

Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구

Development of Autonomous Cable Monitoring System
based on Domain Knowledge with Edge Computing

2023. 12.

Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구

Development of Autonomous Cable Monitoring System
based on Domain Knowledge with Edge Computing

2023. 12.

한국건설기술연구원

연구책임자 / 박영수

연구수행자 / 이상윤, 서동우, 민지영, 진승섭

제 출 문

한국건설기술연구원장 귀하

본 보고서를 "Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구" 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023년 12월 29일

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원

연구책임자 : 수석연구원 박영수

참여연구원 : 연구위원 이상윤

수석연구원 서동우

수석연구원 민지영

수석연구원 진승섭

요 약 문

I. 연구제목

Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구

II. 연구목적

본 연구는 특수교 케이블 모니터링 최적 알고리즘을 구현하고, 구현된 알고리즘이 임베디드 된 IoT 센서를 제작하고, 제작된 센서를 실험을 통해 성능을 검증하는 것을 목적으로 수행되었다.

III. 연구의 배경 및 필요성

최근 국내에서는 기존의 노동 집약적 산업에서 장비·기술집약적 산업으로의 변화가 요구되고 있다. 케이블 교량의 주 부재인 케이블의 모니터링은 가속도 데이터를 계측하고, 계측된 가속도 데이터로부터 침투 추출을 결과로부터 장력과 감쇠비를 추정하는 진동법이 활용되어지고 있다. 침투를 추정하는 과정은 인력의 개입을 통해 이루어지기 때문에, 노동 집약적이며, 침투 추출 결과의 객관성 및 신뢰성이 결여되는 문제가 있다. 기존 유선 계측시스템의 단점들이 개선된 IoT 센서 상용 제품들이 존재하지만, 대부분 무선 통신방식으로 단순하게 데이터를 전송하고 장비를 제어하는 기본적인 기능만을 갖춘 센서가 IoT 기반 모니터링 분야에서 통용되고 있는 실정이기 때문에, 효과적인 케이블 모니터링이 가능한 IoT 센서의 개발이 필요하다.

IV. 연구의 내용 및 결과

본 연구에서는 도메인 지식 기반 장력 및 감쇠비 완전 자동 추정 알고리즘, 온라인 학습 기반 센서 이상 신호 자동 알고리즘의 개발을 통해 케이블 모니터링 최적 알고리즘을 구현하였다. 구현된 알고리즘이 구동 가능한 IoT 센서의 설계 및 시작품을 제작하여, 알고리즘을 탑재 후 실내 실험을 통해 검증을 완료하였다. 제작이 완료된 시작품의 현장 적용성과

정확도 검증을 위하여 공용 중인 현수교와 사장교에 각각 2개의 시작품을 현장 적용하였으며, 계측 데이터를 확인하기 위한 Platform을 구축하여, 센서의 상태, 데이터 분석 결과 등을 모니터링을 통해 검증과 개선 사항 도출에 활용하고 있다.

V. 활용방안과 기대효과

본 연구에서는 기존 IoT 계측기술을 적용하기 어려웠던 대용량, 실시간 데이터 처리가 필요한 대상물에 Edge-Computing 기반의 IoT 센서 적용을 통한 최적 계측시스템 구축을 통해 예방적 유지관리를 지원함으로써 안전사고를 사전에 예방하여 사회적 비용 절감이 가능할 것으로 기대한다.

목 차

제1장 서론	1
1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 연구목표 및 내용	3
3. 추진 체계 및 전략	6
제2장 연구개발의 국내외 현황	9
1. 국내 현황	9
2. 국외 현황	14
3. 사업성 분석	18
제3장 연구개발 수행내용 및 결과	21
1. Edge Computing 구현을 위한 알고리즘 최적화 및 검증	21
2. 알고리즘 적용 IoT 계측 센서 설계 및 시제품 제작	31
3. 시제품 현장 적용	39
제4장 결론 및 파급효과	47
1. 결론	47
2. 기술·경제·사회적 파급효과	48
참고문헌	49

표 목 차

표 1.1 연구목표 및 세부 연구목표별 Activity	4
표 2.1 개발 기술 관련 특허 출원 현황	12
표 2.2 상용 IoT 센서(예)	15
표 3.1시작품 부품 상세	31
표 3.2 이순신대교 상세	40
표 3.2 묘도대교 상세	40

그림 목차

그림 1.1 진동법 기반 케이블 장력 추정 기법	2
그림 1.2 Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 개요 ..	3
그림 1.3 연구 추진체계	6
그림 1.4 연구 추진전략	7
그림 2.1 한국판 디지털 뉴딜사업 및 SOC 디지털화 정부사업 추진	9
그림 2.2 리프트오프 테스트(Lift-off Test)	10
그림 2.3 스마트 강연선	10
그림 2.4 MFL	11
그림 2.5 진동법 - 침두 추출 방법과 문제점	11
그림 2.6 해외 케이블교량 시장규모	16
그림 2.7 국내 특수교 준공 및 특수교 센터 예산 현황	18
그림 2.8 '00년 이후 케이블교량 준공/계획 건수의 권역별 비중	18
그림 3.1 케이블 가속도 데이터의 주파수 영역에서의 신호 특징	22
그림 3.2 침두 완전 자동 추출 알고리즘	23
그림 3.3 시간영역에서 추세 제거를 통한 전처리	23
그림 3.4 기저 제거 알고리즘 적용 결과	24
그림 3.5 침두 추출 자동화 성능 검증 결과	26
그림 3.6 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과	27
그림 3.7 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과(잡음으로 인한 왜곡) ..	28
그림 3.8 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과(설정변수에 따른 영향) ..	28
그림 3.9 추계론적 부공간 규명법을 이용한 침두 추출 방법(예)	29
그림 3.10 부정확한 침두 자동 추정 사례	30
그림 3.11 IoT센서 Block Diagram	32
그림 3.12 센서 회로 설계도	33
그림 3.13 PCB 설계(안)	34
그림 3.14 케이스 규격	34
그림 3.15 IP65인증서	35
그림 3.16 IP65 시험 후 시험품 사진	36
그림 3.17 완성된 PCB 보드와 시작품	37
그림 3.18 시작품 검증 결과	37
그림 3.19 알고리즘 Embedded 결과	38
그림 3.20 현장 적용 대상 교량	39
그림 3.21 이순신대교 시작품 설치위치	41

그림 3.22 묘도대교 시작품 설치위치	41
그림 3.23 시작품 현장 적용을 위한 설치	42
그림 3.24 시작품 데이터 확인을 위한 Platform	43
그림 3.25 묘도대교 시작품 검증 결과(Frequency Domain)	44
그림 3.26 시작품 침두 추출 결과	45

제1장

서론

1. 연구 배경 및 필요성

최근, 건설 인력 노령화와 출산을 저하로 인한 노동인력 부족 등 급격한 사회변화에 대한 건설 산업의 선제적 대응이 요구되고 있다. 이러한 대응책 중 하나로 건설 산업 구조 혁신과 고부가가치 산업으로의 육성을 통해, 노동 집약적 산업에서 장비·기술집약적 산업으로의 변화가 필요하다.

특수교의 핵심 부재인 케이블은 다양한 원인으로 장력이 손실이 발생하며, 이러한 손실은 교량 성능에 크게 영향을 주기 때문에, 케이블의 장력과 감쇠비의 효과적인 모니터링 방법이 요구된다. 국토안전관리원의 특수교 관리센터에서 관리 중인 케이블 교량 중 2022년 기준으로 계측에 사용되는 장력계는 260개이며, 대부분 가속도 데이터 기반의 진동법을 통한 장력 추정 방식으로 케이블을 관리하고 있다. 케이블 장력과 감쇠비의 추정을 위한 진동법은 1) 케이블 외부에 가속도계를 설치하여 진동 응답 획득, 2) 진동 응답을 주파수 영역의 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD) 신호변환, 3) PSD 신호로부터 침두 추출, 4) 추출된 침두로부터 장력, 감쇠비를 추정하는 과정을 가지며, 매년 새롭게 측정된 응답에 대해 상기 과정을 반복 수행한다. 진동법에서 가장 중요한 부분은 침두 추출 과정이며, 기존의 침두 추출 과정은 인력의 개입(사전 설정 등)을 통해 수행되어지다 보니 침두 추출의 객관성 및 신뢰성 결여(편향)가 될 수 있으며, 노동집약적이다. 또한 시간의 경과에 따라 그 최적 설정이 변경될 수 있으며, 지속적인 인력 개입이 요구된다.

기존의 유선 계측 시스템은 통신, 전력 케이블의 설치가 필요하기 때문에 계측기 수량과 위치 선정 등에 제약이 따른다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 IoT 기반의 센서가 개발되고 상용화 되었다. 현재 구조물 유지관리 분야에는 상용 IoT 센서들이 존재하지만, 대부분 무선 통신방식으로 단순하게 데이터를 전송하고 장비를 제어하는 기본적인 기능만을 갖춘 센서가 IoT(Internet of Things, 사물인터넷) 기반 모니터링 분야에서 통용되고 있는 실정이다. 최근 Edge Computing을 통해 중앙 클라우드 서버가 아니라 이용자의 단말기 주변(edge)이나 단말기 자체에서 데이터를 처리하는 기술. 데이터 양이 많고 실시간 처리가

필요한 자율주행자동차, 스마트 공장, 사물인터넷(IOT) 등에서 대거 활용되어지고 있다.

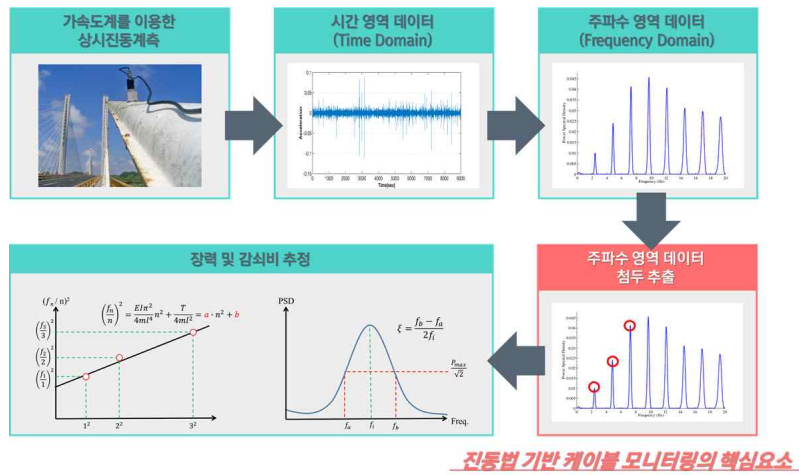


그림 1.1 진동법 기반 케이블 장력 추정 기법

2. 연구목표 및 내용

본 연구는 “자율 케이블 모니터링 시스템 구현”을 위한 최적 Edge-computing 알고리즘 (①센서 이상신호 자동 감지 기법 + ②진동법 기반 케이블 장력, 감쇠비 자동 추정) 개선과 이를 위한 최적 IoT 계측 센서 제작 및 현장 적용을 통한 제품 상용화를 최종 목표로 설정하였다(그림 1.2).

수집되는 데이터의 품질 향상, 사전 설정 없이 케이블 장력 및 감쇠비 자동 추정 알고리즘 기술 등 on-boarding processing이 적용된 시제품 제작하고, 케이블 구조체의 구조 동역학적 배경지식을 통한 자율 모니터링 시스템 구현 및 이를 통한 높은 확장성/신뢰성/효율성 확보한다. 국내 특수교량 관리기관과의 협조를 통한 개발 시제품 시범적용을 통해 현장 적용성과 센서를 검증 및 홍보를 목적으로 한다. 연구의 목적을 달성하기 위한 목표와 세부 목표를 표 1.1과 같이 설정하였다.

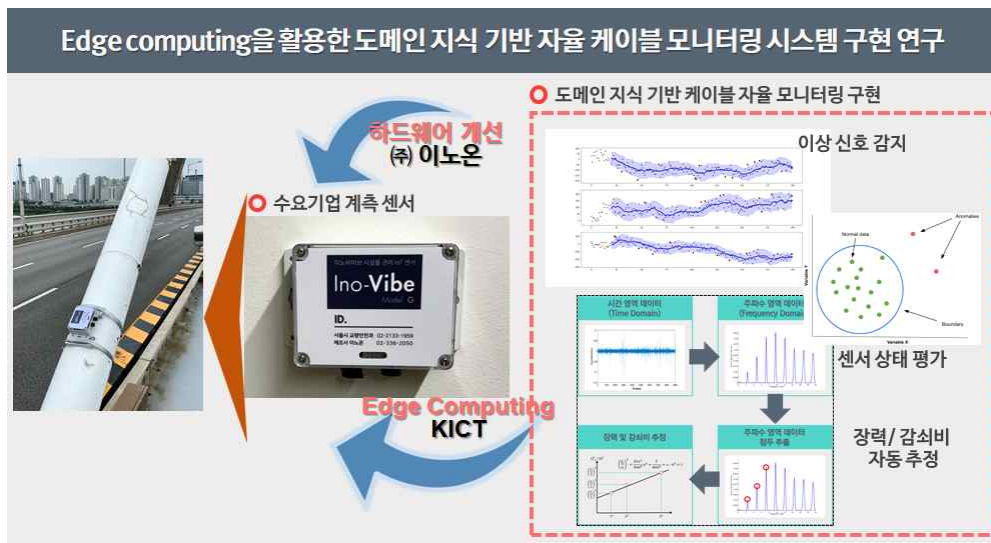


그림 1.2 Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 개요

표 1.1 연구목표 및 세부 연구목표별 Activity

목표	세부 연구목표	세부 연구목표별 Activity
Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현	○ 케이블 모니터링 최적 알고리즘 구현	- 도메인 지식 기반 장력, 감쇠비 완전 자동 추정 알고리즘 개발 - 온라인 학습 기반 센서 이상신호 자동 감지 알고리즘 개발 - 엣지 컴퓨팅을 위한 알고리즘 고도화(연산 효율화 등) - 알고리즘 검증(특수교 장기계측 DB 활용)
	○ Edge computing 기술이 구현된 IoT 기반 센서 제작	- 알고리즘 적용 IoT 계측 센서 설계 및 시제품 제작 - 시제품과 기존 센서와 정확도 비교 검증 및 고도화
	○ 상용화를 위한 현장 적용	- 현장 적용을 위한 대상 교량 선정 및 협의 - 시제품 현장 적용 및 모니터링

위의 연구개발 목표에 따른 세부 연구목표별 주요 연구내용은 다음과 같다.

(세부 연구목표-1) 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템

- 침두 추출 알고리즘
연구원에서 보유한 알고리즘을 Embedded 가능한 프로그래밍 언어로 변환.
특수교 장기 계측 DB 활용을 통한 알고리즘 검증
- 추정된 침두로부터 장력 및 감쇠비 추정 알고리즘 작성
침두 추출 알고리즘과 동일한 프로그래밍 언어로 장력 및 감쇠비 추정 알고리즘 작성
- 이상신호 자동 감지 알고리즘 작성
추정된 장력과 감쇠비의 정확도 향상 및 활용성을 높이기 위한 이상신호 감지 및 분류 알고리즘 작성
특수교 장기 계측 DB 활용을 통한 이상 신호 사례 분석
- 특수교 유지관리 관리주체 요구사항을 반영한 알고리즘 작성

(세부 연구목표-2) - Edge Computing이 적용된 IoT 기반 센서

- 알고리즘 적용을 위한 최적 센서 설계 및 제작
케이블 장력 및 감쇠비 완전 자동화가 가능한 센서 시제품 설계 및 시제품 제작
제작 시제품 실내 검증을 통한 계측 정확도 검증
- 개발 시제품 모니터링을 위한 계측 정보 Platform 구축

(세부 연구목표-3) 상용화를 위한 현장 적용

- 시제품 현장 적용
기존 계측 시스템이 설치된 케이블 교량에 제작 시제품 현장 적용성, 정확도 등 검증
- 현장 운영을 통한 개선 사항 도출을 통한 알고리즘, 시제품 고도화

3. 추진 체계 및 전략

3.1. 연구 추진체계

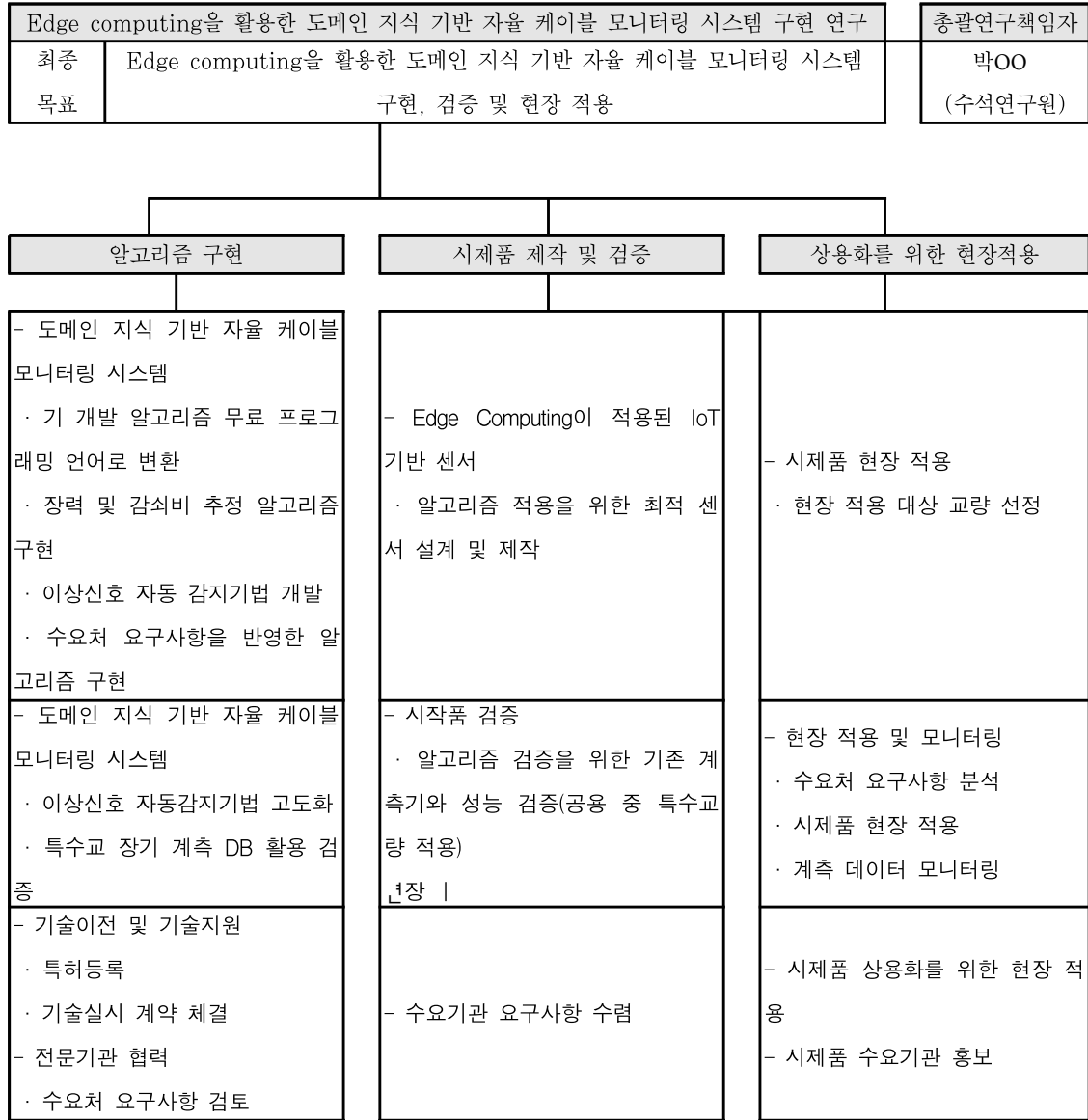


그림 1.3 연구 추진체계

본 연구는 한국건설기술연구원의 구조연구본부에서 알고리즘 작성, 시제품 제작, 현장 적용을 수행하며, 시제품 설계 및 일부 검증은 수요기업에서 수행하였다. 알고리즘 구현, 시제품 제작 및 검증, 상용화를 위한 현장적용의 3개 분야로 구분하여 추진체계를 구성하고, 참여 연구진의 전문성을 고려하여 분야별 주 담당자를 설정하였다.

3.2. 연구 추진전략

본 연구에서는 연구개발 초기인 1차년도 상반기에 케이블 자율 모니터링이 가능한 알고리즘을 작성을 완료하고, 남은 연구기간 동안 사업화기반 확보를 위한 후속 연구를 안정적으로 수행할 수 있도록 계획하였다. 개발된 성과물은 현장 적용을 통해 제품 정확성 검증 및 현장 적용성을 높이기 위한 개선 사항을 도출하여 알고리즘과 제품의 완성도를 높일 수 있도록 계획하였다. 특히, 본 연구과제의 수요기업의 애로사항에 대한 실효성 있는 기술적 지원을 위해 연구 과정에 대한 지원 대상기업의 상시 모니터링 수행하도록 하였다.

한정된 예산의 효과적인 활용을 위해, 사업화에 결정적인 역할을 하는 시제품 제작 및 현장 적용에 예산을 집중하였다.

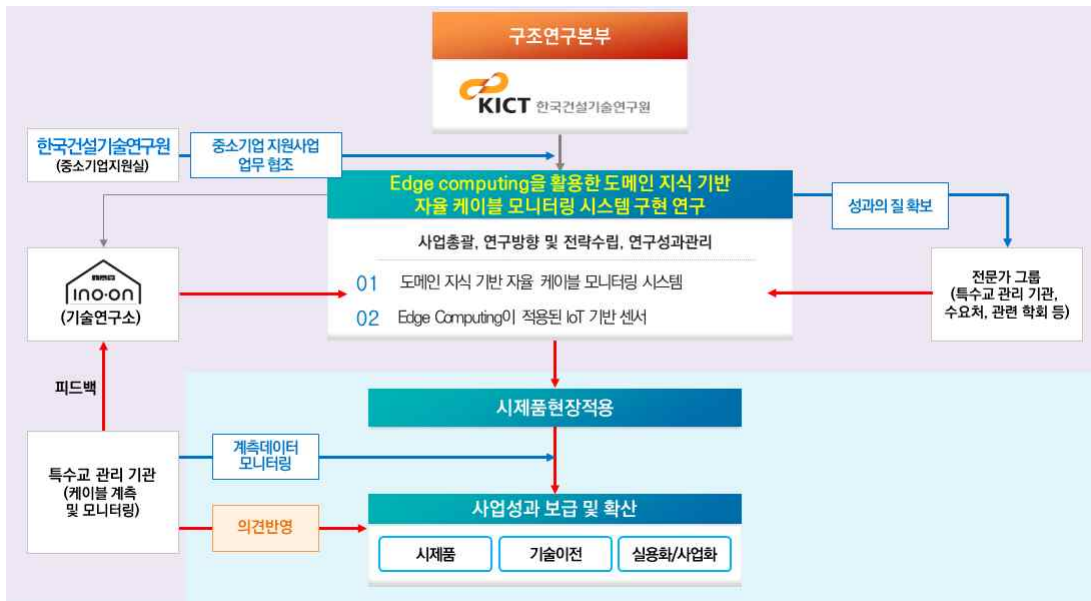


그림 1.4 연구 추진전략

제2장

연구개발의 국내외 현황

1. 국내 현황

1.1 정책현황

시설물의 상시 안전관리체계 구축을 위하여 대부분의 특수교량은 상시계측시스템 운영하고, 교량의 다양한 응답(가속도 및 변형률등)과 주변 환경 인자(온도 및 풍속 등)을 지속적으로 측정하고 이를 분석하여 상태 모니터링 수행하고 있다. 최근 정부는 4차 산업시대를 맞아 사물인터넷(IoT), 클라우드, 빅데이터, 머신러닝 등 첨단기술을 건설, 교통, 농업, 공장, 에너지, 의료 등 전 산업분야에 도입하는 사업을 적극 추진 중에 있으며, 기술적, 사회적 환경에 발맞추어 정부에서는 다양한 시설물에 IoT센서를 설치하여 관리할 수 있는 시스템 구축 사업을 추진 중에 있다.

※ 한국판 뉴딜 프로젝트 : 3대 프로젝트 中 SOC 디지털화 → 10대 중점과제 中 노후 국가기반시설 디지털화

※ '21~'22 터널, 교량 및 비탈면 현장 IoT 계측시스템 구축 용역, 국토교통부

※ '21~'22 디지털(IoT)기반 노후위험시설 안전관리시스템 구축 용역, 행정안전부



그림 2.1 한국판 디지털 뉴딜사업 및 SOC 디지털화 정부사업 추진

1.2 기술현황

다양한 장력 추정 방법이 있지만, 공용 중 교량에 적용할 수 있는 기법은 제한적이다. 다양한 방법 중 실제 현장에서 사용되어진 사례를 아래와 같이 정리하였다.

리프트오프 테스트(Lift-off Test) : 케이블에 로드셀과 변위계, 유압잭을 설치하고 로드셀에 걸리는 힘과 변위계로 측정한 변위와의 관계를 이용하여 케이블의 장력을 산정하는 방식이다. 과정이 단순하고 정확하나, 장비가 비싸고 내구성이 떨어지며, 공용중인 교량에 적용에 어려움이 있다.

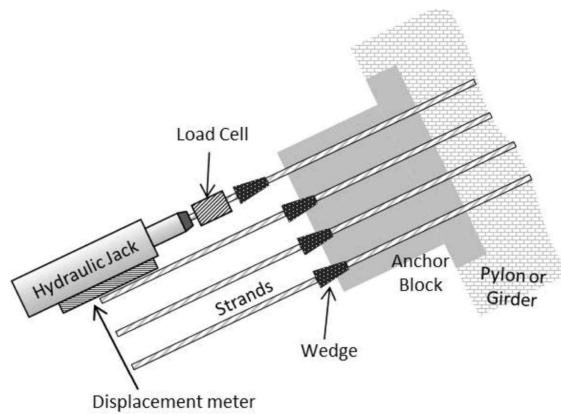


그림 2.2 리프트오프 테스트(Lift-off Test)

스마트 강연선 : 강연선의 심선을 광섬유센서가 매립되어 있는 FRP 심선으로 대체시킨 강연선(스마트강연선)을 이용해 광섬유 파장의 변화를 통해 긴장력을 측정한다. 공용 중 교량에서 설치가 어려우며, 스마트 강연선 손상 시, 해당 강연선을 교체에 어려움이 있다.



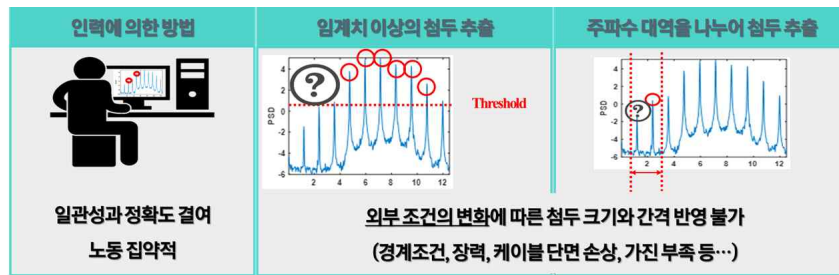
그림 2.3 스마트 강연선

MFL(Magnetic Flux Leakage) 자기장 변화 측정법: 장력의 크기와 자기장 변화율 상의 관계식을 사전에 산출하여 이를 바탕으로 긴장력을 추정하는 방식이다. 공용 중 교량에 사용이 어려우며, 시간 경과에 따른 탈자화로 인한 초기 측정치의 정확성이 결여된다.



그림 2.4 MFL

(진동법 - 침두 추출 방법) ① 인력에 의한 방법, ②특정 임계치(threshold)보다 큰 침두를 선택하는 방법(Threshold-based), ③ 침두가 존재하는 특정 구간(interval)을 사전 설정하고, 해당 구간 내 최댓값을 선택하는 방법(Interval-based) 등이 있다. 사용자의 주관적인 설정이 요구되기 때문에 완벽한 자동화가 아니기 때문에 결과에 영향을 미친다.



부정확한 침두 검출은 추정된 장력과 감쇠비의 신뢰성에 영향

그림 2.5 진동법 - 침두 추출 방법과 문제점

현재 많은 IoT 센서 상용 제품들이 구조물 유지관리 분야에 활용되고 있지만, 대부분 무선 통신방식으로 단순하게 데이터를 전송하고 장비를 제어하는 기본적인 통계 분석 기능만을 갖춘 센서가 IoT 기반 모니터링 분야에서 통용되고 있는 실정이다.

표 2.1 개발 기술 관련 특허 출원 현황

특허명	출원 번호(출원일)	관련 수행과제	주요 특허 범위
IoT 기술을 이용한 구조물의 변위 계측시스템	10-2190-7420000 2020.12.08		구조물의 변위를 레이저를 이용하여 계측하고 IoT기술을 이용하여 변위 발생 정보를 빅데이터로 저장하고 변위 발생 시 관리자에게 알림을 전달하는 구조물의 변위 계측 시스템
에지 컴퓨팅에서 IoT 디바이스 연동을 이용한 패스트 데이터 처리 시스템	10-2075-7910000 (2020.02.04)	IoT 디바이스에서 발생하는 데이터를 엣지에서 실시간 처리하기 위한, 디바이스 연동 및 데이터 수집, 분석, 처리 기술개발	IoT 디바이스에서 발생하는 스트림 데이터 중 즉시 대응이 필요한 데이터는 에지에서 처리하고 나머지 데이터는 클라우드 서버에 전달하는 에지 컴퓨팅에서 IoT 디바이스 연동을 이용한 패스트 데이터 처리 시스템
시설물 계측데이터 수집을 위한 IoT 기반 데이터 로거 시스템	10-2108-9320000 (2020.05.04)	사회기반시설물의 재난·재해예방을 위한 IoT 기반 모듈형 자가진단 센싱시스템 개발	시설물 계측 데이터 수집을 위한 IoT기반 데이터로거 시스템으로 센서접속부에 센서를 연결하고 데이터 통신을 위한 IoT모듈을 장착하여 클라우드 서버 혹은 메인 데이터로거에 연결하여 데이터를 전송하는 시스템

1.3시장 · 산업동향

대표적인 케이블지지 구조물 중 하나인 사장교는 사장 케이블의 인장강도와 주탑 및 보강형의 휨, 압축강도를 효과적으로 결합시켜 구조적 효율을 높일 수 있어서 장대교량에 적합하고, 미관이 뛰어나 짧은 거리에도 종종 사용되어 공용중인 사장교가 늘어나고 있는 추세이다. 국토안전관리원의 특수교 관리센터에서 2022년 기준으로 계측에 사용되는 케이블 장력계는 260개이며, 대부분 가속도계를 이용한 진동법을 통한 장력 추정 방식으로 장력을 추정하고 있다.

IoT 기술을 활용한 시설물 관리, 재난 · 안전 분야의 현안을 해결하기 위한 핵심적인 기술로 각광 받고 있으며, 국민안전을 도모하기 위해서는 IoT 기술과 첨단 기술과의 융합이 활발히 이루어지고 있다. '21년, 한국판 뉴딜사업의 일환으로 SOC 디지털화를 위해 교량,

비탈면, 노후 시설물 등에 IoT 기반 안전관리시스템을 구축하는 정부사업이 활발히 추진 중에 있다. 시설물에 IoT 계측 기반 안전관리시스템 적용이 확대됨에 따라 국내 기술자립을 위해 '21.8월 산업통상자원부는 「시장선도를 위한 K-Sensor 기술개발 사업(2023년 시행)」이 예비타당성 조사를 통과하여 향후 7년간 1,865억원을 투자할 예정이다. 시설물 안전산업 실태조사 결과에서 안전관리시스템 개발 및 관리업에 속하는 기업들의 관련 매출액은 2018년 약 1조 2,591억원이며, 연평균 3.4%의 성장률로 증가하여 2024년에는 약 1조 5,388억원에 달할 것으로 예측하여 매우 성장속도가 빠르고 발전가능성이 높은 것으로 예측된다.

구분	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	CAGR
국내시장(억원)	12,591	13,019	13,462	13,919	14,393	14,882	15,388	3.4

※ 출처 : 재난안전산업 실태조사(2015~2018년 기준)의 CAGR(연평균 성장률, compound annual growth rate)를 바탕으로 추정

2. 국외 현황

2.1 정책 현황

미국의 FHWA(Federal Highway Administration)는 시설물 모니터링에 IoT센서 및 모니터링 기술의 사용을 촉진하는 연구/정책 프로그램을 추진 중이며, 이 프로그램에는 교량 모니터링에서 센서 사용에 대한 지침이 포함되어 있으며 연구 및 개발을 위한 자금을 제공한다. 유럽 연합은 새 건물 및 기반 시설의 건설과 기존 구조물의 유지 관리 및 수리에서 구조 상태 모니터링 사용에 대한 지침을 개발하고 있으며, 이 지침은 건물과 인프라의 안전과 신뢰성을 보장하기 위해 IoT 센서를 포함한 고급 센서 및 모니터링 기술을 사용하는 것의 중요성 강조하고 있다. 산업 조직과 표준 기관 사이에서 구조적 상태 모니터링에 IoT 센서 사용을 촉진하는 증가 추세이며, ASCE(American Society of Civil Engineers)는 교량 모니터링에서 센서 사용에 대한 지침을 개발했으며 여기에는 IoT 센서 사용에 대한 권장 사항이 포함된다.

2.2 기술개발 현황

사물인터넷(IoT : Internet of Things), 인공지능(AI : Artificial Intelligence) 및 빅데이터 등은 자동차, 모바일, 제조, 농업, 유통, 의료 산업의 큰 성장동력으로 주목받고 있다. 데이터의 수집 및 활용의 가치와 중요성이 부각되면서, 실제로 데이터를 수집하는 압력, 온/습도, 가속도 등의 물리량을 전기적 신호 및 데이터로 변환하는 센서의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 2020년대 들어 센서의 연평균 생산량이 1조 개에 달하는 트릴리언 센서 시대에 진입할 것으로 예상된다.

센서의 수가 많아짐에 따라 대용량의 데이터를 중앙 집중 방식으로 처리하기 위한 광대역폭의 통신 애플리케이션 프로세서(AP: Application Processor)의 전력 소모가 커지는 단점이 있다. 따라서, 기존 센서에 제어, 판단, 저장, 통신 기능을 결합한 지능형 센서를 활용하게 되면, 센서 내에서 원시 데이터(raw data)의 잡음을 줄이고 의미 있는 정보를 추출하여, 필요에 따라 데이터를 중앙으로 전송하는 완전 분산 방식이 가능해진다. 지능형 센서에 필요한 핵심 기술을 확보하려는 움직임은 국내외에서 활발히 이루어지고 있으며, 사회 전 분야의 지능형 융합 서비스를 제공하기 위한 스마트 IT 융합 플랫폼 개발도 빠르게 진전하고 있다.

표 2.13은 국내·외에서 개발되어 상용되고 있는 제품의 현황을 조사하여 나타낸 것으로 실제 현업에서는 외산 장치가 대부분이고, 국내에서 개발되어 시판되는 장치도 존재하지만, 사용빈도 및 활용기간 등이 짧아 교량 계측시스템 활용 신뢰성 측면에서 충분한 검증이 되었다고 보기에 한계가 존재하는 것이 사실이다.

표 2.2 상용 IoT 센서(예)

업체명(브랜드)	제품사진	상세내역
Endaq		<ul style="list-style-type: none"> ○ 내장형센서(압전 가속도계, 보조 정전식 가속도계) ○ 압전가속도 $\pm 25g$, 디지털정전가속 040g ○ 측정범위 16g~2000g, 스토리지 16GB ○ Wi-Fi 연결 (ecDAQ클라우드) ○ 4,000mAh 내장 배터리 ○ 가격대 \$4,000~\$6,000
SignalQuest		<ul style="list-style-type: none"> ○ 가속도계, 경사계, 진동 센서 CAN2.0A/B, RS485, RS232, 4-20mA, 0-5V ○ IP67 등급, M12 또는 Deutsch 커넥터 ○ 고신뢰성 솔리드 스테이트 MEMS ○ 안정적인 측정을 위한 디지털 필터링 ○ 직접 PC 인터페이스 케이블 ○ EMI, ESD, RFI 보호 및 인증
PCE Instruments		<ul style="list-style-type: none"> ○ 30g가속, 5~10KHz 주파수 진동감지 ○ 데이터 메모리(수신 베이스) 128MB ○ ZigBee를 통한 무선 통신 5Hz ~ 10kHz의 주파수 범위 ○ Acceleration range up to 300 m/s² ○ 220 VAC or POE
RadioBridge		<ul style="list-style-type: none"> ○ LoRaWAN 무선 기술 기반 ○ 저주파 범위(10Hz - 1kHz)에서 진동 속도를 측정 ○ 벽, 바닥 등의 구조물을 통한 우수한 무선 침투력 ○ 인클로저 변조 감지, 내장배터리 ○ 감지 메시지를 통한 자동 오류 보고
Slam Stick/ Mide tech		<ul style="list-style-type: none"> ○ 기계 장치에 부착한 후 진동 데이터를 기록 ○ 내장 메모리에 진동 데이터를 저장 후 저장된 데이터를 PC로 전송 기계의 이상 진동 여부 분석 ○ 비행기 등 접근이 어려운 상황에서 측정 유리
G-Link 200/ Lord, Systems		<ul style="list-style-type: none"> ○ 기계 장비의 진동 측정, 충격 감시, 장비 상태 모니터링 용도 ○ 진동 가속도계에 무선통신을 결합 ○ 고정밀 센서 사용 ○ 저전력 근거리 무선 통신기술 탑재 및 게이트웨이 통해 인터넷 연결. 다수 센서 밀집 설치 시 유리.

표 2.2 상용 IoT 센서(예)

업체명(브랜드)	제품사진	상세내역
Type 3680/ BKSV		<ul style="list-style-type: none"> ○ 건축 공사 현장 주위에 문화재, 병원 등 진동에 민감한 건축물이 있을 때 주변 진동을 상시 모니터링 ○ 상시 전원 공급, 초고가의 고정밀 가속도 센서 사용 ○ 야외에서 미세한 진동을 일정기간 정밀하게 모니터링하기에 유리
DTL201B/DTL202B / RST Instrument		<ul style="list-style-type: none"> ○ 콘크리트 댐, 건물 벽, 산사태, 교량 등의 미세한 기울기 변화를 장기간 기록 ○ 내부 메모리기록, 전용 게이트웨이를 통한 무선통신은 옵션
Clinotronic PLUS / Wyler		<ul style="list-style-type: none"> ○ 각종 구조물 안전 진단 또는 공사 시 건물이나 옹벽에 설치하여 경사도 측정 ○ 측정지점에 틸트플레이트를 부착 후 필요시에만 수작업으로 측정
Beandevic Willow HI-INC / BeanAir		<ul style="list-style-type: none"> ○ 구조물 기울기 무선 전송 ○ Wifi혹은 ISM대역을 사용하는 무선 통신. GW필요

2.3 시장 · 산업동향

2014년 기준 해외 케이블 교량 시장은 23.5조 원이며, '25년 시장규모는 37.2조 원 규모를 형성할 것으로 전망하고 있으며, 해외 현수교 시장규모는 9.8조 원이며, '25년 시장규모는 15.5조 원 수준을 형성할 것으로 예상된다. 2014년 기준 해외 사장교 시장규모는 13.7조 원이며 '25년 시장규모는 21.7조 원 수준을 형성할 것으로 예상된다.



그림 2.6 해외 케이블교량 시장규모

Zion Market Research에 따르면 공공의 안전관리에 적용되는 IoT의 시장 수익은 2018년 9억 달러이며, 2024년에는 약 24억 달러에 이를 것으로 예측한다.

구분	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	CAGR
세계시장(억\$)	991	1,148	1,330	1,540	1,784	2,066	2,393	15.83

※ 출처 : 공공안전시장을 위한 IoT 세계시장 규모 및 전망, 2020, ZionMarketResearch

3. 사업성 분석

3.1 시장개요

국내 특수교 건설시장은 2015년 이후 하락세를 보이고 있는 반면, 유지관리 시장이 증가하고 있는 추세이다(한국시설안전공단 특수교관리센터 2022년 예산은 약 130억). 현재 국내에는 약 100개소 이상의 특수교(케이블교량)가 공용 중에 있으며, 그 중 약 70개소에는 유지관리를 위한 계측시스템과 모니터링 시스템 구축되어 있다. 특수교의 주요 부재인 케이블의 장력 모니터링이 중요. 대부분 케이블 가속도계를 이용하여 추정된 장력 모니터링을 통한 관리한다. 또한, 케이블 가속도계의 내용연수 9년(특수교 계측시스템 설치 및 운영 요령)이기 때문에 계측기의 수요는 지속적 증가하고 있다.

※ 내용연수: 자산의 수명을 말하며 유형자산이 사용불능이 되어 폐기할 때까지의 추정연수

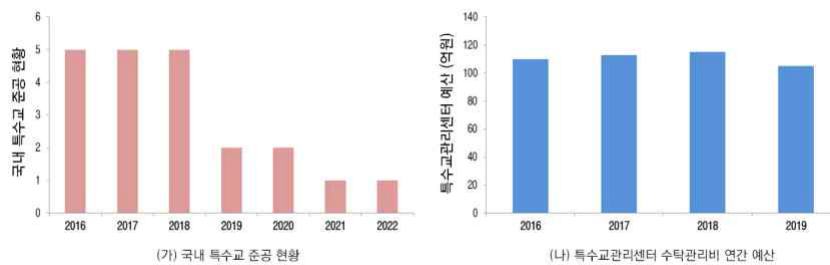


그림 2.7 국내 특수교 준공 및 특수교 센터 예산 현황

제5차 시설물의 안전 및 유지관리 기본계획(2023~2027) 고시하였으며, 시설물 노후화, 기후변화, 디지털 전환 등 정책 여건 변화에 맞춰 계획을 수립하고 있다. 중국, 동남아, 중동 등에서 신규 케이블교량시장이 활발히 형성되고 있으며, 교량의 케이블 모니터링 분야에 대한 관련시장 전망이 밝으며, 차별화 된 기술의 특별 제안을 통한 케이블 교량 시장에서 수주 경쟁력 우위 확보가 가능하다.

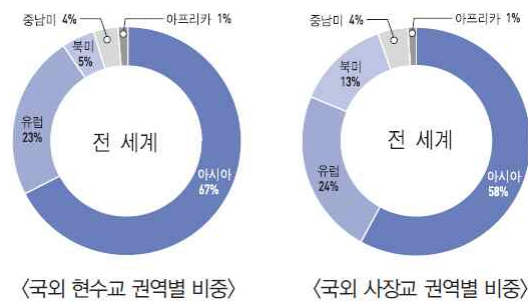


그림 2.8 '00년 이후 케이블교량 준공/계획 건수의 권역별 비중(*출처 국토교통 R&D 동향조사)

- ※ 국가발전정책으로 '한국판 뉴딜 종합계획'을 수립 후 추진 중이며, 국가안전사회간접자본 핵심 인프라의 디지털화를 포함하여 인프라를 통합 관리하는 정책목표 제시
- ※ 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」 제5조제1항에 의하여 국토부장관은 5년마다 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 기본계획을 수립·시행
- ※ '00년 이후 해외 케이블교량 준공/계획 건수 비중은 아시아가 가장 큼

3.2 사업성 분석

특수교의 안전 및 유지관리 분야에서는 기존의 유선계측시스템이 대부분을 적용하고 있으며, IoT 계측 센서 시장의 전개 양상은 국내 계측·모니터링 시장의 사례를 통해 유추할 수 있다. 토목 계측·모니터링 분야의 특성으로 인해 초기 시장 선점의 효과가 장기간 지속될 수 있으므로 시장의 창출과 선점이 사업화의 핵심일 것으로 예상된다.

기존 유선계측시스템에서 IoT 기반의 계측 센서로의 전환이 이루어지고 있으며, 초기 시장은 기존 유선계측시스템의 기능을 구현하고 있는 수준이다. 본 연구를 통해 모니터링의 효율성, 정확성 등을 향상시킨 IoT 계측 센서를 개발하게 된다면 새로운 기술 시장 창출 가능성이 높을 것으로 판단된다.

제3장

연구개발 수행내용 및 결과

1. Edge Computing 구현을 위한 알고리즘 최적화 및 검증

1.1 침투 자동 추출 알고리즘

도메인 지식을 토대로 완전 자동화된 침투 추출 기법 개발에 필요한 기준을 다음과 같이 설정하였다: (1) 사용자가 사전에 설정해야 하는 초월 변수(hyper-parameter)가 필요하지 않고; (2) 진동신호의 잡음과 변동성에 대한 높은 강건함(robustness)을 가지고; (3) 계산 복잡성(사전 학습 및 실행 시간 등)과 연산 시 요구되는 비용(컴퓨팅 자원)이 충분히 낮아 실시간 처리가 가능해야 한다.

케이블의 실시간 상태 모니터링을 위한 다양한 방법들이 개발 및 적용되고 있다. 이러한 모니터링 방법 중 진동법(vibration-based method)은 비용이 저렴하고 설치가 용이하며, 시공 중 또는 공용 중인 케이블에 적용이 가능하며, 케이블의 감쇠비의 추정이 가능하다(그림 1.1).

케이블의 기하형상 및 도입 장력 그리고 시간 경과에 따른 장력 손실, 케이블의 손상으로 인해 현장에서 언급한 기존 방법들의 최적 설정의 변화가 필요하다. 또한, 케이블에 발생하는 응답은 외부 환경, 경계조건, 장력의 변화와 단면 손상 등으로 침투의 특징이 변화되며, 기존 방법들은 능동인 대응이 어렵다. 케이블의 진동 신호를 주파수 영역으로 변환된 신호는 그림 3.1과 같은 특징을 가진다. 케이블의 침투는 주기적인 간격을 가지며, 간격은 케이블의 제원 및 형상에 따라 달라지지만, 동일한 간격을 가지는 주기성(periodicity)은 모든 케이블 부재가 가지는 고유한 물리적 특징이다. 그림 3.1에서 볼 수 있는 침투들은 케이블 구조계의 고유진동수이며, 주변 주파수 성분 대비 높은 진폭(amplitude)을 가지기 때문에, 주변 값들에 대해 이상치(outlier)와 같은 거동을 한다. 이러한 특징은 침투가 인접한 PSD의 앞서 언급한 고유한 특징들은 사장교 케이블의 고유한 물리적 특징(주기성 및 이상치

거동)이며, 이는 침투추정 자동화 기법의 설계 및 구현에 활용할 수 있다(Jin et al., 2021).

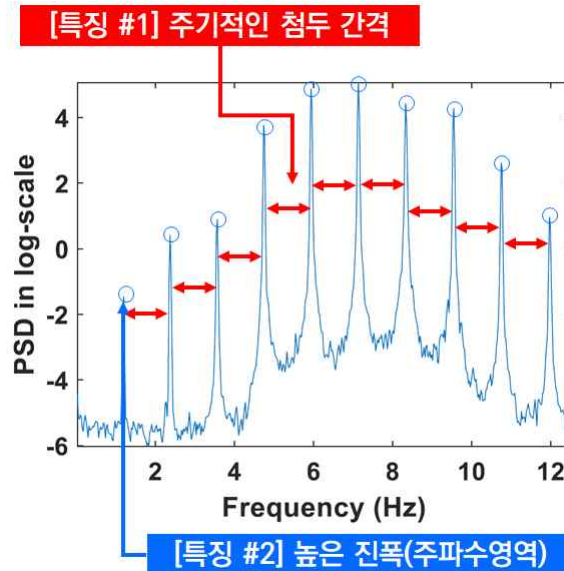


그림 3.1 케이블 가속도 데이터의 주파수 영역에서의 신호 특징

케이블 부재의 주기성을 활용하고자 생체신호처리 분야의 침투 추출 방법 중 Automatic multiscale-based peak detection (AMPD) 기법을 활용하였다(Scholkmann et al., 2012). AMPD 기법은 주기적으로 발생하는 침투에 대한 자동 추정이 가능하며, 신호에 포함된 잡음에 강건한 침투 추출이 가능하다. 특히, 초기 설정이 없기 때문에 자동화 구현이 가능하지만, AMPD는 생체신호처리 분야의 데이터(data modality)를 기반으로 개발된 기법이기 때문에, 케이블 진동신호의 특성에 맞게 개선하였다(Jin et al., 2021). 그림 3.2는 이렇게 추정된 주기적인 침투(periodic peak)을 보여준다.

다른 주파수 영역의 특징인 주파수 영역에서의 이상치(outlier)는 통계적 공정 제어의 이상치 탐지 기법을 활용할 수 있다. 이상치 탐지 기법은 주어진 정상 데이터에서 산출된 임계치 이상의 값을 가지는 데이터를 이상치로 선정하는 방법이며, 임계치 설정 시, PSD 내 peak와 같은 이상치(outlier)가 존재하여도 강건하게 학습이 가능한 중앙값 절대 편차 (Median absolute deviations, MAD) 방법을 이용하였다(Rousseeuw et al., 1993).

주파수 영역에서의 신호에서 침투를 효과적으로 추정하기 위해서는 시간 영역과 주파수 영역에서의 전처리가 필요하다. 시간 영역에서의 추세를 제거하지 않을 경우, 주파수 영역으로 변환 시 0Hz 인근에 침투가 발생되기 때문에, 정확한 침투 추출에 어려움이 있다(그림

3.3). 시간영역에서 추세를 제거하여 주파수 영역으로 변환하는 전처리 알고리즘을 적용하여 0Hz 인근에 발생하는 신호의 왜곡을 제거 함으로서, 침두 추출의 정확도를 향상하였다.

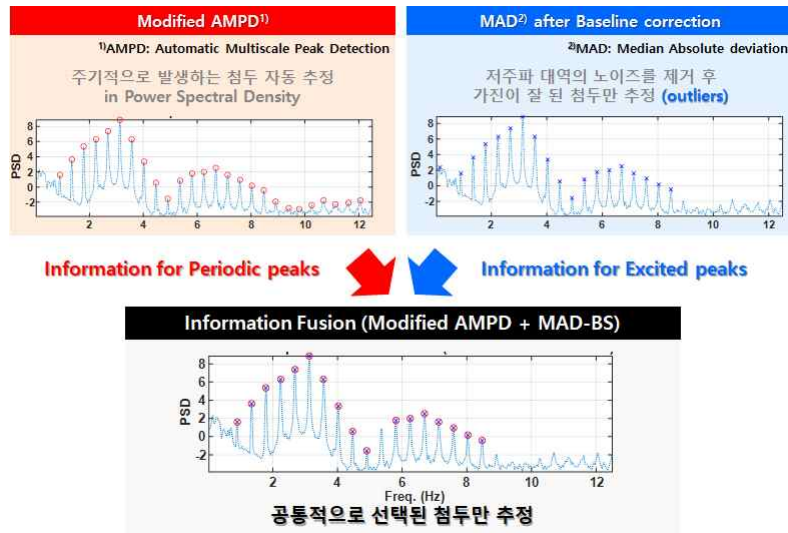


그림 3.2 침두 완전 자동 추출 알고리즘

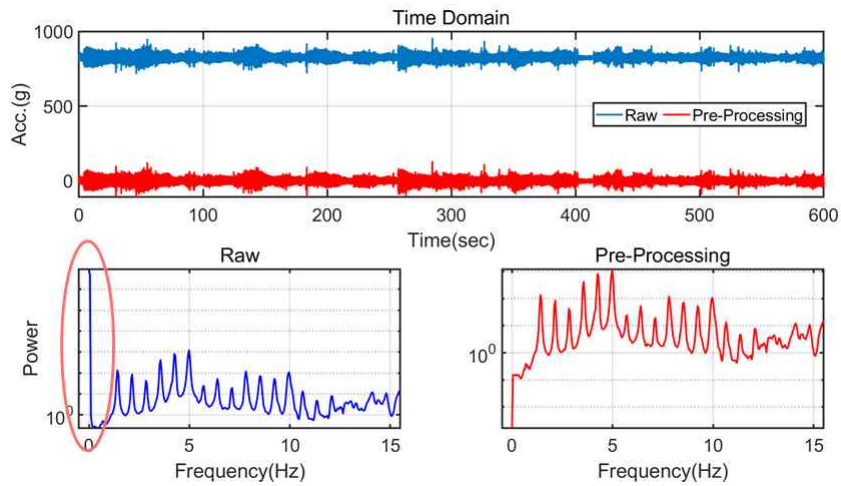
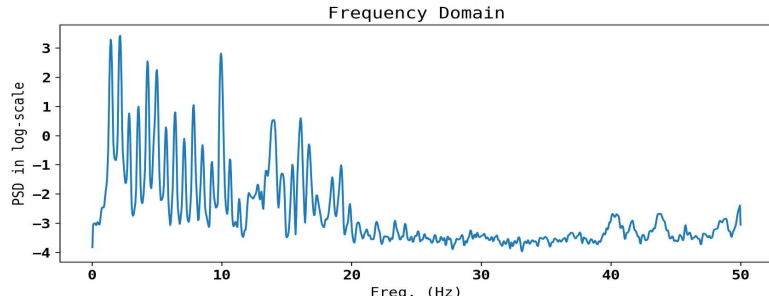


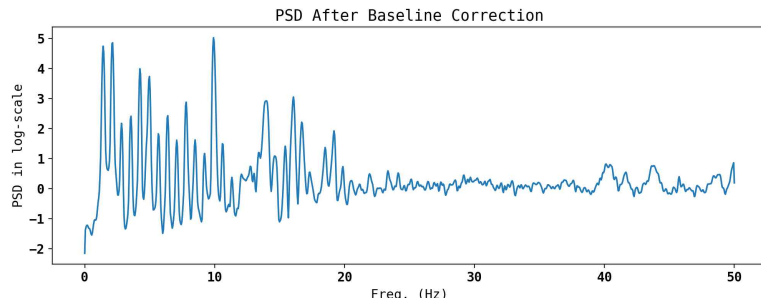
그림 3.3 시간영역에서 추세 제거를 통한 전처리

주파수 영역에서의 신호는 기저(Baseline)로 인하여 MAD의 정상성(stationarity)에 대한 가정 조건을 만족하지 않는 문제가 발생한다. MAD를 효율적으로 적용하기 위해서는 PSD 신호 내 존재하는 기저의 제거가 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 라만 분광법에서 사용하는 기저 제거 기법(Baseline-correction method)을 적용하였다(Schulze et al., 2012). 기저 제거 알고리즘은 사용자가 지정해줘야 할 변수가 없는 완전 자동화된

방법으로 그림 3.4(b)와 같이 첨두의 위치는 그대로 유지하면서 PSD 내 기저를 효과적으로 제거할 수 있다. 기저 제거 후 MAD를 적용하면 PSD 내 상대적으로 높은 값을 가지는 첨두를 추정할 수 있다.



(a) 기저 제거(전)



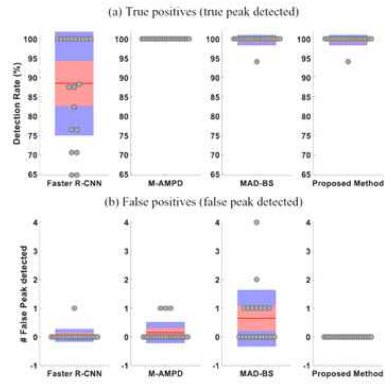
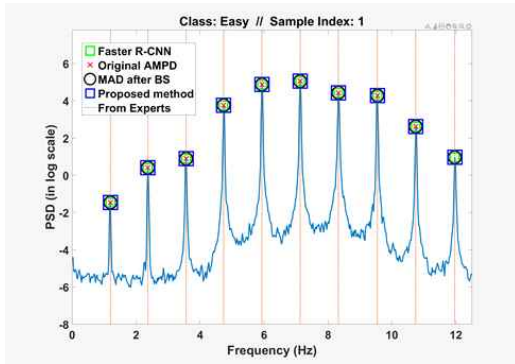
(b) 기저 제거(후)

그림 3.4 기저 제거 알고리즘 적용 결과

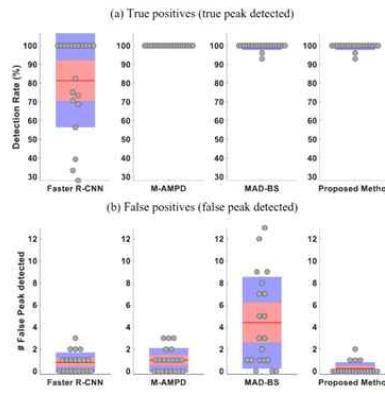
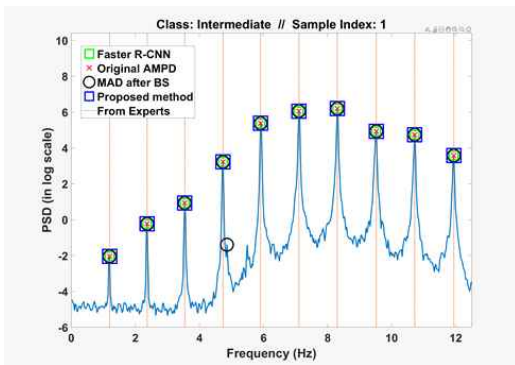
1.2 침두 자동 추출 알고리즘 검증

개발된 침두 자동 추정 알고리즘 검증을 위하여, 실제 특수교 계측 데이터를 활용하였다. 각기 다른 조건에서 수집된 데이터 중 측정된 진동 신호를 침두 추출의 난이도(PSD의 복잡도)에 따라 총 세 가지로 각각 20개씩 구분하였다. 수집된 가속도 계측 데이터는 100Hz의 계측 주기로 1시간 동안 수집되었다. 총 60개의 검증 데이터는 5명의 전문가가 침두를 추정하였으며, 이를 토대로 정답(Ground Truth)을 도출하였다(그림 3.5의 주황색 수직 방향 점선). 그림 3.5와 같이 작성된 알고리즘의 정확성을 검증하기 위하여, (1) 딥러닝 기반 침두 추출 기법(Faster R-CNN 기반), (2) 주기성을 가지는 침두를 추정하는 기법(M-AMPD) 및 (3) 높은 진폭을 하는 침두를 추정하는 기법(MAD after BC)과 비교하였다. 침두 추출을 위한 Faster R-CNN의 학습은 수치 시뮬레이션을 통해 학습데이터(14,000개의 PSD)를 생성하고 침두에 대한 annotation을 수행했다. 그리고 기 학습된 backbone network에 대해 생성된 수치해석 학습데이터를 통해 전이 학습(transfer learning)을 수행하였다(Jeong et al., 2020). 반면 Faster R-CNN을 제외한 세 가지 방법은 사전설정 및 학습 없이 바로 침두 추출이 가능하다.

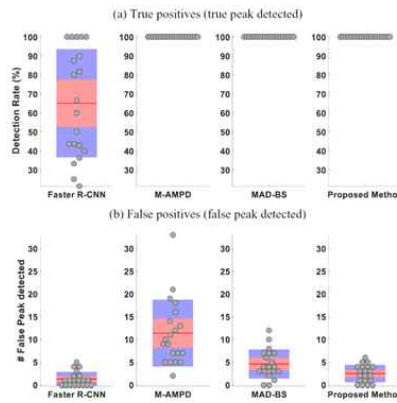
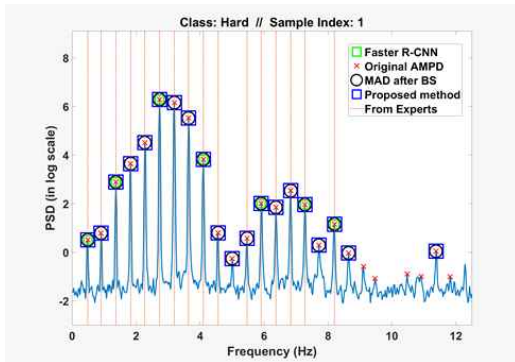
그림 3.5(a)는 침두 추출이 상대적으로 쉬운 PSD(easy class)에 대한 결과 중 일부를 보여준다. 모든 기법들이 정답으로 도출한 침두(ground truth)들을 잘 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 3.5(b),(c)는 가진이 부족하거나 신호에 잡음이 포함되는 등의 조건으로 인하여 PSD신호가 상대적으로 복잡하고, 특정 주파수 대역만 부분적으로 가진 경우이다(Intermediate & Hard class). 전문가의 침두 추출 기준은 주기성을 보이지만 가진이 잘 되지 않은 침두들은 침두 추출에서 배제하였다. M-AMPD는 주기적으로 발생하는 침두들을 잘 추정하나, 일부 가진이 적은 침두들도 다수 포함되었지만, 제안 기법과 MAD-BS가 두 경우 모두에서 정답으로 도출한 침두(ground truth)들을 잘 추정하는 것을 알 수 있다. 그림 3.5(c)의 결과에서 확인 할 수 있듯이, 오직 제안 기법만이 PSD의 패턴 변화와 무관하게 일관적으로 침두 추출의 결과를 확인할 수 있었다.



(a) Easy Class



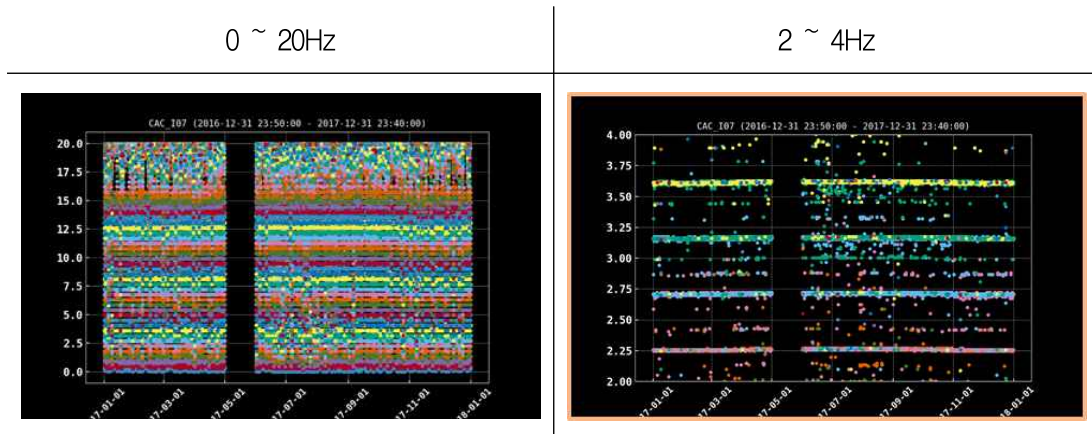
(b) Intermediate Class



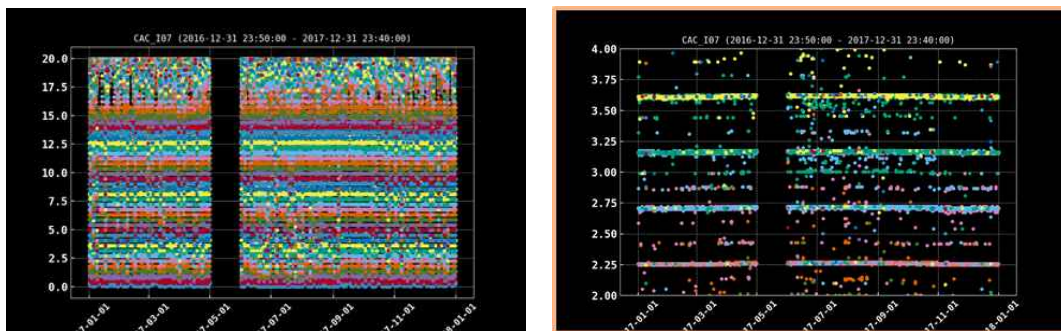
(c) Hard Class

그림 3.5 침두 추출 자동화 성능 검증 결과

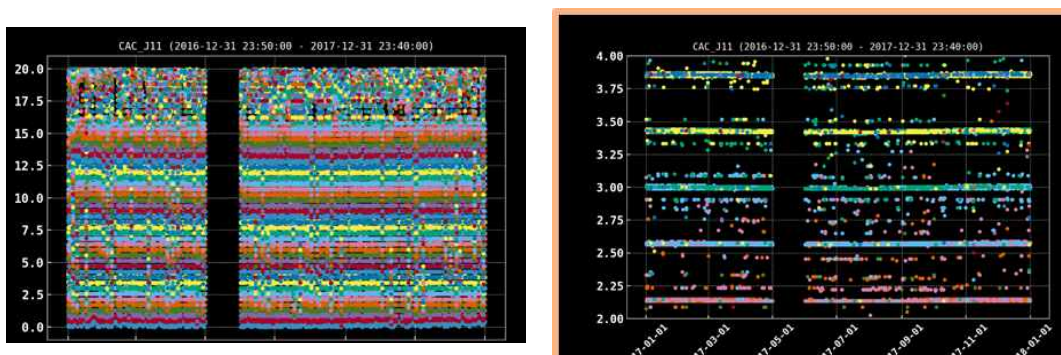
침두 완전 자동화 추출 알고리즘의 장기 데이터에 대한 검증을 위하여, 공용 중인 사장에
 에 설치된 케이블 가속도계 3개의 2017년 연간 수집 데이터 전체에 알고리즘을 적용하여
 침두 추출 결과를 확인하였다. 모든 데이터 분석 과정에서 사전 설정 없이 침두를 추정할
 수 있었으며, 결과는 그림 3.6과 같다.



(a) CAC 107



(b) CAC 109



(c) CAC J11

그림 3.6 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과

일관적으로 침두가 추정되지만, 일부 왜곡된 신호에 의한 침두 추출 결과가 부정확한 경우가 일부 발생하였다(그림 3.7). 따라서, 침두 추출 결과의 정확성을 높일 수 있는 필터를 적용하거나, 침두의 결과가 기존 추정 결과와 상이할 경우 계측 데이터를 분류할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

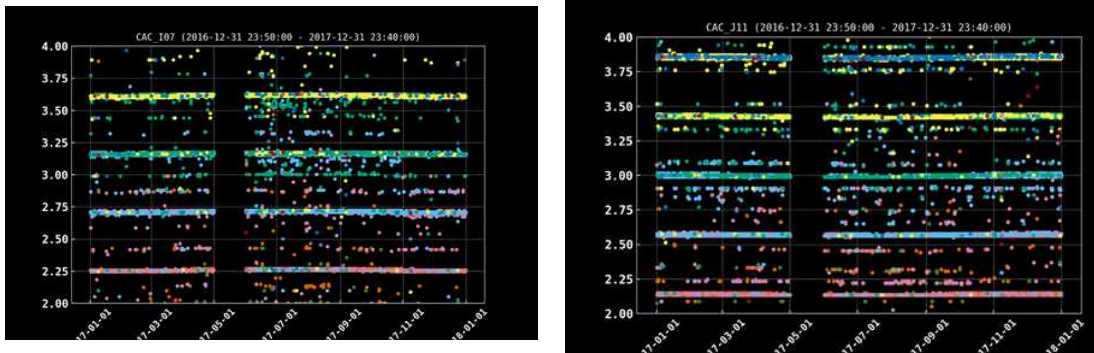


그림 3.7 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과(잡음으로 인한 왜곡)

또한, 주파수 영역으로 분석하는 PSD의 FFT의 수, 윈도우 크기와 종류 등의 영향으로 인해 추정된 침두의 위치가 일정하지 않는 경우를 확인하였다. 케이블의 손상이 발생할 경우 침두 위치가 미세하게 변화되기 때문에, 주파수 영역을 기반으로 할 경우 손상 탐지에 어려움이 있을 수 있다(그림 3.8).

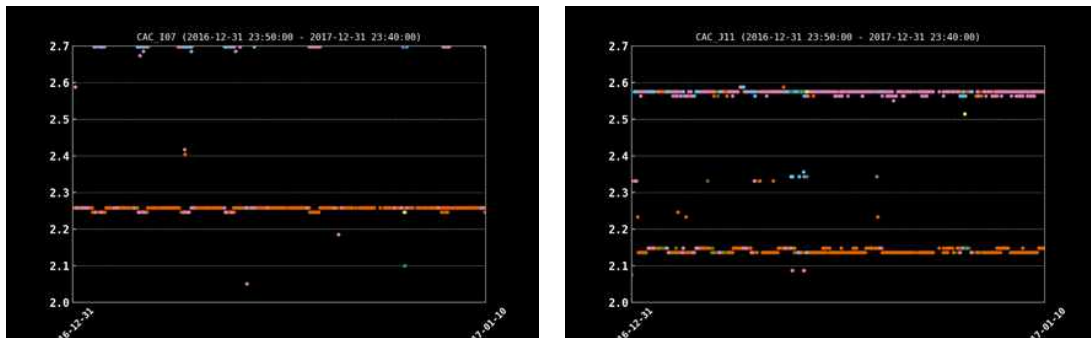


그림 3.8 장기 데이터를 활용한 침두 추출 자동화 성능 검증 결과(설정변수에 따른 영향)

이러한 문제를 해결하기 위하여, 침두 추출 과정을 기존의 주파수 영역 기반이 아닌 시간 영역 분석 기법 중 하나인 추계론적 부공간 규명법(Stochastic Subspace Identification, SSI)으로부터 산출된 안정화 도표(Stabilization Chart)부터 침두를 추정하는 방법을 제안하였다. 시간영역기법은 주파수영역기법 대비 계산 과정이 복잡하지만, 진동신호가 왜곡되어도 정확한 침두 위치 추정이 가능하며, 주파수영역기법보다 강건함을 가진다. 개발 된 알

고리즘은 계산이 복잡하기 때문에, IoT 센서의 전력 소비가 많은 것으로 확인되어, 실제 센서에 탑재에는 제외하였다.

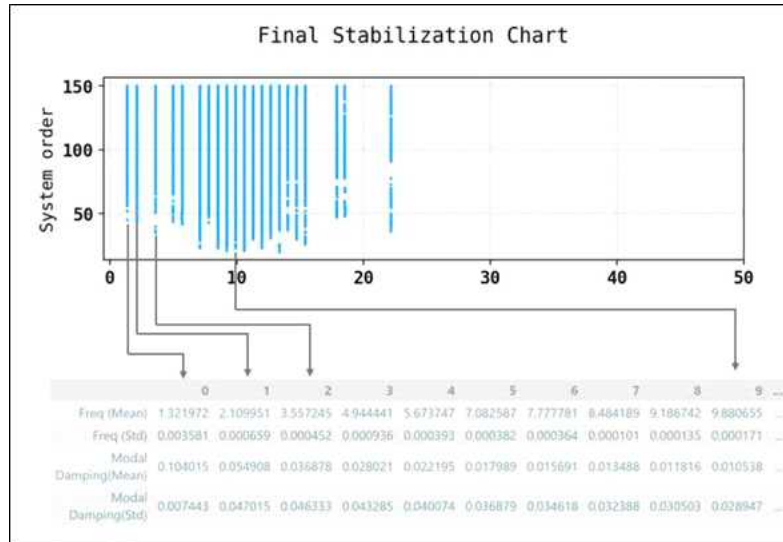


그림 3.9 추계론적 부공간 규명법을 이용한 침투 추출 방법(예)

1.3 이상 신호(고장) 자동 감지 알고리즘 개발

본 연구에서는 케이블 모니터링 과정에서 발생하는 이상 신호 데이터를 분류 할 수 있는 알고리즘을 작성하였다. 알고리즘 작성을 위하여 기존 계측 데이터를 분석하여, 침두 추출 결과가 부정확한 사례를 정리하였다. 이상 신호로부터 계산된 장력과 감쇠비는 데이터의 신뢰도가 떨어지기 때문에, 이상 신호로 분류하여 장력과 감쇠비 계산에서 제외하는 과정이 필요하다. 다양한 이상 신호 중 대표적인 경우는 그림 3.10과 같은 침두 추출 결과가 상대적으로 적은 경우, 0Hz인근에서 침두가 추정되는 경우 등이 있다. 현장 적용된 시작품과 기존의 계측 데이터를 활용하여 다양한 사례 조사 및 분류를 통해 알고리즘을 고도화 할 예정이다.

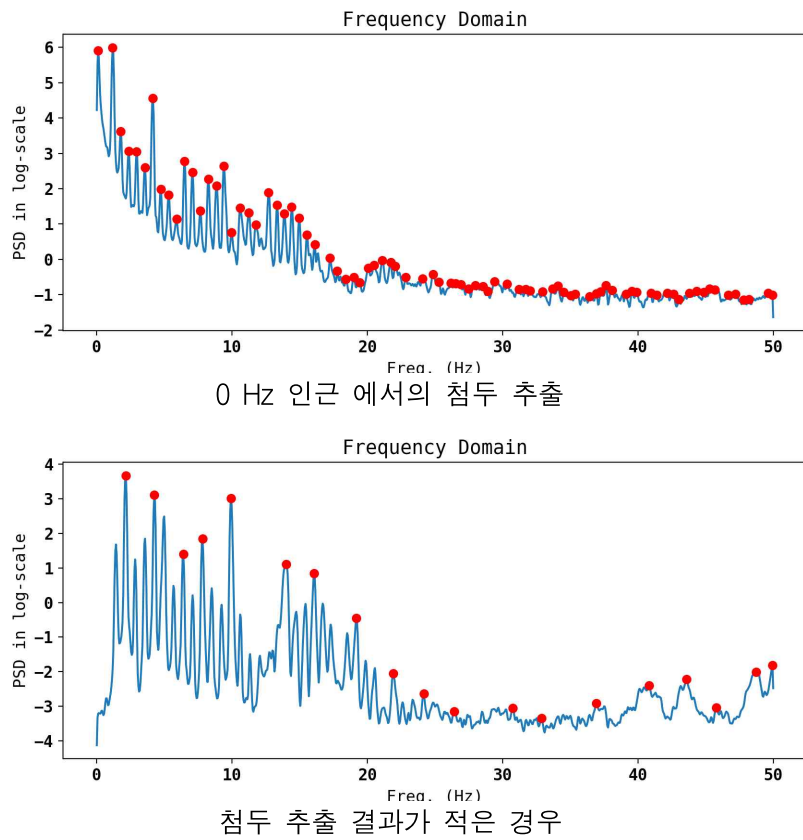


그림 3.10 부정확한 침두 자동 추정 사례

2. 알고리즘 적용 IoT 계측 센서 설계 및 시작품 제작

2.1 IoT 센서 설계

본 연구에서는 케이블 자율 모니터링 시스템 구현을 위한 알고리즘이 원활하게 구동될 수 있는 최적 센서의 제작을 목적으로 한다. 시작품은 1) 가속도를 계측, 2) 계측된 가속도 데이터로부터 침두 추출, 3) 장력 및 감쇠비 계산, 4) 이상 신호 탐지 및 분류, 5) 계측기의 상태 확인 등의 기능을 구현할 수 있도록 설계하였다. 기능 구현을 위해 필요한 부품의 사양과 규격은 표 3.1과 같으며, 센서 회로와 PCB 설계(안), 케이스의 규격은 아래 그림과 같다.

표 3.1 시작품 부품 상세

No.	부품명	규격
1	Flash Memory	256GB
2	On Board Memory	1GB
3	Analog to Digital Converter(ADC)	8CH
4	방수, 방진 케이스	알루미늄, 15X8X10 cm 이내
5	PCB 조립용 커넥터/인덕터	bulk
6	Main Controller	nrf52840 (on-board 32bit MCU) / RP3A0 (SOM 64bit CPU)
7	LTE 통신모듈	NTL 9607
8	기타 케이블, power IC	SS400

IoT 센서는 가속도 데이터의 실시간 수집을 위해 RTOS(Real-Time Operating System)인 Zephyr가 포팅된 32bit MCU와 고도의 연산을 요구하는 시그널 프로세싱 알고리즘 처리와 고속 네트워크 처리를 위한 quadcore 64bit 프로세서에 Linux를 포팅한 dual processor 시스템으로 구성하였다. 이를 통해 실시간, 저전력이라는 목표와 고급 알고리즘 연산을 유연하게 지원할 수 있게 되었다.

가속도 센서의 경우 1차적으로 500Hz로 sampling을 하고, 50Hz low pass filter를 통한 후 100Hz raw data를 생성한다. 이후 이 데이터는 10분단위로 저장되고, 10분 측정데이터를 기반으로 FFT, detrend 등의 auto-peak picking 알고리즘 연산을 수행한다.

이와별도로 IoT센서는 스스로의 상태를 모니터링 하기 위하여 내부에 별도의 온도, 습도

센서와 내부 배터리 전압, 외부 태양광 전압을 측정하기 위한 ADC등을 두고 여기에 통신관련 파라미터를 LTE모뎀을 통해 추출하여 1시간에 한번씩 서버로 전송하여 상태에 관한 데이터를 축적하고 개선할 수 있도록 하고 있다.

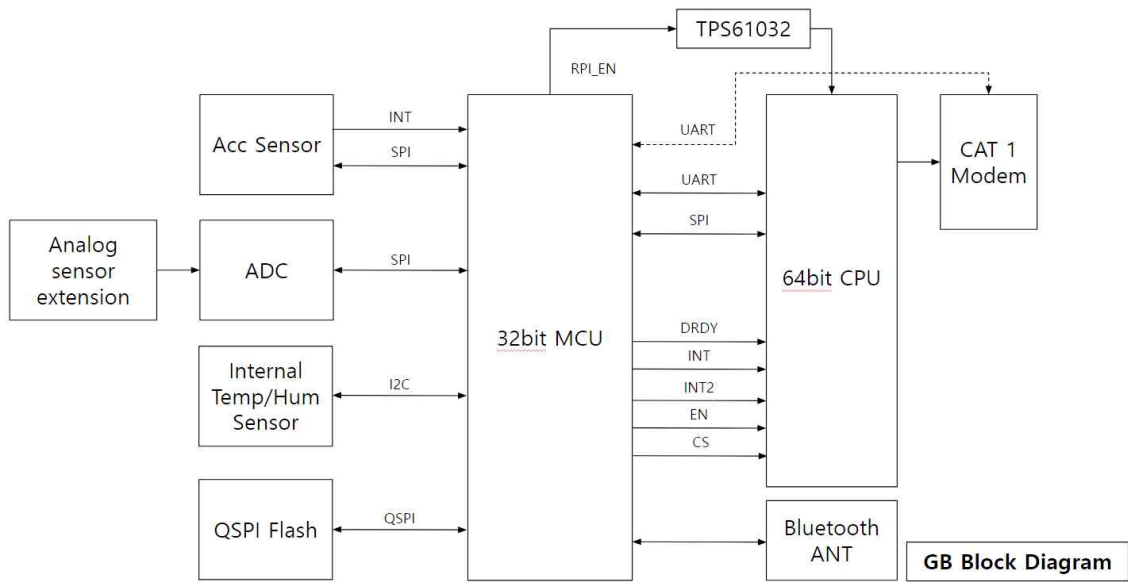


그림 3.11 IoT센서 Block Diagram

케이스의 경우 신뢰성 있는 알루미늄 제질로 구성하였고, 전원을 제외한 모든 외장 포트는 IP67기준으로 구성하여 외부 환경에 직접 노출되어도 신뢰성 있는 동작이 가능하도록 하였다. 본 과제 1차년도 사업 기간동안 방수 방진 시험을 진행하여 일차적으로 IP65등급을 획득하였다.

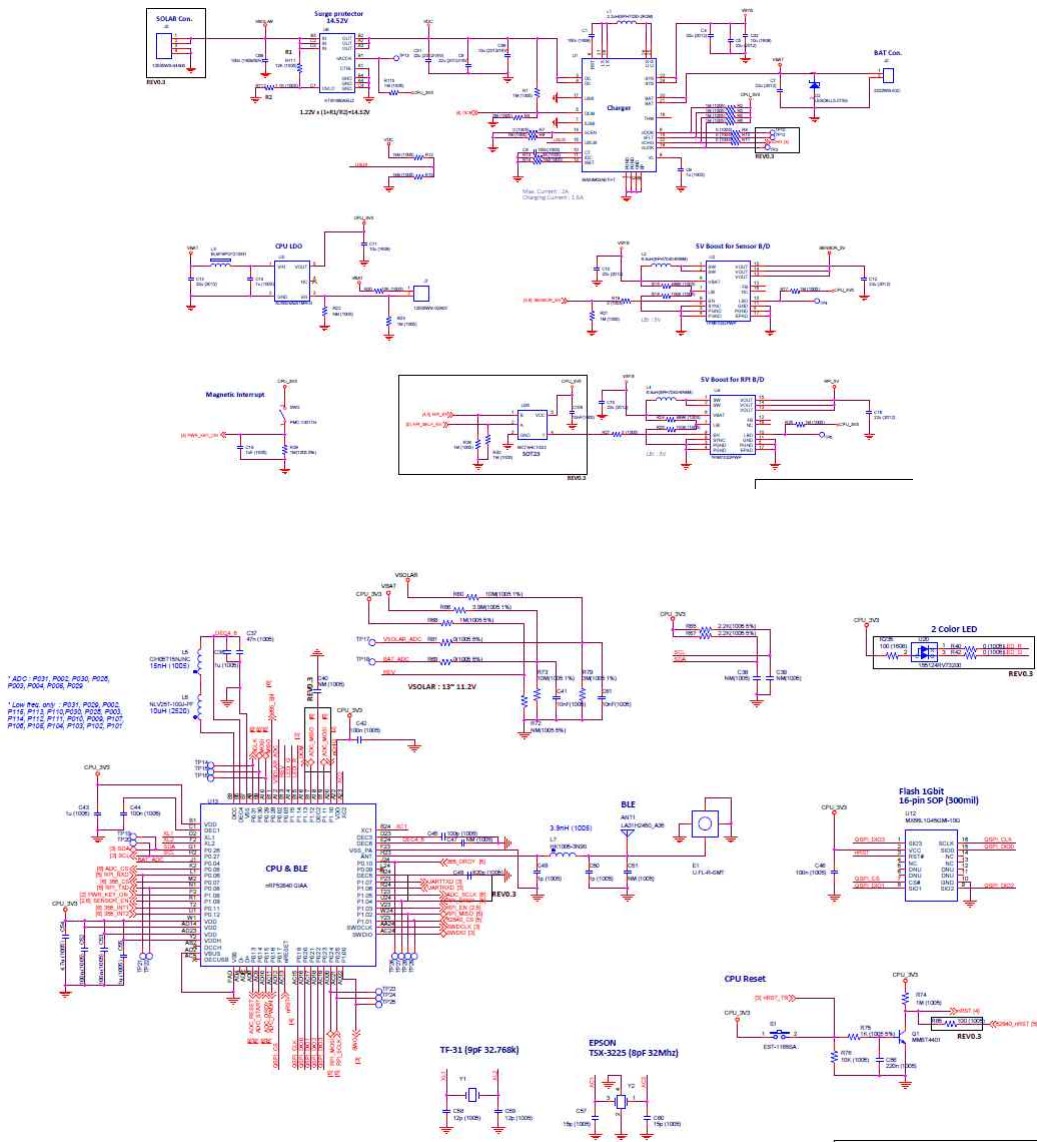


그림 3.12 센서 회로 설계도

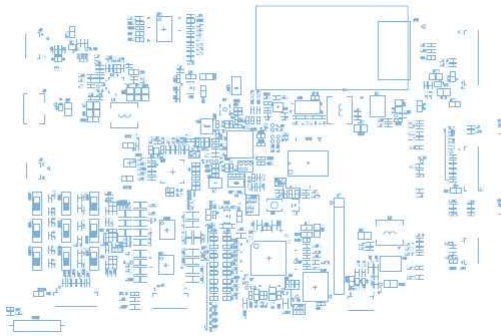
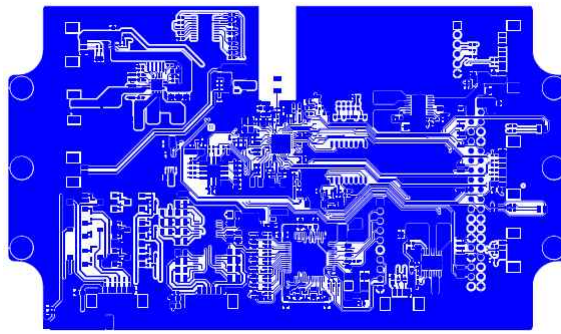


그림 3.13 PCB 설계(안)

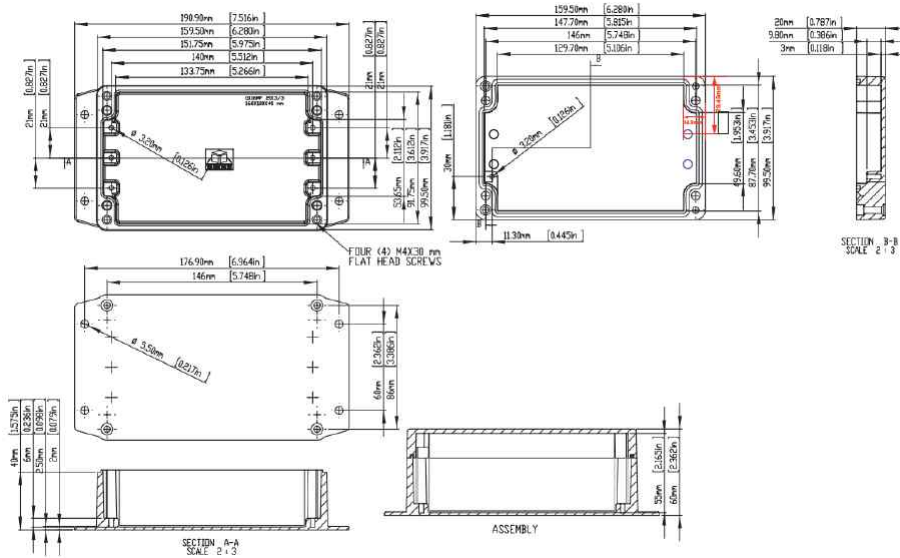


그림 3.14 케이스 규격

시험 성적



	송담인증센터(주) 경기도 용인시 처인구 포곡읍 금어로 419 Tel: +82-31-333-3220, Fax: +82-31-624-8855	성적서 번호: SDCC-2023-00424 페이지 (1)/(총 12)
--	-------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------

성적서번호: SDCC-2023-00424

1. 신청자

상 호 명 : ㈜이노온
 주 소 : 서울특별시 마포구 백범로 199 515호
 의뢰일자 : 2023-12-07

2. 제조자

상 호 명 : ㈜이노온
 주 소 : 서울특별시 마포구 백범로 199 515호

3. 시험성적서의 용도 : 품질관리용
 4. 시험대상품목/ 모델명 : Ino-Vibe GB / Mgi-600
 5. 시험기간 : 2023-12-14 부터 2023-12-15 까지
 6. 시험장소 : 고정시험실 현장시험
 (주소: 경기도 용인시 처인구 동부로 61)
 7. 시험방법 : KS C IEC 60529:2013
 8. 시험환경 : 온도: (21.0 ± 5.0) °C, 습도: (45.0 ± 10.0) % R.H.,
 기압: (99.0 ± 5.0) kPa
 9. 시험결과 : IP65 (2.1.4절 시험결과 참조)

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에만 한정됩니다.
 위 성적서는 송담인증센터(주)의 서면동의 없이 무단전제 및 복사를 할 수 없습니다.

확인	실무자: 성 명: 김	기술책임자: 성 명: 손
----	----------------	------------------

위 성적서는 KOLAS 인정과 관련이 없습니다.

2023-12-21

송담인증센터(주)대표이사 (인)



위 성적서의 진위 확인이 필요할 경우, 상기 연락처로 연락하시기 바랍니다.

그림 3.15 IP65인증서

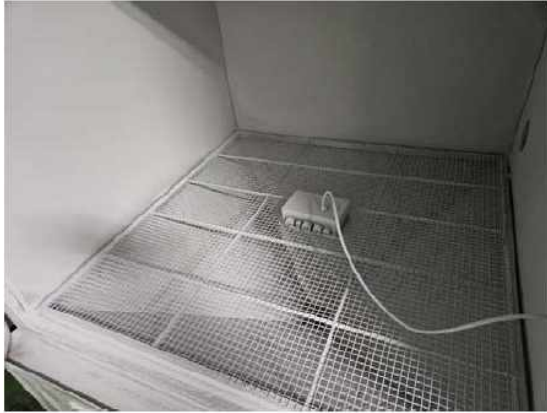


그림 3.16 IP65 시험 후 시험품 사진

2.2 시제품 제작 및 검증

제작된 시제품 PCB 보드와, 시제품은 그림 3.17과 같으며, 시제품의 가속도 계측 성능을 검증하기 위하여, 기존 가속도 계측 신호와 시간, 주파수 영역에서 비교하여, 시제품의 계측 정확도를 검증하였다. 실험 결과 시간영역에서의 두 신호의 상관성은 약 0.93으로 확인되었으며, 차이의 원인은 정확한 시간동기화가 되지 않아 발생하는 것으로 판단된다. 주파수영역에서는 두 신호의 고유진동수는 3.60Hz로 동일하게 추정되었다(그림 3.18).

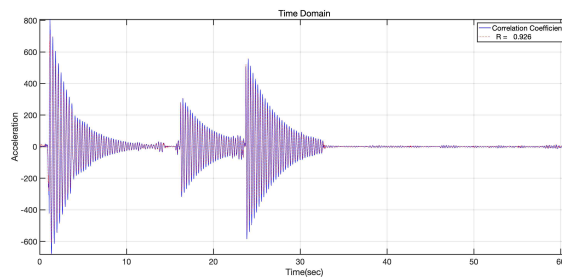


PCB 보드

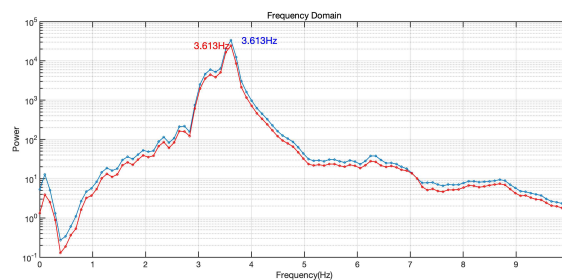


시제품

그림 3.17 완성된 PCB 보드와 시제품



Time Domain



Frequency Domain

그림 3.18 시제품 검증 결과

제작된 시제품에 개발된 알고리즘을 탑재하여 침투 추출에 소요되는 시간을 측정하여 시

작품의 성능을 검증하였다. 수집된 가속도 데이터로부터 데이터의 전처리, 계측 데이터의 주파수 영역 변환, 침투 추출에 소요되는 시간은 약 0.7초로 확인되었다(그림 3.19). 임베디드 결과 작성된 알고리즘의 목적 중 하나인 연산 소요시간에 대한 검증을 완료하였다.

```
After file open: 1.906299999987482e-05
# of Datasets: 50
# of low: 60000
After file open: 3.59010900300000002
before detrend: 3.596178535
After detrend: 6.627956988999999
After 2nd detrend: 6.7712171439999995
After Welch's: 6.919955377000001
After ampd: 7.089214645
After MAD: 7.325965268999999
[ 4 20 29 44 58 73 87 102 116 126 145 159 174 188 203 217 231 248
259 272 288 296 305 321 345 369 407 508 712]
Done!!! 7.328148968000001
From after 1st detrend 0.6880868769999999
```

그림 3.19 알고리즘 Embedded 결과

3. 시작품 현장 적용

3.1 현장 적용을 위한 대상교량 선정

현장 적용을 위해 현수교와 사장교를 각각 1개소 씩 선정하였다. 시작품의 현장 적용의 목적은 1) 기 설치된 유선 계측시스템과 동일한 위치에 설치하여 개발 시작품의 정확도를 검증하고, 2) 시작품의 운영과정에서 발생하는 문제점을 통해 개선 사항을 도출하여, 차년도에 시제품 제작에 반영, 3) 사장교 케이블에 최적화된 알고리즘을 확장을 고려하여 대상 교량을 선정하였다. 대상 교량은 총 2개소로 현수교와 사장교 각각 1개소를 선정하였다.

현수교는 전라남도 여수시 묘도동과 광양시 금호동을 연결하는 길이 약 2,260m의 이순신대교를 선정하였다. 이순신대교에는 총 16개의 유선 계측 시스템 기반의 케이블 가속도계가 설치되어 있으며, 상시 계측을 통해 데이터를 수집 중이다. 사장교는 이순신대교와 동일한 노선 상에 있는 여수시 월내동 국가산업단지과 여수시 묘도동 사이를 잇는 길이 1,410m의 묘도대교를 선정하였다. 묘도대교에도 이순신대교와 동일하게 케이블 장력 측정을 위한 유선계측시스템 기반의 케이블 가속도계가 16개가 설치되어 운영 중 이다.



그림 3.20 현장 적용 대상 교량

표 3.2 이순신대교 상세

구 분	내 용		구 분	내 용	
시설물명	이순신 대교		준공년월	2013년 04월	
도로구분	산단간 진입도로		설계속도	60km/hr	
위 치	전라남도 여수시 묘도동 ~ 전라남도 광양시 금호동				
설계하중	DB-24, DL-24		교령형식	3경간 대형 타정식 현수교	
제 원	연 장	L=357.5 + 1,545 + 357.5 = 2,260m (주경간 : 1,545m)			
	폭	B=25.7m (연석포함 왕복 4차로)			
구조 형식	보강 거더	트윈박스 거더	구조	AN1	지중정착식 앵커리지 (수직터널:31m, 수평터널:72m)
	주 탑	H형 콘크리트 H=270m	형식	AN2	중력식(지중연속벽_Dia.70m)

표 3.3 묘도대교 상세

구 분	내 용		구 분	내 용	
시설물명	묘도대교		준공년월	2013년 02월	
도로구분	지방부 보조간선도로		설계속도	60km/hr	
위 치	전라남도 여수시 묘도동 ~ 전라남도 여수시 삼일동				
설계하중	DB-24, DL-24		교령형식	강합성 사장교	
제 원	연 장	L=60 + 105 + 430 + 105 + 60 = 760m (주경간 : 430m)			
	폭	B=25.9m (왕복 4차로)			
구조 형식	보강 거더	2개의 정착거더와 Edge 거더를 잇는 강합성형	구조	케이블	MS Type의 2면 케이블
	주 탑	H형 콘크리트 PY1 : 169.6m PY2 : 173.3m	형식	교각	중공형 구주교각

3.2 시작품 현장 적용

제작된 시작품을 각각 2개씩 교량에 설치를 계획하였으며, 설치 위치는 기존의 유선 계측 시스템 설치된 위치와 유사한 위치로 선정하였다. 계측기의 설치 위치는 그림 3.21과 3.22와 같이 배치하였으며, 모든 시작품은 여수에서 광양으로 진행되는 방향에 설치하였다. 시작품은 3축 가속도 계측데이터를 100Hz로 24시간 계측 가능하도록 설정하였다. 수집된 데이터는 원활한 데이터 전송을 위하여 10분 단위로 저장, 분석 결과를 전송하도록 설정하였다. 시작품의 성능 검증이 주목적이기 때문에, 침두 추출, 장력, 감쇠비 정보 외에 원시데이터의 수집도 계획하였다. 전송되는 정보가 많아, 안정적인 전원 공급을 위하여 태양광 패널을 설치하였다. 추후 상용화 될 제품은 전력과 통신 용량에 대한 부분을 최적화 할 예정이다. 또한, 태양광 패널로 충전되는 전력량이 부족할 경우를 대비하여, 내부 배터리를 추가로 설치하였으며, 이를 통해 전력이 공급되지 않더라도 약 2일 정도 배터리만으로도 운영이 가능하도록 설계하였다.

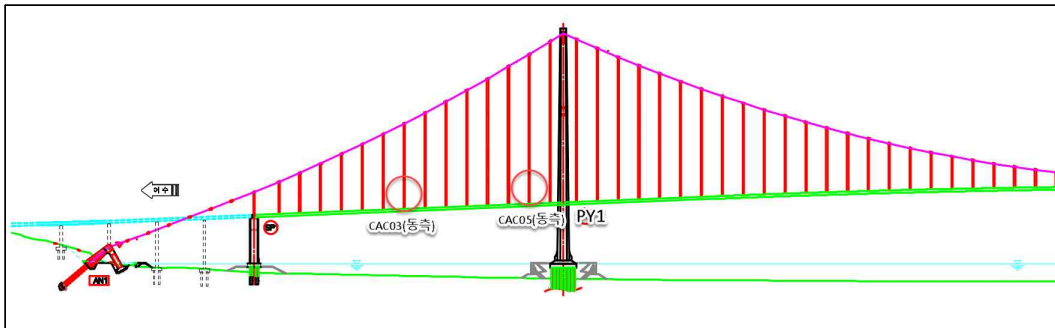


그림 3.21 이순신대교 시작품 설치위치

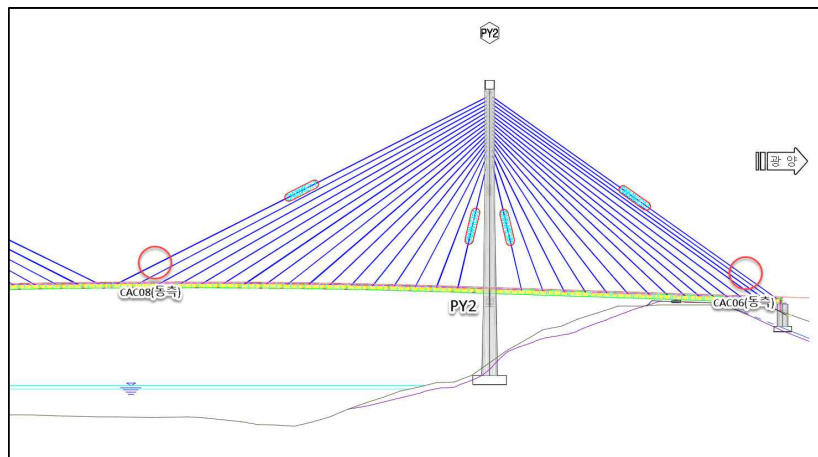


그림 3.22 묘도대교 시작품 설치위치

이순신대교



설치중(보호박스 및 고정)

묘도대교



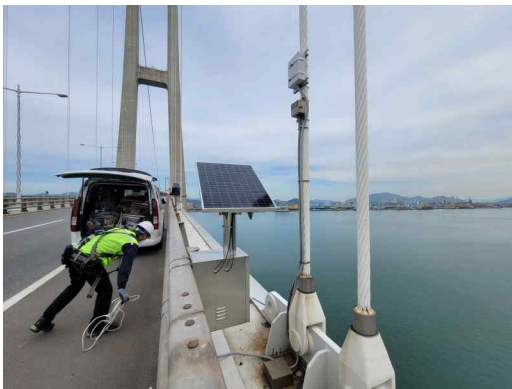
센서 및 보호관 설치 완료(CAC08)



센서 및 솔라시스템 설치완료(CAC05)



센서 및 솔라시스템 설치완료(CAC06)



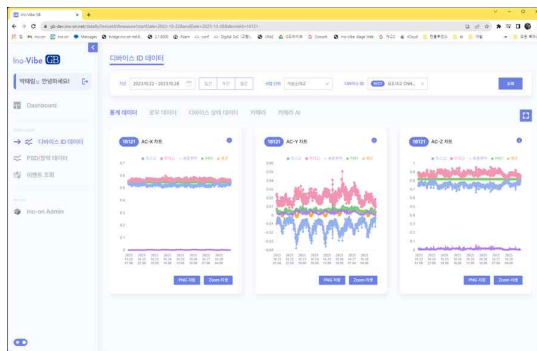
센서 및 솔라시스템 설치완료(CAC03)



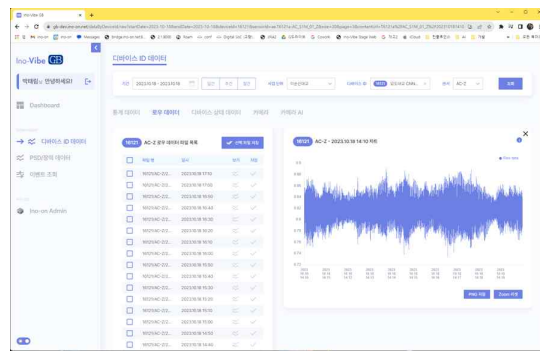
센서 및 솔라시스템 설치완료(CAC06)

그림 3.23 시작품 현장 적용을 위한 설치

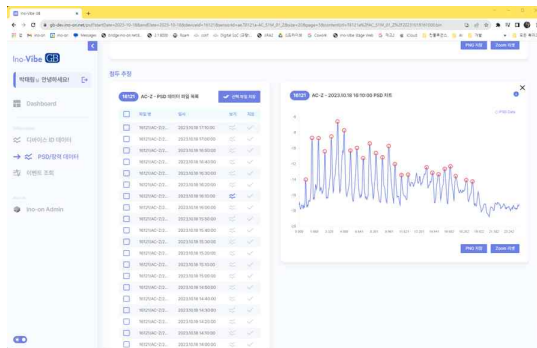
전송하는 데이터의 종류는 원시 데이터, 침두 위치 추정 결과, 장력, 감쇠비 계산 값 등의 정보를 모두 전송을 하고 있다. 또한, 센서 내부의 온·습도, 태양광 충전량, 배터리의 성능 등의 정보를 통해 운용 중에 발생하는 센서의 문제를 파악하기 위한 상태 정보 수집한다. 수집된 정보를 확인하기 위하여 그림 3.24와 같이 정보를 확인할 수 있는 Platform을 구축하였다. Platform에서는 수집된 정보 외에도, 시작품의 계측 주기, 축 설정 등의 계측 상세를 설정할 수 있다. 시작품의 상태를 주기적으로 관찰하여, 운용 중에 발생하는 문제를 확인하고, 문제에 대한 개선 방안 도출에 활용할 예정이다.



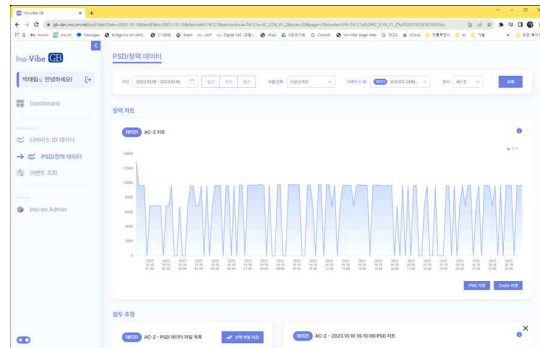
통계 데이터



원시 데이터



침두 추출 결과



장력 추정 결과

그림 3.24 시작품 데이터 확인을 위한 Platform

3.3 데이터 분석 및 검증

묘도 대교에서 유선계측시스템과 IoT 계측시스템으로부터 수집된 데이터를 주파수 영역으로 변환 후 데이터의 정확도를 검증하기 위한 비교를 수행하였다. 비교 결과, 주파수 영역에서의 두 신호의 상관계수는 0.957로 확인되었으며, 정확하게 일치하지 않는 원인은 필터의 설정, 시간 차 등으로 판단된다. 또한, 두 신호로부터 추정된 침투 결과로부터 계산된 장력 값은 기존 계측시스템은 6,889KN, 시제품은 6,816KN으로 확인되었으며, 오차는 약 1.1%로 확인되었다.

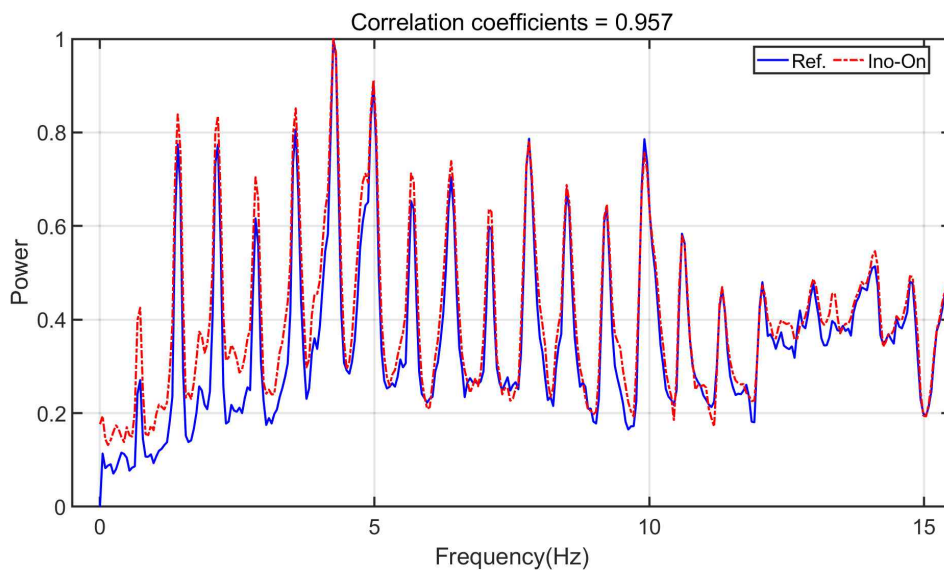


그림 3.25 묘도대교 시제품 검증 결과(Frequency Domain)

이순신대교의 장력 추정 결과는 탑재된 알고리즘은 기존의 사장교 기반으로 작성되어, 현수교의 케이블의 침투 추출의 정확도가 낮은 문제점을 확인하였다(그림 3.26). 수집된 데이터와 기존 현수교의 케이블 가속도 데이터를 기반으로 현수교에 적합한 알고리즘의 개선이 필요한 것으로 판단되었다. 차년도에 문제점을 면밀히 파악하여 알고리즘 수정 및 개선을 통해 현수교에 적합한 알고리즘을 작성하여 탑재할 예정이다. 또한, 시제품 운영 중 발생하는 문제점을 파악하고, 개선사항을 정리하여 시제품 설계, 알고리즘 개선 등에 활용할 예정이다.

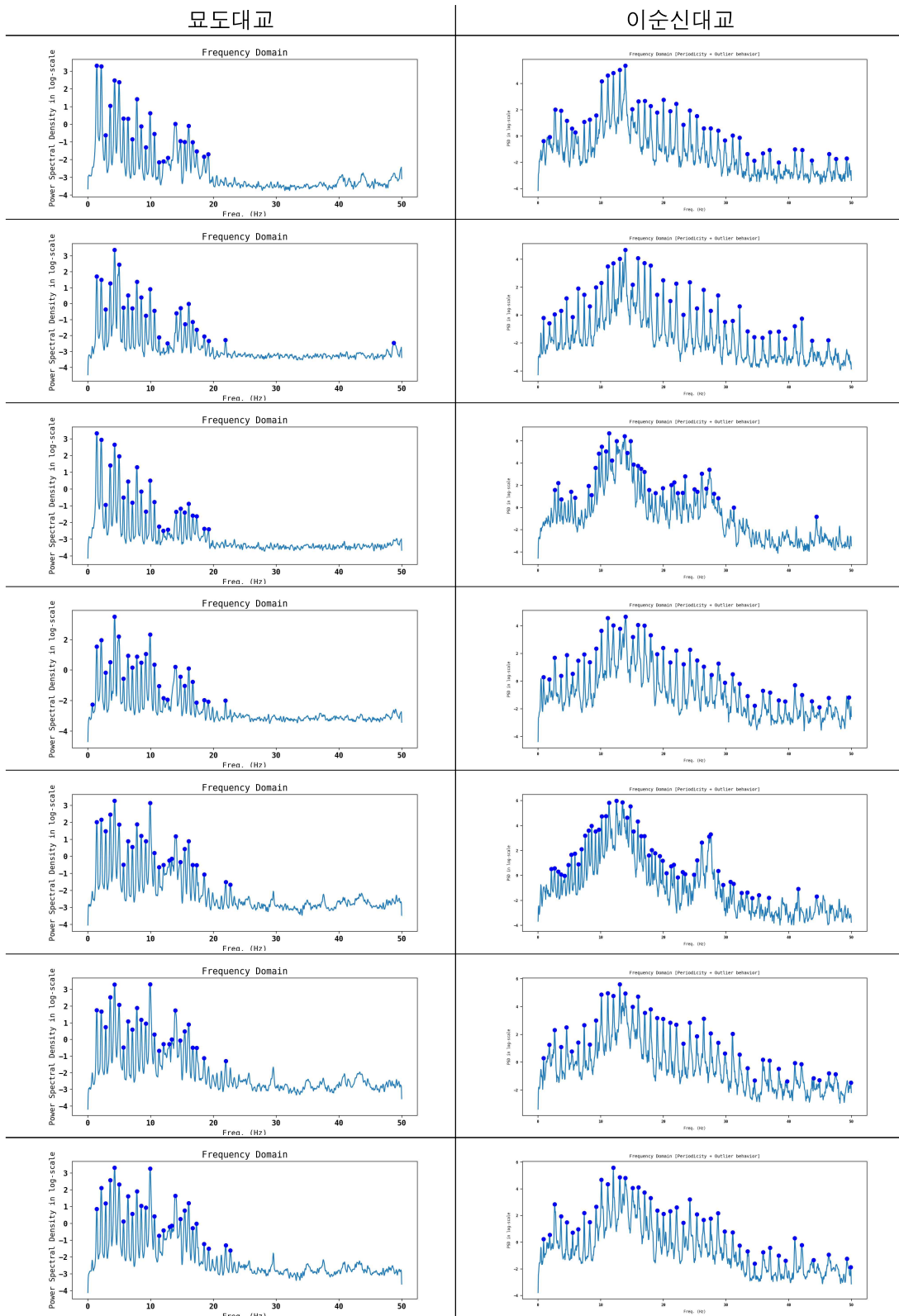


그림 3.26 시작용 침두 추출 결과

제4장

결론 및 파급효과

1. 결론

본 연구는 특수교량의 주 부재인 케이블의 효율적인 모니터링을 할 수 있는 기술 개발을 목적으로 한다. 케이블 교량을 효율적으로 모니터링하기 위하여, 정확도가 높으면서, 자동화가 가능한 알고리즘 개발, 개발된 알고리즘을 탑재하여 운영할 수 있는 IoT 센서 제작, 제작된 센서를 현장 적용하여 검증하는 것을 목적으로 수행되었다.

본 연구에서는 케이블 자율 모니터링 시스템 구현을 위하여 데이터 품질 향상, 이상상태 감지, 케이블 장력, 감쇠비 추정 등의 기능 구현이 가능한 알고리즘을 작성하였다. 장력 추정을 위한 방법은 진동법을 이용하였으며, 기존 인력 위주의 첩두 추출 방법을 도메인 기반의 정보를 통해 완전 자동화가 가능한 알고리즘을 작성하였다. 작성된 알고리즘은 IoT 센서에 탑재할 수 있도록 작성하였으며, 알고리즘이 효율적으로 운영될 수 있도록 PCB 보드와 센서에 적합한 구성품이 구동하도록 설계 및 제작을 완료하였다. 시제품은 현수교와 사장교 각각 1개소에 적용하여 알고리즘의 정확도와 센서의 운영 상태 등을 모니터링을 진행하고 있다.

본 연구에서 제작된 시제품은 실내·외 실험을 통해 센서, 알고리즘 등의 정확도를 확인하였으며, 시제품 운영을 통해 발생하는 문제점들을 정리 및 분류하고 있다. 문제점 개선을 통해 차년도에 시제품의 기능을 개선을 통해 완성도 높은 제품을 제작할 예정이다.

본 연구에서 제안되어 성능이 검증된 케이블 자율 모니터링 시스템 기술이 특수교의 주부재인 케이블 교량의 효율적인 모니터링에 활용되길 기대한다.

2. 기술 · 경제 · 사회적 파급효과

가. 과학 · 기술적 기대효과

- 대용량, 실시간 데이터 처리가 필요한 환경에서의 IoT 기술 적용을 위한 최적 방안 제시
- 기존의 IoT 계측기술을 적용하기 어려웠던 대용량, 실시간 데이터 처리가 필요한 대상물에 Edge-Computing 기반의 IoT 센서를 적용함으로써 최적 계측 시스템 구축
- 데이터 처리 및 분석 기술 고도화를 통한 IoT 기술 확산 및 활용 범위 확대

나. 경제적 파급효과

- 예방적 유지관리 지원을 통한 시설물 공용 효율성 개선 및 사회비용 절감
- 기존에 안전관리에 취약했던 시설물에 대해서도 경제적으로 안전관리가 가능하여 사회기반시설물 및 다양한 사업 분야의 시설물과 설비를 보다 효율적으로 사용이 가능
- 예방적 유지관리를 지원함으로써 안전사고를 사전에 예방하여 사회적 비용 절감 가능

다. 사회적 파급효과

- 건설인력 노령화와 출산율 저하로 인한 노동인력 부족 등 급격한 사회변화에 대한 건설산업의 선제적 대응이 요구되며, 이러한 대응책 중 하나로 건설 산업 구조 혁신과 고부가가치 산업으로의 육성이 필요함(노동집약적 산업 → 장비·기술집약적 산업)
- IoT 계측기술을 이용하여 관심 시설물을 상시 모니터링함으로써, 붕괴와 같은 재난재해를 사전에 신속히 감지할 수 있기 때문에 시설물 이용자의 안전을 확보하고 불안감을 해소시킬 수 있음

참고문헌

국토교통 R&D 동향조사

한국시설안전공단, 2016.12, “ 특수교 계측시스템 설치 및 운영 요령(안)”

국토교통부 국토교통과학기술진흥원, 2019.12, “LoRa LPWAN 센서네트워크 및 Big Data플랫폼 기반의 무선 교량 유지관리시스템개발 최종보고서”

김혜진, et al. “스마트 IT 융합 플랫폼을 위한 지능형 센서 기술 동향.” 전자통신동향분석 34.5 (2019): 14-25.

Jin et al. (2018), Vibration-based damage detection using online learning algorithm for output-only structural health monitoring, Struct. Health Monit. Vol. 172

Jin et al. (2021), Fully automated peak-picking method for an autonomous stay-cable monitoring system in cable-stayed bridges, Autom. Constr. Vol. 1263

Scholkmanm et al. (2012), An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals, Algorithms, Vol. 54

Rousseeuw et al. (1993), Alternatives to the median absolute deviation, J. Am. Stat. Assoc. Vol. 885

Schulze et al. (2012), A small-window moving average-based fully automated baseline estimation method for Raman spectra, Appl. Spectrosc. Vol. 666

Jeong et al. (2020), Automated wireless monitoring system for cable tension forces using deep learning, Struct. Health Monit. Vol. 207

서지자료

1. 출판물 고유번호 KICT 2023-109	2. 사업분류 중소·중견기업 지원사업	3. 발행일 2022. 12. 31.	
4. 제목/부제 Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구		5. 연구수행기간 2023. 1. 1. ~ 2023. 12. 31.	
6. 연구수행기관 한국건설기술연구원		7. 연구 수행자 박영수, 이상윤, 서동우, 민지영, 진승섭	
8. 수행기관 주소 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283		9. 연구의뢰기관 및 주소 해당없음	
10. 공동 수행기관 해당없음		11. 계약 또는 인가번호 해당없음	
12. 초 록 본 연구는 특수교량의 주 부재인 케이블의 효율적인 모니터링을 할 수 있는 기술 개발을 목적으로 한다. 케이블 교량을 효율적으로 모니터링하기 위하여, 정확도가 높으면서, 자동화가 가능한 알고리즘 개발, 개발된 알고리즘을 탑재하여 운영할 수 있는 IoT 센서 제작, 제작된 센서를 현장 적용하여 검증하는 것을 목적으로 수행되었다. 본 연구에서는 케이블 자율 모니터링 시스템 구현을 위하여 데이터 품질 향상, 이상상태 감지, 케이블 장력, 감쇠비 추정 등의 기능 구현이 가능한 알고리즘을 작성하였다. 장력 추정을 위한 방법은 진동법을 이용하였으며, 기존 인력 위주의 침투 추출 방법을 도메인 기반의 정보를 통해 완전 자동화가 가능한 알고리즘을 작성하였다. 작성된 알고리즘은 IoT 센서에 탑재할 수 있도록 작성하였으며, 알고리즘이 효율적으로 운영될 수 있도록 PCB 보드와 센서에 적합한 구성품이 구동하도록 설계 및 제작을 완료하였다. 시작품은 현수교와 사장교 각각 1개소에 설치하여 알고리즘의 정확도와 센서의 운영 상태 등을 모니터링을 진행하고 있다.			
13. 키워드 IoT 센서, 케이블 모니터링, 장력&감쇠비, 엣지컴퓨팅, 완전 자동화			
14. 기타사항 해당없음			
15. 비밀구분 Unclassified	16. 총면수 49쪽	17. 발행부수	18. 가격

Bibliographic Data

1. Report ID KICT 2023-109	2. Project Classification SMEs Support Project	3. Report Date December 29, 2023	
4. Title Development of Autonomous Cable Monitoring System based on Domain Knowledge with Edge Computing		5. Research Period Jan. 1, 2023 ~ Dec. 31, 2023	
6. Performing Organization Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology		7. Authors Park, Young-Soo · Lee, Sang Yoon · Seo Dong-Woo · Min, Jiyoung · Jin Seung-Seop	
8. Performing Organization Address 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea		9. Sponsoring Agency None	
10. Co-performing Organization None		11. Contact No. None	
12. Abstract <p>The purpose of this study is to develop a technology that can efficiently monitor cables, which are the main members of cable bridges. In order to efficiently monitor cable bridges, the purpose of the project was to develop an algorithm that can be automated with high accuracy, to manufacture an IoT sensor that can be operated with the developed algorithm, and to apply and verify the manufactured sensor in the field.</p> <p>In this study, an algorithm was prepared that can implement functions such as data quality improvement, abnormal signal detection, cable tension, and damping ratio estimation for the implementation of the cable autonomous monitoring system. The method for estimating tension was the vibration method, and an algorithm that can be fully automated through domain-based information was created from the existing manpower-oriented peak estimation method. The algorithm was written so that it could be mounted on the IoT sensor, and it was designed and manufactured so that the PCB board and components suitable for the sensor can be operated efficiently. The prototype is installed at one suspension bridge and one cable-stayed bridge to monitor the accuracy of the algorithm and the operation status of the sensors.</p>			
13. Keywords IoT Sensor, Cable-monitoring, Tension force & Damping Ratio, Edge-computing, Fully-automation			
14. Supplementary Notes None			
15. Security Class Unclassified	16. No. of Pages 49 Pages	17. Circulation	18. Price

주의사항

1. 본 보고서는 우리 연구원이 중소·중견기업 지원 사업으로 수행한 자체 연구성과로서 정부의 정책이나 견해와는 다를 수도 있습니다.
2. 본 보고서의 내용을 인용할 경우 반드시 출처를 밝혀주시기 바랍니다.
3. 무단복제는 절대 금하며, 저작권 관련법규에 의해 처벌을 받을 수 있습니다.

Edge computing을 활용한 도메인 지식 기반 자율 케이블 모니터링 시스템 구현 연구

- 사업자등록번호/229-82-01135
- 발행일/2023. 12. 29.
- 발행처/한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
TEL : (031) 9100-114
www.kict.re.kr
- 인쇄처/ 카피코