	-0.41%	0	-	0	876	-
부식1	2301	175	200	2490	160	200	-189	-2.16%	15	0.71%	0	210	210
부식2	2376	202	200	2550	175	200	-174	-1.99%	27	1.29%	0	210	210
기계적1	2401	238	200	2450	210	200	-49	-0.56%	28	1.33%	0	210	210
기계적2	2386	192	200	2580	170	200	-194	-2.21%	22	1.05%	0	210	210
기계적3	2401	189	200	2590	165	200	-189	-2.16%	24	1.14%	0	210	210
기계적4	2259	192	200	2400	175	200	-141	-1.61%	17	0.81%	0	210	210

- 9개의 결함에 대한 검출은 100% 확인.
- 9개 결함 중 위치추정 결과가 모두 오차범위(센서 간 최대거리의 10%)를 만족함.
- 모든 결함의 위치추정이 오차범위 이내이므로, 모든 결함을 검출하였다고 판단
  검출 신뢰도 = 100% 확인 (블라인드 테스트, 테스트베드 기준)

② 음향방출 특징추출 알고리즘

- 목표치 : 특징변수 10개 이상
- 달성치 : 특징변수 15개
- 검증방법 : 소프트웨어 보고서 출력 기능 확인, [증빙7] 참조

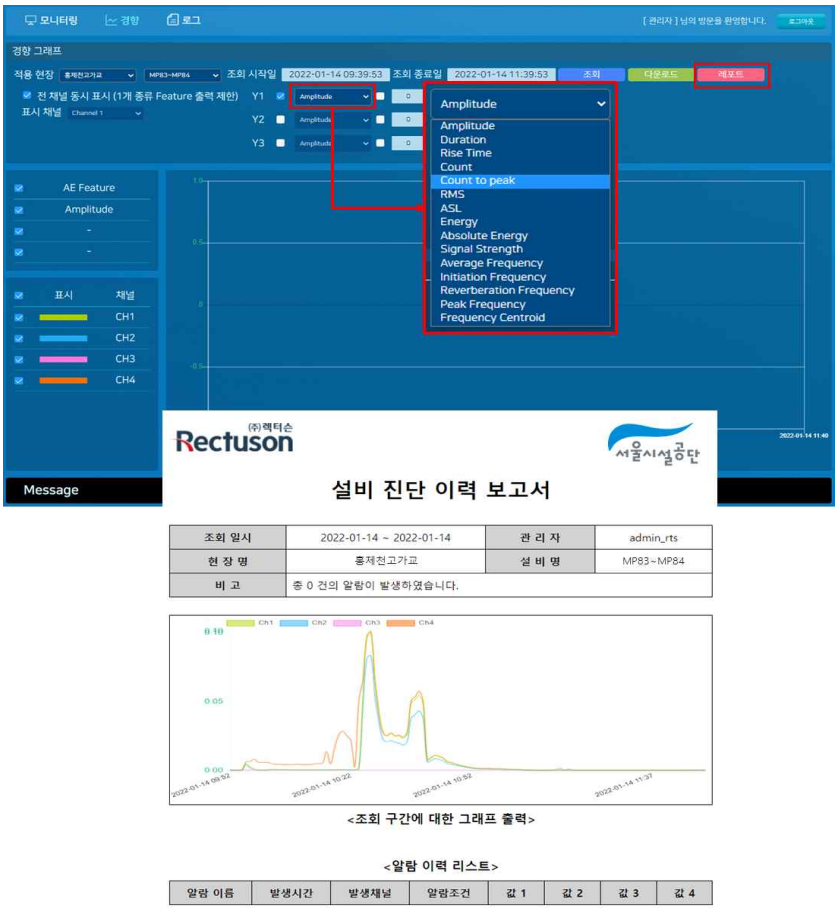


그림 197 소프트웨어 보고서 출력 기능

A-3. PSC 거더교 내부 텐던 검사 절차서

① 검사 절차 적정성 평가

- 목표치 : 검토 결과 적정함
- 달성치 : 검토 결과 적정함
- 검증방법 : 유지관리 보고서[증빙8] 내용 포함. 건설기술연구원 검토 결과 “적절함”

② 내부 텐던 검사 필요 인원

- 목표치 : 2명
- 달성치 : 2명
- 검증방법 : 유지관리 보고서[증빙8-1] 내용

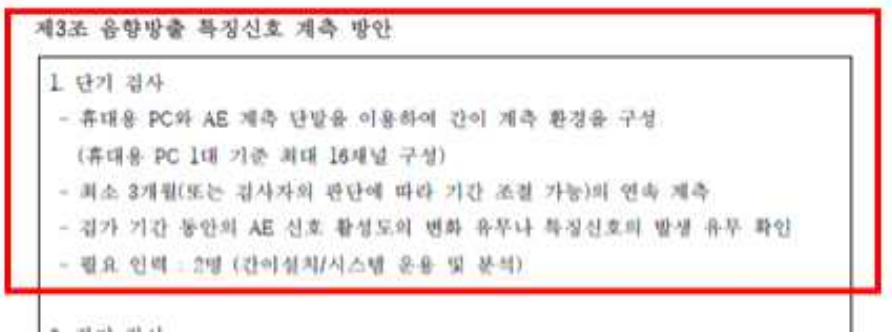


그림 198 내부 텐던 검사 필요 인원 - 유지관리 매뉴얼 발췌

B. PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축

B-1. PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템

① 측정 단말기 당 최대 측정 가능 채널 수

- 목표치 : 16채널
- 달성치 : 16채널

② 채널 당 샘플링 주파수

- 목표치 : 5MHz 이상
- 달성치 : 5MHz 이상

B-2. PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 S/W

※ 검사 장비와 모니터링 시스템은 동일한 소프트웨어와 동일한 계측 단말을 사용하나, 실제 시스템 구성의 차이(게이트웨이 및 웹 서버 활용 유무)가 있을 뿐이므로 동일한 테스트 결과로 이를 증빙함.

① 텐던 손상 여부 검출 신뢰도

- 목표치 : 90% 이상
- 달성치 : 100%
- 검증방법 : 블라인드 테스트 결과, [증빙6] 참조

② 텐던 손상 위치 검출 알고리즘

- 목표치 : 최대 측정 거리 10% 이내
- 달성치 : 최대 5.79%
- 검증방법 : 블라인드 테스트 결과, [증빙6] 참조

③ PSC 거더교 이상상태 분류 및 진단 알고리즘

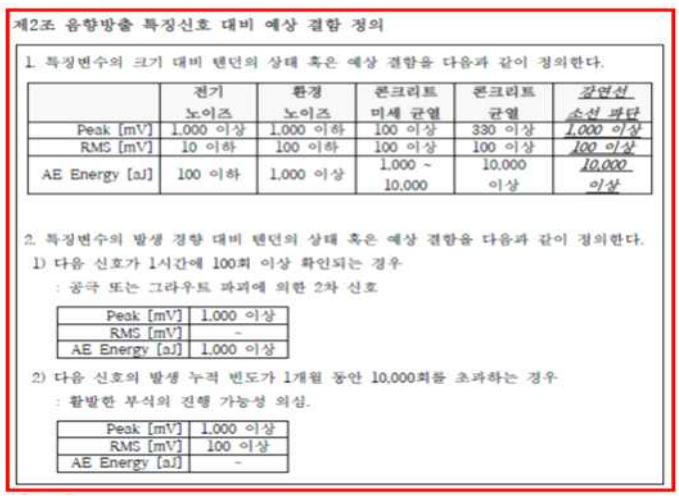
- 목표치 : 특징변수 10개 이상
- 달성치 : 특징변수 15개
- 검증방법 : 소프트웨어 보고서 출력 기능 확인, [증빙7] 참조

C. PSC 거더교 내부 텐던 진단 데이터베이스 구축

C-1. PSC 거더교 내부 텐던 진단 데이터베이스 구축

① 불량사례 분류에 따른 음향방출 데이터 특징 구분

- 목표치 : 특징변수 5개 이상
- 달성치 : 결함별 신호 특징 5개 식별 및 신호 활동도에 의한 진단 기준 2가지
- 검증방법 : 유지관리 보고서[증빙8-2] 내용



제2조 음향방출 특징신호 대비 예상 결함 정의

1. 특징변수의 크기 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

	전기 노이즈	환경 노이즈	콘크리트 미세 균열	콘크리트 균열	강연선 손선 파단
Peak [mV]	1,000 이상	1,000 이하	100 이상	330 이상	1,000 이상
RMS [mV]	10 이하	100 이하	100 이상	100 이상	100 이상
AE Energy [aJ]	100 이하	1,000 이상	1,000 ~ 10,000	10,000 이상	10,000 이상

2. 특징변수의 발생 경향 대비 텐던의 상태 혹은 예상 결함을 다음과 같이 정의한다.

1) 다음 신호가 1시간에 100회 이상 확인되는 경우

: 공극 또는 그라우트 파괴에 의한 2차 신호

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	-
AE Energy [aJ]	1,000 이상

2) 다음 신호의 발생 누적 빈도가 1개월 동안 10,000회를 초과하는 경우

: 활발한 부식의 진행 가능성 의심.

Peak [mV]	1,000 이상
RMS [mV]	100 이상
AE Energy [aJ]	-

그림 199 결함 별 신호 특징 분류 기준 - 유지관리 매뉴얼 발췌

② 현장 실증 데이터 누적 기간
- 목표치 : 3개월 이상
- 달성치 : 3개월 이상 데이터 계측
- 검증방법 : 현장 실증 결과 보고서[증빙9]

D. 진단 결과에 따른 유지관리 매뉴얼 개발 - 건기연 작성
D-1. 유지관리 우선순위 및 절차 매뉴얼
① 기존 방식 대비 점검 효율성 및 경제성
- 목표치 : 30% 이상 절감
- 달성치 : 30.1% 달성
- 검증방법 : 경제성(LOC) 분석 보고서[증빙10]

※ 경제성(LCC) 분석 결과(보다 자세한 내용은 보고서 원본[증빙10] 참조)

ㅇ 생애주기 최적화 경제성 분석은 아래와 같은 특징을 갖게되며 분석 결과, 연구안이 더 경제적인 것으로 나타남

구분			기존안	연구안	특징	경제성요인
직접비	초기공사비		-	+센서설치비	비용증대	-
	유지관리비용	점검	정밀안전점검 2년에 1회 정밀안전진단 4년에 1회	정밀안전점검 2년에 1회 정밀안전진단 5년에 1회	센서설치로 인한 상태등급 향상으로 점검횟수 감소	+
		보수	-	C → B 반복	손상예측 가능하여 보수 가능	-
		보강	D → B 반복	-	손상예측 불가하여 보강 수행	+
		교체	-	센서교체 필요	15년 주기	-
	해체폐기비용		-	-	동일	
간접비	도로이용자비용		보강 수행	-	보강 수행 시, 통행제한 발생	+

ㅇ 공법 최적화 경제성 분석은 타 공법과 비교하여 분석하였으며 연구안이 더 경제적인 것으로 분석됨

ㅇ 생애주기 최적화 LCC 분석 결과, 기존안 대비 연구안이 7.6% 비용 절감이 되며, 공법 최적화 LCC 분석은 기존안 대비 연구안이 30.1% 비용 절감되는 것으로 나타남

ㅇ 2가지 방법 모두 연구안을 적용하는 것이 경제적인 것으로 분석됨

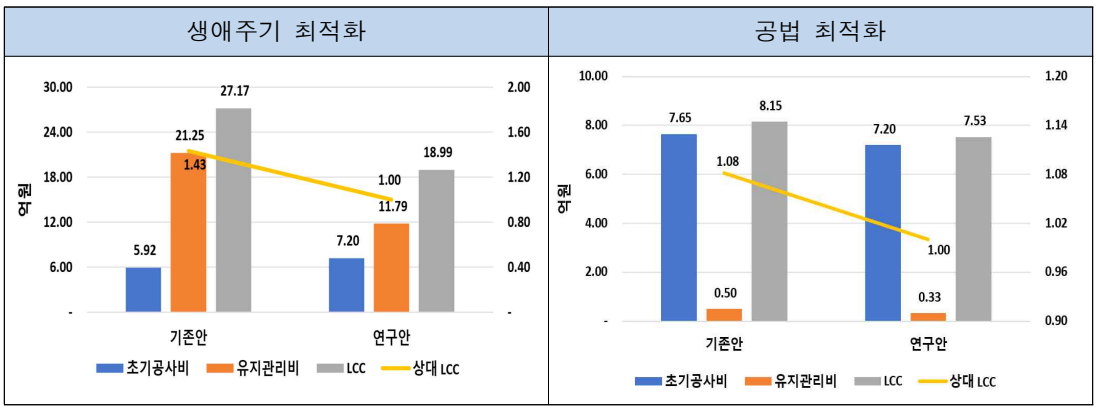


그림 200 공법 최적화 LOC 분석 결과

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	음향방출 기술을 이용한 PSC 거더교 텐던의 건전성 평가기술	비파괴검사 학회지	김동현	Vol. 39, No. 1: 37-44	대한민국	한국 비파괴 검사학회	비SCI	19년 12월	1225-7842	100%
2	음향방출 기술을 이용한 PSC 구조물 내부 텐던의 파괴거동 연구	비파괴검사 학회지	김동현	Vol. 39, No. 6: 362-368	대한민국	한국 비파괴 검사학회	비SCI	19년 12월	1225-7842	100%
3	음향방출 기술을 이용한 PSC 거더교 안전진단 및 평가기술	비파괴검사 학회지	김동현	Vol. 41, No. 1: 25-38	대한민국	한국 비파괴 검사학회	비SCI	20년 12월	1225-7842	100%
4	음향방출 기법을 이용한 PSC 거더교 그라우팅 공극 신호 분석 및 진단 기술	비파괴검사 학회지	서동우	Vol. 41 No. 6: 374-381	대한민국	한국 비파괴 검사학회	비SCI	21년 12월	1225-7842	100%
5	음향방출 기법을 이용한 PSC 구조물 내부텐던 부식 모니터링 및 진단 기술	비파괴검사 학회지	김동현	Vol. 41, No. 6: 382-390	대한민국	한국 비파괴 검사학회	비SCI	21년 12월	1225-7842	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국비파괴검사학회 춘계학술대회	음향방출 기술을 이용한 PSC 거더교 구조물 안전진단 기술개발	김동현	19.05.24	창원	대한민국
2	9th Internal Conference on Acoustic Emission & 61th Acoustic Emission Working Group Meeting	Development of structure health monitoring technology for internal tendon of PSC bridge using acoustic emission technology	김동현	19.06.19	시카고	미국
3	2020 한국 구조물유지관리공학회 하계 학술발표회 및 포럼	음향발출 기법을 이용한 내부 텐던 손상 탐지	정규산	20.07.07	제주	대한민국
4	2020 한국비파괴검사학회 추계학술대회	음향방출 기술을 이용한 PSC 거더교 내부텐던 파괴거동 특성분석	김동현	20.11.05	서울	대한민국
5	2021 대한토목학회 정기학술발표회	PSC 구조물 내부 텐던 손상 음향방출 신호 분석 연구	김재환	21.10.21	광주	대한민국
6	2021 한국비파괴검사학회 추계학술대회	음향방출 기술을 이용한 PSC 구조물 내부텐던 강연선 부식 모니터링 및 진단 기술	김동현	21.10.29	여수	대한민국
7	2021 한국 구조물유지관리공학회 추계학술발표회 및 포럼	음향방출 기법 적용 PSC 박스거더교 내부텐던 손상 모니터링 시스템 현장 적용 및 성능 검증	서동우	21.11.18	제주	대한민국

□ 기술 요약 정보

해당사항 없음

□ 보고서 원문

해당사항 없음

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

해당사항 없음

[기술적 성과]

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

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	노이즈 환경을 고려한 구조물 결함 탐지 장치 및 방법	대한민국	㈜렉터슨	20.12.28	10-2020-0185130	-	-	-	100%	O
2	특허	음향방출을 이용한 구조물 결함 진단용 검사장치	대한민국	㈜렉터슨	20.12.28	10-2020-0185134	-	-	-	100%	O
3	특허	전기 비저항에 따른 콘크리트 건전도 평가용 철근 간격재 및 이를 이용한 콘크리트 건전도 평가 방법	대한민국	한국건설기술연구원	20.12.02	10-2020-0166233	-	-	-	100%	O

ㅇ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1	-	O	O	-	-	-	-	-	-	-	-
2	O	-	O	-	-	-	-	-	-	-	-

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

해당사항 없음

□ 신기술 지정

해당사항 없음

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		
1	방송통신기자재등의 적합등록 필증	국립전파연구원	KC	R-R-rTS-AE-100	21.11.18	대한민국

□ 표준화

ㅇ 국내표준

해당사항 없음

ㅇ 국제표준

해당사항 없음

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

□ 기술 실시(이전)

해당사항 없음

□ 사업화 투자실적

해당사항 없음

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	공공기관 용역 수주	AE 모니터링 시스템 구축	국내	광주국토 관내 상시계측시스템 고도화 용역	비탈사면 붕괴 감시를 위한 AE 모니터링 시스템 구축	광주국토 사무소	5.52억원	-	19.12.26 ~21.03.19	-
2	연구기관 용역 수주	AE 모니터링 시스템 구축	국내	케이블 손상 자동 모니터링을 위한 음향방출 시스템 구축	케이블 이탈 사고 및 손상 유무 진단을 위한 AE 모니터링 시스템 구축	한국건설기술연구원	0.41억원	-	20.08.13 ~20.11.12	-
3	사기업 시스템 납품	AE 모니터링 시스템 구축	국내	HCR공정 실시간 균열 감지 AE 비파괴검사 System 설치	HCR 설비 이상 및 구조물 균열 감시를 위한 AE 모니터링 시스템 구축	GS칼텍스	2.78억원	-	19.08.12 ~21.03.31	-

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
4	지자체 산하 공공기관 용역 수주	AE 모니터링 시스템 구축	국내	PSC박스거더교 내부텐던 유지관리 개선 용역	PSC박스 거더교 내부텐던 유지관리 개선 및 AE 모니터링 시스템 구축	서울시설관리공단	8.14억원	-	20.08.19. ~21.03.31.	-
5	지자체 산하 공공기관 용역 수주	AE 모니터링 시스템 구축	국내	PSC박스거더교 내부텐던 손상 모니터링을 위한 음향방출 시스템 구축 및 데이터 분석	PSC박스 거더교 내부텐던 손상 AE 모니터링 시스템 구축	서울시설관리공단	0.92억원	-	21.12.10. ~22.01.06.	-

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

해당사항 없음

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

해당사항 없음

□ 경제적 파급 효과

해당사항 없음

□ **산업 지원(기술지도)**

해당사항 없음

□ **기술 무역**

해당사항 없음

[사회적 성과]

□ **법령 반영**

해당사항 없음

□ **정책활용 내용**

해당사항 없음

□ **설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영**

해당사항 없음

□ **신진연구자 채용**

해당사항 없음

□ **전문 연구 인력 양성**

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	S/W 개발(신규채용)	2019	-	-	1	-	1	-	-	-	1	-	-
2	신호분석(신규채용)	2020	-	-	1	-	1	-	-	-	1	-	-
3	신호분석(신규채용)	2021	-	1	1	-	2	-	-	-	2	-	-

□ **산업 기술 인력 양성**

해당사항 없음

□ **다른 국가연구개발사업에의 활용**

해당사항 없음

□ **국제화 협력성과**

해당사항 없음

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	인터넷 언론	고양일보	건설연 기술 개발 “소리로 교량 노후화 진단한다”	2019-11-29
2	인터넷 언론	건설경제	‘소리’로 노후 교량 찾아낸다	2019-11-29
3	인터넷 언론	내일신문	"소리로 교량 노후화 진단한다"	2019-11-29
4	인터넷 언론	전자신문	건기연, 소리로 교량 노후화 진단하는 원천기술 국산화	2019-11-29
5	인터넷 언론	국토경제신문	소리로 콘크리트 시설물 안전진단한다	2019-11-29
6	인터넷 언론	국토매일	건설연 “소리로 교량 노후화 진단한다”...원천기술 국산화	2019-11-29
7	인터넷 언론	녹색경제	[과학을 품다] 소리로 콘크리트 시설물 안전 진단한다	2019-11-29
8	인터넷 언론	대덕넷(헬로디디)	'소리로 시설물 노후화 진단' 원천기술 개발	2019-11-29
9	인터넷 언론	동아사이언스	노후 교량·건축물 소리로 진단한다	2019-11-30
10	인터넷 언론	세이프투데이	건설연 “소리로 교량 노후화 진단한다”	2019-11-29
11	인터넷 언론	신아일보	음향방출 이용 콘크리트 시설물 안전진단기술 '국산화'	2019-11-29
12	인터넷 언론	아이뉴스24	교량 노후화, 소리로 진단한다…건설연, 서울시설물에 시범적용	2019-11-29
13	인터넷 언론	중앙뉴스	건설연, 소리로 교량 노후화 진단한다…원천기술 국산화	2019-11-29
14	인터넷 언론	투데이코리아	건설연, '음향방출(AE)' 응용 콘크리트 시설물...원천기술 개발	2019-11-29
15	인터넷 언론	한국정보통신신문	"소리로 교량 노후화 진단"	2019-12-02
16	인터넷 언론	와이어드코리아(Wired Korea)	소리로 교량 안전 지킨다… 음향 진단기술 국산화	2019-11-29
17	인터넷 언론	스마트경제	건설연 “소리로 교량 노후화 진단한다”… 원천기술 국산화	2019-11-29
18	인터넷 언론	기계설비신문	건설연, 음향방출 응용 콘크리트 시설물 상시 모니터링 기술 개발	2019-11-29
19	인터넷 언론	엔지니어링데일리	건설연, "소리로 교량 노후화 진단한다"…원천기술 국산화	2019-11-29
20	인터넷 언론	건설산업신문	건설연, 소리로 교량 노후화 진단하는 기술 개발	2019-12-03
21	인터넷 언론	매일일보	건설연, 소리로 교량 노후화 진단…원천기술 국산화	2019-11-29
22	인터넷 언론	국토일보	건설연, 소리로 교량 노후화 진단한다… 원천기술 국산화 ‘쾌거’	2019-11-29
23	인터넷 언론	환경과조경	콘크리트 시설물 파손 위험도 ‘음파’로 미리 감지	2019-12-01

□ 포상 및 수상 실적

해당사항 없음

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

해당사항 없음

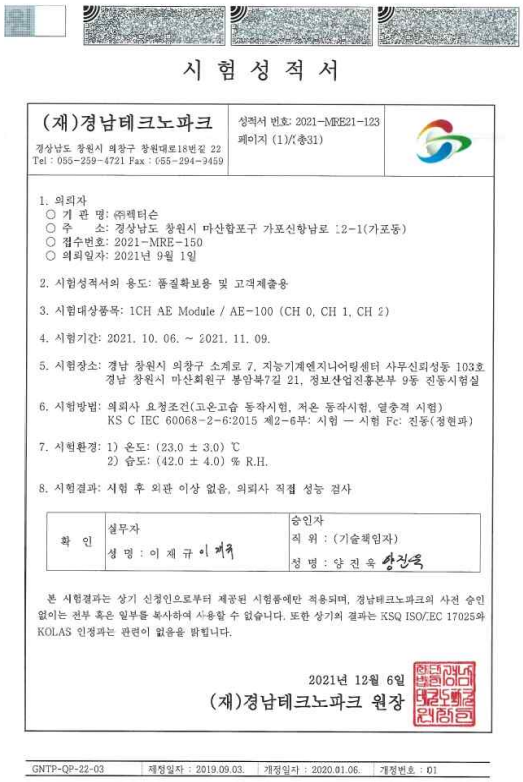
[그 밖의 성과](해당 시 작성)

해당사항 없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○ 제품 품질시험 (온도 시험, 전원 내구성)

- 옥외 설치 제품이므로 진동 내구성 외 내환경성과 정전에 의한 전원 내구성에 대한 품질시험을 추가로 실시하고 성적을 득하였음.
- 온도 시험 : [증빙3] 참조



시 험 성 적 서

(재)경남테크노파크
경상남도 창원시 의창구 창원대로18번길 22
Tel : 055-259-4721 Fax : 055-294-9459

성적서 번호: 2021-MRE21-123
페이지 (1)/(총31)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: ㈜넥터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MRE-150
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 품질확보용 및 고객제출용

3. 시험대상품목: 1CH AE Module / AE-100 (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 10. 06. ~ 2021. 11. 09.

5. 시험장소: 경남 창원시 의창구 소계로 7, 지능기계엔지니어링센터 사무신뢰성동 103호
경남 창원시 마산회원구 봉암북7길 21, 정보산업진흥본부 9동 진동시험실

6. 시험방법: 의뢰사 요청조건(고온고습 동작시험, 저온 동작시험, 열충격 시험)
KS C IEC 60068-2-6:2015 제2-6부: 시험 — 시험 Fc: 진동(정현파)

7. 시험환경: 1) 온도: (23.0 ± 3.0) ℃
2) 습도: (42.0 ± 4.0) % R.H.

8. 시험결과: 시험 후 외관 이상 없음, 의뢰사 적절 성능 검사

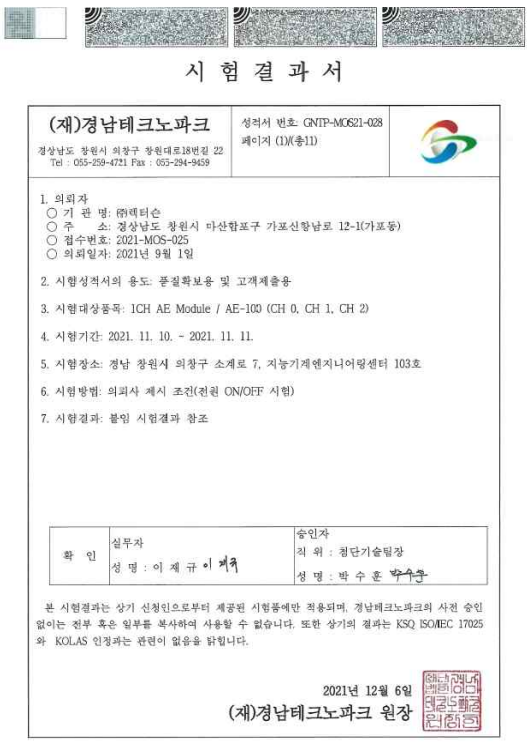
확 인	실무자	승인자
	성 명 : 이 제 규 이제규	직 위 : (기술책임자) 성 명 : 양 진 욱 양진욱

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 12월 6일
(재)경남테크노파크 원장

GNTP-QP-22-03 | 제정일자 : 2019.09.03. | 개정일자 : 2020.01.06. | 개정번호 : 01

- 전원 내구성 : [증빙4] 참조



시 험 결 과 서

(재)경남테크노파크
경상남도 창원시 의창구 창원대로18번길 22
Tel : 055-259-4721 Fax : 055-294-9459

성적서 번호: GNTP-MOS21-028
페이지 (1)/(총11)

1. 의뢰자
○ 기 관 명: ㈜넥터슨
○ 주 소: 경상남도 창원시 마산합포구 가포신항남로 12-1(가포동)
○ 접수번호: 2021-MOS-025
○ 의뢰일자: 2021년 9월 1일

2. 시험성적서의 용도: 품질확보용 및 고객제출용

3. 시험대상품목: 1CH AE Module / AE-100 (CH 0, CH 1, CH 2)

4. 시험기간: 2021. 11. 10. ~ 2021. 11. 11.

5. 시험장소: 경남 창원시 의창구 소계로 7, 지능기계엔지니어링센터 103호

6. 시험방법: 의뢰사 제시 조건(전원 ON/OFF 시험)

7. 시험결과: 붙임 시험결과 참조

확 인	실무자	승인자
	성 명 : 이 제 규 이제규	직 위 : 첨단기술팀장 성 명 : 박 수 훈 박수훈

본 시험결과는 상기 신청인으로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 경남테크노파크의 사전 승인 없이는 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다. 또한 상기의 결과는 KSQ ISO/IEC 17025와 KOLAS 인정과는 관련이 없음을 밝힙니다.

2021년 12월 6일
(재)경남테크노파크 원장

○ 제품 인증 (KC) : [증빙5] 참조

- 계측 단말기는 주변 전기 노이즈에 민감한 전자 장비이므로 전자파 영향성에 대한 인증 취득
- 국내 고객의 수요 조사를 통해 KC 인증을 취득하였음



BE40-5C2B-89D6-160B

방송통신기자재등의 적합등록 필증

Registration of Broadcasting and Communication Equipments

상호 또는 성명 Trade Name or Registrant	㈜벡터슨
기자재명칭(제품명칭) Equipment Name	데이터 수집 및 분석시스템(1채널 AE 모듈)
기기부호/추가 기기부호 Equipment code /Additional Equipment code	IMI61
기본모델명 Basic Model Number	AE-100
파생모델명 Series Model Number	
등록번호 Registration No.	R-R-rTS-AE-100
제조자/제조국가 Manufacturer/Country of Origin	㈜벡터슨 / 한국
등록연월일 Date of Registration	2021-11-18
기타 Others	

위 기자재는 「전파법」 제58조의2 제3항에 따라 등록되었음을 증명합니다.

It is verified that foregoing equipment has been registered under the Clause 3, Article 58-2 of Radio Waves Act.

2021년(Year) 11월(Month) 19일(Day)

국립전파연구원장 국립전파연구원장인

Director General of National Radio Research Agency

※ 적합등록 방송통신기자재는 반드시 "적합성평가표시" 를 부착하여 유통하여야 합니다.
위반시 과태료 처분 및 증족이 취소될 수 있습니다.

2) 목표 달성 수준

연 구 개 발 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발 - PSC 거더교 상태 진단 기준 수립 - PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가 - PSC 박스거더교 내부 텐던 유지관리 매뉴얼 개발	○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 및 진단 기술 개발 - PSC 거더교 상태 진단 기준 수립 (유지관리 매뉴얼 개발, 증빙8) - PSC 거더교 내부 텐던 진단 기술 신뢰성 평가 (블라인드 테스트(증빙6), 외산 장비 비교(본문참조) 내환경시험(증빙2,3,4), 전자파 인증(증빙5)) - PSC 박스거더교 내부 텐던 유지관리 매뉴얼 개발 (유지관리 매뉴얼 개발, 증빙8)	*100%*
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발 - 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발 - 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증	○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발 - 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 검사 장비 개발 (개발 내용 본문 참조) - 음향방출기술 활용 검사 장비 성능 검증 (블라인드 테스트(증빙6), 외산 장비 비교(본문참조) 내환경시험(증빙2,3,4), 전자파 인증(증빙5))	*100%*
○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축 - 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축 - PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축 - 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행	○ 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 실시간 모니터링 시스템 구축 - 음향방출 기반 PSC 거더교 내부 텐던 상시 모니터링 시스템 설계 및 구축 (홍제천고가교 실제 현장 적용, 본문참조) - PSC 거더교 불량 사례에 대한 음향방출진단 DB 구축 (홍제천고가교 실제 현장 적용, 3개월 데이터 확보, 증빙9, 본문참조) - 테스트베드 교량 시범 적용을 통한 상시 모니터링 및 진단 수행 (홍제천고가교 실제 현장 적용, 본문참조)	*100%*

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

○ **특허 등록 1건**
- **출원 후 심사 진행 중**
- 특허 심사 기간이 과제 기간 내 완료되기 현실적으로 어려운 부분이 존재함

2) 자체 보완활동

○ 특허 등록을 위한 적극적 대응
- 심사 결과에 따른 보완 요구사항에 대해 적극적으로 대처
- 해당 분야의 전문연구기관인 한국건설기술연구원와 과제 종료 후에도 긴밀한 협조
- 변리사 사무소를 통해 전문가 자문을 바탕으로 보완 요구에 성실히 대응

○ 특허 등록 불허 시
- 차별성 강화를 통해 재등록 심사 요청
- 현장 실적 등의 축적 데이터 추가 활용

3) 연구개발 과정의 성실성

○ **총 3건의 특허 출원**
- 과제 내용에 있어서 성실히 연구를 수행하였으며, 차별화된 연구 내용에 대해 총 3건의 특허를 출원
- 현재 모두 심사 중이며, 행정 절차상의 시간 소요는 본 과제 참여자들의 역량 밖의 문제
- 출원 특허와 관련한 기술을 실제 현장에 적용하거나, 제품화에 성공하였음

○ **유관 현장 1개소 시범 설치 및 장기 모니터링 적용**
- 서울시 내부순환로, 홍제천고가교에 8월부터 12월까지 약 4개월 간의 시범 설치 수행
- 홍제천고가교의 AE 시스템 적용 우선 순위를 결정하고, 12월에 장기 모니터링(반영구) 시스템을 도입

○ **음향방출 관련 기술의 해외 장비 대체 등 실질적 기술 성과 달성**
- PSC 교량 외 석유화학 플랜트나 비탈사면, 특수교 케이블 등 음향방출 기술을 이용한 구조물 진단 시스템에 기존의 해외 장비 대신 개발품을 적용하였음
- 이로 인한 수입 대체 효과가 클 뿐 아니라 자체적인 플랫폼 개발로 더욱 현장에 최적화된 엔지니어링 서비스를 제공할 수 있게 됨.

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

가. 기술적 기대효과

○ PSC 구조물 내부 텐던 상태평가 기술 분야에서 세계적으로 공인된 기술이 부재한 상태에서 텐던의 파단 여부를 신속하고 정확하게 판단하여 관리자에게 실시간 정보 제공이 가능한 시스템을 개발하여 PSC 구조물뿐만 아니라 노후 인프라 유지관리 전반에 활용 가능할 것으로 기대됨.

○ 또한, 통일시대를 대비하여 노후 시설물의 안전 상태를 신속히 평가할 수 있는 시스템 개발이 시급한 상황이며 그 활용 가치가 상당할 것으로 예상됨.

○ 시설물 유지관리와 관련하여 다양한 유형의 시설물에 직접적인 점검이 어려워 비파괴 방법을 활용한 점검 기술이 개발되고 있으나 현장에서 활용되고 있는 기술은 극히 제한적인 상황임. 본 연구의 성공적인 결과를 바탕으로 관련 분야의 기술 선도 그룹에 건설연이 한 축을 담당할 수 있을 것으로 기대됨.

나. 사회적 기대효과

○ PSC 구조물 상태평가 기술의 적용으로 구조물 붕괴는 물론 갑작스러운 교량 보수나 교체로 인한 교통 불편 및 간접적 비용 증가 등이 감소하여 국민 삶의 질이 향상될 것으로 기대됨.

○ 현재 상태 중심으로 진행되어 오던 인프라 유지관리기술에 대해 미래를 예측하고 이를 대비함으로써 유지관리비용 절감이 가능하고, 보다 안정적인 인프라 유지관리가 가능하게 되며, 이에 대한 홍보를 통하여 인프라 유지관리 분야 투자와 관련한 사회적 공감대 형성이 가능.

○ 센싱 등의 ICT 기술을 활용하여 공공서비스의 질을 높일 수 있도록 중앙부처, 지자체, 공공기관 및 관련 업체 지원이 가능하며 혁신적인 연구를 통한 국민의 삶의 질을 높이고 사회전반의 효율성을 증진시키는 등의 성과를 창출할 수 있음.

다. 경제적 기대효과

○ 제안된 연구가 성공적으로 완료되면 경제적이고 과학적인 방법을 통한 교량의 유지관리가 가능하여 한정된 유지관리 예산의 효율적인 집행 가능.

○ 연간 PSC 교량의 수주액은 약 2조 원 규모임(건설산업조사보고서). 교량 설계수명을 50년으로 가정하면 연간 교량 사용비용은 400억 원이므로 교량 수명을 1년 연장 시 400억 원의 국가 예산 절감 효과가 있음.

○ 국내 대형 SOC 시설물의 노후화가 가속화됨에 따라(2030년 이후 30년 이상 시설물이 전체 시설물의 약 37% 예상) 효율적 유지관리를 통한 국가 예산 절감 효과가 있음.

○ 국내뿐만 아니라 OECD 국가 기준 연간 300조 시장을 형성하고 있는 인프라시설물 유지관리시장 진출을 기대할 수 있음.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 구조물 진단, 계측, 유지관리 기업 및 유지관리 주체 등에 기술을 이전하여 PSC 구조물의 안전점검 및 유지관리에 활용할 계획이며, 현재 서울시설공단에서는 음향방출 기법을 적용하여 서울시 소재 PSC 교량 텐던의 손상상태를 평가를 위한 AE 기법 도입을 검토 중에 있음.

○ 텐던의 상태평가에 대한 원천기술의 확보 및 응용기술 개발력을 확보하여 PSC 교량뿐만 아니라 좀 더 구조적 시스템이 복잡한 특수교(현수교, 사장교 등)의 케이블 시스템 및 부속 시설물(정착구, 행어 밴드 등)의 손상 검출 등으로 확대 적용할 계획임.

○ 향후 국내 교량관리 주체/기업의 관련 분야 국내외시장 진출 시 모니터링 시스템(H/W 및 S/W 포함)뿐만 아니라 데이터 기반 의사결정 지원의 노하우를 획득하여 해외 진출을 적극 시도할 계획임.

○ 매년 주요시설물 유지관리에 연간 약 1조원이 소요되고 있는 실정이며, 첨단 모니터링 기술을 이러한 시설물과 접목함으로써 해 유지관리 비용 최적화 달성.

○ 웹 기반의 모니터링 시스템 개발 보안성 확보를 통해 시스템 신뢰성 확보

- 공공기관에서는 소프트웨어 제품에 대해여 소스코드 등의 보안성 검증을 수행하는 국정원의 암호 모듈 인증이 있음.



그림 201 ETRI 암호모듈 시험 및 검증 절차

- 2015년 1월부터는 모든 공공기관의 전자정부사업중 20억원 시상의 웹 응용프로그램(홈페이지, 소프트웨어 등) 개발, 구축 시에는 시큐어 코딩 적용 여부에 대한 검증을 의무화하고 있음.

- 향후 음향방출 모니터링 시스템의 웹 모니터링 프로그램에 대해서도 이와 같은 보안성 검증을 진행하고자 함.

○ 개발 결과물의 지적재산권 확보를 위한 특허등록 추진

- 현재 본 과제 개발을 통해 출원한 3개의 특허 중 최소 1개 이상 등록을 목표로 함.

- 특허등록 추진을 위해 전문 변리사 사무소와의 연계 및 관련 전문연구기관(건설기술연구원)과의 협력을 이어나감.

7. 참고 문헌

(1) 일본비파괴검사협회 저, ㈜렉터슨 역, **음향방출시험 II**, 도서출판 구미사관, 2010

(2) 서울시설공단 도로시설처, **PSC박스거더교 내부텐던 유지관리개선 용역 1차년도 연차보고서**, 2021

(3) Dong Hyun Kim, Yoon Ki Hong, Dong-Woo Seo, Ki-Tae Park, **Integrity Evaluation Technology of PSC Bridge Tendons Using Acoustic Emission Technique**, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 39, No. 1: 37-44, 2019

(4) Dong Hyun Kim, Yoon Ki Hong, Dong-Woo Seo, Jaehwan Kim, **Fracture Behavior of Internal Tendon in PSC Structure Using Acoustic Emission Technique**, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 39, No. 6: 362-368, 2019

(5) Dong Hyun Kim, Yun Ki Hong, Dong-Woo Seo, Kyu-San Jung, Jaehwan Kim, **Safety Diagnosis and Evaluation Technique for PSC Bridges Using Acoustic Emission Technique**, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 1: 025-038, 2021

(6) Dong-Woo Seo, Kyu-San Jung, Jaehwan Kim, Yun Ki Hong, Tae-Hwan Kim, Dong Hyun Kim, **Technology of Data Analysis and Diagnosis for Grout Void Signal in PSC Girder Bridges using Acoustic Emission Technique**, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 6: 374-381, 2021

(7) Dong Hyun Kim, Yun Ki Hong, Tae-Hwan Kim, Jaehwan Kim, Kyu-San Jung, Dong-Woo Seo, **Corrosion Monitoring and Diagnosis Technology for Internal Steel Tendons in PSC structures using the Acoustic Emission Technique,** Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 41, No. 6: 382-390, 2021

< 별첨 >

※ 2021 성과점검기준표 및 연구개발성과 증빙자료집 참조

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

[뒷면지]

주 의

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

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

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