

무선 전력
통신 계측
기반 장비
개발의
9축 자유도
손실방지를
위한
원거리
활용한
장력
센서
모듈을
활용한

사장교 케이블장력 손실방지를 위한 원거리 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력 계측장비개발

최종보고서(안)

2020. 12. 31.

주관연구기관 / (주)구주엔지니어링

2020

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 (국토교통과학기술진흥원장) 귀하

‘사장교 케이블장력 손실방지를 위한 원거리 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력계측장비개발’ (연구개발 기간 : 2018.04.17. ~ 2020.12.31.) 과제의 최종보고서(안) 10부를 제출합니다.

2020. 12. 31.

주관연구기관명 : (주)구주엔지니어링 (대표자) 이 현 철 (인)

주관연구기관책임자 : 이 현 철

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C143275-03	해당 단계 연구 기간	2018. 04. 17 - 2020. 12. 31.	단계구분	3 / 3
연구사업명	중사업명	국가연구개발사업			
	세부사업명	국토교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	사장교 케이블장력 손실방지를 위한 원거리 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력계측장비개발			
연구책임자	이 현 철	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:200,000천원 민간: 67,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:267,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	총 연구비	정부:600,000천원 민간:201,000천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:801,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	(주)구주엔지니어링			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록· 기탁 번호	1	4				4					

- 기존의 사장교 케이블 유지관리 방법을 분석한 후 사장교 케이블에 적용 가능한 스마트 센서 및 통합시스템을 구성하여 새로운 유지관리 방법을 제시한다.
- 스마트센서는 정확도가 높고 측정하고자 하는 값을 쉽고 빠르게 측정할 수 있으며 상대적으로 가격이 저렴하며 다종의 센서들을 단일 프로세스로 처리하여 통합 시스템을 구성한다.
- 스마트센서는 가속도계, 지자기계, 자이로계, 무선통신 프로토콜, 온도계 등으로 구성되며 통합시스템으로는 오픈소스 기반의 아두이노를 선정하여 스마트 센서의 프로그램의 운용 및 처리를 극대화 할 수 있는 사용자 편의성을 대폭 개선한 시스템을 구성한다.
- 본 연구목표의 근거는 현재 사장교 케이블의 유지관리 운영상태를 바탕으로 연구기간, 연구비, 연구자의 역량 및 자료수집 등의 제한 등을 종합적으로 고려한 목표달성이 가능한 범위내에서 설정하였다.

보고서 면수

218 면

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	기존의 사장교 케이블 유지관리 방법을 분석한 후 사장교 케이블에 적용 가능한 스마트센서 및 통합시스템을 구성하여 새로운 유지관리 방법을 제시한다. 스마트센서는 정확도가 높고 측정하고자 하는 값을 쉽고 빠르게 측정할 수 있으며 상대적으로 가격이 저렴하며 다종의 센서들을 단일 프로세스로 처리하여 통합시스템을 구성한다. 사장교 케이블 유지관리전용 계측장비는 3차년도에 걸쳐 연구가 진행되며 1차년도에는 시제품제작, 2차년도에는 시제품에 대한 실내시험, 3차년도에는 시제품에 대한 현장검증을 진행하여 국내 사장교 케이블 유지관리기술뿐 아니라 국외 사장교 케이블 유지관리기술개발에 기여하여 사장교 케이블 유지관리 기술수준을 향상시키고자 한다.				
연구개발성과	현재 국내 서남해안의 섬과 육지를 잇는 사장교가 건설중이거나 계획중에 있으며 해외에서도 사장교의 건설이 다수 진행되고 있어 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세이다. 케이블의 장력, 변위 및 온도에 대한 통합계측시스템을 구성하므로서 국내 및 국외에 건설된 사장교 케이블의 유지관리를 위한 장비로서 특허등록 및 제품화가 완성되면 국내 내수 및 국외수출이 가능할 것으로 추정된다.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	사장교 케이블 유지관리 시스템의 제품화는 상용중인 스마트 센서들을 프로그래밍하여 하드웨어 및 소프트웨어 패키지로 제품화 한다. 스마트 센서 제조사와 판매공급계약을 체결하여 제품화 이후 양산에 대한 pilot생산을 실시하고 양산 유효성에 대한 시험은 국내 공인인증기관을 통해 완성품의 품질확인을 실시한다. 양산제품의 마케팅방법으로는 사장교 케이블을 유지관리하는 주체에 대해서 시연회, 설명회 등을 개최하여 마케팅을 실시하고 시연회 및 설명회 결과값 등을 기초로 한 논문을 국내 및 해외 학회 등에 게재하여 판로를 개척한다.				
핵심어 (5개 이내)	케이블장력	변형	온도	지그비	센서모듈

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	After analyzing the existing maintenance method for cable of the cable-stayed bridge, configure a new maintenance method by organizing the deployable sensors and the integrated systems that are applicable to the cable. Smart sensors can be accurate and quick to measure and measure the values they want to measure, relatively inexpensive, and implement multiple sensors in a single process, dealing with multiple sensors. Measurement equipment for cable-stayed bridge maintenance is performed throughout the third year, and in the first year, prototypes for prototypes for prototype prototypes and in the second year lab test for prototypes and in the third year site test for prototypes will be conducted to enhance the maintenance of overseas cable maintenance cables as well as domestic cable maintenance for cable maintenance.					
Results	Currently, the construction of a cable-stayed bridge on the southwestern coast of the southwestern coast is under construction, and the construction of a cable-stayed bridge is underway. As equipment for maintenance of cable-stayed bridge in Korea and overseas, the integrated measuring system for tension, displacement, and temperature of cables is constructed, it is estimated that domestic consumption and overseas export will be possible once the registration register and products are completed.					
Expected Contribution	The commercialization of the cable maintenance system is programmed by programming the commercially available smart sensors into hardware and software packages. After signing a sales contract with the manufacturer of the Smart Sensor, conduct a production of pilot production for mass production and test the validity of the finished product through the certification authority. The marketing method for mass production products is conducted by holding a demonstration and presentation of a demonstration of the cable-stayed bridge and conducting a demonstration, and publishes a market based on the presentation by presenting a thesis based on demonstrations and briefing results on the domestic and overseas academic institutes.					
Keywords	Cable tension	Displacement	Temperature	Xbee	Sensor Module	

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	5
3. 연구수행내용 및 성과	6
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	124
5. 연구개발성과의 활용 계획	127
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	128
7. 연구개발성과의 보안등급	128
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	128
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	128
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	129
11. 기타 사항	130
12. 참고 문헌	130

제1장. 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 배경 및 필요성

1. 연구개발 목적

- 기존의 사장교 케이블 유지관리 방법을 분석한 후 사장교 케이블에 적용 가능한 스마트센서 및 통합시스템을 구성하여 새로운 유지관리 방법을 제시한다.
- 스마트센서는 정확도가 높고 측정하고자 하는 값을 쉽고 빠르게 측정할 수 있으며 상대적으로 가격이 저렴하며 다종의 센서들을 단일 프로세스로 처리하여 통합시스템을 구성한다.
- 스마트센서는 가속도계, 지자기계, 자이로계, 무선통신 프로토콜, 온도계 등으로 구성되며 통합 시스템으로는 오픈소스 기반의 아두이노를 선정하여 스마트 센서의 프로그램의 운용 및 처리를 극대화 할 수 있는 사용자 편의성을 대폭 개선한 시스템을 구성한다.

2. 연구개발의 필요성

- 기존의 사장교 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS를 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치함으로써 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 변형특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있었다. 본 개발 기술은 이러한 미비점을 보완하고자 설치비용이 저렴한 초소형 스마트 센서를 단일 센서가 아닌 다중센서를 통합적으로 운용 관리할 수 있는 아두이노 기반의 케이블 유지관리 시스템을 개발하여 하드웨어 및 소프트웨어를 효율적으로 활용하고자 하였다.
- 개발대상기술은 제품화가 가능하여 상용화 할 수 있으며 기존기술 및 세계기준과의 비교를 할 때 사장교 케이블 유지관리 분야에 대해서는 최초로 적용한 사례이다. 본 개발대상기술이 성공적으로 이루어지면 향후 해상교량의 케이블 유지관리시 기술적, 경제적 우위성을 확보하는 데에 유리한 위치를 선정하게 된다.
- 개발기술은 케이블 유지관리 기술로서 케이블 점검시스템, 계측 및 모니터링 기술, 상태 평가 및 진단 기술로 분류되는 케이블 유지관리 기술 중에 케이블 계측 및 모니터링 기술에 해당되며 국내외 기술개발현황은 주요 사장교에 대해서 케이블의 구조적 응답을 대표하는 일부 개소에 센서를 설치하여 사장교 케이블에 대한 계측모니터링을 수행하고 있다. 국내에서의 정부정책방향은 제4차 국토종합계획에 따라 사장교 등의 해상교량의 건설이 진행 및 추진중에 있다. 향후 사장교 등의 해상교량이 다수 건설된다면 이에 대한 케이블 유지관리 시스템의 개발은 국내에서도 유지관리 시스템에 대한 체계적인 관리를 시행하고 있어 다수의 데이터가 누적되었으며 기술력의 진보가 이루어지고 있어 개발기술은 시공성 및 경제성이 우수하여 공용중인 사장교에 효율적으로 적용되리라 본다.

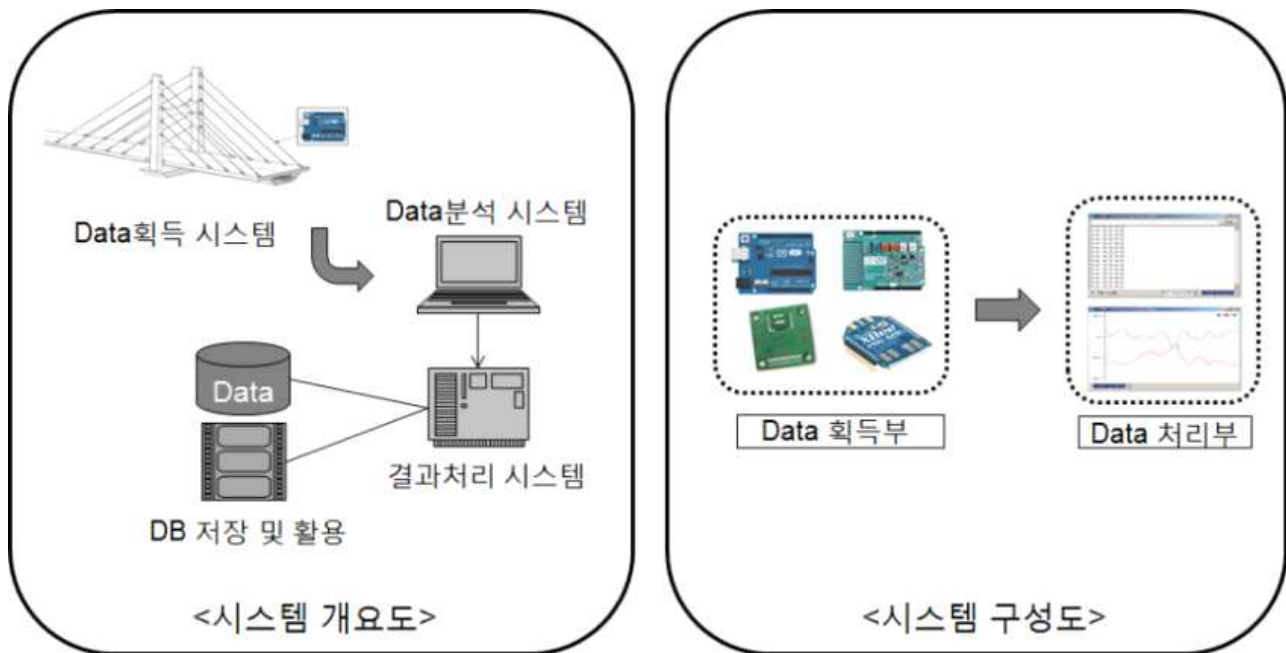
1.2 연구개발의 범위

① 연구개발 내용

- 사장교 케이블의 가속도, 지자기, 자이로, 무선통신, 온도를 측정할 수 있는 시험검증
- 사장교 케이블의 가속도, 지자기, 자이로, 무선통신거리 및 온도를 프로그래밍 할 수 있는 소프트웨어의 개발
- 사장교 케이블의 변형, 장력, 온도특성을 프로그래밍할 수 있는 통합시스템의 개발
- 향후 연차별 목표가 최종연구목표에 부합하도록 필요시 수정·보완하도록 조치한다.

② 연구개발 범위

아래 <그림 1>은 개발시스템의 개요도 및 구성도를 나타낸 것으로 사장교의 케이블을 시험체 규모로 제작하여 케이블의 가속도, 지자기, 자이로, 무선통신거리, 온도값에 대한 데이터 결과를 수집하여 케이블의 온도특성, 케이블의 장력특성, 케이블의 변형특성에 대한 프로세싱을 거쳐서 결과값을 텍스트, 표 및 그래프로 출력하는 형태로 나타낸다.



<그림 1> 개발시스템의 개요도 및 구성도

③ 실증실험 계획

- 3차년도 연구목표인 케이블의 온도특성 계측시스템을 개발하기 위하여 실증실험이 요구된다. 실증실험의 상세한 계획은 다음과 같다.
- 실험실규모로 케이블의 온도특성 시스템을 개발하고, 보도사장교 및 소·중지간의 사장교에 대해서 케이블의 온도특성 계측시스템을 확인한다.

④ 1,2차년도 연구내용 보완

- 1,2차년도 연구내용(케이블의 장력특성, 변형특성 계측시스템 개발)을 보완하기 위하여 다음의 연구활동을 실시한다.
 - 실험실규모의 사장교 모형체를 구축하여 케이블의 장력특성, 변형특성 계측시스템을 검증한다.
 - 보도사장교, 소·중지간 사장교에 대한 실험실증을 통해서 케이블의 장력특성, 변형특성 계측시스템의 정확도를 검증한다.
- 개발 장비의 성능에 대한 목표값 설정과 경제성 분석
 - 개발장비의 성능에 대한 목표값은 케이블의 장력계측 측정시스템의 결과값(측정장력값) 대비 90%이상의 정확도를 목표값으로 설정한다.
 - 개발장비에 대한 경제성 분석을 위해서 케이블의 장력계측 측정시스템의 구축에 소요되는 비용과 개발장비의 비용에 대해서 경제성을 확인한다.

⑤ 사업화계획 및 연구최종 성과목표

- 본 연구의 기술개발 성숙도는 실용화단계이나 다수의 현장 실증시험을 통해서 사업화단계를 목표로 한다. 사업화를 위해서 지식재산권 확보 및 현장적용의 다수의 실적을 확보하며 개발기술에 대한 홍보, 개발기술의 우수성을 달성하여 사업화를 이루도록 한다. 또한 연구 최종 성과목표로 시제품을 포함한다.

⑥ 9축센서데이터 활용방안(자이로, 지자기데이터)

- 9축센서의 자이로 및 지자기 데이터를 활용하여 케이블의 장력추정 및 케이블의 변형관리에 활용될 수 있도록 다수의 실증시험을 실시하여 케이블의 장력과 자이로 및 지자기 데이터의 상관관계 분석, 케이블의 변형과 자이로 및 지자기 데이터의 상관관계를 분석한다.

⑦ 계획 보완사항

- 연구목표 TRL 8단계를 달성하도록, 검증을 위한 대상교량(사장교)을 조속히 결정하고, 장력, 변형 및 온도특성 결과 검증이 필요하다.
연구기간내 연구목표(케이블의 장력, 변형, 온도특성)의 달성을 위하여 검증대상 교량에 대한 결정을 신속히 하기 위하여 시험체 결과의 분석을 실시하고 현장검증 대상교량을 신속히 결정하도록 한다.
- 기 등록된 S/W(장력, 변형 특성 등)에 대하여 가시화 프로그램 추가 개발 필요
기 등록된 소프트웨어는 케이블의 장력 및 변형특성을 텍스트 위주로 작성되었으므로 케이블의 모형 및 그래프형태로 가시화가 가능하도록 추가 개발을 진행한다.
- 본 연구 결과와 현재 공용중인 통합관리시스템 측정결과와 비교 분석 필요
본 연구를 통해서 도출된 결과와 현재 공용중인 통합관리시스템의 측정결과의 비교분석을 통해서 본 연구결과의 개발수준을 현재 공용중인 통합관리시스템의 기술수준이상으로 진행하도록 한다.

- 자이로와 지자기 센서의 측정결과에 대한 활용 방안을 구체적으로 기술 필요

자이로는 케이블의 변형상태를 3차원적으로 파악할 수 있으므로 케이블의 변형관리를 위해서 활용될 수 있다.

지자기 센서의 데이터와 케이블의 장력, 변형, 온도특성과의 관계를 분석하여 지자기 센서의 활용방안을 고려하도록 한다.

- 성과점검기준표에 온도특성 관련 연구결과 검증을 위한 성과지표 및 목표 추가 필요

시제품 케이블에 대해서 온도특성 연구결과를 검증할 수 있도록 성과지표 및 목표를 추가함.

- 기존 무선통신기술 통합모니터링시스템과 기술적·경제성을 분석하여 제시 필요

개발 무선통신기술과 기존 무선통신기술과의 기술적, 경제성에 대하여 분석결과를 제시한다.

- 개발중인 통합시스템에 대한 시험(인증) 계획 명시 필요

개발중인 통합시스템에 대한 시험 계획을 실증검증(보도교, 소지간 사장교, 중지간 사장교) 위주로 명시하였음.

- 전파법을 고려한 무선통신 송신전력 고려 필요

(현재 국내 2.4GHz 대역에서 +10dBm 이하로만 송신 가능)

전파법을 고려하여 무선통신 송신전력을 고려하여 연구를 수행한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

2.1 국내 기술개발 현황

현재 국내 서남해안의 섬과 육지를 잇는 사장교가 건설중이거나 계획중에 있으며 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있고 국내의 특이한 환경변화는 없는 상태이다. 국내에 건설된 사장교 케이블의 유지관리를 위한 장비로서 국내 내수시장은 형성될 것으로 추정되며 다수의 실적을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

국내 장대교량 시장은 다른 건설 분야와 마찬가지로 성장단계를 지나 성숙단계에 진입해 있으며 국도를 중심으로 많은 연륙·연도교 사업이 완공되었거나 시공 중에 있음. 앞으로의 케이블교량은 국도 상에 있는 기존 연륙·연도교와 연계한 섬연결지방도 사업이 주로 추진될 전망이다. 장대교량의 계획건수는 감소되겠지만, 장대교량의 시장규모는 현 상태를 유지할 전망이다. 이는 케이블교량의 기술발전으로 교량건설이 힘들던 지역에서 도전적으로 교량 건설이 추진되고, 개별 교량 길이가 지속적으로 늘어남에 따라 교량별공사비가 늘어나기 때문으로 판단된다. 또한 국내 케이블진동 모니터링기술은 영상기반 진동감지기술을 이용한 교량 모니터링 시스템이 적용되고 있다.

2.2 국외 기술개발 현황

현재 해외에서도 사장교의 건설이 다수 진행되고 있어 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세로서 국외의 특이한 환경변화는 없는 상태이다.

국외에 건설된 사장교 케이블의 유지관리를 위한 장비로서 해외의 특허등록 및 제품화가 완성되면 국외 수출이 가능할 것으로 추정되며 향후 다수의 수출실적을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

세계 건설 시장 지속 성장 2020년 약 \$85,000억으로 예상되며, 이중 도로 및 철도 분야는 중동, 아시아, 중남미 및 아프리카에서 대형 프로젝트 다수 추진되어 \$3,500억으로 예상된다. 국외에서는 GNSS기반 교량 모니터링 시스템이 적용되고 있다.

제3장. 연구수행내용 및 성과

3.1 연구개발 추진전략·방법

사장교 케이블 유지관리전용 계측장비는 3차년도에 걸쳐 연구가 진행되며 3차년도에는 시제품에 대한 실내시험 및 시제품에 대한 현장검증을 진행하여 국내 사장교 케이블 유지관리기술뿐 아니라 국외 사장교 케이블 유지관리기술개발에 기여하여 사장교 케이블 유지관리 기술수준을 향상시키고자 한다.

3.2 연구개발 추진체계

연구개발과제	
과제명	사장교 케이블장력 손실방지를 위한 원거리 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력계측장비개발

기 관 별 참 여 현 황			총인원 수
구 분	기관수	인원수	
산 업 계	1	5	5
대 학			
국공립(연)			
출 연 (연)			
기 타			

주 관 연 구 기 관
(주)구주엔지니어링

참 여 연 구 원
주관연구책임자 (이현철)외 4명

담당연구개발내용
-사장교 케이블 장력 계측장비 개발 및 유지관리방안 제공 -사장교 케이블 변형 계측장비 개발 및 유지관리방안 제공 -사장교 케이블 온도 계측장비 개발 및 유지관리방안 제공

참여기업

3.3 추진일정

구분	년도	세부 연구목표	세부 연구개발 내용	평가목표 및 착안점	가중치	추진일정			
						1분기 (1/4)	2분기 (2/4)	3분기 (3/4)	4분기 (4/4)
1차년도	2018	케이블의 장력측정 시스템개발	케이블의 장력측정 시스템개발 (실험실규모)	논문	40				
				특허	30				
				프로그램	30				
2차년도	2019	케이블의 변형측정 시스템개발	케이블의 변형측정 시스템개발 (실험실규모)	논문	40				
				특허	30				
				프로그램	30				
3차년도	2020	케이블의 온도측정 시스템개발	케이블의 온도측정 시스템개발 (실험실규모)	논문	35				
				특허	35				
				프로그램	30				

3.4 연구개발 연차별 성과

구분 (연도/단계)	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
1차 연도 (2018)	케이블의 장력특성계측 시스템개발 및 유지관리방안 제시	케이블의 시간이력에 따른 장력특성을 계측하여 분석하였으며 최적 유지관리시기 및 방법 제안	사장교 케이블의 장력을 측정할 수 있는 시험체를 제작하여 케이블의 시간이력에 따른 장력특성을 계측, 분석하여 그 결과물로 프로그램등록, 특허출원을 하였음.
2차 연도 (2019)	케이블의 변형특성계측 시스템개발 및 유지관리방안 제시	케이블의 시간이력에 따른 변형특성을 계측하여 분석하였으며 최적 유지관리시기 및 방법 제안	사장교 케이블의 변형을 측정할 수 있는 시험체를 제작하여 케이블의 시간이력에 따른 변형특성을 계측, 분석하여 그 결과물로 프로그램등록, 특허출원을 하였고 학술지 게재하였임.
3차 연도 (2020)	케이블의 온도특성계측 시스템개발 및 유지관리방안 제시	케이블의 시간이력에 따른 온도특성을 계측하여 분석하였으며 최적 유지관리시기 및 방법 제안	사장교 케이블의 온도를 측정할 수 있는 시험체를 제작하여 케이블의 시간이력에 따른 온도특성을 계측, 분석하여 그 결과물로 프로그램등록, 특허출원을 하였고 학술지 심사중임.

3.5 교량 케이블시스템의 모드변수에 관한 연구

1. 서론

최근 들어 장대교량의 건설에 현수교, 사장교 등과 같은 케이블이 주 요소인 교량 형식이 급증하고 있다. 이와 같은 구조물에서 케이블이 미치는 영향은 매우 크며, 케이블의 모드 특성이 전체 구조계에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 케이블은 거더에 가해지는 하중효과를 주탑으로 전달하는 캠버조절과 직결되고 전체 구조에서 중요한 부재로서, 가설시 가해지는 초기 장력과 시간이 지난 후 장력을 비교함으로써 교량의 노후 상태와 이상을 점검 할 수 있다(Choi, 1988). Chiko(1996) 등은 모드해석에 사용하는 커브피팅(Curve fitting)을 새로운 Direct Simultaneous Modal Approximation(DSMA) 방법으로 적용하여 고유진동수와 고유벡터의 신뢰성을 높이고자 전체 모드에 비선형 함수를 최소화 하여 모달 매개변수의 신뢰성을 검토하였다.

Cornwell et al (1999) 과 Elliott et al (1998) 등은 실내 모드해석으로 변수가 많은 장대 구조물을 가상실험 모달해석으로 모드 특성을 비교하여 최적의 센서위치에 의한 신뢰성과 교량의 진동특성을 측정하기 위해서 다수의 연구 방법을 제안하고 모드특성을 제시하였다. 그리고 Shwarz(2001) 등은 다수의 채널을 이용하여 시간 영역의 진동응답을 측정하고자 Z24 고속도로에 2개의 가진실험(Shaker Test), 충격해머실험(Impact Hammer Test)와 상시진동실험(Ambient Vibration Test)을 적용한 FRF와 ODS FRF(Frequency Response Function)을 커브 피팅 과정으로 얻은 모드 매개변수와 MAC(Modal Assurance Criterion)을 통해 실험방법을 비교분석하였다. 상기와 같이 기존 연구에서는 구조물 전체에 대한 모드해석을 수행하여 구조물의 손상을 검색하거나 공진을 유발하는 요인 및 구조물의 경계조건에 대한 연구가 주류를 이루었다. 연구대상 구조물은 케이블교량이 아닌 일반교량이었다. 기존 연구내용으로부터 구조물 전체에서 주요부재에 해당하는 케이블의 모드특성을 상세하게 파악하는 데에는 한계가 있었고 본 연구에서는 케이블교량에서 주요부재인 케이블에 대해서 충격 해머를 이용하여 케이블의 배치방법에 따른 영향 등을 파악하고자 경사각이 상이한 케이블로 연구방법을 적용하여 충격에 따른 모드변수별 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

모드해석은 구조물의 개선과 모드특성을 나타내기 위해 기계 및 항공 분야에 제한되지 않고, 토목 분야로 확대되어 연구되고 있다. 특히 장대 구조물의 경우 풍하중 및 지진 등의 영향에 의해 발생하는 진동에 의한 동적거동을 파악하는 연구가 다수 진행되고 있다. 모드해석은 해석 및 실험과정을 통해 모드 매개변수를 추정하며 구조물의 모드 특성으로 반영한다. 이로 인해 구조물의 유지관리에 있어서 모드특성은 가볍고 유연하면서 견고하기 위한 주요인자로 적용된다.

주로 구조물의 동적거동에 대한 타당성을 확인하기 위해 수치해석 방법으로 유한요소해석을 사용하지만 결과의 정확도가 높다고 판단할 수는 없다. 실제 구조물의 경우 재료특성을 비롯한 지지조건이나 접합 상태 등의 예측 할 수 없는 변수가 발생되기 때문에 수치적 해석방법과 병행하여 실험적 해석방법을 이용한 상호검증과 보완이 필요하다(Hwang, 2009).

2-1. 충격해머실험(Impact Hammer Test)

충격해머실험에 적용되는 장비는 충격해머(Impact hammer)라고 불리며 가진실험(Shaker Test)에 비해 질량에 의해 발생하는 문제점이 없고, 실험이 비교적 용이하여 널리 사용되는 실험방법이다. 충격해머실험은 가진력의 한계로 비교적 소규모 구조물의 진동시험에 자주 사용된다. 가장 일반적인 실험 방법으로 가진 위치를 바꿔 가면서 가속도 고정으로 단 자유도(위치와 방향)를 측정하는 방법과 가진 위치를 고정으로 다 자유도를 측정하는 실험방법이 있다(Hwang, 2009).

충격해머는 끝단부에 로드셀(Loadcell)이 부착되어 충격의 가진 하중을 측정한다. 충격해머의 무게와 타격 속도에 비례한 크기를 가지며 해머팁(Tip)의 종류에 따라 주파수범위가 결정되고 단단할수록 고주파수 범위를 가지므로 해머팁의 선택이 중요하다. 또한 충격해머실험시 충격가진에 의한 가속도계로부터 측정된 응답은 0으로 없어지지 않는다.

이런 경우 누설이 발생하며 이를 최소화하는 방법으로 지수 창(Exponential Window)을 적용한다. 이것은 데이터로 하여금 푸리에 변환과정(Fourier Transform)의 주기성 요구조건을 더욱 만족시키기 위해 사용한다(Hwang, 2009).

실험에 사용된 데이터수집장치는 NI사의 NI9234를 적용하였으며 모드해석 소프트웨어는 ModalVIEW Single Seat를 이용하였다.

2.2 케이블교량 축소 모형

케이블의 모드변수를 파악하고자 Fig. 1과 같이 케이블에 인장력을 도입하고 케이블을 거치할 수 있는 축소모형을 제작하였다. 축소 모형은 총 2개이며, 모형에 사용된 강재는 H-250×250×9×14이다. H형강의 접합방법은 ㄱ-100×100×7을 사용하여 볼트접합으로 H형강을 연결하였다. Fig. 1은 H형강으로 제작한 케이블거치 축소모형을 나타내었다. Fig. 2는 수평방향 케이블설치사진이다.



Fig. 1 Laboratory Model Overview Diagram



Fig. 2 Horizontal Model Diagram

2.3 실험 케이블 및 장력도입장치

대상 실험체에 설치된 케이블은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 의 강연선으로서 케이블의 단면은 7연선으로 외측에 6개의 소선이 있고 그 중앙에 1개의 심선이 위치해있는 형태이다. Table 1은 케이블의 제원을 나타내었고, Fig. 3은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 케이블의 단면도를 나타내었다. 케이블에 인장력을 도입하기 위하여 사용된 유압실린더 및 유압펌프를 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1 Cable Specification

Division	Specifications
Diameter	$\varnothing 12.7\text{mm}$
Area	98.71 mm ²
Modulus of Elasticity	200,000 MPa



Fig. 3 Cable Cross Section



Fig. 4 Hydraulic Cylinder



Fig. 5 Hydraulic Pump

2.4 Impact Hammer

PCB사의 086D05 모델로서 해머의 특성은 측정 결과에 영향을 주지 않는다. 이는 실험 데이터가 손상되지 않도록 관심 주파수 범위의 해머 공진기를 제거하여 보다 정확하고 일관된 측정을 수행 할 수 있다. Table 2은 Impact Hammer의 제원을 나타내고 Fig. 6은 Impact Hammer의 사진을 나타내었다. 케이블의 관심주파수가 200Hz이상으로서 해머의 Tip을 적용함에 있어서 케이블의 관심주파수를 벗어난 해머의 Tip을 실험에 사용하였다.

Table 2 Impact Hammer Specification

Division	Specifications
Sensitivity($\pm 15\%$)	0.23 mV/N
Measurement Range	± 22240 N pk
Resonant Frequency	≥ 22 kHz



Fig. 5 Hydraulic Pump

2.5 가속도계 및 하드웨어

PCB사의 ICP(IEPE) 타입의 정밀형 1축 가속도계로서 케이블의 모드특성을 산출하기 위해 사용하였다. Table 3는 가속도계에 대한 기술적 사양, Fig. 7는 가속도계의 사진을 나타내고 있다. Fig. 11은 가속도계의 설치위치를 나타내며 케이블의 길이를 4등분하여 케이블의 진폭이 가장 큰 중앙부분과 케이블길이의 1/4지점 및 3/4지점에 가속도계를 설치하여 실험을 수행하였다. 하드웨어는 NI사의 NI 9234 모델로서 본 연구에서는 케이블의 모드특성을 산출하기 위해 사용된다. Fig. 8는 하드웨어 사진이다.

Table 3 Accelerometer Specification

Division	Specifications
Sensitivity($\pm 15\%$)	1.02 mV/(m/s ²)
Measurement Range	± 4900 m/s ² pk
Frequency Range	0.5 to 10000 Hz



Fig. 7 Accelerometer(PCB352C03)



Fig. 8 Data Acquisition System

2.6 실험개요

본 실험은 Impact Hammer를 이용하여 측정하는 진동실험으로 수행되었다. 제작된 강연선 케이블 거치대에 케이블을 설치하고 소정의 장력을 가한 후, 케이블에 1축 가속도계를 부착하고 Impact Hammer를 통하여 진동을 가하면서 실험을 진행하였다. 실험은 총 22회로 케이블의 설치각도별(0° , $20^\circ \sim 70^\circ$; 매 10° 마다), 케이블의 단면적별($1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$, $2 \times \varnothing 12.7\text{mm}$, $3 \times \varnothing 12.7\text{mm}$, $4 \times \varnothing 12.7\text{mm}$, $5 \times \varnothing 12.7\text{mm}$)순으로 진행되었다. 실험체의 주요변수는 케이블의 길이, 케이블의 설치각도, 케이블의 단면적이다. 케이블의 길이는 주탑측에서 가장 가까운 케이블이 0.53m이며 주탑측에서 가장 멀리 있는 케이블이 2.1m이다. 케이블의 설치각도는 주탑측에서 가장 가까운 케이블의 설치각도가 70° 이고 주탑측에서 가장 멀리 있는 케이블의 설치각도가 20° 이다.

케이블의 단면적은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 인 강선이 1개인 경우부터 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 인 강선이 5개까지 1개씩 점차 증가시켜서 케이블의 구성하였다. 실험체의 주요변수로 케이블의 길이, 케이블의 단면적, 케이블의 설치각도를 산정한 근거는 케이블의 모드해석에서 케이블의 길이, 단면적 등이 고유진동수 등의 동적특성에 영향을 미치기 때문이다.

실험으로부터 얻어진 결과데이터를 모드해석 소프트웨어인 ModalVIEW R2를 통하여 분석을 실시하였다 (ABSignal, 2012). 모드 분석의 방법에 대해서 측정타입은 FRF-EMA으로서 구조물에 가진력과 구조물의 진동응답으로부터 FRF를 계산한다. 윈도우의 타입은 Hanning을 적용하였다. 또한 FRF의 산정시 노이즈의 영향을 고려하였다. 데이터 수집은 NI9234 하드웨어를 적용하였다.

FRF 결과로부터 모드안정차트, 모드복합성 및 모드상관계수 등을 구하여 모드평가를 실시하였다. 모드실험의 전체적인 과정은 구조물의 모델링, 구조물에 부착된 센서로부터 데이터 수집, 모드해석, 해석결과분석 순으로 이루어진다. 고유진동수는 푸리에변환을 이용하여 Peak Picking Method를 이용하여 산정하고 감쇠비는 3dB Method를 적용하였다. 여기서 3dB Method를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Damping\ ratio(\%) = \frac{f_0}{f_1 - f_2}$$

여기서 f_0 는 공진주파수, f_1 는 공진주파수보다 작은 주파수로서 3dB 낮은 주파수, f_2 는 공진주파수보다 큰 주파수로서 3dB 낮은 주파수이다.

Fig. 9 ~ Fig.10는 실험구성에 대한 도면을 나타내었다. Fig. 9에서 최외측 케이블의 길이가 2.1m로서 케이블이 주탑측으로 갈수록 케이블의 길이가 작아지며 케이블의 경사각이 커지는 경향을 모사하였고, 주탑 및 보강형을 H-BEAM으로 모사하였다.

실제 사장교의 외측케이블의 연장이 100m라고 하면 실제 사장교 크기의 축소비 50을 적용하면 주탑측에 가장 가까운 케이블의 연장은 27m로서 케이블 규모는 실제 사장교의 케이블 배치형상을 따라 모사하였고 케이블이 보강형과접하는 정착부의 위치도 주탑측에서 측경간방향으로 갈수록 정착부의 설치간격이 크도록 정착부의 위치를 선정하였다.

케이블과 주탑, 케이블과 보강형의 경계조건은 고정으로 가정하여 실험시 정착부는 고정단으로서 작용하도록 상세도에 따라 시험체를 제작하였다. Fig. 9에서 가속도계의 설치위치를 나타내며 케이블의 길이를 4등분하여 케이블의 진폭이 가장 큰 중앙부분과 케이블길이의 1/4지점 및 3/4지점에 가속도계를 설치하여 케이블진동에 대한 계측방향은 면내진동이 되도록 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 케이블의 현황은 Table 4과 같다. 또한, 각 케이블에 도입된 장력과 최대장력에 대한 비율을 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Cable Install Dimension

Division	Length	Angle
Cable N0	1.250m	0°
Cable N1	2.100m	20°
Cable N2	1.440m	30°
Cable N3	0.950m	40°
Cable N4	0.800m	50°
Cable N5	0.580m	60°
Cable N6	0.530m	70°

Table 5 Cable Tension Ratio for Allowable Tension

Division	Tension (kN)	Test Tension / Allowable Tension (%)
Cable N0	20.148	12.193%
Cable N1	9.079	5.494%
Cable N2	16.035	9.704%
Cable N3	13.458	8.144%
Cable N4	14.282	8.643%
Cable N5	9.658	5.845%
Cable N6	8.884	5.376%

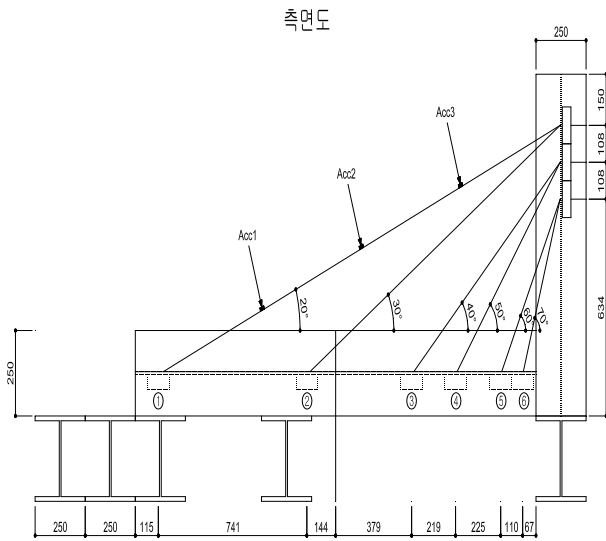


Fig. 7 Accelerometer(PCB352C03)

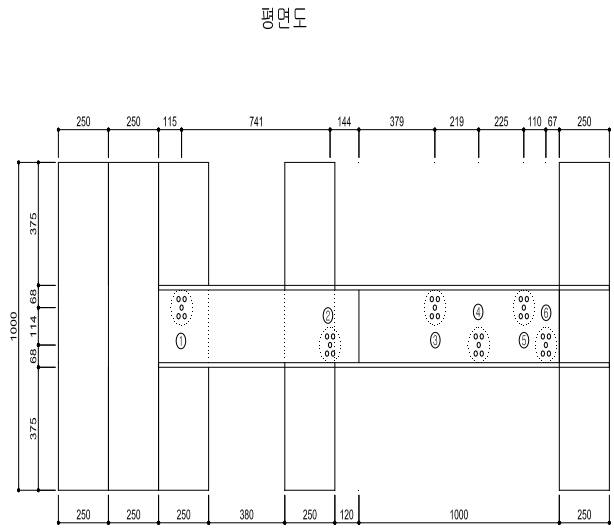


Fig. 8 Data Acquisition System



Fig. 7 Accelerometer(PCB352C03)

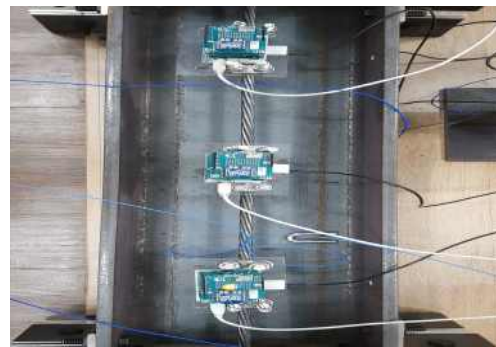


Fig. 8 Data Acquisition System

3. 실내실험

3.1 케이블의 FRF 결과

Fig. 13~19은 각 실험 case 별 모드평가를 실시하여 FRF결과를 나타낸 것이다. FRF는 다음 Eq.(2)과 같이 전달함수는 입력 힘(x_n)의 라플라스 변환으로부터 응답(y_n)의 라플라스 변환의 관계로 나타내었다.

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 y_i 는 자유도 i에서 응답신호 스펙트럼이다. x_j 는 자유도 j에서 가진신호 스펙트럼이다. H_{ij} 는 자유도 i와 j 사이에 FRF이다. Table 6에서 케이블의 FRF 결과를 나타내었다. Fig.13 ~ Fig.19로부터 기존 FRF가 중첩된 FRF와 거의 일치하므로 모드평가가 정확하다는 의미이다. Table 6에서 산정된 FRF 결과는 케이블의 질량과 케이블의 길이변화에 따라 케이블의 고유진동수와 댐핑의 변화는 미미한 것으로 나타났으며 고유진동수 최대값은 290.10Hz, 최소값은 276.2Hz로서 최대값은 최소값 대비 1.05배이며, 댐핑의 최대값은 0.150%, 최소값은 0.006%로서 댐핑의 차이는 0.145%에 불과하였다. 이는 실험에 사용된 케이블의 질량이 공용종인 케이블의 질량대비 약 1/12로서 케이블의 고유진동수와 댐핑의 뚜렷한 변화를 나타내는 데에는

제약이 있었다. 주파수응답함수는 외력이 특수해에 미치는 영향의 정도로서, FRF가 클수록 외력은 시스템의 정상상태에 큰 영향을 미치며, FRF가 작을수록 외력의 영향은 작아진다. 공진이 발생할 시에는 위상각이 90도가 되는 것을 알 수 있다. 또한, 감쇠가 클수록 위상각이 커지며 공진의 영향은 줄어든다.

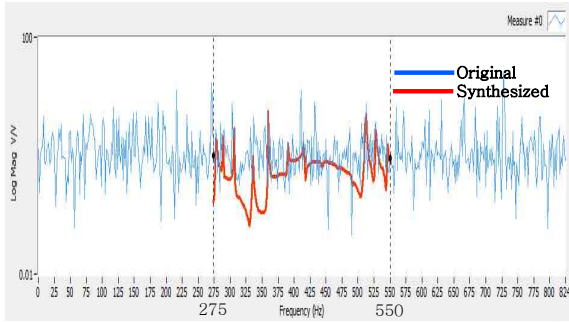


Fig. 13 Comparison of Synthesized FRF and Original FRF(Cable N0)

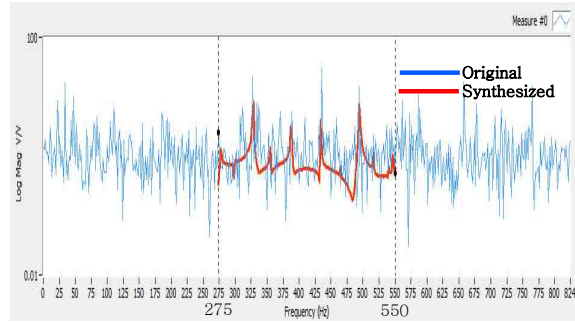


Fig. 14 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N1)

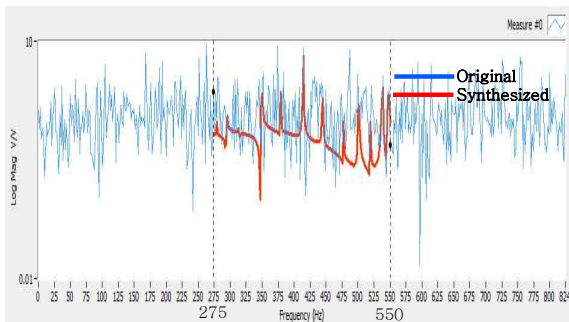


Fig. 15 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N2)

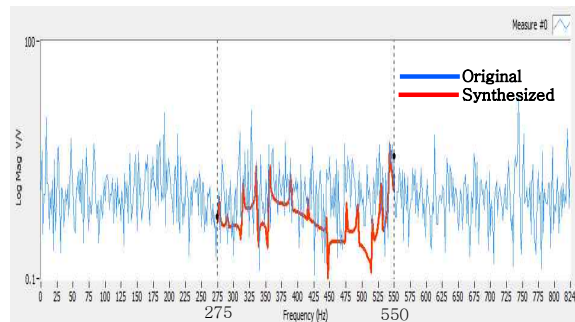


Fig. 16 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N3)

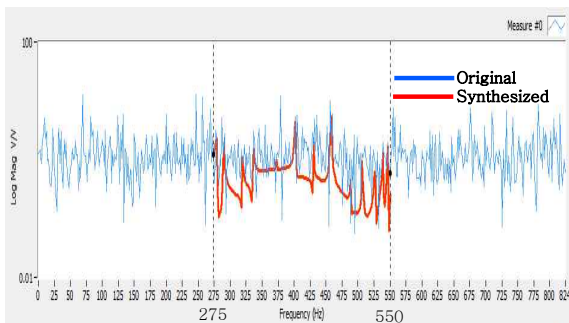


Fig. 17 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N4)

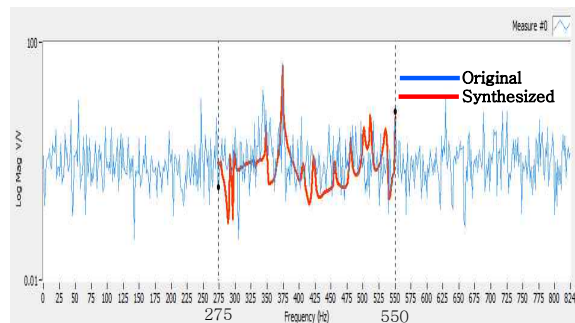


Fig. 18 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N5)

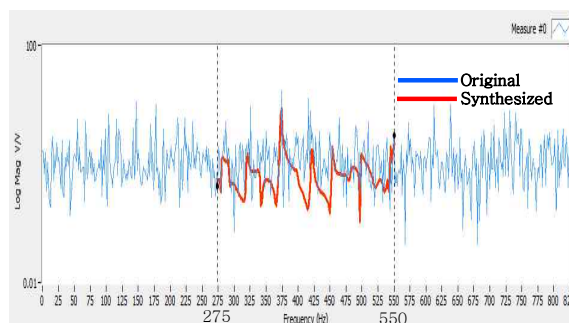


Fig. 19 Comparison of Synthesized and Original FRF(Cable N6)

Table 6 Cable FRF Result

Division	Frequency (Hz)	Damping (%)	Cable Area
Cable N0	290.10	0.0163	1 × Ø 12.7mm
Cable N1	285.20	0.0742	1 × Ø 12.7mm
	279.60	0.1000	2 × Ø 12.7mm
	282.00	0.1396	3 × Ø 12.7mm
	284.50	0.0282	4 × Ø 12.7mm
	285.50	0.0236	5 × Ø 12.7mm
Cable N2	281.30	0.0347	1 × Ø 12.7mm
	279.80	0.1204	2 × Ø 12.7mm
	276.50	0.0748	3 × Ø 12.7mm
	279.90	0.0406	4 × Ø 12.7mm
	277.70	0.0323	5 × Ø 12.7mm
Cable N3	280.60	0.1260	1 × Ø 12.7mm
	276.20	0.0505	2 × Ø 12.7mm
	278.90	0.0611	3 × Ø 12.7mm
	279.00	0.1106	4 × Ø 12.7mm
	283.60	0.1502	5 × Ø 12.7mm
Cable N4	280.80	0.0076	1 × Ø 12.7mm
	277.50	0.0265	2 × Ø 12.7mm
	279.70	0.0447	3 × Ø 12.7mm
	280.70	0.0581	4 × Ø 12.7mm
Cable N5	277.50	0.0165	1 × Ø 12.7mm
Cable N6	282.40	0.0056	1 × Ø 12.7mm

3.2 케이블의 Stabilization Chart 결과

Fig. 20~26에서는 케이블에 대한 Stabilization Chart 결과를 나타내었다. Table 7는 Stabilization Criteria를 나타내었다.

Table 7 Cable Stabilization Criteria

Symbol	Frequency	Damping Ratio	Mode Shape
s	yes	yes	yes
v	yes	no	yes
d	yes	yes	no
f	yes	no	no
o	no	no	no

여기서 Stabilization Criteria는 Frequency stability에 대해서는 1%, Damping stability은 5%, mode Shape stability는 2%를 적용하였다(Jenny et al. 2007). Stabilization Chart는 고유진동수와 댐핑비 및 모드형상에 따라 심벌을 부여하여 일정 기준치를 만족하는 경우 yes로 표현하였고, 불만족하는 경우 no로 표시하였다. Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값이 FRF에 의한 고유진동수와 댐핑값보다 크게 나타났다. Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값의 관계를 다음 Fig. 27에서 나타내었으며 고유진동수가 높은 값을 가질수록 댐핑비는 낮아지는 경향을 나타내었다. Stabilization Chart 분석결과

케이블의 고유진동수, 댐핑 및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 저차모드에서의 고유진동수의 범위는 275.86Hz ~ 318.42Hz이며 댐핑의 범위는 0.085% ~ 2.38%범위내에 속하였다. 이는 FRF 산정결과로 나타난 고유진동수와 댐핑의 범위와 유사하게 나타났다.

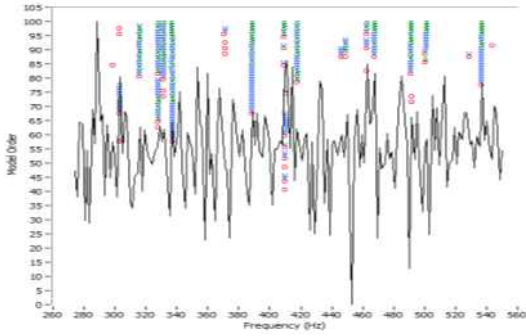


Fig. 20 Stabilization Chart(Cable N0)

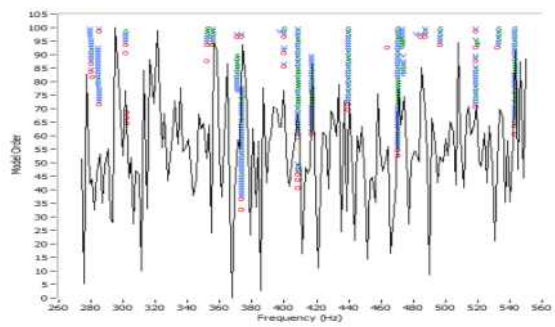


Fig. 21 Stabilization Chart(Cable N1)

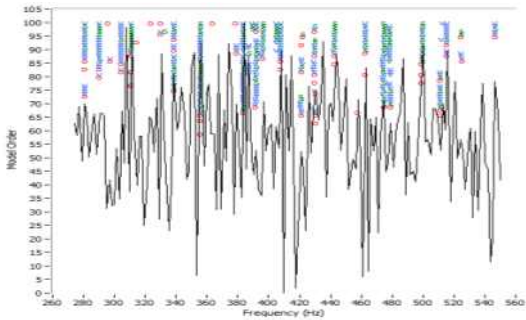


Fig. 22 Stabilization Chart(Cable N2)

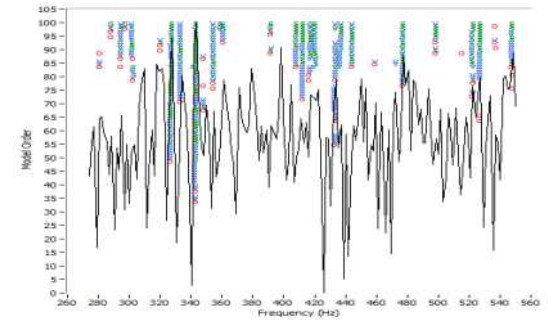


Fig. 23 Stabilization Chart(Cable N3)

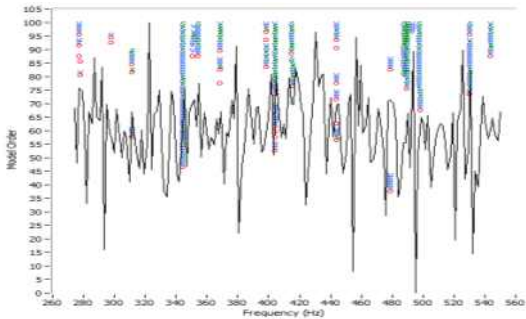


Fig. 24 Stabilization Chart(Cable N4)

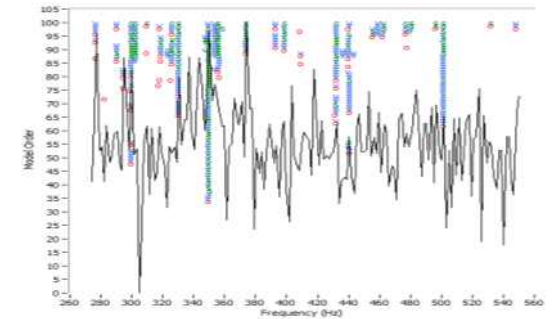


Fig. 25 Stabilization Chart(Cable N5)

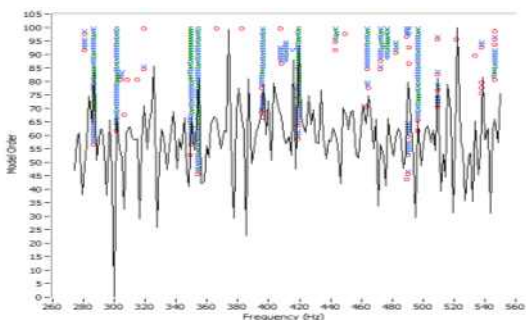


Fig. 26 Stabilization Chart(Cable N6)

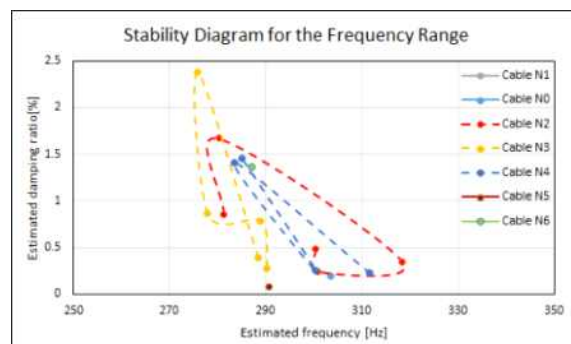


Fig. 27 Stabilization Diagram for the Frequency Range

Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값이 FRF에 의한 고유진동수와 댐핑값보다 크게 나타났다. Stabilization Chart에 의한 고유진동수와 댐핑값의 관계를 상기 Fig. 27에서 나타내었다. Table 8에서는

케이블의 Stabilization Chart 결과에서 고유진동수와 댐핑에 대한 값을 나타내었다.

Table 8 Cable Stabilization Chart Result

Division	Frequency(Hz)	Damping(%)	Cable Area
Cable N0	303.39	0.1960	1 × Ø12.7mm
Cable N1	285.20	1.9300	1 × Ø12.7mm
	298.61	0.1430	2 × Ø12.7mm
	292.74	0.1200	3 × Ø12.7mm
	288.81	1.3100	4 × Ø12.7mm
	285.54	0.1760	5 × Ø12.7mm
Cable N2	281.31	0.8570	1 × Ø12.7mm
	280.31	1.6700	2 × Ø12.7mm
	318.42	0.3470	3 × Ø12.7mm
	300.75	0.2400	4 × Ø12.7mm
	300.39	0.4840	5 × Ø12.7mm
Cable N3	288.43	0.3900	1 × Ø12.7mm
	275.86	2.3800	2 × Ø12.7mm
	277.94	0.8630	3 × Ø12.7mm
	288.90	0.7840	4 × Ø12.7mm
	290.32	0.2810	5 × Ø12.7mm
Cable N4	311.71	0.2260	1 × Ø12.7mm
	283.44	1.4100	2 × Ø12.7mm
	300.43	0.2500	3 × Ø12.7mm
	284.99	1.4600	4 × Ø12.7mm
Cable N5	290.64	0.0845	1 × Ø12.7mm
Cable N6	287.02	1.3600	1 × Ø12.7mm

3.3 케이블의 Complexity 결과

모드는 normal mode와 complex mode로 구분되며 normal mode는 모든 자유도의 위상관계가 180° 를 이루지만 complex mode는 자유도간의 위상관계가 180° 를 이루지 않으며 모드별로 complex mode에 대하여 작도하였다. 특히 모드는 구조물의 댐핑특성에 의하여 결정된다. Fig. 28~33에서는 케이블의 Complexity를 나타내었다. Table 9에서는 케이블의 Complexity 결과에서 위상각에 대한 값을 나타내었다. Fig. 28에서 케이블의 다른 자유도에서 서로간에 위상각과의 관계가 180° 도가 되지 않아서 복합모드로 구분된다. Fig. 34에서는 케이블의 위상각에 따른 케이블의 단면적과 케이블의 경사각에 따른 모드해석 결과를 나타내었다. 모드해석결과 선형 구조물에서 모드형상은 댐핑값이 비례하지 않게 분포한다면 구조물의 모드형상은 복합모드로 나타날 수 있다. 대부분의 구조요소는 시간에 따른 댐핑값은 비례하는 분포를 보이고 있다. 실제구조물에서는 댐핑의 대부분은 연결부에서 비례하지 않은 분포가 집중적으로 나타난다. Complexity 분석결과 케이블의 질량증가 및 케이블의 길이에 따라 케이블의 위상각의 변화는 불규칙적으로 나타났으며 그 원인으로서는 실험대상 케이블의 질량이 작을수록 Complexity에 대한 민감도가 떨어진다고 보여진다. 즉, 공용중에 있는 케이블에 대해서 Complexity를 분석하면 위상각의 변화가 뚜렷한 비례관계를 나타낼 것으로 판단된다.

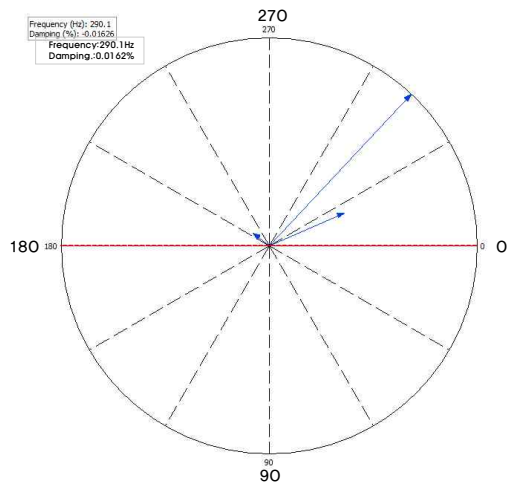


Fig. 28 Complexity Plot(Cable N0)

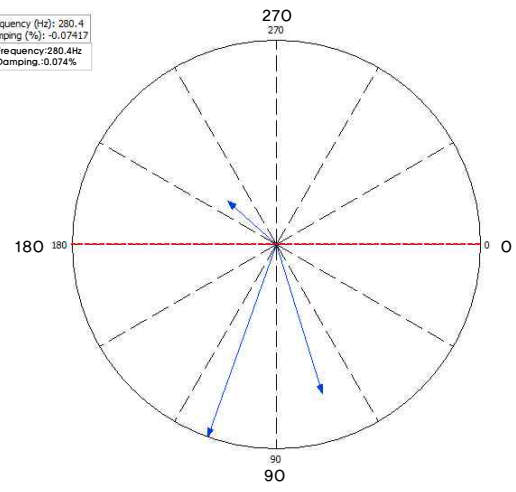


Fig. 29 Complexity Plot(Cable N1)

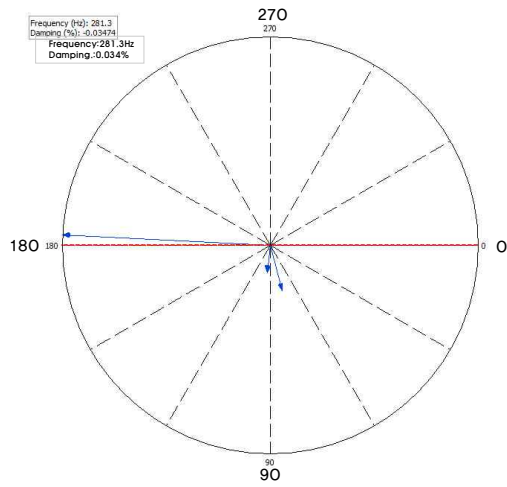


Fig. 30 Complexity Plot(Cable N2)

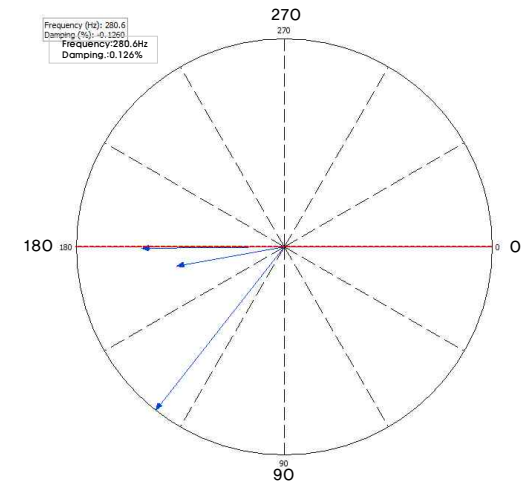


Fig. 31 Complexity Plot(Cable N3)

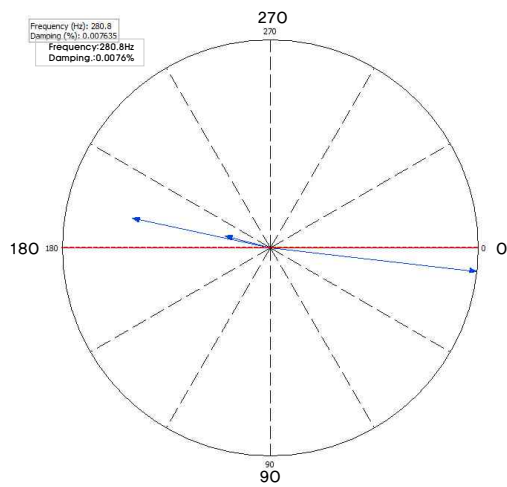


Fig. 32 Complexity Plot(Cable N4)

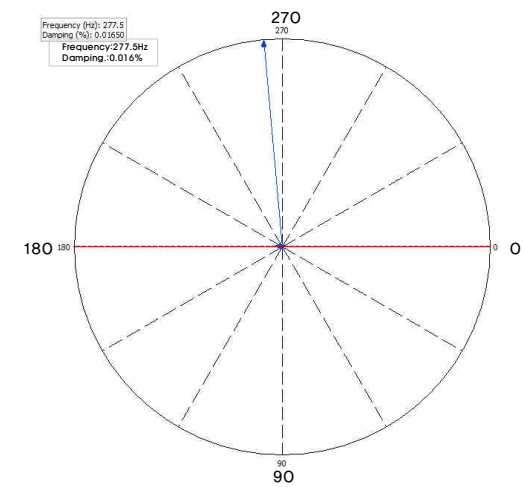


Fig. 33 Complexity Plot(Cable N5)

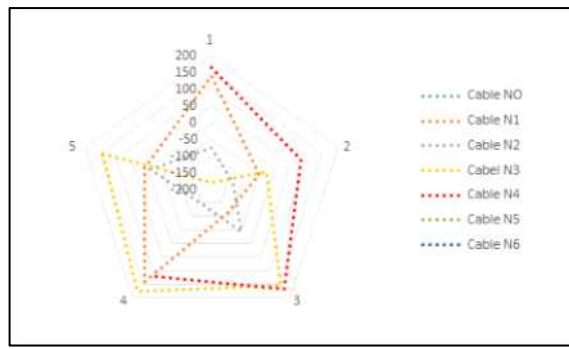


Fig. 34 Complexity Plot(Cables)

Table 9. Cable Complexity Result

Division	Phase(Deg)	Cable Area
Cable N0 Center	46.872	1 × Ø 12.7mm
Cable N1 Center	138.365	1 × Ø 12.7mm
	-48.573	2 × Ø 12.7mm
	-114.257	3 × Ø 12.7mm
	141.946	4 × Ø 12.7mm
	11.567	5 × Ø 12.7mm
Cable N2 Center	-74.985	1 × Ø 12.7mm
	-133.634	2 × Ø 12.7mm
	-46.680	3 × Ø 12.7mm
	-148.198	4 × Ø 12.7mm
	-6.896	5 × Ø 12.7mm
Cable N3 Center	-179.549	1 × Ø 12.7mm
	-25.717	2 × Ø 12.7mm
	152.673	3 × Ø 12.7mm
	176.659	4 × Ø 12.7mm
	143.686	5 × Ø 12.7mm
Cable N4 Center	165.512	1 × Ø 12.7mm
	83.232	2 × Ø 12.7mm
	170.084	3 × Ø 12.7mm
	119.893	4 × Ø 12.7mm
Cable N5 Center	95.122	1 × Ø 12.7mm
Cable N6 Center	-89.092	1 × Ø 12.7mm

3.4 케이블의 MAC 결과

Modal Assurance Criteria(MAC)는 모드간의 직교성을 나타내며 MAC가 0에 가까우면 선형독립적인 관계를 가지며 1에 가까우면 선형비례적인 관계를 갖는다. MAC는 상호 비교되는 서로 다른 두 개의 세트에서 해석 모드간의 상관관계를 비교 분석하는 방법이다(Shin, 2016). MAC는 다음식 Eq.(3)로 나타내었다.

$$MAC = \frac{|X_i X_j|}{|X_i| |X_j|} \quad (3)$$

여기서 X_i 는 모드형상행렬 $[\phi_{1i} \ \phi_{2i} \ \dots \ \phi_{mi}]$ 의 열벡터이다. Fig. 35~41에서는 케이블의 MAC값을 나타내었다.

Fig. 35~41에서 모드간의 상관관계를 분석한 결과 대부분의 경우에서 0.9이상의 높은 상관관계를 나타내어 실험 모드간의 분석이 적절한 것으로 나타났다. 또한 Fig. 35~41에서 MAC 분석결과 저차모드에서 케이블의 질량이 클수록 1.0에 가까워지는 경향을 보이고 고차모드에서 0에 근접하는 결과를 나타내었으며 이는

지배모드의 결정이 저차모드에서 이루어지는 것을 나타낸다.

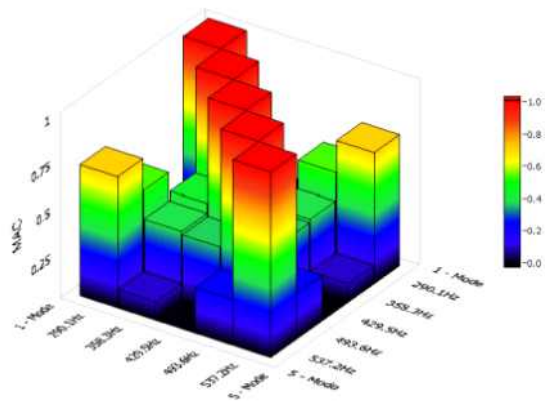


Fig. 35 MAC Plot(Cable N0)

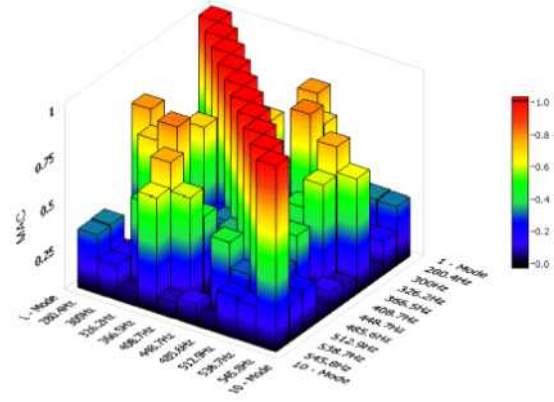


Fig. 36 MAC Plot(Cable N1)

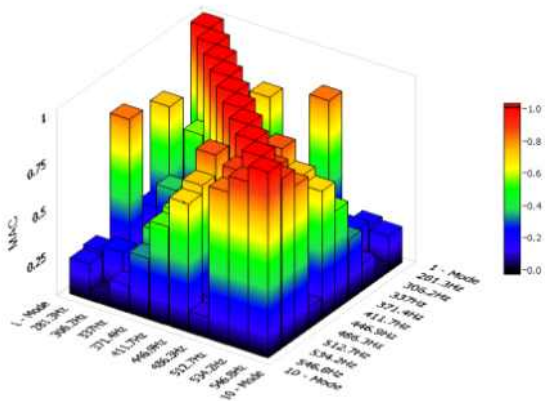


Fig. 37 MAC Plot(Cable N2)

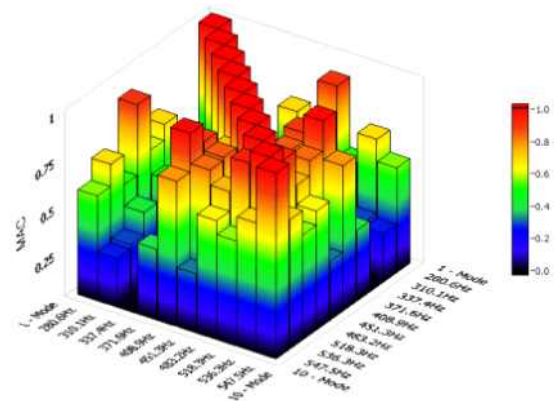


Fig. 38 MAC Plot(Cable N3)

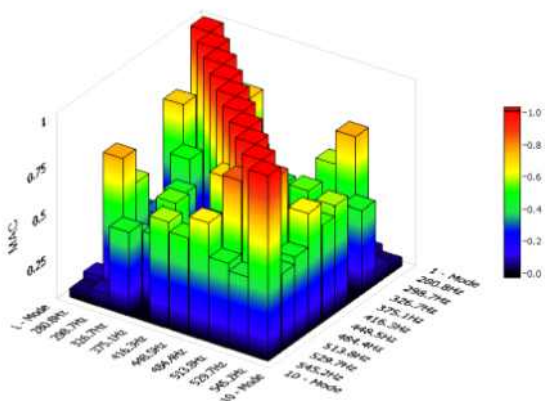


Fig. 39 MAC Plot(Cable N4)

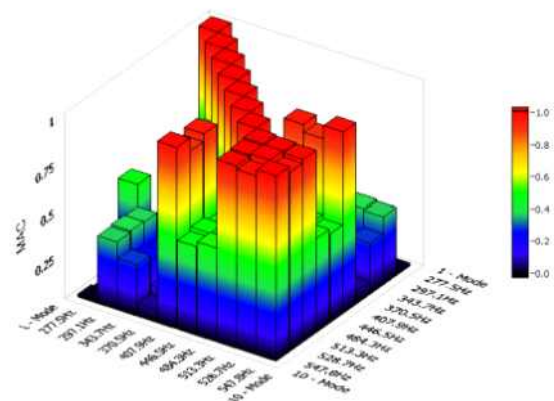


Fig. 40 MAC Plot(Cable N5)

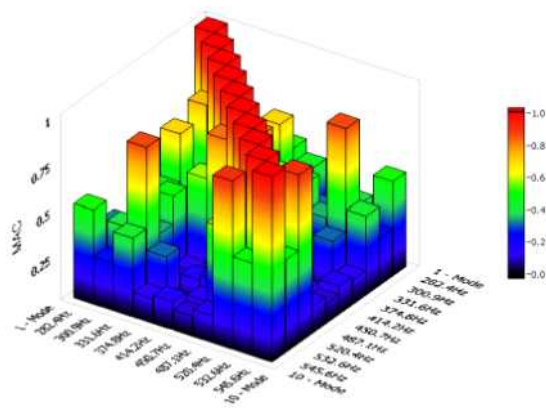


Fig. 41 MAC Plot(Cable N6)

4. 결론

본 연구에서는 H형강 및 케이블을 사용하여 케이블교량 축소 모형을 제작하고 케이블의 축방향이 수평면과 이루는 각도가 0° , $20^\circ \sim 70^\circ$ (매 10° 마다)의 경우로 구분하여 각각의 Case마다 케이블에 대해서 3개의 1축 가속도계와 Impact Hammer를 사용하여 모드해석을 수행하고 모드해석 결과로 케이블의 고유진동수 산정, Stabilization Chart, Complexity 및 MAC를 산정하였다. 상기의 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) FRF 산정결과 케이블의 질량과 케이블의 길이변화에 따라 케이블의 고유진동수와 댐핑의 변화는 미미한 것으로 나타났으며 고유진동수 최대값은 290.10Hz, 최소값은 276.2Hz로서 최대값은 최소값 대비 1.05배이며, 댐핑의 최대값은 0.150%, 최소값은 0.006%로서 댐핑의 차이는 0.145%에 불과하였다. 이는 실험에 사용된 케이블의 질량이 공용중인 케이블의 질량대비 약 1/12로서 케이블의 고유진동수와 댐핑의 뚜렷한 변화를 나타내는 데에는 제약이 있었다.

2) Stabilization Chart 분석결과 케이블의 고유진동수, 댐핑 및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 저차모드에서의 고유진동수의 범위는 275.86Hz ~ 318.42Hz이며 댐핑의 범위는 0.085% ~ 2.38%범위내에 속하였다. 이는 FRF 산정결과로 나타난 고유진동수와 댐핑의 범위와 유사하게 나타나서 Stabilization Chart 분석은 적정한 것으로 판단된다.

3) Complexity 분석결과 케이블의 질량증가 및 케이블의 길이에 따라 케이블의 위상각의 변화는 불규칙적으로 나타났으며 그 원인으로는 실험대상 케이블의 질량이 작을수록 Complexity에 대한 민감도가 떨어진다고 보여진다. 즉, 공용중에 있는 케이블에 대해서 Complexity를 분석하면 위상각의 변화가 뚜렷한 비례관계를 나타낼 것으로 판단된다.

4) MAC 분석결과 저차모드에서 케이블의 질량이 클수록 1.0에 가까워지는 경향을 보이고 고차모드에서 0에 근접하는 결과를 나타내었으며 이는 곧 지배모드의 결정이 저차모드에서 이루어지는 것을 나타낸다.

3.6 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력계측장비 개발

1. 서론

케이블의 힘은 사장교, 현수교와 같은 케이블 구조물의 중요한 구성요소 중 하나이다. 구조물이 정상적으로 작동하도록 하려면 모니터링 케이블이 매우 중요하다. 현재까지 많은 케이블 힘 모니터링 방법이 제안되었고 소형 및 실제 구조물에 대한 실험이 성공적으로 평가되었다(Kim et al., 2010).

기존의 사장교 케이블의 유지관리 방법은 케이블의 규모에 의해서 위치적 접근성과 안전성이 떨어지고, 유지관리시 많은 비용 및 시간이 소요되며, 이동성의 제한으로 대표적인 개소에 대해서 제한적인 점검을 하므로서 전체적인 케이블의 유지관리상태를 기술하는 데에는 제약이 있다.

일반적으로 사장교 케이블의 유지관리는 점검자가 직접 케이블에 근접하여 케이블의 진동특성 등을 측정하여 점검자에 따라서 측정값이 다르게 조사될 수 있으므로 조사값에 대한 정확도가 높은 센서를 사용하면 효율적인 유지관리가 가능하다.

본 연구에서는 사장교 케이블에 적용 가능한 스마트 센서 및 통합시스템을 구성하여 새로운 유지관리 방법을 제시하며, 스마트센서는 정확도가 높고 측정값을 신속하고 용이하게 측정할 수 있으며 상대적으로 가격이 저렴하여 다종의 센서들을 단일 프로세스로 처리하여 통합시스템을 구성한다.

사장교 케이블의 통합시스템은 기존 유지관리비용대비 경제적인 절감효과가 크므로 전체 케이블에 계측장비를 설치할 수 있어 사장교 케이블의 전체적인 관리가 가능하며 사장교 케이블의 전체적인 거동파악, 유지관리시기를 최적화하며 적절한 유지관리방안을 제시할 수 있게 된다.

2. 실험

2.1 사장교 케이블 축소모형

케이블의 모드특성을 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 케이블에 인장력을 도입하고 거치할 수 있는 케이블교량 축소 모형을 제작하였다. 축소 모형은 총 2개이며, 모형에 사용된 강재는 H형강으로 H 250×250×9×14이다. H형강의 접합방법은 ㄱ형강 100×100×7을 사용하여 볼트접합으로 H형강을 연결하였다. Fig. 1은 H형강으로 제작한 케이블교량 축소모형의 사진을 나타내었다.



(a) Model Overview Diagram



(b) Horizontal Model Diagram

Fig. 1 Laboratory Model Overview Diagram

2.2 케이블

대상 실험체에 설치할 케이블은 PC 강선으로 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 가 사용되었다. 케이블의 단면형상은 7연선 케이블로 외측에 6개의 소선이 있고 내측 중심부에 1개의 심선이 위치해있는 형태이다(Jin, 2010). Table 1은 케이블의 특성을 나타내고 Table 2는 케이블의 제원이며, Fig. 2은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 케이블의 단면도를 나타내었다.

Table 1 Cable Specification

Division	Specifications
Diameter	$\varnothing 12.7\text{mm}$
Area	98.71 mm^2
Density	774 kgf/km
Tension Force	$19,742 \text{ N}$
Modulus of Elasticity	$200,000 \text{ MPa}$

Table 2 Cable Dimension

Division	Length	Angle
Cable N0	1.250m	0°
Cable N1	2.100m	20°
Cable N2	1.440m	30°
Cable N3	0.950m	40°
Cable N4	0.800m	50°
Cable N5	0.580m	60°
Cable N6	0.530m	70°



Fig. 2 Cable Photograph

2.3 유압실린더

알루미늄 복동 실린더이며, 실린더 종양에 구멍이 뚫어져 있어 교량로프인장, 유압편칭 콘크리트 고정볼트 고정용 등 각종 기계 지그로 사용된다. 12.7mm 케이블을 쉽게 삽입하고 완료시 분해가 용이하며 현장에서 사용하기 적합하게 중량감소제작 되었다. Table 3은 유압실린더의 제원을 나타내고, Fig. 3은 유압실린더의 사진을 나타내었다.



Fig. 3 Hydraulic Cylinder Photograph

Table 3 Hydraulic Cylinder Specification

Division	Specifications
Range of Use	28 TON 250ST
Working Pressure	700 kgf/cm ²
Joint	1/4" PT

2.4 유압펌프(SDMP-1)

알루미늄 복동 유압실린더와 세트인 자동전동펌프이며 실린더의 동작방법에 따라 싱글 전자변과 더블 전자변을 선정하고, 전자변과 수동밸브를 선정한다. Table 4은 유압펌프의 제원을 나타내고, Fig. 4은 유압펌프의 사진을 나타내었다.

Table 4 Hydraulic Pump Specification

Division	Specifications
Working Pressure	High Voltage 720 kgf/cm ²
	Low Voltage 70 kgf/cm ²
Discharge Rate	High Voltage 0.8 l/min
	Low Voltage 4l/min
Working Voltage	Three Phase
Automatic Motor	Power 0.75 kw
	Pole 4
	Revolution 1720 RPM
Optimum Oil	10 L
Tank Capacity	14 L
Weight	45 kg



Fig. 4 Hydraulic Pump Photograph

2.5 Hardware

2.5.1 Arduino Uno

아두이노 우노는 Atmel 사의 16MHz 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 사용하여 다양한 주변 장치를 연결할 수 있다(Lee et al., 2018). 다운로드 할 수 있는 프로그램의 최대 크기는 32KByte이지만 아두이노의 특징 중 하나인 부트로더가 그 중 일부를 사용하므로 실제로는 부트로더 크기를 뺀 나머지를 프로그램으로 사용할 수 있다. 이외에도 프로그램 실행 중 데이터 저장을 위한 2KByte 크기의 SRAM과 전원이 꺼진 이후에도 데이터가 보존되는 1KByte 크기의 EEPROM을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축 모션센서로부터 수신받은 신호를 디지털신호로 변환하여 모니터상에 출력하는 역할을 한다(Lee et al., 2018). Fig. 5은 제품 사진을 나타내고 있다.



Fig. 5 Arduino Uno Photograph

2.5.2 9Axes Motion Shield

Bosch 사의 BN0055로 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 3축 지자기센서로 구성되어 있다. 센서는 선형 가속도와 같은 신호를 출력한다(Lee et al., 2018). 본 연구에서 9축 모션센서의 측정값은 케이블의 고유진동수를 산출하는 데 활용된다. Table 5는 Motion Shield에 대한 사양이며 Fig. 6은 제품 사진을 나타내고 있다.

Table 5 9Axes Motion Shield Specification

Division	Specifications
Chip based	BOSCH Sensortech BN0055
Thinker Kit interface	2x TWI, 2x OUT, 2x IN
Motion Sensors	Triaxial accelerometer, Triaxial gyroscope, Triaxial geomagnetic
Fusion Engine	32-bit microcontroller with BSX3.0 FusionLib
Operating Voltage	5 / 3.3 V

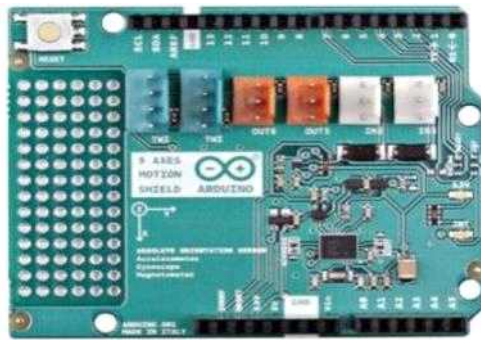


Fig. 6 9Axes Motion Shield Photograph

2.5.3 Xbee Sensor

본 연구에 적용된 XBee모듈은 지그비 통신규약을 적용하였고 토폴로지는 일대일 통신을 적용하였다. XBee S2 모듈은 XCTU를 이용하여 일대일 통신을 구축하였다. 이처럼 지그비를 통해서 모션센서로부터 얻은 가속도 데이터를 수신부 컴퓨터에 무선으로 송신한다. Table 6은 Xbee Module에 대한 기술적 사양, Fig. 7은 제품 사진을 나타내고 있다.

Table 6 Xbee Sensor Specification

Division	Specifications	Division	Specifications
Transceiver Chipset	silicon Labs EM357 SoC	Antenna Options	PCB Antenna, U.FL Connector, RPSMA Connecetor
Outdoor / RF Line-of-sight Range	2 miles / 3200m	Protocol	ZigBee Pro 2007
Transmit Power	63 mW(+18dBm)	Encryption	128-bit AES
Serial Data Interface	UART, SPI	Supply Voltage	2.7 to 3.6 V

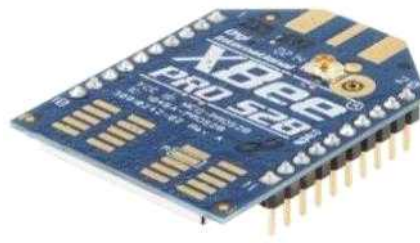


Fig. 7 Xbee Sensor Photograph

2.6 Data Logger

PC와 연결하여 데이터 측정 및 저장, 그래프를 표시하는 PC연결형 스트레인 측정기이며, Strain Gage를 연결하여 변형률을 측정할 수 있고 가속도 센서 등의 센서측정이 가능하다. 본 연구에서는 9축 모션센서와 1축 가속도계로 측정되는 가속도값을 Multiscan과 Multiload를 이용하여 산정하였다. Table 7는 Data Logger에 대한 기술적 사양, Fig. 8은 제품 사진을 나타내고 있다.

Table 7 Data Logger Specification

Division	Specifications
Number of Channel	4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 Channel
Measure Hz	1000 Hz
Connector for sensor	5p Screw connector or TAJIMI - 1Gage & 2Gage : 120Ω , 350Ω - 4Gage Bridge Sensor : 0.5 mV/V ~ 100 mV/V
Input Sensor	- Protentionmeter Sensor - Pt100 온도센서, 써머서클 온도센서 J, K, T, E, R, S - Voltage : 10V
Strain Input Range	10000, 100000, 1000000×10^{-6} strain
Low Pass Filter	10Hz, 100Hz, 1Khz, Pass Program Selectable
Interface	USB
Program	Multiscan S/W & Multiload S/W
Demension	470(W)*190(H)*320(D)mm
Power	AC220V, 50~60Hz



Fig. 8 Data Logger Photograph

2.7 1축 가속도계 (ARF-20A)

DC레벨에서 측정이 가능한 소형 경량의 저용량 가속도계이며 토목 진동을 받는 구조물의 가속도 측정에 사용되는 소자로 구성된 가속도계이다. 본 연구에서는 케이블의 장력을 산출하기 위해서 사용되었다. Table 8는 1축 가속도계에 대한 기술적 사양, Fig. 9은 제품 사진을 나타내고 있다.

Table 8 Accelerometer Specification

Division	Specifications
Capacity	20 m/s ²
Rated Output	약 0.5 mV/V(1000*10 ⁻⁶)
Non-linearity	1% R0
Frequency Response (Hz)	80
Natural Frequency (Hz)	150
Permissible Temperature Range	-10 ~ +50 ° C
Permissible Overload	300%
Input&Output resistance	120Ω
Recommend Impressed Voltage	2V이하
Allowable Impressed Voltage	5V
Connection Cable	Φ3mm 0.05mm ² 4-core shielded Chloroprene Cable 5m
Mass	13g



Fig. 9 Accelerometer Photograph

3. 케이블의 장력추정

장력이 도입된 케이블에 1축 가속도계와 9축 모션센서를 등 간격으로 3개씩 설치하였다. 여기서 가속도계의 측정방향은 케이블의 진동방향과 일치시켰으며 위치는 단부로부터 영향을 적게 받는 케이블의 중앙부가 가장 적합하다(Won, 2006).

설치된 케이블에 대한 비파괴 측정을 위해 상시 진동이나 충격망치를 사용하여 강제 진동을 일으켜서 시간이력 가속도 데이터를 추출하는데(Ju, 2010) 본 실험은 실내실험이므로 충격망치를 사용하여 실험을 실시하였다.

시간이력에 의한 가속도 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)분석 프로그램을 통해 시간영역 데이터를 주파수영역 데이터로 변환하여 고유진동수를 추출하고 수학적 모델의 특성방정식인 현의 이론 방정식과 보

의 진동이론으로 장력을 구하고 각각의 장력값들을 비교분석하여 측정하였다. 여기서 장력값은 현의이론식에서 높은 정밀도를 보이는 7차 진동모드 이하에서의 고유진동수로 장력을 산정하였다.

3.1 현의 진동이론을 이용한 방정식

현의 진동이론을 이용한 방정식은 다음 식 (1) 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, y : 진폭 x : 길이 t : 시간 w : 단위중량 g : 중력가속도 이고 식 (1)을 양단고정의 경계조건으로 풀면 식 (2)(Kim et al., 2010)와 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력산정식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{4wL^2}{n^2g} \cdot (f_n)^2 \quad (2)$$

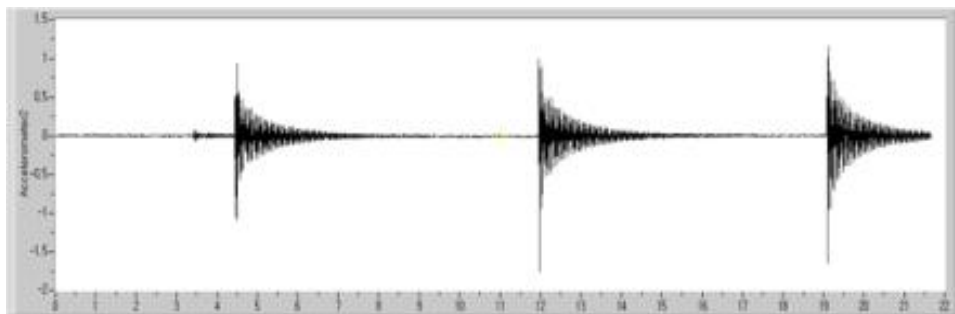
여기서, T : 장력 L : 케이블 길이 w : 단위중량 g : 중력가속도 f_n : n 차 고유진동수 이다.

현의 진동이론을 이용한 방정식은 새그와 휨강성을 고려하지 않고 단지 장력과 고유진동수의 관계만을 고려하여 실제 장력값과 다소의 오차율을 보일 수 있다.

4. 실험결과

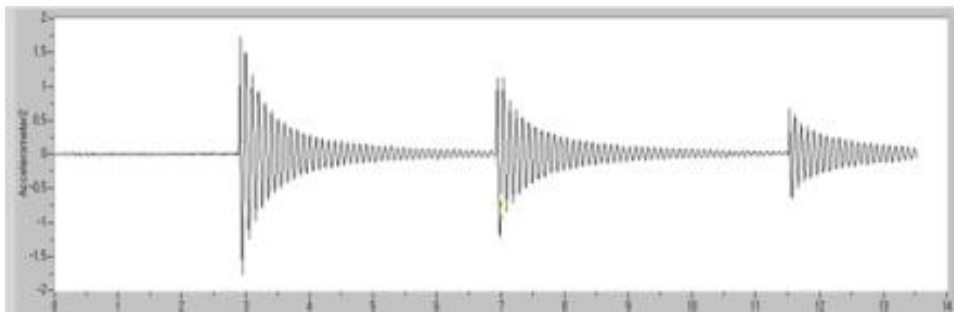
4.1 실험 데이터 결과

각 케이블 실험체마다 9축 모션센서와 1축 가속도계를 부착하여 진동시험을 실시하였다 실험은 총 20회 실시하였으며 시간 영역 데이터를 주파수 영역 데이터로 변환하여 비교 분석 하였다. Fig. 10 ~ Fig. 15에서 각 케이블의 가속도 측정값의 결과를 나타내었다.

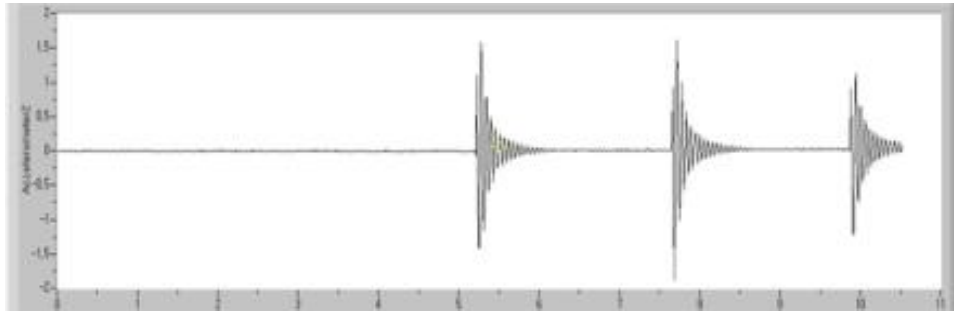


(a) Cable N0 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 10 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N0)

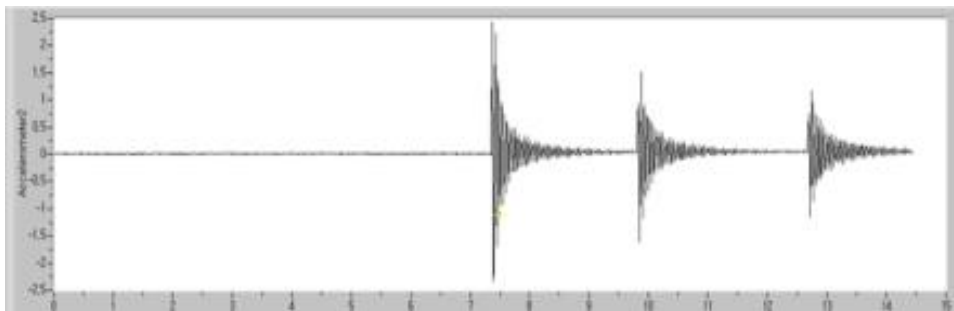


(a) Cable N1 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

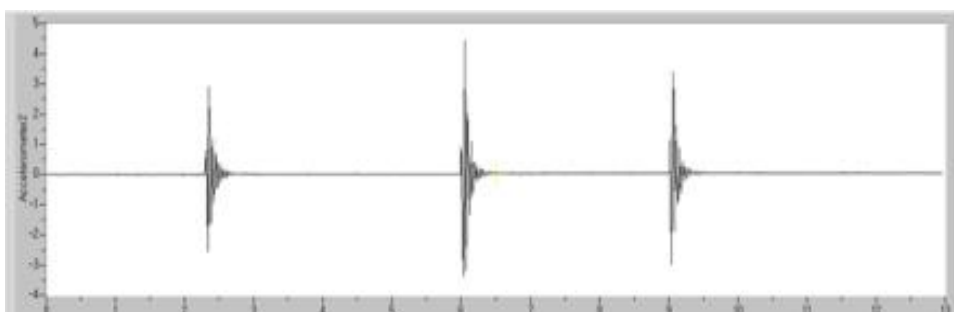


(b) Cable N1 $5 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 11 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N1)

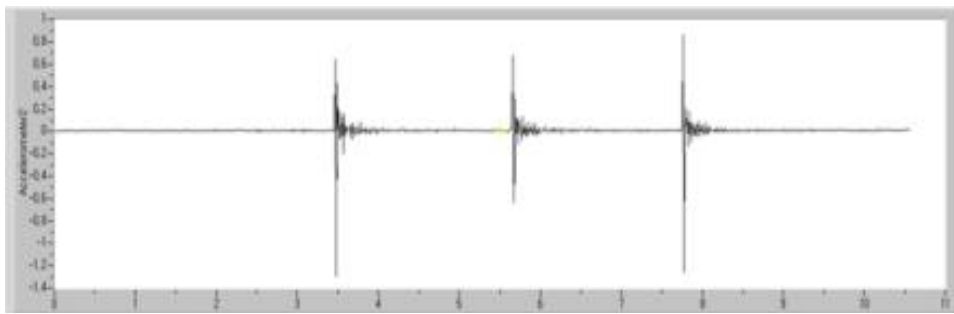


(a) Cable N2 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

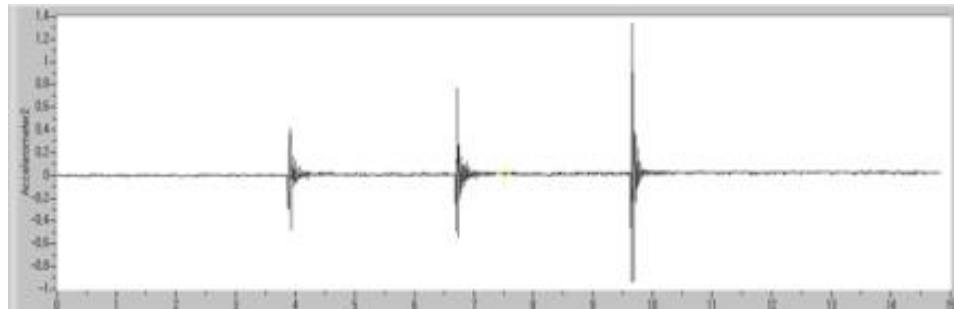


(b) Cable N2 $5 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 12 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N2)

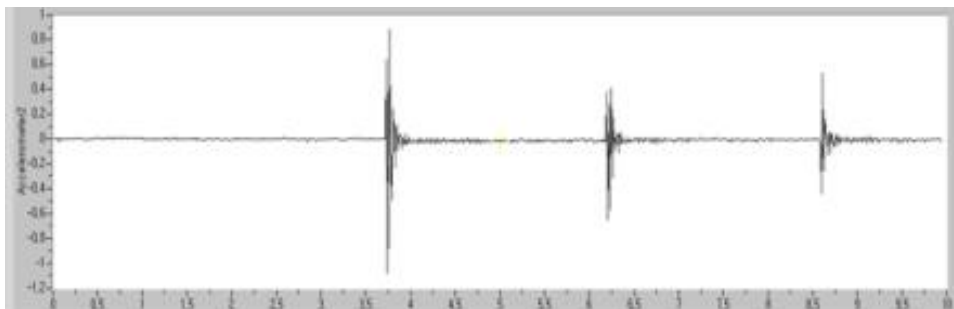


(a) Cable N3 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

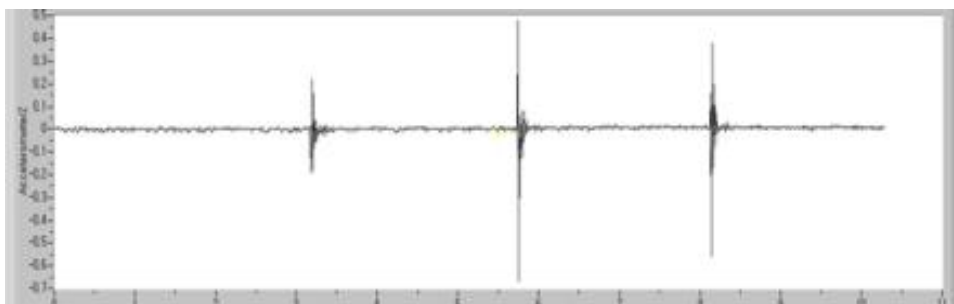


(b) Cable N3 $5 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 13 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N3)

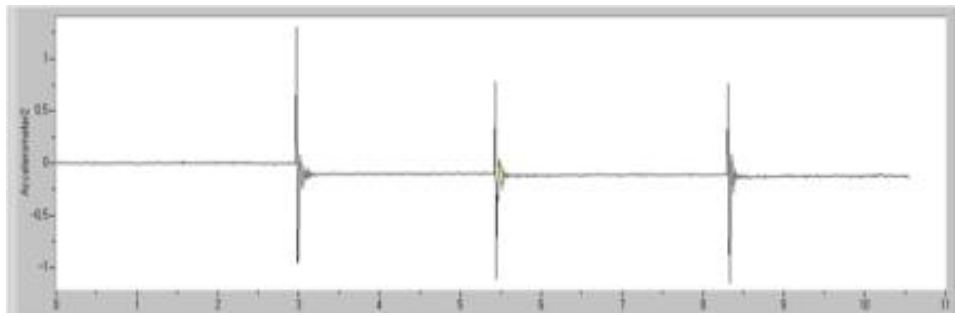


(a) Cable N4 $\times \varnothing 12.7\text{mm}$



(b) Cable N4 $4 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 14 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N4)



(a) Cable N5 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$

Fig. 15 Comparison of Acceleration of Motion sensor and Accelerometer(Cable N5)

Table 9 ~ Table 18에서 FFT해석을 통하여 고유진동수를 산정하고 현이론을 적용하여 장력을 구하여 Motion Sensor와 가속도계를 비교하였다.

Table 9 Comparison of Frequency and Tension (Cable N0; $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$)

Cable N0 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	1.56	1.56	0.00	11.81	11.81	0.00
	2	3.91	3.91	0.00	18.55	18.55	0.00
	3	7.81	7.81	0.00	32.89	32.89	0.00
	4	9.38	9.38	0.00	26.68	26.68	0.00
	5	12.50	12.50	0.00	30.33	30.33	0.00
	6	17.19	17.19	0.00	39.83	39.83	0.00
	7	18.75	18.75	0.00	34.82	34.82	0.00

Table 10 Comparison of Frequency and Tension (Cable N1; $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$)

Cable N1 $1 \times \varnothing 12.7\text{mm}$							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	3.13	3.13	0.00	136.35	136.35	0.00
	2	6.25	6.25	0.00	135.92	135.92	0.00
	3	9.96	10.16	-0.20	153.41	159.63	-6.22
	4	15.23	16.41	-1.18	201.77	234.24	-32.48
	5	25.59	250	0.59	364.56	347.94	16.62
	6	28.32	27.34	0.98	310.07	288.98	21.09
	7	35.94	36.72	-0.78	366.89	382.98	-16.10

Table 11 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N1; 5× ø12.7mm)

Cable N1 5× ø12.7mm							
Mode	Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
		Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	4.30	4.30	0.00	257.34	257.34	0.00
	2	10.55	10.55	0.00	387.27	387.27	0.00
	3	14.84	14.84	0.00	340.56	340.56	0.00
	4	19.14	19.14	0.00	318.67	318.67	0.00
	5	24.22	24.22	0.00	326.57	326.57	0.00
	6	28.91	28.91	0.00	323.12	323.12	0.00
	7	38.67	38.67	0.00	424.74	424.74	0.00

Table 12 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N2; 1× ø12.7mm)

Cable N2 1× ø12.7mm

Mode	Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
		Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
1		6.64	6.84	-0.20	288.53	306.17	-17.64
2		8.20	8.20	0.00	110.01	110.01	0.00
3		12.11	9.57	2.54	106.64	66.59	40.04
4		14.45	12.11	2.34	85.40	59.98	25.42
5		19.73	19.73	0.00	101.90	101.90	0.00
6		27.34	27.34	0.00	135.88	135.88	0.00
7		32.42	32.42	0.00	140.37	140.37	0.00

Table 13 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N2; 5× ø12.7mm)

Cable N2 5× ø12.7mm

Mode	Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
		Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	1.56	1.56	0.00	15.93	15.93	0.00
	2	3.13	3.13	0.00	16.03	16.03	0.00
	3	6.25	6.25	0.00	28.40	28.40	0.00
	4	8.59	8.59	0.00	30.18	30.18	0.00
	5	11.72	11.72	0.00	35.96	35.96	0.00
	6	13.28	13.28	0.00	32.06	32.06	0.00
	7	15.63	15.63	0.00	32.63	32.63	0.00

Table 14 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N3; 1× ø 12.7mm)

Cable N3 1× ø 12.7mm							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
1		7.81	7.81	0.00	173.73	173.73	0.00
2		12.89	12.89	0.00	118.31	118.31	0.00
3		17.19	17.19	0.00	93.52	93.52	0.00
4		21.48	21.48	0.00	82.13	82.13	0.00
5		26.17	26.17	0.00	78.03	78.03	0.00
6		30.47	30.47	0.00	73.46	73.46	0.00
7		41.41	39.45	1.96	99.68	90.46	9.21

Table 15 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N3; 5× ø 12.7mm)

Cable N3 5× ø 12.7mm							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	2.34	2.34	0.00	15.60	15.60	0.00
	2	5.47	5.47	0.00	21.31	21.31	0.00
	3	8.59	8.59	0.00	23.35	23.35	0.00
	4	11.72	11.72	0.00	24.45	24.45	0.00
	5	14.06	14.06	0.00	22.52	22.52	0.00
	6	18.75	18.75	0.00	27.82	27.82	0.00
	7	20.31	20.31	0.00	23.98	23.98	0.00

Table 16 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N4; 1× ø 12.7mm)

Cable N4 1× ø 12.7mm							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	6.25	6.25	0.00	78.90	78.90	0.00
	2	10.55	10.55	0.00	56.20	56.20	0.00
	3	15.63	15.63	0.00	54.83	54.83	0.00
	4	20.70	20.70	0.00	54.09	54.09	0.00
	5	26.95	26.95	0.00	58.68	58.68	0.00
	6	32.81	32.81	0.00	60.40	60.40	0.00
	7	39.84	39.84	0.00	65.43	65.43	0.00

Table 17 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N4; 4× ø 12.7mm)

Cable N4 4× ø 12.7mm							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	3.13	3.13	0.00	19.79	19.79	0.00
	2	7.42	7.42	0.00	27.80	27.80	0.00
	3	13.28	13.28	0.00	39.58	39.58	0.00
	4	17.97	17.97	0.00	40.77	40.77	0.00
	5	24.61	24.61	0.00	48.93	48.93	0.00
	6	30.47	30.47	0.00	52.09	52.09	0.00
	7	37.89	37.89	0.00	59.18	59.18	0.00

Table 18 Comparison of Frequency and Tension

(Cable N5; 1× ø 12.7mm)

Cable N5 1× ø 12.7mm							
Frequency(Hz)				Tension(N)			
Mode	Order	Motion Sensor	Acc.	Diff.	Motion Sensor	Acc.	Diff.
	1	5.47	2.34	3.13	31.77	5.81	25.95
	2	10.16	5.47	4.69	27.40	7.94	19.46
	3	13.28	7.03	6.25	20.80	5.83	14.97
	4	15.63	9.38	6.25	16.21	5.84	10.37
	5	17.97	13.28	4.69	13.71	7.49	6.22
	6	20.31	15.63	4.68	12.16	7.20	4.96
	7	31.25	17.97	13.28	21.16	7.00	14.16

Fig.16 ~ Fig.17은 케이블의 단면적변화에 따른 고유진동수 변화 및 장력의 변화를 나타내었다.

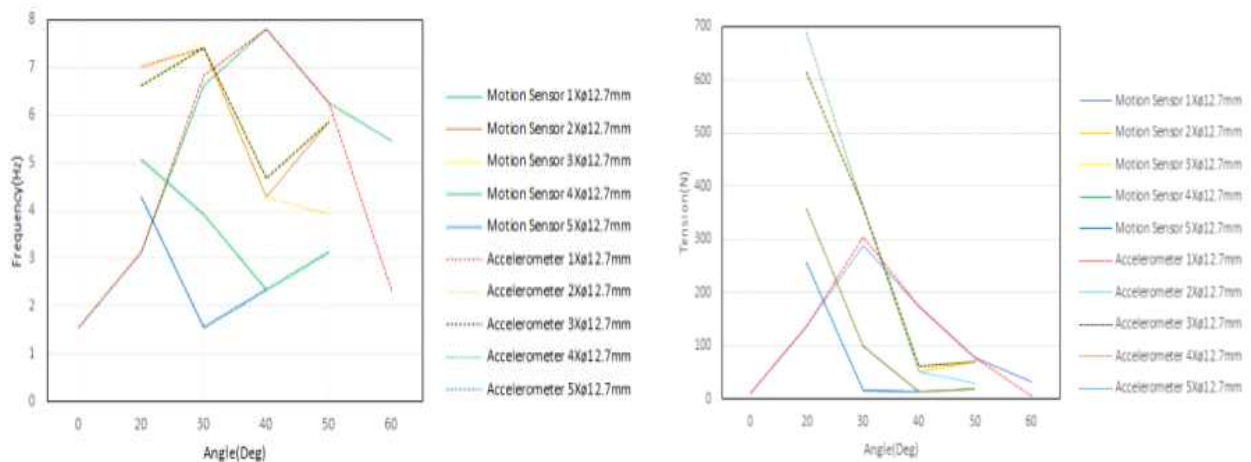


Fig. 16 Comparison of Frequency of Motion Sensor and Accelerometer Fig. 17 Comparison of Tension of Motion Sensor and Accelerometer

5. 결 론

본 연구에서는 H형강을 사용하여 케이블교량 축소 모형을 만들어 케이블과 수평면이 이루는 각이 0° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° 의 경우로 구분하여 각 경우마다 케이블에 대해서 1축 가속도계와 9축 모션센서를 사용하여 고유진동수를 산출하였고, 현의 진동이론과 보의 진동이론을 사용하여 케이블 장력을 산정하였다. 본 연구를 통해서 나온 결론은 다음과 같다.

- 1) 케이블의 단면이 커질수록 휨강성의 영향도 커지기 때문에 오차가 증가하며 케이블의 고유진동수도 감소하는 추세를 나타내었다. 또한, 케이블의 길이가 짧을수록 오차가 증가하는 경향을 보여 휨강성의 영향이 커진 것으로 판단되며 케이블의 길이가 길어질수록 고유진동수는 증가하는 경향을 나타내었다.
- 2) 케이블의 장력이 커질수록 오차는 작아지는 경향을 보였는데 이는 장력이 커질수록 새그비가 작아져서 오차가 감소하는 것으로 판단되며 케이블의 단면적이 커질수록 장력은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한, 케이블의 길이가 증가할수록 장력은 증가하는 경향을 나타내었다.
- 3) 9축 모션센서와 가속도계를 통해서 구한 고유진동수와 장력값의 차이는 미미한 것으로 나타나서 9축 모션센서를 이용하여 장력을 추정하여도 오차는 허용범위내에 들어올 것으로 보인다.

3.7 사장교 케이블장력 손실방지를 위한 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한

장력추정방법 개발

1. 기술분야

본 발명은 스마트센서를 이용한 사장교 케이블 시스템의 진동특성 및 변형특성을 파악하기 위해서 아두이노 기반의 소프트웨어 및 하드웨어를 단일 프로세서로 처리하여 통합 유지관리 시스템을 개발하여 케이블의 유지관리 장비를 구축한다.

2. 배경이 되는 기술

국내 서남해안의 섬과 육지를 잇는 사장교가 건설중이거나 계획중에 있으며 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세이다.

해외에서도 사장교의 건설이 다수 진행되고 있어 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세이다.

이러한 상황에서 사장교의 유지 관리를 위해, 사장교의 진동특성 및 변형특성을 평가하고 노후화를 막기 위해 연구가 필요하다.

사장교 케이블의 장력을 추정하는 방법으로는 로드셀과 유압잭, 스트레인 게이지를 사용해 직접적으로 측정하는 방법과 케이블의 제원과 계측된 가속도 데이터를 활용해 장력을 구하는 진동법이 활용되고 있다. 직접적인 측정 방법은 케이블 유지관리시에 유용하게 사용할 수 없다는 단점이 있다.

진동법을 이용한 케이블의 장력 추정법은 케이블의 고유진동수, 케이블의 유효길이, 케이블의 단위길이당 질량, 고유진동수의 모드차수등의 변수에 의해 결정된다.

3. 해결하고자 하는 과제

1) 조사신뢰도

일반적으로 사장교 케이블의 유지관리는 점검자가 직접 케이블에 근접하여 케이블의 진동특성 및 변형특성을 측정하기 때문에 점검자에 따라 측정값이 다르게 측정될 수 있고, 교량 연장이 길어질수록 케이블 길이가 길어지게 되므로 단일 센서로는 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 힘들다.

2) 경제성

기존의 사장교 케이블 유지관리 시스템은 많은 비용이 발생한다는 문제점이 있으며, 또한 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 변형특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다.

3) 안전성

기존의 사장교 케이블의 유지관리 방법은 사장교 케이블의 규모에 의해서 위치적 접근성과 안전성이 떨어졌다.

4) 조사측정시간

점검자의 이동성 한계와 단일 센서를 사용하므로서 교량 연장이 수십 수백미터에 이르는 사장교 케이블의 전체적인 점검을 실시하려면 조사시간이 길어지므로 제한적인 점검을 실시했다.

조사값에 대한 정확도가 높은 초소형 센서 및 다종의 센서들을 아두이노 기반 통합시스템에 탑재하여 운영하면 기존 유지관리방법대비 경제적이 절감효과가 크므로 전체 케이블에 계측장비를 설치할 수 있어 사장교 케이블의 전체적인 관리가 가능해지며 유지관리를 효율적이고 경제적으로 수행할 수 있다.

실제 교량에서 점검자가 케이블을 인위적으로 가진하지 않아도 케이블에 가해지는 바람이나, 교량 위를

주행하는 차량 등의 하중에 의해 케이블에 발생하는 진동을 이용해 장력을 측정할 수 있다.

아두이노에 장착된 9축 모션 센서의 가속도 데이터를 Xbee센서를 통해 결과값을 송신하여 수신기로 확인할 수 있다.

아두이노는 가속도 정보를 받는 9축 모션센서, 송수신하는 Xbee센서, 전기를 공급하는 배터리 등이 아두이노에 장착되어 사장교 케이블의 장력특성과 변형특성을 측정할 수 있다.

9축 모션 센서는 사장교 케이블의 가속도를 측정하는 센서이다.

Xbee센서는 송수신센서로 아두이노에서 측정된 가속도 측정 값을 Xbee센서를 통해 수신기로 송신하는 센서이다.

배터리는 아두이노에 결합되어 있는 센서들을 작동시키기 위해 전력공급을 하는 장치이다.

4. 발명의 효과

기존의 사장교 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS를 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로서 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 변형특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 발명은 이러한 미비점을 보완하고자 설치비용이 저렴한 초소형 스마트 센서를 단일 센서가 아닌 다중 센서를 통합적으로 운용 관리할 수 있는 아두이노 기반의 케이블 유지관리 시스템을 개발하여 하드웨어 및 소프트웨어를 효율적으로 활용하고자 하였다.

도 1은 사장교 케이블의 축소모형을 제작한 도면이며, 케이블의 경사각이 각각 20° , 30° , 40° , 50° , 60° , 70° 의 경우로 총 21개의 케이블에 대해서 장력계측 실험을 실시 할 수 있게 만들어졌다.

도 2는 케이블의 수평거동을 확인하기 위한 실험모형이며 총 1개의 케이블에 대해서 장력계측 실험을 실시 할 수 있게 만들어졌다.

장력을 측정하고자 하는 케이블에 아두이노 센서를 부착하고 설치된 케이블의 대한 비파괴 측정을 위해 주행차량이나 바람 등의 상시 진동을 이용하거나 충격망치를 사용하여 강제 진동(가진)을 일으킨다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 9축 모션 센서를 통해 가속도를 측정한다. 가속도 공식은 다음 수학적 식 1과 같다.

【수학적 식 1】

$$g = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

여기서 g 는 중력가속도이며, 3차원 좌표상의 x, y, z 축의 스칼라량의 합은 중력가속도와 같다.

측정된 가속도 값을 Xbee를 통하여 PC로 전송한다. 이 때 측정된 가속도는 시간이력 가속도이며, 이 시간이력 가속도 데이터를 FFT(Fast Fourier Transformation)분석을 통해 주파수 영역으로 변환시킨다. FFT 공식은 $x_0, \dots, x_{n-1}$ 이 복소수라고 가정할 때, 다음 수학적 식 2와 같다.

【수학적 식 2】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k W^{jk}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

다음 수학적 식 2에서 $W = e^{-2\pi i/n}$ 라고 하고 정리하면, 다음 수학적 식 3이 된다.

【수학적 식 3】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-2\pi i/n^{jk}}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

변환된 가속도 신호를 주파수 영역으로 전개한 후 고유진동수를 결정하고 수학적 모델의 특성방정식인 현의 진동이론 방정식을 이용하여 장력을 구한다. 현의 이론 방정식은 다음 수학식 4과 같이 미분방정식으로 표시할 수 있다.

【수학식 4】

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

여기서, y 는 진폭, x 는 길이, t 는 시간, w 는 단위중량, g 는 중력가속도이며 수학식 4을 양단 고정의 경계조건으로 풀면 수학식 5와 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력추정식을 얻을 수 있다.

【수학식 5】

$$T = \frac{4wL^2}{n^2g} \cdot (f_n)^2$$

여기서, T 는 장력, L 은 케이블 길이, w 는 단위중량, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차 고유진동수이다. 현의 진동이론을 이용한 방정식은 새그와 휨강성을 고려하지 않고 오로지 장력과 고유진동수의 관계만을 고려하므로 휨강성의 영향이 적은 케이블에 적합하다.

사장교 케이블의 진동특성 및 변형특성을 해석하기 위해 아두이노 센서모듈을 케이블에 연결하여 가속도 데이터를 용이하게 측정하는 장비로서,

아두이노 보드와 센서모듈을 결합하여 통신을 설정하는 단계;

수신부 컴퓨터에 아두이노 보드와 Xbee센서모듈을 연결하여 통신을 설정하는 단계;

다종의 아두이노 센서를 사장교 케이블에 부착시키는 단계;

9축모션센서가 감지한 케이블의 가속도 데이터를 Xbee센서를 통해 수신부로 전송하는 단계;

수신받은 가속도 데이터를 FFT 분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계;

FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계;

추정장력과 허용장력과 비교하여 평가하는 단계;

도 1은 사장교 축소 모형을 나타낸 사진이다.

도 2는 케이블의 수평거동을 위한 실험모형을 나타낸 사진이다.

도 3는 12.7mm 케이블을 나타낸 사진이다.

도 4은 유압실린더를 나타낸 사진이다.

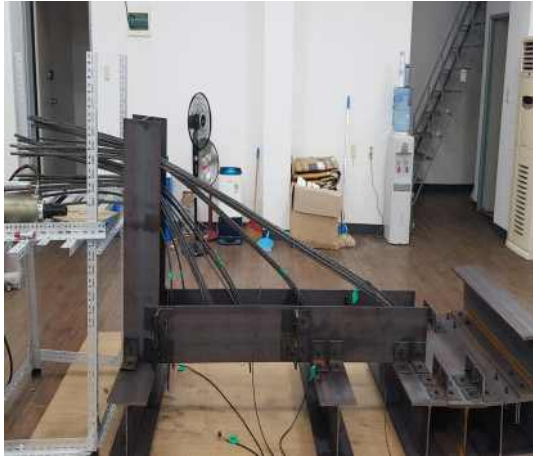
도 5는 유압펌프를 나타낸 사진이다.

도 6은 아두이노 보드에 결합되는 9축모션센서를 나타낸 사진이다.

도 7은 데이터로거를 나타낸 사진이다.

도 8은 본 발명에 따른 사장교 케이블 교량의 장력 측정방법을 단계별로 설명한 흐름도이다.

도 9 ~ 14은 1축 가속도계와 9축 모션 센서의 가속도값을 비교한 그래프도이다.



【도 1】



【도 2】



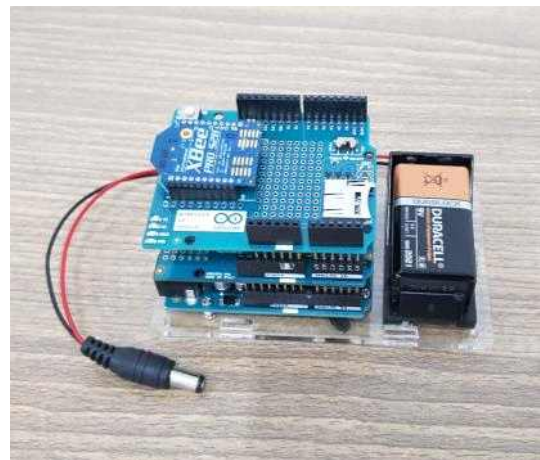
【도 3】



【도 4】



【도 5】

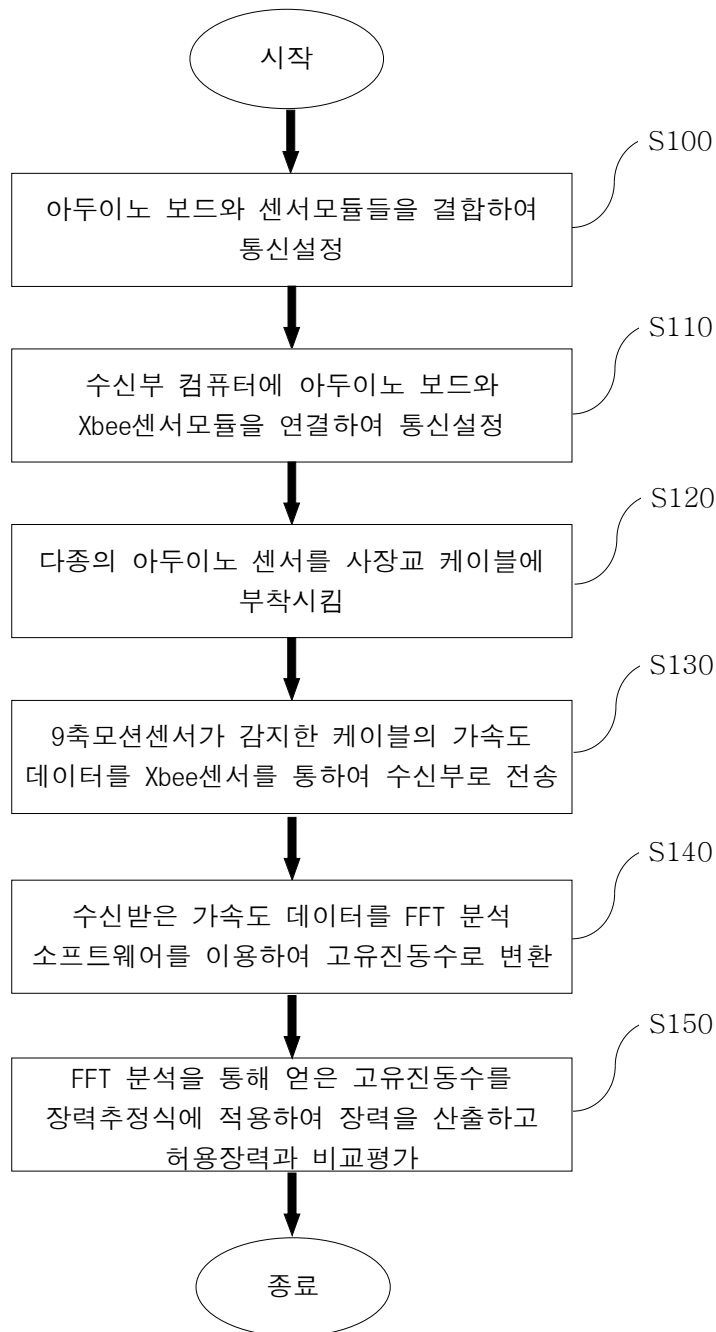


【도 6】

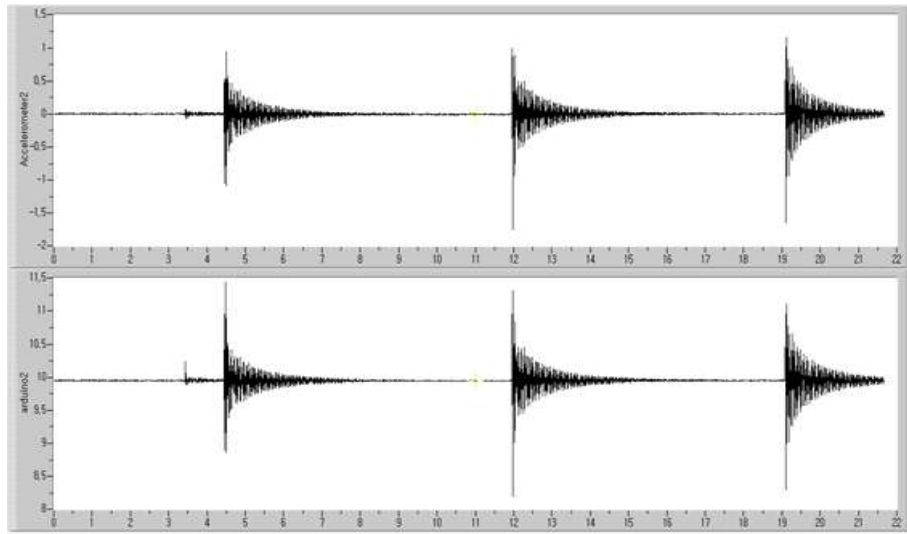


【도 7】

【도 8】

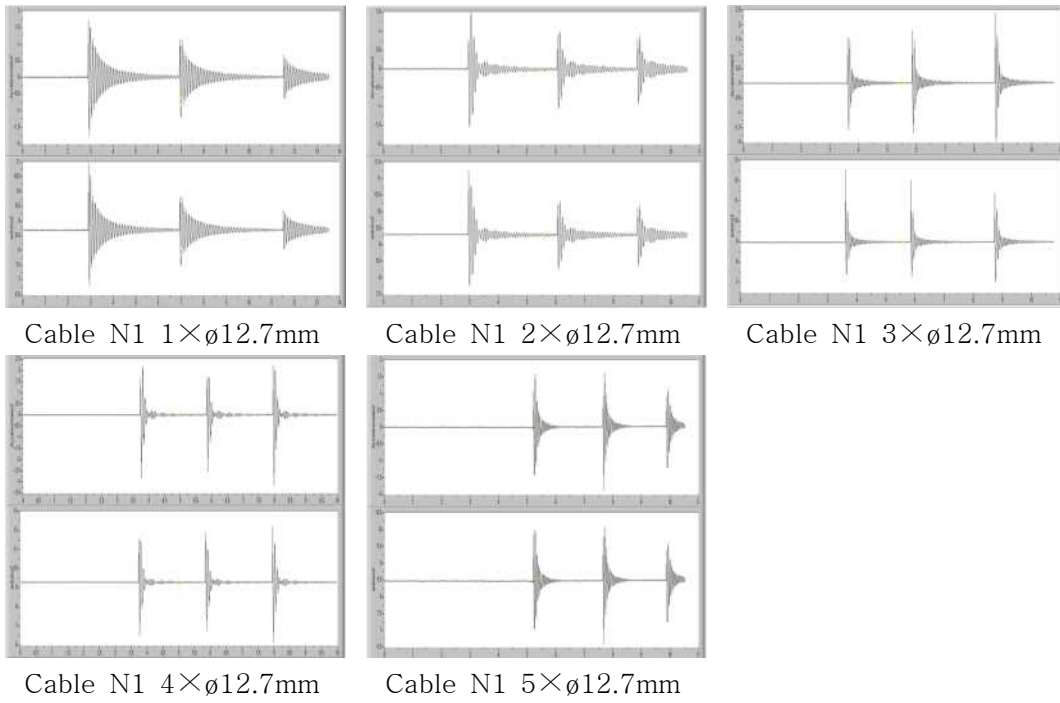


【도 9】

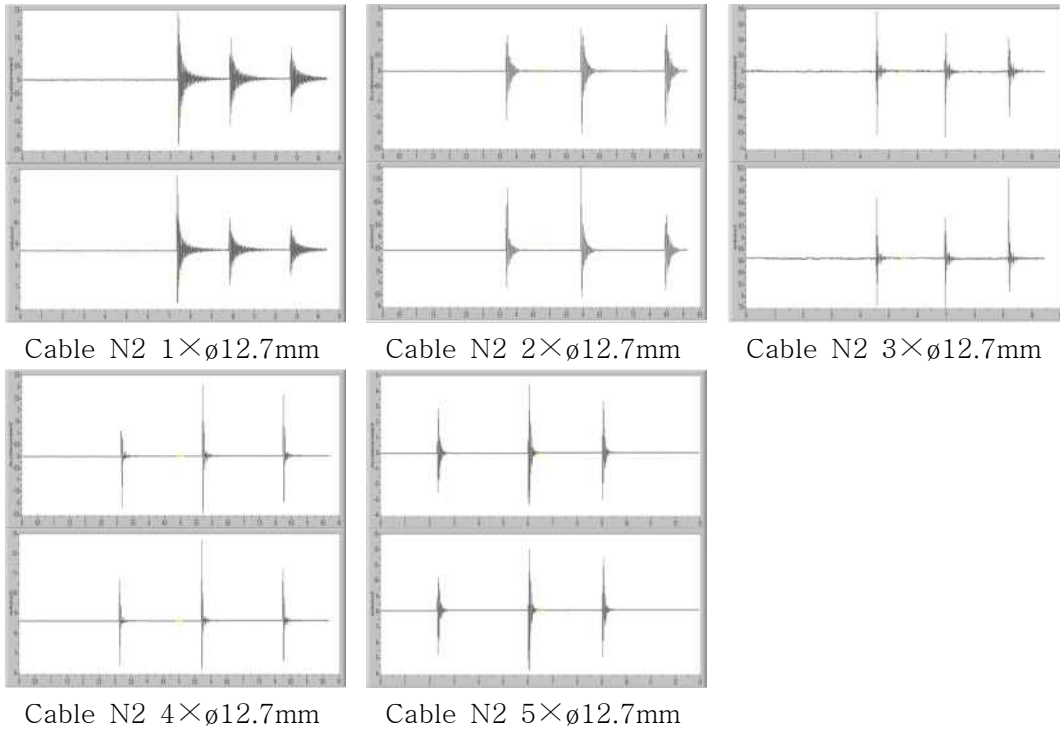


Cable N0 1×ø12.7mm

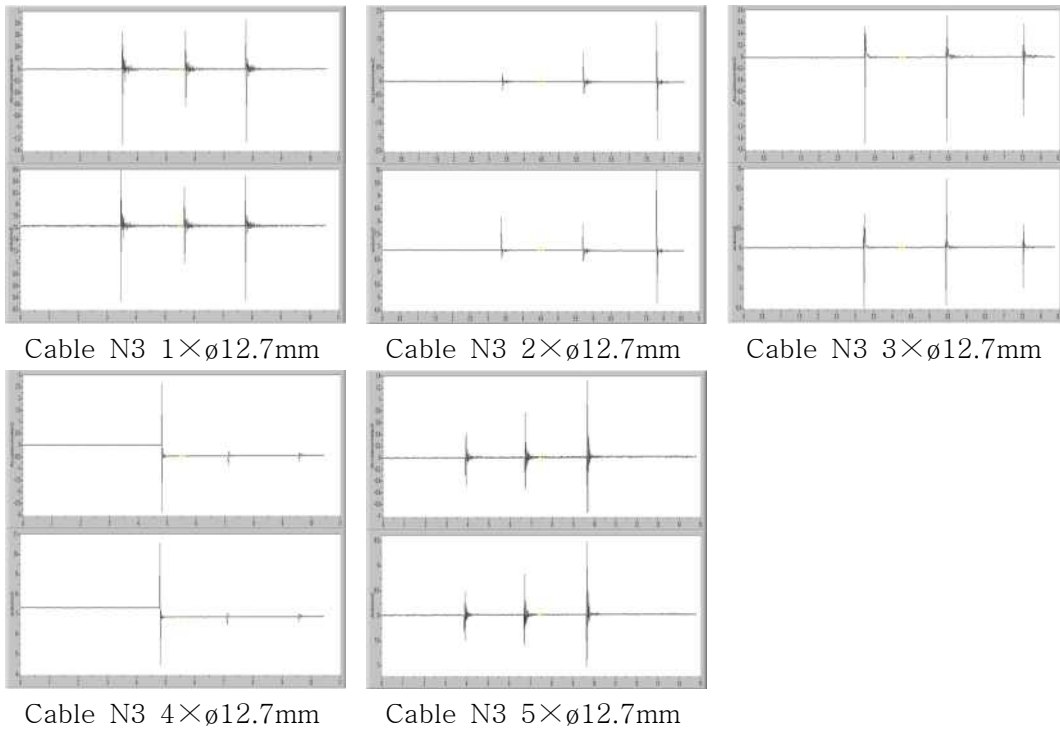
【도 10】



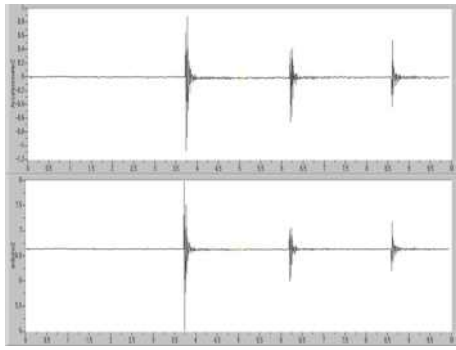
【도 11】



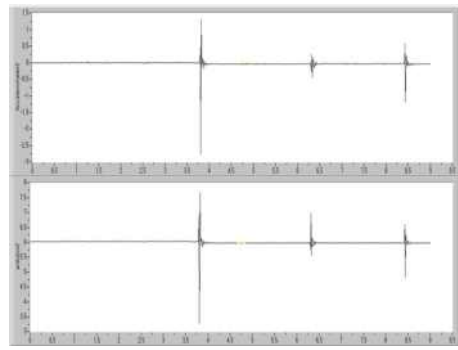
【도 12】



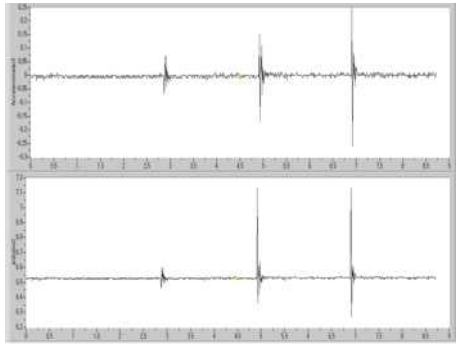
【도 13】



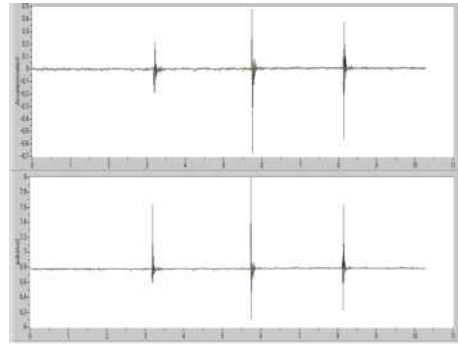
Cable N4 1×Ø12.7mm



Cable N4 2×Ø12.7mm

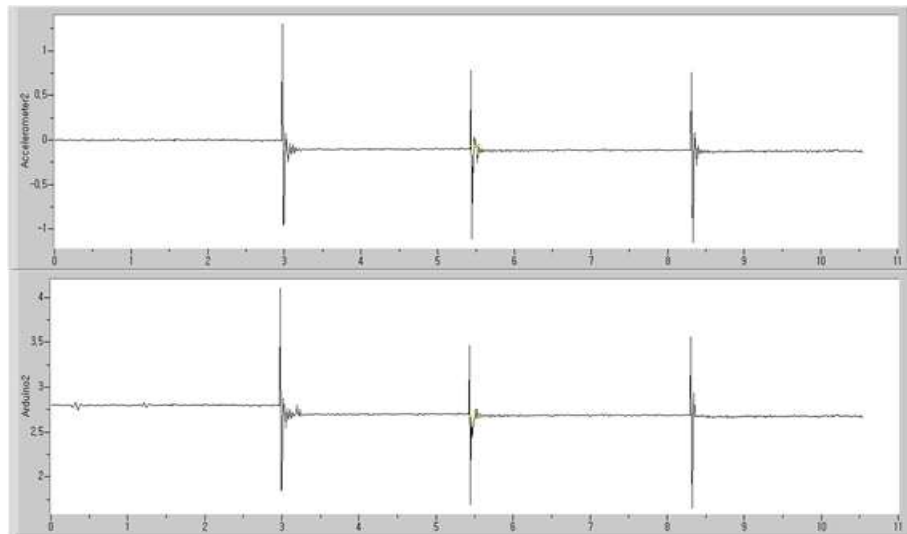


Cable N4 3×Ø12.7mm



Cable N4 4×Ø12.7mm

【도 14】



Cable N5 1×Ø12.7mm

【表 1】 Cable Dimension

Division	Length	Angle
Cable N0	1.250m	0°
Cable N1	2.100m	20°
Cable N2	1.440m	30°
Cable N3	0.950m	40°
Cable N4	0.800m	50°
Cable N5	0.580m	60°
Cable N6	0.530m	70°

【表 2】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N0)

Cable N0 1×ø12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	1.56	1.56	0.00	11.81	11.81	0.00
2	3.91	3.91	0.00	18.55	18.55	0.00
3	7.81	7.81	0.00	32.89	32.89	0.00
4	9.38	9.38	0.00	26.68	26.68	0.00
5	12.50	12.50	0.00	30.33	30.33	0.00
6	17.19	17.19	0.00	39.83	39.83	0.00
7	18.75	18.75	0.00	34.82	34.82	0.00

【表 3】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N1)

Cable N1 1×ø12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	3.13	3.13	0.00	136.35	136.35	0.00
2	6.25	6.25	0.00	135.92	135.92	0.00
3	9.96	10.16	-0.2	153.41	159.63	-6.22
4	15.23	16.41	-1.18	201.77	234.24	-32.48
5	25.59	25.00	0.59	364.56	347.94	16.62
6	28.32	27.34	0.98	310.07	288.98	21.09
7	35.94	36.72	-0.78	366.89	382.98	-16.10

【表 4】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N1)

Cable N1 2× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	7.03	7.03	0.00	687.83	687.83	0.00
2	11.72	11.72	0.00	477.93	477.93	0.00
3	23.05	18.75	4.30	821.62	543.66	277.95
4	28.91	28.91	0.00	727.02	727.02	0.00
5	32.42	32.42	0.00	585.14	585.14	0.00
6	41.41	41.41	0.00	662.95	662.95	0.00
7	48.44	48.44	0.00	666.47	666.47	0.00

【表 5】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N1)

Cable N1 3× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	6.64	6.64	0.00	613.63	613.63	0.00
2	10.16	10.16	0.00	359.17	359.17	0.00
3	16.80	16.80	0.00	436.46	436.46	0.00
4	21.09	21.09	0.00	386.90	386.90	0.00
5	28.91	28.91	0.00	465.29	465.29	0.00
6	36.33	36.33	0.00	510.27	510.27	0.00
7	46.09	46.09	0.00	603.38	603.38	0.00

【表 6】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N1)

Cable N1 4× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	5.08	5.08	0.00	359.17	359.17	0.00
2	10.16	10.16	0.00	359.17	359.17	0.00
3	16.02	16.02	0.00	396.87	396.87	0.00
4	25.00	25.00	0.00	543.66	543.66	0.00
5	30.08	30.08	0.00	503.72	503.72	0.00
6	38.67	38.67	0.00	578.12	578.12	0.00
7	46.09	46.09	0.00	603.38	603.38	0.00

【表 7】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N1)

Cable N1 5× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	4.30	4.30	0.00	257.34	257.34	0.00
2	10.55	10.55	0.00	387.27	387.27	0.00
3	14.84	14.84	0.00	340.56	340.56	0.00
4	19.14	19.14	0.00	318.67	318.67	0.00
5	24.22	24.22	0.00	326.57	326.57	0.00
6	28.91	28.91	0.00	323.12	323.12	0.00
7	38.67	38.67	0.00	424.74	424.74	0.00

【表 8】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N2)

Cable N2 1× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	6.64	6.84	-0.20	288.53	306.17	-17.64
2	8.20	8.20	0.00	110.01	110.01	0.00
3	12.11	9.57	2.54	106.64	66.59	40.04
4	14.45	12.11	2.34	85.40	59.98	25.42
5	19.73	19.73	0.00	101.90	101.90	0.00
6	27.34	27.34	0.00	135.88	135.88	0.00
7	32.42	32.42	0.00	140.37	140.37	0.00

【表 9】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N2)

Cable N2 2× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	7.42	7.42	0.00	360.30	360.30	0.00
2	10.16	10.16	0.00	168.88	168.88	0.00
3	12.50	12.50	0.00	113.61	113.61	0.00
4	16.80	16.80	0.00	115.44	115.44	0.00
5	20.31	20.31	0.00	107.98	107.98	0.00
6	24.61	24.61	0.00	110.10	110.10	0.00
7	39.06	33.59	5.47	203.76	150.69	53.07

【表 10】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N2)

Cable N2 3× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	7.42	7.42	0.00	360.30	360.30	0.00
2	14.84	14.84	0.00	360.30	360.30	0.00
3	17.19	17.19	0.00	214.87	214.87	0.00
4	19.53	19.53	0.00	156.01	156.01	0.00
5	29.69	29.69	0.00	230.75	230.75	0.00
6	34.77	34.77	0.00	219.77	219.77	0.00
7	42.19	42.19	0.00	237.73	237.73	0.00

【表 11】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N2)

Cable N2 4× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	3.91	3.91	0.00	100.05	100.05	0.00
2	8.98	8.98	0.00	131.93	131.93	0.00
3	12.89	12.89	0.00	120.81	120.81	0.00
4	17.19	17.19	0.00	120.86	120.86	0.00
5	25.78	25.78	0.00	173.97	173.97	0.00
6	32.81	32.81	0.00	195.69	195.69	0.00
7	41.80	41.80	0.00	233.35	233.35	0.00

【表 12】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N2)

Cable N2 5× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	1.56	1.56	0.00	15.93	15.93	0.00
2	3.13	3.13	0.00	16.03	16.03	0.00
3	6.25	6.25	0.00	28.40	28.40	0.00
4	8.59	8.59	0.00	30.18	30.18	0.00
5	11.72	11.72	0.00	35.96	35.96	0.00
6	13.28	13.28	0.00	32.06	32.06	0.00
7	15.63	15.63	0.00	32.63	32.63	0.00

【表 13】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N3)

Cable N3 1× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	7.81	7.81	0.00	173.73	173.73	0.00
2	12.89	12.89	0.00	118.31	118.31	0.00
3	17.19	17.19	0.00	93.52	93.52	0.00
4	21.48	21.48	0.00	82.13	82.13	0.00
5	26.17	26.17	0.00	78.03	78.03	0.00
6	30.47	30.47	0.00	73.46	73.46	0.00
7	41.41	39.45	1.96	99.68	90.46	9.21

【表 14】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N3)

Cable N3 2× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	4.30	4.30	0.00	52.66	52.66	0.00
2	9.77	8.20	1.57	67.97	47.88	20.09
3	13.67	13.67	0.00	59.14	59.14	0.00
4	16.02	18.36	-2.34	45.69	60.01	-14.32
5	24.22	24.22	0.00	66.83	66.83	0.00
6	37.89	32.81	5.08	113.59	85.17	28.42
7	41.80	41.80	0.00	101.56	101.56	0.00

【表 15】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N3)

Cable N3 3× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	4.69	4.69	0.00	62.65	62.65	0.00
2	10.55	10.55	0.00	79.25	79.25	0.00
3	14.06	14.06	0.00	62.56	62.56	0.00
4	19.14	19.14	0.00	65.21	65.21	0.00
5	25.39	25.39	0.00	73.45	73.45	0.00
6	30.08	30.08	0.00	71.59	71.59	0.00
7	39.06	39.06	0.00	88.68	88.68	0.00

【表 16】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N3)

Cable N3 4× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	2.34	2.34	0.00	15.60	15.60	0.00
2	5.47	5.47	0.00	21.31	21.31	0.00
3	8.59	8.59	0.00	23.35	23.35	0.00
4	11.72	11.72	0.00	24.45	24.45	0.00
5	20.31	20.31	0.00	47.00	47.00	0.00
6	25.78	25.78	0.00	52.58	52.58	0.00
7	35.94	35.94	0.00	75.08	75.08	0.00

【表 17】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N3)

Cable N3 5× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	2.34	2.34	0.00	15.60	15.60	0.00
2	5.47	5.47	0.00	21.31	21.31	0.00
3	8.59	8.59	0.00	23.35	23.35	0.00
4	11.72	11.72	0.00	24.45	24.45	0.00
5	14.06	14.06	0.00	22.52	22.52	0.00
6	18.75	18.75	0.00	27.82	27.82	0.00
7	20.31	20.31	0.00	23.98	23.98	0.00

【表 18】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N4)

Cable N4 1× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	6.25	6.25	0.00	78.90	78.90	0.00
2	10.55	10.55	0.00	56.20	56.20	0.00
3	15.63	15.63	0.00	54.83	54.83	0.00
4	20.70	20.70	0.00	54.09	54.09	0.00
5	26.95	26.95	0.00	58.68	58.68	0.00
6	32.81	32.81	0.00	60.40	60.40	0.00
7	39.84	39.84	0.00	65.43	65.43	0.00

【表 19】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N4)

Cable N4 2× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	5.86	3.91	1.95	69.36	30.88	38.48
2	10.55	10.55	0.00	56.20	56.20	0.00
3	12.89	12.89	0.00	37.29	37.29	0.00
4	16.02	16.02	0.00	32.40	32.40	0.00
5	21.88	21.88	0.00	38.68	38.68	0.00
6	30.86	30.86	0.00	53.43	53.43	0.00
7	39.45	36.45	0.00	64.15	54.77	9.39

【표 20】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N4)

Cable N4 3× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	5.86	5.86	0.00	69.36	69.36	0.00
2	8.98	8.98	0.00	40.72	40.72	0.00
3	14.84	14.84	0.00	49.42	49.42	0.00
4	23.44	23.44	0.00	69.36	69.36	0.00
5	32.03	32.03	0.00	82.89	82.89	0.00
6	39.84	39.84	0.00	89.05	89.05	0.00
7	47.27	47.27	0.00	92.11	92.11	0.00

【표 21】 Comparison of Frequency and Tension(Cable N4)

Cable N4 4× ø 12.7mm						
Mode Order	Frequency(Hz)			Tension(N)		
	Motion Sensor	Accelerometer	difference	Motion Sensor	Accelerometer	difference
1	3.13	3.13	0.00	19.79	19.79	0.00
2	7.42	7.42	0.00	27.80	27.80	0.00
3	13.28	13.28	0.00	39.58	39.58	0.00
4	17.97	17.97	0.00	40.77	40.77	0.00
5	24.61	24.61	0.00	48.93	48.93	0.00
6	30.47	30.47	0.00	52.09	52.09	0.00
7	37.89	37.89	0.00	59.18	59.18	0.00

3.8 변형률계의 동적해석을 통한 교량 케이블의 장력추정방법

1. 기술분야

본 발명은 변형률계를 이용한 교량 케이블 시스템의 진동특성 및 장력특성을 파악하기 위해서 변형률계를 이용한 교량 케이블의 장력을 추정하기 위한 방법으로서 하드웨어를 단일 프로세서로 처리하여 교량 케이블의 유지관리 분야에 활용하도록 한다.

2. 배경이 되는 기술

국내 서남해안의 섬과 육지를 잇는 케이블교가 건설중이거나 계획중에 있으며 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세이다.

해외에서도 케이블교의 건설이 다수 진행되고 있어 시장성이 양호하며 향후 시장의 규모도 점차 증대되고 있는 추세이다.

이러한 상황에서 케이블교의 시공 중 뿐만 아니라 공용 중에도 유지 관리를 위해 활용할 수 있는 상시 모니터링 시스템을 구축하여 케이블교의 장력특성을 평가하고 노후화를 막기 위해 연구가 필요하다.

케이블의 장력을 추정하는 방법으로는 로드셀과 유압잭 등을 사용해 직접적으로 측정하는 방법과 케이블의 제원과 계측된 가속도 데이터를 활용해 장력을 구하는 진동법이 활용되고 있다.

직접적인 측정 방법은 케이블 유지관리시에 유용하게 사용할 수 없다는 단점이 있다.

반면에 변형률 게이지 또는 가속도계를 케이블에 부착하여 장력이 도입된 케이블의 진동특성을 추정하는 간접적인 측정방법은 케이블을 장기적으로 관리해야 하는 모니터링 시스템에 적합하다고 볼 수 있다.

변형률 게이지를 이용한 케이블의 장력 추정법은 케이블의 길이, 케이블의 탄성계수, 케이블의 단면적, 케이블의 고유진동수 등의 변수에 의해 결정된다.

3. 해결하고자 하는 과제

1) 조사신뢰도

일반적으로 케이블교의 유지관리는 점검자가 직접 케이블에 근접하여 케이블의 장력특성을 측정하기 때문에 점검자에 따라 측정값이 다르게 측정될 수 있고, 교량 연장이 길어질수록 케이블 길이가 길어지게 되므로 단일 센서로는 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 힘들다.

2) 경제성

기존의 케이블교의 유지관리 시스템은 많은 비용이 발생한다는 문제점이 있으며, 또한 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로 전체적인 케이블 시스템의 장력특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다.

3) 안전성

기존의 케이블교의 유지관리 방법은 케이블교의 규모에 의해서 위치적 접근성과 안전성이 떨어졌다.

4) 조사측정시간

점검자의 이동성 한계와 단일 센서를 사용함으로써 교량 연장이 수십, 수백미터에 이르는 케이블교의 전체적인 점검을 실시하려면 조사시간이 길어지므로 제한적인 점검을 실시했다.

4. 과제의 해결 수단

조사값에 대한 정확도가 높은 케이블의 변형률 응답계측을 이용하면 기존 유지관리방법대비 경제적으로 절감효과가 크므로 다수의 케이블에 계측기를 설치할 수 있어 케이블교의 전체적인 관리가 가능해지며 유지

관리를 효율적이고 경제적으로 수행할 수 있다.

실제 교량에서 점검자가 케이블을 인위적으로 가진하지 않아도 케이블에 가해지는 바람이나, 교량 위를 주행하는 차량 등의 하중에 의해 케이블에 발생하는 진동을 이용해 장력을 측정할 수 있다.

데이터로거는 변형률 정보를 수신하여 FFT해석을 통해 고유진동수를 알아내어 케이블교의 장력특성을 측정할 수 있다.

변형률 게이지는 시공중인 케이블교의 변형률을 측정하는 센서이다.

가속도계는 시공중인 교량과 공용중인 교량 케이블의 가속도를 측정하는 센서이다.

데이터로거는 측정장비로 변형률 게이지와 가속도계로부터 측정된 변형률과 가속도 측정값을 유선케이블을 통해 실시간으로 데이터 측정 및 저장, 그래프를 표시하는 PC 연결형 측정기다.

5. 발명의 효과

기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS를 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로서 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 장력특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 발명은 이러한 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 부착 및 제거 과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 변형률 게이지를 통해 케이블 유지관리 방법을 개발하여 하드웨어를 효율적으로 활용하고자 하였다.

도 1는 케이블의 측방향거동을 확인하기 위한 실험모형이며 총 1개의 케이블에 대해서 장력계측 실험을 실시할 수 있게 만들어졌다.

장력을 측정하고자 하는 케이블에 변형률 게이지와 가속도계를 부착하고 설치된 케이블에 대한 비파괴 측정을 위해 주행차량이나 바람 등의 상시 진동을 이용하거나 충격망치를 사용하여 강제 진동(가진)을 일으킨다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 변형률 게이지를 통해 변형률을 측정한다. 변형률을 이용한 장력추정 공식은 다음 수학식 1과 같다.

【수학식 1】

$$H_s(w) = -z \sum_{r=1}^n \left(\frac{r\pi}{l} \right) \frac{W_r^s(x) W_r(\bar{x})}{(w_r^2 - w^2 + 2\xi w_r w j) \rho A l}$$

$$W_r^s(x) = -\sin\left(\frac{r\pi x}{l}\right)$$

여기서, W_r 는 변위모드함수, W_r^s 는 변형률 모드함수이다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 변형률을 통해 변형률값을 측정한다. 변형률을 이용한 장력추정 공식은 상기 수학식 1과 같다. 이 때 측정된 변형률은 시간이력 변형률이며, 이 시간이력 변형률 데이터를 FFT(Fast Fourier Transformation)분석을 통해 주파수 영역으로 변환시킨다. FFT 공식은 $x_0, \dots, x_{n-1}$ 이 복소수라고 가정할 때, 다음 수학식 2와 같다.

【수학식 2】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k W^{jk}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

다음 수학식 2에서 $W = e^{-2\pi i/n}$ 라고 하고 정리하면, 다음 수학식 3이 된다.

【수학식 3】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-2\pi i / n^{jk}}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

변환된 가속도 신호를 주파수 영역으로 전개한 후 고유진동수를 결정하고 수학적 모델의 특성방정식인 현의 진동이론 방정식을 이용하여 장력을 구한다. 현의 이론 방정식은 현과 현에 작용하는 장력과 방정식을 이용하여 해를 구한다. 현 이론식에 의할 경우 케이블의 강성을 고려한 경우 길이가 비교적 짧고 새그의 영향을 무시할 수 있는 경우에 전 지간에 걸쳐서 케이블의 휨 강성이 일정하다고 생각되면 다음 수학식 4과 같이 휨 강성을 고려한 미분방정식으로 표시할 수 있다.

【수학식 4】

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

여기서, T 는 케이블의 휨 강성, y 는 진폭, x 는 길이, t 는 시간, w 는 단위중량, g 는 중력가속도이며 수학식 4을 양단 고정 경계조건으로 풀면 수학식 5와 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력추정식을 얻을 수 있다.

【수학식 5】

$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2$$

여기서, T 는 장력, L 은 케이블 길이, w 는 단위중량, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차 고유진동수이다.

수학식 5을 케이블의 진동으로 고유진동수를 실험적으로 획득하는 경우 장력을 추정하기 위하여 다음 수학식 6과 같은 1차 회귀식으로 정리한다.

【수학식 6】

$$\left(\frac{f_n}{n} \right)^2 = T \cdot \frac{g}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + a \cdot n^2$$

따라서 변형률계에 의해 측정된 케이블의 변형률의 FFT 분석결과를 위의 수학식 6과 같이 1차 회귀식으로 나타낸 후, 매개변수 a (기울기)와 b (y 절편)를 구하면 아래의 수학식 7에 의해 케이블의 장력과 휨 강성을 산정할 수 있다.

【수학식 7】

$$a = \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4}, EI = \frac{4wL_{eff}^4}{\pi^2 g} a$$

$$b = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2}, T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} b$$

위의 수학식 7과 같이 휨 강성 EI 와 장력값 T 를 구할 수 있다.

교량 케이블의 장력특성을 해석하기 위해 변형률 게이지를 케이블에 연결하여 변형률 데이터를 용이하게 측정하는 방법으로서,

수신부 컴퓨터에 변형률 게이지를 연결하여 데이터 로거 통신을 설정하는 단계;

변형률 게이지를 교량 케이블에 부착시키는 단계;

변형률 게이지가 감지한 케이블의 변형률 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계;
수신받은 변형률 데이터를 FFT 분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계;
FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계;
추정장력과 허용장력과 비교하여 평가하는 단계;
도 1는 케이블의 축방향거동을 위한 실험모형을 나타낸 사진이다.
도 2는 15.2mm 케이블을 나타낸 사진이다.
도 3은 유압실린더를 나타낸 사진이다.
도 4는 유압펌프를 나타낸 사진이다.
도 5은 변형률 게이지를 나타낸 사진이다.
도 6은 데이터로거를 나타낸 사진이다.
도 7은 본 발명에 따른 케이블 교량의 장력 측정방법을 단계별로 설명한 흐름도이다.
도 8은 FFT해석을 통한 고유진동수를 산정하는 그래프도이다.

【도면】



【도 1】



【도 2】



【도 3】



【도 4】

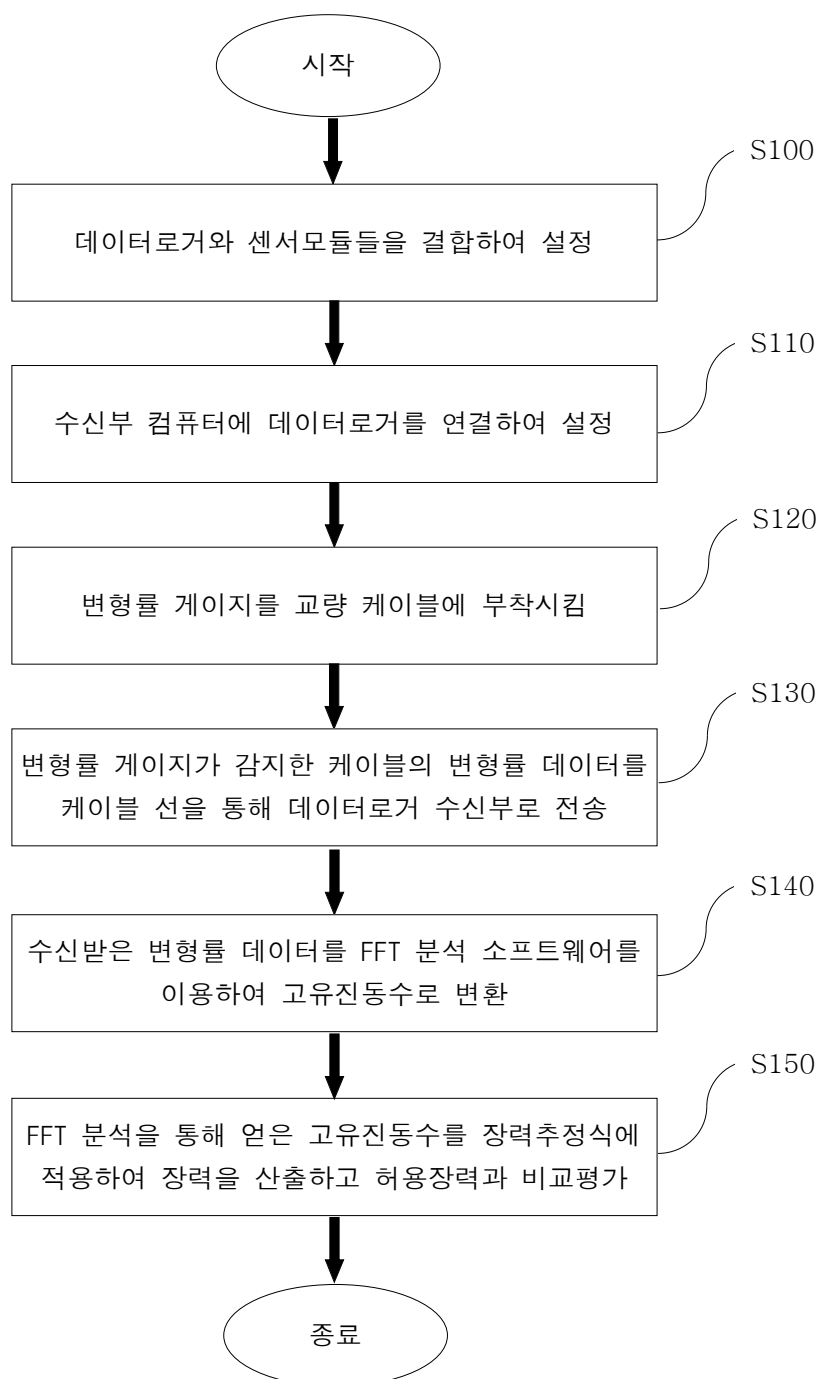


【도 5】

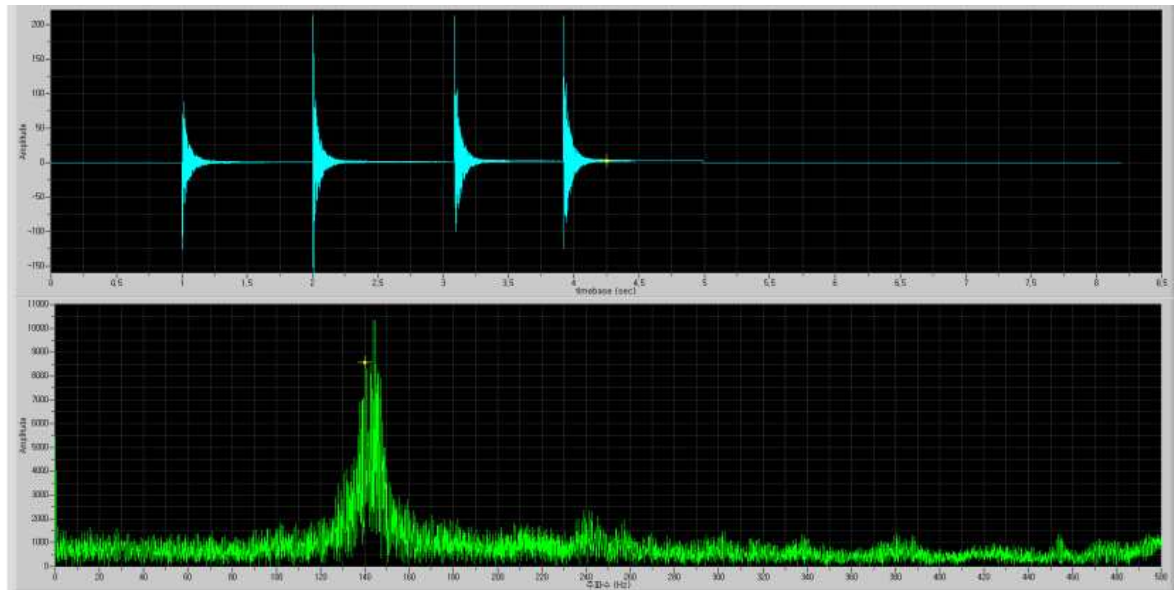


【도 6】

【도 7】



【도 8】



【표 1】 Cable Dimension

Division	Length	Angle
Cable 1	2.120m	20°

【표 2】 Comparison of Strain Gauges and Tension

Cable (ø 15.2mm)				
Mode	Order	Tension Force		
		Strain Gauges (kN)	Accelerometer (kN)	difference (%)
	1	2.35	2.29	-2.72
	2		2.21	-5.99
	3		2.42	+3.11

3.9 가속도를 이용한 케이블 변위 모니터링 방법

1. 기술분야

본 발명은 가속도계를 이용한 교량 케이블 시스템의 변형특성을 파악하기 위한 방법으로서 교량 케이블 유지관리의 활용방법에 관한 것이다.

2. 배경이 되는 기술

대부분의 토목 구조물은 강풍, 지진, 쓰나미, 화재 등과 같은 재해에 노출되어있기 때문에 언제라도 극한 하중을 받을 수 있는데, 중국에는 구조물의 붕괴로 이어질 가능성이 크다.

특히 교량의 크기와 건설비용의 증가로 인해 교량의 이상유무를 실시간으로 감시할 수 있는 교량의 건전성 모니터링 기법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

교량에서 발생하는 동적변위를 정확하게 파악하는 것은 교량의 안전성을 평가하기 위한 필수적인 조건이다.

가속도계로 측정한 가속도 데이터를 이중적분의 신호처리를 거쳐 의사변위를 획득한다.

이러한 가속도 데이터로 변위를 획득하는 방법은 가속도계 데이터에 내재된 노이즈를 제거하는 과정에서의 오차로 인해 정밀도가 높은 변위를 구하기가 어려워 결과의 신뢰도를 확보하는 데에는 어려움이 있다.

교량의 건전성 모니터링에서는 가속도계의 샘플 주파수가 매우 높고 DC 수준의 신호도 직접 계측이 가능하다는 장점 때문에 적극적으로 활용되고 있다.

가속도계를 통한 변위 추정기법의 단점을 보완하기 위해 실측변위 데이터를 통합하여 동적 변위를 측정할 시에 사용할 수 있는 계산 방법들을 비교하였다.

3. 해결하고자 하는 과제

1) 조사신뢰도

일반적으로 케이블교량의 유지관리는 점검자가 직접 케이블에 근접하여 케이블의 변위특성을 측정하는 것이 어렵기 때문에 GNSS 등의 제한된 측정방법으로 측정값의 신뢰도가 낮을 수 있고, 교량 연장이 길어질수록 케이블 길이가 길어지게 되므로 일부 센서로 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기는 힘들다.

2) 경제성

기존 케이블교량의 유지관리 시스템은 많은 비용이 발생한다는 문제점이 있으며, 또한 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로 전체적인 케이블 시스템의 변위특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다.

3) 안전성

기존 케이블교량의 유지관리 방법은 케이블교량의 규모에 의해서 지지조건 문제와 위치적 접근성과 안전성이 떨어졌다.

4) 조사측정시간

점검자의 이동성 한계와 일부 센서를 사용함으로써 교량 연장이 길어지면서 케이블교량의 전체적인 변형상태를 점검하려면 조사시간이 길어지므로 제한적인 점검을 실시하였다.

4. 과제의 해결 수단

가속도계를 통한 의사변위 추정기법의 단점을 보완하기 위해서 가속도계와 실측 변위계를 통하여 정밀도와 신뢰도를 향상시키는 방법을 제안하였다.

실제 교량에서 점검자가 케이블을 인위적으로 가진하지 않아도 케이블에 가해지는 바람이나, 교량 위를 주행하는 차량 등의 하중에 의해 케이블에 발생하는 진동을 이용해 케이블의 변형을 측정할 수 있다.

데이터로거는 가속도 정보를 수신하여 이중적분을 통해서 케이블교의 변형특성을 측정할 수 있다.

가속도계는 시공중인 케이블교량의 케이블의 가속도를 측정하는 센서이다.

데이터로거는 측정장비로 가속도계로부터 측정된 가속도 측정값을 유선케이블을 통해 실시간으로 데이터 측정 및 저장, 그래프를 표시하는 PC 연결형 측정기다.

5. 발명의 효과

기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 일부의 GNSS를 설치하여 케이블의 변형특성을 파악하였고 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로서 전체적인 케이블 시스템의 변형특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 발명은 이러한 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 부착 및 제거 과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 가속도계를 통해 케이블의 변형특성을 파악하는 방법을 활용하고자 하였다. 도 1는 케이블의 횡방향변형을 확인하기 위한 실험모형이며 총 1개의 케이블에 대해서 변위계측을 실시할 수 있게 만들어졌다. 변위를 측정하고자 하는 케이블에 가속도계와 변위계를 부착하고 설치된 케이블에 대한 비파괴 측정을 위해 실험교량에서는 주행차량이나 바람 등의 상시 진동을 이용하며 모형교량에서는 충격망치 등을 사용하여 강제 진동(가진)을 일으킨다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 가속도계를 통해 가속도를 측정한다. 측정된 가속도 데이터를 뉴마크방법에 의한 변위추정 공식은 다음 수학적 식 1과 같다.

【수학적 식 1】

$$v_{i+1} = v_i + [1 - \gamma]a_i + (\gamma\Delta t)a_{i+1}$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)v_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]a_i + [\beta(\Delta t)^2]a_{i+1}$$

여기서, a_n, v_n, u_n 은 각각 n 번째 시간스텝에서의 가속도, 속도, 변위를 나타내고, Δt 는 측정시간 간격을 나타낸다. β 와 γ 는 뉴마크 상수로서 한시간 단계에 걸친 가속도의 변동을 정의하고, 해석법의 수치적 안정성과 정확도를 결정한다. 대표적으로 $1/6 \leq \beta \leq 1/4$, $\gamma = 1/2$ 를 선택하면 정확도를 비롯한 관점에서 만족스러운 결과를 얻을 수 있다.

$\beta = 1/4, \gamma = 1/2$ 의 경우는 i 번째 시간 스텝에서의 가속도와 $i+1$ 번째 가속도들 사이를 일정한 평균 가속도를 가정하고 유도된 것과 같고 $\beta = 1/4, \gamma = 1/2$ 의 경우는 가속도의 선형 변동 가정에 해당한다.

측정가속도가 주어진 경우 수학적 식 1에서 가속도에 해당하는 항들이 모두 기지의 항이 되므로 i 번째 스텝에서의 변위와 속도를 알 수 있을 경우 $i+1$ 번째 스텝에서의 변위와 속도를 계산할 수 있게 된다. 일련의 시간이 지속될 때 n 번째 스텝에서의 변위는 수학적 식 1에 의해 초기변위, 초기속도, 측정가속도로써 다음 수학적 식 2와 같이 표현된다.

【수학적 식 2】

$$u_n = u_1 + n\Delta tv_1 - n\gamma(\Delta t)^2a_1 - 2\beta(a_n - a_1) + (1/2)(\Delta t)^2S_a^{n-1} + \gamma(\Delta t)^2S_a^{n-1} + (\Delta t)^2\sum_{i=1}^{n-1}S_a^{i-1}$$

다음 수학적 식 2를 통해서 초기조건 u_1, v_1 이 주어진 경우에 측정가속도로부터 변위이력을 구해낼 수 있다.

주어진 가속도에서 변위를 구해내는 문제를 일립틱문제로 정의하면 이산화된 데이터에서 중심차분법(central difference method)를 이용하여 가속도와 속도, 변위 사이의 관계를 다음 수학적 식 3, 4로 정의할

수 있다. 이 때 근사로 인한 에러는 측정시간간격 Δt 의 제곱에 비례하므로 측정시간의 간격이 0에 가까워질수록 정확도가 높아진다.

【수학식 3】

$$v_t = \frac{u_{t+1} - u_{t-1}}{2\Delta t} \quad O((\Delta t)^2)$$

【수학식 4】

$$a_t = \frac{u_{t+1} - 2u_t + u_{t-1}}{(\Delta t)^2} \quad O((\Delta t)^2)$$

특정 시점에서의 가속도와 변위의 관계식 수학식 4를 n개의 가속도에 대하여 전 시간범위로 확장하면 수학식 5와 행렬식을 이용하여 수학식 6의 간단한 형태로 표현된다.

【수학식 5】

$$\frac{1}{(\Delta t)^2} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & \\ & 1 & -2 & 1 & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & -2 & 1 \\ & & & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n-1} \\ u_n \\ u_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \\ a_n \end{bmatrix}$$

【수학식 6】

$$Lu = a \text{ for known } u_0, u_{n+1}$$

양쪽 변위경계조건(u_0, u_{n+1})을 알 때 정의된 문제는 간단한 행렬계산을 통해서 해결되는 비교적 간단한 문제이다.

일반적으로 실내실험과 초기조건을 제어할 수 있는 특수한 문제와 직접변위 측정이 가능한 특수한 경우를 제외하고는 변위의 경계조건을 알 수 없다. 따라서 정의된 문제는 n개의 방정식으로부터 n+2개의 미지수를 찾는 문제이고 이러한 랭크부족(rank deficiency)으로 인해 직접적인 계산을 통해 변위를 계산할 수 없다. 이러한 이유로 수학식 7과 같이 추정가속도와 측정가속도 사이의 차이를 최소화하는 최적화문제로서 변위를 추정한다.

【수학식 7】

$$Min_{\tilde{u}} \Pi = \frac{1}{2} \|\tilde{a} - \bar{a}\|_2^2 = \frac{1}{2} \|L\tilde{u} - \bar{a}\|_2^2$$

최적화 과정 동안 발생하는 해의 불안정성은 이차미분연산행렬(L)의 특이치 분해(singular value decomposition)을 통해서 살펴볼 수 있다.

【수학식 8】

$$L = S = Z\Omega V^T$$

이차미분연산행렬은 수학식 8와 같이 $n \times (n+2)$ 행렬 Z, $(n+2) \times (n+2)$ 행렬 Ω , $(n+2) \times (n+2)$ 행렬 V로 표시된다. 여기서 각 행렬은 다음 수학식 9와 같은 특성을 나타낸다.

【수학식 9】

$$Z^T Z = I_{n+2}, VV^T = I_{n+2}, \Omega = \text{diag}(\omega_j)$$

여기서, ω_j 는 $\omega_1 = \omega_{\max} \geq \dots \geq \omega_r \geq \varepsilon_r \geq \omega_{r+1} \geq \dots \geq \omega_{n+1} = \omega_{\min} \geq 0$ 과 같이 내림 차순으로 정렬된 이차미분연산행렬의 특이치를 나타낸다. 그리고 I_{n+2} 은 $n+2$ 차의 단위행렬을 나타낸다 여기서 ε_r 과 r 은 각각 rank의 결정을 위한 한계치와 이차미분연산행렬 L 의 rank를 나타낸다.

수학적 관점에서 이 한계치 ε_r 은 정확히 0이 되어야 한다. 하지만 수치적 계산과정에서의 유효자리의 한계로 인하여 정확히 0이 될 수 없다. 이차미분연산행렬의 특이치는 수치적 계산에 의해 얻어지기 때문에 이 한계치는 다음의 수학식 10에 따라서 계산기계의 유효자리를 고려하여 결정된 값을 사용한다.

【수학식 10】

$$\varepsilon_r = \delta_m \|L\|_{\infty}$$

여기서, δ_m 은 계산기계의 유효자리를 고려한 허용오차 값이다. $\|\cdot\|_{\infty}$ 은 행렬의 L_{∞} -norm을 나타낸다. L_{∞} -norm의 정의는 다음 수학식 11와 같다.

【수학식 11】

$$\|A\|_{\infty} = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m |a_{ij}|$$

$r = n$ 이면 민감도행렬은 rank-sufficiency 라고 부르고, $r < n$ 인 경우에는 rank deficiency 라고 부른다. 측정가속도를 이용해서 변위를 재구성하는 문제는 이러한 rank deficiency로 인해 해가 불안정(ill-posed)해지는 특징을 보여준다.

가속도로부터 변위를 추정하는 기법들은 뉴마크 방법과 같이 초기경계조건 문제(hyperbolic problem)로서 변위추정 문제를 정의하게 된다. 이러한 경우 미지의 초기조건과 가속도 측정과정의 계측오차로 인하여 constant drift, linear drift, nonlinear drift 가 발생하고 이러한 drift들로 인해 추정된 변위는 실제 변위와 상당한 차이를 갖고 물리적으로 의미 없는 추정결과를 낳게 된다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 수학식 12의 정규화 기법을 제안하였다.

【수학식 12】

$$\text{Min } \Pi = \frac{1}{2} \|Lu - (\Delta t)^2 L_a \bar{a}\|_2^2 + \frac{\lambda^2}{2} \|u\|_2^2$$

여기서 u , a 는 시간창 내부의 재구성변 변위 및 측정가속도 이력, L , L_a 는 각각 시간창 크기에의 해서 결정되는 사다리꼴 적분연산자와 2차미분연산자, λ 는 수학식 13를 통해서 결정된 최적정규화 계수, 2는 벡터의 2-norm이다.

【수학식 13】

$$\lambda = 46.81N^{-1.95}$$

여기서 최적 정규화 계수(λ)와 최적시간창 크기(N)은 조화운동의 매개변수 연구를 통해서 결정되었으며, 최적시간창 크기는 측정가속도의 최장주기 성분이 2.65 혹은 3배로 결정하였다. 시간창 내부의 측정된 가속도 이력과 수학식 13로부터 결정된 최적정규화 계수를 이용하면, 수학식 12의 1차 필요조건으로부터 다음식과 같이 시간창 내부의 변위를 재구성 할 수 있다.

【수학식 14】

$$u = (L^T L + \lambda^2 I)^{-1} L^T L_a \bar{a} (\Delta t)^2 = C \bar{a} (\Delta t)^2$$

이때 계산된 변위벡터 u 는 각 시간창에서 계산된 변위이력으로서 $N + 2$ 의 크기를 갖게되는 변위 이력이다. 하지만 시간창 양 끝의 변위 이력은 미지의 경계조건으로 인하여 왜곡된다.

교량 케이블의 변형특성을 해석하기 위해 가속도계를 케이블에 연결하여 변위 데이터를 용이하게 측정하는 방법으로서,

수신부 컴퓨터에 가속도계를 연결하여 데이터 로거 통신을 설정하는 단계;

가속도계를 교량 케이블에 부착시키는 단계;

가속도계가 감지한 케이블의 가속도 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계;

수신받은 가속도 데이터를 이중적분함수를 이용하여 변위 데이터로 변환하는 단계;

가속도계를 통해 얻은 변위데이터와 변위계에 의한 변위데이터와 비교 평가하는 단계;

도 1는 케이블의 횡방향거동을 위한 실험모형을 나타낸 사진이다.

도 2는 15.2mm 케이블을 나타낸 사진이다.

도 3은 유압실린더를 나타낸 사진이다.

도 4는 유압펌프를 나타낸 사진이다.

도 5은 가속도계를 나타낸 사진이다.

도 6은 변위계를 나타낸 사진이다.

도 7은 데이터로거를 나타낸 사진이다.

도 8은 본 발명에 따른 케이블 교량의 변위측정방법을 단계별로 설명한 흐름도이다.

도 9은 가속도계에 의한 결과 그래프이다.

도 10은 가속도를 변위로 변환하는 과정을 나타낸 그래프이다.

【도면】



【도 1】



【도 2】



【도 3】



【도 4】



【도 5】

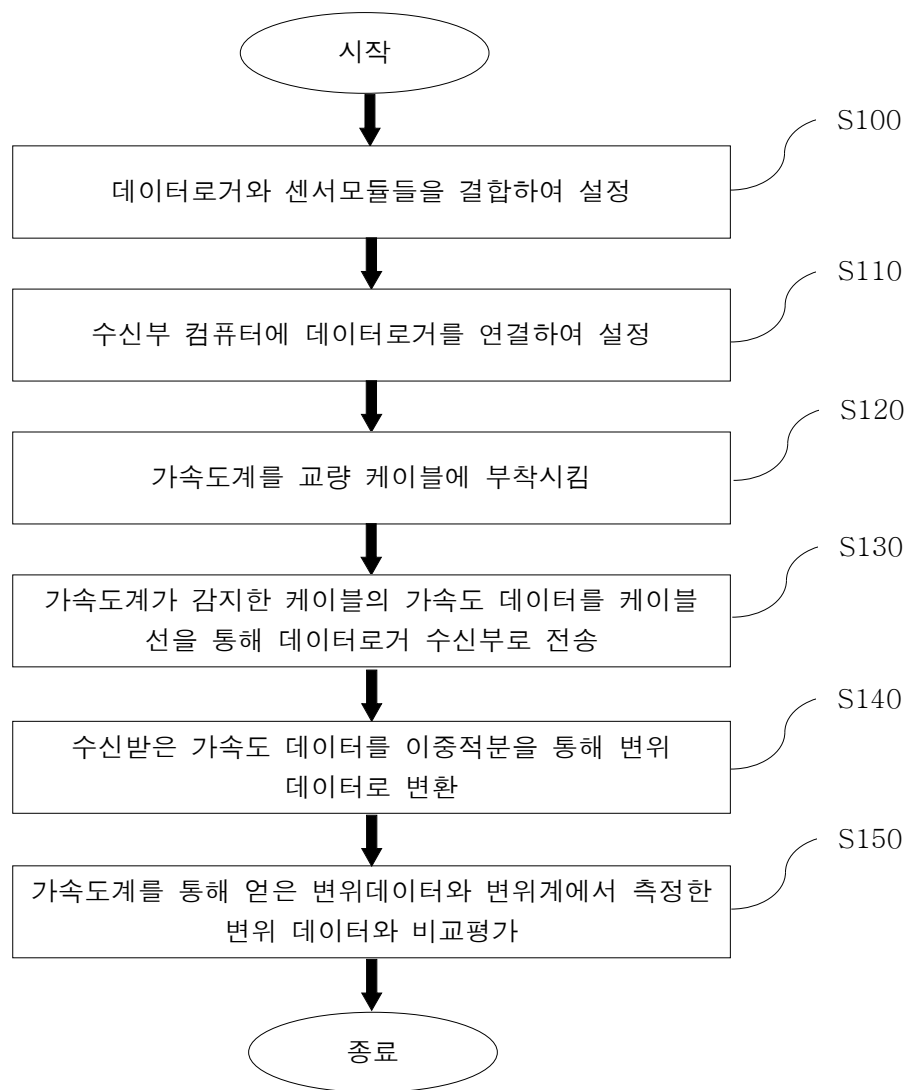


【도 6】

【도 7】

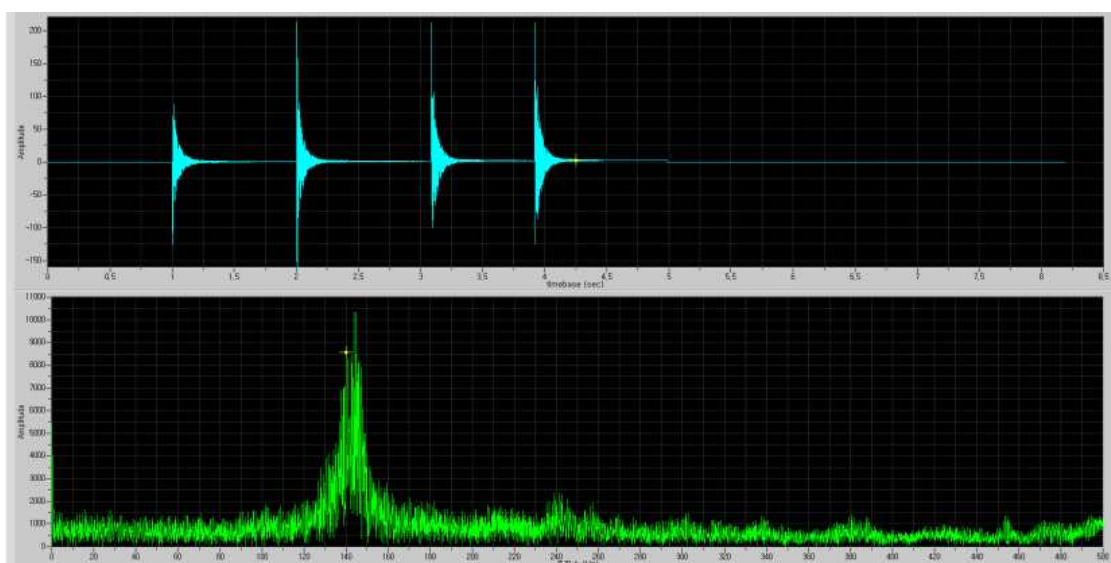


【도 8】

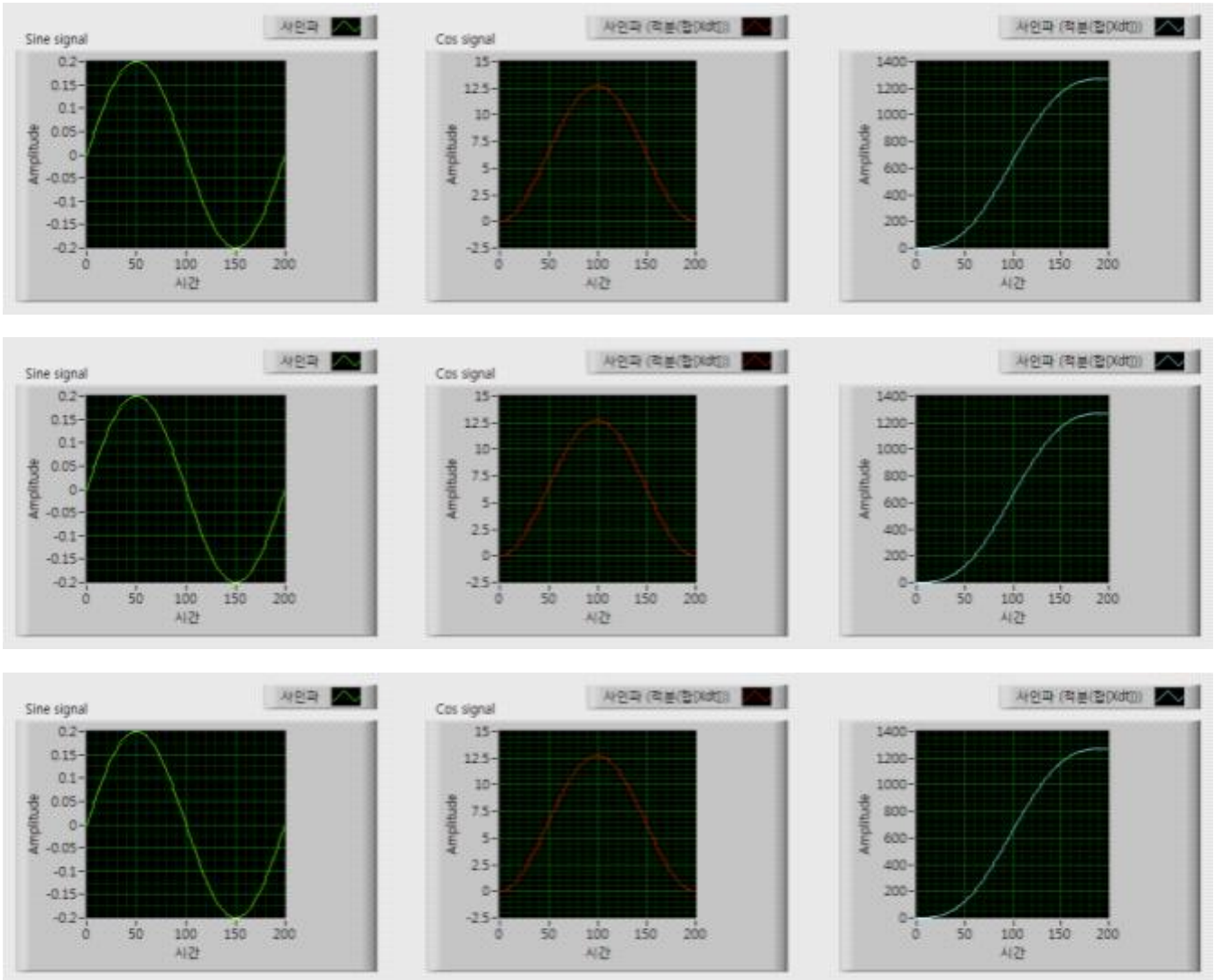


케이블 변형관리대상은 전체케이블을 대상으로 하며, 계측지점은 케이블의 중앙부로서 변위계 및 가속도계를 이용하여 케이블변형관리 결과의 신뢰성을 높인다.

【도 9】



【도 10】



3.10 사장교 케이블의 온도변화에 따른 케이블변위 및 장력추정방법

1. 기술분야

본 발명은 아두이노를 이용한 교량 케이블 온도측정 시스템개발을 위해서 아두이노를 이용하여 교량 케이블의 온도특성을 추정하여 케이블의 변위 및 케이블의 장력과의 상관관계분석을 용이하게 하는 방법으로 하드웨어 및 소프트웨어를 통합 프로세서로 처리하여 교량 케이블의 온도관련 유지관리 분야에 활용하도록 한다.

2. 배경이 되는 기술

케이블 교량은 교량의 길이가 길고 규모가 크기 때문에 온도에 의한 이동량과 형상변화가 일반교량에 비해 크다. 따라서 케이블 교량의 유지관리를 위해서는 공용 중 온도영향을 분석 및 평가하는 것이 매우 중요하며 온도의 영향 평가는 온도변화에 따른 교량 상부구조계의 신축거동을 평가하는 것이 가장 기본적인 분석방법 중 하나로 알려져 있다. 케이블 교량의 온도특성을 분석하기 위해서 온도센서와 아두이노를 연결하여 케이블의 온도특성을 측정하는 방법이 있다.

3. 해결하고자 하는 과제

1) 조사신뢰도

일반적으로 케이블교량의 유지관리는 점검자가 직접 케이블에 근접하여 케이블의 온도특성을 측정하는 것이 어렵기 때문에 로봇점검 등의 제한된 측정방법으로 측정값의 신뢰도가 낮을 수 있고, 교량 연장이 길어질수록 케이블 길이가 길어지게 되므로 일부 센서로 신뢰할 수 있는 계측데이터를 얻기는 힘들다.

2) 경제성

기존 케이블교량의 유지관리 시스템은 많은 비용이 발생한다는 문제점이 있으며, 또한 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로 전체적인 케이블 시스템의 온도특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다.

3) 안전성

기존 케이블교량의 유지관리 방법은 케이블교량의 규모에 의해서 지지조건 문제와 위치적 접근성과 안전성이 떨어졌다.

4) 조사측정시간

점검자의 이동성 한계와 일부 센서를 사용함으로써 교량 연장이 길어지면서 케이블교량의 전체적인 온도에 따른 변형상태를 점검하려면 조사시간이 길어지므로 제한적인 점검을 실시하였다.

4. 과제의 해결 수단

조사값에 대한 정확도가 높은 아두이노 시스템을 이용하면 기존 유지관리방법대비 경제적으로 절감효과가 크므로 케이블교량의 전체적인 관리가 가능해지며 유지관리를 효율적이고 경제적으로 수행할 수 있다. 실제 교량에서 점검자가 교량 케이블에 아두이노를 사용하여 케이블의 온도특성에 따른 결과값을 얻을 수 있다.

아두이노 시스템은 마이크로컨트롤러를 사용한 보드, 단순 로봇, 온도계, 습도계, 조명제어, 모터제어, 스마트 홈 등의 제어장치들을 쉽고 간단하게 개발할 수 있는 환경을 갖추고 있다. 또한 가속도계와 같은 센서를 추가로 부착하여 측정된 측정값을 유선 및 무선을 통해 실시간으로 데이터 측정 및 저장, 그래프를 표시하는 PC 연결형 하드웨어로 구성이 가능하다.

5. 발명의 효과

기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 일부의 센서를 설치하여 케이블의 온도특성을 파악하였고 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로써 전체적인 케이블 시스템의 온도특성을 정확하게 파악하는데에는 미흡한 점이 있다. 본 발명은 이러한 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 부착 및 제거 과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 아두이노 시스템을 통해서 케이블의 온도특성을 파악하는 방법으로 활용하고자 하였다.

도 1는 케이블의 실험모형이며 총 1개의 케이블에 대해서 온도특성을 파악할수 있게 만들어졌다. 온도특성을 측정하고자 하는 케이블에 아두이노와 변위계 및 가속도계를 부착하고 설치된 케이블에 대한 측정값을 얻기 위해 실험교량에서의 바람, 상시 온도를 모형체에서는 실내온도를 변화하면서 실험을 모사하였다.

실내온도를 실험에 맞는 온도를 변화하면서 부착한 아두이노를 통해 온도특성을 측정하였다. 온도특성을 이용한 공식은 다음 수학식 1과 같다.

【수학식 1】

$$\Delta L_t = \alpha \times \Delta T \times L$$

【수학식 2】

$$\Delta L_t / \Delta T = \alpha \times L = S_T$$

구조물의 온도변화에 의한 신축량 ΔL_t 은 수학식 1과 같이 정의할 수 있다. 여기서 ΔT 는 온도변화, L 은 신축길이, α 는 재료의 선팽창계수를 의미한다. 수학식 1에서 α 와 L 은 각각 사용된 재료 및 부재길이에 따른 경계조건 값이 된다. 이는 신축량과 온도의 선형관계임을 알 수 있으며, 다음과 같은 수학식 2로 정의할 수 있다. S_T 는 온도변화에 의한 신축의 변화량인 단위온도신축량 (mm/℃)로 정의한다

【수학식 3】

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (3-1)$$

$$\beta'_1 = \frac{\sum (x_i - x')(y_i - y')}{\sum (x_i - x')^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (3-2)$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) / n \quad (3-3)$$

$$S_{xy} = \sum x \frac{2}{i} - (\sum x_i) \frac{2}{n} \quad (3-4)$$

계측 데이터를 이용한 단위온도 신축량은 계산은 두 변수의 계측값 β_0, β_1 으로부터 선형회귀식 (3-1)을 최소제곱법 (3-2)으로 추정한다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 변형률 게이지를 통해 변형률을 측정한다. 변형률을 이용한 장력추정 공식은 다음 수학식 4와 같다.

【수학식 4】

$$H_s(w) = -z \sum_{r=1}^n \left(\frac{r\pi}{l} \right) \frac{W_r^s(x) W_r(\bar{x})}{(w_r^2 - w^2 + 2\xi w_r w j) \rho A l}$$

$$W_r^s(x) = -\sin\left(\frac{r\pi x}{l}\right)$$

여기서, W_r 는 변위모드함수, W_r^* 는 변형률 모드함수이다.

케이블이 진동하게 되면 부착한 변형률을 통해 변형률값을 측정한다. 변형률을 이용한 장력추정 공식은 상기 수학식 4와 같다. 이 때 측정된 변형률은 시간이력 변형률이며, 이 시간이력 변형률 데이터를 FFT(Fast Fourier Transformation)분석을 통해 주파수 영역으로 변환시킨다. FFT 공식은 $x_0, \dots, x_{n-1}$ 이 복소수라고 가정할 때, 다음 수학식 5와 같다.

【수학식 5】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k W^{jk}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

다음 수학식 5에서 $W = e^{-2\pi i/n}$ 라고 하고 정리하면, 다음 수학식 6이 된다.

【수학식 6】

$$f_j = \sum_{k=0}^{n-1} x_k e^{-2\pi i/n^{jk}}, \quad j = 0, \dots, n-1$$

변환된 가속도 신호를 주파수 영역으로 전개한 후 고유진동수를 결정하고 수학적 모델의 특성방정식인 현의 진동이론 방정식을 이용하여 장력을 구한다. 현의 이론 방정식은 현과 현에 작용하는 장력과의 방정식을 이용하여 해를 구한다. 현 이론식에 의할 경우 케이블의 강성을 고려한 경우 길이가 비교적 짧고 새그의 영향을 무시할 수 있는 경우에 전 지간에 걸쳐서 케이블의 휨 강성이 일정하다고 생각되면 다음 수학식 7과 같이 휨 강성을 고려한 미분방정식으로 표시할 수 있다.

【수학식 7】

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0$$

여기서, E 는 케이블의 휨 강성, y 는 진폭, x 는 길이, t 는 시간, w 는 단위중량, g 는 중력가속도이며 수학식 7을 양단 고정 경계조건으로 풀면 수학식 8과 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력추정식을 얻을 수 있다.

【수학식 8】

$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2$$

여기서, T 는 장력, L 은 케이블 길이, w 는 단위중량, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차 고유진동수이다.

수학식 8을 케이블의 진동으로 고유진동수를 실험적으로 획득하는 경우 장력을 추정하기 위하여 다음 수학식 9와 같은 1차 회귀식으로 정리한다.

【수학식 9】

$$\left(\frac{f_n}{n} \right)^2 = T \cdot \frac{g}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + a \cdot n^2$$

따라서 변형률계에 의해 측정된 케이블의 변형률의 FFT 분석결과를 위의 수학식 9과 같이 1차 회귀식으로 나타낸 후, 매개변수 a (기울기)와 b (y 절편)를 구하면 아래의 수학식 10에 의해 케이블의 장력과 휨 강성을 산정할 수 있다.

【수학식 10】

$$a = \frac{EI\pi^2g}{4wL_{eff}^4}, EI = \frac{4wL_{eff}^4}{\pi^2g}a$$

$$b = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2}, T = \frac{4wL_{eff}^2}{g}b$$

위의 수학적 식 10과 같이 휨 강성 EI와 장력값 T를 구할 수 있다.

교량 케이블의 온도특성을 분석하기 위해 아두이노를 케이블에 연결하여 케이블의 변위값 및 장력값과 케이블의 온도특성과의 상관성을 측정하는 장치로서,

수신부 컴퓨터에 데이터로거 무선통신을 설정하는 단계;

아두이노를 교량 케이블에 부착시키는 단계;

가속도계를 교량 케이블에 부착시키는 단계;

온도 및 변형률 게이지를 교량 케이블에 부착시키는 단계;

온도 및 변형률 게이지와 가속도계가 감지한 케이블의 데이터값을 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계;

수신받은 온도, 변형률 데이터와 가속도 데이터를 FFT 분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계;

FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계;

추정장력과 허용장력과 비교하여 평가하는 단계;

수신받은 가속도 데이터를 이중적분함수를 이용하여 변위 데이터로 변환하는 단계;

가속도계를 통해 얻은 변위데이터와 변위계의 데이터를 비교 평가하는 단계;

케이블의 변위와 장력값과 온도특성과 상관분석하는 단계;

도 1는 케이블의 횡방향거동을 위한 실험모형을 나타낸 사진이다.

도 2는 15.2mm 케이블을 나타낸 사진이다.

도 3은 유압실린더를 나타낸 사진이다.

도 4는 유압펌프를 나타낸 사진이다.

도 5은 가속도계를 나타낸 사진이다.

도 6은 변위계를 나타낸 사진이다.

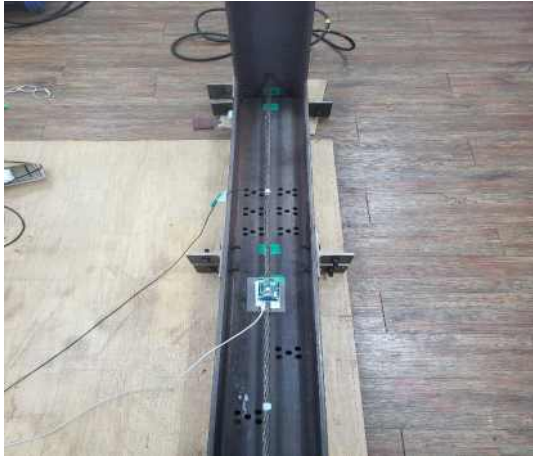
도 7은 데이터로거를 나타낸 사진이다.

도 8은 아두이노를 나타낸 사진이다.

도 9은 아두이노에 연결하는 온도센서를 나타낸 사진이다.

도 10은 아두이노시스템을 실행하여 결과 값을 얻는 사진이다.

도 11은 본 발명에 따른 케이블 교량의 온도측정 장치를 단계별로 설명한 흐름도이다.



【도 1】



【도 2】



【도 3】



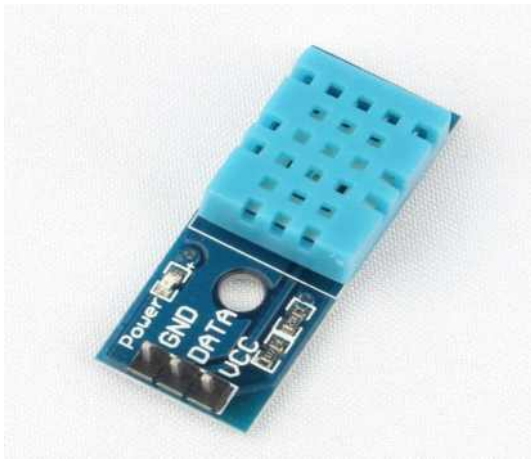
【도 4】



【도 5】



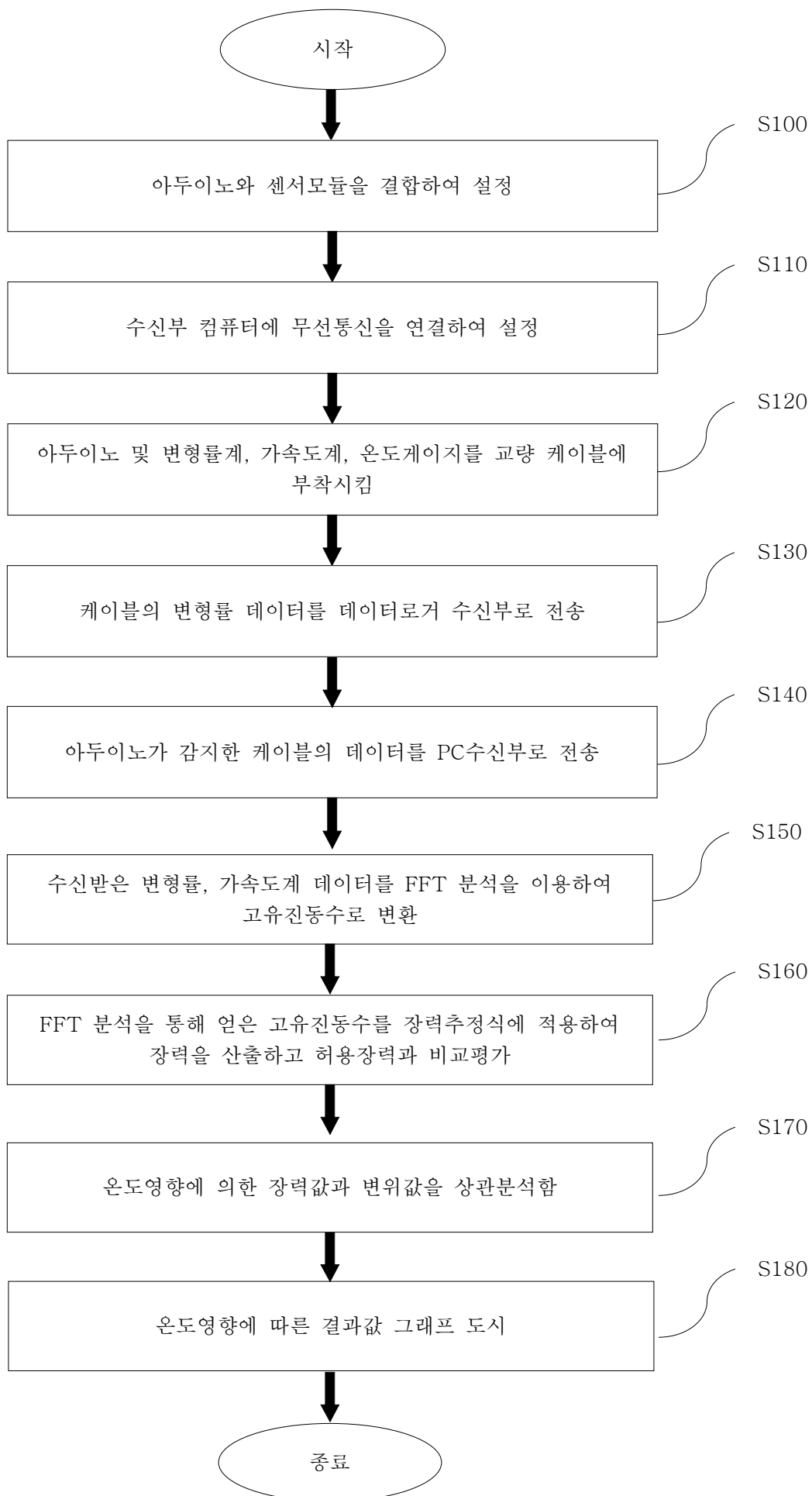
【도 6】



【도 10】

[illegible]

【도 11】



3.11 케이블 교량의 장력측정 및 평가

적용분야	케이블 교량의 장력 측정 및 평가	
주요내용	본 프로그램의 특징	기존의 사장교 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS 등을 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치함으로서 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 장력 특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 프로그램은 이러한 미비점을 보완하고자 설치비용이 저렴한 초소형 스마트 센서를 단일 센서가 아닌 다중 센서를 통합적으로 운용 관리할 수 있는 오픈 소스 기반의 케이블 유지관리 시스템을 개발하여 하드웨어 및 소프트웨어를 효율적으로 활용하고자 하였다.
	주요기능	아두이노 보드와 센서모듈을 결합하여 통신설정을 한다. 1. 수신부 컴퓨터에 아두이노 보드와 Xbee센서모듈을 연결하여 통신설정을 한다. 2. 다종의 아두이노 센서를 사장교 케이블에 부착시킨다. 9축모션센서가 감지한 케이블의 가속도 데이터를 Xbee센서를 통하여 수신부로 전송한다. 3. 수신받은 가속도 데이터를 FFT 분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계 4. FFT분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계 5. 추정장력과 허용장력을 비교하여 평가하는 단계
	사용방법	1. 교량 케이블의 장력특성을 해석하기 위해 변형률 게이지를 케이블에 연결하여 변형률 데이터를 용이하게 측정하는 방법으로, 수신부 컴퓨터에 변형률 게이지를 연결하여 데이터 로거 통신을 설정하는 단계이다. 2. 변형률 게이지가 감지한 케이블의 변형률 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계이다. 3. 수신받은 변형률 데이터를 FFT분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계이다. 4. FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계이다. 5. 추정장력과 허용장력을 비교하여 평가하는 단계이다.
	판매구분	☒ 상업용 ☐ 비상업용
사용기종	☒ IBM-PC호환기종 ☐ 매킨토시 ☐ 모바일 ☐ PDA ☐ 기타()	
사용 OS	Windows 7, Windows 8, Windows 10	
사용언어	C++	

3.12 교량 케이블의 장력측정 및 분석

적용분야	교량 케이블의 장력 측정 및 분석	
주요내용	본 프로그램의 특징	기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS 등을 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치함으로서 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 장력특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 발명은 이러한 마비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 부착 및 제거 과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 변형률 게이지를 통해 케이블 유지관리 방법을 개발하여 하드웨어를 효율적으로 활용하고자 하였다.
	주요기능	교량 케이블의 장력특성을 해석하기 위해 변형률 게이지를 케이블에 연결하여 변형률 데이터를 용이하게 측정하는 방법으로서, 1.수신부 컴퓨터에 변형률 게이지를 연결하여 데이터로거 통신을 설정하는 단계 2.변형률 게이지를 교량 케이블에 부착시키는 단계, 변형률 게이지가 감지한 케이블의 변형률 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는단계 3.수신받은 변형률 데이터를 FFT 분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계 4.FFT분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계 5.추정장력과 허용장력을 비교하여 평가하는 단계
	사용방법	1. 교량 케이블의 장력특성을 해석하기 위해 변형률 게이지를 케이블에 연결하여 변형률 데이터를 용이하게 측정하는 방법으로서, 수신부 컴퓨터에 변형률 게이지를 연결하여 데이터 로거 통신을 설정하는 단계이다. 2. 변형률 게이지가 감지한 케이블의 변형률 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계이다. 3. 수신받은 변형률 데이터를 FFT분석 소프트웨어를 이용하여 고유진동수로 변환하는 단계이다. 4. FFT 분석을 통해 얻은 고유진동수를 장력추정식에 적용하여 장력을 산출하는 단계이다. 5. 추정장력과 허용장력을 비교하여 평가하는 단계이다.
	판매구분	☒ 상업용 ☐ 비상업용
사용기종	☒ IBM-PC호환기종 ☐ 매킨토시 ☐ 모바일 ☐ PDA ☐ 기타()	
사용 OS	Windows 7, Windows 8, Windows 10	
사용언어	Labview	

3.13 교량 케이블의 변형 측정 및 분석

적용분야	교량 케이블의 변형 측정 및 분석	
주요내용	본 프로그램의 특징	기존의 교량 케이블의 변위에 대한 유지관리 시스템은 일부 케이블에 고가의 GNSS 등을 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치 비용 및 설치개소의 제한으로 전체적인 케이블의 변형특성을 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 프로그램은 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블의 부착 및 제거가 용이한 가속도계를 활용하여 케이블의 변형에 관한 유지관리 방법을 개발하고자 한다.
	주요기능	교량 케이블의 변형특성을 해석하기 위해 가속도계를 케이블에 연결하여 가속도에 대한 이중적분과정을 통하여 케이블의 변형특성을 측정하는 방법으로서, 1.수신부 컴퓨터에 가속도계를 연결하여 데이터로거 통신을 설정하는 단계 2.가속도계를 교량 케이블에 부착시키는 단계, 가속도계가 감지한 케이블의 가속도 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는단계 3.수신받은 가속도 데이터를 이중적분 함수를 이용하여 변위로 변환하는 단계 4.시간에 따른 변위결과와 직접 설치한 변위계와 비교하여 평가하는 단계
	사용방법	1. 교량 케이블의 변형특성을 평가하기 위해 가속도계를 케이블에 연결하여 가속도 데이터를 측정하고, 수신부 컴퓨터에 가속도계를 연결하여 데이터 로거 통신을 설정하는 단계이다. 2. 가속도계가 감지한 케이블의 가속도 데이터를 데이터로거를 통해 PC로 전송하는 단계이다. 3. 수신받은 가속도 데이터를 이중적분 함수를 이용하여 변위로 변환하는 단계이다. 4. 가속도계를 이용한 변위와 직접 설치한 변위계에 의한 결과와 비교평가하는 단계이다.
	판매구분	☒ 상업용 ☐ 비상업용
사용기종	☒ IBM-PC호환기종 ☐ 매킨토시 ☐ 모바일 ☐ PDA ☐ 기타()	
사용 OS	Windows 7, Windows 8, Windows 10	
사용언어	Labview	

3.14 교량 케이블의 온도측정 및 분석

적용분야	교량 케이블의 온도측정 및 분석	
주요내용	본 프로그램의 특징	케이블 교량은 교량의 길이가 길고 규모가 크기 때문에 온도에 의한 이동량과 형상변화가 일반교량에 비해 크다. 따라서, 케이블 교량의 유지관리를 위해서는 공용 중 온도영향을 분석 및 평가하는 것이 매우 중요하며 온도의 영향평가는 온도변화에 따른 교량 상부구조계의 신축거동을 평가하는 가장 기본적인 분석방법이다. 케이블 교량의 온도특성을 분석하기 위해서 온도센서를 케이블에 부착하여 케이블로 부터 온도이력데이터를 프로그램을 통해서 측정하여 케이블의 온도이력에 따른 케이블의 변위와의 상관관계 및 케이블의 온도이력에 따른 케이블의 장력과의 상관관계를 분석할 수 있으며 케이블의 변위와 케이블에 장력에 미치는 온도영향을 파악하여 케이블의 유지관리 분야에 활용한다
	주요기능	교량 케이블의 온도이력특성을 분석하기 위해서 온도센서모듈을 케이블에 연결하여 개발프로그램을 통해서 온도이력데이터를 계측 및 분석을 실시하여 교량케이블의 변위와 온도와의 상관관계, 교량케이블장력과 온도와의 상관관계를 분석하여 케이블의 온도특성을 분석하는 방법으로 온도센서를 케이블에 부착하는 단계; 수신부 컴퓨터에 무선통신을 연결하는 단계; 케이블의 온도특성을 데이터로거에서 프로그램을 통해서 컴퓨터로 수신하는 단계; 케이블에 설치된 변위계, 가속도계를 통한 케이블의 변위와 케이블의 장력을 산출하는 단계; 케이블의 온도이력데이터와 케이블의 변위와 케이블의 장력과의 상관관계를 분석하는 단계
	사용방법	1. 교량 케이블의 온도이력특성을 분석하기 위해서 온도센서모듈을 케이블에 연결하여 개발프로그램을 통해서 온도이력데이터를 계측 및 분석을 실시한다. 2. 교량케이블의 변위와 온도와의 상관관계, 교량케이블장력과 온도와의 상관관계를 분석하여 케이블의 온도특성을 분석한다. 3. 온도센서를 교량의 케이블에 부착하는 단계이다. 4. 수신부 컴퓨터에 무선통신을 연결하는 단계이다. 5. 케이블의 온도특성을 데이터로거에서 프로그램을 통해서 컴퓨터로 수신하는 단계이다. 6. 케이블에 설치된 변위계, 가속도계를 통한 케이블의 변위와 케이블의 장력을 산출하는 단계이다. 7. 케이블의 온도이력데이터와 케이블의 변위와 케이블의 장력과의 상관관계를 분석하는 단계이다.
	판매구분	☒ 상업용 ☐ 비상업용
사용기종	☒ IBM-PC호환기종 ☐ 매킨토시 ☐ 모바일 ☐ PDA ☐ 기타()	
사용 OS	Windows 7, Windows 8, Windows 10	
사용언어	Labview	

제 C-2018-025979 호

 **저작권 등록증**

1. 저작물의 제호(명칭)	오른소스기반의 모션센서를 이용한 케이틀의 장력 측정프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 구주엔지니어링 인천광역시 남동구 인주대로
4. 생년월일(법인등록번호)	120111-0640872
5. 창작연월일	2018년09월29일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2018년10월02일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 구주엔지니어링, 창작 : 2018.09.28

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2018년 10월 05일

 **한국저작권위원회**

제 C-2019-019477 호

 **저작권 등록증**

1. 저작물의 제호(명칭)	변형물계를 이용한 케이틀의 장력 측정 프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 구주엔지니어링 인천광역시 남동구 인주대로
4. 생년월일(법인등록번호)	120111-0640872
5. 창작연월일	2019년07월11일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2019년07월12일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 구주엔지니어링, 창작 : 2019.07.11

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2019년 07월 15일

 **한국저작권위원회**

제 C-2019-030598 호

 **저작권 등록증**

1. 저작물의 제호(명칭)	가속도계를 이용한 교량 케이틀의 변형 측정 프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>산업용 S/W
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 구주엔지니어링 인천광역시 남동구 인주대로
4. 생년월일(법인등록번호)	120111-0640872
5. 창작연월일	2019년10월25일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2019년10월29일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 구주엔지니어링, 창작 : 2019.10.25

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2019년 10월 30일

 **한국저작권위원회**

제 C-2020-023111 호

 **저작권 등록증**

1. 저작물의 제호(명칭)	교량 케이틀의 온도이력 측정 프로그램
2. 저작물의 종류	컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램
3. 저작자 성명(법인명)	주식회사 구주엔지니어링 인천광역시 남동구 인주대로
4. 생년월일(법인등록번호)	120111-0640872
5. 창작연월일	2020년07월11일
6. 공표연월일	-
7. 등록연월일	2020년07월13일
8. 등록사항	저작자 : 주식회사 구주엔지니어링, 창작 : 2020.07.11

『저작권법』 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2020년 07월 14일

 **한국저작권위원회**

이 위치의 복사본 지대 크기를 확대합니다.

3.15 온도변화에 따른 사장교 케이블 고유진동수 분석

1. 서 론

사장교는 교량에 작용하는 연직하중을 케이블을 통해 주탑으로 전달하는 구조로 경간장 증가에 따른 고정 하중 증가율이 작기 때문에 다른 교량형식에 비해 장경간의 교량건설이 가능하다. 교량의 거동에 영향을 주는 주요 하중들 중에서 교량의 지리적 위치, 교축의 방향, 단면형상, 재료 특성, 대기온도와 일사 등의 여러 환경요인과 구조적 재료특성에 의해 나타난다. 이런 인자 가운데 온도변화에 큰 영향을 주는 외부적인 요인은 대기 온도변화와 일사에 의한 변화이다. 보통 교량설계에 있어 온도영향의 고려는 받침이동량 산정에 대한 설치 문제와 교량단면의 온도분포가 균일하거나 선형적인 변화조건하에서 해석하는 방법으로 이루어진다. 케이블 강교량 설계지침 작성연구는 케이블과 기타부재간의 온도차로 인한 영향을 설계시 고려해야 하며 사장교인 경우 케이블 외측면을 흰색 테이프나 밝은 도장으로 마감한 경우 8℃, 검은색으로 마감한 경우 22℃를 적용할 수 있다고 제시한다. 연구는 사장교를 대상으로 하였으며 주위 온도변화 등으로 인해 케이블에 작용하는 온도변화를 재하하중으로 하여 케이블의 고유진동수를 예측 분석하는 것을 연구목적으로 하였다. 온도영향에 의한 교량의 단면내 온도분포, 응력분포거동에 대한 연구는 1970년대 후반부터 본격적으로 연구가 이루어지기 시작하였다(Emanuel Hulsey, 1978). Branco Mendes, (1993)은 콘크리트교량에 대한 단면형상과 일사량, 콘크리트 및 아스팔트의 열전도특성 등을 고려한 연구로 온도에 대한 규정에 대해 언급하였다. Zhwig et al, (2003)은 경간장이 50m와 82m 및 180m이고 단일탑으로 이루어진 사장교에 대해 계측 및 유한요소해석을 사용하여 주탑거동에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서 교량에 발생하는 온도영향에 대해 1990년대 초반부터 연구가 이루어지기 시작하였다. Lim C. G., (1999)은 합성형 교량에 대해 계측 및 해석에 대한 비교 연구와 함께 다양한 매개변수 변화에 따른 교량단면내 온도응력분포와 설계온도에 대해 연구하였다. Lee M. G., (1999)은 PSC 박스거더 교량에서 재료전달에 대한 물성치 변화에 따른 매개변수연구와 계측치와 비교 연구하였다. Moon J. H., (1999)은 강현수교를 모델로 계측자료와 해석결과를 비교하여 일정한 온도하중을 케이블과 거더 및 주탑에 가하여 이에 대한 교량거동에 대해 분석하였다. Lim C. G., (2000)은 강현수교에 대해 실계측자료를 통하여 온도영향에 따른 현수교의 거동에 관해 연구하였다. Kim S. H., (2003, 2004)는 곡선 강박스 거더교에 대한 3차원 온도분포를 고려하기 위해 대표단면을 선정한 2차원 열전달 해석 결과를 이용하여 3차원으로 확장하는 기법을 사용하여 곡선 강박스 거더교에 대한 거동에 대해 연구하였다. Hwang I. M., (2001)은 올림픽대교를 해석모델로 주탑 및 거더의 열전달해석을 수행하고 단면에 작용하는 곡률을 단면에 발생하는 온도구배하중으로 치환하여 봄 및 여름에 대한 구조거동을 분석하였다. 케이블도 다른 구조부재처럼 온도영향에 따른 각 케이블에 다른 장력변화가 일어남에도 불구하고 전체 케이블에 발생하는 온도변화가 일정하다고 가정하거나 케이블의 온도변화를 무시하고 해석하였다. 또한, Park H. W., et al, (2009) 자기센서에 의한 강재 케이블 장력측정에서 온도특성에 관해서 연구를 수행하였다. 따라서 연구에서는 대기온도와 같이 일상적으로 발생하는 온도를 고려하였으며 온도영향을 받는 케이블의 고유진동수를 예측 분석하는데 중점을 두었다.

2. 본 론

2.1 실험의 개요

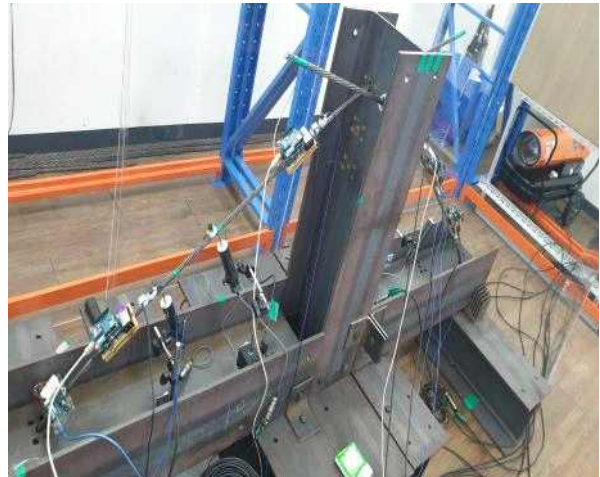
모드해석은 구조물의 모드특성을 나타내기 위해 다양한 분야에 제한되지 않고, 교량 분야로 확대되어 연구되고 있다. 충격해머실험에 사용되는 장비는 충격해머(Impact hammer)라고 부르며 가진실험(Shaker Test)에 비해 무게에 의해 발생하는 문제점이 없으며, 실험이 용이하여 널리 사용되고 있는 실험법이다. 실험에 쓰인 데이터의 수집장치는 NI-9234를 적용하였으며 모드해석을 분석하기 위한 소프트웨어는 ModalVIEW Single Seat를 적용하였다.

2.2 실험체 구성

케이블의 모드특성을 파악하기 위해서 Photo 1과 같이 케이블에 인장력을 도입하고 거치할 수 있는 케이블교량 축소 모형을 제작하였다. 대상 실험체에 설치할 케이블은 강선으로 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 가 사용되었다. 케이블의 단면형상은 7연선 케이블로 외측에 6개의 소선이 있고 내측 중심부에 1개의 심선이 위치해있는 형태이다(Jin, 2010). Photo 2은 $\varnothing 12.7\text{mm}$ 케이블의 단면도, 실린더, 유압펌프, 충격해머를 나타내었다. 실험체는 공용중인 사장교의 케이블의 거동을 중점적으로 모사하였으며 케이블과 주탑, 케이블과 보강거더의 경계조건은 고정단으로 가정하여 실험하였으며 케이블에 대한 온도변화에 따른 케이블의 고유진동수 특성을 분석하는 데 중점을 두었다. 케이블의 고유진동수를 측정하기 위해 충격망치를 케이블길이 중앙부에 가력하였으며 케이블의 고유진동수의 측정시간은 케이블의 온도를 최저에서 최고에 이르기까지 변화하면서 측정을 하였다. 고유진동수의 산정은 FFT를 이용하여 산정하였다.

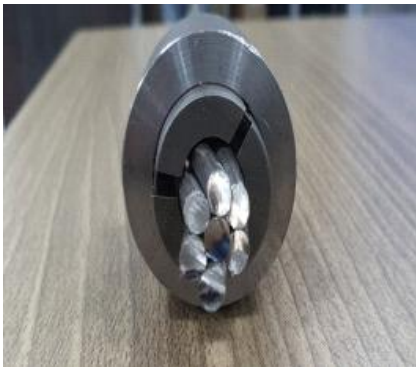


(a) Model Overview Diagram



(b) Horizontal Model Diagram

Photo 1 Experimental Model Overview Diagram



(a) Cable



(b) Hydraulic Cylinder



(c) Hydraulic Pump



(d) Impact Hammer

Photo 2 Experimental Apparatus

2.3 가속도계 및 하드웨어

Photo 3는 가속도계 및 모듈의 사진을 나타내고 있다. Photo 1에서 가속도계를 설치한 위치를 나타내고 있으며 케이블의 전길이를 4등분하여 진폭이 가장 큰 중앙부와 전길이의 1/4지점 및 3/4지점에 가속도센서를 설치후 실험하였다. 하드웨어는 NI-9234 및 NI-9213을 사용하였다.



(a) Accelerometer



(b) Modules

Photo 3 Data Acquisition System

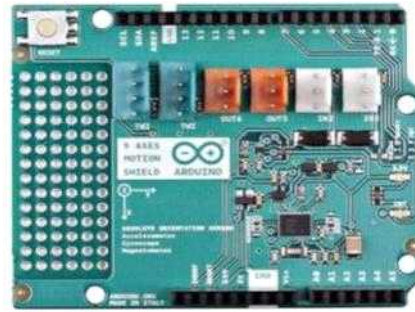
2.4 Arduino Uno etc. Sensors

아두이노 우노는 Atmel 사의 16MHz 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 사용하여 다양한 주변 장치를 연결할 수 있다 (Lee et al., 2018). 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축모션센서로부터 수신받은 신호를 디지털신호로 변환하여 모니터상에 출력하는 역할을 한다(Lee et al., 2018). Photo 4은 센서사진을 나타내고 있다.

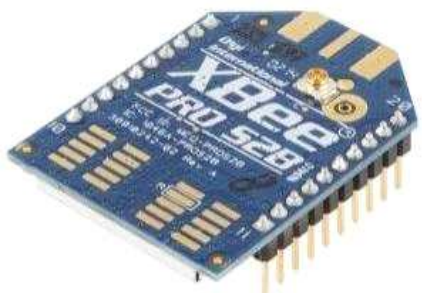
9축모션센서는 Bosch 사의 BNO055로 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 3축 지자계센서로 구성되어 있다. 센서는 선형 가속도와 같은 신호를 출력한다(Lee et al., 2018). 본 연구에서 9축 모션센서의 측정값은 케이블의 고유진동수를 산출하는 데 활용된다. 본 연구에 적용된 XBee모듈은 지그비 통신규약을 적용하였고 토폴로지는 일대일 통신을 적용하였다. 온도센서를 이용하여 케이블의 온도변화를 측정하였다.



(a) Arduino Uno



(b) 9Axes Motion Shield



(c) Xbee Sensor



(d) Temperature Sensor

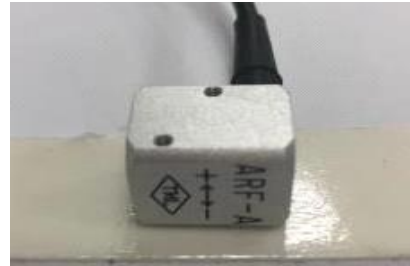
Photo 4 Arduino etc. Sensors

2.5 Data Logger etc. Sensors

Data Logger는 노트북과 연결하여 데이터를 측정하고 저장하며, 그래프를 나타내는 PC연결형 스트레인 측정기이다. Photo 5은 데이터로거, 가속도계, 변위계 및 변형률계를 나타내고 있다.



(a) Data Logger



(b) Accelerometer



(c) Displacement meter



(d) Strain gauge

Photo 5 Data Logger Photograph

2.6 케이블의 장력

장력이 도입된 케이블에 가속도계와 9축모션센서를 등간격으로 4개씩 설치하였다. 여기서 가속도계의 측정방향은 케이블의 진동방향과 일치시켰으며 위치는 단부로부터 영향이 적은 케이블의 중앙부로 적용하였다. 설치된 케이블에 대한 진동측정을 위해 본 실험은 충격해머를 사용하여 실험을 실시하였다. 현의 진동이론을 이용한 방정식은 새그와 휨강성을 고려하지 않고 단지 장력과 고유진동수의 관계만을 고려하여 실제 장력값과 다소의 오차를 보일 수 있다.

2.7 케이블의 온도하중

케이블의 경우 대부분의 단면이 원형을 나타내고 케이블의 형상은 직선이 아니다. 그러나 연구에서 사용한 사장교의 케이블은 새그량이 적은 경우에 적용하는 등가의 트러스요소를 사용하였기에 직선으로 가정할 수 있다. 케이블 단면을 다각형으로 모델링할 경우 기하계를 사용하여 케이블 단면의 경계요소에 따른 방위각과 경사각으로 정의할 수 있다. Fig. 1에는 공간상에 위치한 직선 케이블과 케이블 단면의 경계각을 정의하는 기하형상을 나타내는 것이다. 케이블 교량의 설계기준은 케이블 단면의 온도차가 일정하다고 고려한다. 다른 교량과 달리 케이블로 지지하는 사장교는 케이블과 주탑, 케이블과 거더간의 상호작용으로 인하여 연계거동을 나타내며 상호작용도 매우 복잡한 힘의 전달기구를 나타내기때문에 온도영향에 따른 구조적인 거동을 분명히 제시하고 있지 않다.

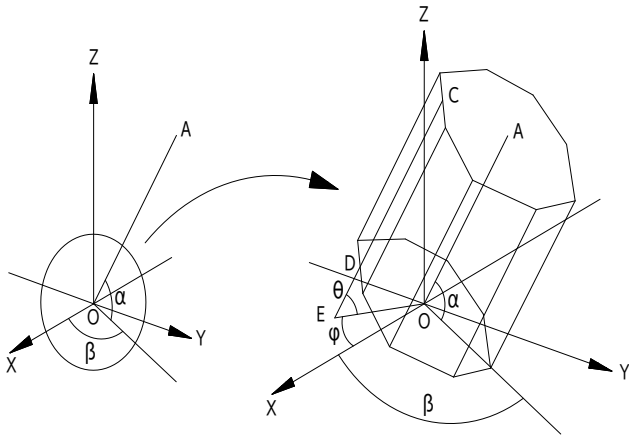


Fig. 1 Azimuth and Slope Angle of Cable Outsider Surface

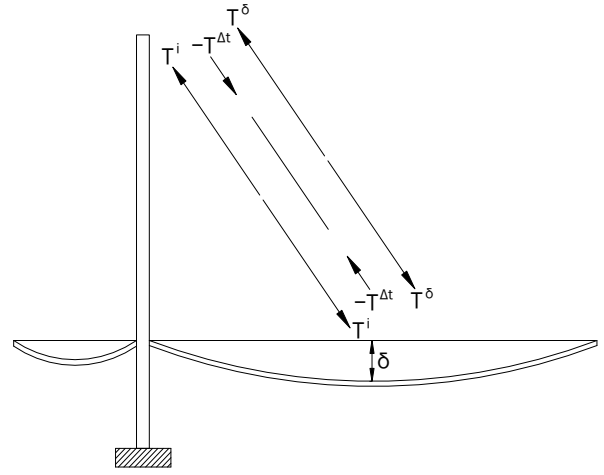


Fig. 2 Variation of Cable Tension to Temperature Effect

Fig. 2는 케이블에 발생하는 온도효과를 고려하는 경우에 케이블의 장력변화를 나타냈다. 온도변화에 따른 케이블의 장력변화는 케이블 평균온도가 기준온도보다 높을 경우 케이블의 장력은 감소하는 경향을 나타내었다. 반대로 케이블 평균온도가 기준온도보다 낮은 경우 케이블 장력은 증가하였다. 그러므로 구조계에 대한 명확한 거동을 이해하기 위해서는 케이블의 온도영향을 잘 고려하고 케이블의 설치위치에 따라 다르게 분포하는 온도변화를 반영하여 해석해야 한다.

3. 실험결과

본 실험은 Impact Hammer를 이용하여 측정하는 진동실험으로 수행되었다. 강연선 케이블의 거치대에서 케이블에 장력을 가한 후, 케이블에 다양한 센서들을 부착하고 충격해머를 이용하여 가진하면서 실험을 수행하였다. 실험은 열풍기를 이용하여 밀폐된 실험공간내에서 케이블의 온도변화(100℃~50℃)를 가하여 진행하였으며 케이블의 온도변화는 교량 설계기준에서 언급한 강교의 보통지방 온도범위(-10℃~50℃)를 감안하여 모사한 것이다. 실험으로부터 얻어진 결과데이터를 ModalVIEW R2를 통하여 분석을 실시하였다(ABSignal, 2012). 데이터 수집은 NI-9234 하드웨어를 적용하였다. FRF 결과로부터 모드안정차트를 구하여 모드평가를 실시하였다. 고유진동수는 Peak Picking Method을 사용하여 구하고 감쇠비는 3dB Method를 이용하였다. 여기서 3dB Method는 다음 Eq. (1)과 같다.

$$Damping\ ratio(\%) = \frac{f_0}{f_1 - f_2} \quad (1)$$

여기서 f_0 는 공진주파수이며, f_1 는 공진주파수보다 낮은 주파수로서 3dB 작은 주파수, f_2 는 공진주파수보다 높은 주파수로서 3dB 작은 주파수이다.

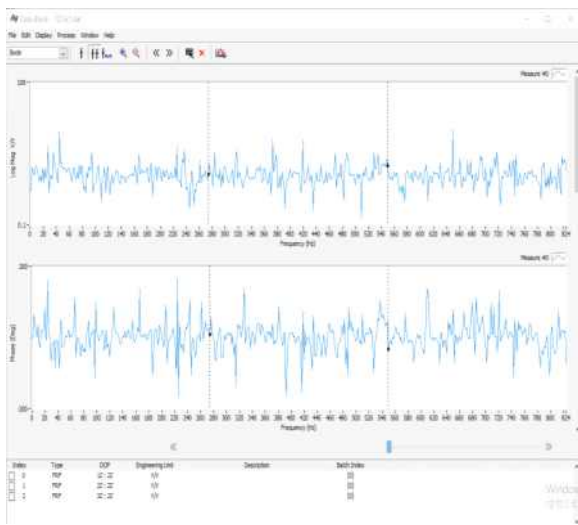
3.1 케이블의 주파수응답함수(FRF) 결과

Fig. 3은 실험 case별 모드평가를 실시하여 주파수응답함수(FRF)결과를 나타낸 일례이다. FRF는 다음 Eq. (2)와 같이 전달함수는 힘(X_n)의 라플라스 변환으로부터 출력(Y_n)의 라플라스 변환의 관계로 나타내었다.

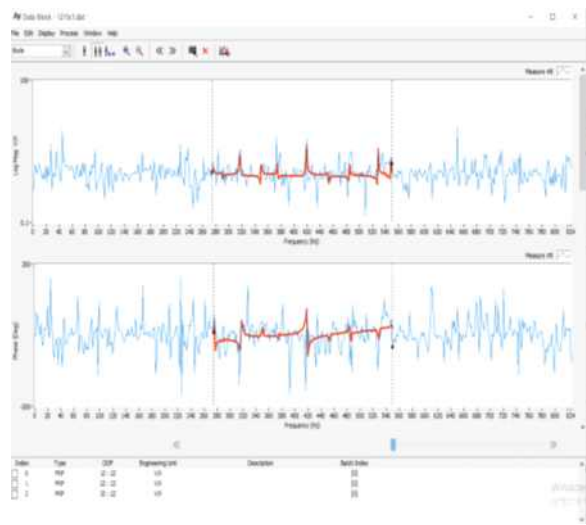
$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 Y_i 는 자유도 i 에서 응답신호스펙트럼이다. X_j 는 자유도 j 에서 가진신호스펙트럼이다. H_{ij} 는 자유도 i 와 j 사이에 FRF이다.

Table 1에서는 케이블의 FRF 결과를 나타내었다. Table 1에서 구한 FRF 결과는 케이블의 무게와 길이에 따라 케이블에 작용하는 고유진동수와 댐핑의 변화는 미소한 것으로 나타났으며 고유진동수 1차모드는 4.806Hz, 5차모드는 38.110Hz이며, 댐핑의 1차모드는 3.373%, 5차모드는 0.487%이다. 이는 실험에 이용된 케이블의 무게가 공용중인 케이블의 무게대비 약 1/20로서 케이블의 고유진동수와 댐핑값은 공용중인 사장교의 값과 차이가 있기 때문이다.



(a) FRF of Cable



(b) FRF Fit of Cable

Fig. 3 FRF of Cable

Table 1 Cable FRF Result

Division	Frequency (Hz)	Damping (%)	Cable Area
Cable	4.806	3.373	1×Ø12.7mm
	13.066	0.409	1×Ø12.7mm
	19.061	0.646	1×Ø12.7mm
	35.832	0.632	1×Ø12.7mm
	38.110	0.487	1×Ø12.7mm

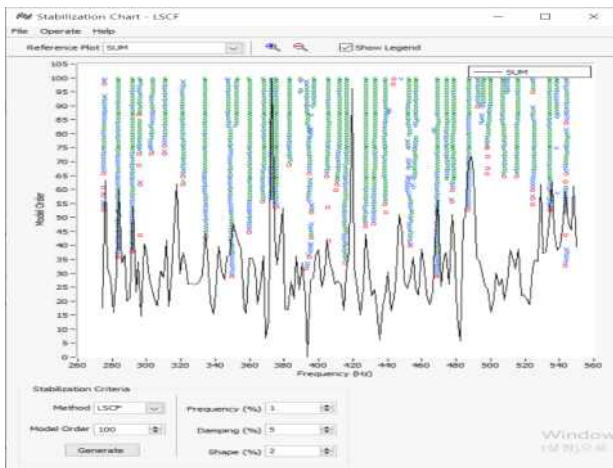
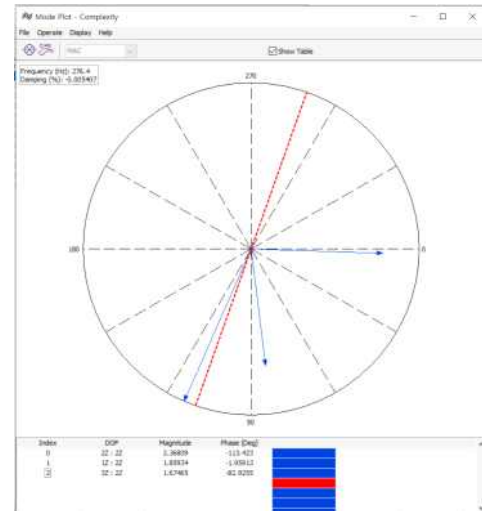
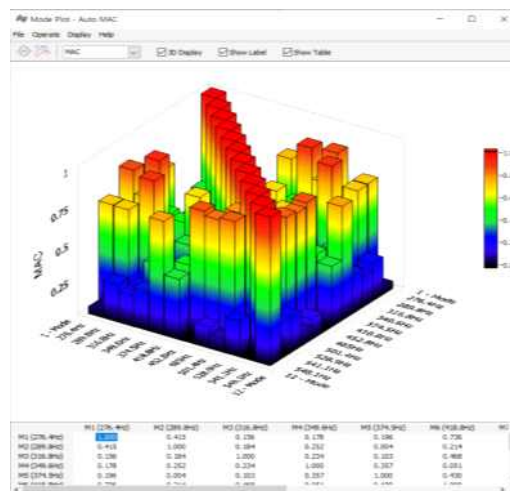
3.2 케이블의 Stabilization Chart 결과

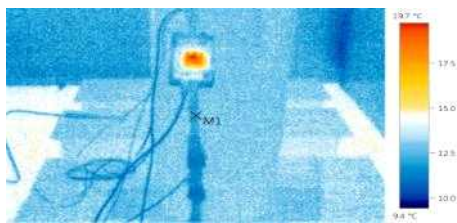
Fig. 4에서는 케이블에 대한 Stabilization Chart 결과를 나타내었다. Table 2는 Stabilization Criteria를 나타내었다.

Table 2 Cable Stabilization Criteria

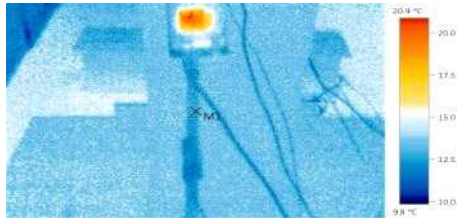
Symbol	Frequency	Damping Ratio	Mode Shape
s	yes	yes	yes
v	yes	no	yes
d	yes	yes	no
f	yes	no	no
o	no	no	no

여기에서 Stabilization Criteria는 Frequency Stability에 대해서 1%, Damping Stability는 5%이며, Mode Shape stability는 2%를 사용하였다(Jenny et al. 2007). 또한, Stabilization Chart는 케이블의 고유진동수와 댐핑 및 모드형상에 따라 기호를 부여하여 일정 기준치를 충족하는 경우 yes로 표현하였고, 불충족하는 경우 no로 표시한다. Stabilization Chart에 따른 케이블의 고유진동수와 댐핑의 관계를 분석한 결과 고유진동수가 높을수록 댐핑은 낮아지는 양상을 나타내었다. Stabilization Chart 결과 케이블의 고유진동수와 댐핑 및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 것은 저차모드에서 나타났다. 케이블의 온도가 높을수록 고유진동수는 낮게 나타났으며, Fig. 5는 케이블의 Complexity, Fig. 6에서는 케이블의 MAC를 나타내었다.

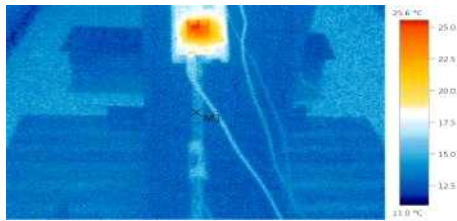
**Fig. 4** Stabilization Chart of Cable**Fig. 5** Complexity of Cable**Fig. 6** MAC of Cable



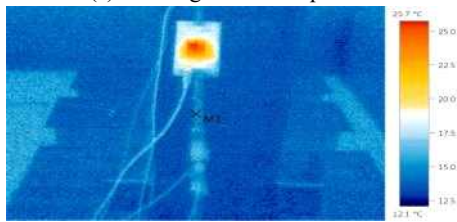
(a) 11.8 deg Cable Temperature



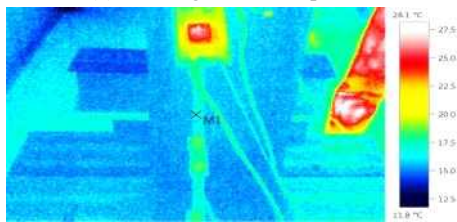
(b) 12.1 deg Cable Temperature



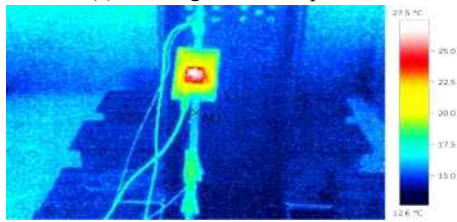
(c) 13.9 deg Cable Temperature



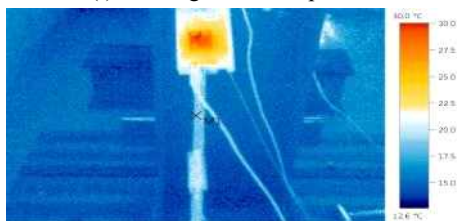
(d) 14.1 deg Cable Temperature



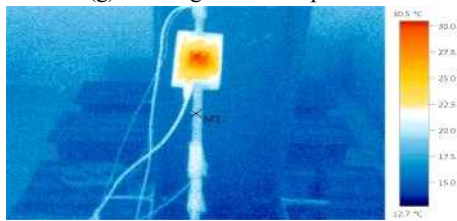
(e) 15.9 deg Cable Temperature



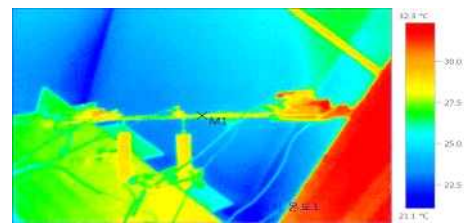
(f) 16.0 deg Cable Temperature



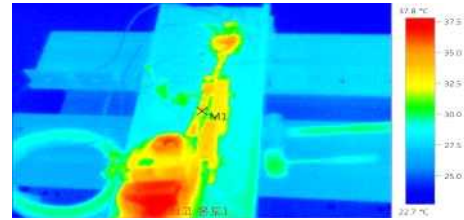
(g) 17.9 deg Cable Temperature



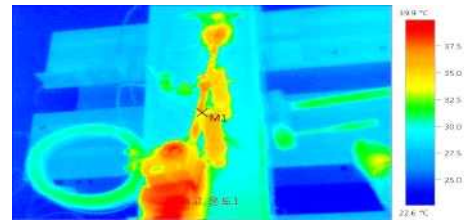
(h) 18.1 deg Cable Temperature



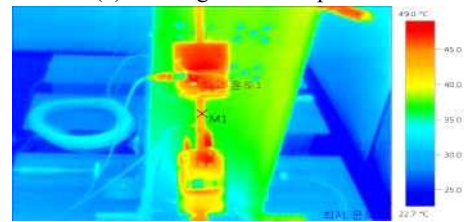
(i) 32.3 deg Cable Temperature



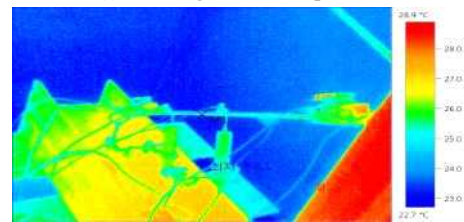
(j) 37.8 deg Cable Temperature



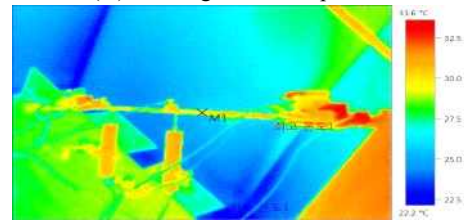
(k) 39.9 deg Cable Temperature



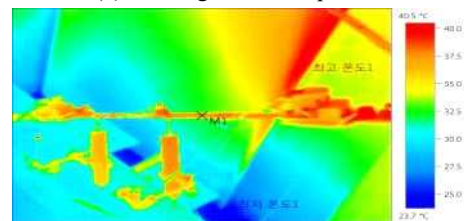
(l) 49.0 deg Cable Temperature



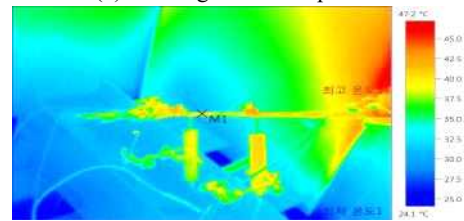
(m) 28.9 deg Cable Temperature



(n) 33.6 deg Cable Temperature



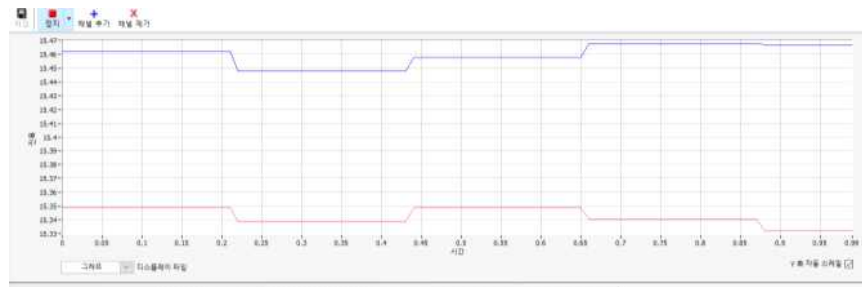
(o) 40.5 deg Cable Temperature



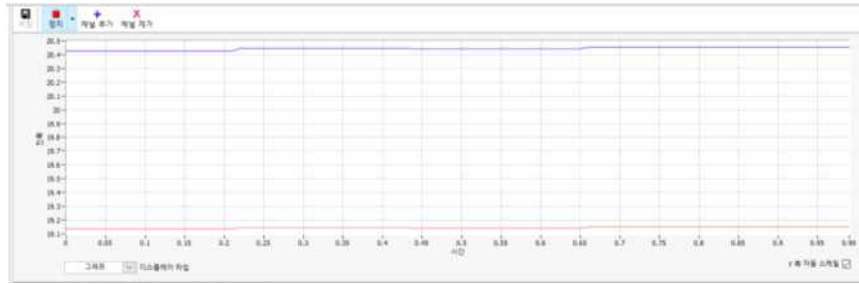
(p) 47.2 deg Cable Temperature

Fig. 7 Cable Temperature Result

Fig. 7은 열풍기 및 냉풍기를 사용하여 케이블의 온도변화를 열화상카메라를 통해서 측정한 결과로서 온도범위는 11.8℃~49℃를 나타내었으며 케이블의 온도변화는 사진상으로도 뚜렷하게 확인할 수 있었다. Fig. 8은 NI 9213모듈을 이용한 열전쌍으로 측정한 온도결과를 나타내고 있으며 열화상카메라와 더불어 케이블의 온도측정에 대한 신뢰성을 갖는 상태에서 실험을 수행하였다.

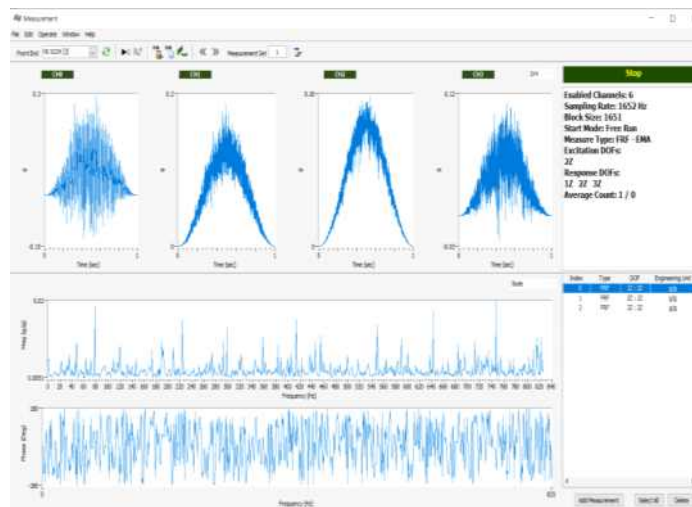


(a) 15.35 deg Cable Temperature

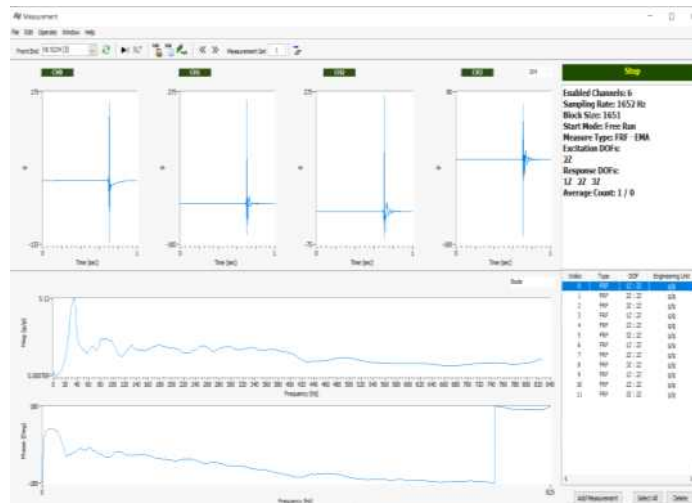


(b) 19.1 deg Cable Temperature

Fig. 8 Cable Temperature Result of thermocouple

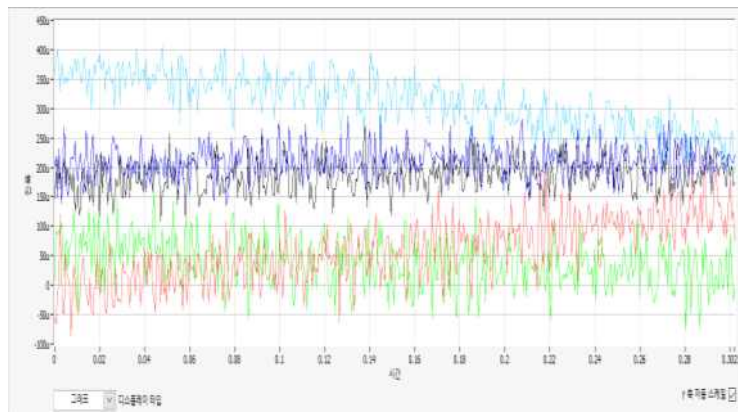


(a) Frequency Measurement in Nonexcitation

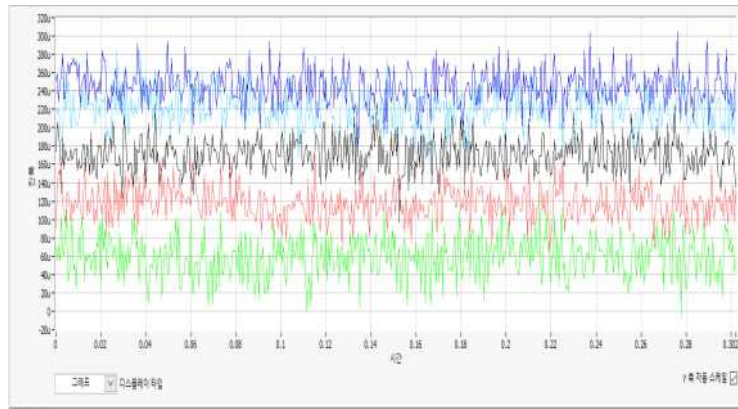


(b) Frequency Measurement in Excitation

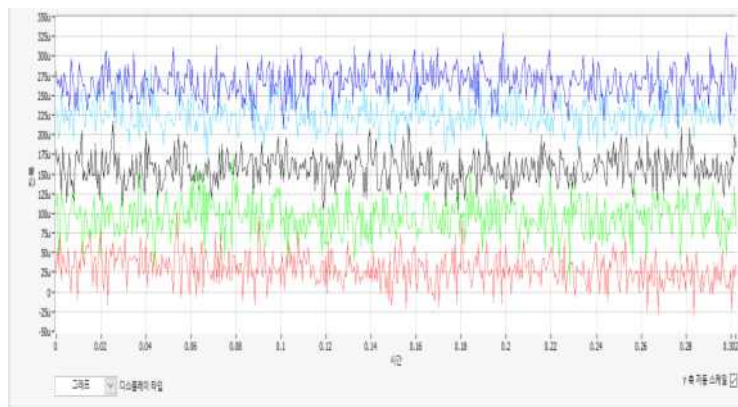
Fig. 9 Cable Modal Test Result



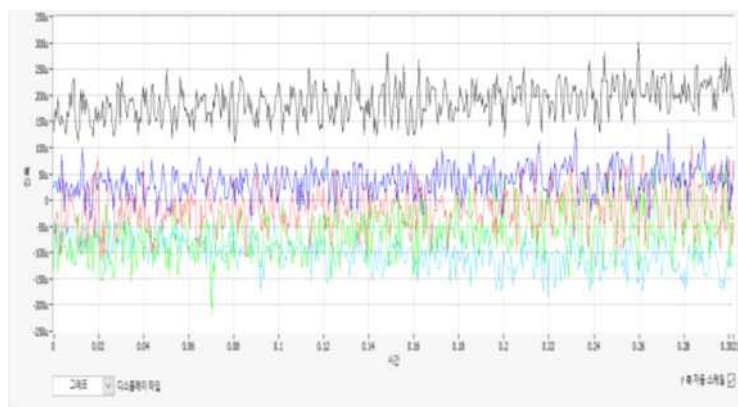
(c) Acceleration Measurement of Temperature 45 deg



(d) Acceleration Measurement of Temperature 24 deg



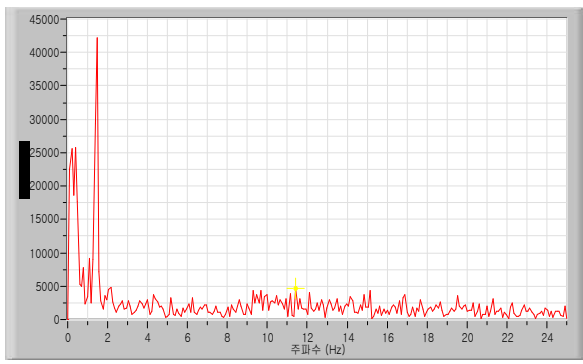
(e) Acceleration Measurement of Temperature 40 deg



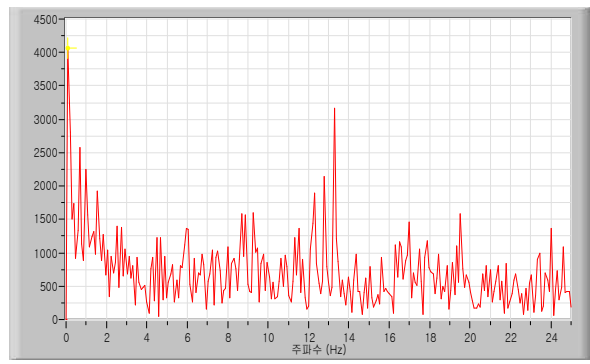
(f) Acceleration Measurement of Temperature 34 deg

Fig. 9 Cable Modal Test Result(Continued)

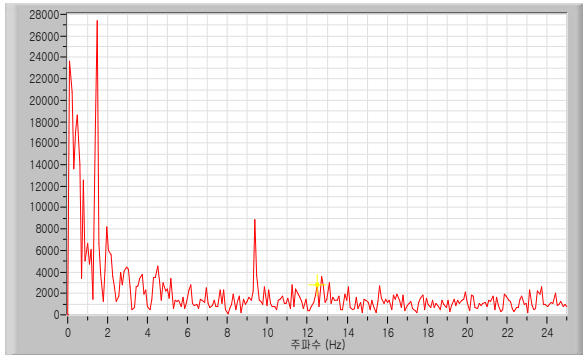
Fig. 9에서 케이블에 온도하중을 변화시킨 경우의 케이블의 충격미가진시와 충격가진시 고유진동수와 가속도 측정 결과를 나타내었다. 케이블의 온도변화에 따른 충격미가진시의 고유진동수 및 가속도의 크기가 충격가진시의 고유진동수와 가속도 측정값 대비 분명한 차이를 나타내고 있다.



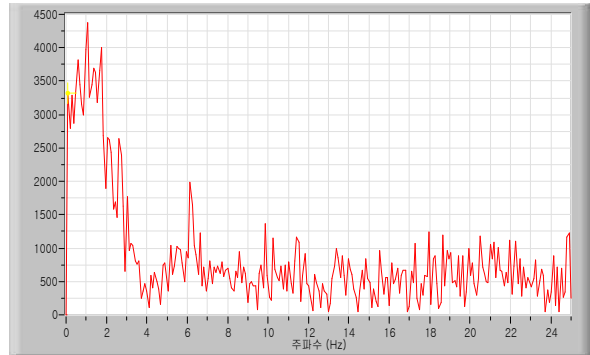
(a) Frequency to Temperature 15.09 deg



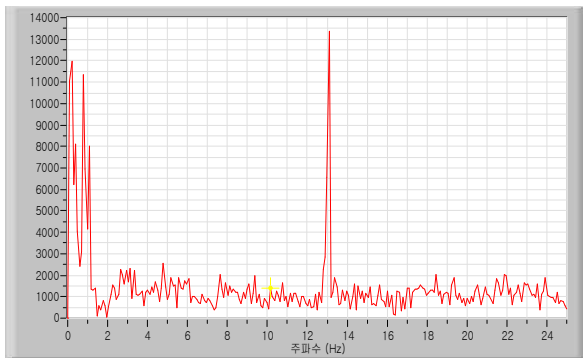
(f) Frequency to Temperature 29 deg



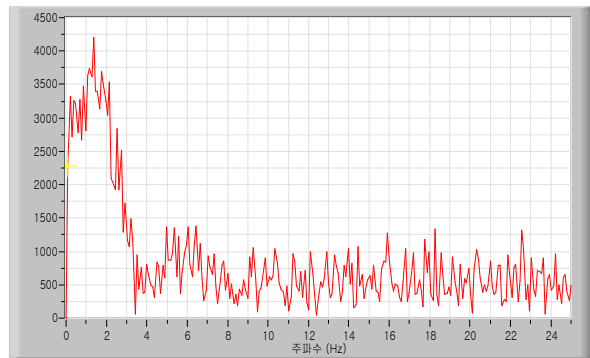
(b) Frequency to Temperature 17.01 deg



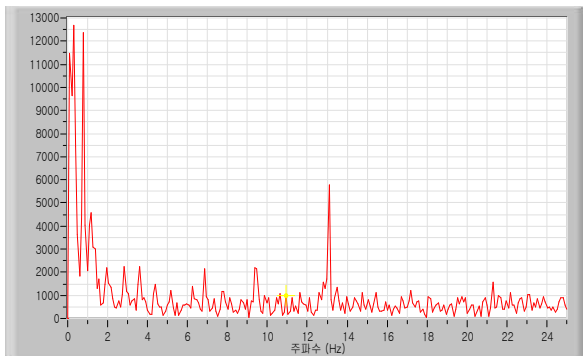
(g) Frequency to Temperature 33 deg



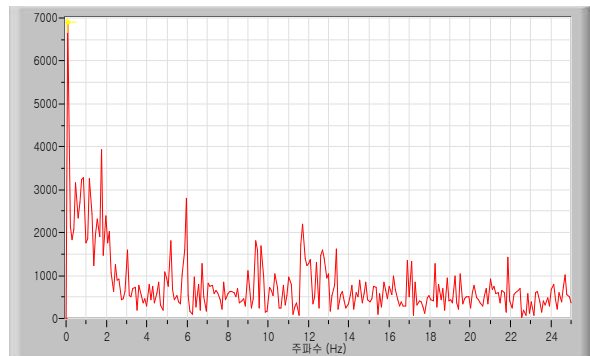
(c) Frequency to Temperature 18.1 deg



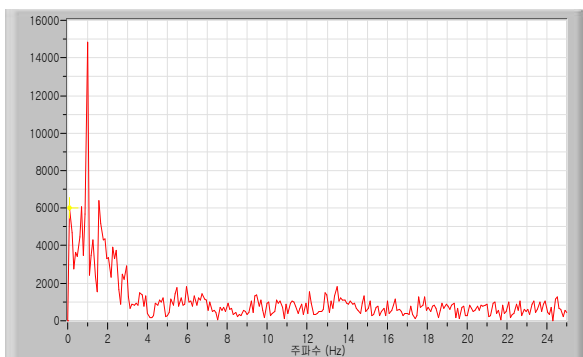
(h) Frequency to Temperature 37 deg



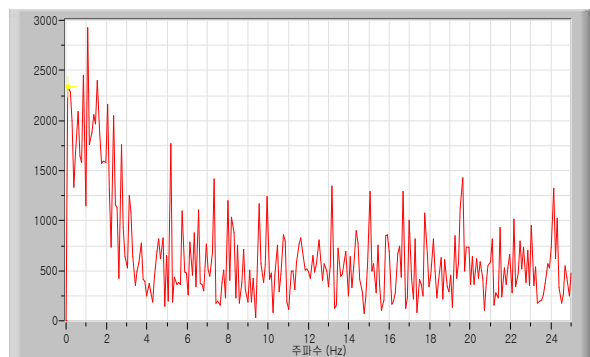
(d) Frequency to Temperature 19.32 deg



(i) Frequency to Temperature 39 deg



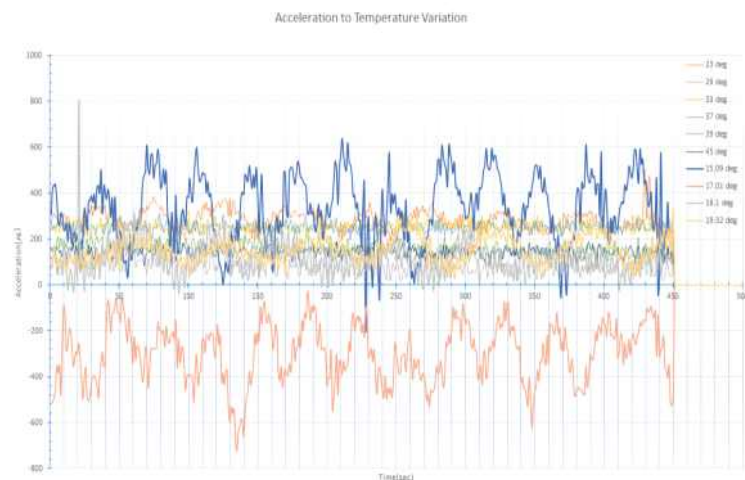
(e) Frequency to Temperature 23 deg



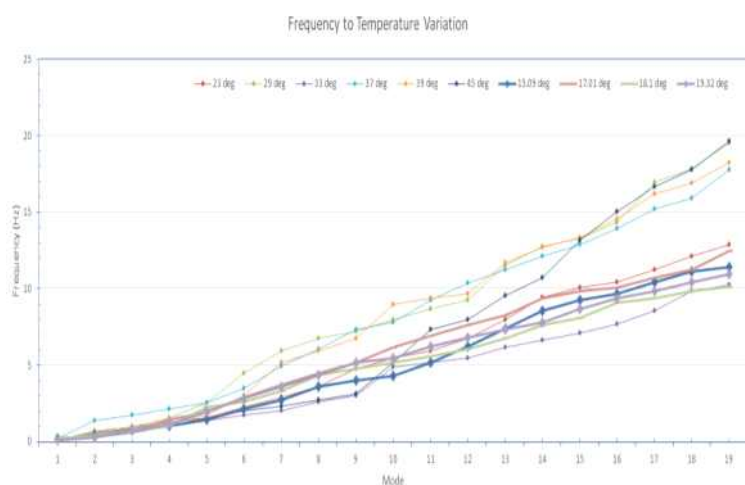
(j) Frequency to Temperature 45 deg

Fig. 10 Cable Frequency to Temperature

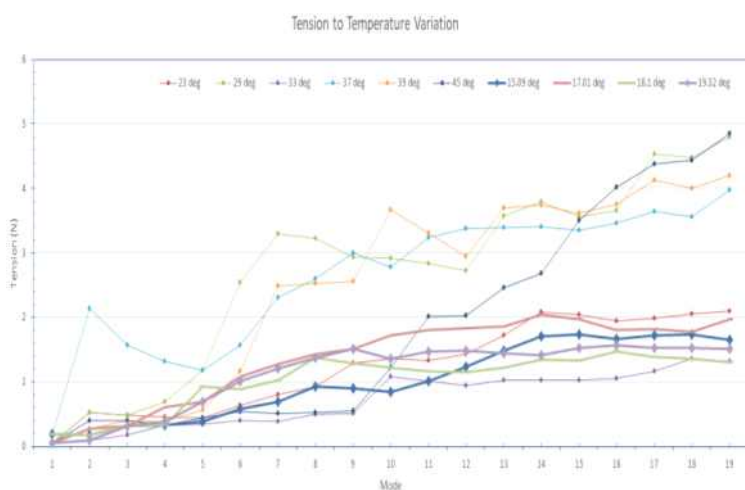
Fig. 10에서는 케이블의 온도변화에 따른 고유진동수의 측정결과를 나타내었으며 케이블의 온도가 11℃에서 45℃까지 증가함에 따라 케이블의 고유진동수는 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내고 있다.



(a) Acceleration to Temperature Variation



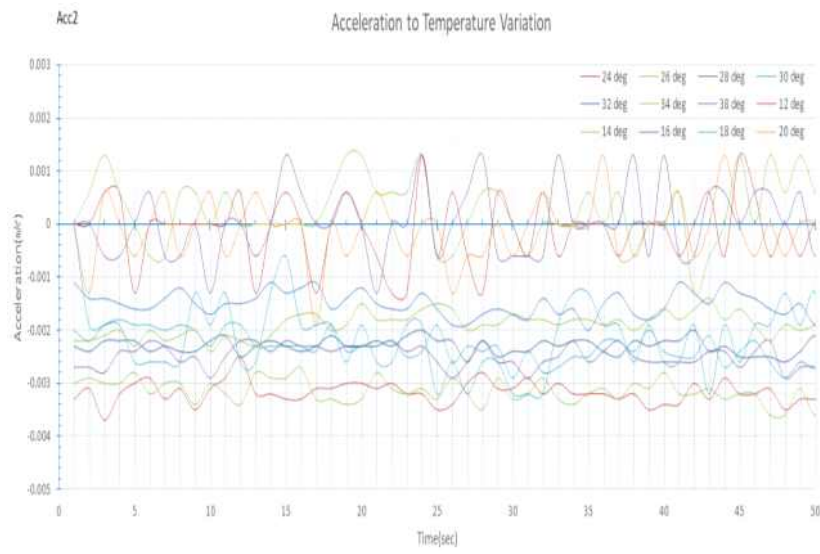
(b) Frequency to Temperature Variation



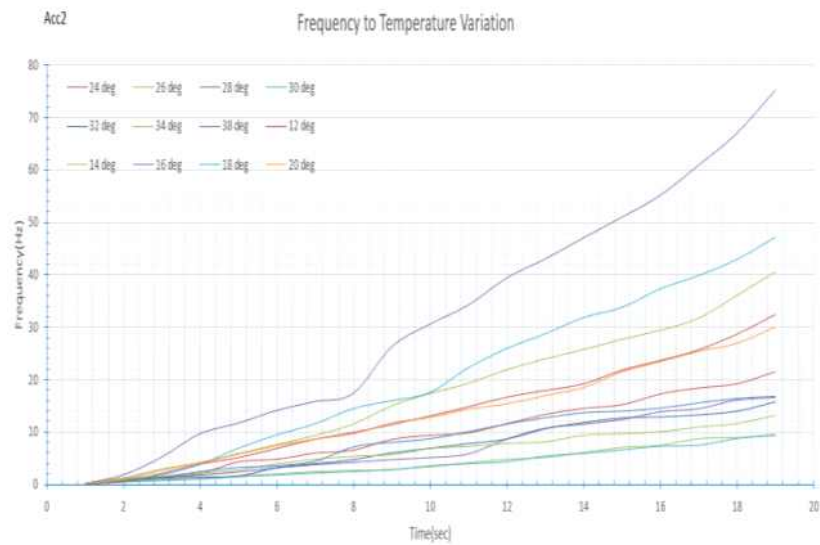
(c) Tension to Temperature Variation

Fig. 11 Cable Temperature Effect from IEPE Accelerometer

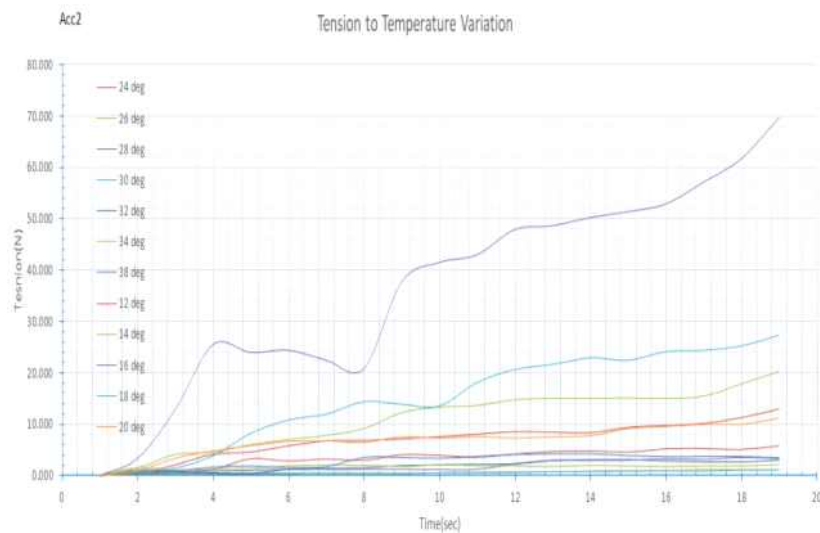
Fig. 11에서 케이블의 온도변화에 따른 IEPE 가속도계에 따른 가속도, 고유진동수 및 장력추정의 결과값을 나타내었으며 케이블의 온도가 증가함에 따라 가속도, 고유진동수 및 장력값은 감소하는 경향을 나타내었다.



(a) Acceleration to Temperature Variation



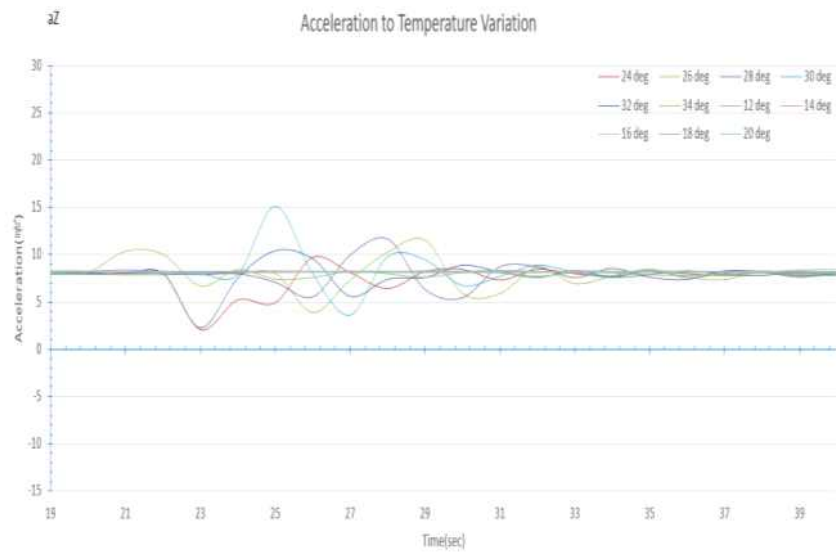
(b) Frequency to Temperature Variation



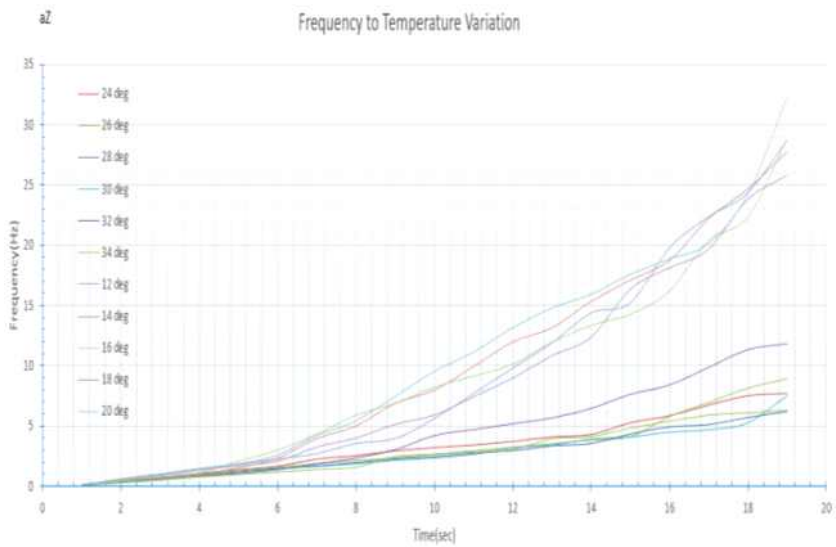
(c) Tension to Temperature Variation

Fig. 12 Cable Temperature Effect from Accelerometer

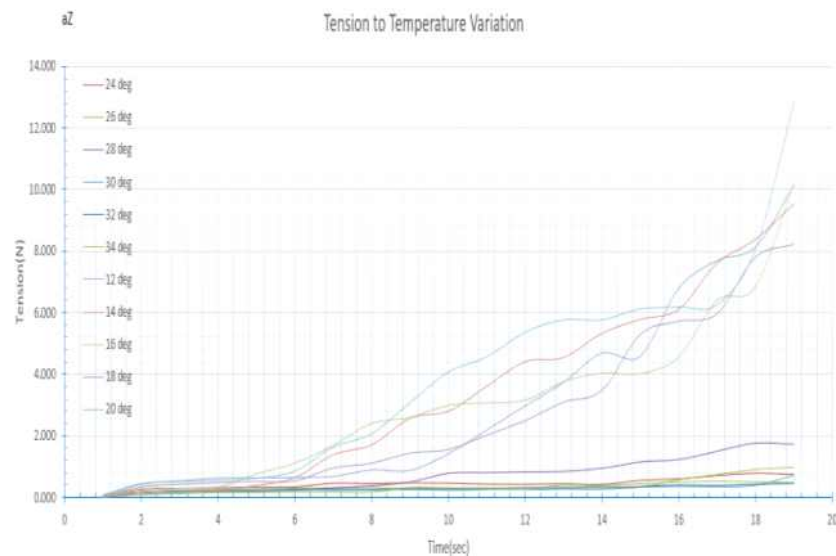
Fig. 12에서 케이블의 온도변화에 따른 ARF 가속도계에 따른 케이블의 가속도, 케이블의 고유진동수 및 케이블의 장력추정의 결과값을 나타내었으며 케이블의 온도가 증가함에 따라 케이블의 가속도, 케이블의 고유진동수 및 케이블의 장력추정값은 마찬가지로 감소하는 양상을 나타내었다.



(a) Acceleration to Temperature Variation



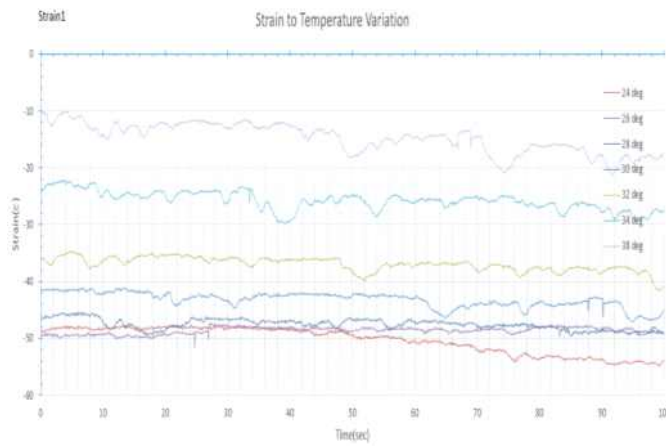
(b) Frequency to Temperature Variation



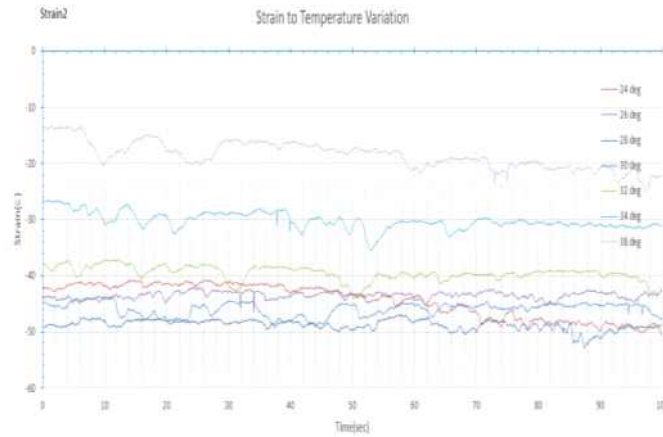
(c) Tension to Temperature Variation

Fig. 13 Cable Temperature Effect from Motionsensor

Fig. 13에서 케이블의 온도를 변화함에 따른 9축모션센서를 이용하여 측정한 케이블의 가속도, 케이블의 고유진동수 및 케이블의 장력추정의 결과값을 나타내었으며 케이블의 온도가 증가함에 따라 케이블의 가속도, 케이블의 고유진동수 및 케이블의 장력값은 감소하는 경향을 나타내었다.



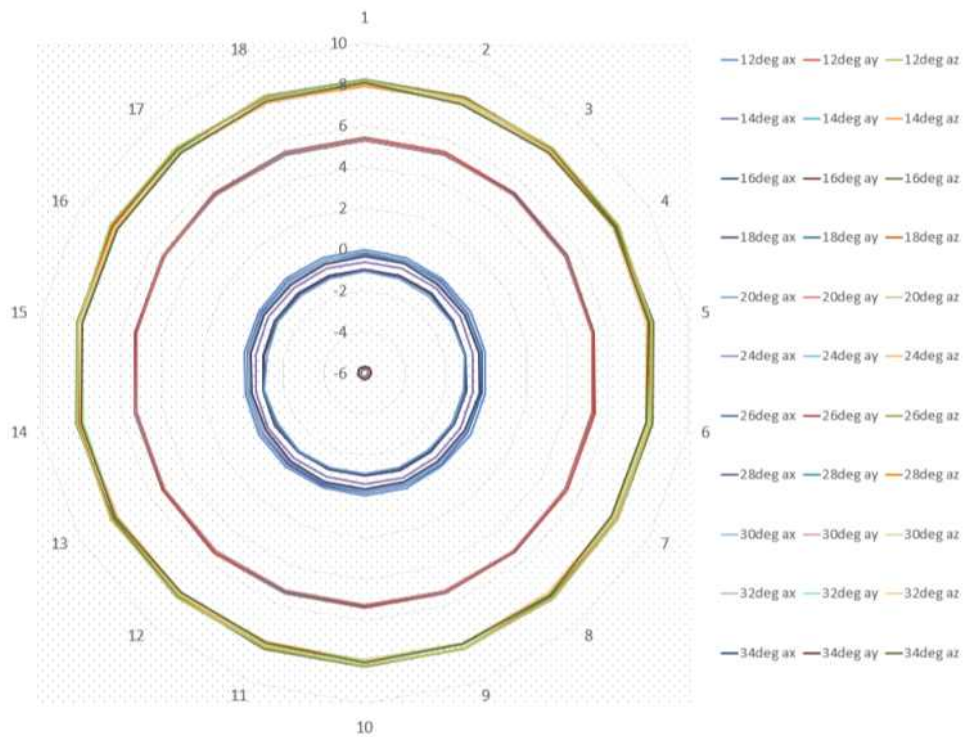
(a) Strain to Temperature Variation



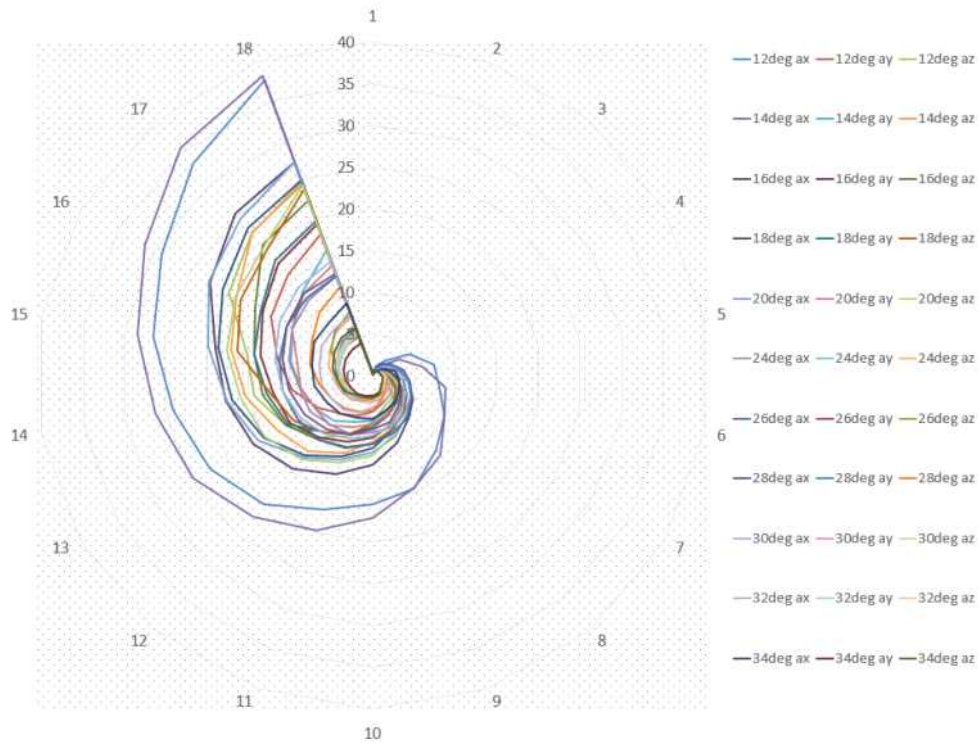
(b) Strain to Temperature Variation

Fig. 14 Cable Temperature Effect from Straingauge

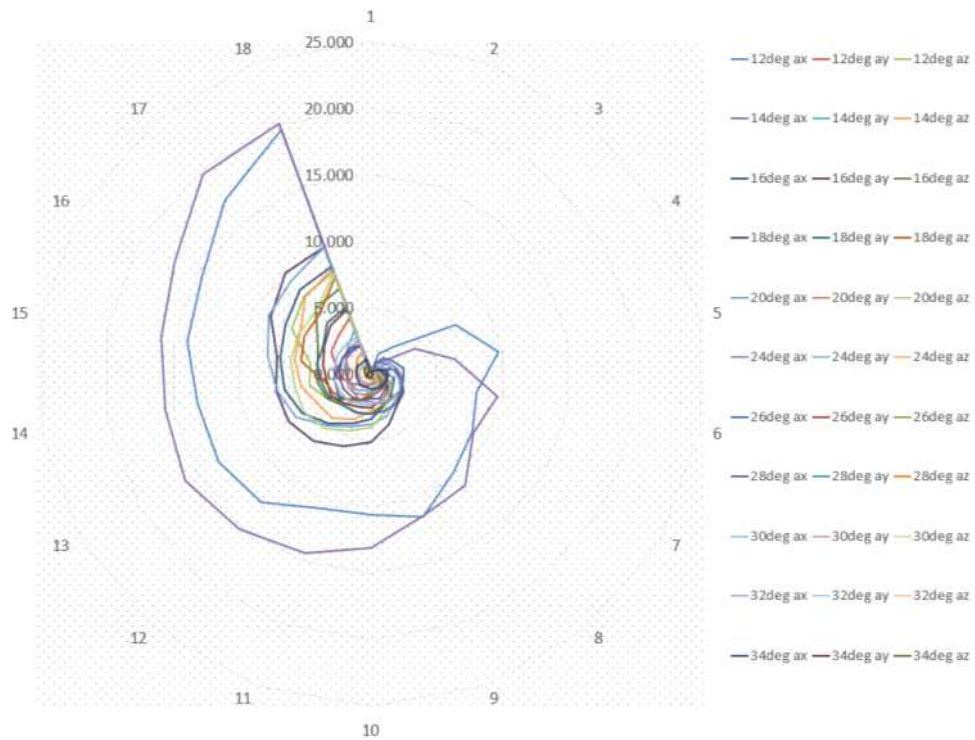
Fig. 14에서 케이블의 변형률은 온도가 증가할수록 케이블의 변형률이 감소하는 경향을 나타내었으며, 여기서 케이블의 변형률은 가력이 아닌 온도에 의한 변형률을 의미한다. 또한 케이블이 변위는 온도가 증가함에 따라 케이블 변위의 증감이 미미한 것으로 나타났으며 이는 케이블의 길이대비 상대적으로 케이블의 강성이 큰 이유로 판단된다.



(a) Acceleration to Temperature Variation



(b) Frequency to Temperature Variation



(c) Tension to Temperature Variation

Fig. 15 Cable Tri-axial Temperature Effect from Motionsensor

Fig. 15에서 케이블의 온도변화에 따라 케이블의 3축 가속도에 대해서 분석한 결과 y축과 z축의 가속도의 비는 평균 0.713배로서 케이블의 경사각을 45.5도임을 확인할 수 있었다. 케이블의 3축 고유진동수의 값은 온도가 낮은 구간에서의 고유진동수값의 변화가 온도가 높은 구간의 고유진동수값의 변화의 비율은 약 1.78배로서 온도가 낮은 구간에서 고유진동수의 변화가 민감하게 나타났다. 케이블의 3축에 대한 장력은 온도가 낮은 구간에서의 장력변화비는 1.73배 온도가 높은 구간에서의 장력변화비는 2.9배로서 온도가 높을수록 장력변화에 대해서 민감하게 변화하는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

케이블의 온도영향에 의한 케이블의 가속도, 고유진동수 및 케이블의 장력값에 대해서 분석하였다. 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 케이블의 온도변화에 따른 케이블의 가속도($0.1g \sim 0.5g$), 고유진동수($11Hz \sim 19Hz$), 장력($1.3N \sim 4.8N$)은 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 나타내었으며 온도영향에 의해 케이블의 가속도는 11% 감소하였으며 온도영향에 따라 고유진동수는 4%감소하였고, 온도영향에 의해 장력은 33% 감소하였다. 케이블의 온도영향에 따른 고유진동수 및 장력의 상관관계를 분석한 결과 온도가 증가함에 따라 고유진동수는 4%변화가 발생한 반면 장력은 33%변화가 발생하여 온도의 영향을 더 크게 받는 것은 장력으로 나타났다. 케이블의 변형률은 온도가 증가함에 따라 감소하였고 케이블의 변위는 온도가 증가하더라도 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 이는 케이블의 길이대비 강성의 크기가 큰 이유로 사료된다. 이는 공용중인 사장교의 온도변화에 따른 장력의 변화와 유사한 결과를 나타내고 있다.
- 2) FRF 산정결과 케이블의 무게와 길이에 따라 케이블의 고유진동수 및 댐핑의 변화는 미소한 것으로 나타났고 고유진동수 1차모드는 $4.806Hz$, 5차모드는 $38.110Hz$ 이며, 댐핑의 1차모드는 3.373%, 5차모드는 0.487%를 나타내었으며 이는 실험에 이용된 케이블의 무게가 공용중인 케이블의 무게대비 약 1/20로서 케이블의 고유진동수와 댐핑의 차이를 나타내는 데에는 제약이 있었다. 따라서 공용중인 사장교의 케이블에서는 케이블의 길이대비 케이블의 강성이 유연하므로 케이블의 고유진동수와 댐핑의 변화는 뚜렷하게 구분될 것으로 판단된다.
- 3) Stabilization Chart 결과 케이블의 고유진동수와 댐핑이 모드형상의 안정기준을 모두 충족하는 저차모드에서 나타났다. 이상에서 공용중인 사장교의 케이블에서 고유진동수는 저차모드에서 지배되므로 안정차트결과는 만족할 것으로 판단된다.
- 4) 9축모션센서($1.78N$)와 가속도계($2.16N$)를 통해서 구한 장력값의 차이는 미미한 것으로 나타났으며 이는 축소모형에서 나타난 결과이며, 공용중인 사장교의 케이블 장력측정에서는 9축모션센서와 가속도계의 장력추정값은 유사할 것으로 판단되어 9축모션센서를 이용하여 케이블의 장력을 추정하여도 오차는 허용범위내에 들어오는 것으로 판단된다.
- 5) 케이블의 3축방향에 대해서 온도변화에 대한 민감도를 분석한 결과 가속도는 온도변화의 영향을 작게 받으며 고유진동수와 장력은 온도변화의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

3.16 사장교 케이블장력 계측장치의 현장적용성 분석

1. 서론

최근 들어 장대교량의 건설에 현수교, 사장교 등과 같은 케이블이 주 요소인 교량 형식이 급증하고 있다. 이와 같은 구조물에서 케이블이 미치는 영향은 매우 크며, 케이블의 모드 특성 및 케이블의 장력이 전체 구조계에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. 케이블은 거더에 가해지는 하중효과를 주탑으로 전달하는 캠버조절과 직결되고 전체 구조에서 중요한 부재로서, 가설시 가해지는 초기 장력과 시간이 지난 후 장력을 비교함으로써 교량의 노후 상태와 이상을 점검 할 수 있다. Chiko[1] 등은 모드해석에 사용하는 커브피팅(Curve fitting)을 새로운 Direct Simultaneous Modal Approximation(DSMA) 방법으로 적용하여 고유진동수와 고유벡터의 신뢰성을 높이고자 전체 모드에 비선형 함수를 최소화 하여 모달 매개변수의 신뢰성을 검토하였다.

Cornwell et al[2]과 Elliott et al[3] 등은 실내 모드해석으로 변수가 많은 장대 구조물을 가상실험 모달해석으로 모드 특성을 비교하여 최적의 센서위치에 의한 신뢰성과 교량의 진동특성을 측정하기 위해서 다수의 연구 방법을 제안하고 모드특성을 제시하였다. 그리고 Shwarz[4] 등은 다수의 채널을 이용하여 시간영역의 진동응답을 측정하고자 Z24 고속도로에 2개의 가진실험(Shaker Test), 충격해머실험(Impact Hammer Test)와 상시진동실험(Ambient Vibration Test)을 적용한 FRF와 ODS FRF(Frequency Response Function)을 커브피팅 과정으로 얻은 모드 매개변수와 MAC(Modal Assurance Criterion)을 통해 실험방법을 비교분석하였다.

케이블 장력 추정 기법으로 사용되는 방법은 보통 직접법과 간접법으로 구분할 수 있다. 직접법은 초기 비용이 들고 유지관리의 문제로 간접법을 주로 사용한다. 간접법에 해당되는 방법으로는 교량의 케이블에서 진동을 계측하여 역으로 장력을 추정하는 진동법이 있다[5-8]. 진동 계측 센서는 가속도계가 주로 사용되고 본 연구에서는 9축모션센서를 적용하여 진동계측을 실시하였다.

상기와 같이 기존 연구에서는 구조물 전체에 대한 모드해석을 수행하여 구조물의 손상을 검색하거나 공진을 유발하는 요인 및 구조물의 경계조건에 대한 연구가 주류를 이루었다. 연구대상 구조물은 케이블교량이 아닌 일반교량이었다. 기존 연구내용으로부터 구조물 전체에서 주요부재에 해당하는 케이블의 모드특성을 상세하게 파악하는 데에는 한계가 있었고 본 연구에서는 케이블교량에서 주요부재인 케이블에 대해서 충격 해머를 이용하여 케이블의 모드특성을 파악하였고 GTDL360, NI Module, 9 Axes Motion Sensor에 의한 케이블 장력계측의 현장적용성을 분석하고 수치해석결과와 비교분석을 통해서 상기 계측장치들의 현장적용성을 연구하였다.

2. 본론

2.1 사장교 케이블 장력 추정방법

기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하였고 일부 케이블에 GNSS를 설치하여 케이블의 변형특성을 조사하였으나 설치비용의 제한으로 인해 일부 개소에 설치하므로써 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 장력특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다. 본 연구는 이러한 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 부착 및 제거 과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 9축모션센서를 통해 케이블 유지관리를 효율적으로 활용하였다.

장력을 측정하고자 하는 케이블에 9축모션센서를 부착하고 설치된 케이블에 대한 비파괴 측정을 위해 주행차량이나 바람 등의 상시 진동을 이용하거나 충격망치를 사용하여 강제 진동(가진)을 일으킨다.

케이블이 진동하게 되면 센서를 통해 수집된 변환된 가속도 신호를 주파수 영역으로 전개한 후 고유진동

수를 결정하고 수학적 모델의 특성방정식인 현의 진동이론 방정식을 이용하여 장력을 구한다. 현의 이론 방정식은 현과 현에 작용하는 장력과의 방정식을 이용하여 해를 구한다. 현 이론식에 의할 경우 케이블의 강성을 고려한 경우 길이가 비교적 짧고 새그의 영향을 무시할 수 있는 경우에 전 지간에 걸쳐서 케이블의 휨 강성이 일정하다고 생각되면 다음 Eq. (1)과 같이 휨 강성을 고려한 미분방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, T 는 케이블의 휨 강성, y 는 진폭, x 는 길이, t 는 시간, w 는 단위중량, g 는 중력가속도이며 Eq. (1)을 양단 고정의 경계조건으로 풀면 Eq. (2)와 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력추정식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2 \quad (2)$$

여기서, T 는 장력, L 은 케이블 길이, w 는 단위중량, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차 고유진동수이다.

Eq. (2)을 케이블의 진동으로 고유진동수를 실험적으로 획득하는 경우 장력을 추정하기 위하여 다음 Eq. (3)과 같은 1차 회귀식으로 정리한다.

$$\left(\frac{f_n}{n} \right)^2 = T \cdot \frac{g}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + a \cdot n^2 \quad (3)$$

따라서 센서에 의해 측정된 케이블의 가속도의 FFT 분석결과를 위의 Eq. (3)과 같이 1차 회귀식으로 나타낸 후, 매개변수 a (기울기)와 b (y 절편)를 구하면 아래의 Eq. (4)에 의해 케이블의 장력과 휨 강성을 산정할 수 있다[6-7].

$$a = \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4}, EI = \frac{4wL_{eff}^4}{\pi^2 g} a \quad (4)$$

$$b = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2}, T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} b$$

위의 Eq. (4)와 같이 휨 강성 EI 와 장력값 T 를 구할 수 있다.

2.2 사장교 케이블 장력 현장실증실험

사장교 케이블 장력에 대한 현장실증실험방법은 다음과 같이 실시하였다.

Table 1는 가속도계에 대한 기술적인 사양이며, Fig. 1는 가속도계 및 모듈의 사진을 나타내고 있다. 하드웨어는 NI 9234, PXIe 4464, GTDL360를 사용하였다.



(a) Accelerometer



(b) I/O Modules



(c) Triaxial-accelerometer



(d) PXI Modules

Fig. 1. Data Acquisition System

Table 1. Accelerometer Specification

Division	Specifications
Sensitivity(±15%)	1.02 mV/(m/s ²)
Measurement Range	±4900 m/s ² pk
Frequency Range	0.5 to 10000 Hz

2.2.1 Arduino Uno etc. Sensors

아두이노 우노는 Atmel사의 16MHz 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 사용하여 다양한 주변 장치를 연결할 수 있다[9]. 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축모션센서로부터 수신받은 신호를 디지털신호로 변환하여 모니터상에 출력하는 역할을 한다[9]. Fig. 2은 센서사진을 나타내고 있다.

9축모션센서는 Bosch사의 BNO055로 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 3축 지자계센서로 구성되어 있다. 센서는 선형 가속도와 같은 신호를 출력한다[9]. 본 연구에서 9축 모션센서의 측정값은 케이블의 고유진동수를 산출하는 데 활용된다. Table 2은 9축모션센서의 기술적사항을 나타낸다.



(a) Arduino Uno



(b) 9Axes Motion Sensor

Fig. 2. Arduino etc. Sensors

Table 2. 9Axes Motion Sensor Specification

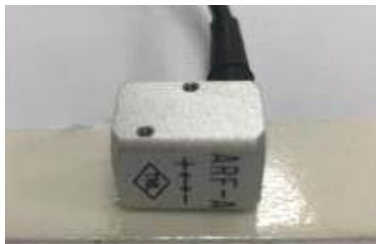
Division	Specifications
Chip based	BOSCH Sensortech BNO055
Thinker Kit interface	2 × TWI, 2 × OUT, 2 × IN
Motion Sensors	3-axial accelerometer, 3-axial gyroscope, 3-axial geomagnetic
Fusion Engine	32-bit microcontroller with BSX3.0 FusionLib
Operating Voltage	5 / 3.3 V

2.2.2 Data Logger etc. Sensors

Data Logger는 노트북과 연결하여 데이터를 측정하고 저장하며, 그래프를 나타내는 PC연결형 스트레인 측정기이다. Table 3는 Data Logger에 대한 기술적 사양, Fig. 3은 데이터로거, 가속도계를 나타내고 있다. Table 4는 1축 가속도계에 대한 기술적 사양을 나타낸다.



(a) Data Logger



(b) Accelerometer

Fig. 3. Data Logger Photograph

Table 3. Data Logger Specification

Division	Specifications
Number of Channel	4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 Channel
Measure Hz	1000 Hz
Connector for sensor	5p Screw connector or TAJIMI
Input Sensor	- 1Gage & 2Gage : 120Ω, 350Ω - 4Gage Bridge Sensor : 0.5 mV/V ~ 100 mV/V - Protentionmeter Sensor - Pt100, thermocouple J, K, T, E, R, S - Voltage : 10V
Strain Input Range	10000, 100000, 1000000*10 ⁻⁶ strain
Low Pass Filter	10Hz, 100Hz, 1Khz, Pass Program Selectable
Interface	USB
Program	Multiscan S/W & Multiload S/W
Demension	470(W)*190(H)*320(D)mm
Power	AC220V, 50~60Hz

Table 4. Accelerometer Specification

Division	Specifications
Capacity	20 m/s ²
Rated Output	0.5 mV/V(1000*10 ⁻⁶)
Non-linearity	1% RO
Frequency Response (Hz)	80
Natural Frequency (Hz)	150
Permissible Temperature Range	-10 ~ +50°C
Permissible Overload	300%
Input&Output resistance	120Ω
Recommend Impressed Voltage	2V less than
Allowable Impressed Voltage	5V
Connection Cable	Φ 3mm 0.05mm ² 4-core shielded Chloroprene Cable 5m
Mass	13g

본 실험은 Impact Hammer를 이용하여 측정하는 진동실험으로 수행되었다. 사장교 케이블에 다양한 센서들을 부착하고 충격해머를 이용하여 가진하면서 실험을 수행하였다. 실험은 케이블에 열전쌍을 설치하여 케이블의 온도를 측정하여 수행하였다. 실험으로부터 얻어진 모드특성 결과데이터를 ModalVIEW R2를 통하여 분석을 실시하였다[10]. 데이터 수집은 NI 9234 하드웨어를 적용하였다. FRF(Frequency Response Function) 결과로부터 모드안정차트를 구하여 모드평가를 실시하였다. 고유진동수는 Peak Picking Method을 사용하여 구하고 감쇠비는 3dB Method를 이용하였다. 여기서 3dB Method는 다음 Eq. (5)과 같다.

$$Damping\ ratio(\%) = \frac{f_0}{f_1 - f_2} \quad (5)$$

여기서 f_0 는 공진주파수이며, f_1 는 공진주파수보다 낮은 주파수로서 3dB 작은 주파수, f_2 는 공진주파수보다 높은 주파수로서 3dB 작은 주파수이다.

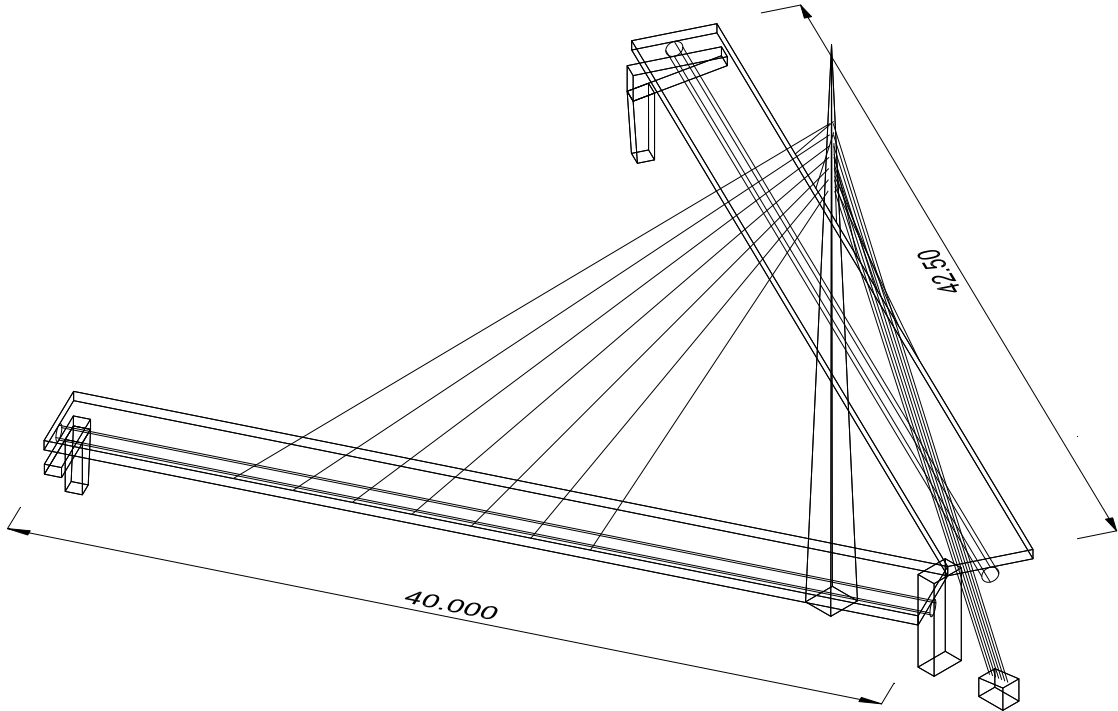
2.2.3 케이블의 주파수응답함수(FRF) 결과

Fig. 4은 실험 case별 모드평가를 실시하여 FRF결과를 나타낸 것이다. FRF는 다음 Eq. (6)와 같이 전달함수

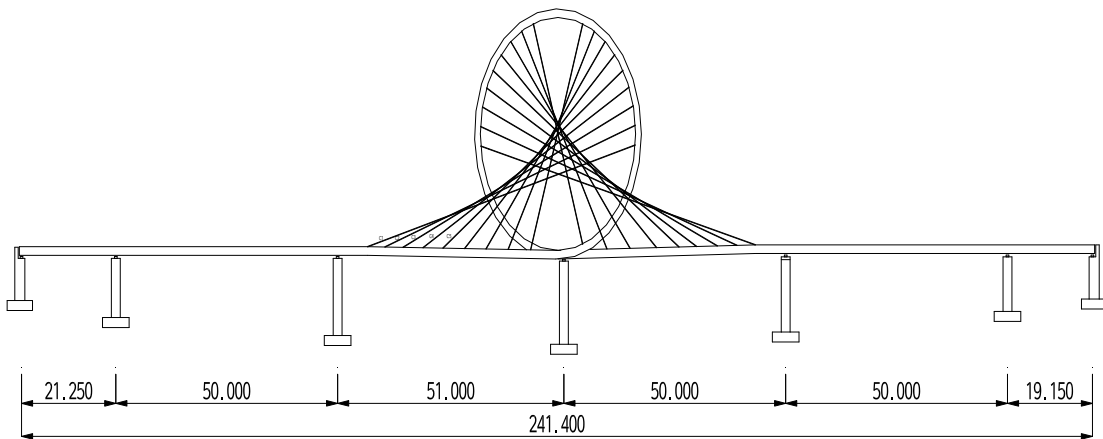
는 힘(X_n)의 라플라스 변환으로부터 출력(Y_n)의 라플라스 변환의 관계로 나타내었다.

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

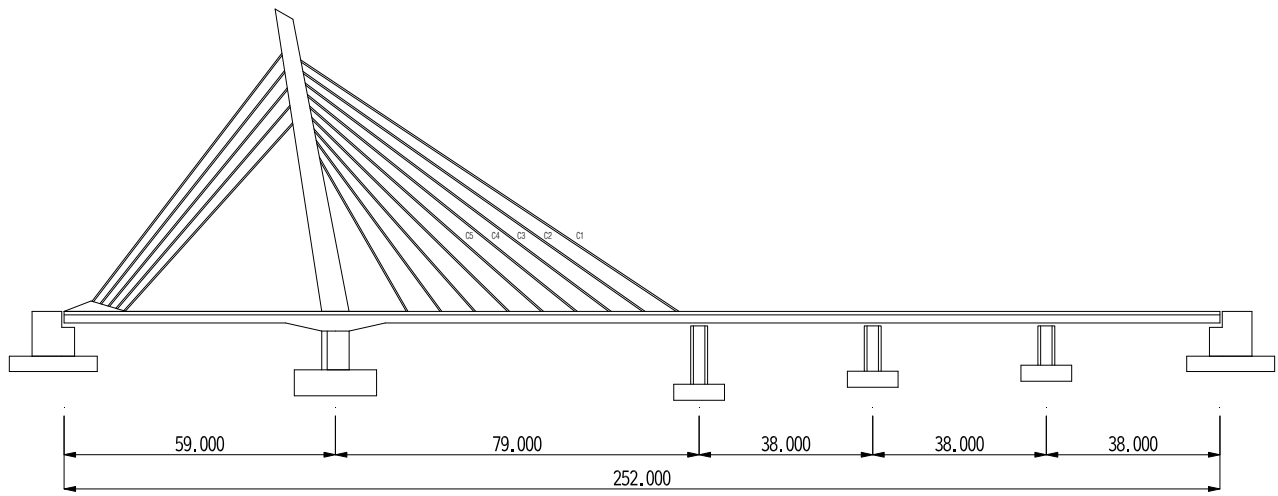
여기서 Y_i 는 자유도 i 에서 응답신호스펙트럼이다. X_j 는 자유도 j 에서 가진신호스펙트럼이다. H_{ij} 는 자유도 i 와 j 사이에 FRF이다.



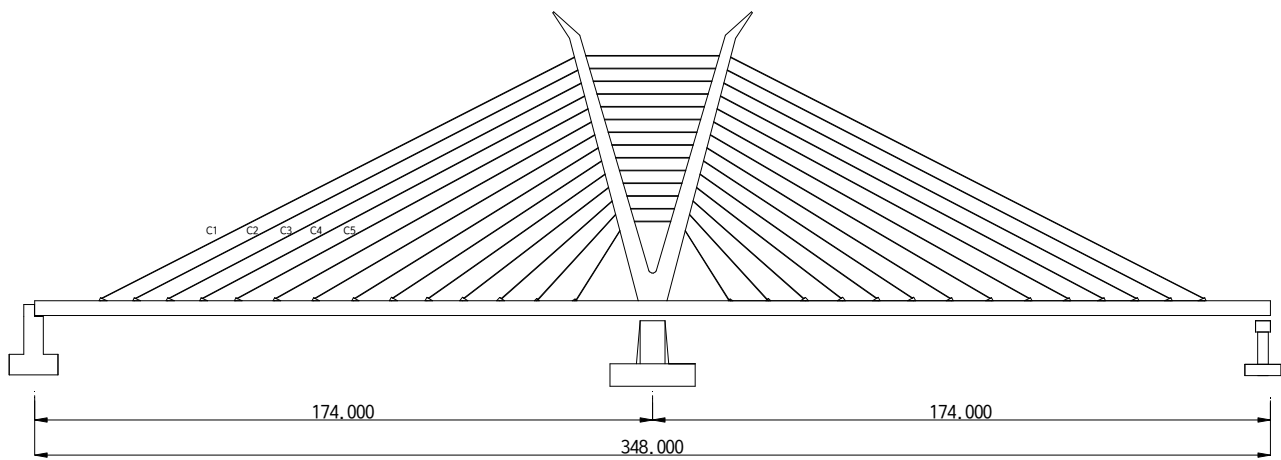
(a) A Birdge Longitudinal Section



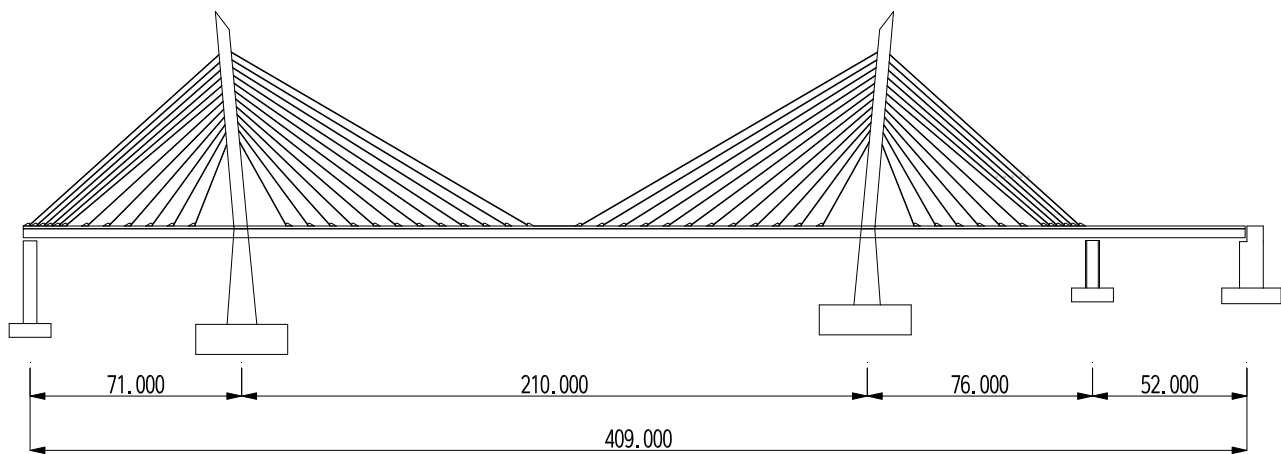
(b) B Birdge Longitudinal Section



(c) C Birdge Longitudinal Section



(d) D Birdge Longitudinal Section



(e) E Birdge Longitudinal Section

Fig. 4. A~E Bridge Longitudinal Section



(a) A Bridge Panorama



(b) B Bridge Panorama



(c) C Bridge Panorama



(d) D Bridge Panorama



(e) E Bridge Panorama

Fig. 5. A~E Bridge Panorama



(a) A Bridge Cable Tension Measurement



(b) B Bridge Cable Tension Measurement



(c) C Bridge Cable Tension Measurement



(d) D Bridge Cable Tension Measurement



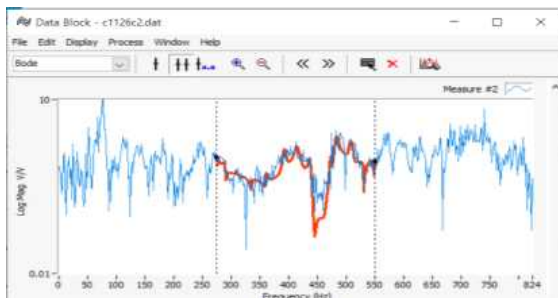
(e) E Bridge Cable Tension Measurement

Fig. 6. A~E Bridge Cable Tension Measurement
Sensors

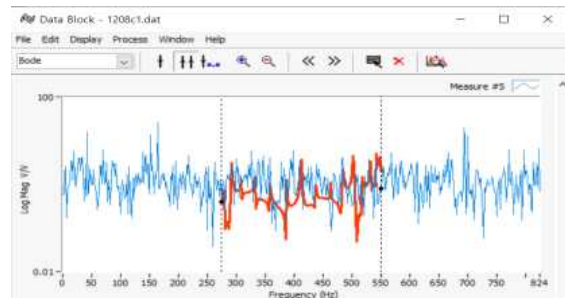
Table 5에서 구한 FRF 결과는 케이블의 무게와 길이에 따라 케이블에 작용하는 고유진동수와 댐핑의 변화는 미소한 것으로 나타났다. 고유진동수에 대한 중첩분석을 한 결과 A~E교량 전체적으로 고유진동수가 일치하는 것으로 나타나서 실험결과는 적정한 것으로 판단된다.

Table 5. Cable FRF Result

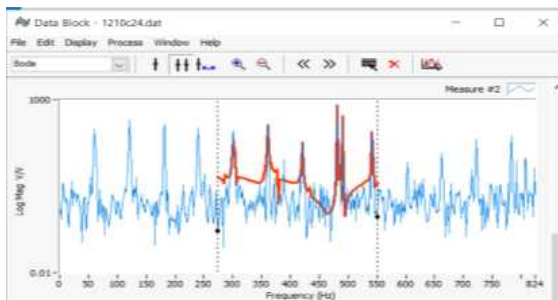
Division	Frequency(Hz)	Damping(%)	Cable Length(m)
A Bridge	277.8	0.2549	24.3
B Bridge	279	-0.1528	57.8
C Bridge	285.7	-0.08229	93.9
D Bridge	270.3	0.9896	138.7
E Bridge	249.4	0.6526	76.3



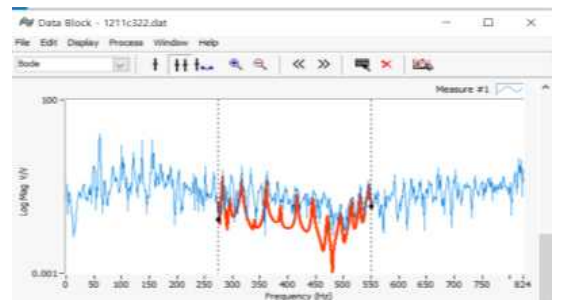
(a) A Bridge FRF



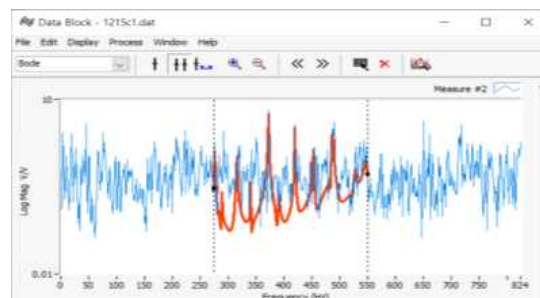
(b) B Bridge FRF



(c) C Bridge FRF



(d) D Bridge FRF



(e) E Bridge FRF

Fig. 7. A~E Bridge FRF

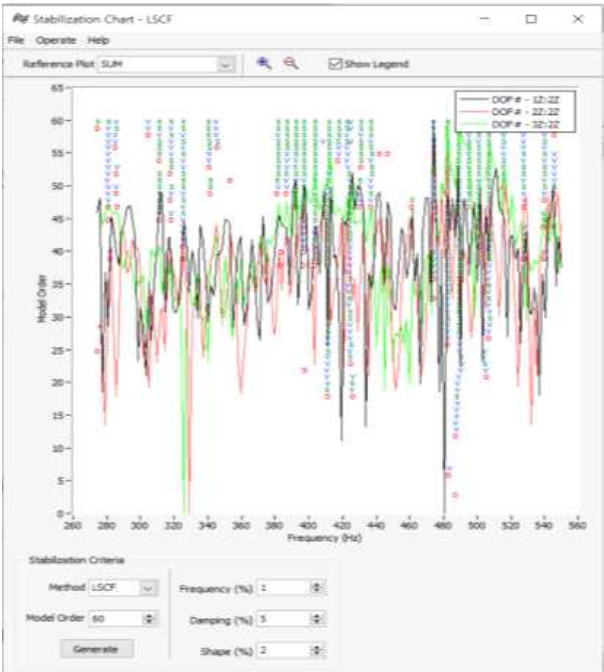
2.2.4 케이블의 Stabilization Chart 결과

Fig. 8에서는 케이블에 대한 Stabilization Chart 결과를 나타내었으며 Table 6에서는 Stabilization Criteria를 나타내었다.

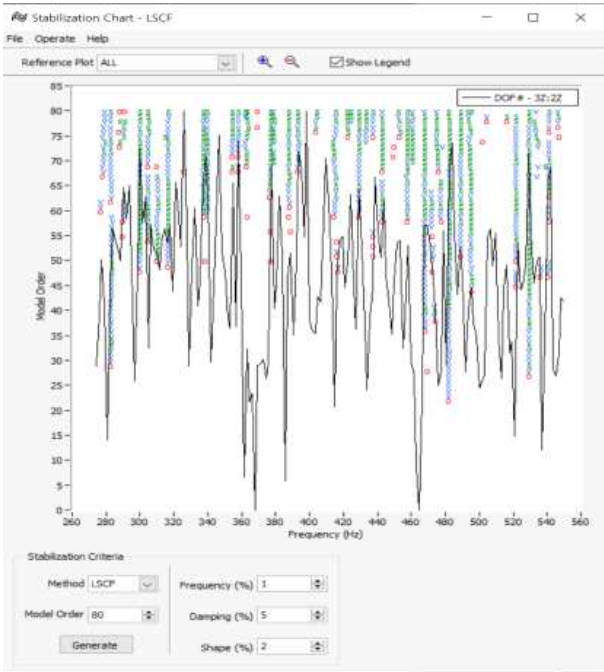
Table 6. Cable Stabilization Criteria

Symbol	Frequency	Damping Ratio	Mode Shape
s	yes	yes	yes
v	yes	no	yes
d	yes	yes	no
f	yes	no	no
o	no	no	no

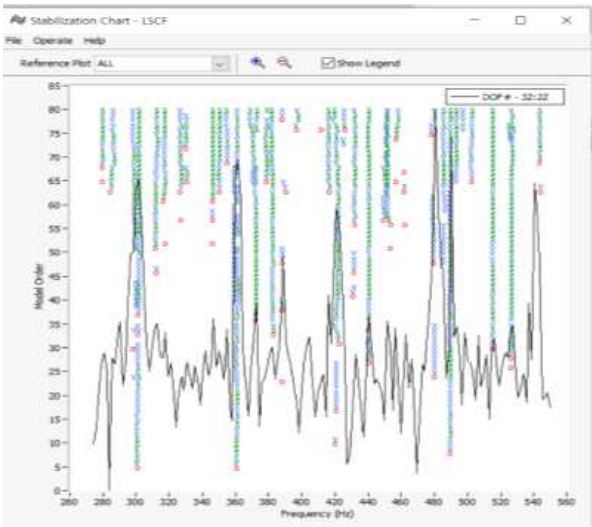
여기에서 Stabilization Criteria는 Frequency stability에 관해서 1%, Damping stability은 5%이며, Mode Shape stability는 2%를 사용하였다[11]. 또한, Stabilization Chart는 케이블의 고유진동수와 댄핑 및 모드형상에 따라 기호를 부여하여 일정 기준치를 충족하는 경우 yes로 표현하였고, 불충족하는 경우 no로 표시한다. Stabilization Chart에 따른 케이블의 고유진동수와 댄핑의 관계를 분석한 결과 고유진동수가 높을수록 댄핑은 낮아지는 양상을 나타내었다. A~E 교량에 대해서 Stabilization Chart 결과 케이블의 고유진동수와 댄핑 및 모드형상의 안정기준을 모두 만족하는 것은 고차모드에서 나타났다.



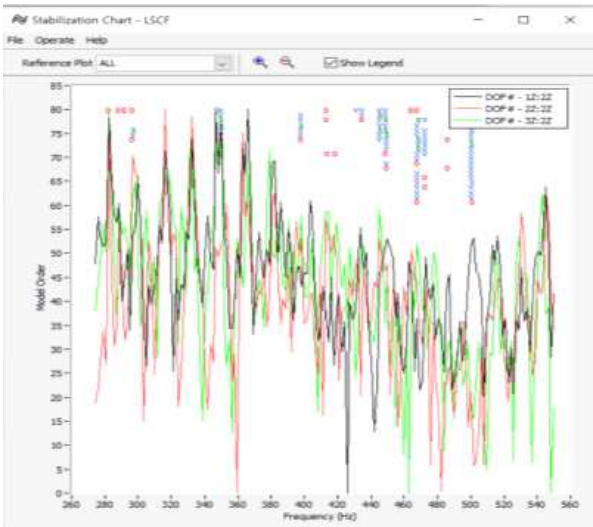
(a) A Bridge Stabilization Chart



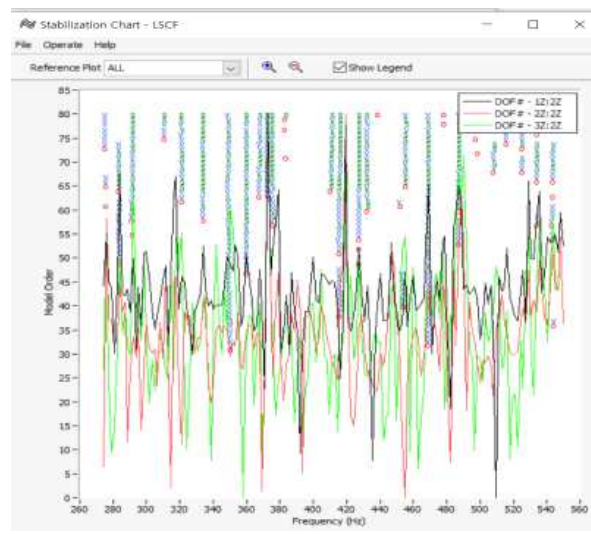
(b) B Bridge Stabilization Chart



(c) C Bridge Stabilization Chart



(d) D Bridge Stabilization Chart



(e) E Bridge Stabilization Chart

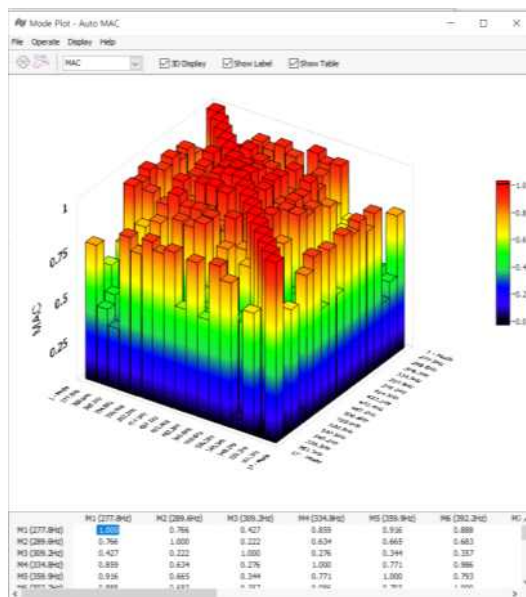
Fig. 8. A~E Bridge Stabilization Chart

2.2.5 케이블의 MAC 결과

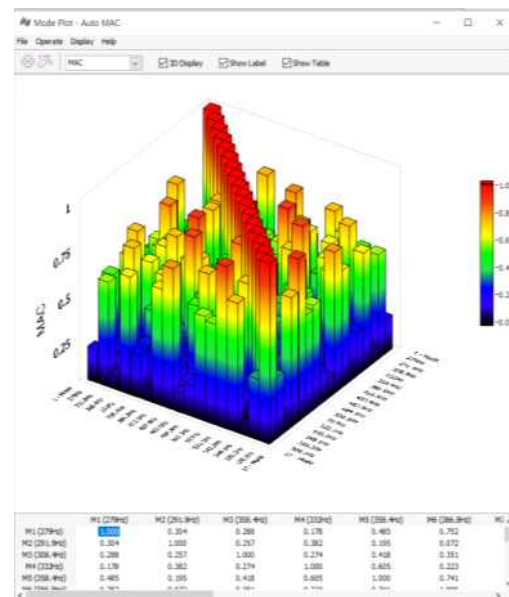
Modal Assurance Criteria(MAC)는 모드간의 직교성을 나타내며 MAC가 0에 가까우면 선형독립적인 관계를 가지며 1에 가까우면 선형비례적인 관계를 갖는다. MAC는 상호 비교되는 서로 다른 두 개의 세트에서 해석 모드간의 상관관계를 비교 분석하는 방법이다[12]. MAC는 다음식 Eq. (7)로 나타내었다.

$$MAC = \frac{|X_i X_j|}{|X_i| |X_j|} \quad (7)$$

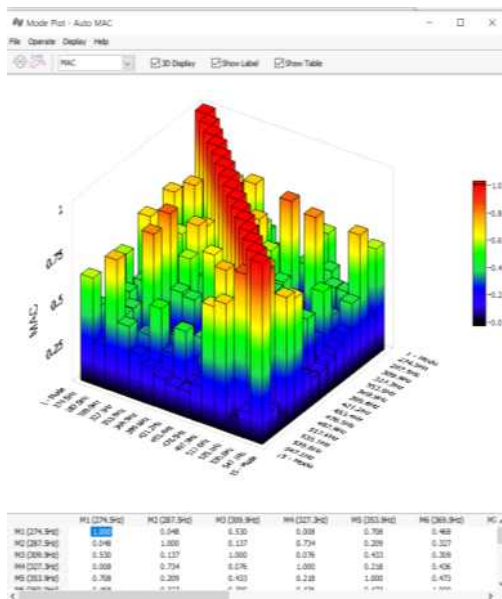
여기서, X_i 는 모드형상행렬 $[\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{mi}]$ 의 열벡터이다. Fig. 9에서 A~E 교량에 대한 교량 MAC 결과를 분석한 결과 모드형상에 대한 MAC는 1.0에 가까운 값을 나타내어 A~E 교량의 모드간의 직교성을 나타내고 있는 것으로 판단된다.



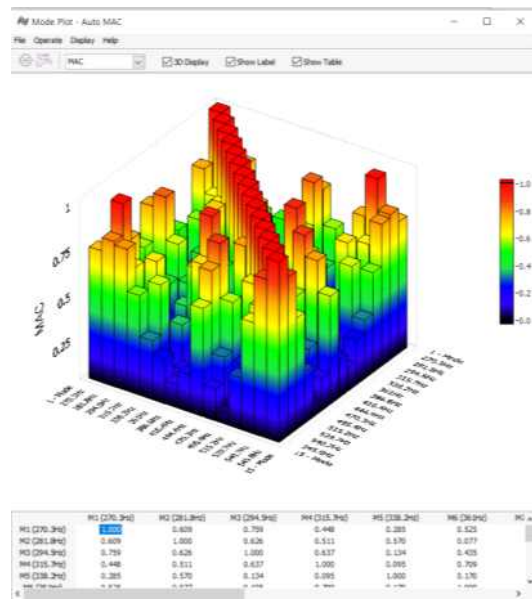
(a) A Bridge MAC



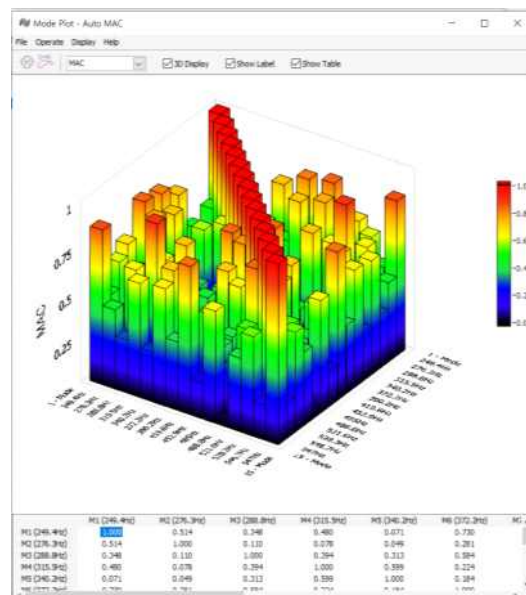
(b) B Bridge MAC



(c) C Bridge MAC



(d) D Bridge MAC



(e) E Bridge MAC

Fig. 9. A~E Bridge MAC

2.3 사장교 케이블장력 현장실증 실험결과

A~E 교량의 케이블 장력에 대한 현장실증 실험결과는 다음 Table 7 ~ Table 11과 같다.

Table 7. Cable Measurement Tension(A Bridge)

Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)
GTDL360	Cable 1	31.267	NI Module	Cable 1	30.655	9-Axes Motion Sensor	Cable 1	31.041
	Cable 2	54.297		Cable 2	55.102		Cable 2	54.787
	Cable 3	63.963		Cable 3	-		Cable 3	66.122
	Cable 4	75.198		Cable 4	-		Cable 4	71.306
	Cable 5	85.669		Cable 5	-		Cable 5	-

Table 8. Cable Measurement Tension(B Bridge)

Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)
GTDL360	Cable 1	17.506	NI Module	Cable 1	6.621	9-Axes Motion Sensor	Cable 1	17.257
	Cable 2	66.448		Cable 2	-		Cable 2	-
	Cable 3	106.771		Cable 3	-		Cable 3	-
	Cable 4	113.867		Cable 4	-		Cable 4	-
	Cable 5	207.625		Cable 5	-		Cable 5	-

Table 9. Cable Measurement Tension(C Bridge)

Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)
GTDL360	Cable 1	1946.065	NI Module	Cable 1	-	9-Axes Motion Sensor	Cable 1	-
	Cable 2	3976.063		Cable 2	-		Cable 2	3916.942
	Cable 3	5546.620		Cable 3	5757.901		Cable 3	5546.620
	Cable 4	6552.311		Cable 4	-		Cable 4	-
	Cable 5	6873.544		Cable 5	-		Cable 5	-

Table 10. Cable Measurement Tension(D Bridge)

Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)
GTDL360	Cable 1	4770.434	NI Module	Cable 1	-	9-Axes Motion Sensor	Cable 1	4792.118
	Cable 2	6765.702		Cable 2	6632.484		Cable 2	6705.536
	Cable 3	8158.837		Cable 3	-		Cable 3	-
	Cable 4	9544.691		Cable 4	-		Cable 4	-
	Cable 5	10834.285		Cable 5	-		Cable 5	-

Table 11. Cable Measurement Tension(E Bridge)

Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)	Division	Cable Number	Tesnion(kN)
GTDL360	Cable 1	8152.997	NI Module	Cable 1	-	9-Axes Motion Sensor	Cable 1	-
	Cable 2	8362.523		Cable 2	8337.568		Cable 2	8348.644
	Cable 3	8573.703		Cable 3	-		Cable 3	8581.497
	Cable 4	8811.415		Cable 4	-		Cable 4	-
	Cable 5	9054.293		Cable 5	-		Cable 5	-

Table 7 ~ Table 11에서 각각의 교량별, 계측방법별 케이블장력을 추정하였으며 각각의 계측방법별 케이블장력의 편차는 A교량인 경우 0.728~1.996%이며 B교량인 경우 1.443%이며, C교량인 경우 1.509~3.669%이며, D교량인 경우 0.452~2.009%이며, E교량인 경우 0.091~0.299%로서 최대편차는 3.669%로서 각각의 교량 및 계측방법에 대한 현장실증시험을 한 결과 상기 계측방법들에 대해서 현장에 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

2.4 사장교 케이블 수치해석결과

사장교의 케이블 장력에 대한 수치해석결과는 다음과 같이 고유진동수 및 장력에 대해서 나타내었다. 사장교 케이블에 대한 고유진동수 결과는 다음의 Fig. 10 및 Table 12와 같이 나타났다.

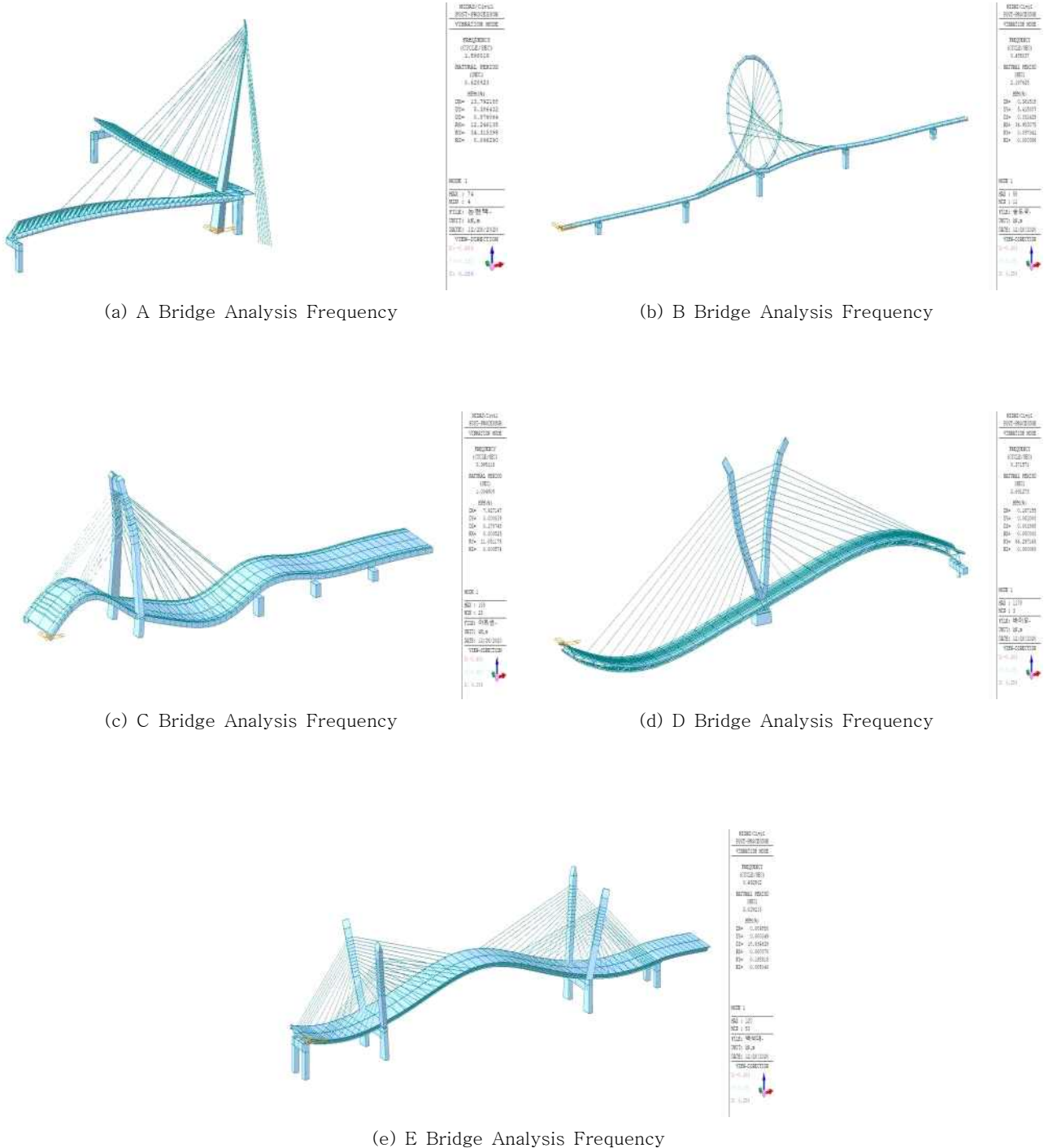


Fig. 10. A~E Bridge Analysis Frequency

Table 12. Cable Analysis Frequency

Division	Frequency(Hz)	Mode Shape
A Bridge	1.590	Torsion
B Bridge	0.455	Torsion
C Bridge	0.995	Vertical
D Bridge	0.371	Vertical
E Bridge	0.492	Vertical

Table 12에서 교량의 기하형상에 따라 모드형상이 비틀림모드 및 연직모드가 지배적인 모드로 나타났으며 지배모드에서의 고유진동수는 0.371Hz~1.590Hz로 나타나 공용종인 사장교의 고유진동수 범위와 유사한 것으로 나타났다.

A~E 교량에 대한 케이블장력에 대한 수치해석결과 케이블의 장력은 Fig. 11 및 Table 13과 같이 나타났다.

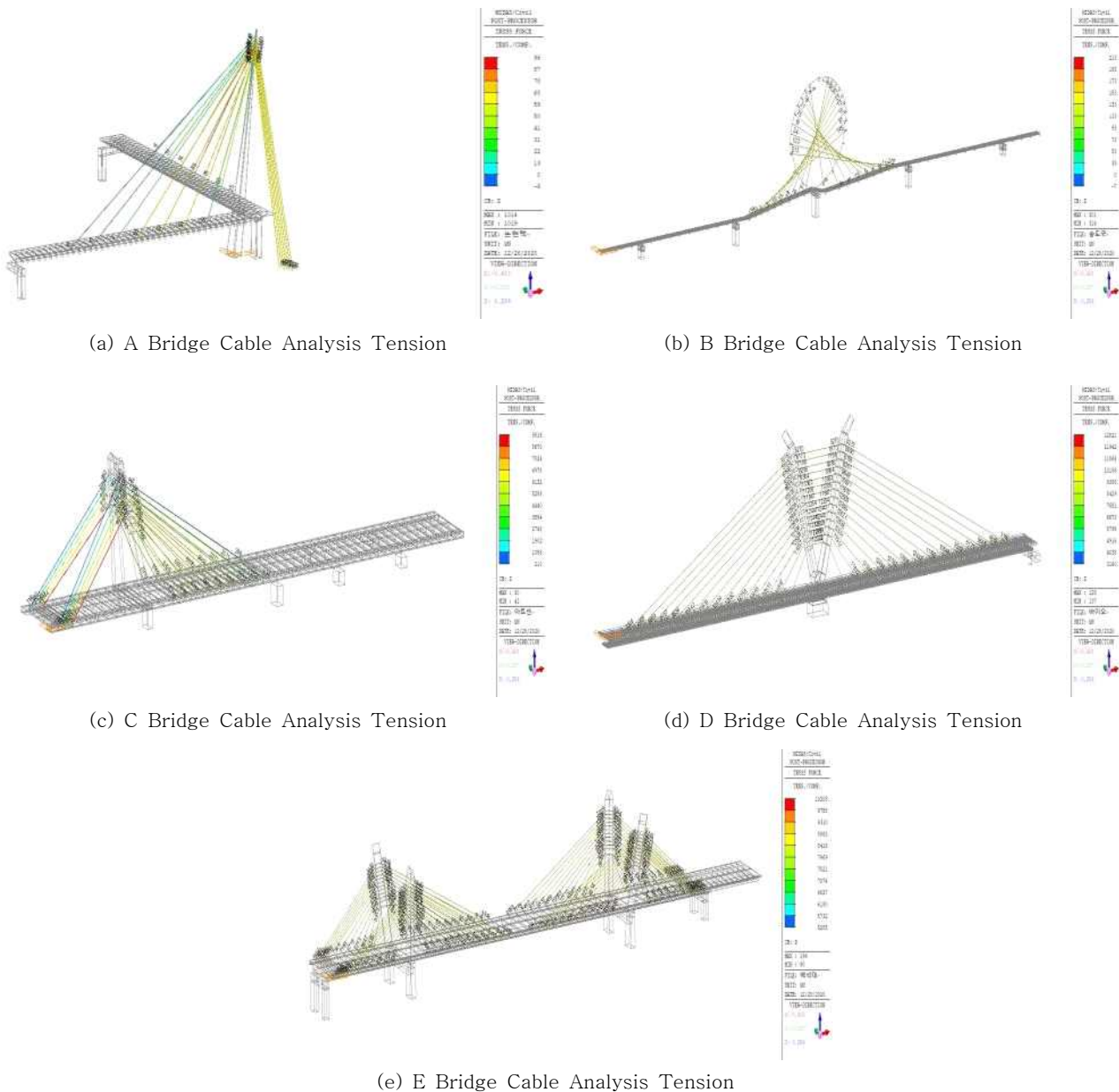


Fig. 11. A~E Bridge Cable Analysis Tension

Table 13. Cable Analysis Tension

Division	Cable Number	Tension(kN)
A Bridge	Cable 1	25
	Cable 2	53
	Cable 3	75
	Cable 4	85
	Cable 5	74
B Bridge	Cable 1	207
	Cable 2	116
	Cable 3	16
	Cable 4	9
	Cable 5	14
C Bridge	Cable 1	1933
	Cable 2	3917
	Cable 3	5546
	Cable 4	6566
	Cable 5	6857
D Bridge	Cable 1	4982
	Cable 2	6668
	Cable 3	8171
	Cable 4	9559
	Cable 5	10848
E Bridge	Cable 1	9055
	Cable 2	8818
	Cable 3	8586
	Cable 4	8361
	Cable 5	8144

Table 13에서 A, B교량은 보도사장교로서 장력의 크기가 일반사장교 대비 작게 나타났으며 C~E교량은 일반사장교로서 케이블장력의 크기가 공용중인 사장교의 케이블장력과 유사하게 나타나서 수치해석결과는 적절한 것으로 판단된다.

2.5 사장교 케이블장력 현장실증 분석결과

A~E 교량의 케이블 장력에 대한 현장실측계측값과 수치해석에 의한 케이블 장력값과의 비교분석은 다음 Table 14와 같이 나타났다.

Table 14. Cable Tension Analysis Result

Division	Cable Number	Field Tesnion (kN)	Analysis Tesnion (kN)	Differece
A Bridge	Cable 1	31	25	6
	Cable 2	54	53	1
	Cable 3	75	75	0
	Cable 4	85	85	0
	Cable 5	64	74	-10
B Bridge	Cable 1	207	207	0
	Cable 2	113	116	-3
	Cable 3	17	16	1
	Cable 4	6	9	-3
	Cable 5	13	14	-1
C Bridge	Cable 1	1946	1933	13
	Cable 2	3976	3917	59
	Cable 3	5546	5546	0
	Cable 4	6552	6566	-14
	Cable 5	6873	6857	16
D Bridge	Cable 1	4916	4982	-66
	Cable 2	6765	6668	97
	Cable 3	8158	8171	-13
	Cable 4	9544	9559	-15
	Cable 5	10834	10848	-14
E Bridge	Cable 1	9054	9055	-1
	Cable 2	8811	8818	-7
	Cable 3	8573	8586	-13
	Cable 4	8362	8361	1
	Cable 5	8152	8144	8

Table 14에서 현장실측계측장력과 수치해석에 의한 장력값과의 차이를 분석한 결과 최대 97kN의 차이로
서 현장실측계측장력 대비 1% 차이가 발생하는 것으로 나타나 현장실측계측장력은 수치해석에 의한 장력값
과 유사한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 케이블의 장력추정방법 중 진동법을 사용하여 5개소의 현장교량 실험에서 GTDL360, NI Module
및 9 Axes Motion Sensor를 사용하여 장력을 추정하고 수치해석을 통해서 계측장력과 분석하여 케이블의 장력
측정장치의 적정성을 분석하였으며 연구수행 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 현장실증교량의 케이블에 대해서 모드특성을 분석한 결과 주파수응답함수, 안정차트 및 MAC값은 모두 공
용중인 사장교의 값과 유사한 값으로 측정되어 실험결과는 타당한 것으로 판단된다.

2) 현장실증교량에 대한 다양한 케이블 장력계측방법(GTDL360, NI Module, 9 Axes Motion Sensor)의 장력측
정값의 최대편차가 3.669%로서 유사하게 측정되어 장력계측방법의 현장적용성에 대한 문제는 없는 것으로 판단
된다.

3) 현장실증교량의 케이블 실측장력과 수치해석에 의한 해석장력과의 값을 비교분석한 결과 값이 1%로서 실
측장력값은 적정한 것으로 판단된다.

3.17 실적에 대한 보완사항

- 기 수행한 연구내용 및 방법을 구체적으로 기술 필요

① 논문 : 케이블의 진동특성을 평가하기 위하여 케이블의 시험체를 제작하여 충격햄머를 이용하여 케이블에 가진을 가하고 케이블의 제원별, 설치각도별로 케이블의 주파수응답함수, 케이블안정화차트, 케이블의 복합성결과 케이블의 MAC에 관하여 평가 및 분석을 실시하였다. 또한 케이블에 유압펌프를 이용하여 장력을 도입하고 기존의 가속도계와 개발한 가속도계를 이용하여 케이블에 도입된 장력결과를 비교 분석하였다.

② 특허 : 케이블의 변형률계를 설치하여 케이블의 변형률의 FFT 분석결과를 이용하여 케이블의 장력을 산정한 결과와 가속도계를 이용한 케이블의 장력값의 비교 분석을 실시하였다. 또한 케이블의 측정가속도를 이용한 케이블의 변위를 모니터링 하는 방법에 대하여 분석하였다.

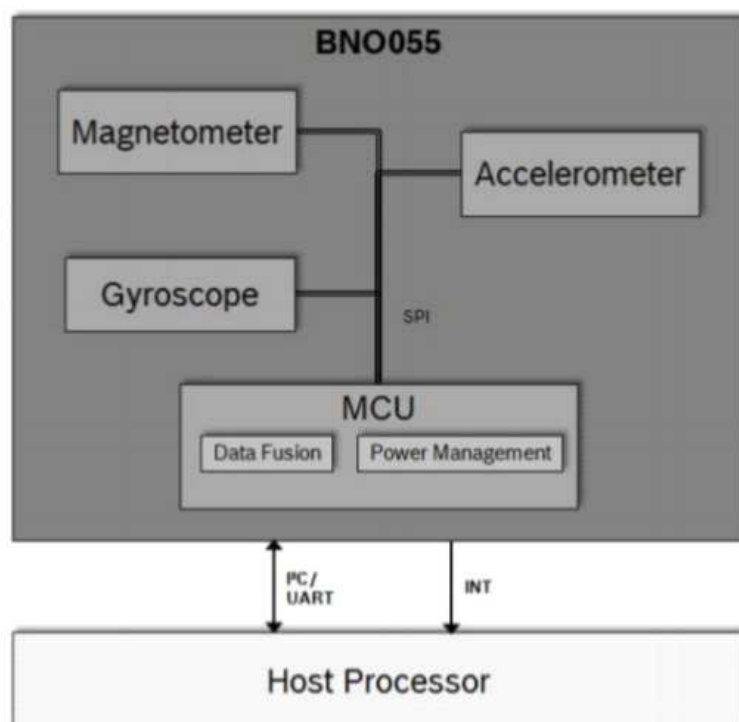
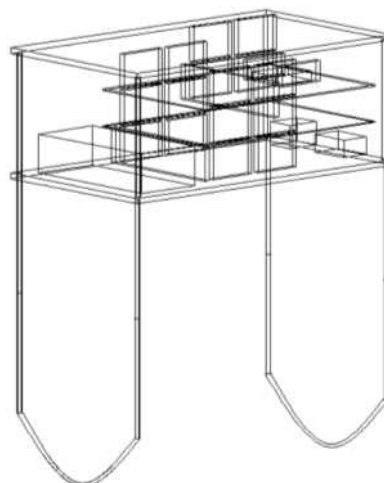
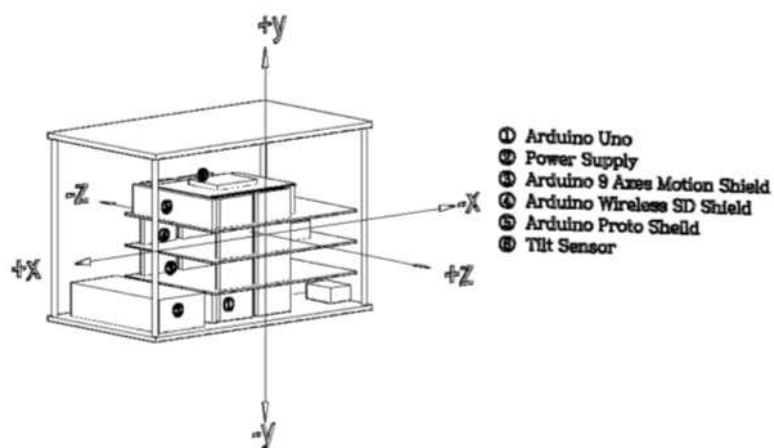
③ 프로그램 : 변형률계를 이용한 케이블의 장력측정 프로그램은 변형률을 고유진동수로 변환하여 장력을 추정하는 프로그램이다. 또한 가속도계를 이용한 케이블의 변형측정 프로그램은 가속도계의 데이터를 이중적분을 적용하여 케이블의 변형을 측정하는 프로그램이다.

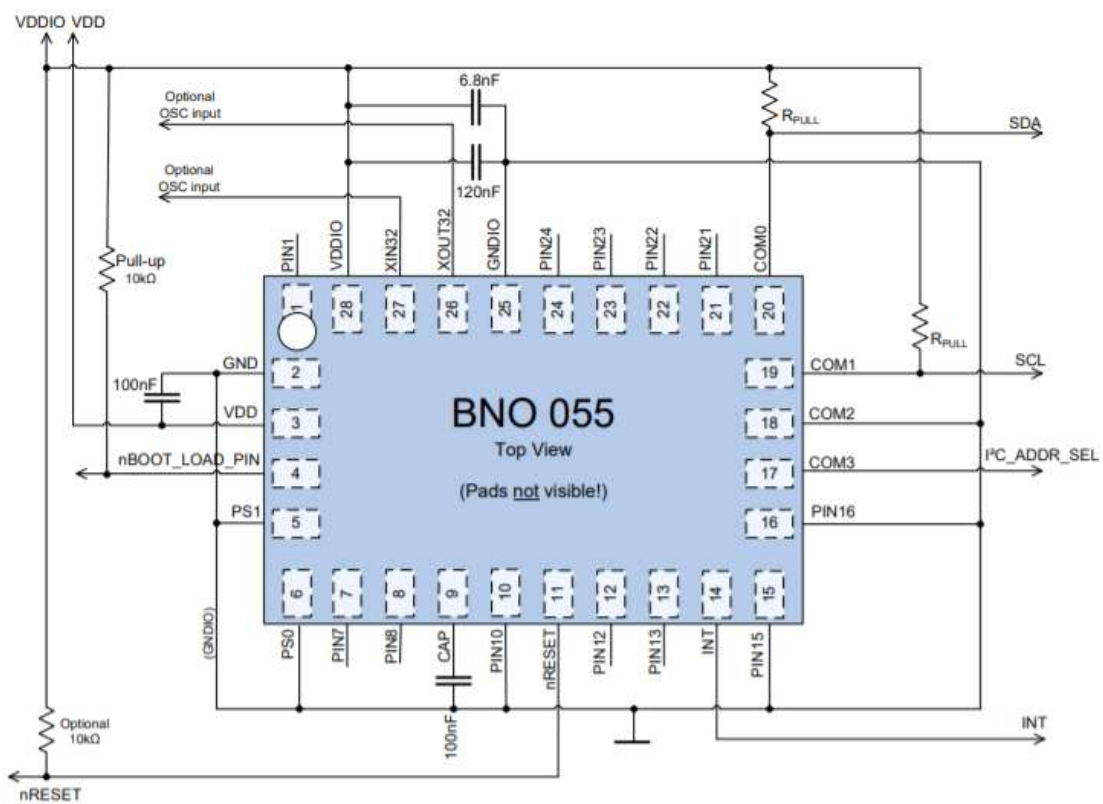
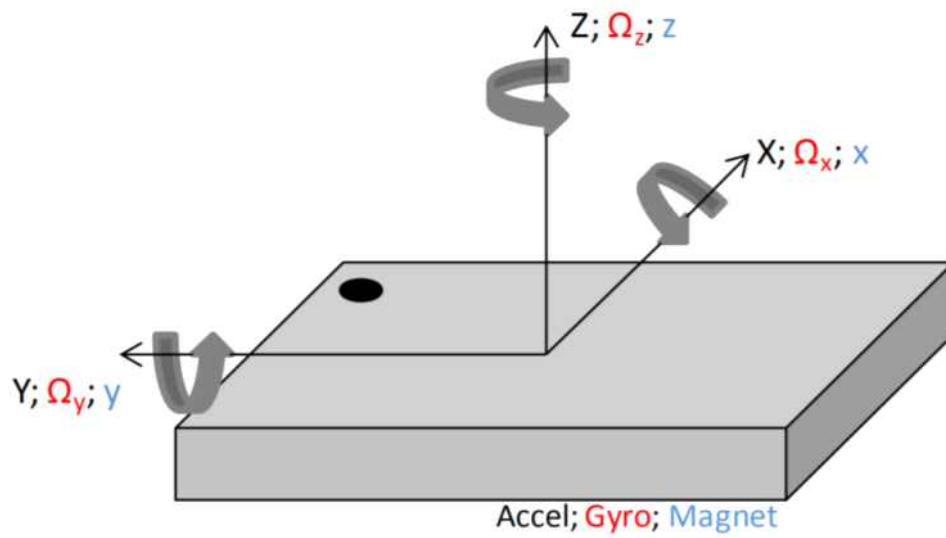
- 2차년도 목표인 변형특성 계측에 대한 시스템 개발 부분을 구체적으로 보완 필요

2차년도 변형특성 계측에 대한 시스템을 개발하기 위하여 개발한 소프트웨어와 하드웨어에 대해서 실험검증을 통해서 시스템 개발의 적용성을 보완하였다.

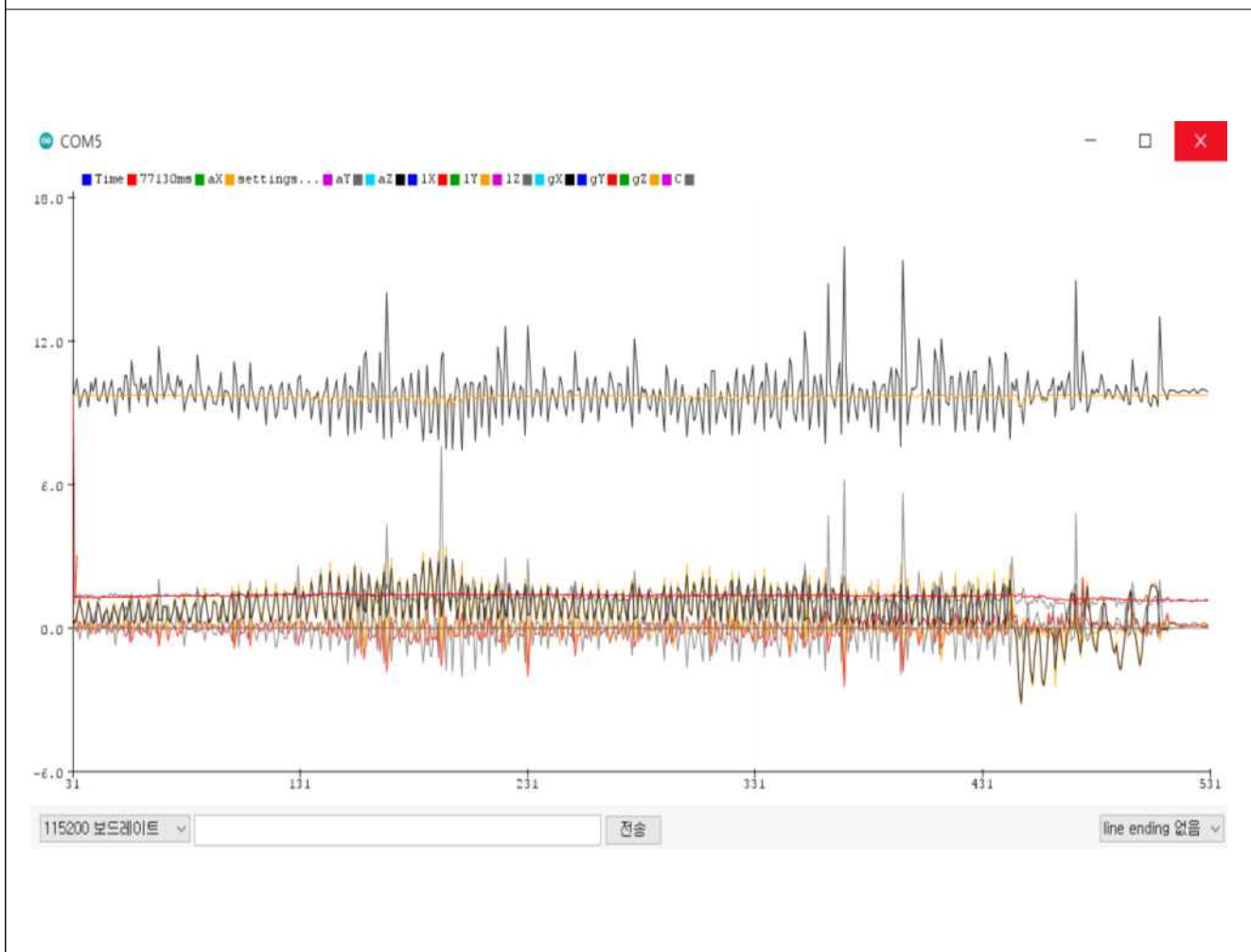
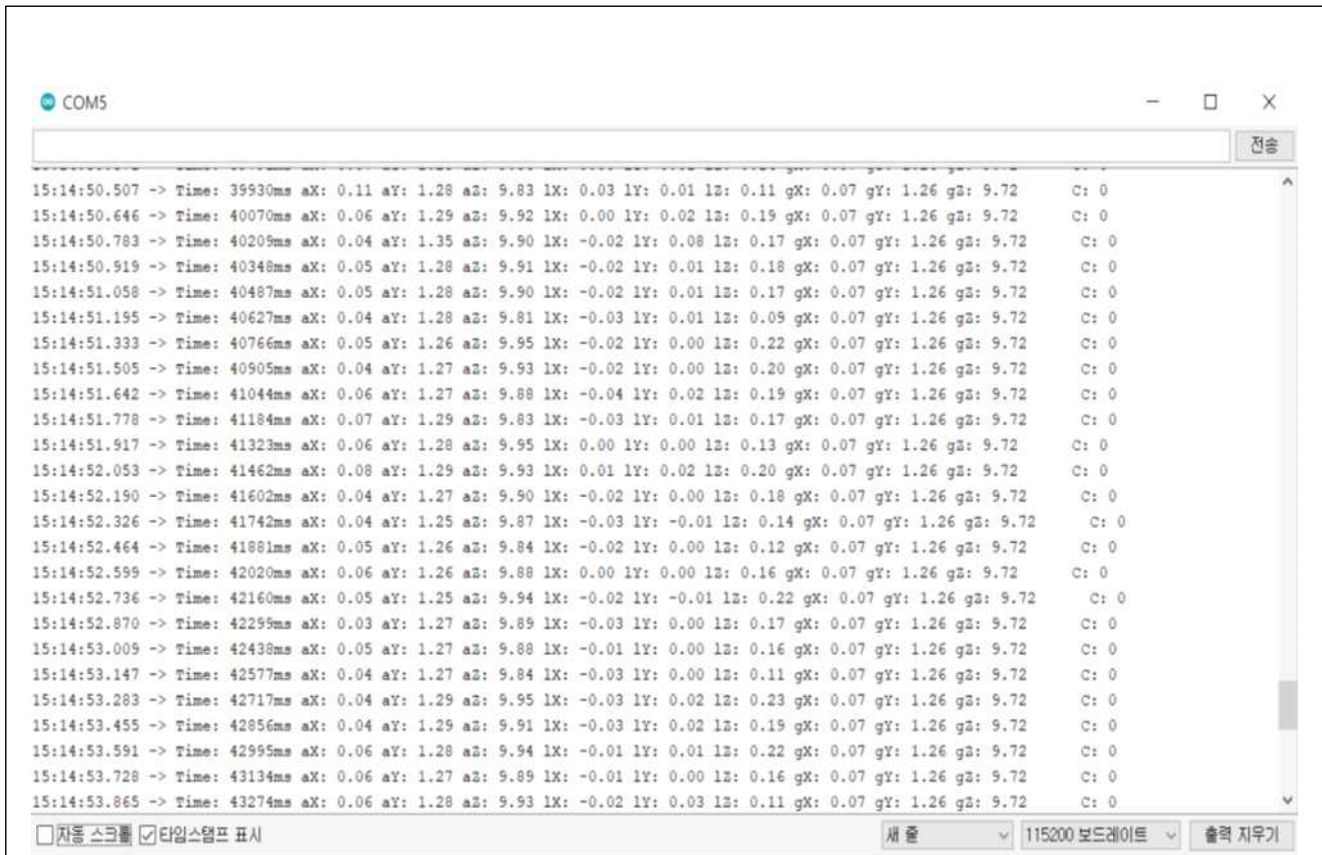
- 기 출원된 “변형률계의 동적특성을 이용한 장력추정방법” 특허에 대하여 허용장력과 본 연구의 분석장력 결과를 비교하여 제시 필요

특허에서 산정한 변형률계를 이용한 케이블의 장력은 2.35kN으로 측정되었고 본 연구의 분석장력에 의한 결과 가속도계에 의한 케이블의 장력이 2.29kN으로서 차이가 2.72% 정도로 발생되어 변형률계에 의한 케이블의 장력과 가속도계에 의한 케이블의 장력은 유사한 결과를 나타내는 것으로 나타났다.





■ 시제품의 데이터 수집방법



XCTU Working Modes Tools Help

Radio Modules

Name: ROUTER
Function: Digi XBee3 Zigbee 3.0 TH
Port: COM6 - 9600/8/N/1 - AT
MAC: 0013A20041A050E5

Name: COORD
Function: Digi XBee3 Zigbee 3.0 TH
Port: COM7 - 9600/8/N/1 - AT
MAC: 0013A20041A05AE2

1 remote modules:

Name: ROUTER
Function: Could not initialize device
MAC: 0013A20041A050E5

ROUTER - 0013A20041A050E5 COORD - 0013A20041A05AE2

Close Record Detach

Console log

Send packets

Send a single packet

Send sequence

Transmit interval (ms): 500

Repeat times: 1

Loop infinitely

Start sequence

Tx Bytes: 0
Rx Bytes: 0

Windows 정품 인증
[불법]으로 이용하여 Windows를 정품 인증합니다.

Serial Console

This tool allows you to communicate with your XBee devices without having to add them to the list of radio modules.

COM5 - 19200/8/N/1/N

Console log

Time: 59180ms aX: 0.04 aY: 1.21 aZ: 9.91 lX: -0.01 lY: -0.01 lZ: 0.18 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 59320ms aX: 0.03 aY: 1.22 aZ: 9.81 lX: -0.02 lY: 0.00 lZ: 0.09 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 59459ms aX: 0.03 aY: 1.18 aZ: 9.81 lX: -0.02 lY: -0.04 lZ: 0.09 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 59598ms aX: 0.07 aY: 1.20 aZ: 9.78 lX: 0.01 lY: -0.02 lZ: 0.05 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 59730ms aX: 0.03 aY: 1.21 aZ: 9.85 lX: -0.02 lY: -0.01 lZ: 0.12 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 59877ms aX: 0.03 aY: 1.22 aZ: 9.91 lX: -0.02 lY: 0.00 lZ: 0.18 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60016ms aX: 0.03 aY: 1.23 aZ: 9.88 lX: -0.02 lY: 0.00 lZ: 0.15 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60155ms aX: 0.05 aY: 1.22 aZ: 9.82 lX: 0.00 lY: 0.00 lZ: 0.10 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60295ms aX: 0.05 aY: 1.23 aZ: 9.78 lX: 0.00 lY: 0.00 lZ: 0.05 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60434ms aX: 0.06 aY: 1.18 aZ: 9.90 lX: 0.00 lY: -0.04 lZ: 0.17 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60573ms aX: 0.04 aY: 1.21 aZ: 9.87 lX: -0.01 lY: -0.01 lZ: 0.14 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60712ms aX: 0.05 aY: 1.20 aZ: 9.84 lX: 0.01 lY: -0.05 lZ: 0.11 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60852ms aX: 0.05 aY: 1.19 aZ: 9.79 lX: 0.02 lY: -0.02 lZ: 0.10 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 60991ms aX: 0.05 aY: 1.21 aZ: 9.89 lX: 0.01 lY: -0.03 lZ: 0.08 gX: 0.05 gY: 1.23 gZ: 9.72 C: 1

Time: 61130ms aX: 0.07 aY: 1.22 aZ: 9.90 lX: 0.01 lY: 0.00 lZ: 0 C: 1

Send packets

Send a single packet

Send sequence

Transmit interval (ms): 500

Repeat times: 1

Loop infinitely

Start sequence

Tx Bytes: 0
Rx Bytes: 43404

Windows 정품 인증
[불법]으로 이용하여 Windows를 정품 인증합니다.

Close



PXI 시제품 완성도

PXI Express Embedded Controllers

PXIe-8880, PXIe-8861, PXIe-8840, and PXIe-8821



PXIE 8840 운영시스템

PXI Sound and Vibration Module

PXI-4461, PXI-4472B, PXIe-4463, PXIe-4464, PXIe-4480, PXIe-4492, PXIe-4497, PXIe-4499



PXIE 4464 진동측정모듈

PXI Displacement Input Module

PXIe-4340



PXIE 4340 변위측정모듈

PXI Temperature Input Module

PXIe-4353, PXIe-4357



PXIE 4353 온도측정모듈



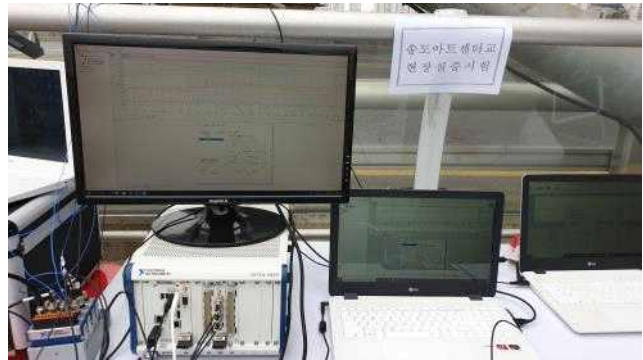
논현택지2육교 현장실증시험 - PXI 적용



논현택지2육교 현장실증시험 - PXI 적용



송도국제교 현장실증시험 - PXI 적용



송도아트센터교 현장실증시험 - PXI 적용



바이오산업교 현장실증시험 - PXI 적용



백석대교 현장실증시험 - PXI 적용

3.18 사장교 케이블 유지관리방안

1. 사장교 케이블장력 유지관리방안

기존 관리한계치 설정 방법은 일일관리한계치와 연간관리한계치로 나누어 설정한다. 이를 위해서 연간 최대 변화량에 따른 계측 결과값을 이용한다. 케이블 장력의 경우 일일 계측값에는 이동하중에 의한 장력과 온도변화에 의한 변화가 포함되어 있다. 따라서 장력의 일일간 변화는 변동을 보이게 된다. 또한 장기적으로 1년간의 계측결과를 보면 장력은 계절에 따라 편차를 보이며 변동한다는 것을 알 수 있다. 따라서 기존의 방법에서는 1년 이상의 계측값을 바탕으로 하여 기준값에 얼마 정도의 할증을 주어 관리한계치를 설정함으로써 변동범위를 충분히 포함하도록 하고 있다.

통상적으로 관리한계치는 ‘주의치’와 ‘경과치’로 구분하여 단계적으로 위험을 통보하는 방식을 취하고 있다. ‘주의레벨’은 약간 이상이 발생되어 관리자가 원인분석 등의 조치를 해야 하는 수준을 말하며, ‘경고레벨’은 큰 이상이 발생되어 관리자가 차량운행 제한 등의 조치를 해야 하는 주의 레벨보다 더 위험한 수준이다. 이러한 관리한계치 설정방법은 1년간의 계측결과를 이용하여 설정하는 것으로 교량에 있어서 가장 많이 적용하고 있는 방법이다. 그러나 이 방법의 단점은 관리한계치 설정 시 계측결과를 관리자가 임의로 결정함으로써 주관적인 경험요소를 포함하게 된다. 또한 여러 항목을 계측하는 경우에도 계측항목의 특수성은 배제한 채 모든 계측항목에 대해 값을 적용한다.

사장교 케이블에 대한 설계 시 허용장력은 대체로 파단장력의 45%~50% 수준이 되도록 설계한다. 따라서 계측되는 장력의 평균장력은 허용장력보다 작게 되며 파단장력보다는 훨씬 적은 값을 보이게 된다. 따라서 장력 관리한계치를 설정할 때 허용장력의 주의수준이면 주의, 경고수준이면 위험하다고 설정하는 것은 각 케이블에 발생하는 장력의 분포 특성을 배제한 방법이다.

따라서 새로운 관리한계치 설정방법은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

(1) 사장교 각 케이블의 장력 분포 특성 반영하여 사장교 케이블 장력의 분포범위는 케이블의 위치마다 다르기 때문에 관리한계치는 각 케이블의 장력 변동 특성을 고려할 수 있어야 한다. 즉 주탑과 가까운 내측 케이블의 경우에는 장력의 변동폭이 외측 케이블 보다 더 작다. 따라서 이러한 특성을 반영할 수 있어야 한다.

(2) 공용연수에 따른 장력 변화 반영하여 케이블 장력은 교량의 공용수명에 따라 증감하게 되므로 관리한계치는 공용연수의 증가에 따라 계속적으로 수정해야만 하며 관리한계치 수정시에는 관리한계치가 의미하는 바가 정확하게 정의되어야 한다.

(3) 확률적 방법 적용하여 케이블의 장력은 교량 상에 작용하는 이동하중과 풍하중 등에 의해 계속적으로 변하게 되며, 교량의 공용연수 증가에 따른 교량의 노후화로 인해 장력값은 어떤 분포를 갖는 확률변수이므로 관리한계치 설정을 위해서는 확정적 방법이 아닌 확률적 방법을 도입하여야 한다.

(4) 케이블 안전성과 연계된 관리한계치 결정은 관리한계치는 교량의 안전성 검토를 위해 설정하는 것이므로 관리한계치는 교량의 안전성과 분명한 연관성이 있어야 한다. 위에서 언급한 바와 같이 케이블 장력은 확률적 변량이므로 케이블의 안전성 문제를 접근하기 위해서는 신뢰성 이론을 이용한 접근 방법이 필요하다. 따라서 실제적인 장력의 추이를 관찰하고 의미 있는 관리한계치를 설정하기 위해서는 장력의 확률분포를 고려한 신뢰성 이론에 바탕을 둔 적절한 수준에 해당하는 장력을 관리한계치로 설정하는 방법을 적용해야 한다. 본 연구에서는 이러한 개념에 근거하여 교량에 기 설치된 모니터링 시스템으로부터 케이블 장력에 대한 시간이력 데이터가 얻어지는 경우 위에서 열거한 조건을 모두 만족하도록 하여야 한다. 제안 방법은 다음과 같이 크게 두 과정으로 나눌 수 있다.

(1) 케이블 장력에 대한 이론적 확률분포모형 결정에서 케이블 장력은 확률적 변량이므로 이를 취급하기

위해 먼저 장력에 대한 확률분포 모형을 결정한다.

(2) 신뢰성 해석을 통한 관리한계 장력 선정은 장력에 대한 확률분포모형이 결정되면 관리한계 장력은 신뢰성 해석을 통해 적절한 관리수준에서 결정된다.

2. 사장교 케이블온도 유지관리방안

(1) 계측자료를 분석한 결과, 구조물은 온도가 내려갈수록 처짐은 위로 올라가고 여름에는 이와 반대되는 경향으로 나타난다. 또한 케이블장력 역시 일정한 곡선으로 온도가 내려갈수록 장력이 증가하면서 온도변화와 반대되는 양상으로 변화 것으로 나타났다. 추가적으로 계측 데이터의 상태가 양호한 특정월의 처짐-기온, 처짐-케이블온도와 관계 분석한 결과로도 구조물의 응답의 변화에 온도가 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

(2) 수치해석을 통해 시스템 전체의 온도변화로 인하여 구조물의 고유치가 변화하고 있음을 알 수 있었다. 온도가 올라갈수록 구조물의 고유진동수를 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 사장교의 주요부재인 주케이블에 여러 경우의 국부적인 온도의 변화를 주어서 좀더 명확한 결과를 도출해 낼 수 있었다. 온도의 변화만으로도 케이블의 장력이 변화하고 있고 그 변화폭 역시 온도변화량에 의해 지배되고 있음을 알 수 있었다.

(4) 사장교 케이블의 온도변화를 통해서 케이블장력의 변화 등을 확인할 수 있으므로 사장교 케이블온도에 대한 유지관리가 적절히 이루어져야 한다.

3. 사장교 케이블변위 유지관리방안

사장교 케이블에 대한 장기형상 관리기법에 관한 연구는 GNSS(Global Navigation Satellite Systems)와 기존 계측센서 등을 연계·활용하여 장기 계측데이터 수집, 케이블교량의 형상 및 정·동적 거동을 모니터링하는 기술에 중점을 두었다. GNSS 기반 변위측정 기술은 인공위성에서 발신하는 신호를 수신하여 좌표로 환산하는 방식으로 교량의 측정점에 대한 절대변위를 추정할 수 있다. 이는 기존 계측시스템에 적용되는 레이저 변위계나 경사계가 제한된 고정 측정점에서 상대변위를 측정한다는 한계를 극복할 수 있기 때문에 최근 들어 적용이 활발히 진행되고 있다. 또한 레이저변위계와 달리 안개나 비와 같은 기상상황에 대한 영향이 적으며, 지진이나 강풍과 같은 이벤트 발생시 교량의 전체 거동변화를 용이하게 확인할 수 있는 장점이 있어 향후 장경간 케이블교량에 적용되는 계측센서를 상당부분 대체할 수 있을 것으로 예상된다. GNSS 기반 변위측정 기술의 정립은 상당부분 이뤄져 있으며, 이를 교량의 실시간 정밀교량 변위 모니터링을 위한 RTK-DGPS(Real Time Kinematic-Differential Global PositioningSystem) 기술이 적용단계에 있다. 따라서 변위 모니터링 기술개발보다는 GNSS의 응용 가능성에 중점을 두고 연구가 진행되었다. 또한 GNSS 기술이 국내케이블교량에는 영종대교(2008년), 서해대교(2009년)에 처음 적용되어 데이터의 신뢰성을 검증할 필요가 중요했기 때문에 이 부분에 대한 연구가 진행되었다. GNSS 뿐 만 아니라 모든 계측데이터는 장기적인 관점에서 교량의 건전성을 평가하고 유지관리에 활용하기 위한 것이며, 이를 위해 많은 케이블교량이 공용 중 계측시스템을 운영하고 있다. 서해대교와 영종대교와 같은 이들 교량의 계측데이터를 분석한 결과를 보면 케이블교량만이 가진 독특한 특성 때문에 계측데이터에 다양한 응답성분이 혼재되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 장기 계측데이터에 혼재된 다양한 응답성분을 추출할 수 있는 프로그램 개발 연구도 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 기존의 GNSS를 대체할 수 있는 케이블의 3차원 회전거동을 파악할 수 있는 계측시스템을 개발하여 그 결과를 수치해석 등을 통해 검증을 실시한다.

3.19 연구결과

1. 기술적 성과

○ 기술적 측면

사장교 케이블의 전체적인 거동파악이 상시에 이루어져 케이블의 장력관리의 효율화와 케이블의 유지관리방안의 효율화를 이루어 낼 수가 있다.

2. 경제적 성과

○ 경제적·산업적 측면

주관기관에서는 연구원등에 대해서 사장교 케이블에 관한 유지관리 기법에 대한 자료수집, 자료분석, 세미나 발표등을 수행하고 있다.

○ 사회적 측면

현재 주관기관에서는 기업부설연구소를 운영중에 있으며 향후 사장교 케이블에 관한 연구활성화를 통해서 고용유지 및 추가 고용계획을 갖고 있다.

추가고용계획으로는 사장교 케이블에 대한 원활한 연구수행을 위해서 2인 이상의 연구원을 채용할 계획을 수립하였다.

○ 사장교 케이블 유지관리 시스템의 제품화는 상용중인 스마트 센서들을 프로그래밍하여 하드웨어 및 소프트웨어 패키지로 제품화 한다.

○ 스마트 센서 제조사와 판매공급계약을 체결하여 제품화 이후 양산에 대한 pilot생산을 실시하고 양산유효성에 대한 시험은 국내 공인인증기관을 통해 완성품의 품질확인을 실시한다.

○ 양산제품의 마케팅방법으로는 사장교 케이블을 유지관리하는 주체에 대해서 시연회, 설명회 등을 개최하여 마케팅을 실시하고 시연회 및 설명회 결과값 등을 기초로 한 논문을 국내 및 해외 학회 등에 게재하여 판로를 개척한다.

○ 개발제품에 대한 해외 마케팅 전략으로는 해외의 시장을 확보한 국내기업과 협약을 통해서 해외시장 진출 교두보를 확보하고 해외진출방법으로는 라이선싱 등의 계약방식의 적극적으로 활용한다.

○ 판매법인을 해외에 설립하여 해외시장에 대한 매출확대를 추진한다.

○ 해외판매의 효율화를 위해서 전문 무역업체나 해외바이어를 적극적으로 활용한다.

○ 사장교 전용 케이블 계측시스템의 기존제품과의 차별성 및 시장성을 확보하기 위하여 기존제품에 대한 규격 및 경제성, 시장성에 대한 비교·분석결과를 보고서에 수록하여 개발제품의 차별성 및 시장성을 확보하도록 한다.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

4.1 목표 달성도

○ 전체 연도 정량적 연구성과 목표 및 평가의 착안점

(단위 : 편, 건, 명, 천원)

구분		1차년도	2차년도	3차년도	계
국외논문 게재	SCI				
	비SCI				
	계				
국내논문 게재	SCI				
	비SCI	1	1	1	3
	계	1	1	1	3
특허출원	국내	1	1	1	3
	국외				
	계	1	1	1	3
특허등록	국내			1	1
	국외				
	계			1	1
인력양성	전문학사		1		1
	박사				
	계		1		1
기술이전	계약건수				
	계약액				
	징수액				
국제 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문				
	연구시설·장비				
	기술요약정보				
	생명 자원	생명정보			
		생물자원			
		신품종			
	소프트웨어		1	1	1
화학물					
기타	시제품			2	2
	성과 홍보				
	일자리 창출			3	3
	현장검증 및 시험			5	5

구분	년도	성과목표	세계최고수준 (보유국/ 보유기관)	연구전 국내수준	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치 (건, 편)
최종목표	2020	케이블의 장력특성, 변형특성, 온도특성을 계측하고 유지관리시기 및 방법을 제안하는 장치개발	유럽/-	실 험 실 단 계의 유지 관 리 기 술 수준	논문 1편	40	게재증명서	3
			유럽/-		특허 1건	30	출원증명서	3
			유럽/-		프로그램 1건	30	등록증	3
1차년도	2018	케이블의 장력특성을 계측하고 유지관리시기 및 방법을 제안하는 장치개발	유럽/-	실 험 실 단 계의 유지 관 리 기 술 수준	논문	40	게재증명서	1
			유럽/-		특허	30	출원증명서	1
			유럽/-		프로그램	30	등록증	1
2차년도	2019	케이블의 변형특성을 계측하고 유지관리시기 및 방법을 제안하는 장치개발	유럽/-	실 험 실 단 계의 유지 관 리 기 술 수준	논문	40	게재증명서	1
			유럽/-		특허	30	출원증명서	1
			유럽/-		프로그램	30	등록증	1
3차년도	2020	케이블의 온도특성을 계측하고 유지관리시기 및 방법을 제안하는 장치개발	유럽/-	실 험 실 단 계의 유지 관 리 기 술 수준	논문	40	게재증명서	1
			유럽/-		특허	30	출원증명서	1
			유럽/-		프로그램	30	등록증	1

4.2 관련 분야 기여도

기존의 사장교 케이블 변형관리는 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 변형특성을 파악하여 사장교 케이블의 전체적인 변형관리는 상시적으로 곤란한 실정이었다. 따라서, 이와같은 문제점을 해결하고자 다종 센서를 통합적으로 활용하여 케이블의 전체적인 변형관리가 가능케 하여 공용중인 사장교 케이블의 변형관리를 효율적으로 할 수 있다.

현재 공용중인 사장교의 케이블변형관리는 대표적인 케이블에 국한되어 관리되고 있는 실정으로서 당해 연도 연구개발성과를 활용하면 사장교 케이블의 전체적인 변형관리가 가능하게 되어 사장교 케이블 변형관리에 대한 효율성을 극대화 할 수 있다. 또한, 연구개발성과는 현재 공용중인 사장교에 적용이 가능하게 그 파급효과는 크다고 할 수 있다.

사장교 케이블 변형관리를 위한 시스템의 개발은 현재 공용중인 사장교 케이블의 관리를 현행 대표케이블에 대한 관리에 국한되지 않고 전체적인 케이블의 변형관리가 상시적으로 가능하게 되어 케이블의 유지관리의 효율성을 극대화할 수 있고 공용중인 사장교 케이블 변형관리에 활용이 가능하다고 판단된다.

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

제5장. 연구개발성과의 활용계획

5.1 연구 개발 성과의 활용 방안

- 사장교 케이블 유지관리 시스템의 제품화는 상용중인 스마트 센서들을 프로그래밍하여 하드웨어 및 소프트웨어 패키지로 제품화 한다.
- 스마트 센서 제조사와 판매공급계약을 체결하여 제품화 이후 양산에 대한 pilot생산을 실시하고 양산유효성에 대한 시험은 국내 공인인증기관을 통해 완성품의 품질확인을 실시한다.
- 양산제품의 마케팅방법으로는 사장교 케이블을 유지관리하는 주체에 대해서 시연회, 설명회 등을 개최하여 마케팅을 실시하고 시연회 및 설명회 결과값 등을 기초로 한 논문을 국내 및 해외 학회 등에 게재하여 판로를 개척한다.
- 개발제품에 대한 해외 마케팅 전략으로는 해외의 시장을 확보한 국내기업과 협약을 통해서 해외시장 진출 교두보를 확보하고 해외진출방법으로는 라이선싱 등의 계약방식의 적극적으로 활용한다.
- 판매법인을 해외에 설립하여 해외시장에 대한 매출확대를 추진한다.
- 해외판매의 효율화를 위해서 전문 무역업체나 해외바이어를 적극적으로 활용한다.
- 사장교 전용 케이블 계측시스템의 기존제품과의 차별성 및 시장성을 확보하기 위하여 기존제품에 대한 규격 및 경제성, 시장성에 대한 비교·분석결과를 보고서에 수록하여 개발제품의 차별성 및 시장성을 확보하도록 한다.

5.2 기대효과

○ 기술적 측면

사장교 케이블의 전체적인 거동파악이 상시에 이루어져 케이블의 장력관리의 효율화와 케이블의 유지관리방안의 효율화를 이루어 낼 수가 있다.

○ 경제적·산업적 측면

주관기관에서는 연구원등에 대해서 사장교 케이블에 관한 유지관리 기법에 대한 자료수집, 자료분석, 세미나 발표등을 수행하고 있다.

○ 사회적 측면

현재 주관기관에서는 기업부설연구소를 운영중에 있으며 향후 사장교 케이블에 관한 연구활성화를 통해서 고용유지 및 추가 고용계획을 갖고 있다.

추가고용계획으로는 사장교 케이블에 대한 원활한 연구수행을 위해서 2인 이상의 연구원을 채용할 계획을 수립하였다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

일반과제

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

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

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책기술적 위험요소를 기존자료를 이용하여 분석하고 참여연구원의 교육훈련 및 건강검진을 실시한다.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허	사장교 케이블장력 손실방지를 위한 무선통신기반의 9축 자유도 센서모듈을 활용한 장력추정방법 개발	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2018.10.26. (출원일)	단독사사	-
2	소프트 웨어	오픈소스기반의 모션센서를 이용한 케이블의 장력측정프로그 램	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2018.10.02	단독사사	-
3	논문	교량 케이블시스템의 모드변수에 관한 연구	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	한국구조물 진단유지관 리공학회	-	2019.09.30	단독사사	비SCI
4	특허	변형률계의 동적해석을 통한 교량 케이블의 장력추정방법	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2019.07.11. (출원일)	단독사사	-
5	특허	교량의 측정가속도를 이용한 케이블변위 모니터링방법	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2019.10.26. (출원일)	단독사사	-
6	소프트 웨어	변형률계를 이용한 케이블의 장력측정 프로그램	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2019.07.12	단독사사	-
7	소프트 웨어	가속도계를 이용한 교량 케이블의 변형측정 프로그램	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2019.10.29	단독사사	-
8	특허	사장교 케이블의 온도변화에 따른 케이블변위 및 장력추정방법	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2020.07.10. (출원일)	단독사사	-
9	소프트 웨어	교량 케이블의 온도이력측정 프로그램	(주)구주 엔지니 어링	주저 자	대한민국	-	2020.07.11	단독사사	-

제11장. 기타 사항

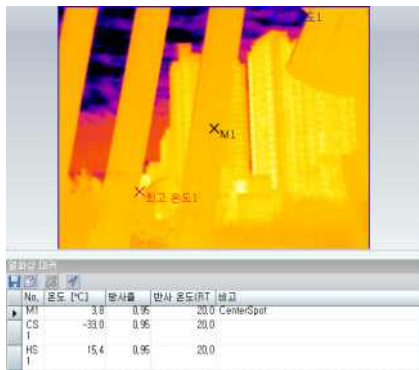
해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

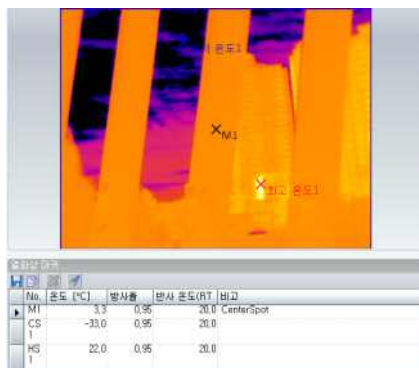
1. Chlko, T. J., Haritos, N. and Gershkovich, V.(1996), Non-linear curve fitting for modal analysis, Environmental Software, Vol 11, 9-18.
 2. Cornwell, P., Farrar, C. R., Doebling, S. W. and Sohn H. (1999) Environmental Variability of Modal Properties, Experimental Techniques, Vol. 23, 45-48.
 3. Elliott, A. S. and Richardson, M. H. (1998), Virtual Experimental Modal Analysis(VEMA), Proceeding of 16th IMAC.
 4. Jenny Lau, Jeroen Lanslots, Bart Peeters, Herman Van der Auweraer. (2007), Automatic modal analysis: reality or myths.
 5. Jeong-In Shin. (2016), Damage Detection In Braced Steel Frame using Modal Analysis.
 6. Jun-Kyu Choi. (1998), Measurement of Cable Tension Force by Vibration Method.
 7. Min-Gyu Hwang. (2009), The Evaluation of Structural Performance of Braced Plate Girder Using Experimental Modal Analysis.
 8. Shwarz, B. and Richardson, M. (2001), Modal Parameter estimation from ambient response data, Proceeding of 19th IMAC.
 9. ABSignal, (2012) ModalVIEW - Operating Tutorial Version R2, 1-199 (Web : www.absignal.com)
 10. Jin, Byeong Chang, "An evaluation on the application of vibration method for tension force estimation of the stay cables in spatial structures" , 2010
 11. Lee, Hyun Chol, Kwon, Ki Mun, Moon, Chang Eun, Jo, Yeong Hun, "Survey Equipment Development of Stability Evaluation for Rock Slope using Drone" , JKSMI, Vol.22, no4, pp.91-99, 2018
 12. Won, Jong Seung, "A Study of Tension Measurement and Damping Effect following the Installation of Damper in Cable Stayed Girder Bridge" , 2006
 13. Ju, Hwan Jung, "The Identification Technique of Tensile Forces of Bridge Stay Cables Using the HSI Algorithm" , 2010
 14. Kim, Jeong Hoon, Song, Jae Ho, "Evalation of Applicability of Cable Force Monitoring System of Cable-stayed Bridge by field Loading Test" , JKSMI, Vol.13, no1, pp.205-213, 2009
 15. Kim, Byeong Hwa, Park, Tae Yo, "Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method" , Journal of Sound and Vibration, 304, pp.660-676, 2007
-

부 록

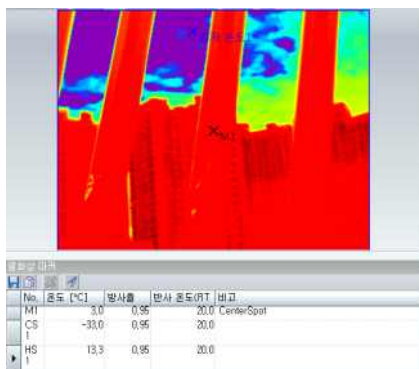
1. 열화상카메라 측정자료
2. 케이블 고유진동수 산정자료



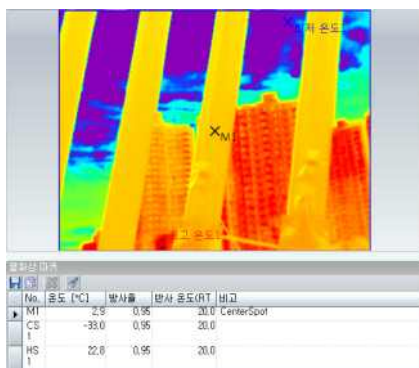
논현택지2육교 1번케이블



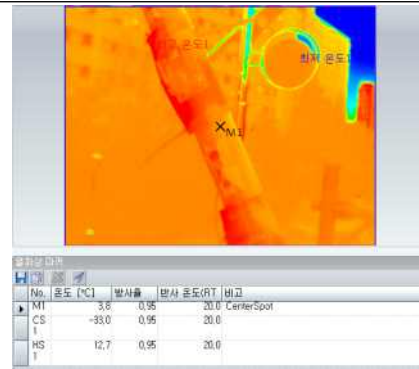
논현택지2육교 2번케이블



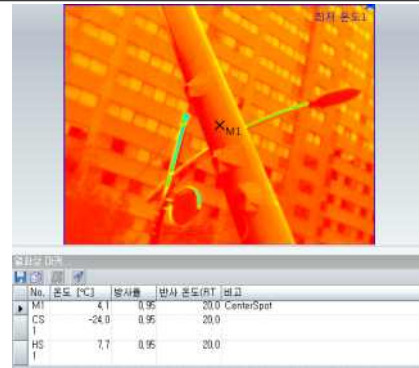
논현택지2육교 3번케이블



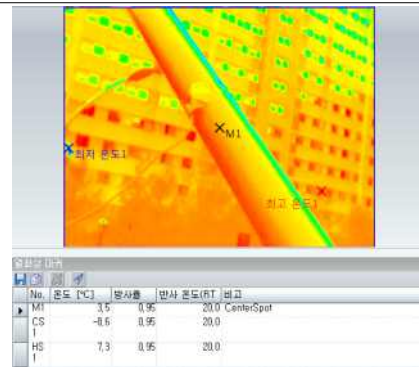
논현택지2육교 4번케이블



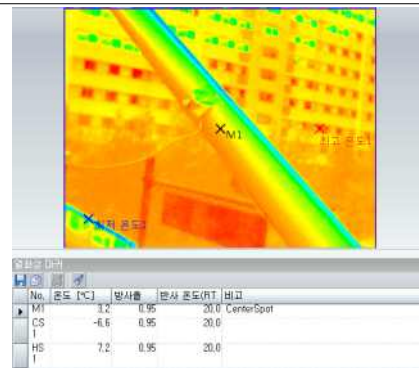
논현택지2육교 1번케이블



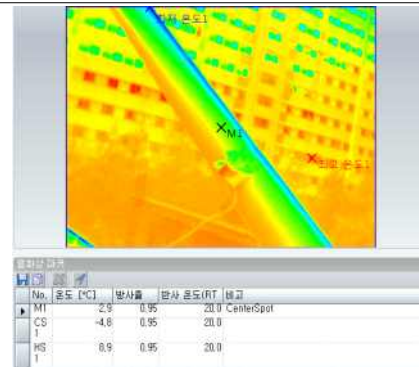
논현택지2육교 2번케이블



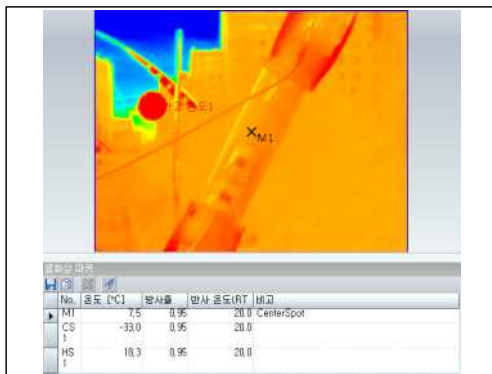
논현택지2육교 3번케이블



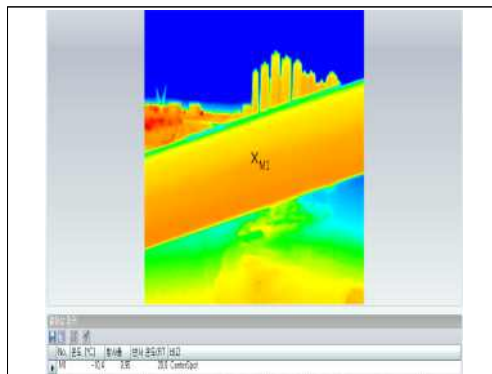
논현택지2육교 4번케이블



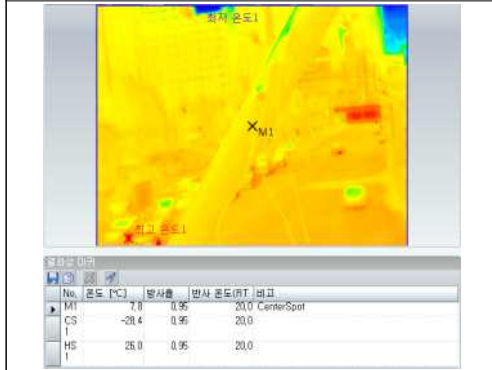
논현택지2육교 5번케이블



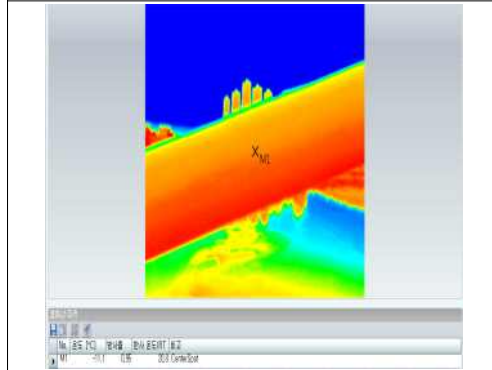
논현택지2육교 1번케이블



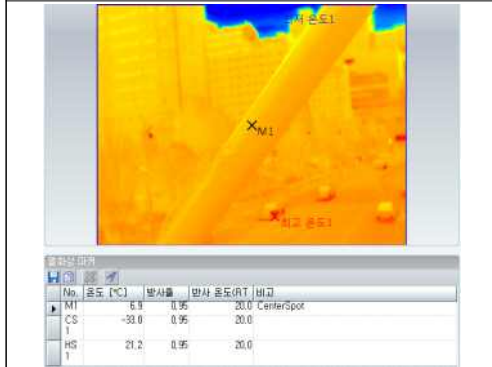
송도국제교 1번케이블



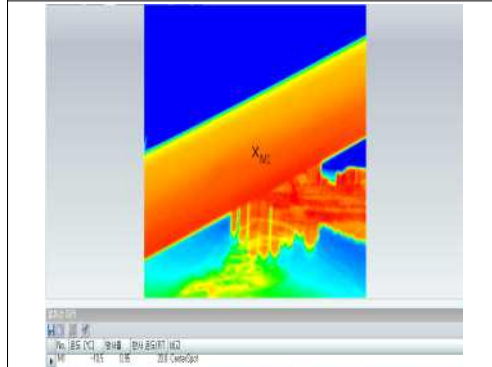
논현택지2육교 2번케이블



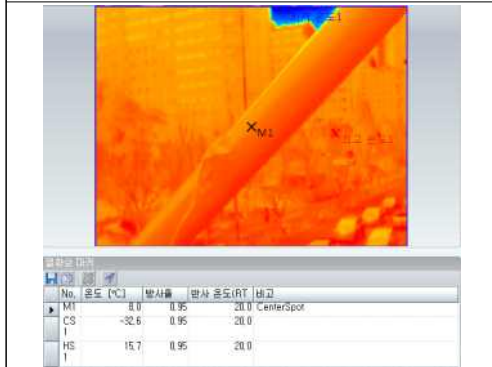
송도국제교 2번케이블



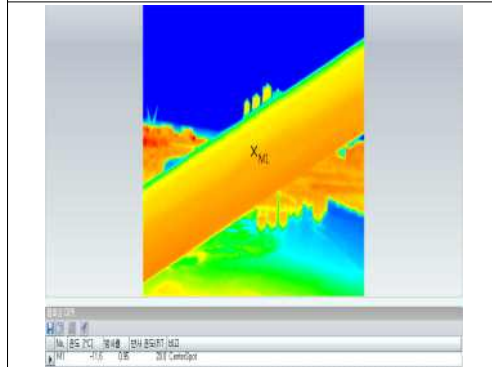
논현택지2육교 3번케이블



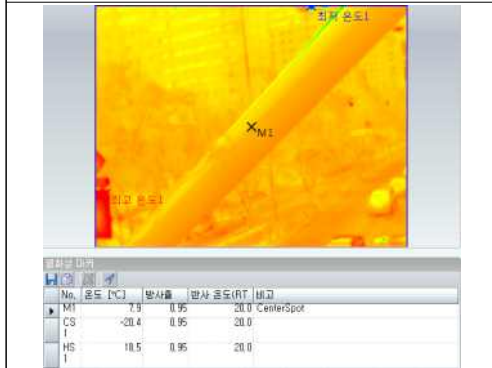
송도국제교 3번케이블



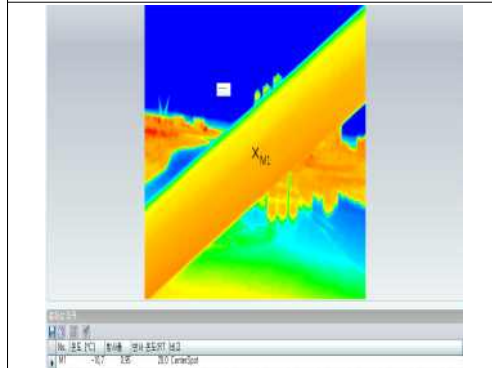
논현택지2육교 4번케이블



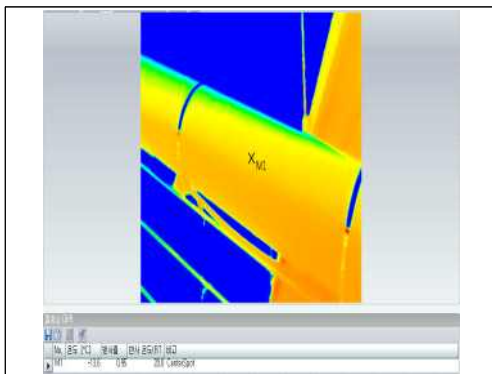
송도국제교 4번케이블



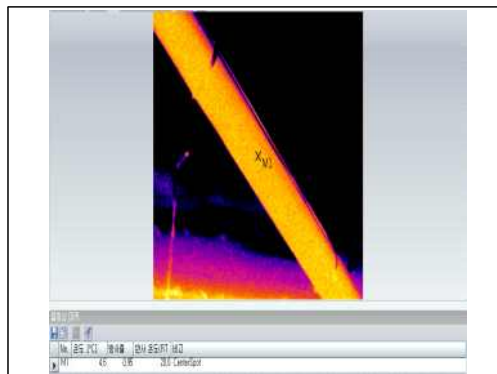
논현택지2육교 5번케이블



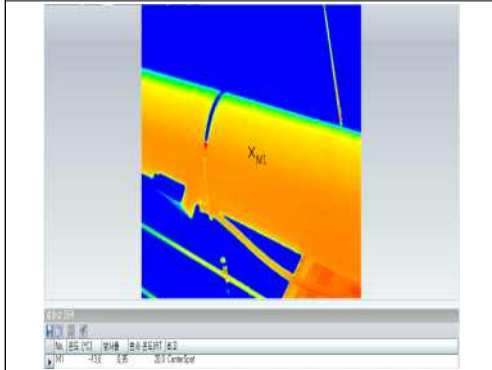
송도국제교 5번케이블



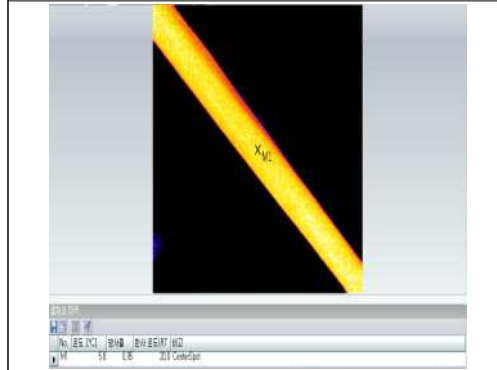
송도아트센터교 1번케이블



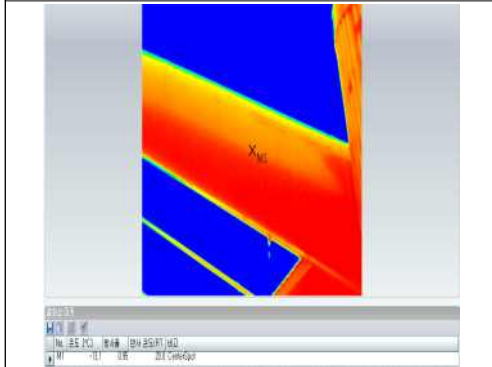
바이오산업교 1번케이블



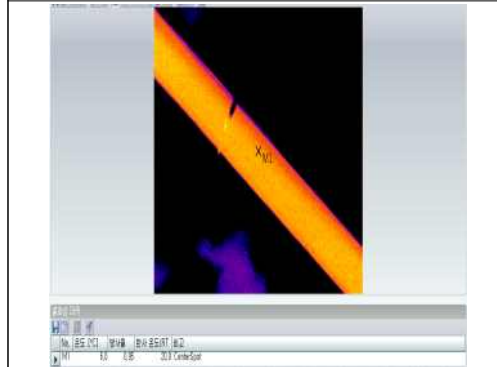
송도아트센터교 2번케이블



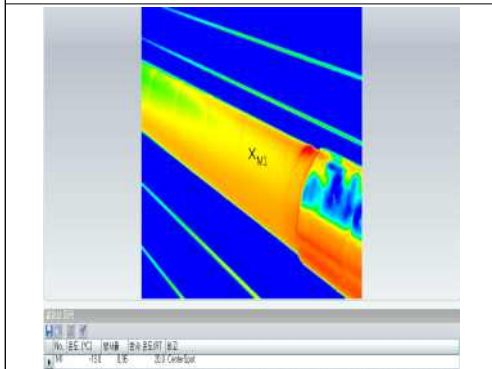
바이오산업교 2번케이블



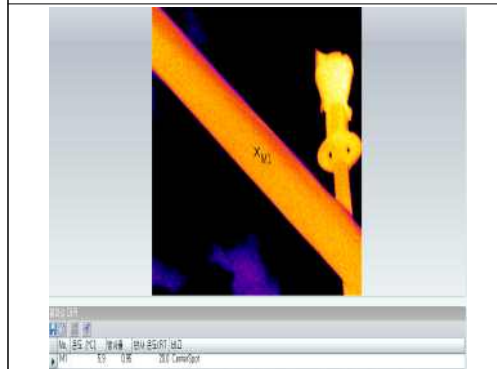
송도아트센터교 3번케이블



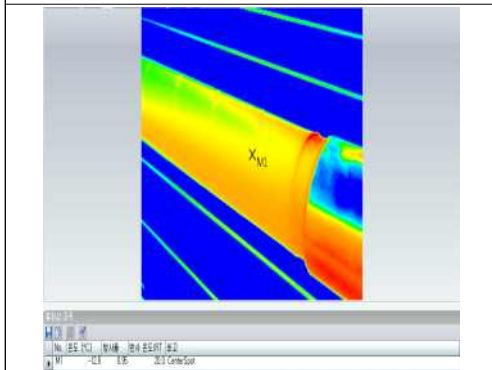
바이오산업교 3번케이블



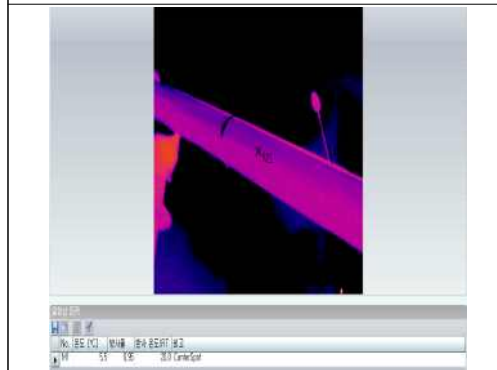
송도아트센터교 4번케이블



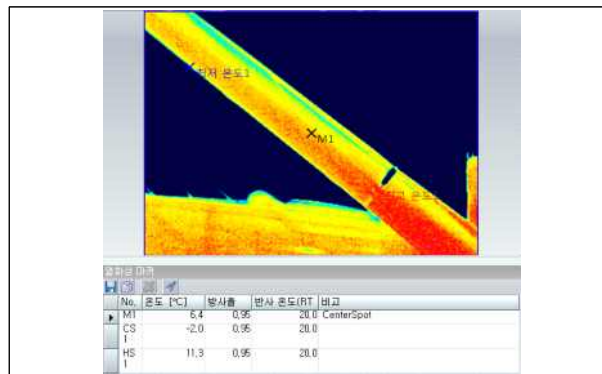
바이오산업교 4번케이블



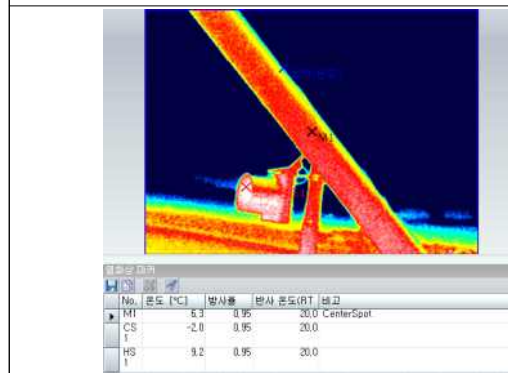
송도아트센터교 5번케이블



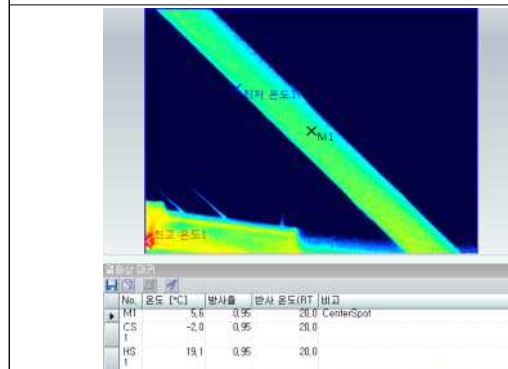
바이오산업교 5번케이블



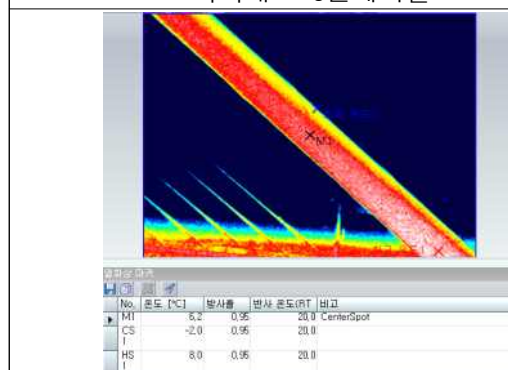
백석대교 1번케이블



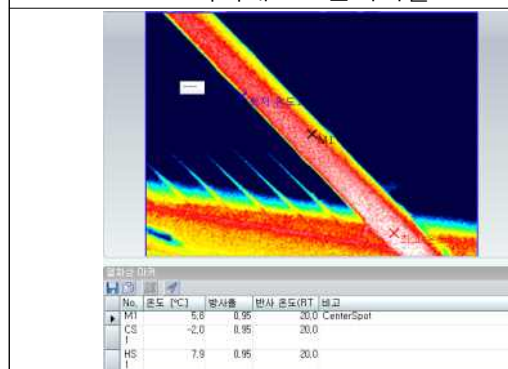
백석대교 2번케이블



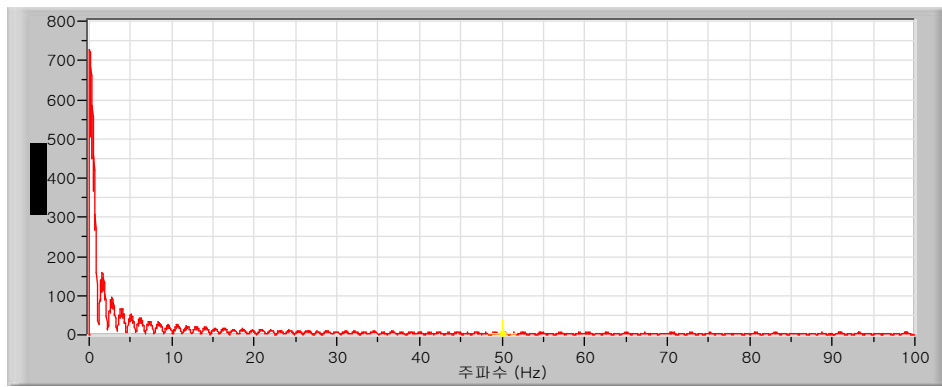
백석대교 3번케이블



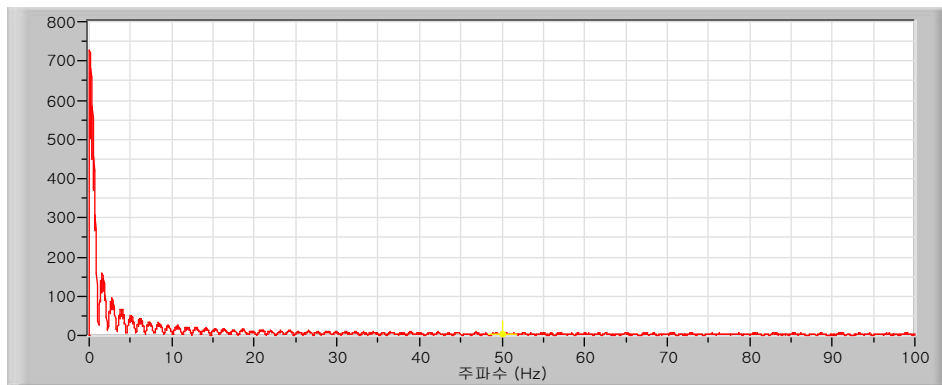
백석대교 4번케이블



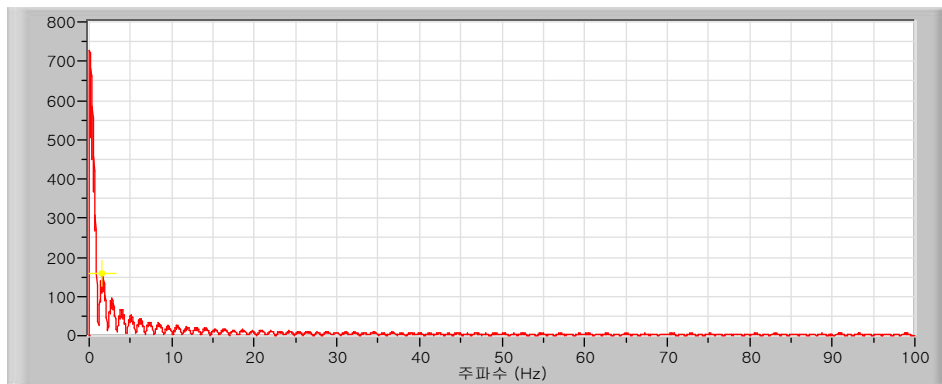
백석대교 5번케이블



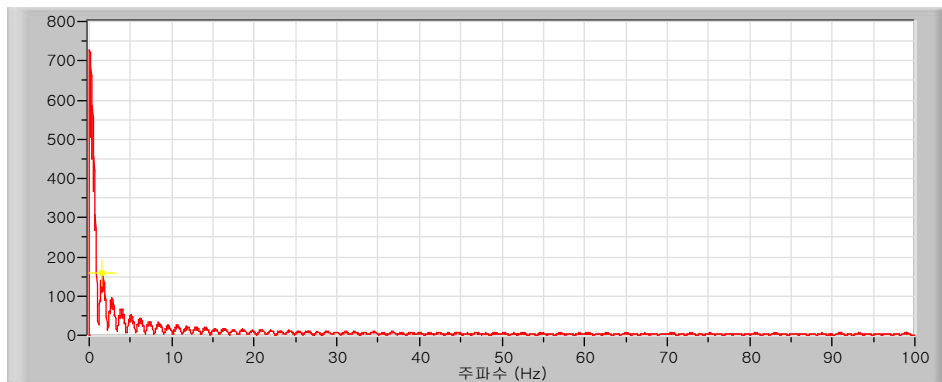
1번케이블 acc1



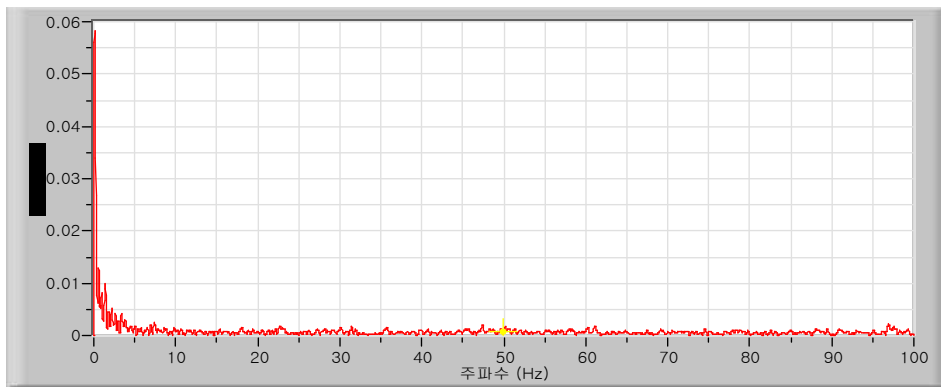
1번케이블 acc2



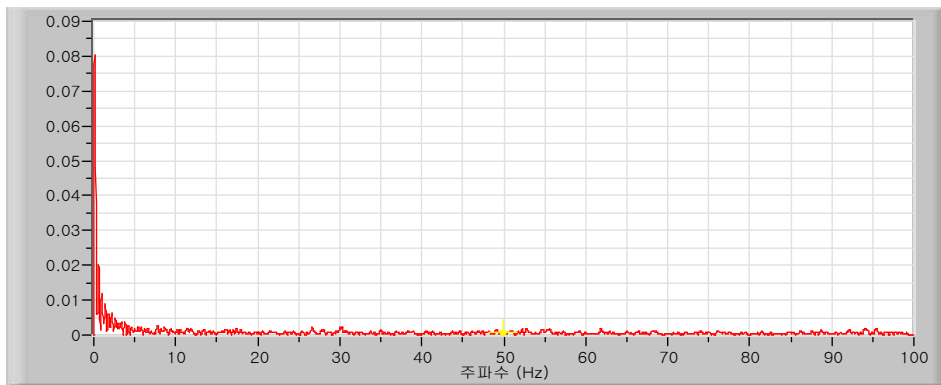
2번케이블 acc1



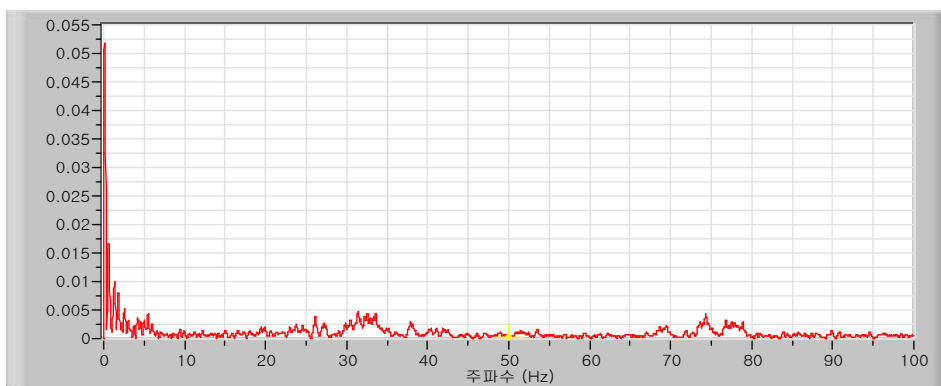
2번케이블 acc2



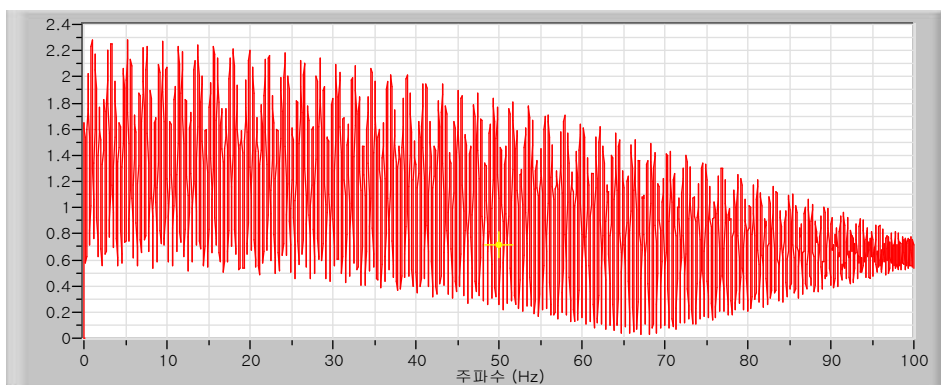
1번케이블 3축 aY



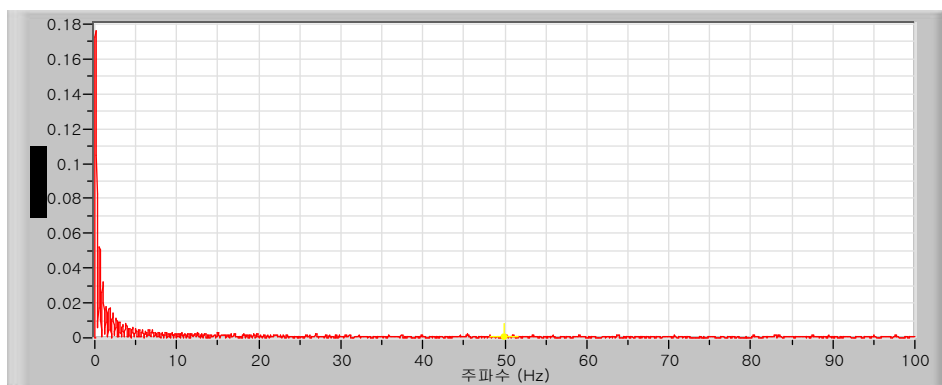
1번케이블 3축 aZ



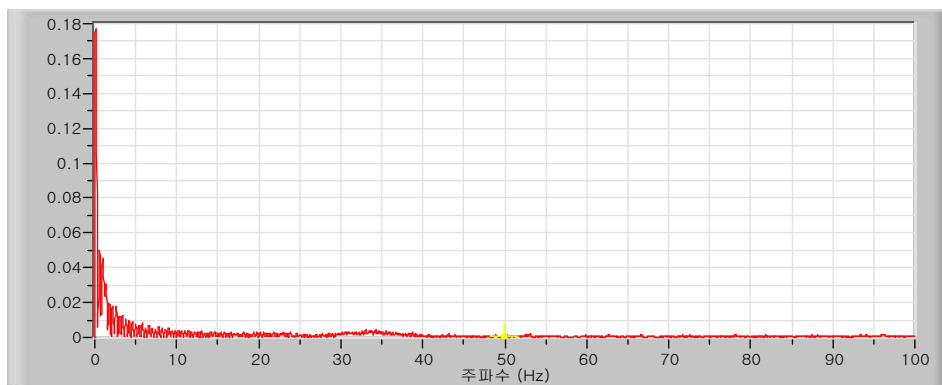
1번케이블 1축 acc1



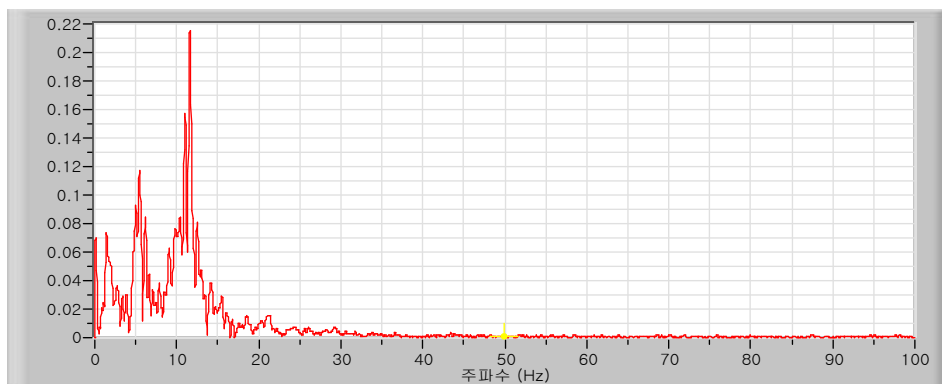
1번케이블 1축 acc2



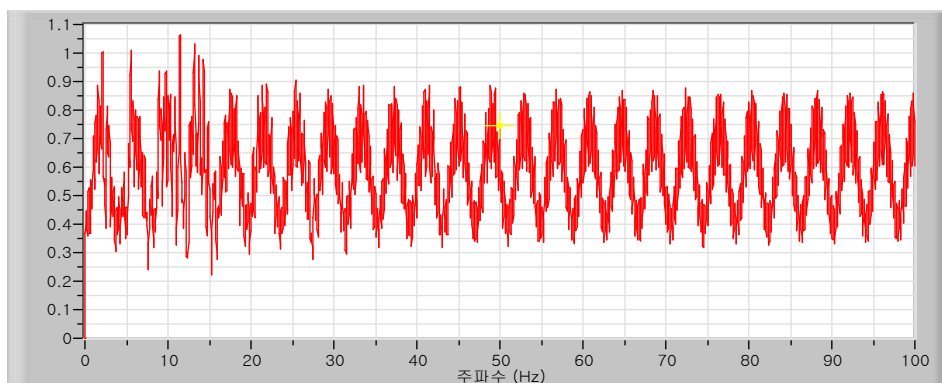
2번케이블 3축 aY



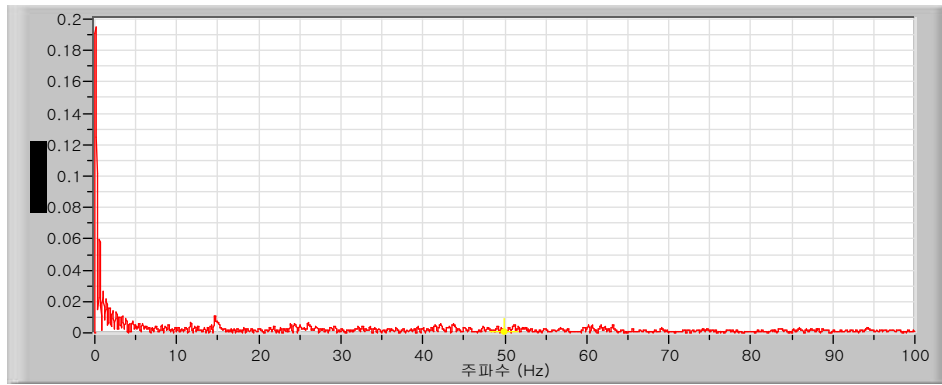
2번케이블 3축 aZ



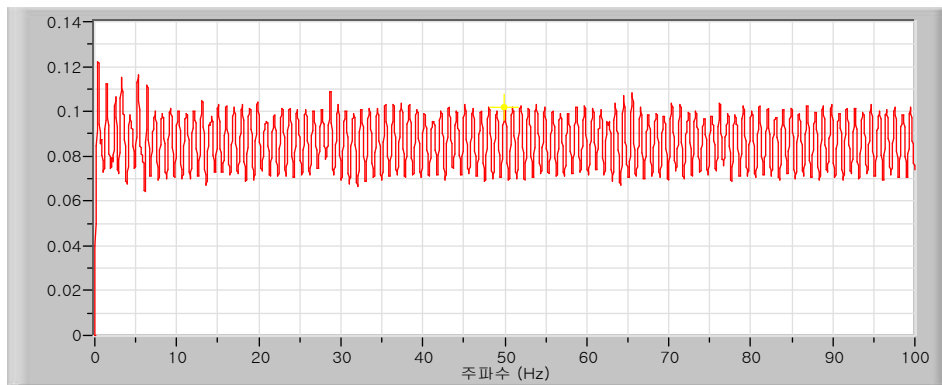
2번케이블 1축 acc1



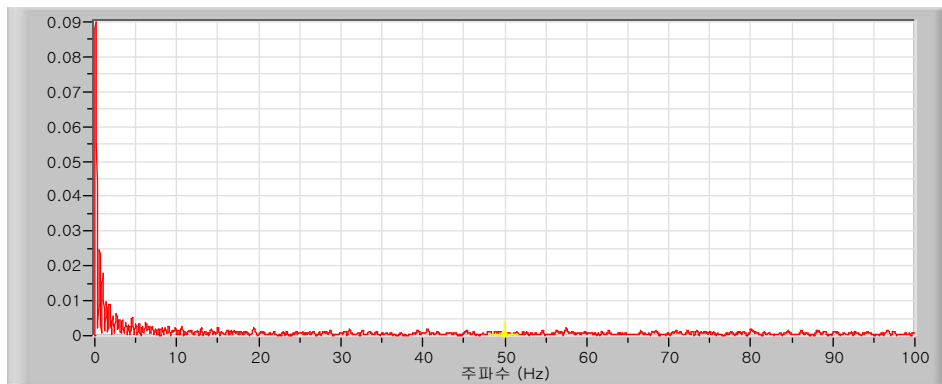
2번케이블 1축 acc2



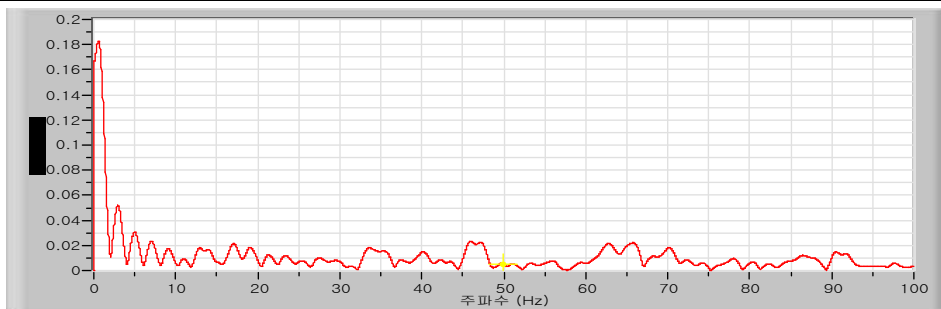
1번케이블 3축 aX



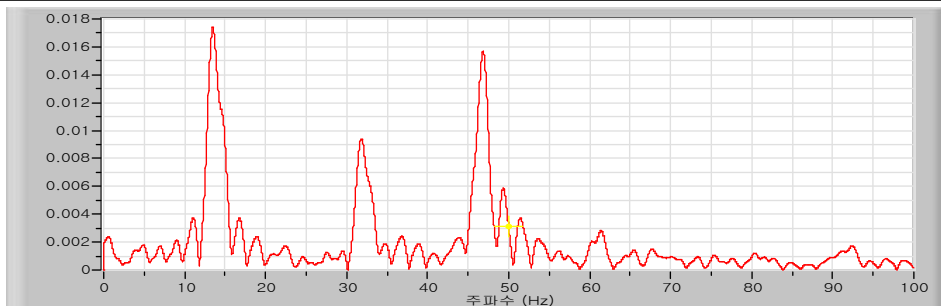
1번케이블 3축 aY



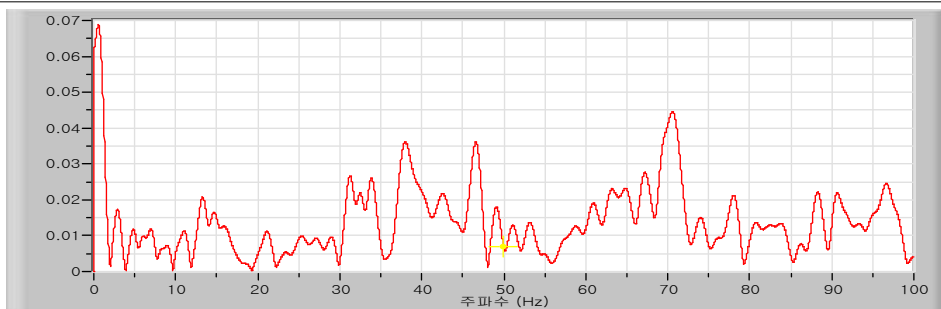
1번케이블 3축 aZ



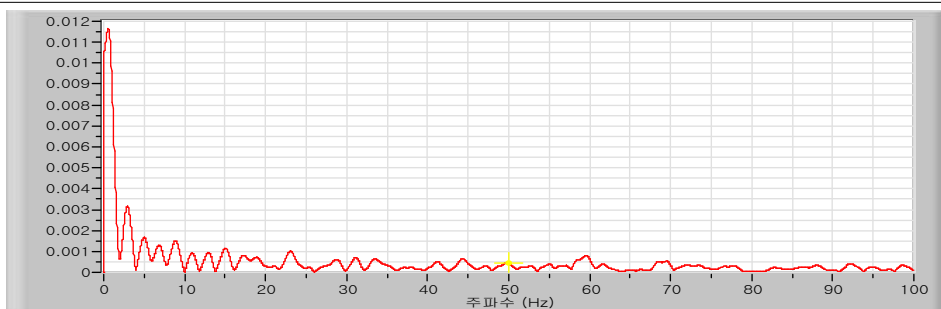
1번케이블 3축가속도 aX



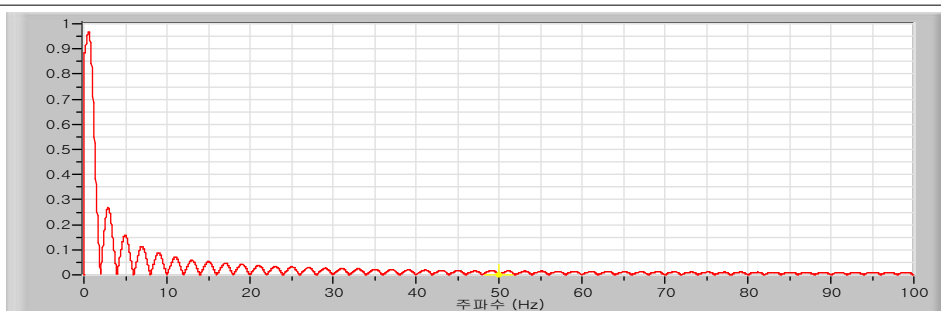
1번케이블 3축가속도 aY



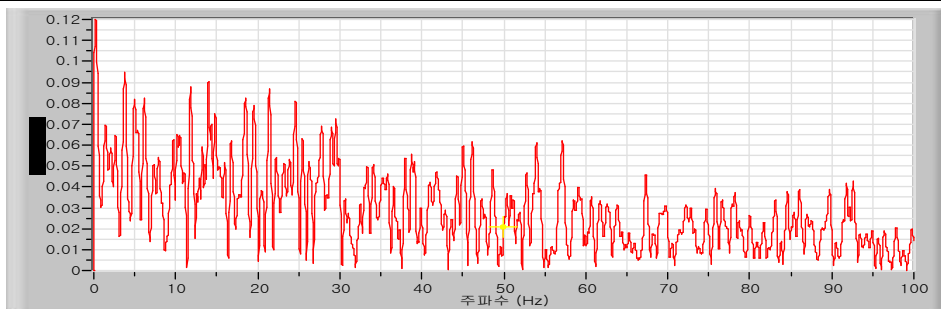
1번케이블 3축가속도 aZ



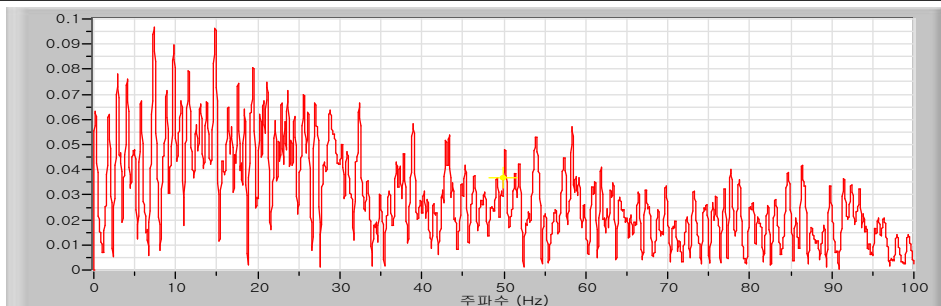
1번케이블 1축가속도 acc1



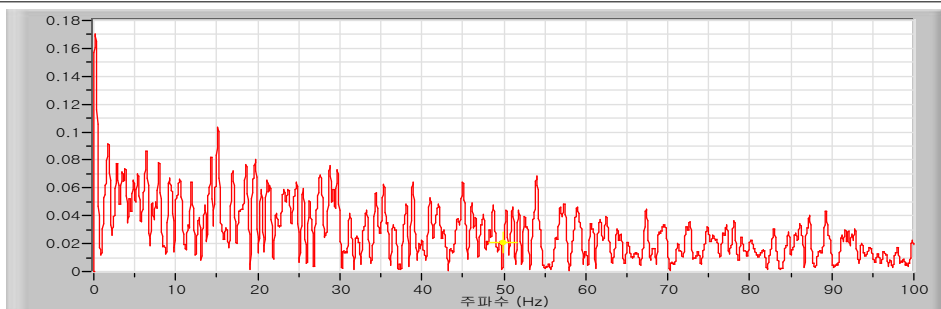
1번케이블 1축가속도 acc2



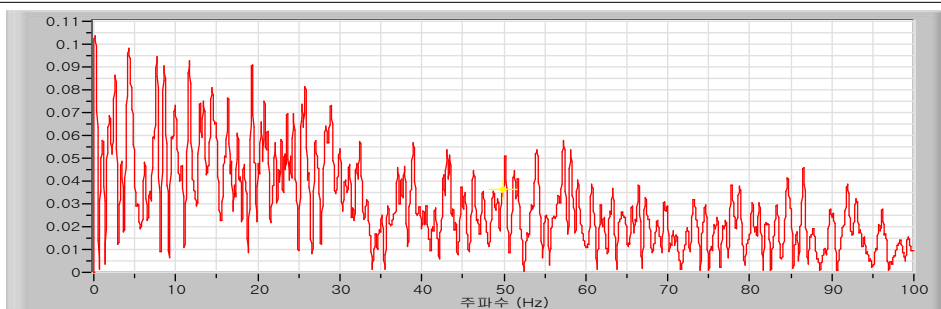
1번케이블 3축가속도 aX



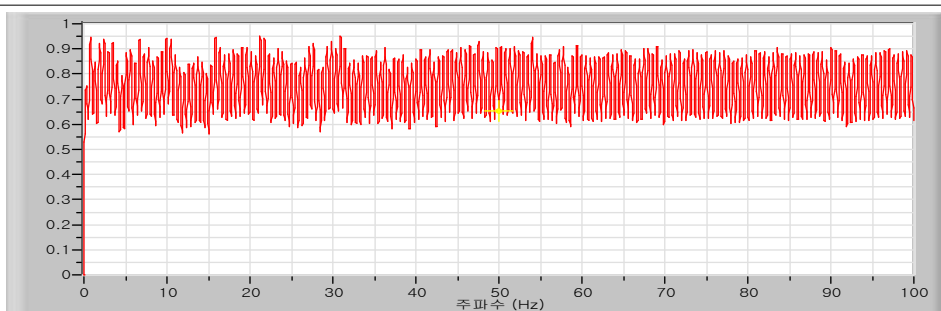
1번케이블 3축가속도 aY



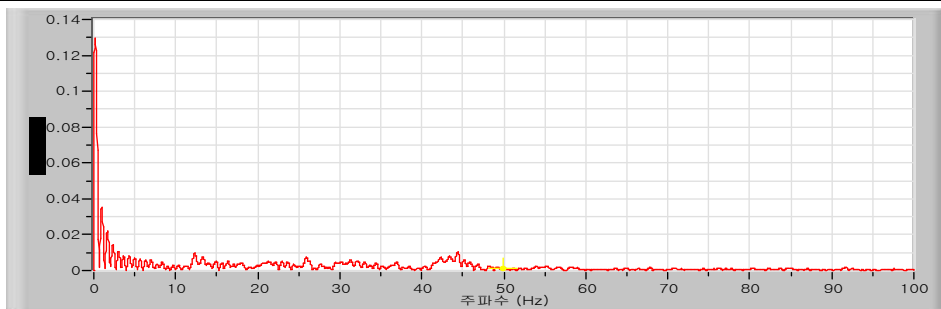
1번케이블 3축가속도 aZ



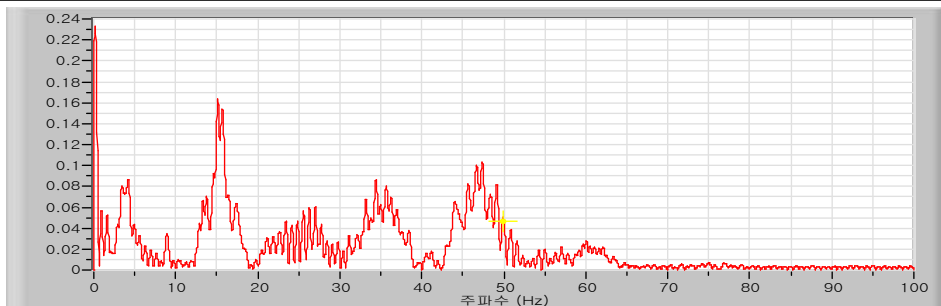
1번케이블 1축가속도 acc1



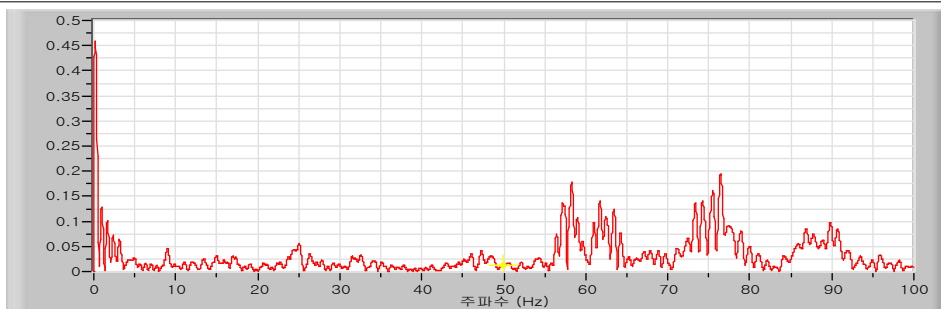
1번케이블 1축가속도 acc2



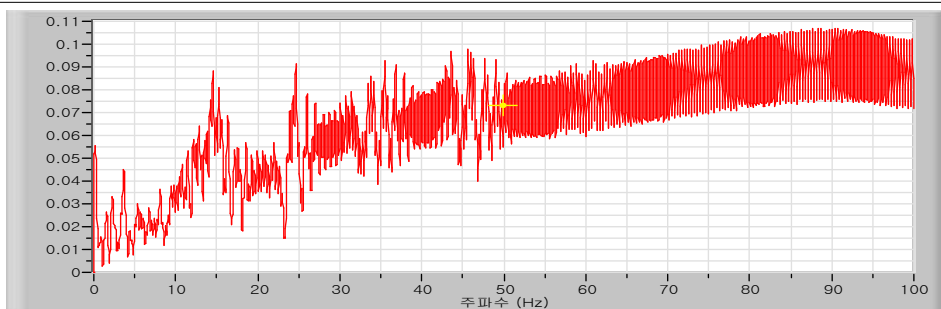
1번케이블 3축가속도 aX



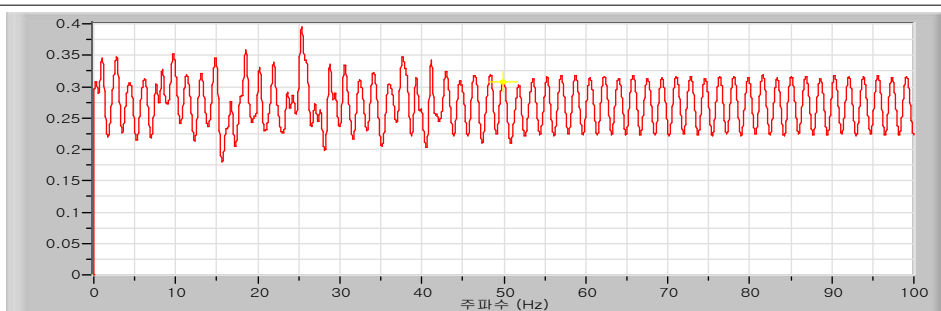
1번케이블 3축가속도 aY



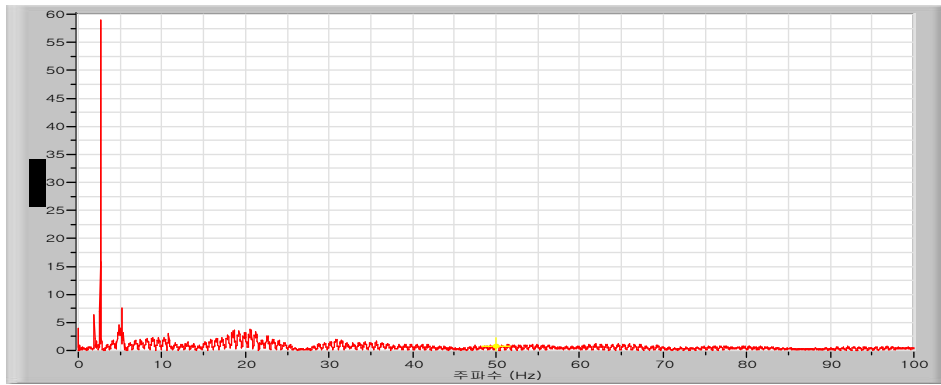
1번케이블 3축가속도 aZ



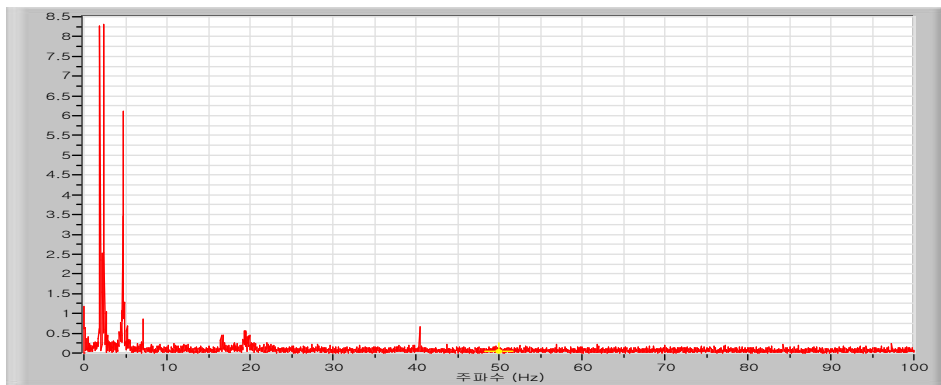
1번케이블 1축가속도 acc1



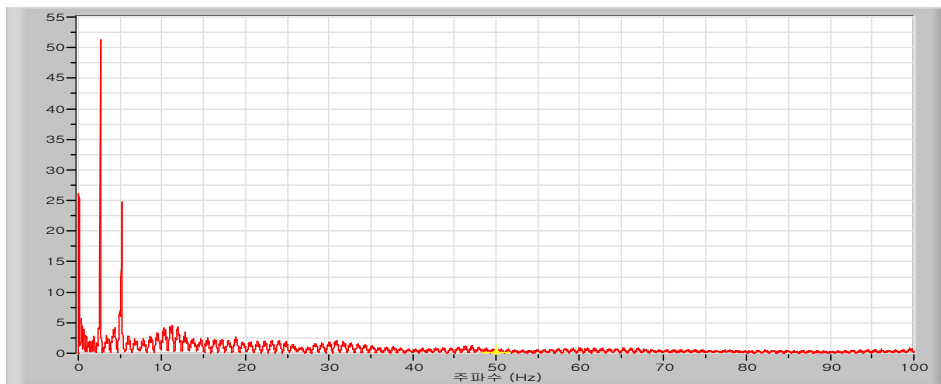
1번케이블 1축가속도 acc2



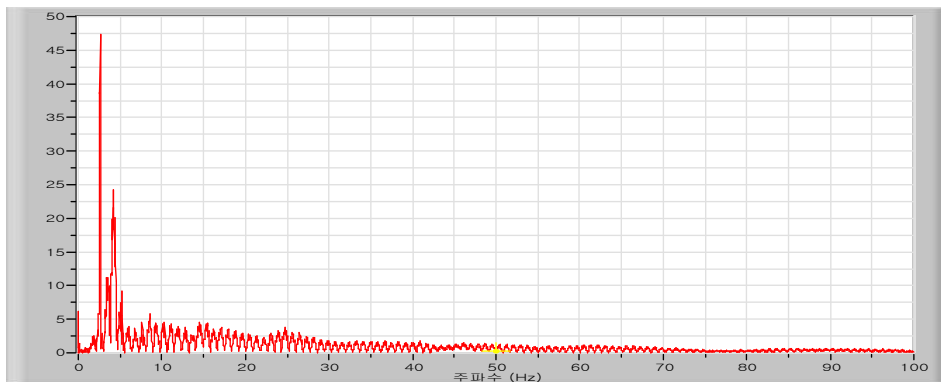
1번 케이블 acc1



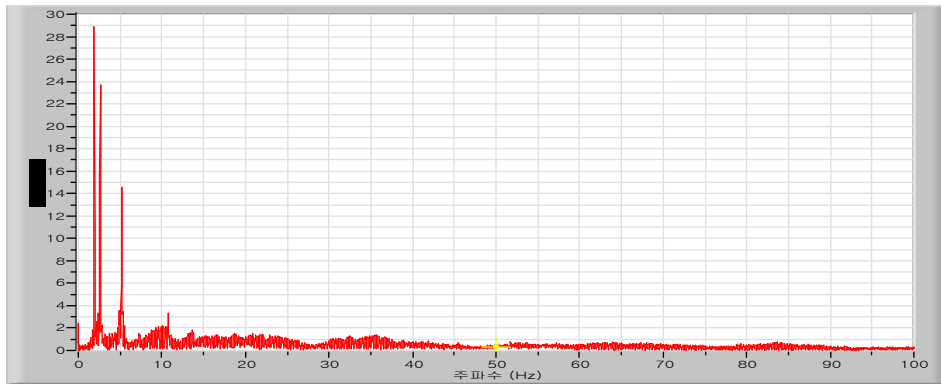
2번 케이블 acc2



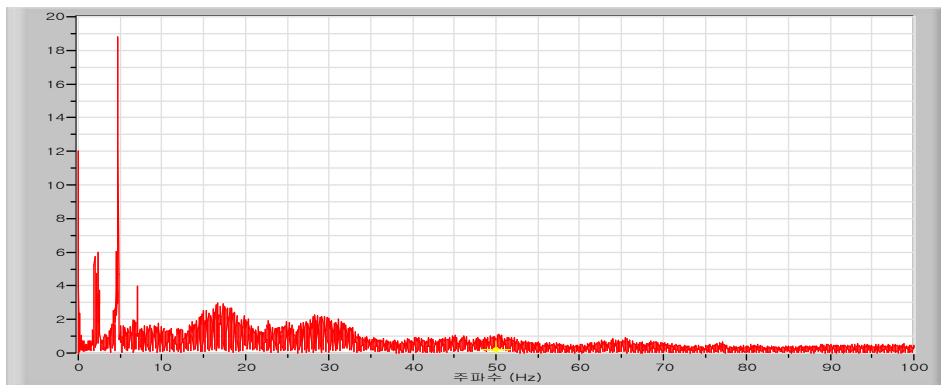
3번 케이블 acc3



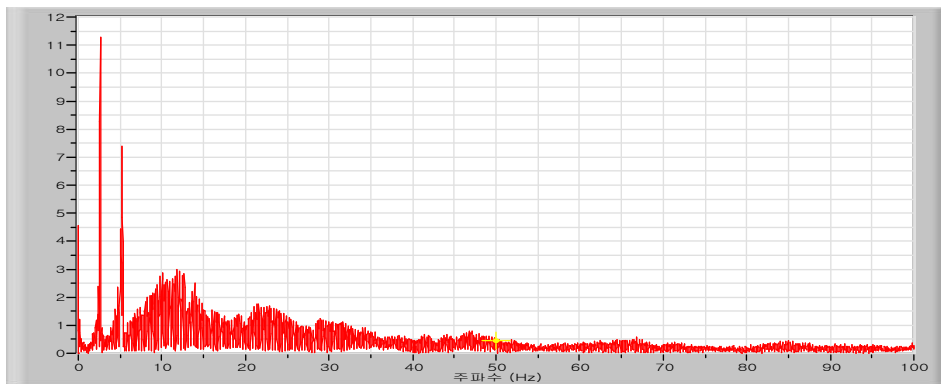
4번 케이블 acc4



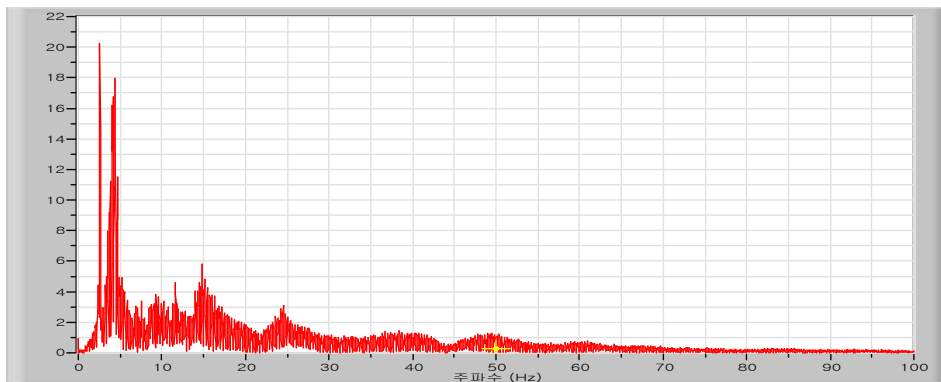
1번 케이블 acc1



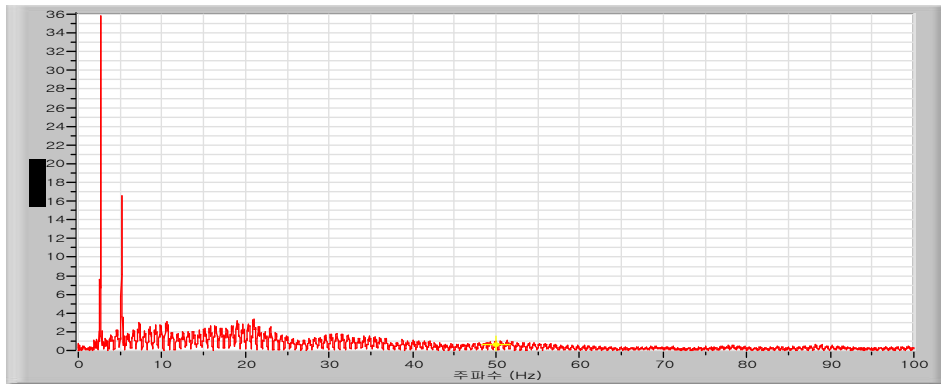
2번 케이블 acc2



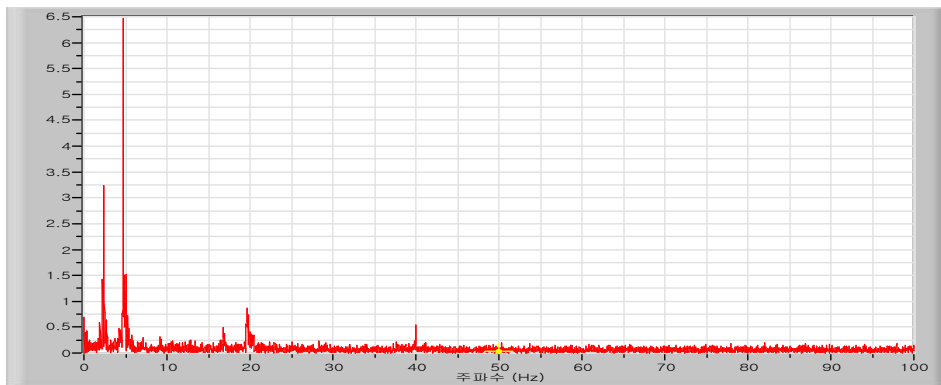
3번 케이블 acc3



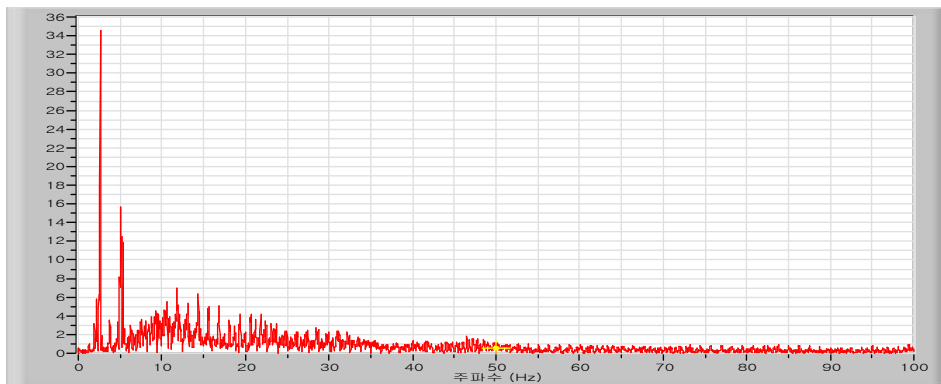
4번 케이블 acc4



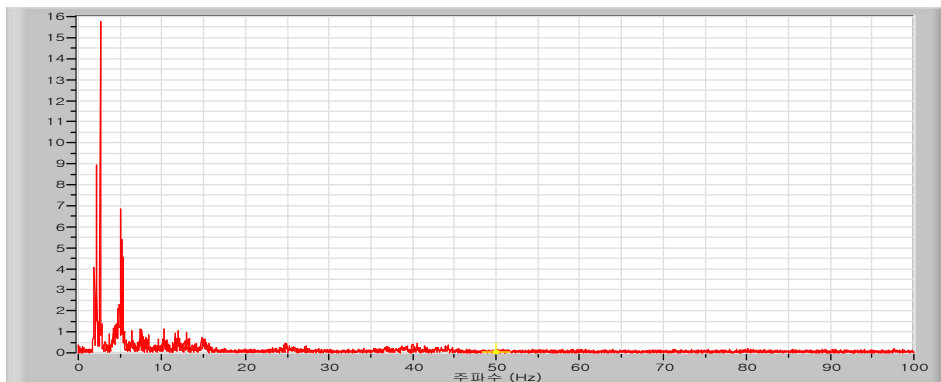
1번 케이블 acc1



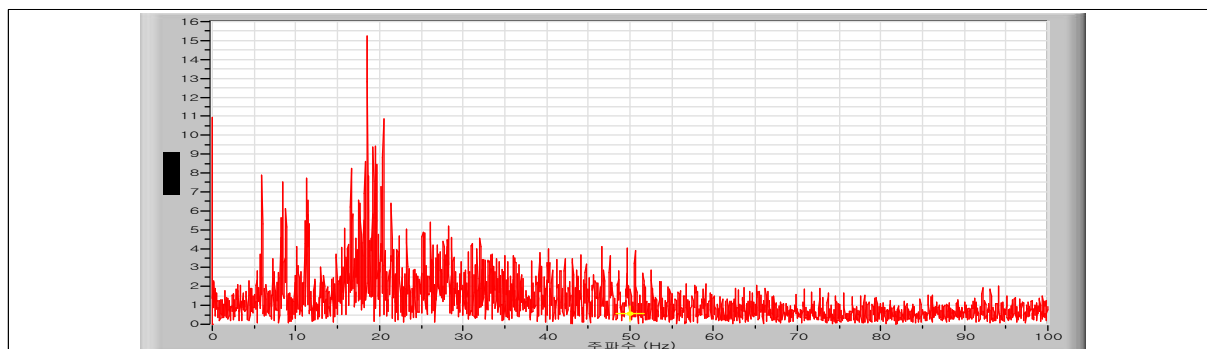
2번 케이블 acc2



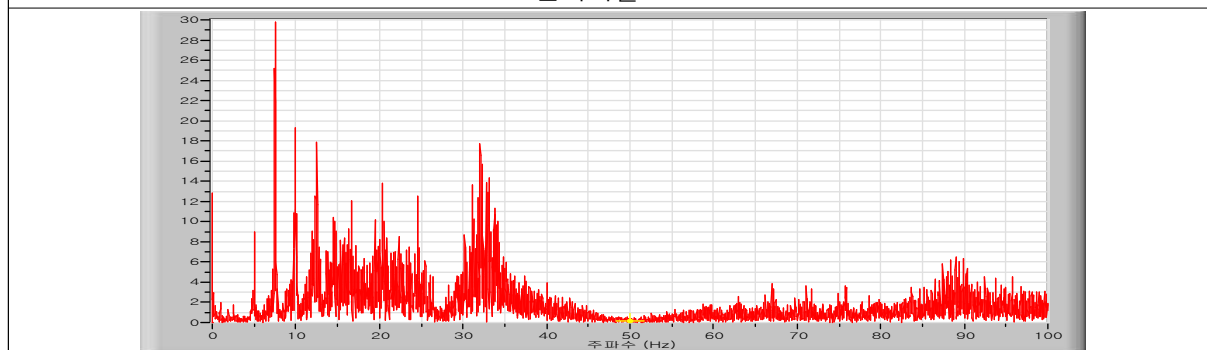
3번 케이블 acc3



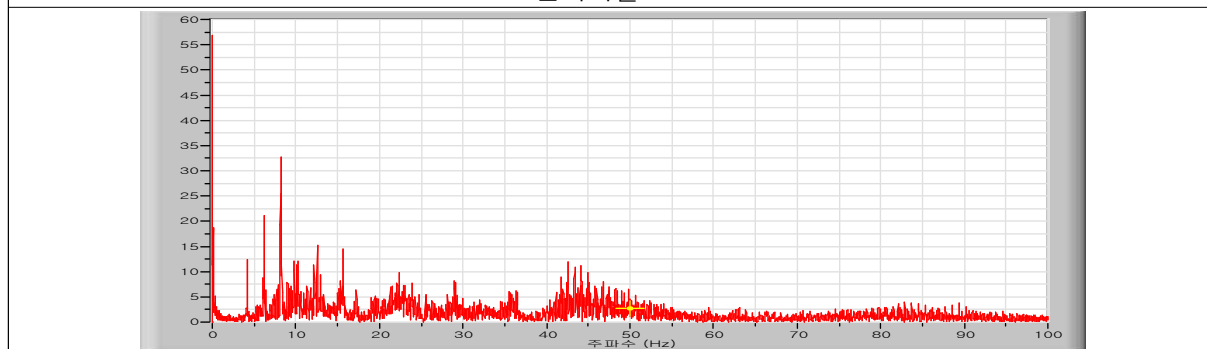
4번 케이블 acc4



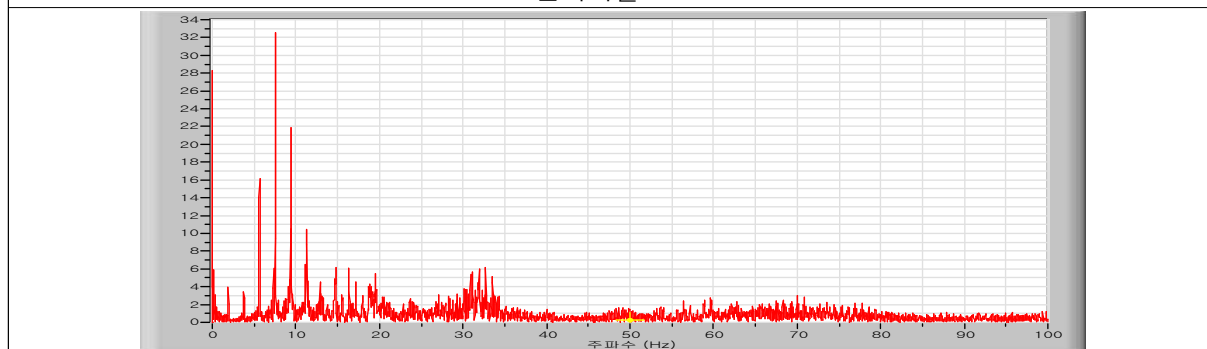
1번케이블 acc1



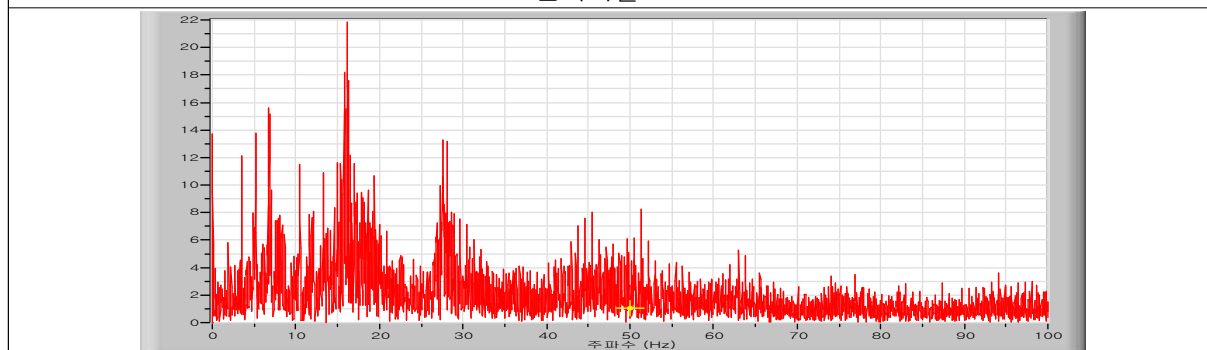
2번케이블 acc2



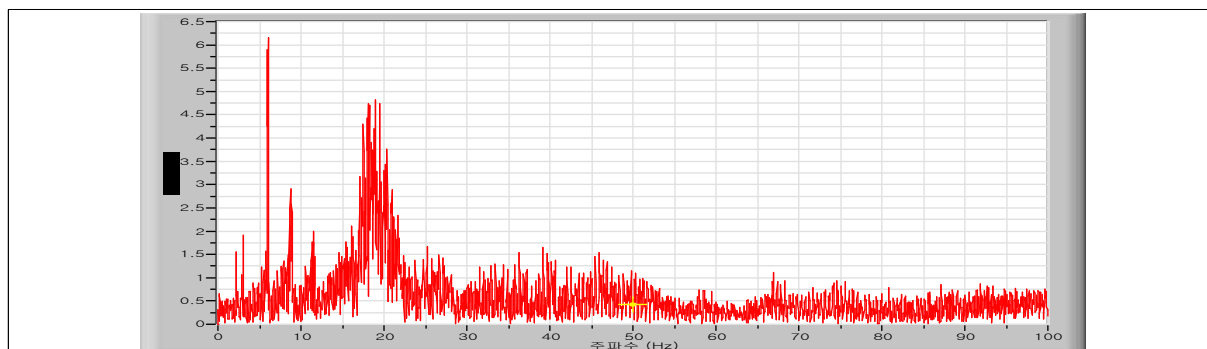
3번케이블 acc3



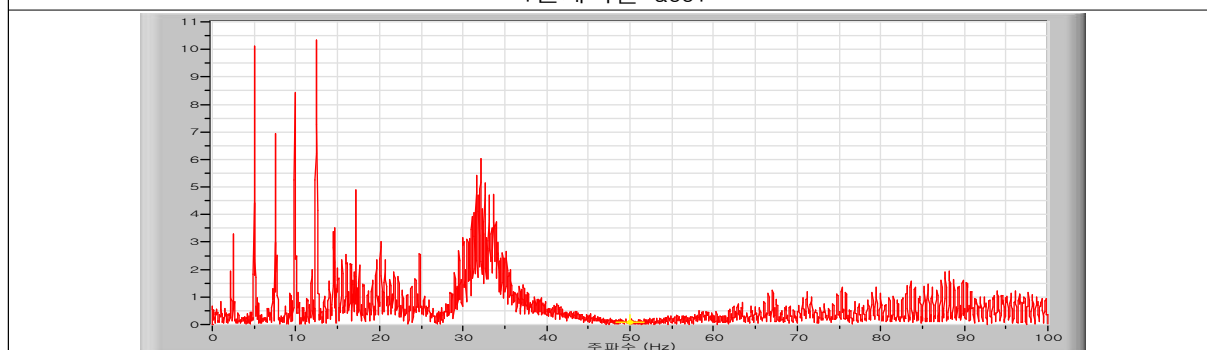
4번케이블 acc4



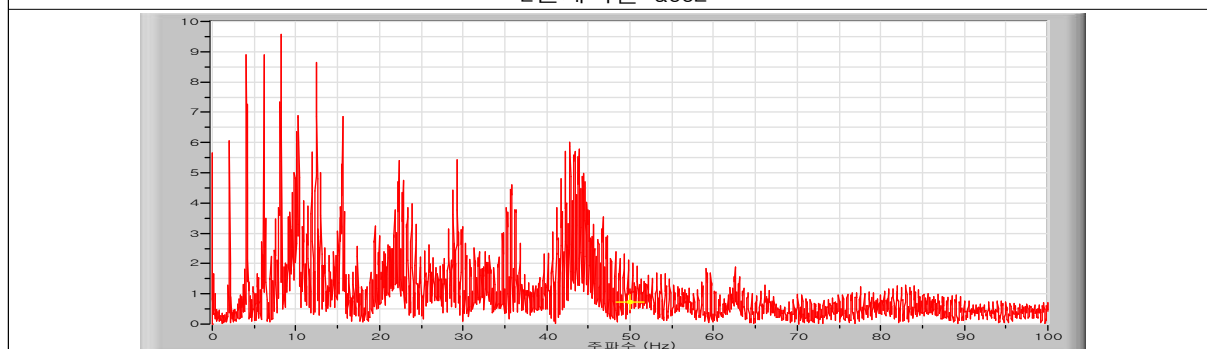
5번케이블 acc5



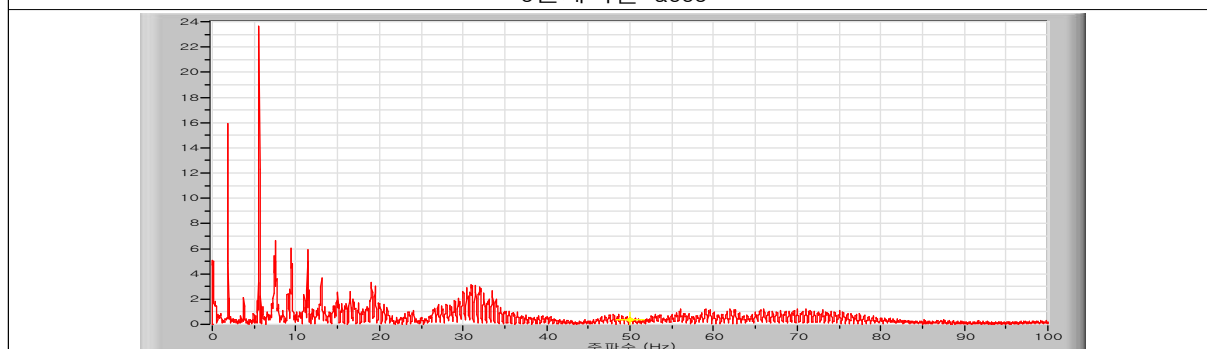
1번케이블 acc1



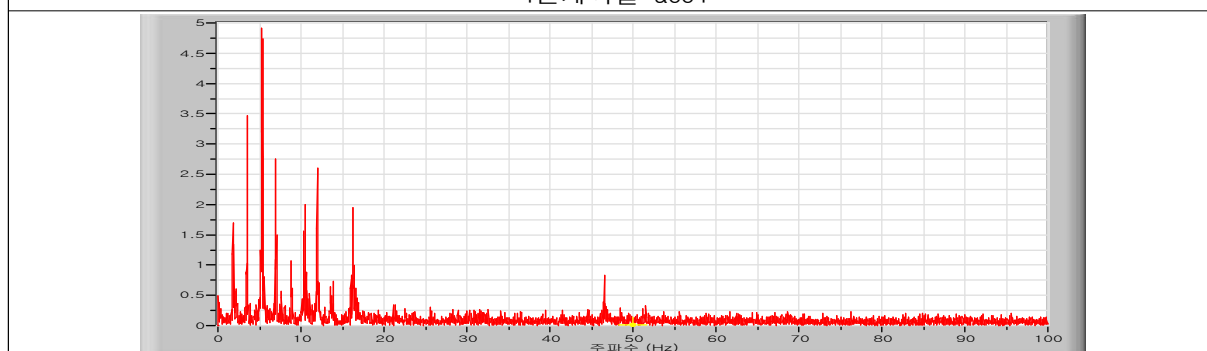
2번케이블 acc2



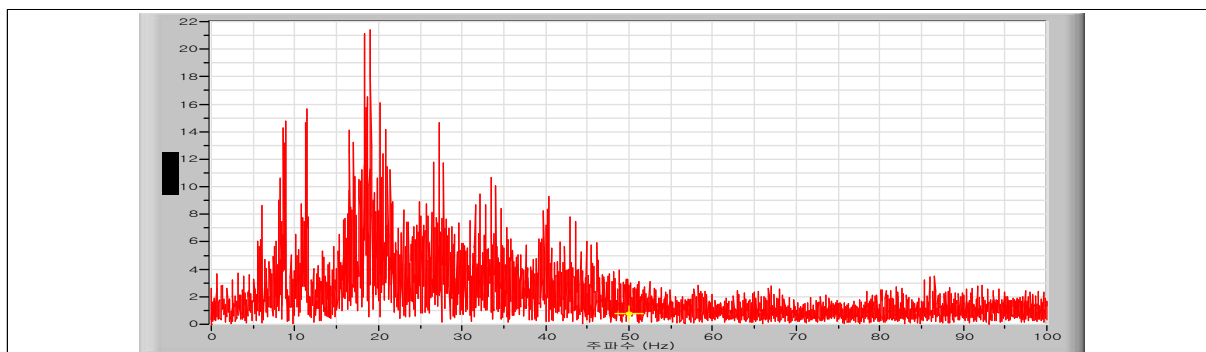
3번케이블 acc3



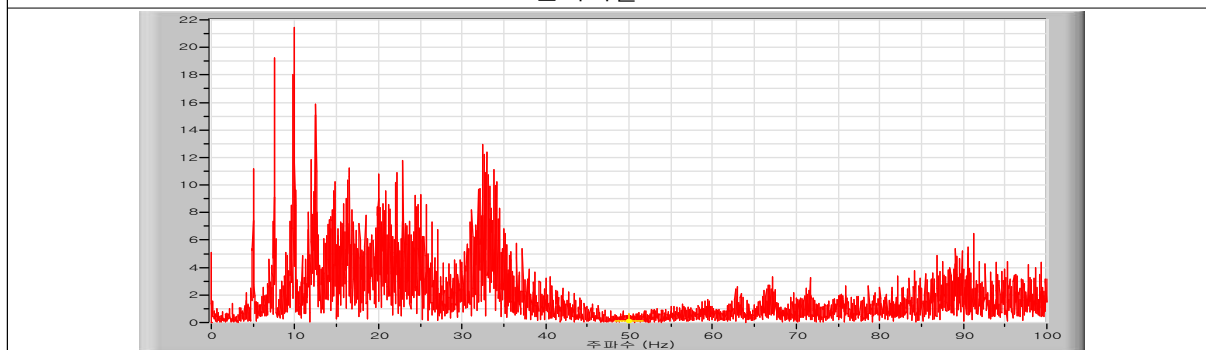
4번케이블 acc4



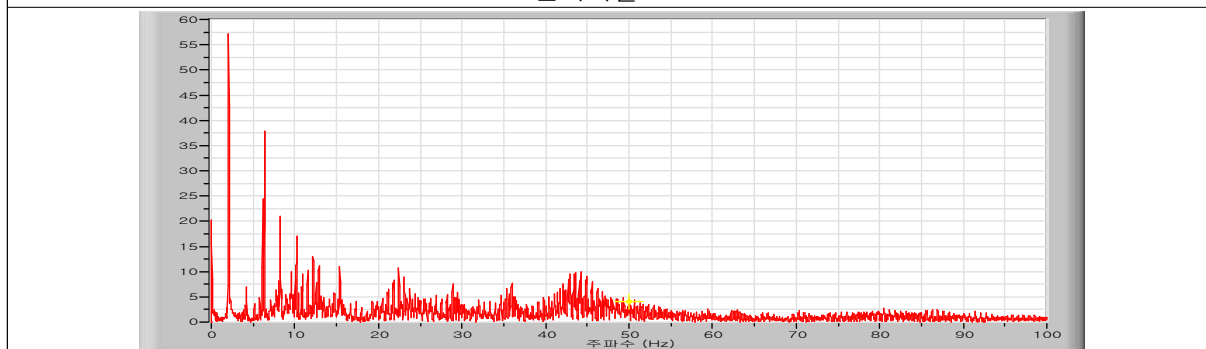
5번케이블 acc5



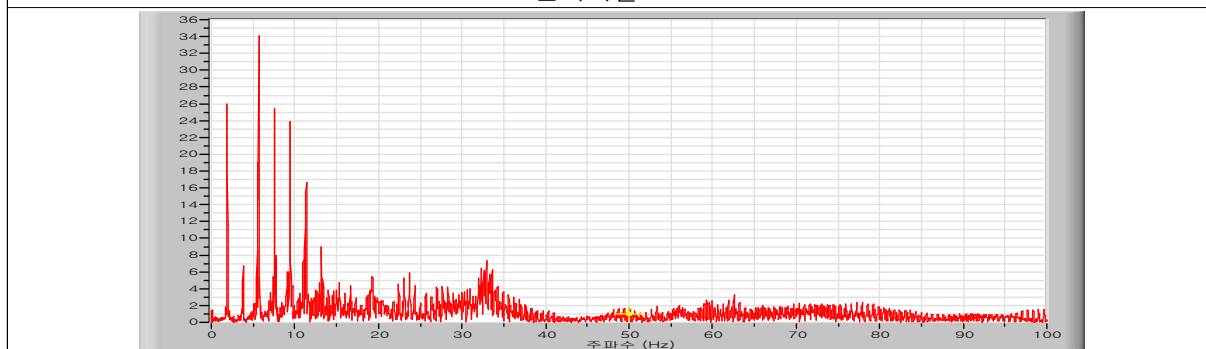
1번케이블 acc1



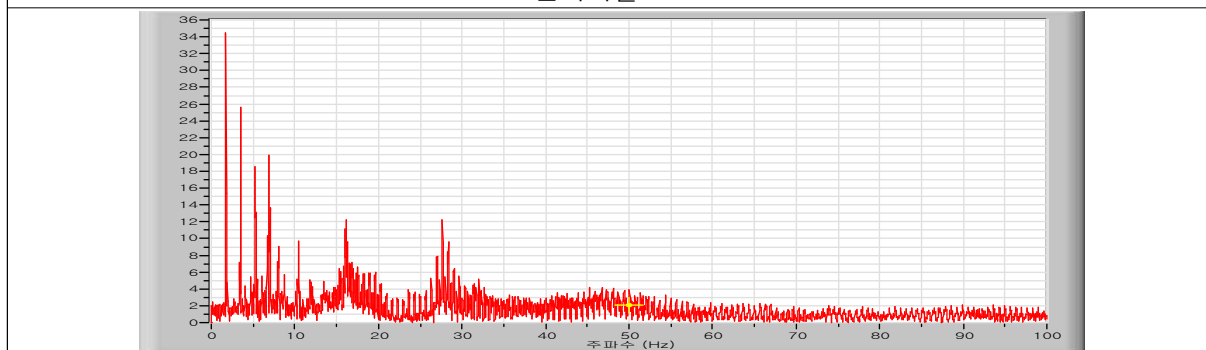
2번케이블 acc2



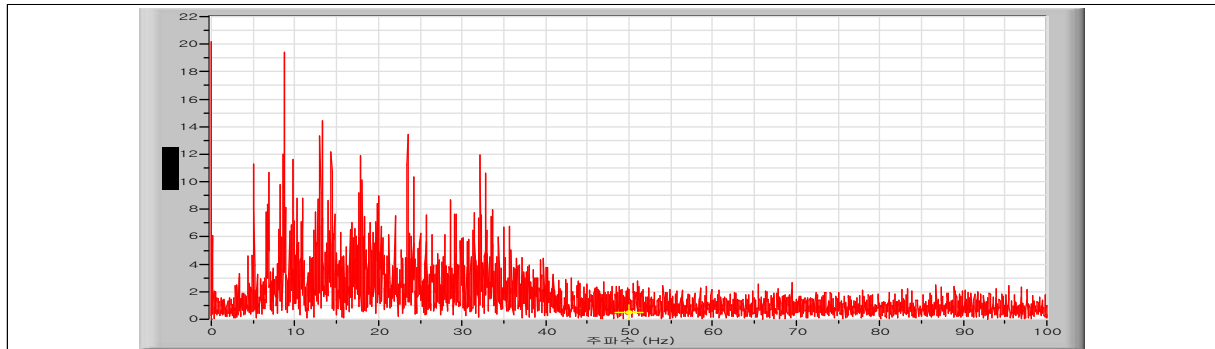
3번케이블 acc3



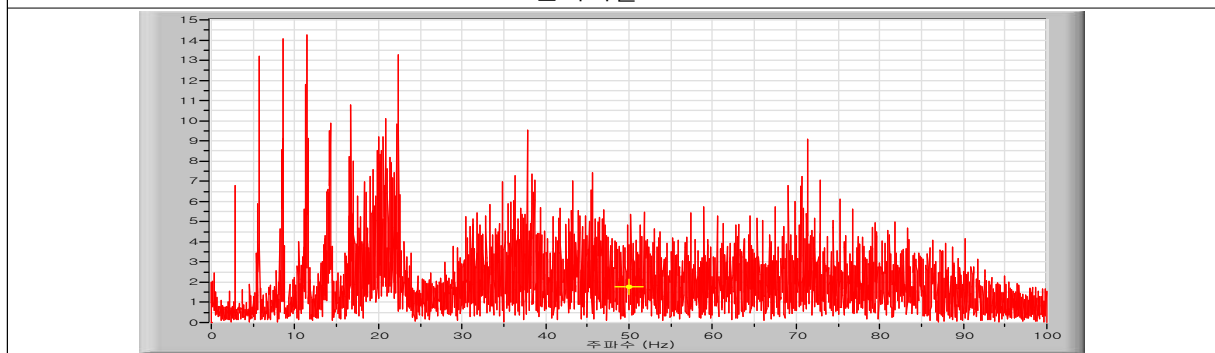
4번케이블 acc4



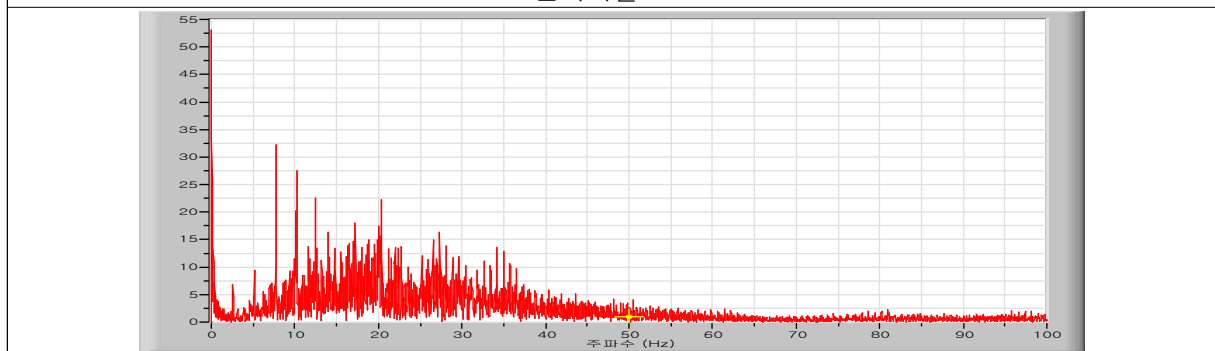
5번케이블 acc5



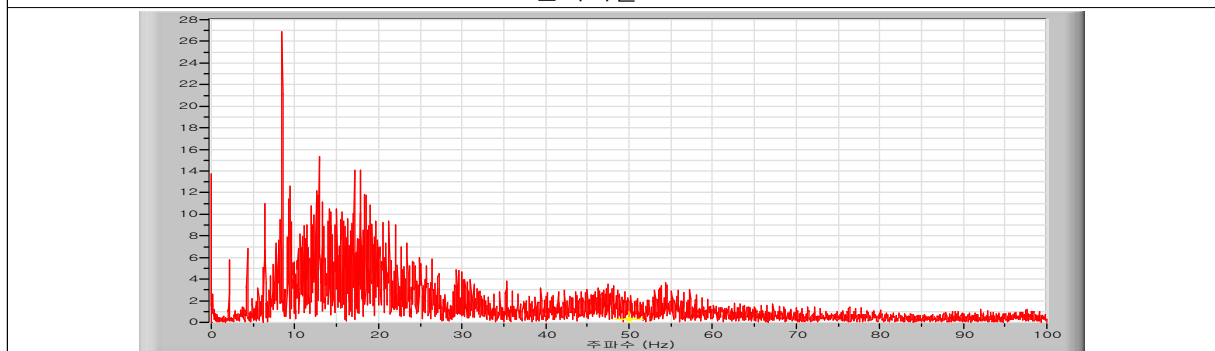
1번케이블 acc1



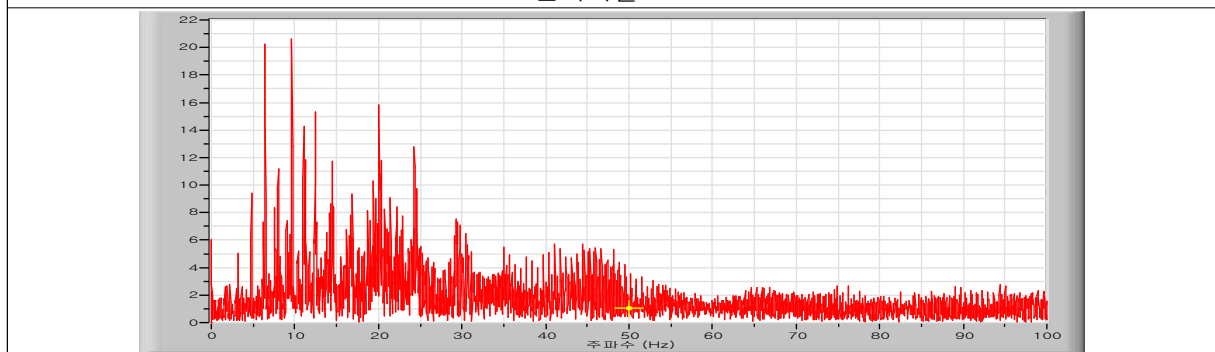
2번케이블 acc2



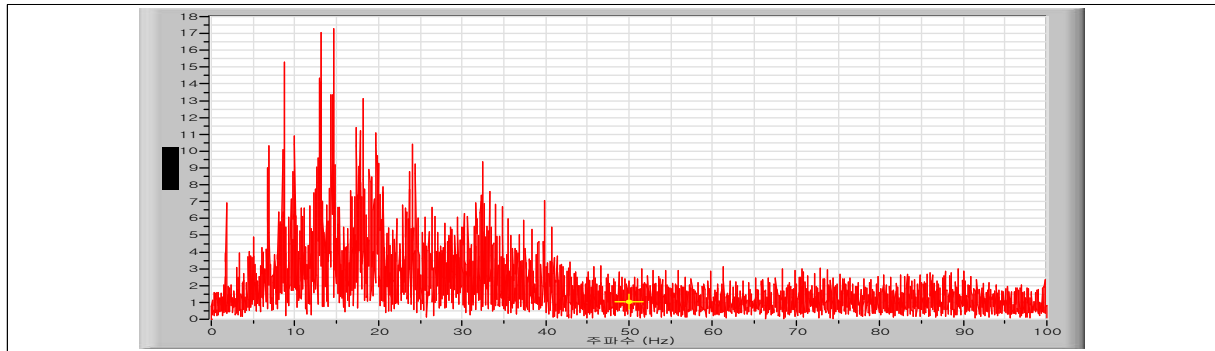
3번케이블 acc3



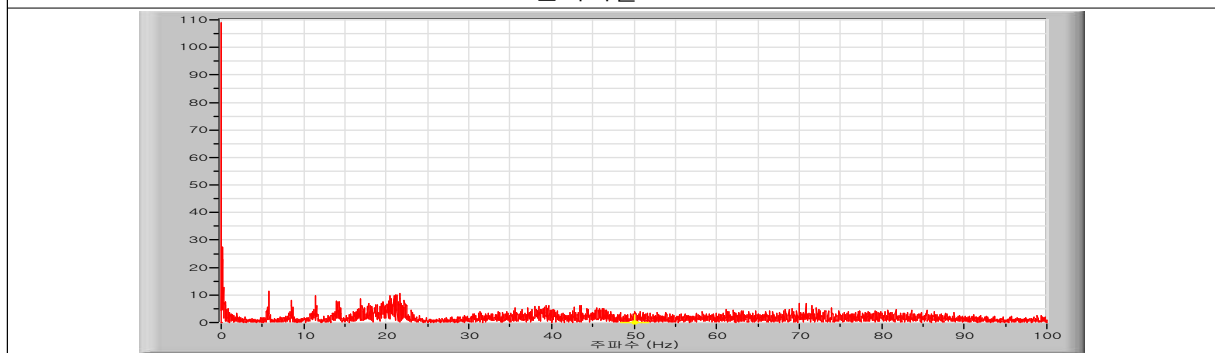
4번케이블 acc4



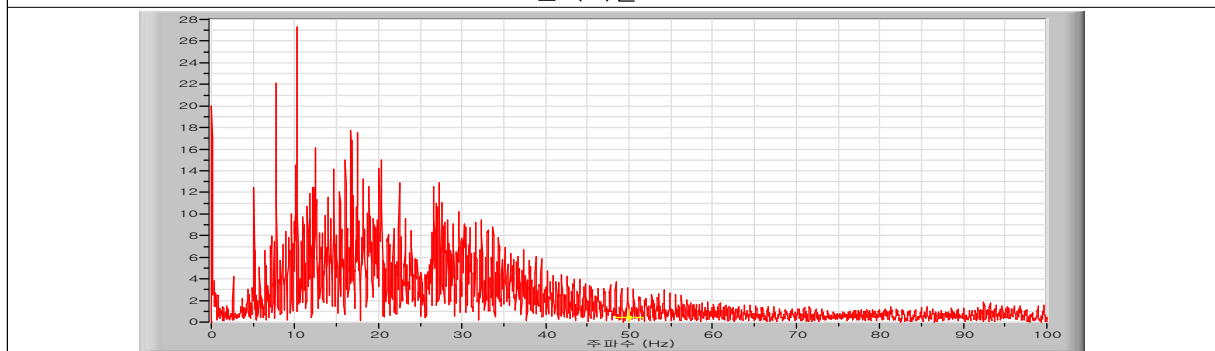
5번케이블 acc5



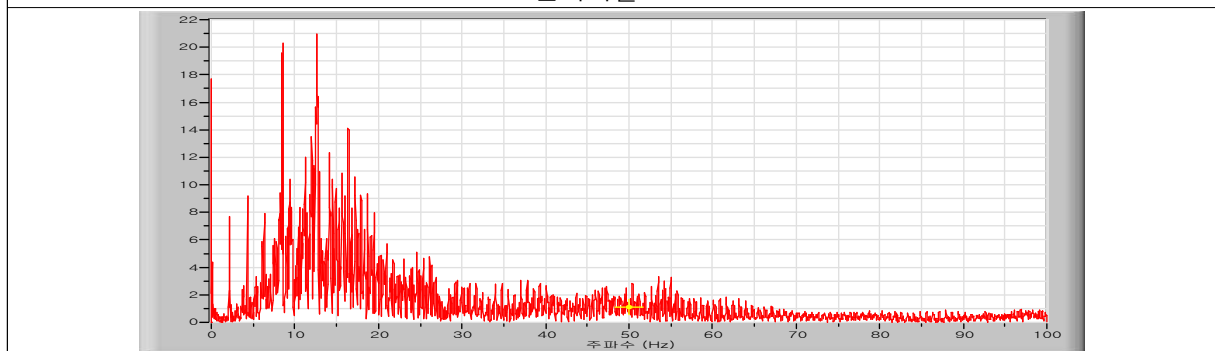
1번케이블 acc1



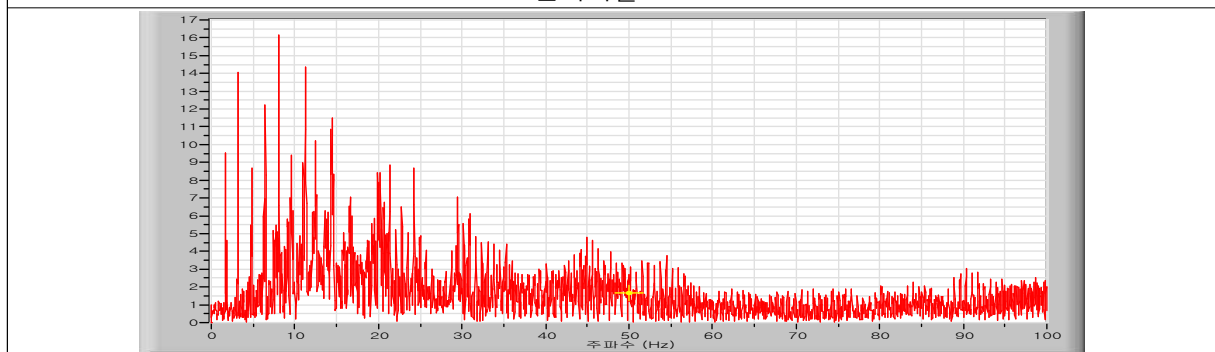
2번케이블 acc2



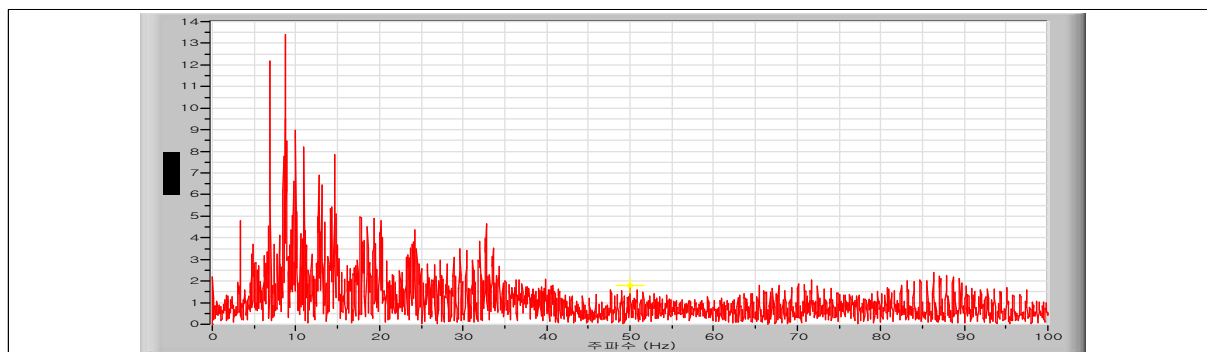
3번케이블 acc3



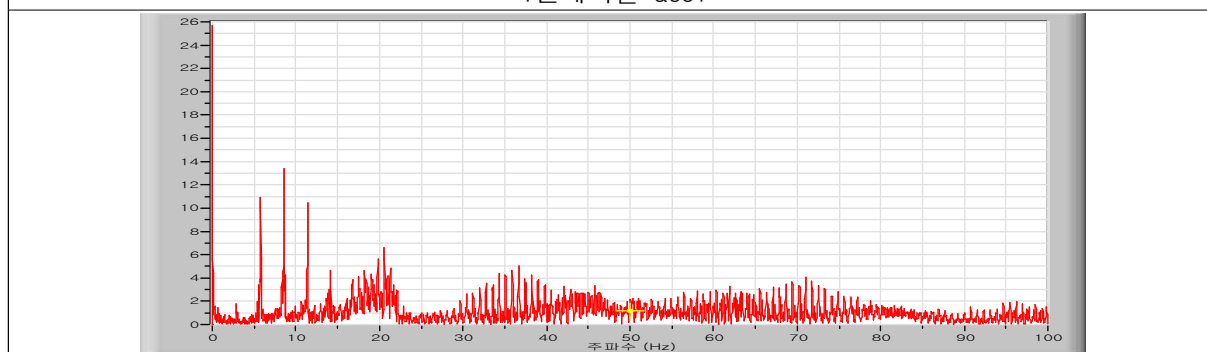
4번케이블 acc4



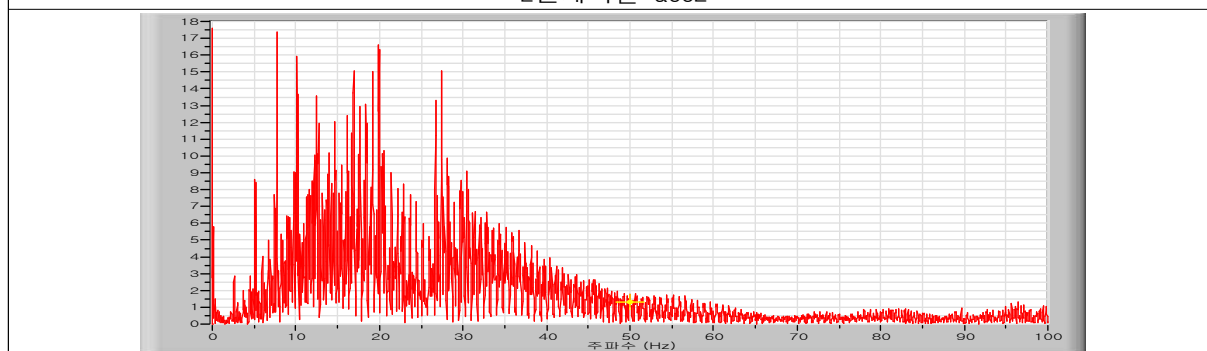
5번케이블 acc5



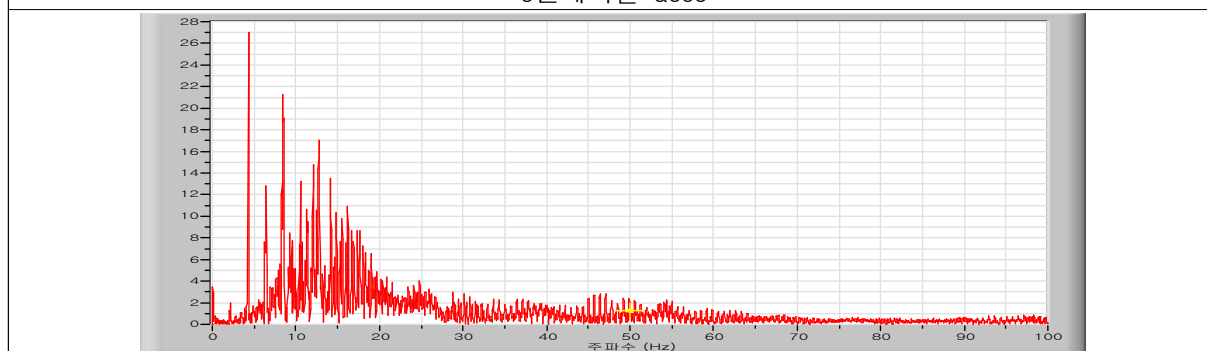
1번케이블 acc1



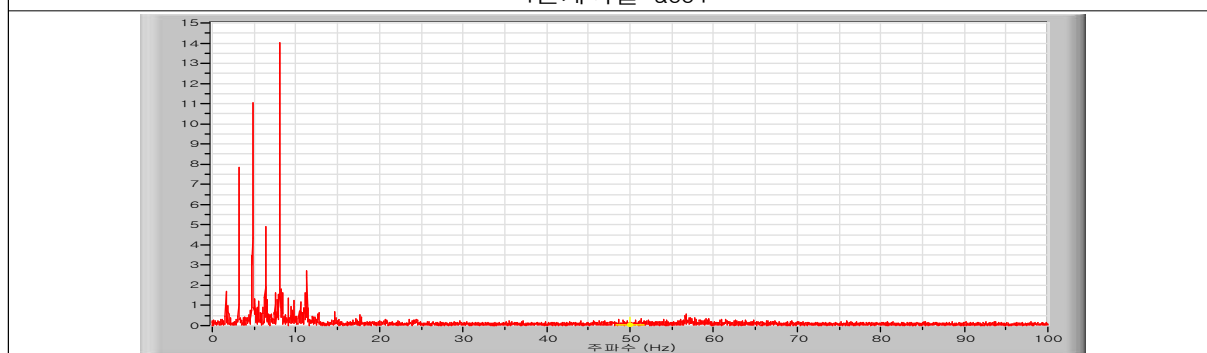
2번케이블 acc2



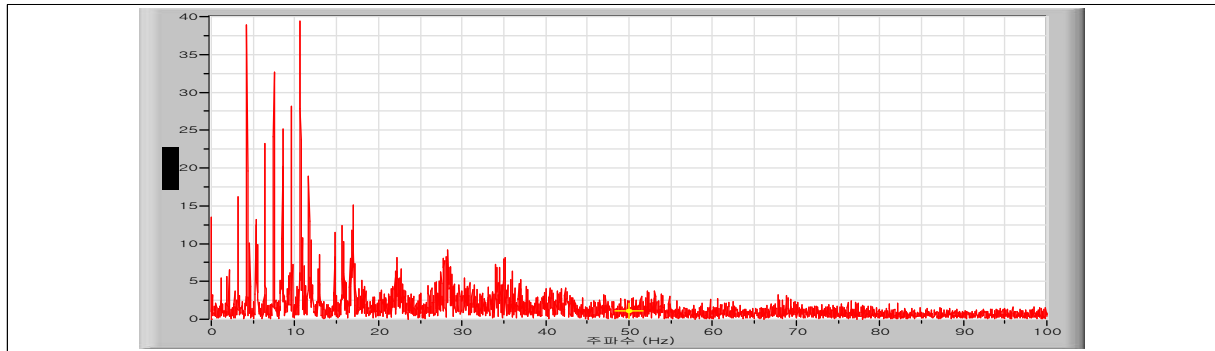
3번케이블 acc3



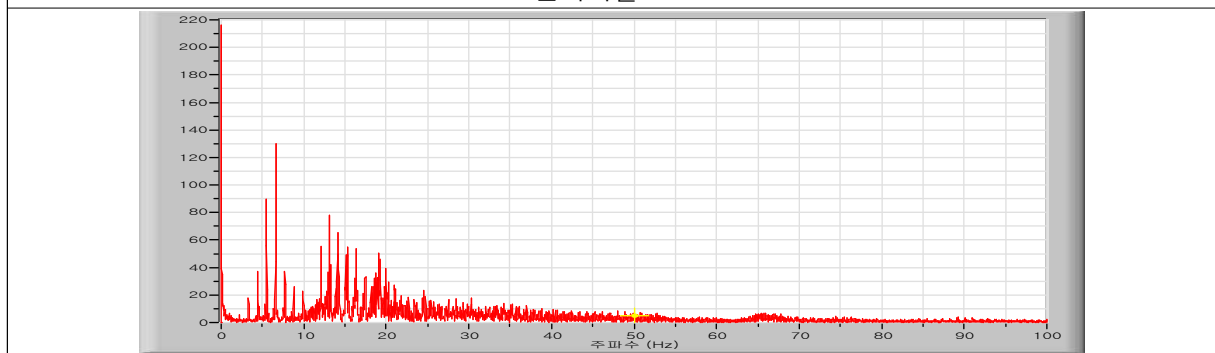
4번케이블 acc4



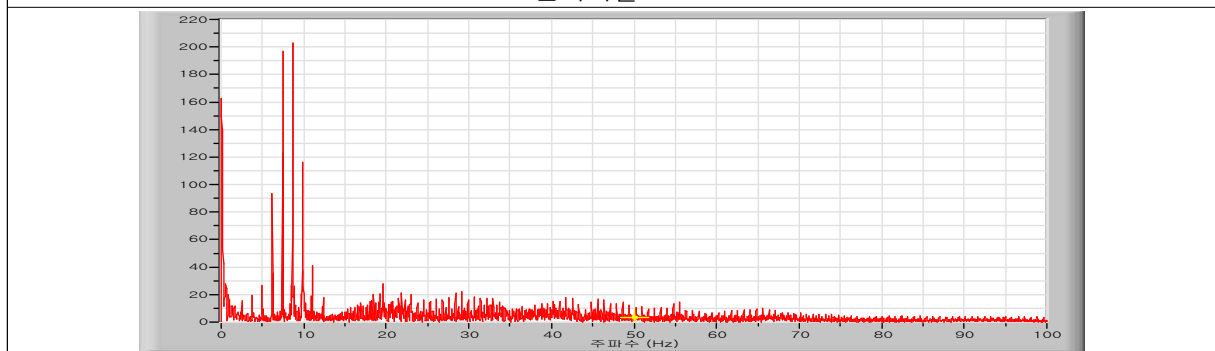
5번케이블 acc5



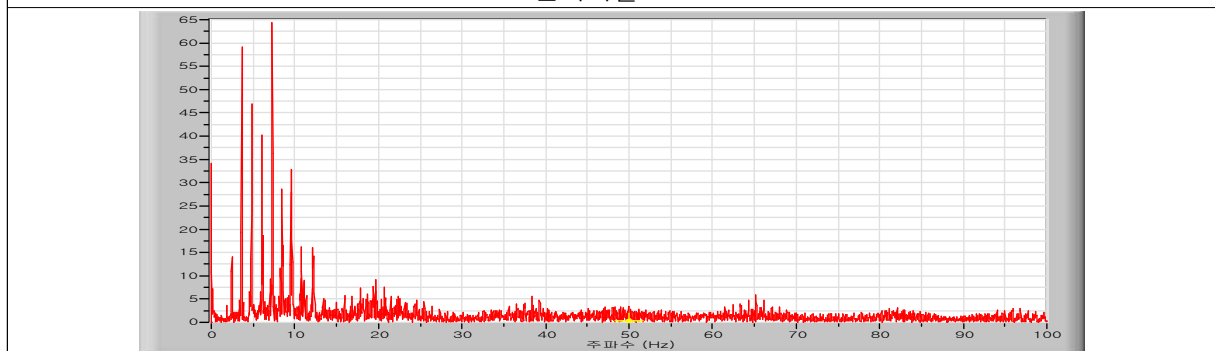
1번케이블 acc1



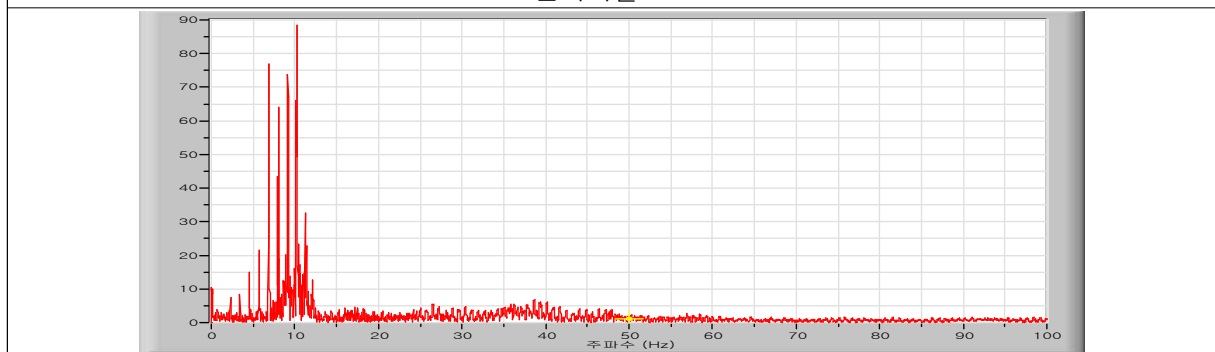
2번케이블 acc2



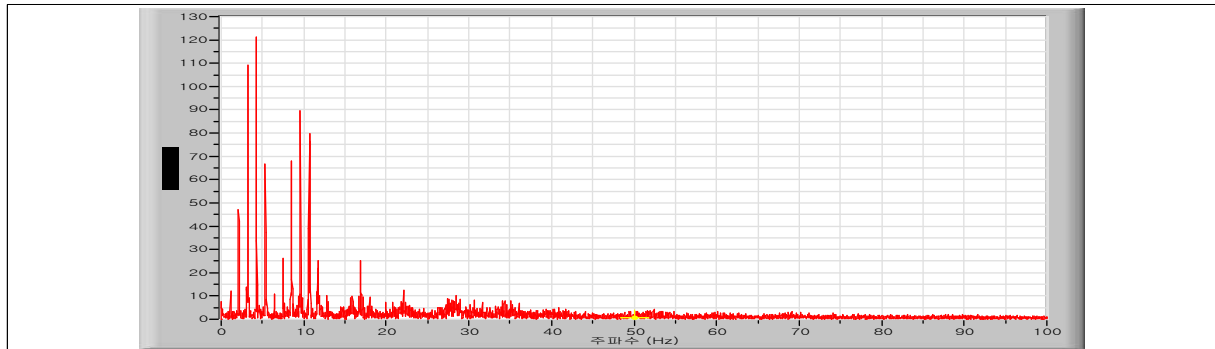
3번케이블 acc3



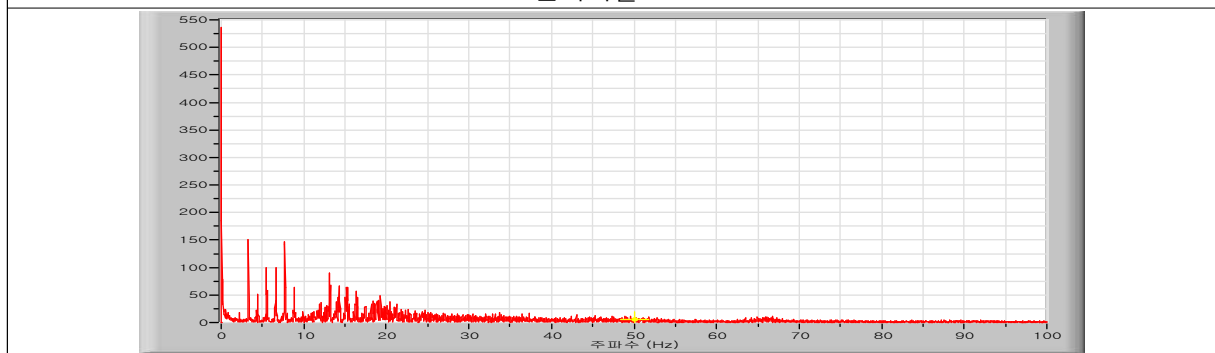
4번케이블 acc4



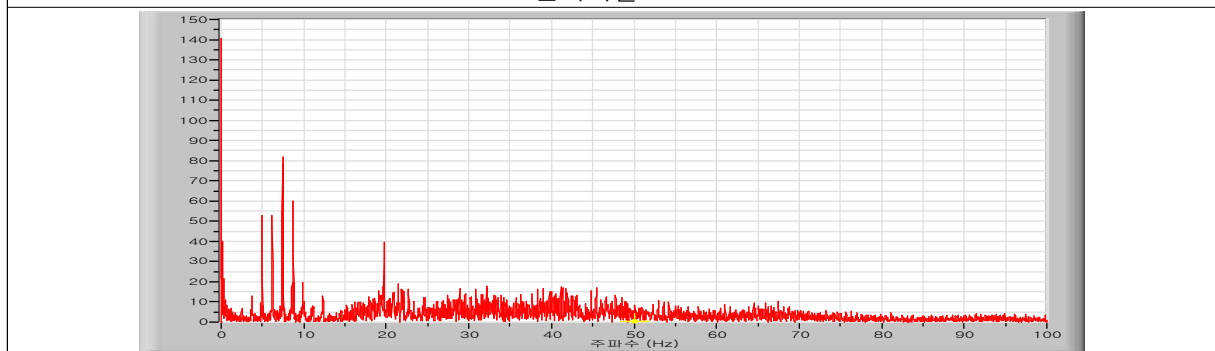
5번케이블 acc5



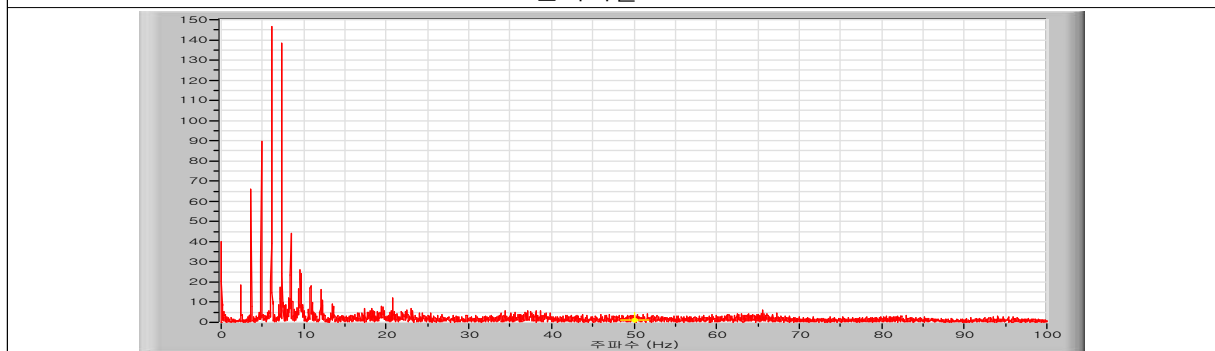
1번케이블 acc1



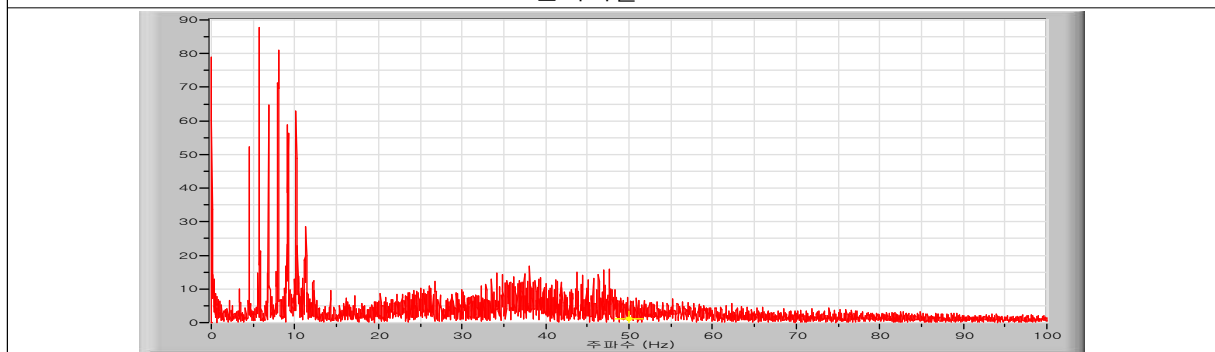
2번케이블 acc2



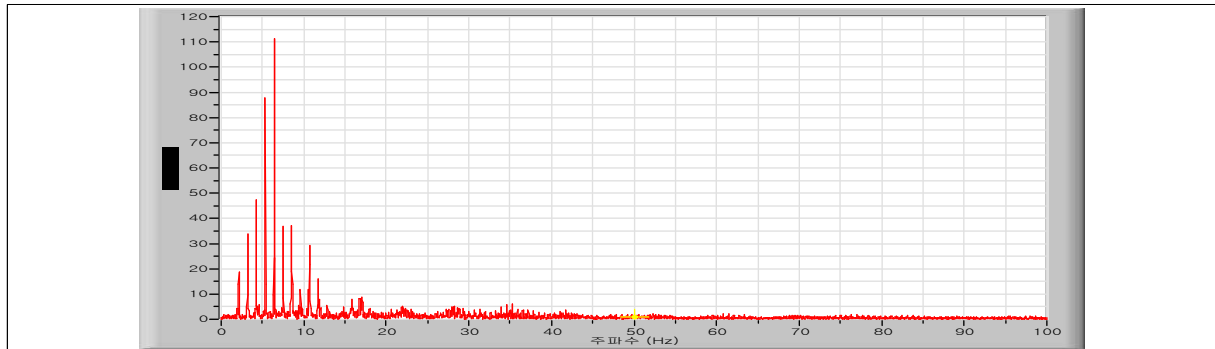
3번케이블 acc3



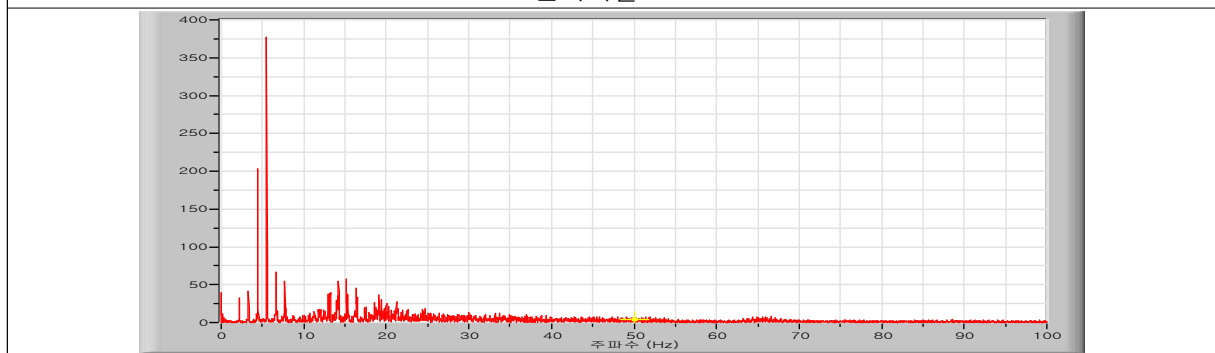
4번케이블 acc4



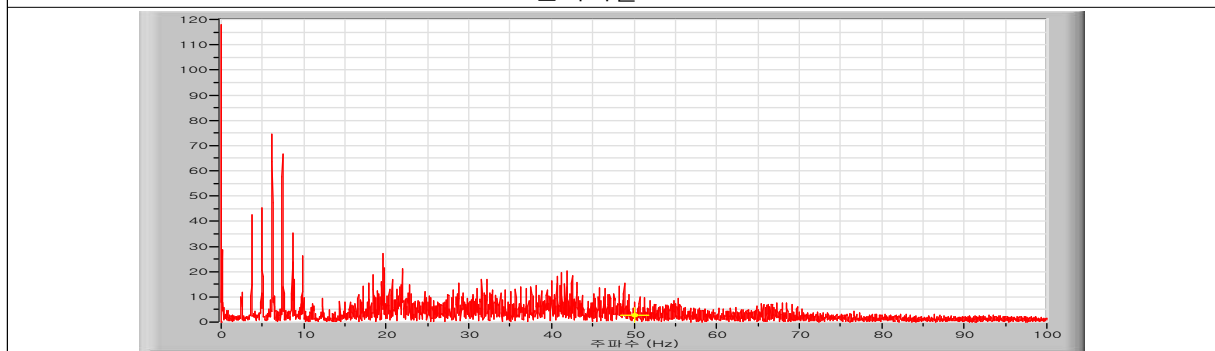
5번케이블 acc5



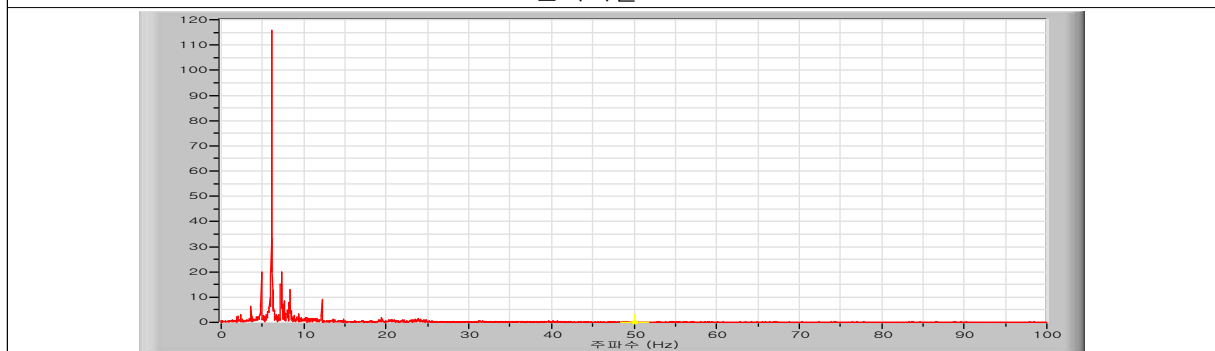
1번케이블 acc1



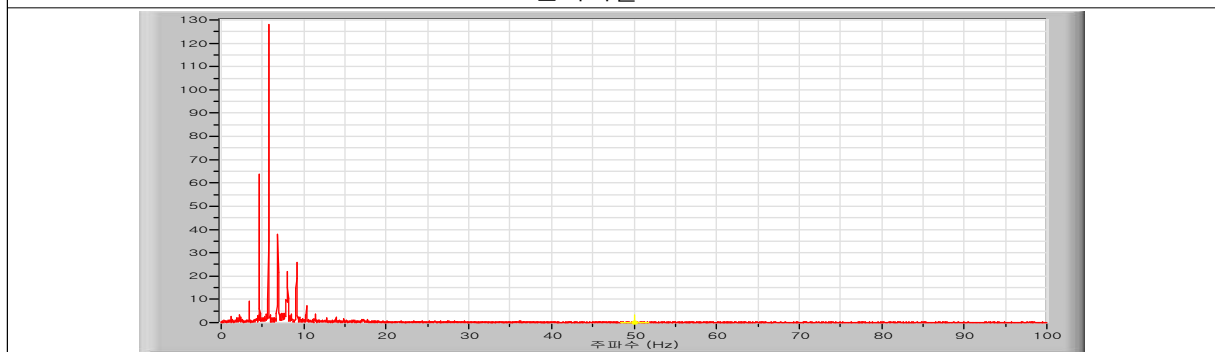
2번케이블 acc2



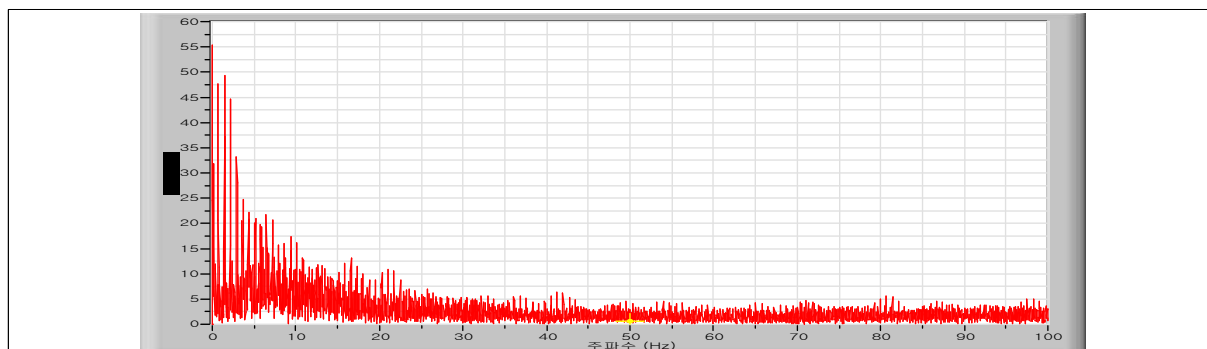
3번케이블 acc3



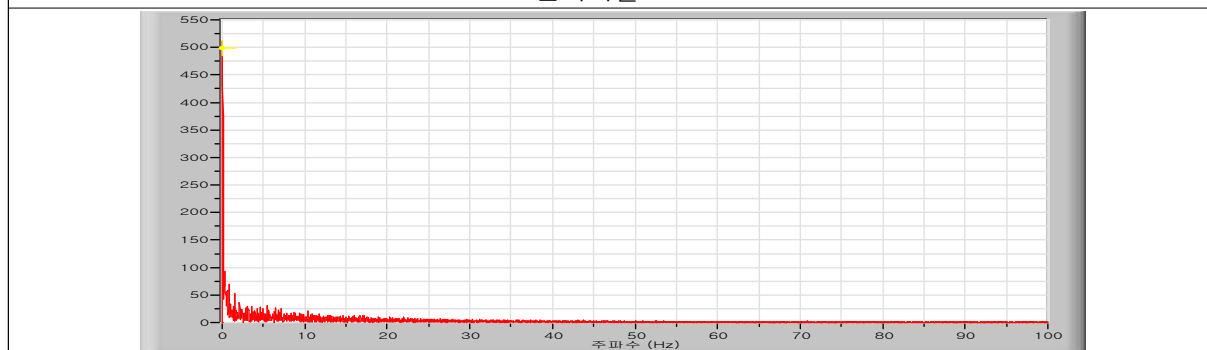
4번케이블 acc4



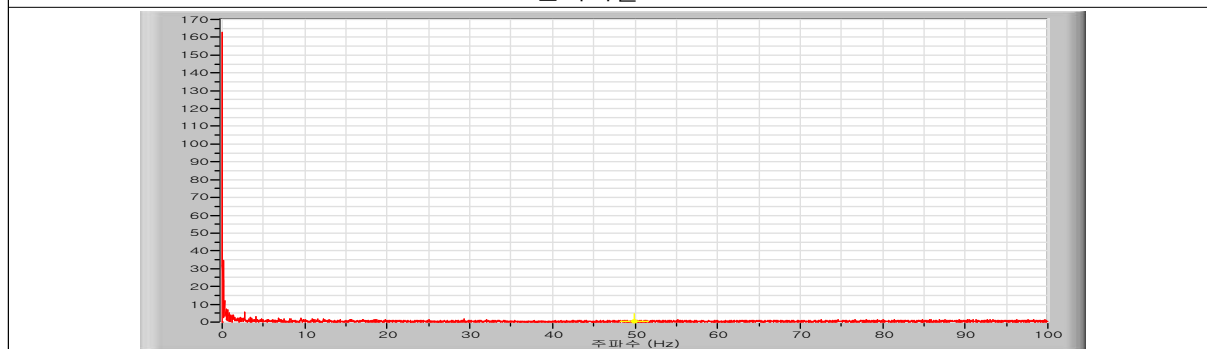
5번케이블 acc5



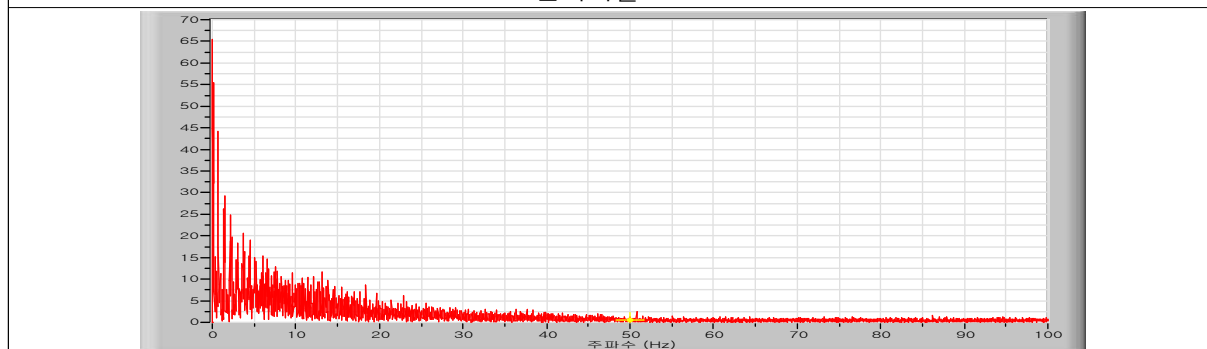
1번케이블 acc1



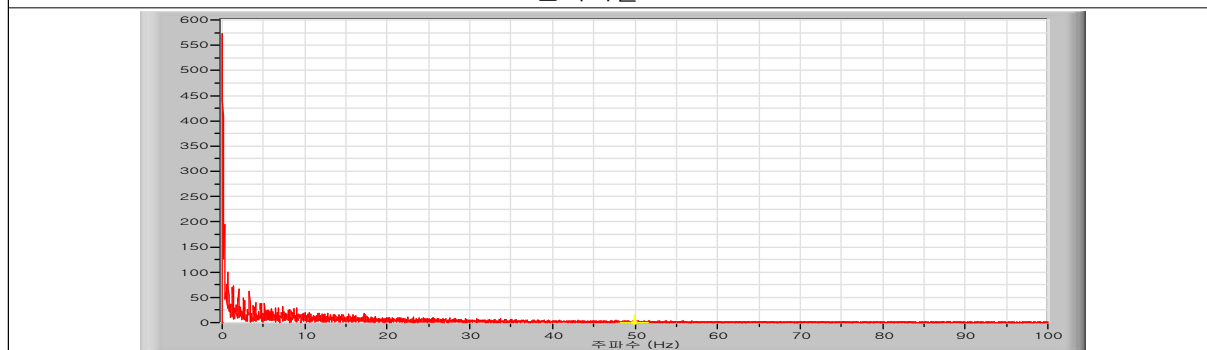
2번케이블 acc2



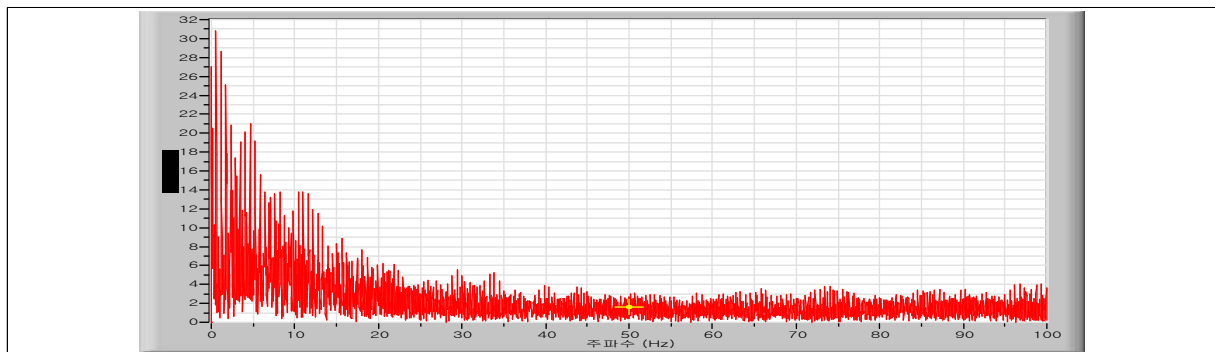
3번케이블 acc3



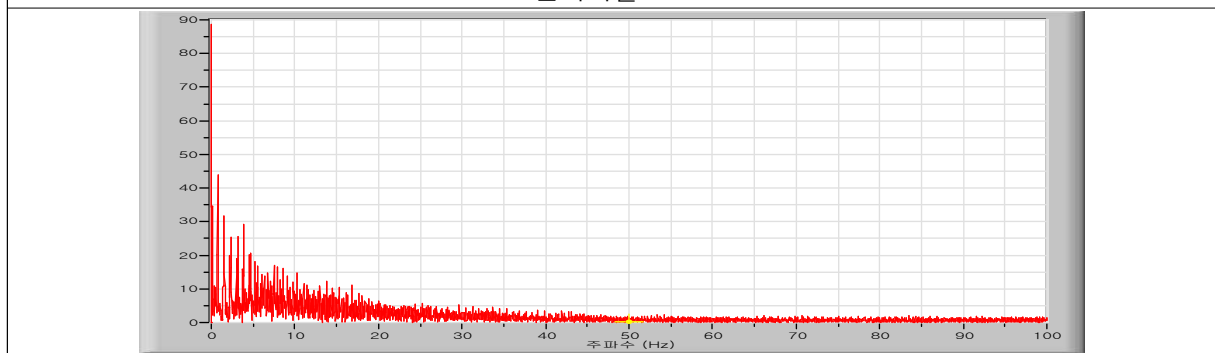
4번케이블 acc4



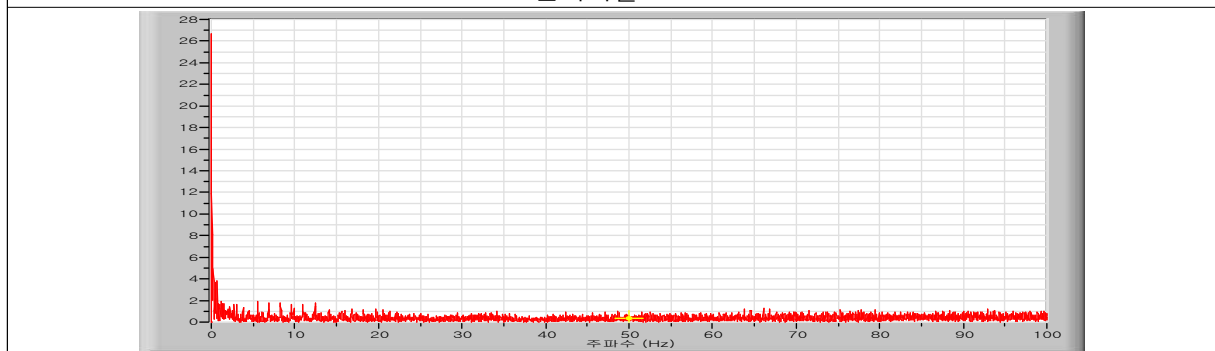
5번케이블 acc5



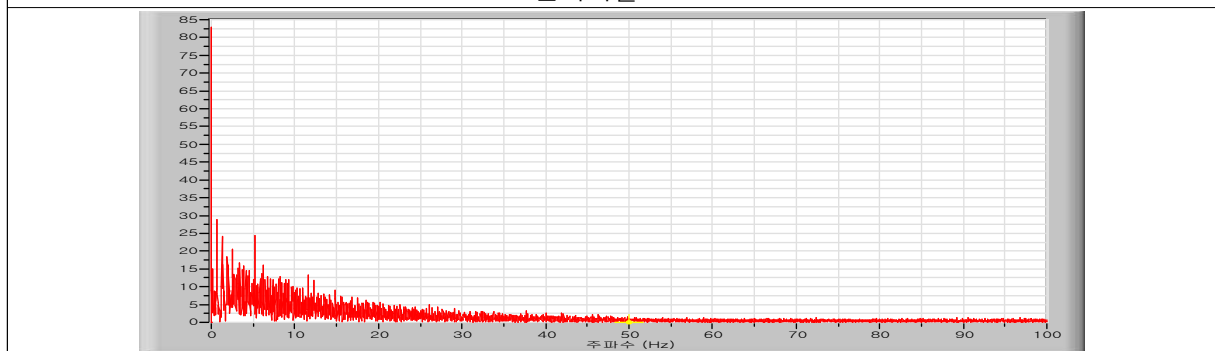
1번케이블 acc1



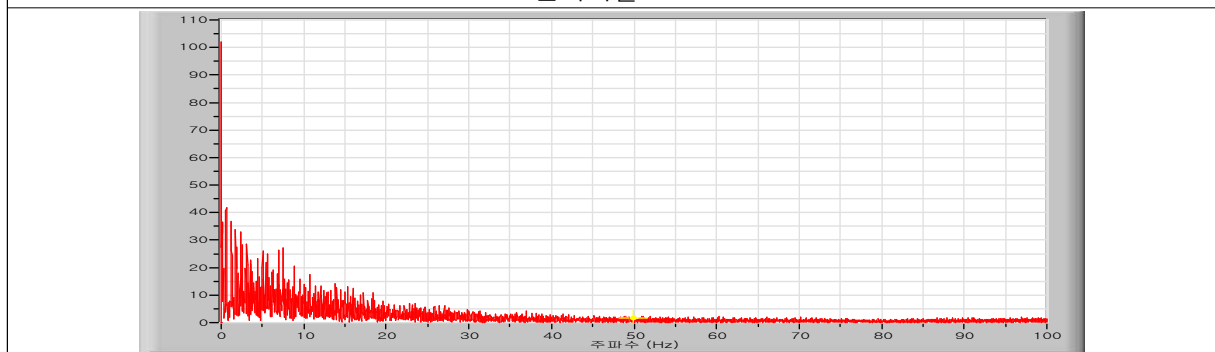
2번케이블 acc2



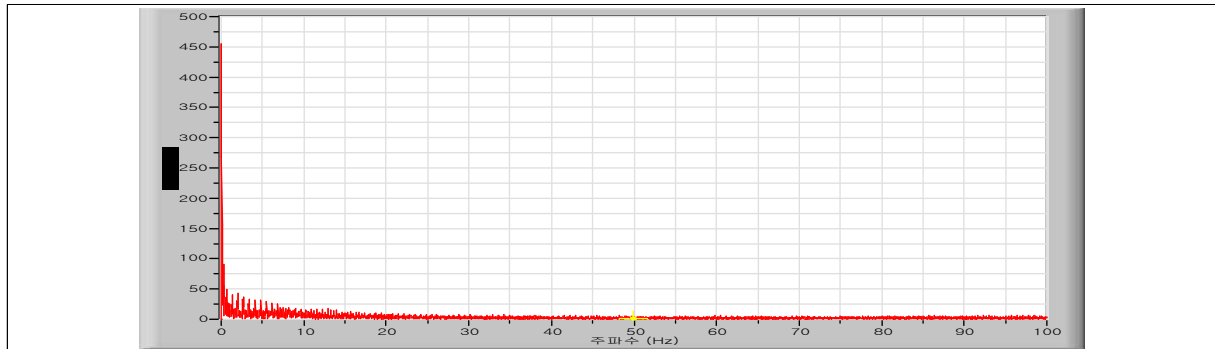
3번케이블 acc3



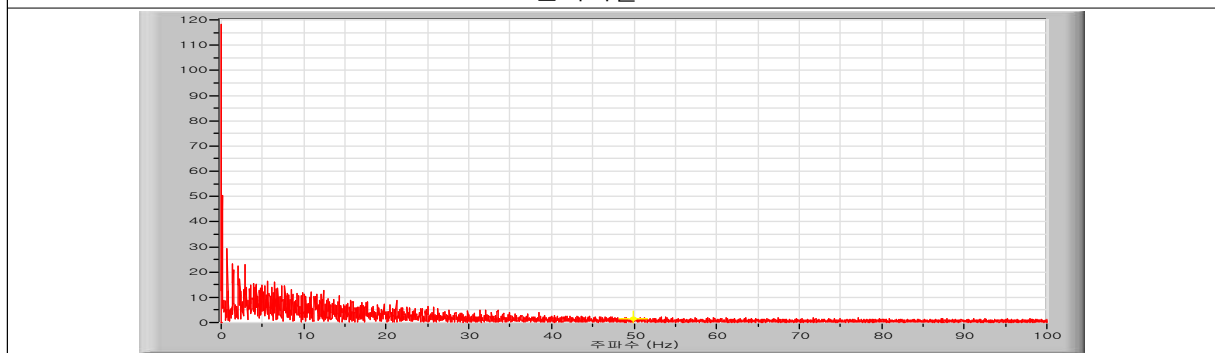
4번케이블 acc4



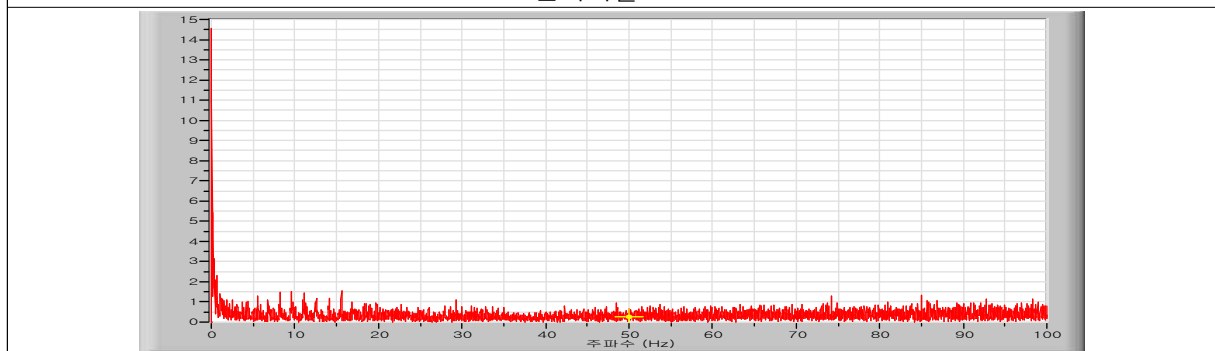
5번케이블 acc5



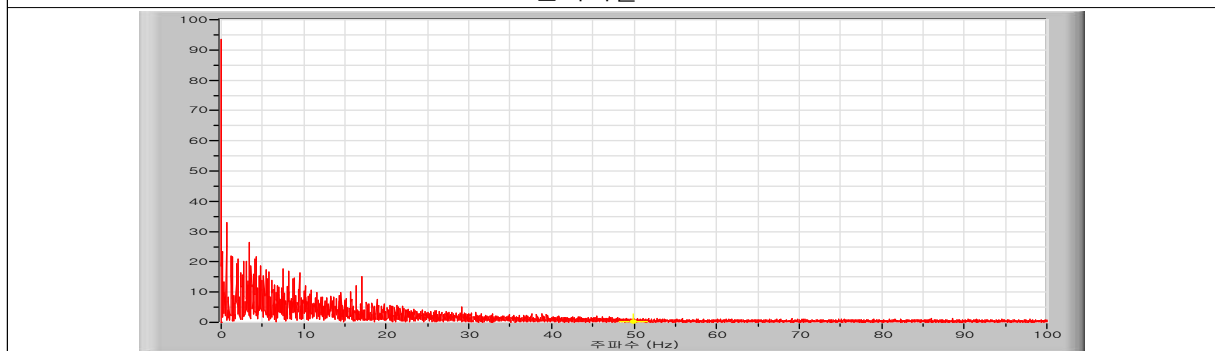
1번케이블 acc1



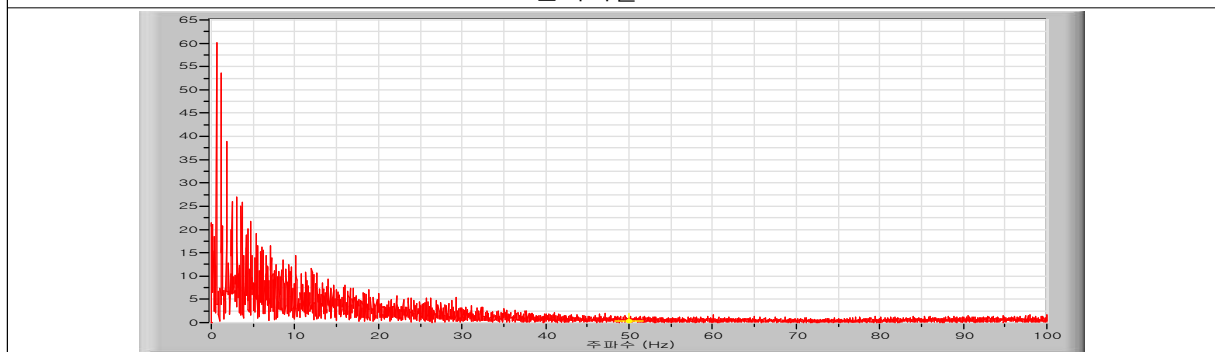
2번케이블 acc2



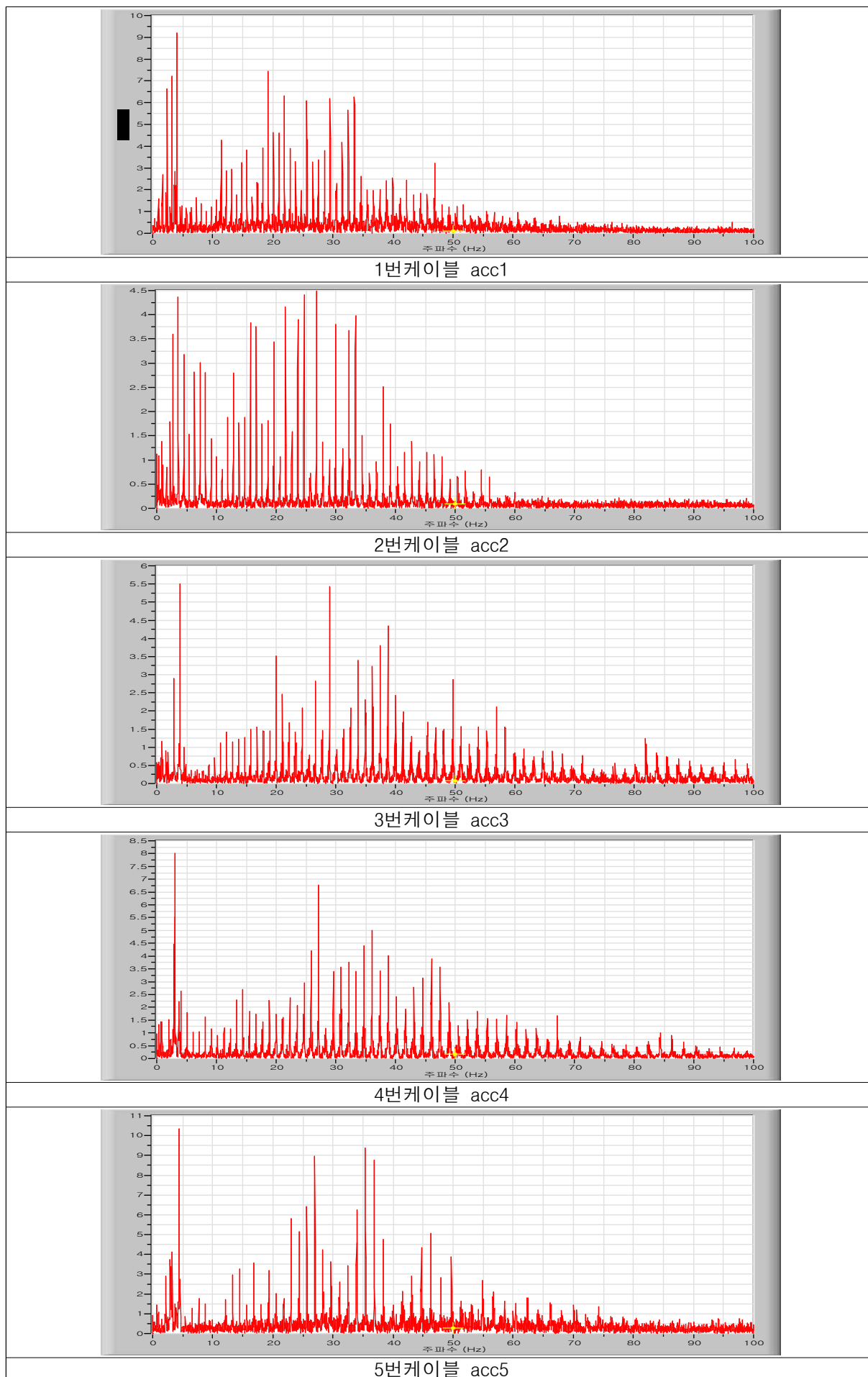
3번케이블 acc3

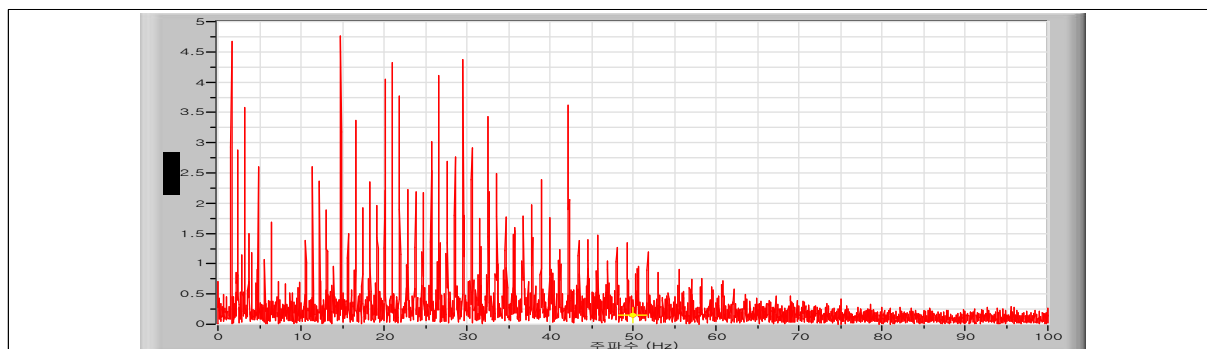


4번케이블 acc4

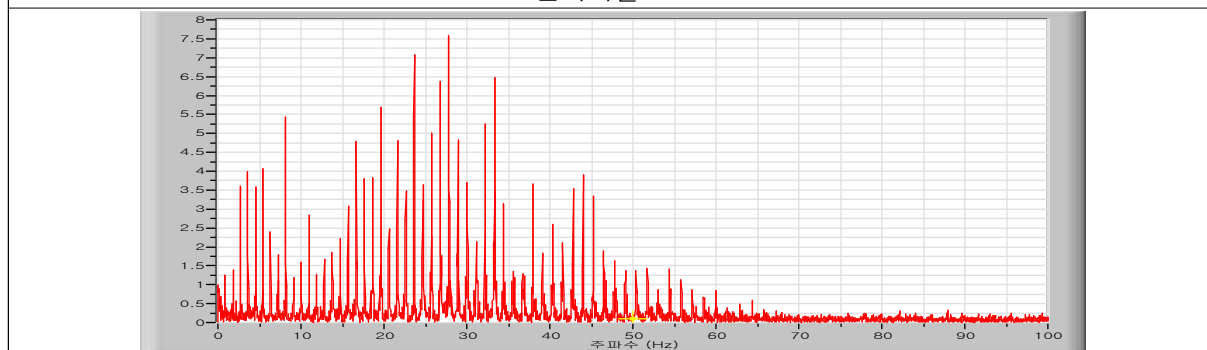


5번케이블 acc5

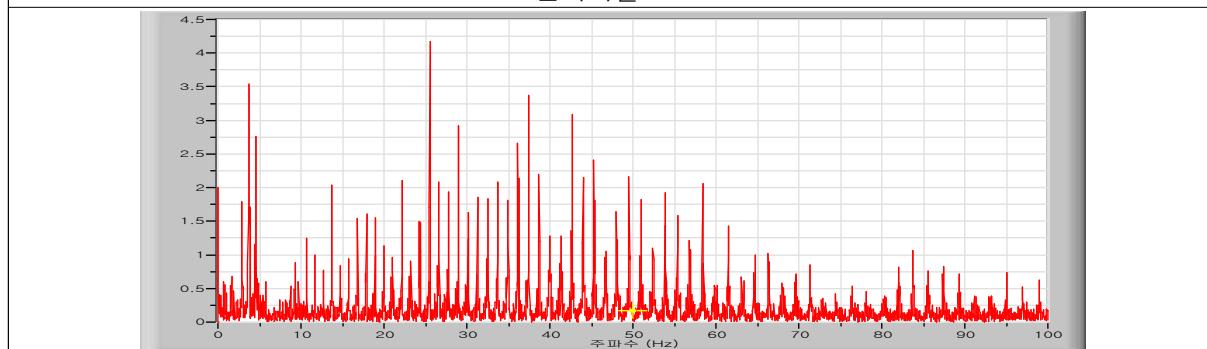




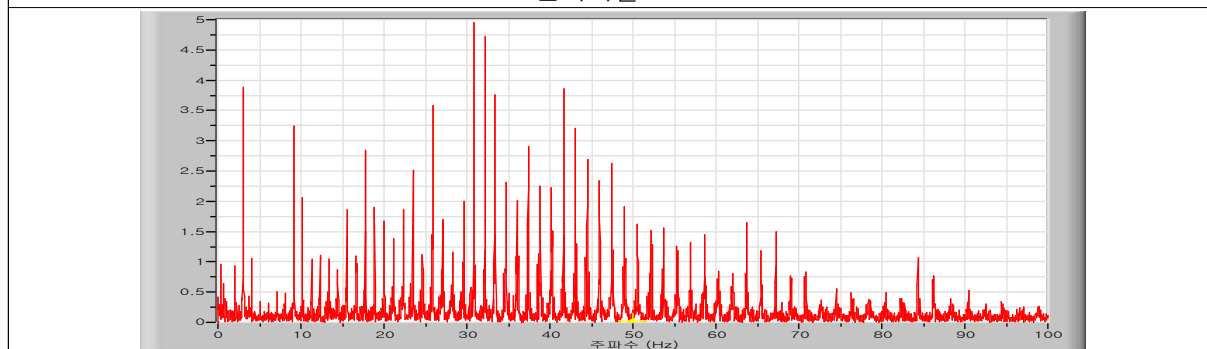
1번케이블 acc1



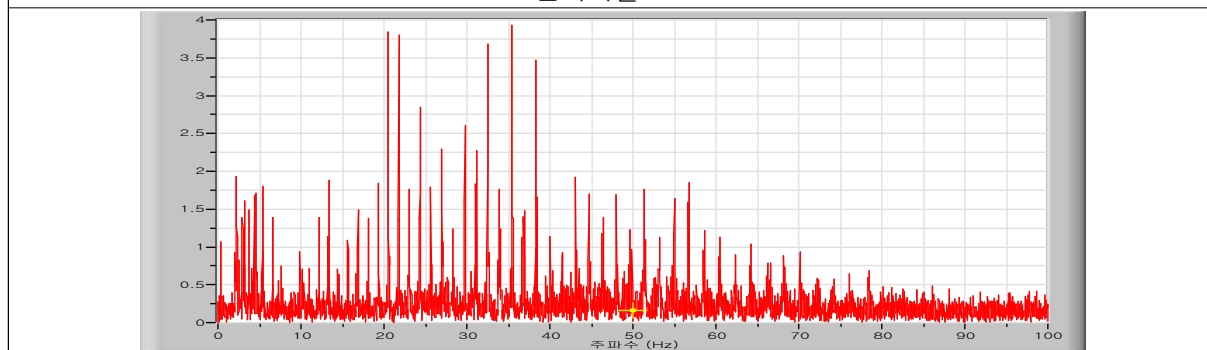
2번케이블 acc2



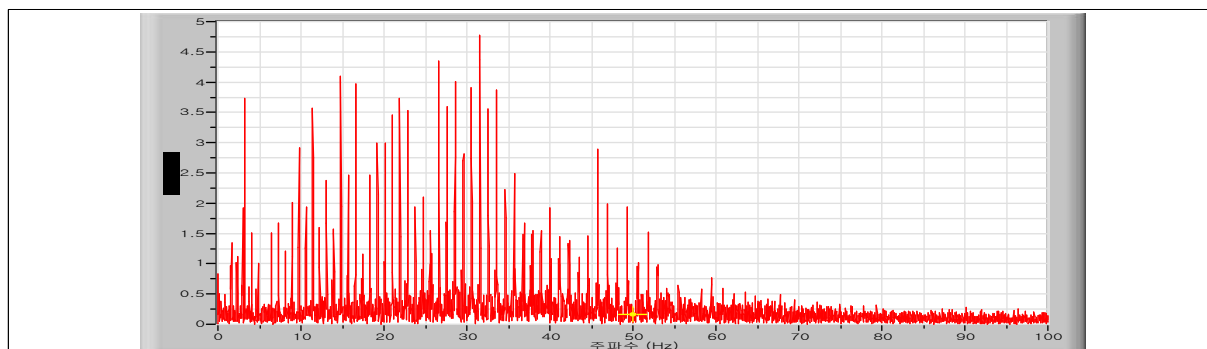
3번케이블 acc3



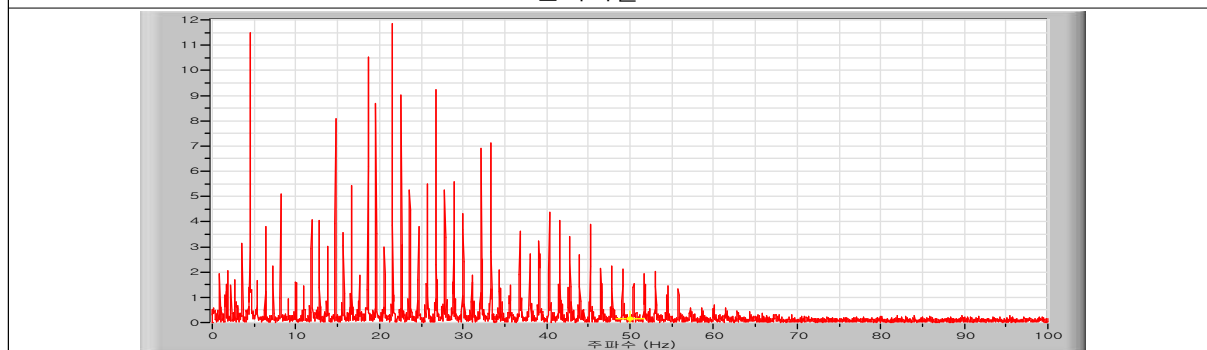
4번케이블 acc4



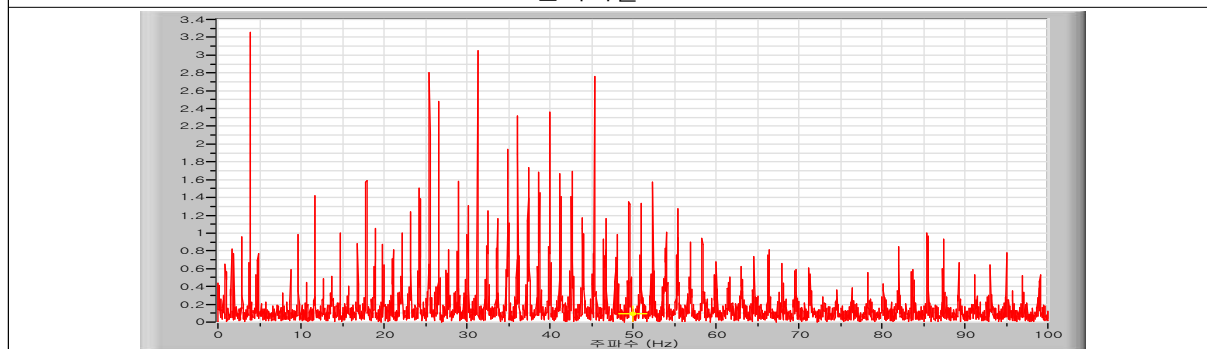
5번케이블 acc5



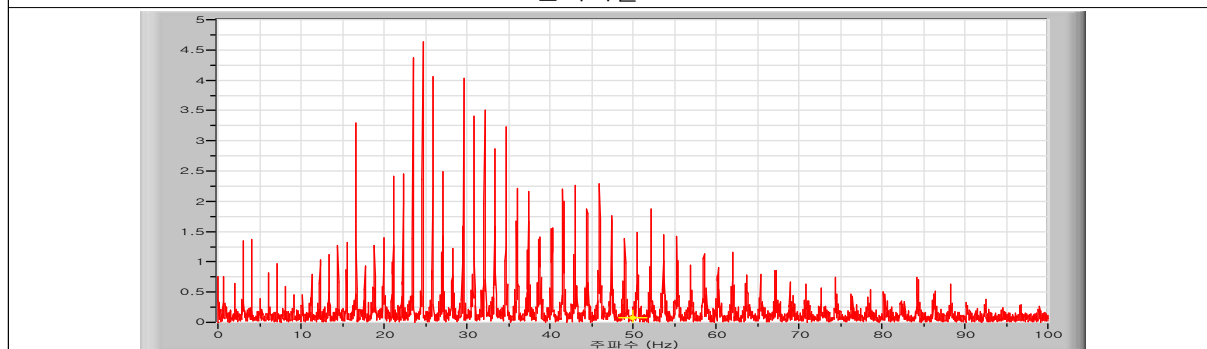
1번케이블 acc1



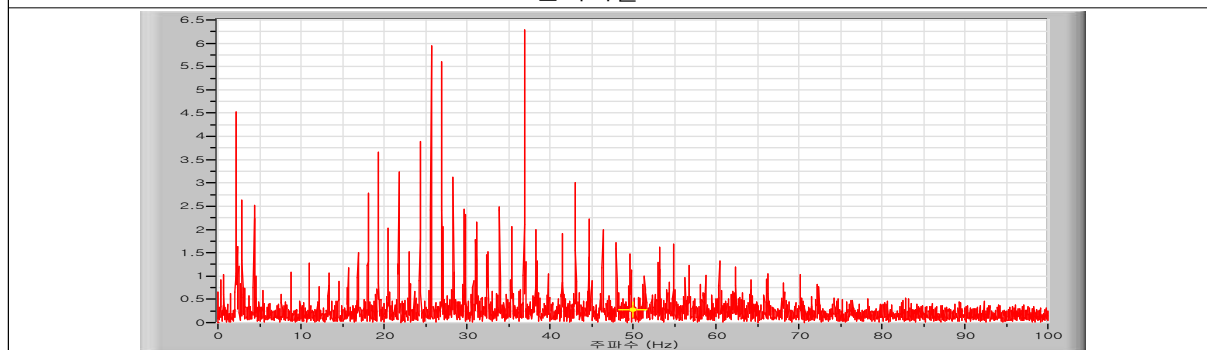
2번케이블 acc2



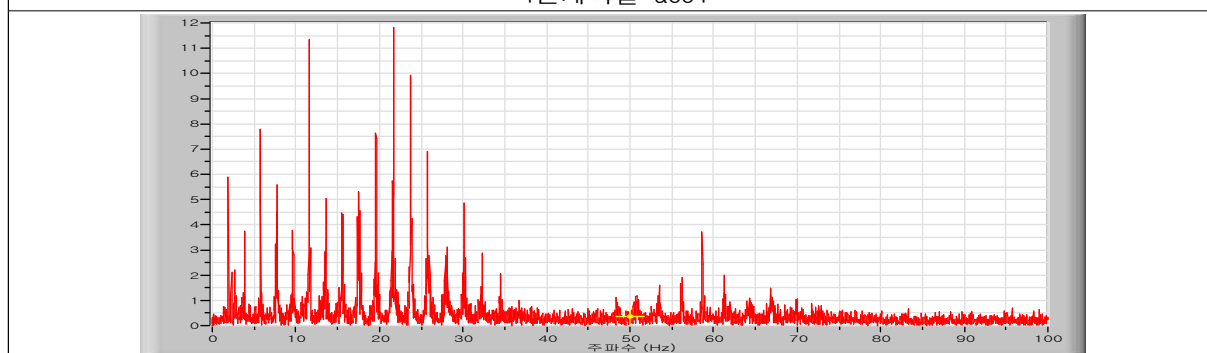
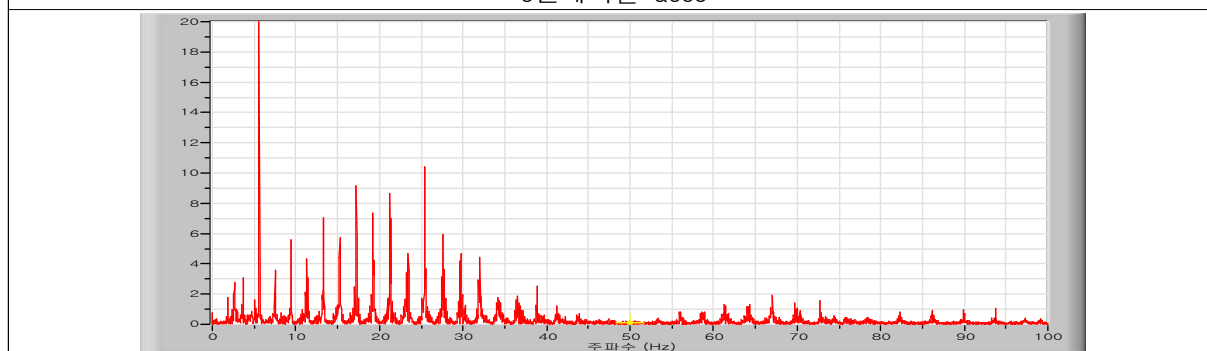
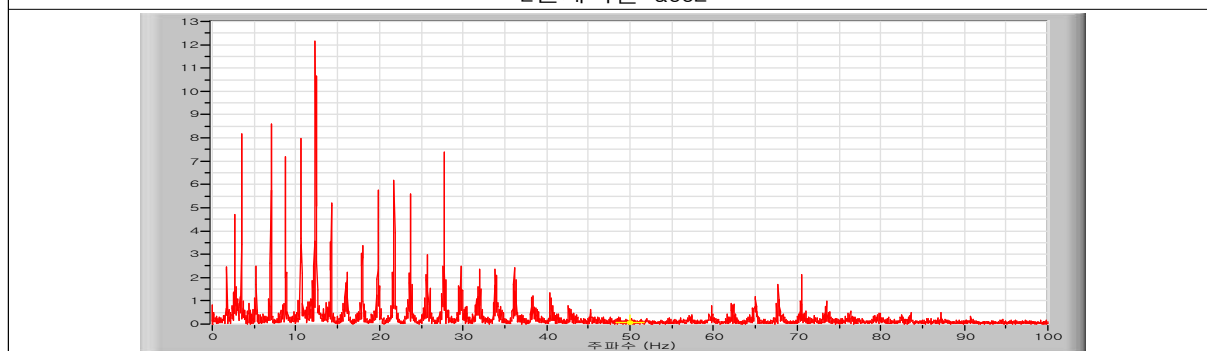
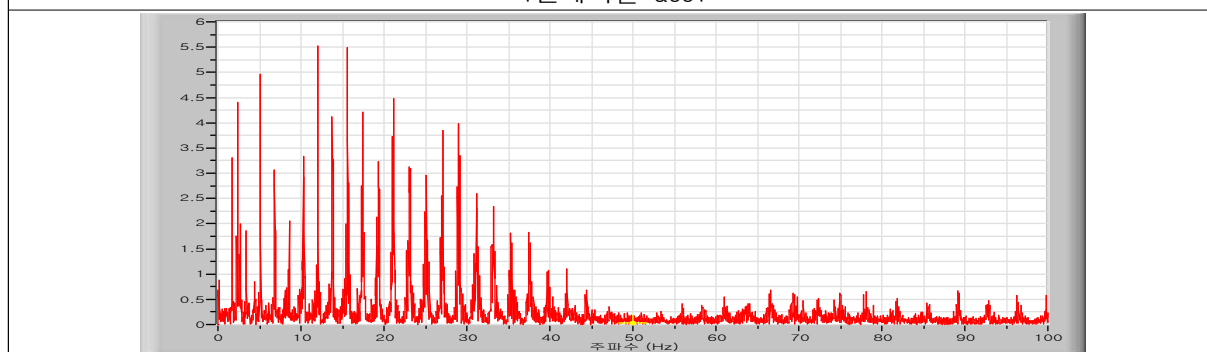
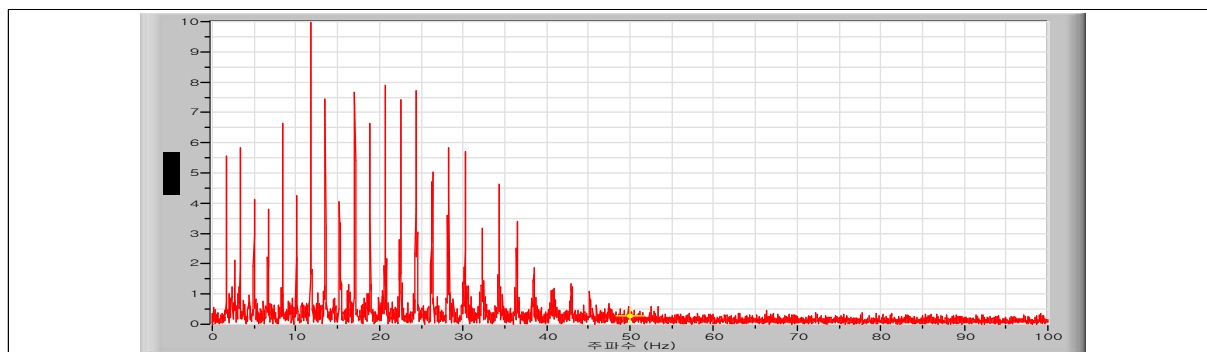
3번케이블 acc3

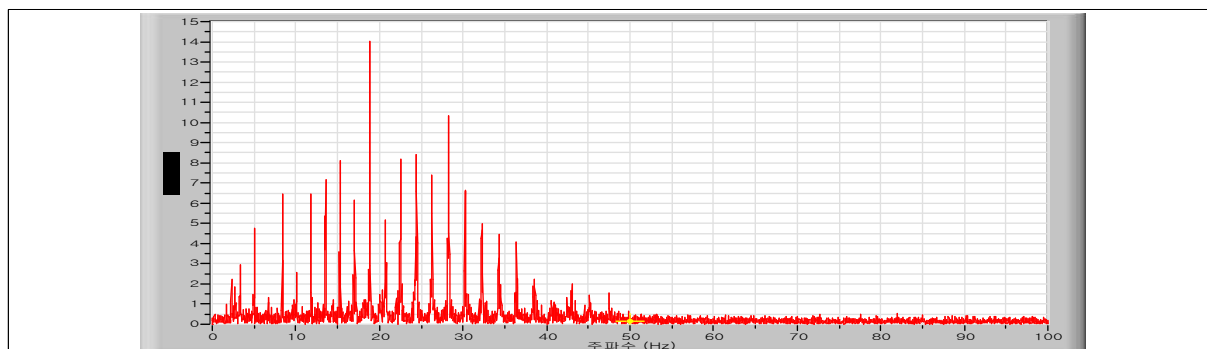


4번케이블 acc4

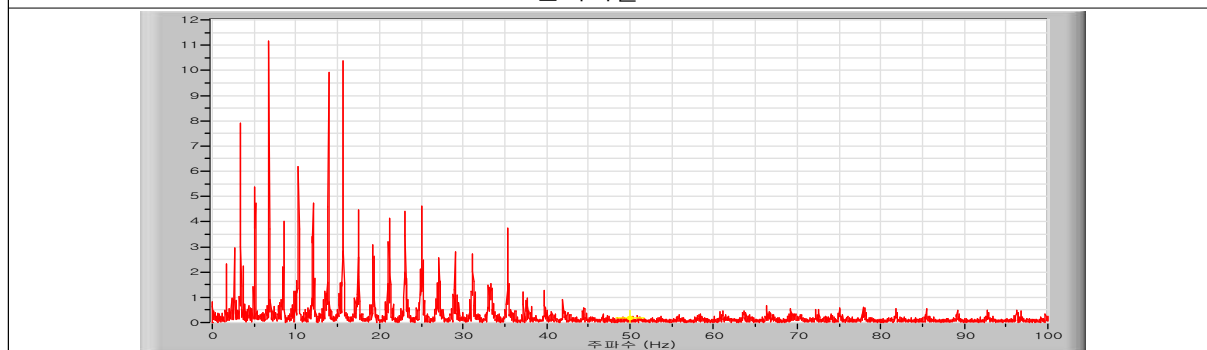


5번케이블 acc5

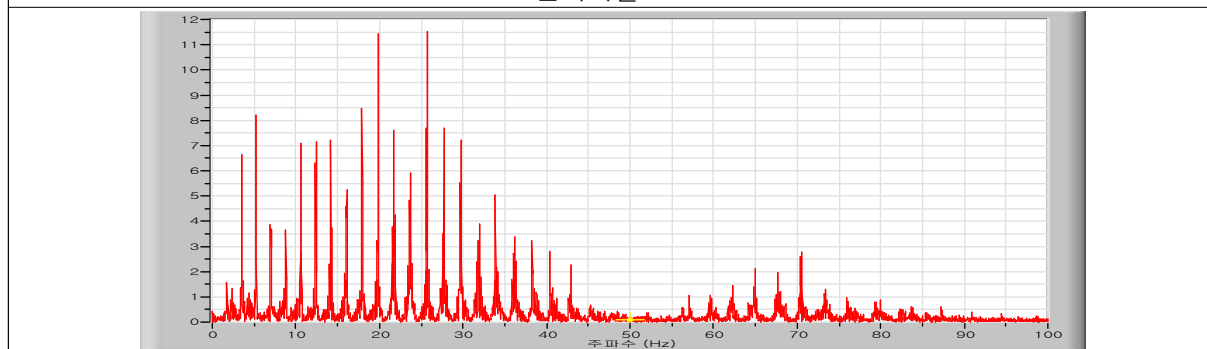




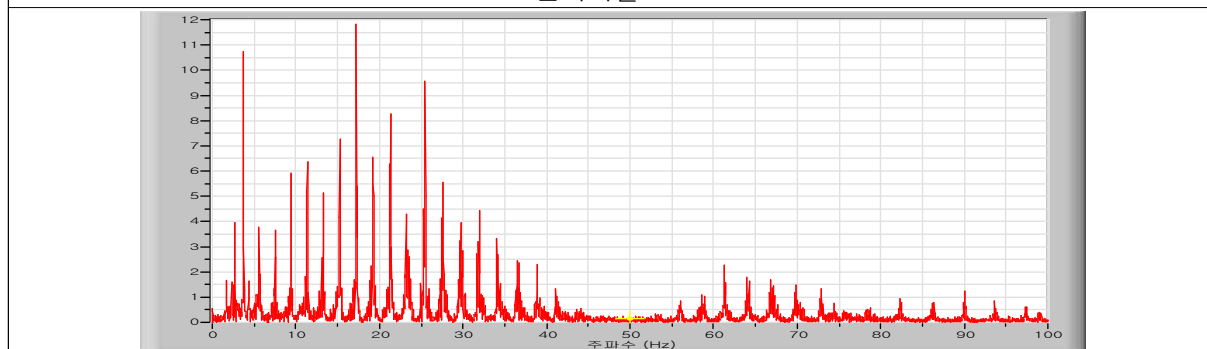
1번케이블 acc1



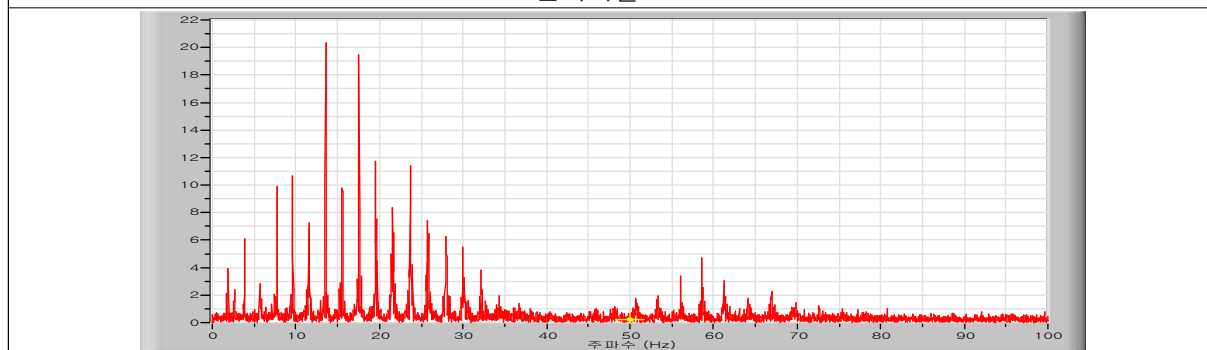
2번케이블 acc2



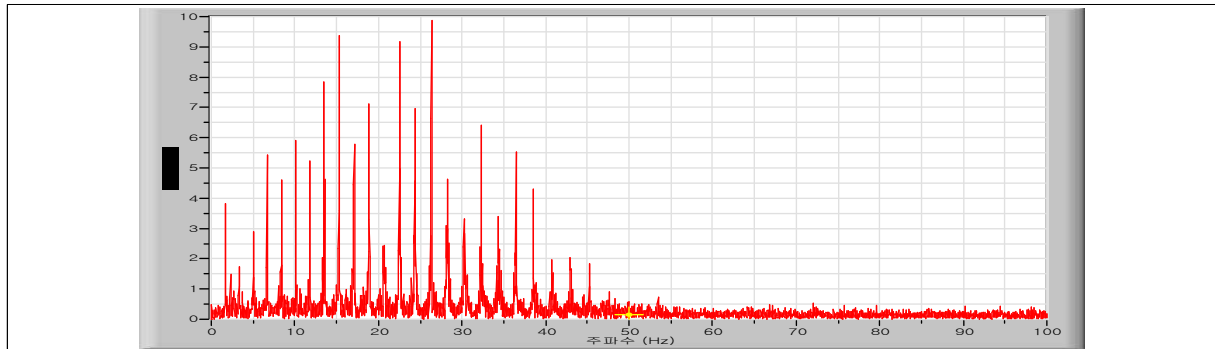
3번케이블 acc3



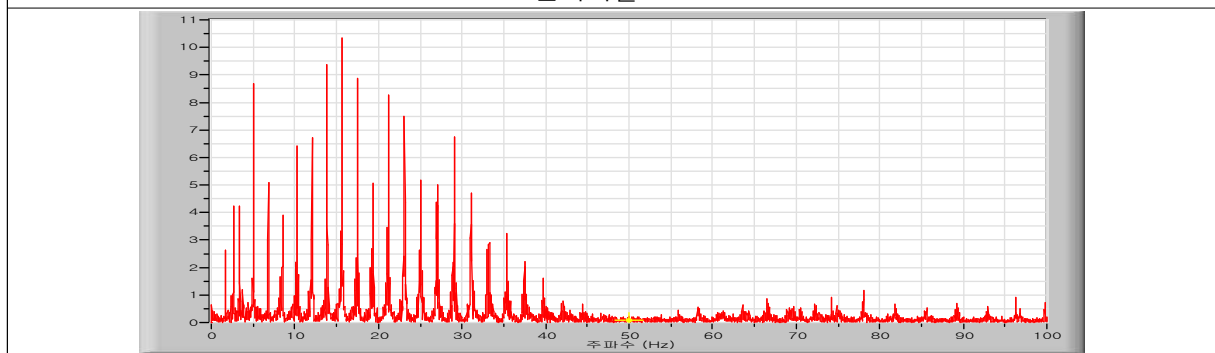
4번케이블 acc4



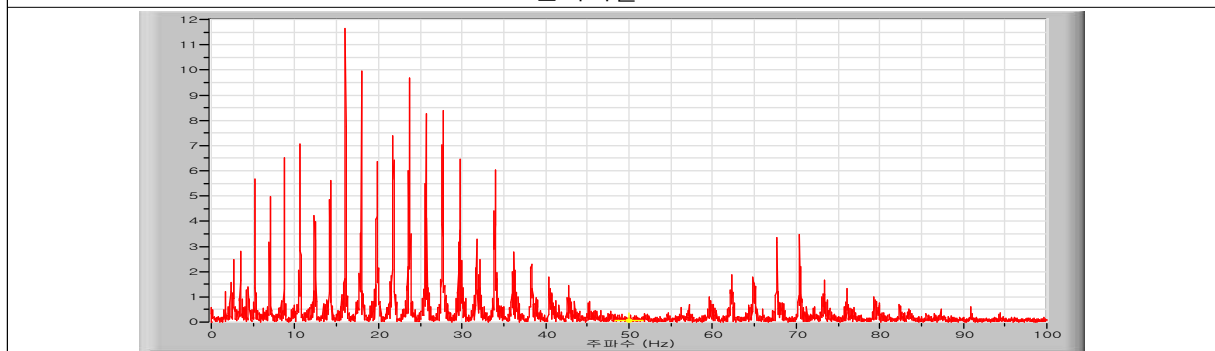
5번케이블 acc5



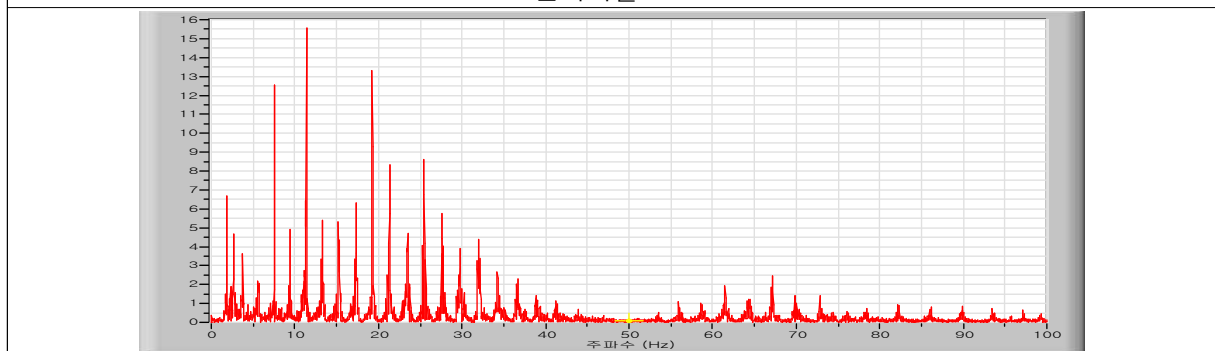
1번케이블 acc1



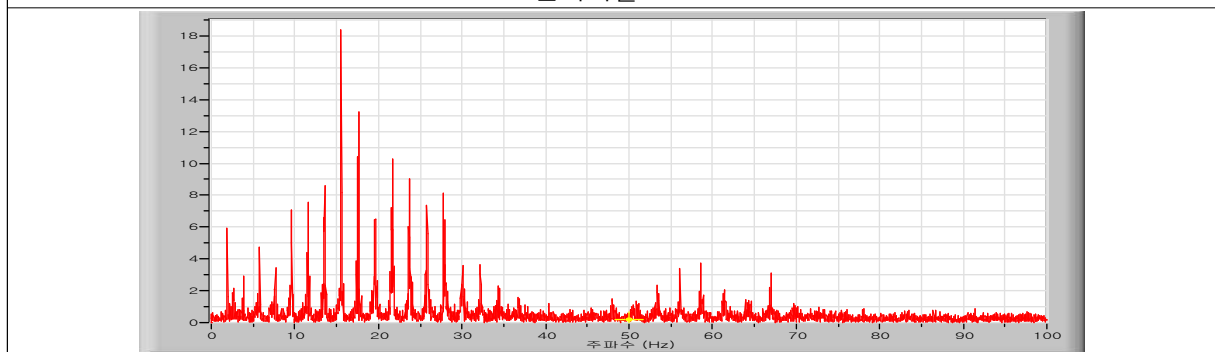
2번케이블 acc2



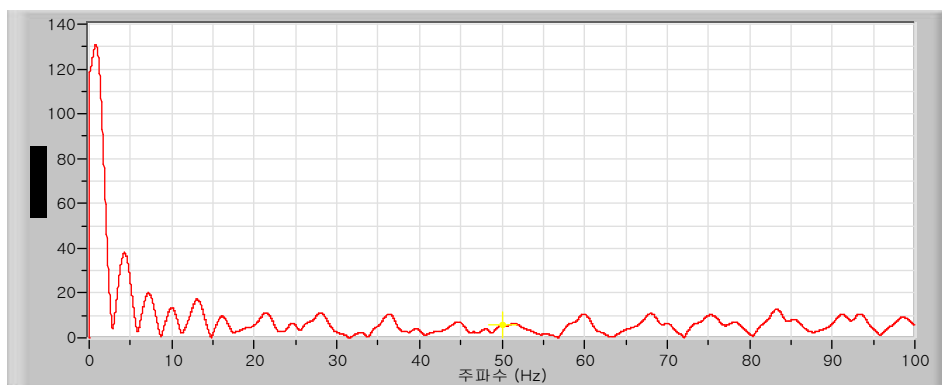
3번케이블 acc3



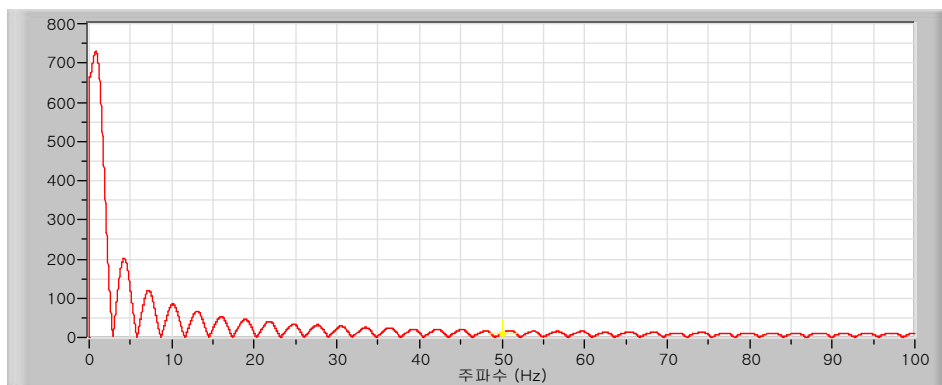
4번케이블 acc4



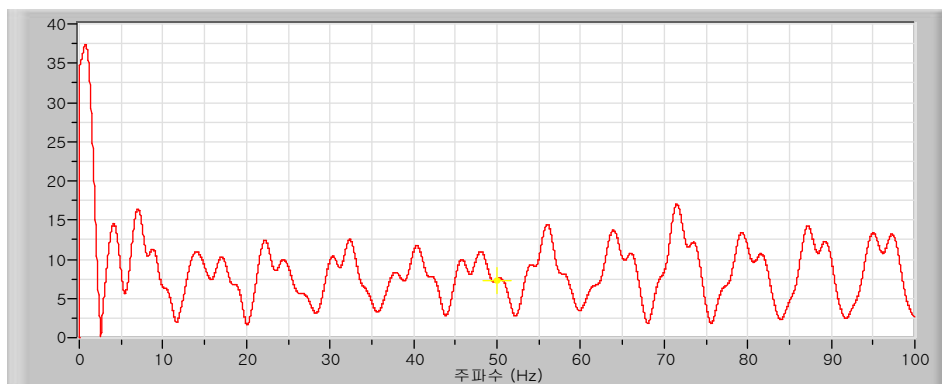
5번케이블 acc5



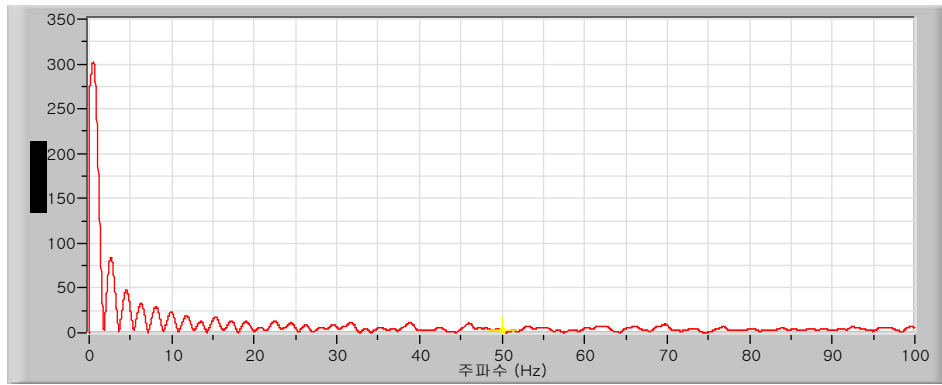
1번케이블 3축가속도 aX



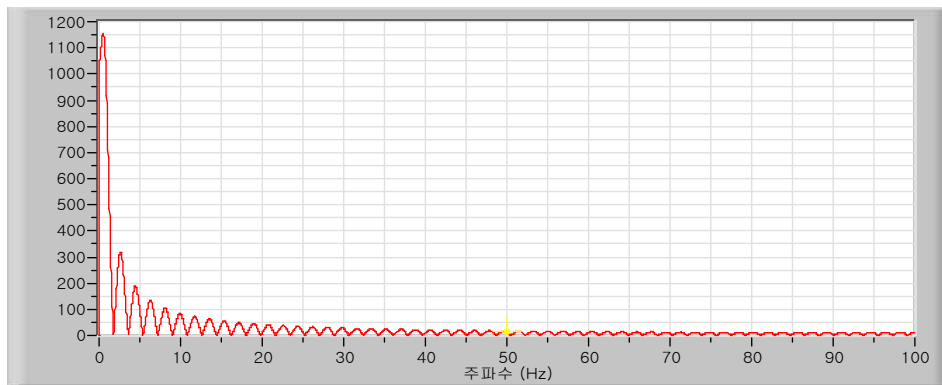
1번케이블 3축가속도 aY



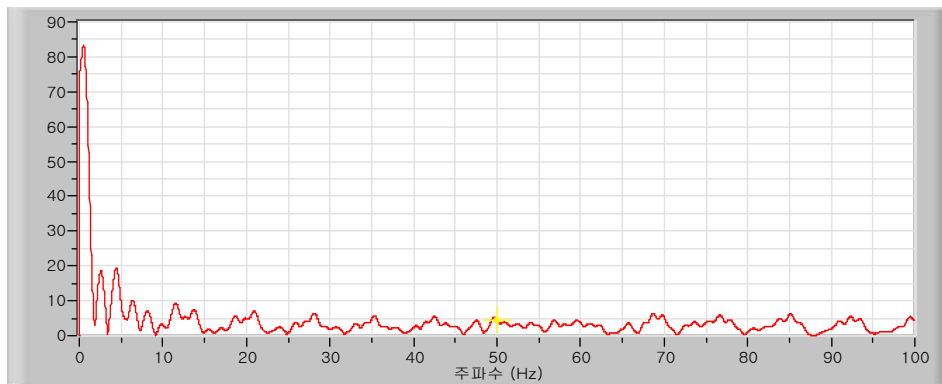
1번케이블 3축가속도 aZ



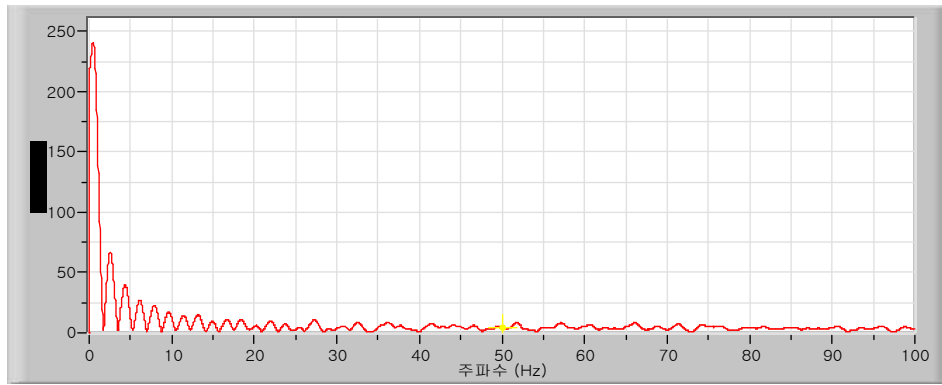
2번케이블 3축가속도 aX



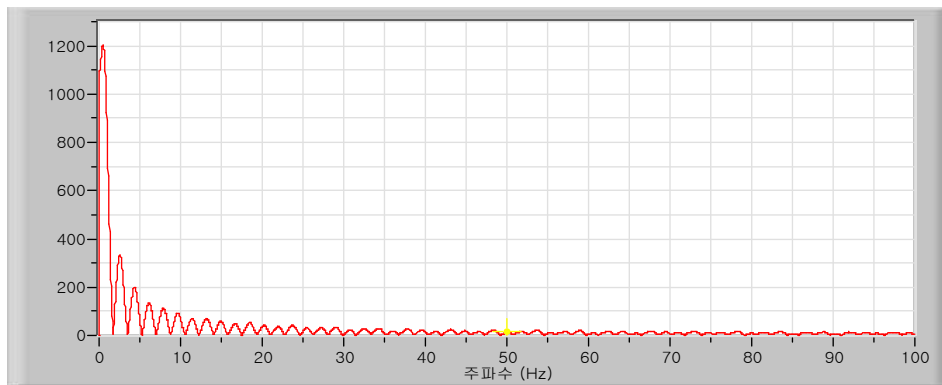
2번케이블 3축가속도 aY



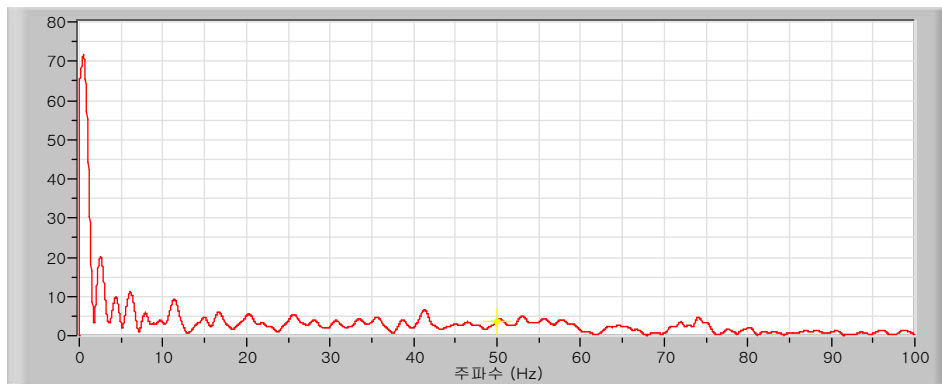
2번케이블 3축가속도 aZ



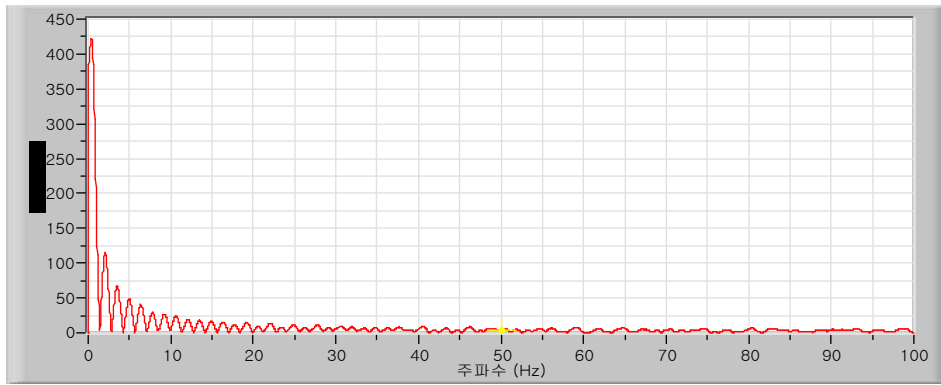
3번케이블 3축가속도 aX



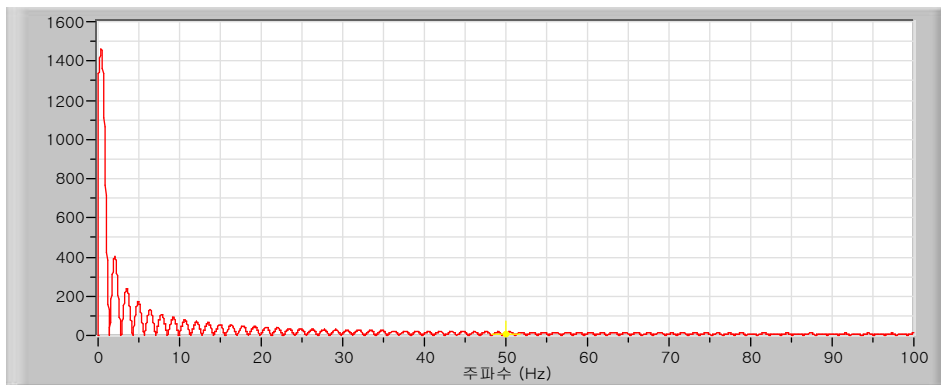
3번케이블 3축가속도 aY



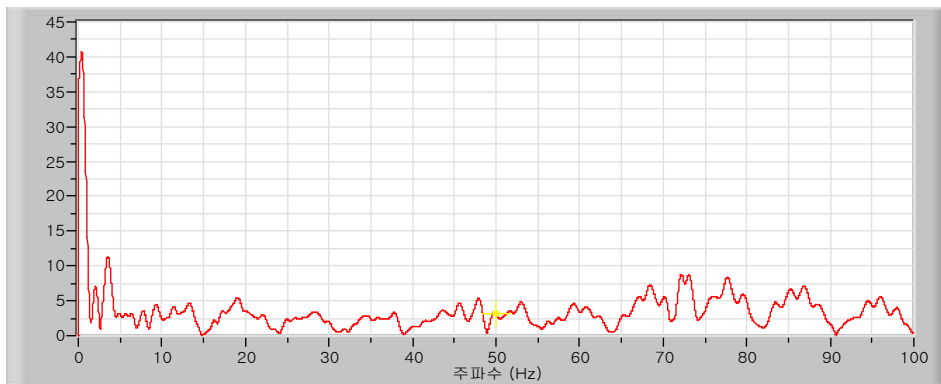
3번케이블 3축가속도 aZ



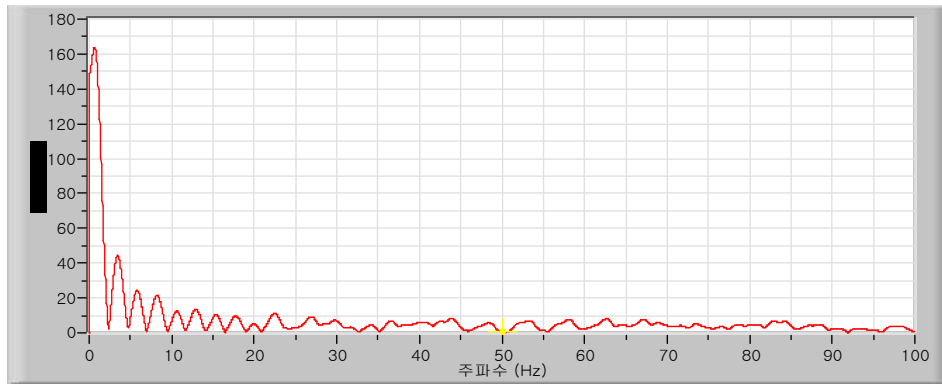
4번케이블 3축가속도 aX



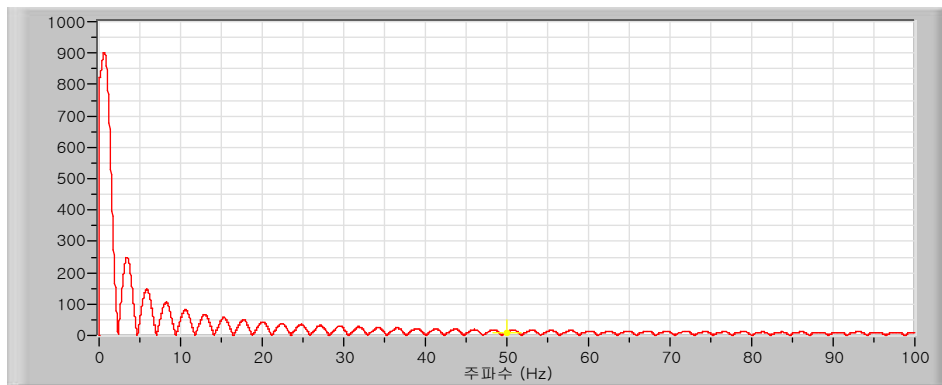
4번케이블 3축가속도 aY



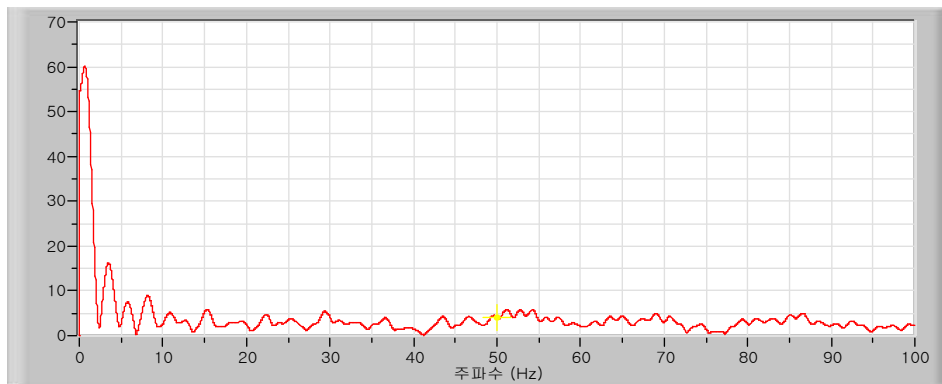
4번케이블 3축가속도 aZ



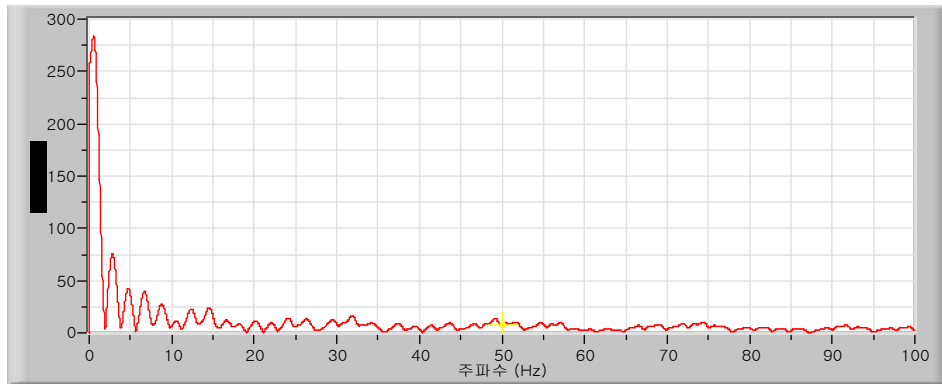
1번케이블 3축가속도 aX



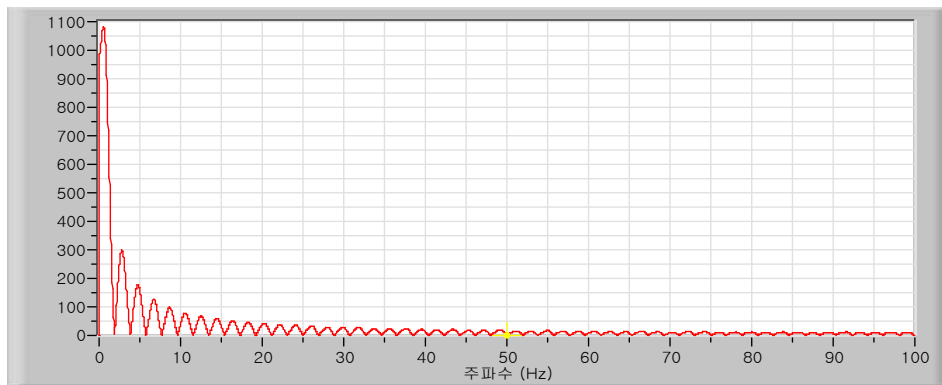
1번케이블 3축가속도 aY



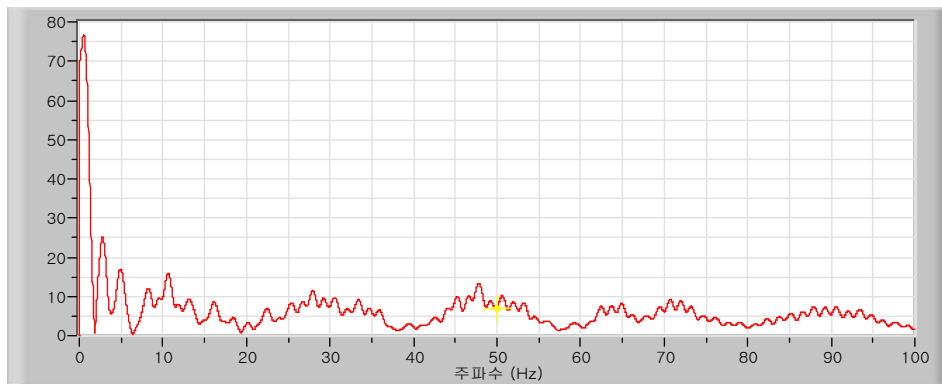
1번케이블 3축가속도 aZ



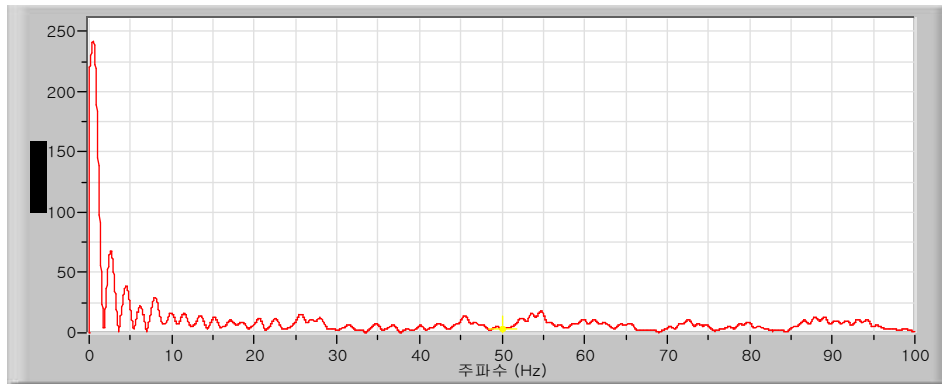
2번케이블 3축가속도 aX



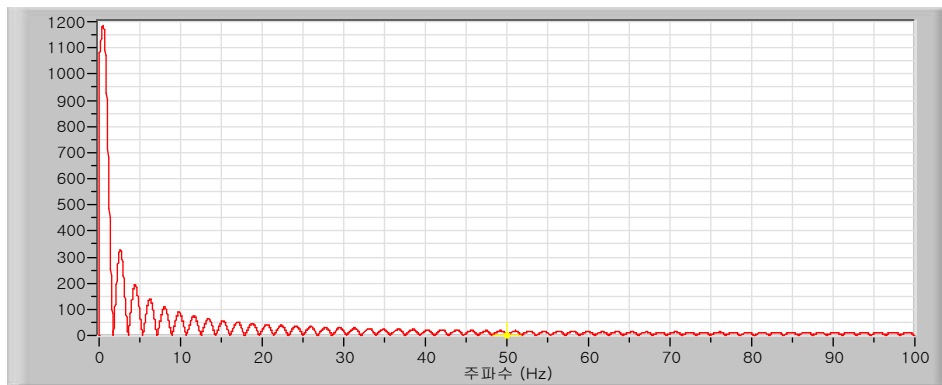
2번케이블 3축가속도 aY



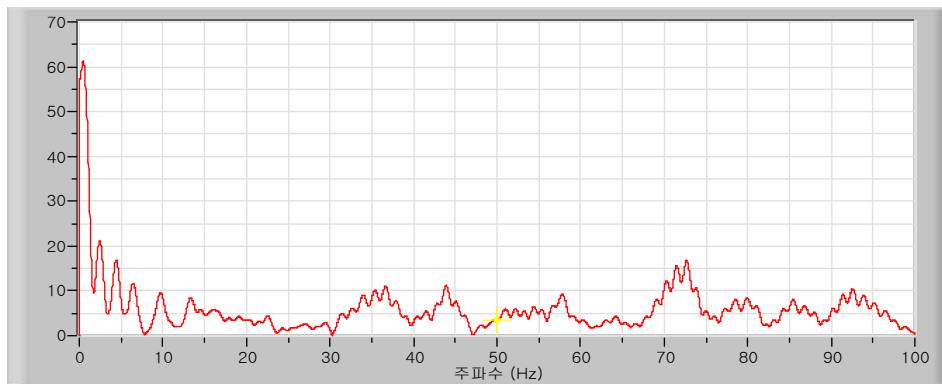
2번케이블 3축가속도 aZ



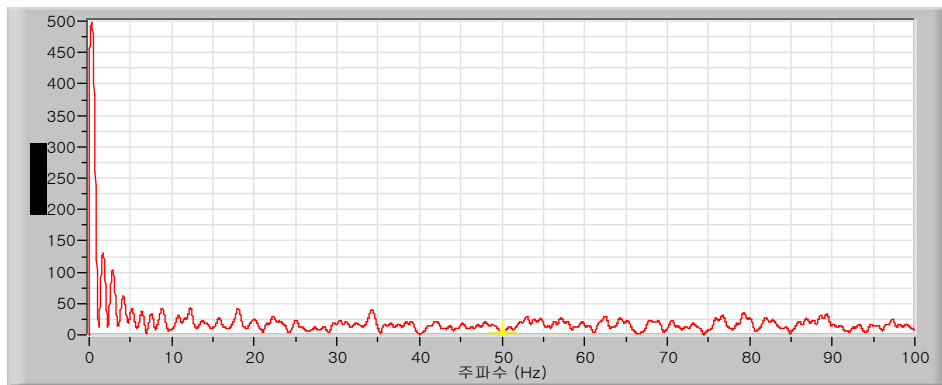
3번케이블 3축가속도 aX



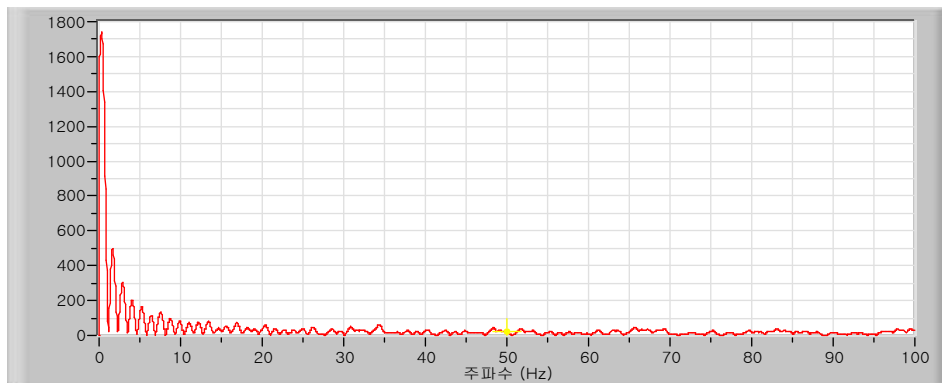
3번케이블 3축가속도 aY



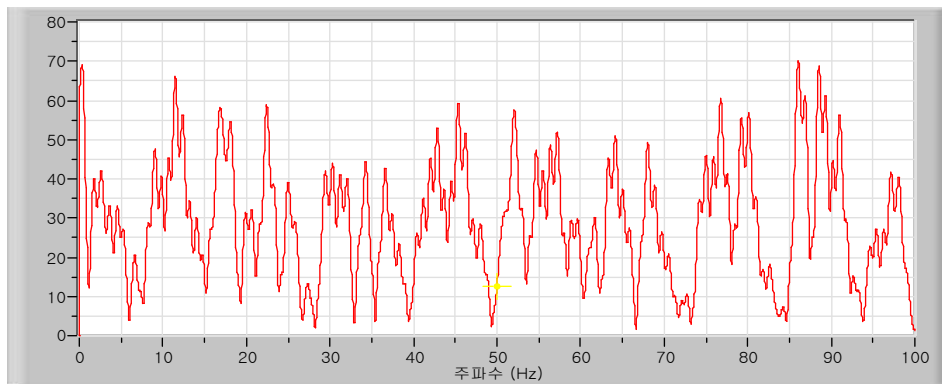
3번케이블 3축가속도 aZ



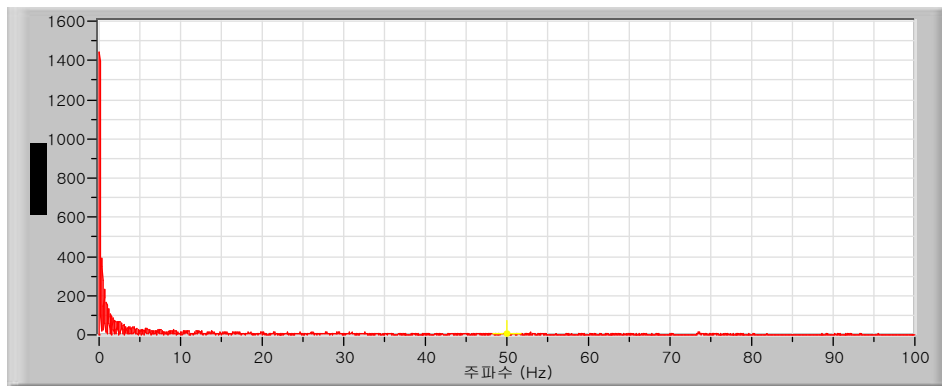
4번케이블 3축가속도 aX



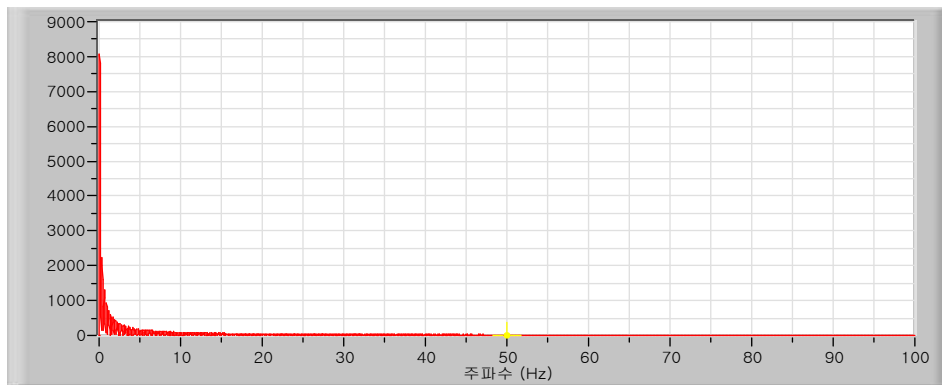
4번케이블 3축가속도 aY



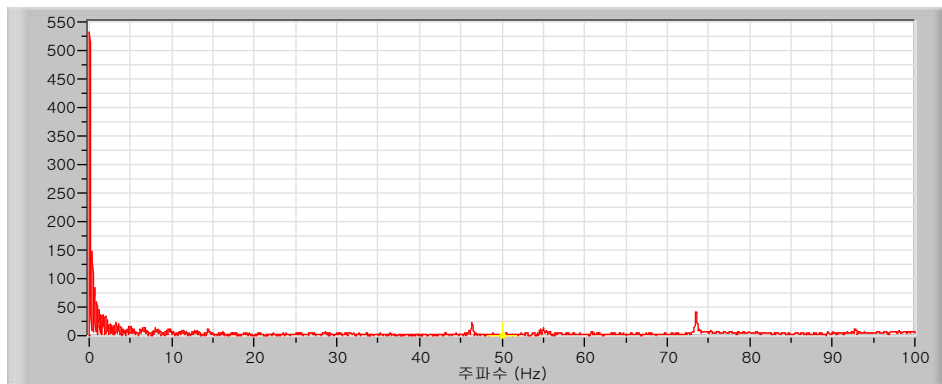
4번케이블 3축가속도 aZ



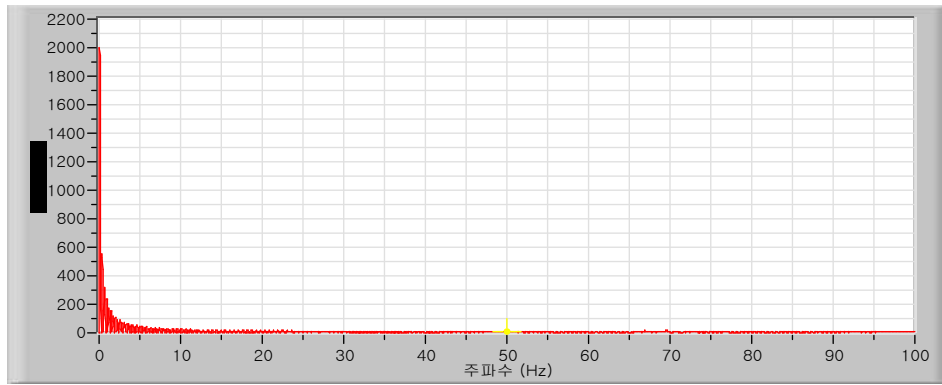
1번케이블 3축가속도 a_X



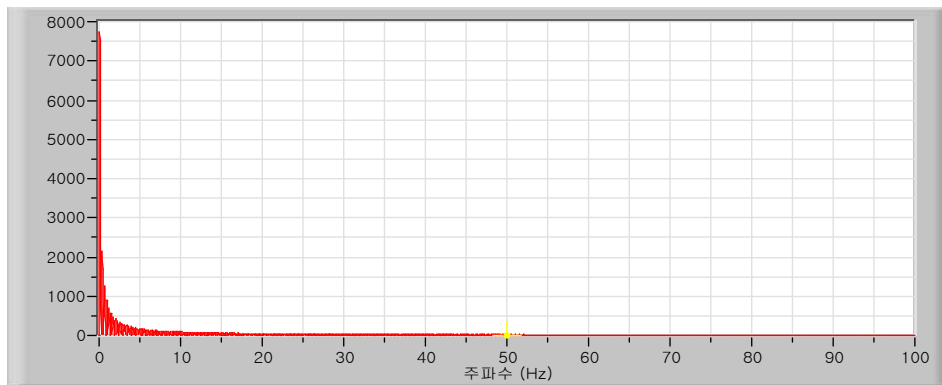
1번케이블 3축가속도 a_Y



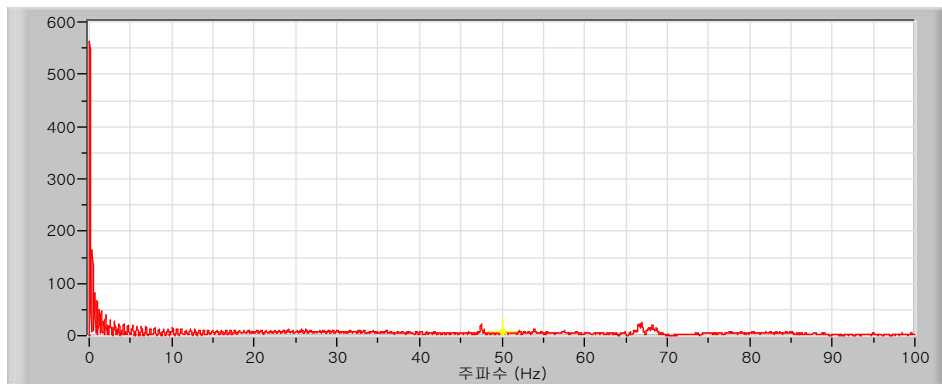
1번케이블 3축가속도 a_Z



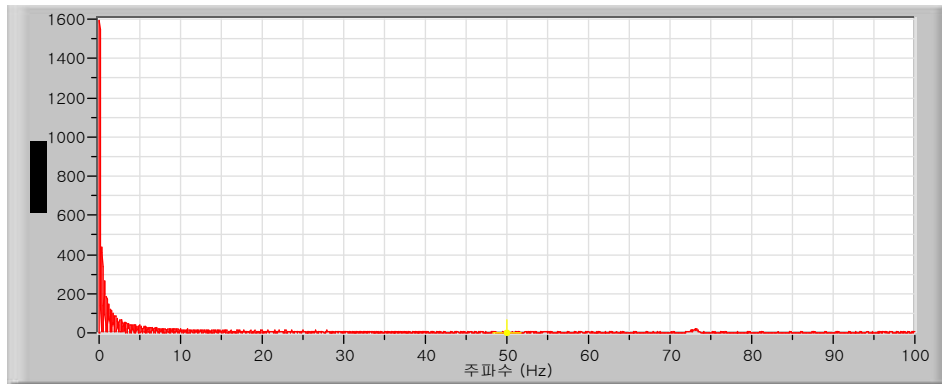
2번케이블 3축가속도 a_X



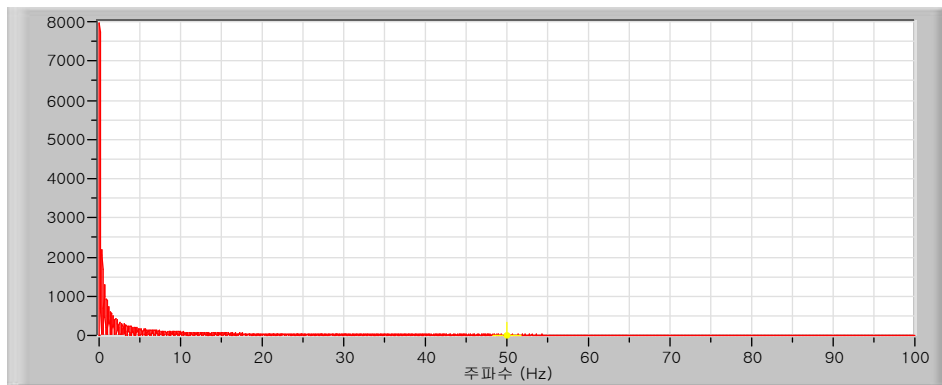
2번케이블 3축가속도 a_Y



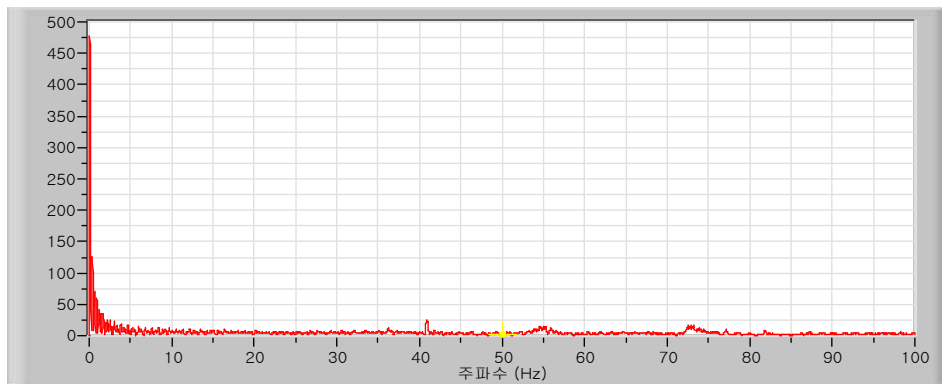
2번케이블 3축가속도 a_Z



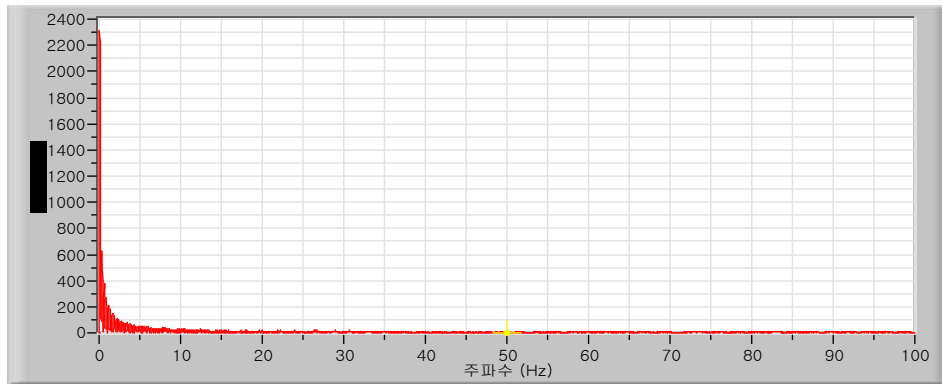
3번케이블 3축가속도 a_X



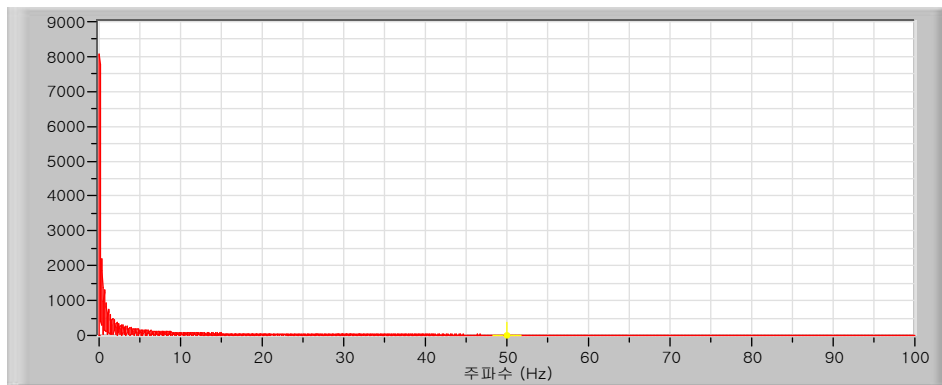
3번케이블 3축가속도 a_Y



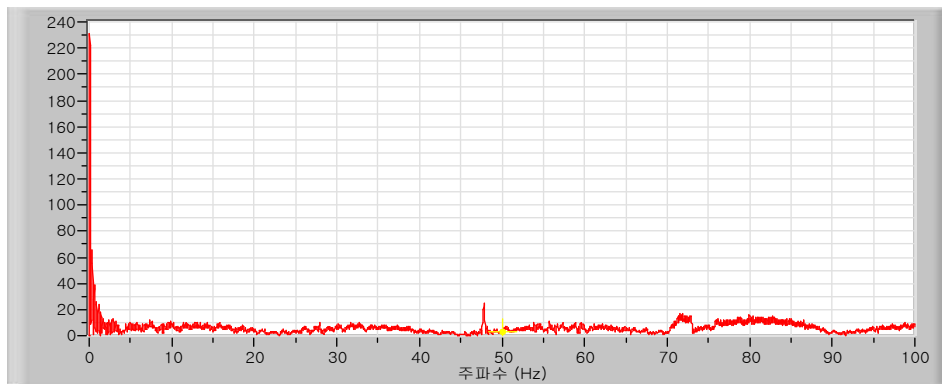
3번케이블 3축가속도 a_Z



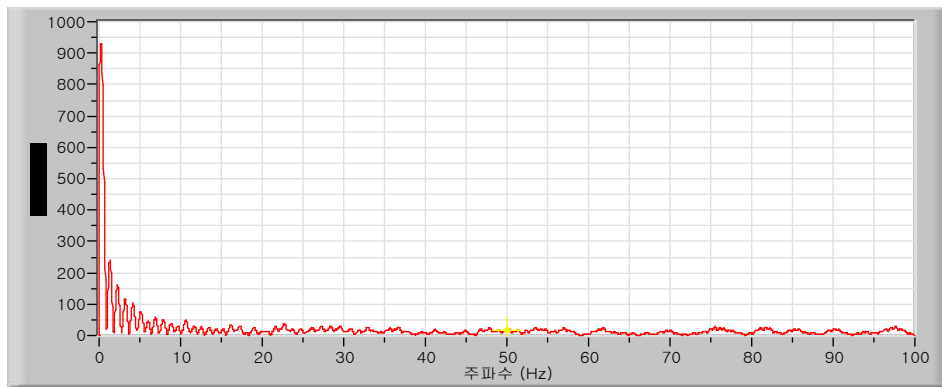
4번케이블 3축가속도 a_X



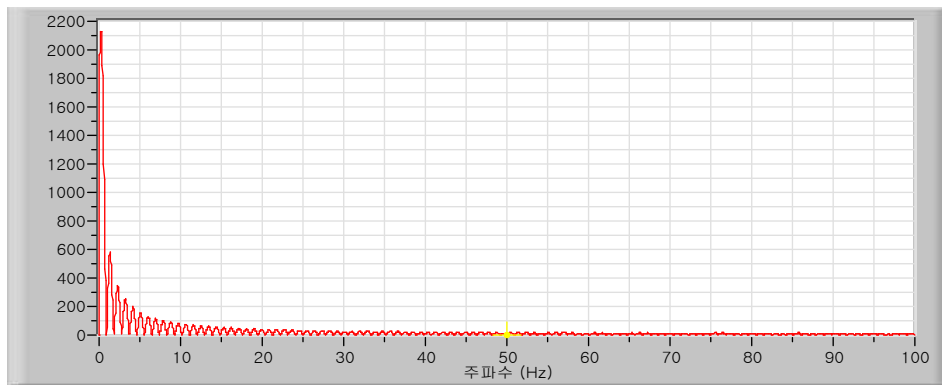
4번케이블 3축가속도 a_Y



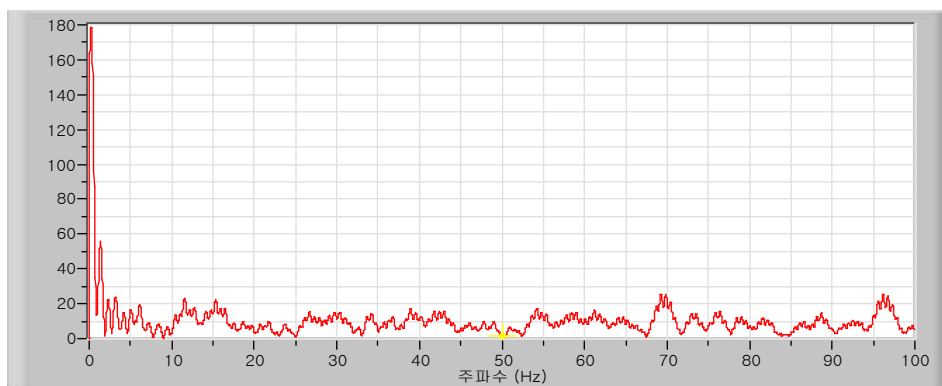
4번케이블 3축가속도 a_Z



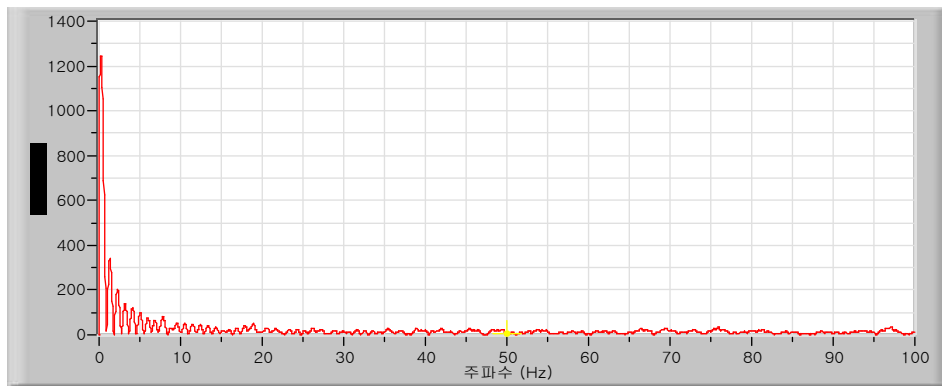
1번케이블 3축가속도 a_X



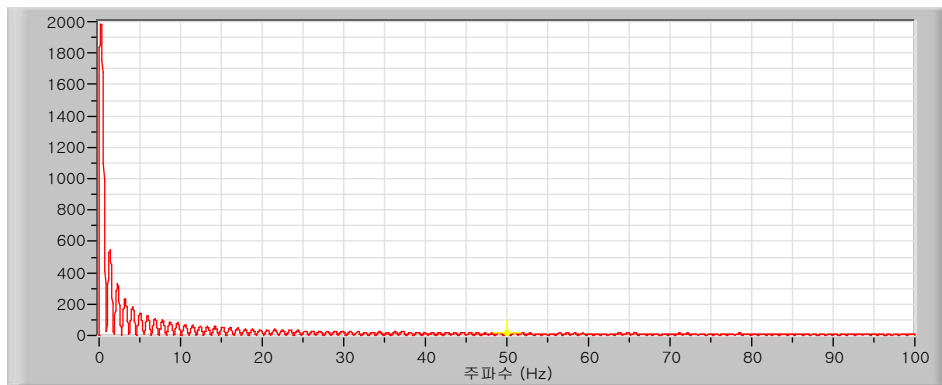
1번케이블 3축가속도 a_Y



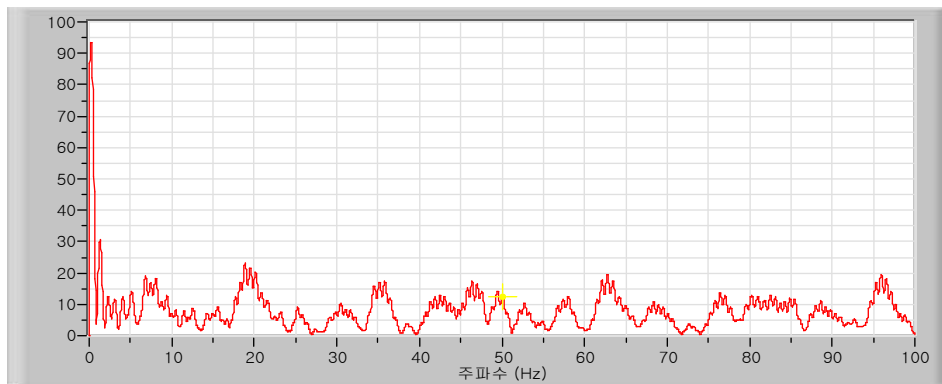
1번케이블 3축가속도 a_Z



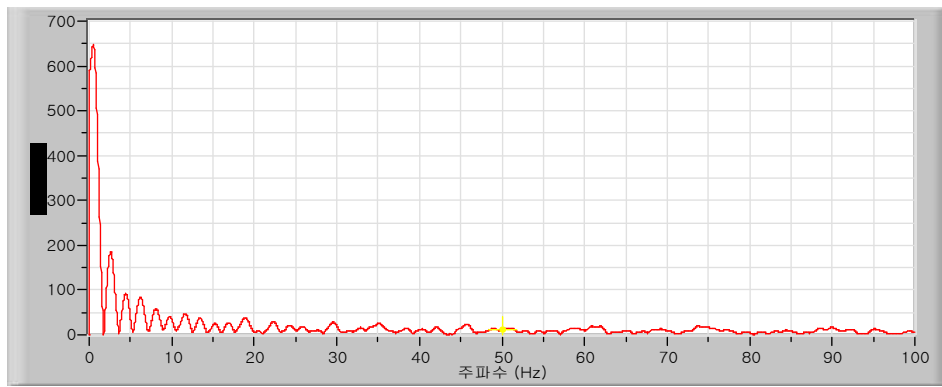
2번케이블 3축가속도 aX



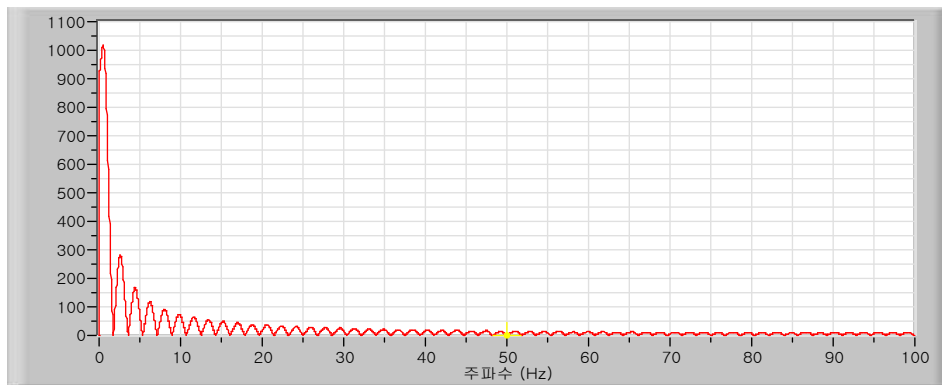
2번케이블 3축가속도 aY



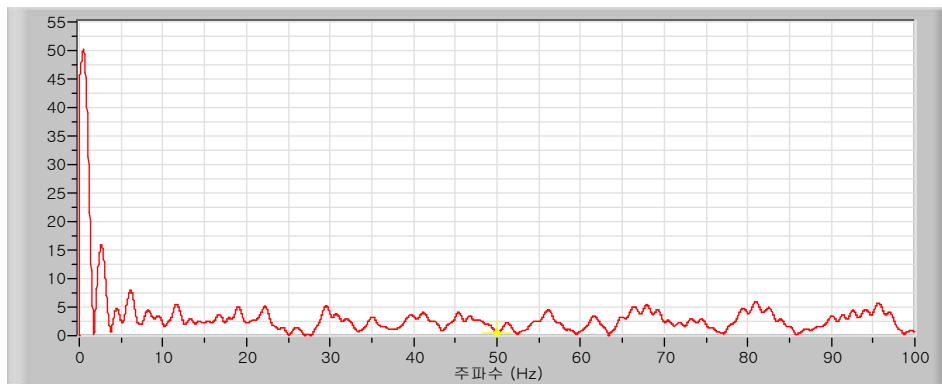
2번케이블 3축가속도 aZ



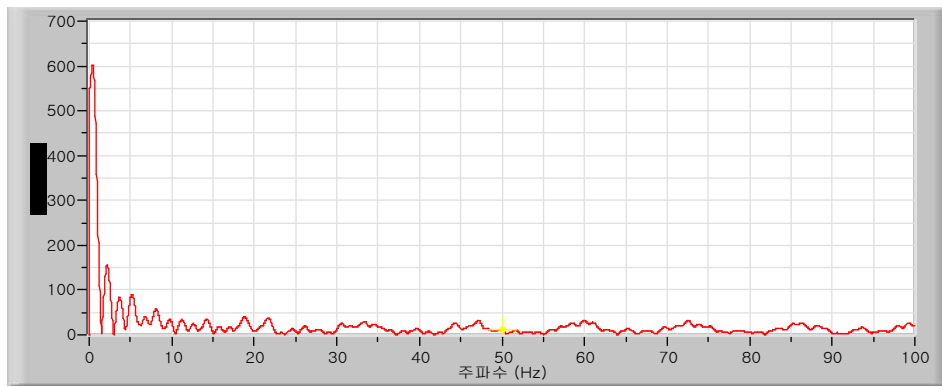
1번케이블 3축가속도 aX



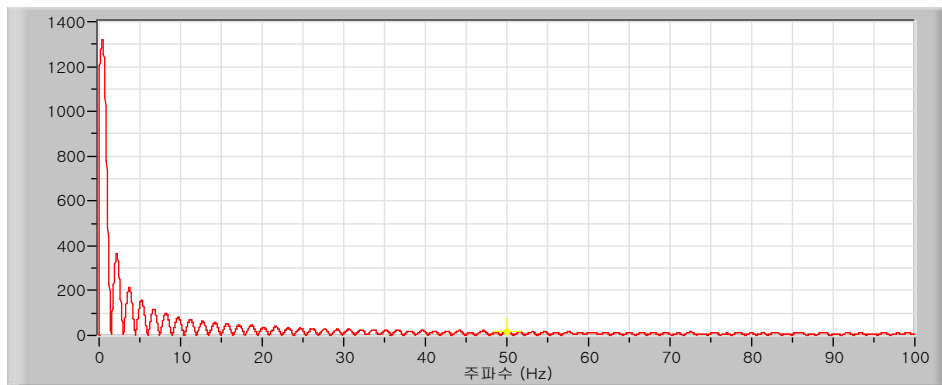
1번케이블 3축가속도 aY



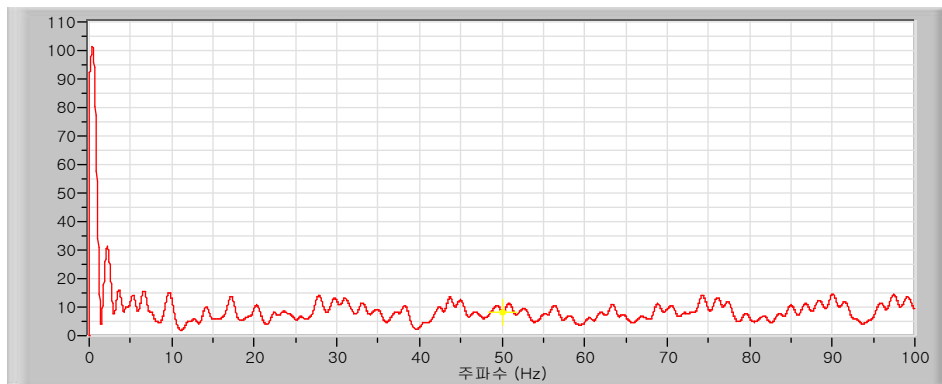
1번케이블 3축가속도 aZ



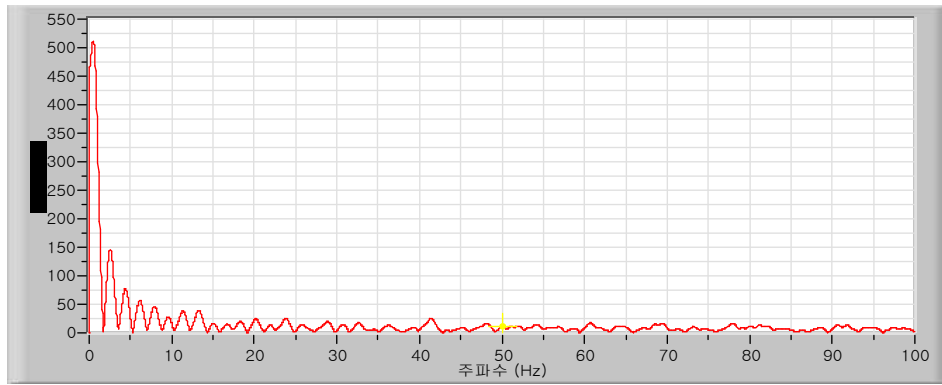
2번케이블 3축가속도 aX



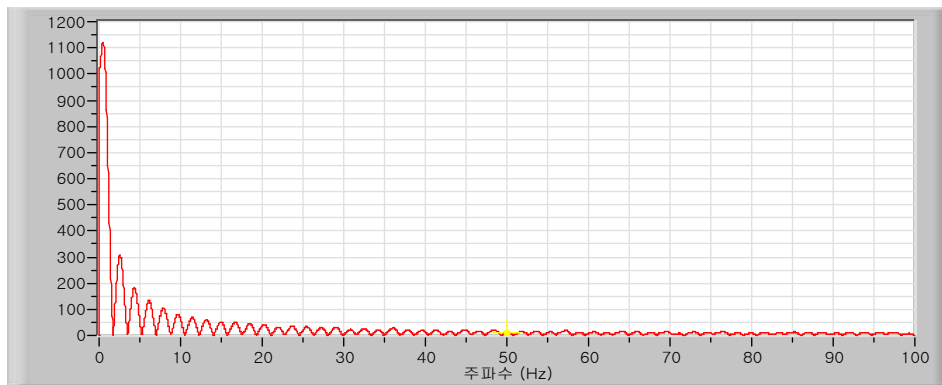
2번케이블 3축가속도 aY



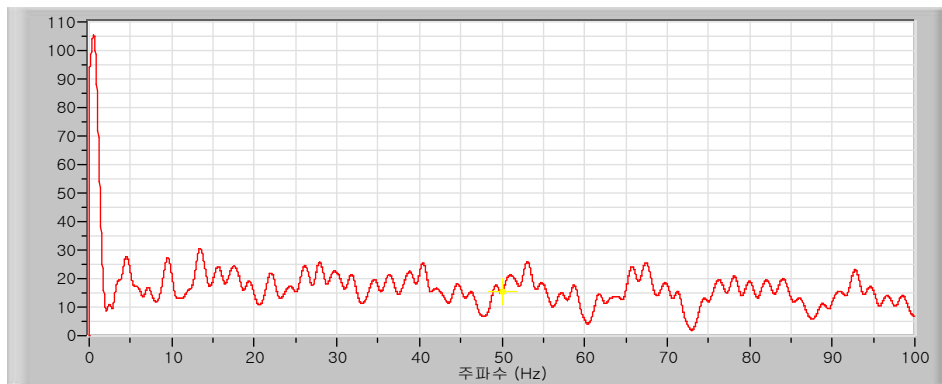
2번케이블 3축가속도 aZ



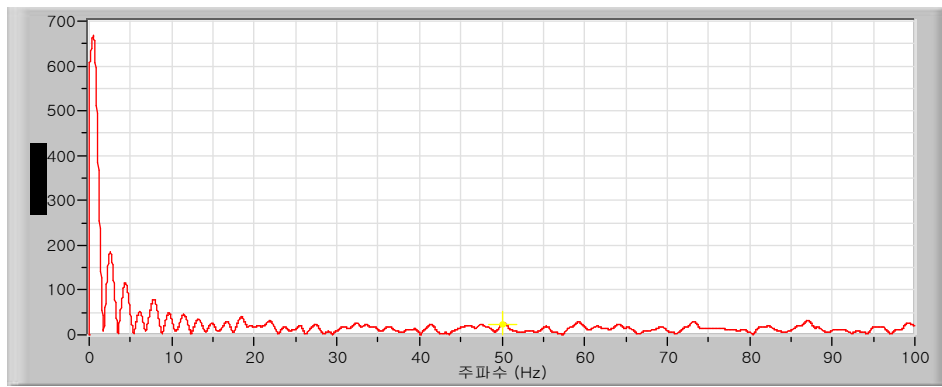
1번케이블 3축가속도 aX



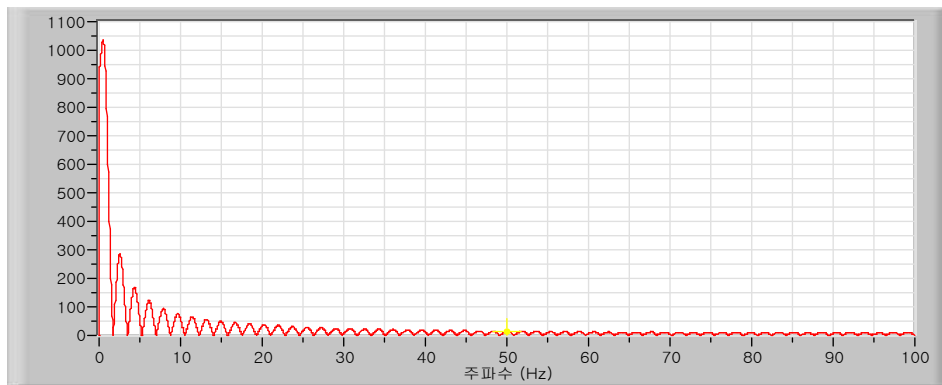
1번케이블 3축가속도 aY



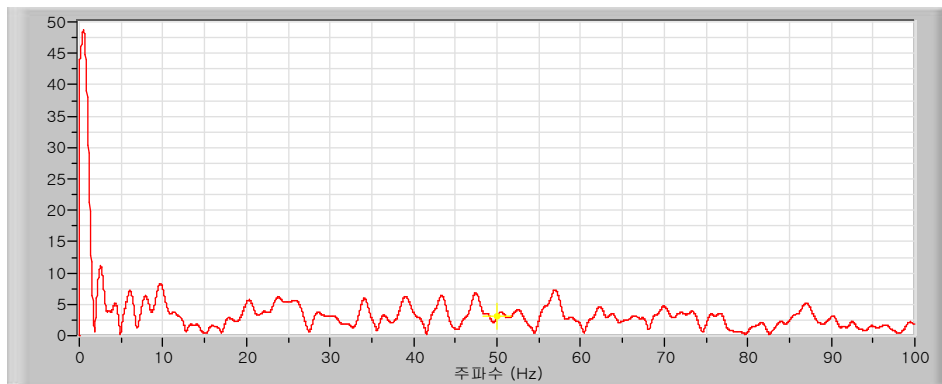
1번케이블 3축가속도 aZ



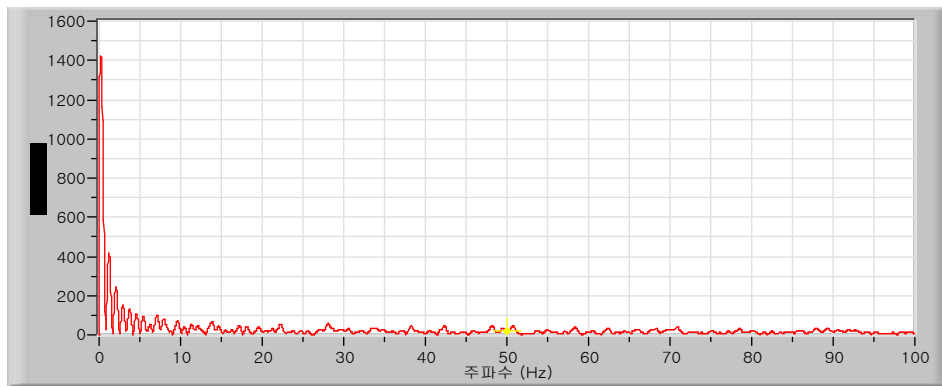
2번케이블 3축가속도 a_X



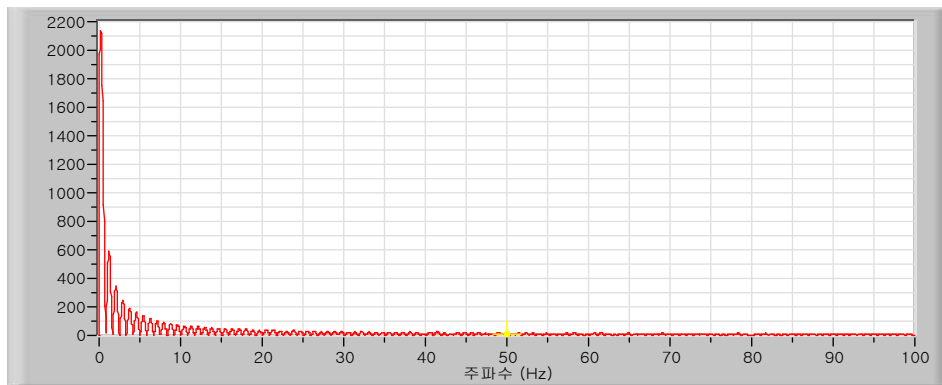
2번케이블 3축가속도 a_Y



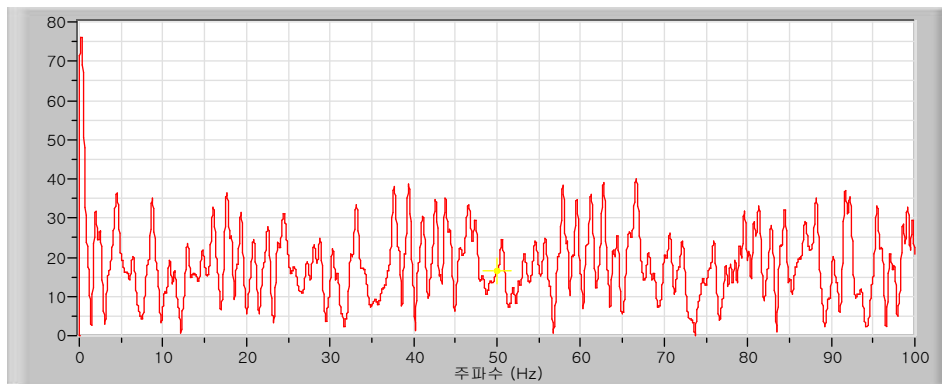
2번케이블 3축가속도 a_Z



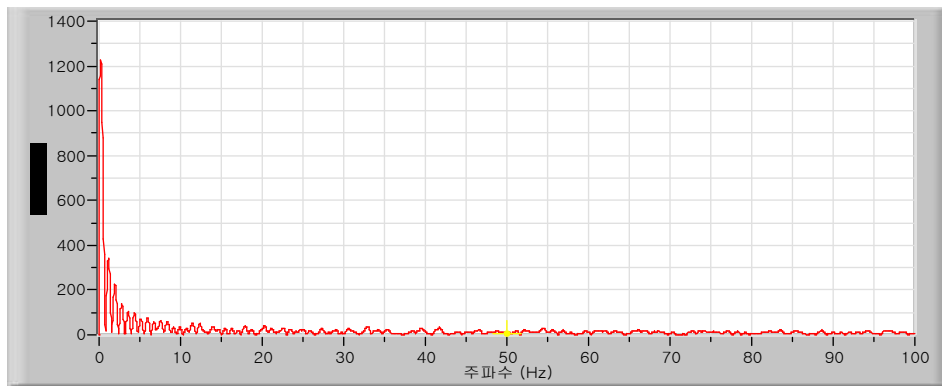
1번케이블 3축가속도 aX



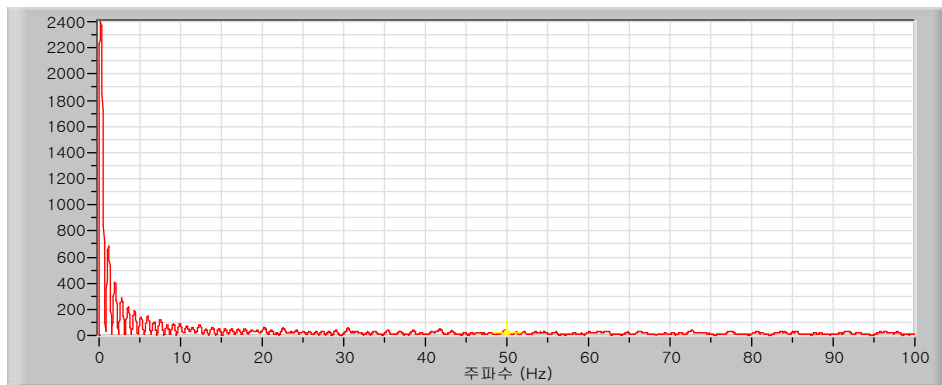
1번케이블 3축가속도 aY



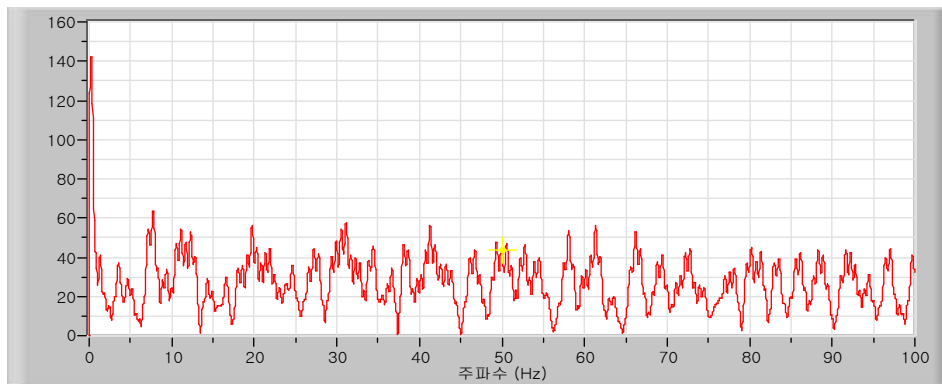
1번케이블 3축가속도 aZ



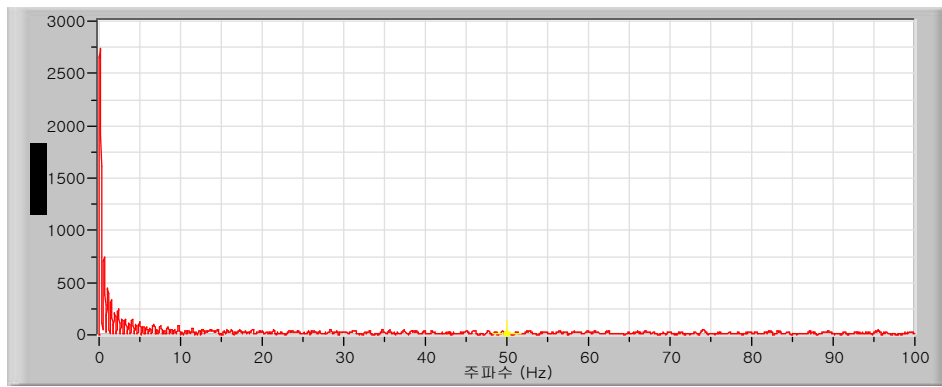
2번케이블 3축가속도 aX



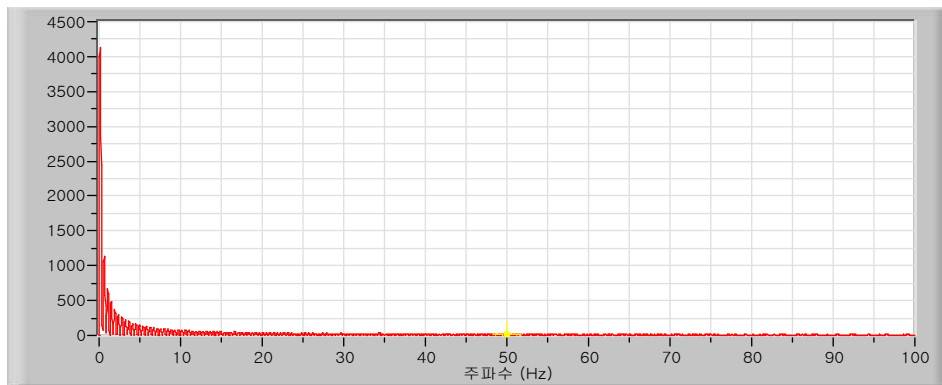
2번케이블 3축가속도 aY



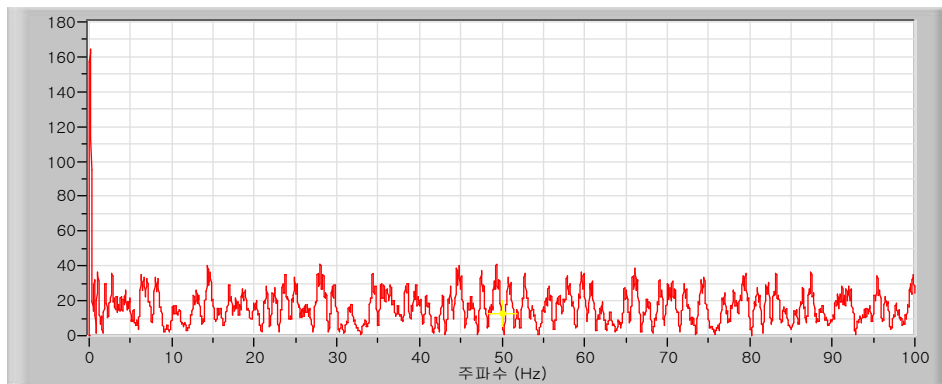
2번케이블 3축가속도 aZ



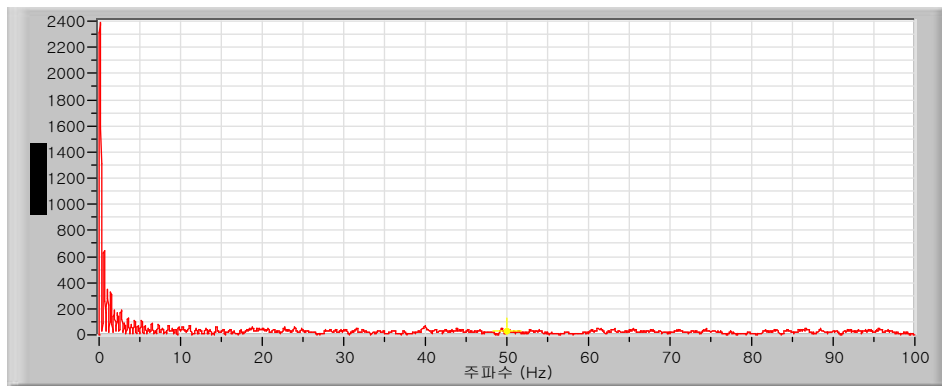
1번케이블 3축가속도 a_X



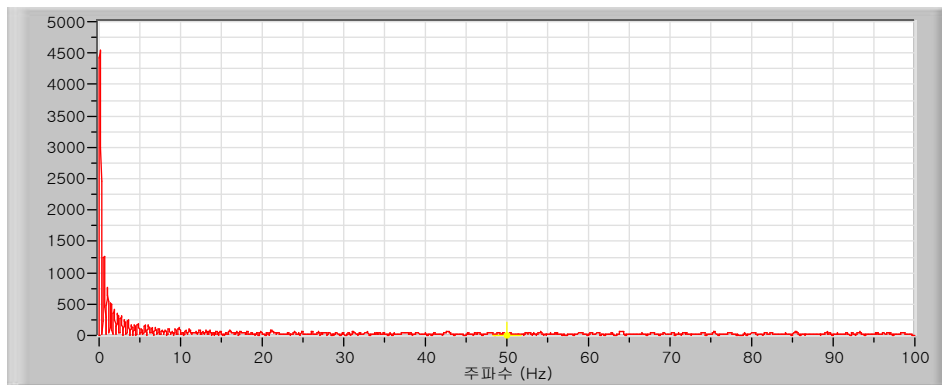
1번케이블 3축가속도 a_Y



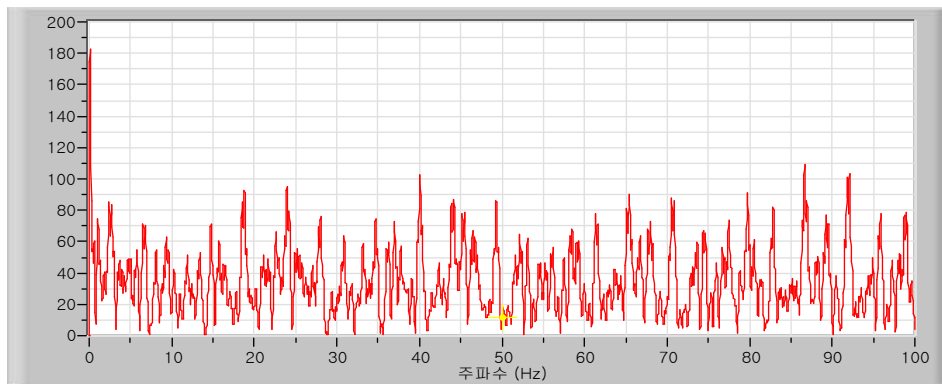
1번케이블 3축가속도 a_Z



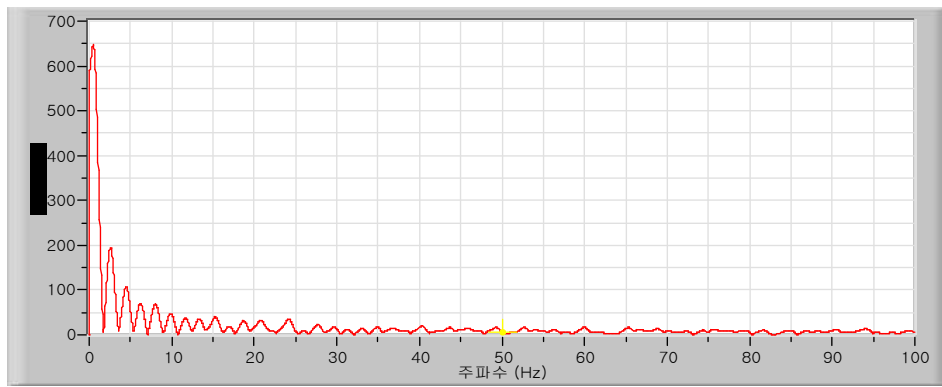
2번케이블 3축가속도 a_X



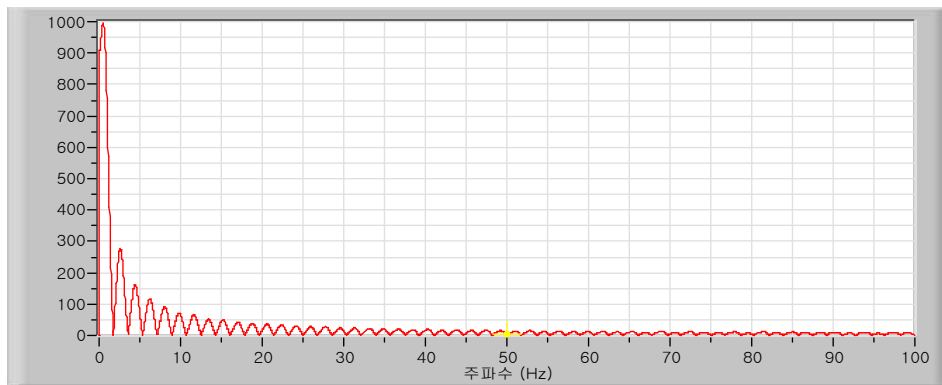
2번케이블 3축가속도 a_Y



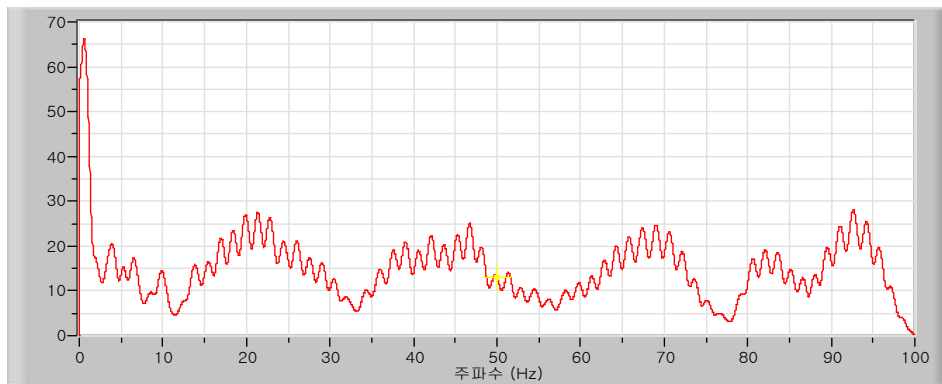
2번케이블 3축가속도 a_Z



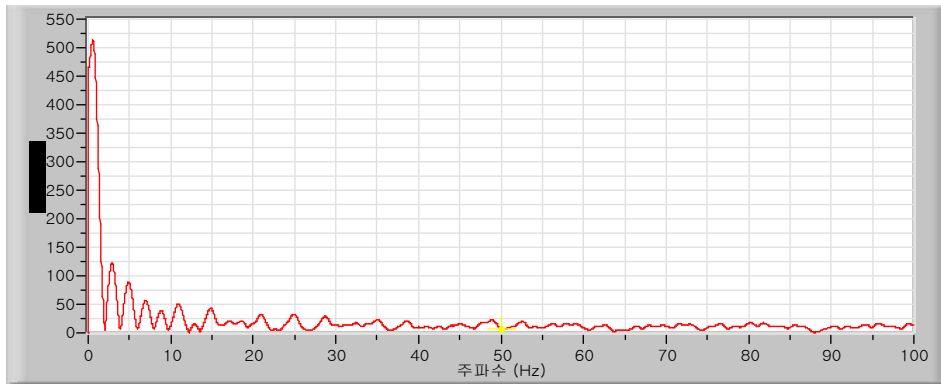
1번케이블 3축가속도 aX



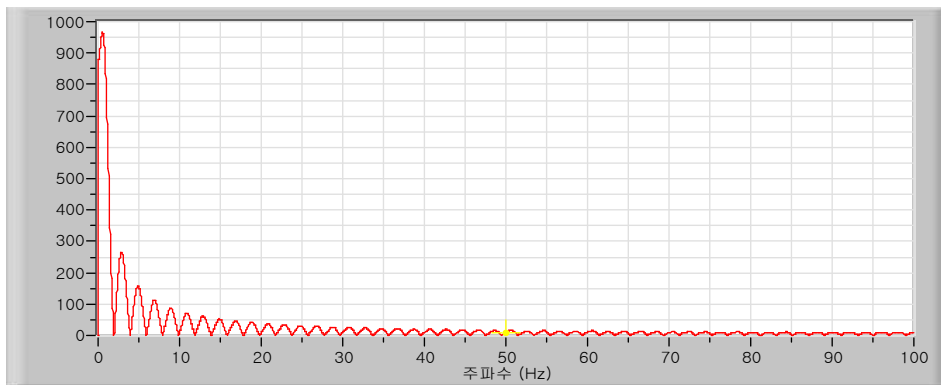
1번케이블 3축가속도 aY



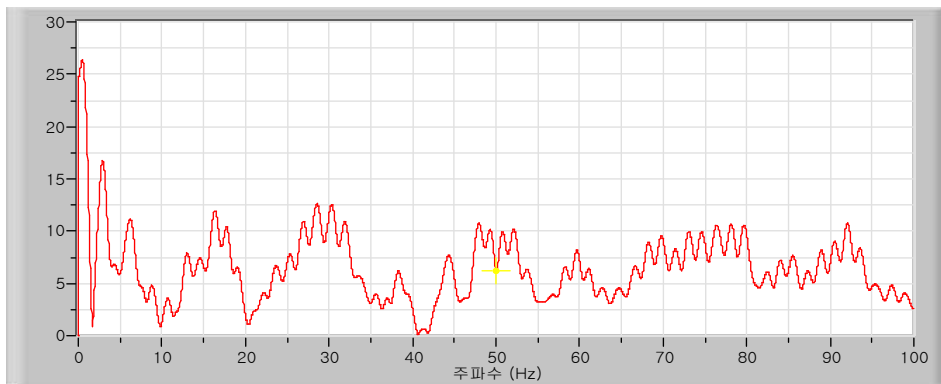
1번케이블 3축가속도 aZ



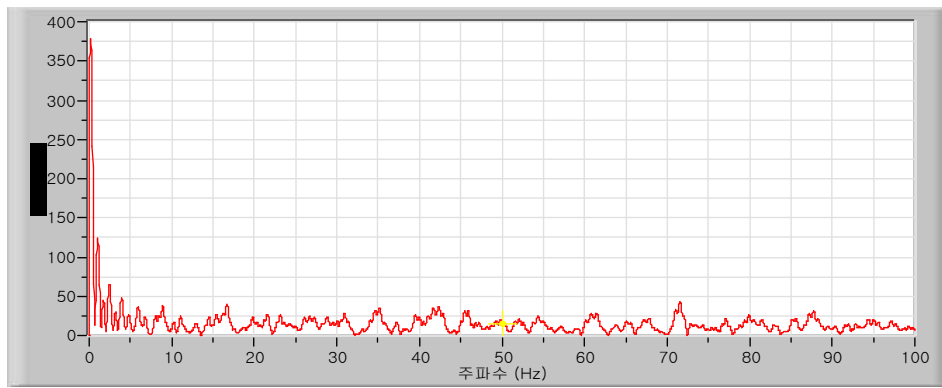
2번케이블 3축가속도 aX



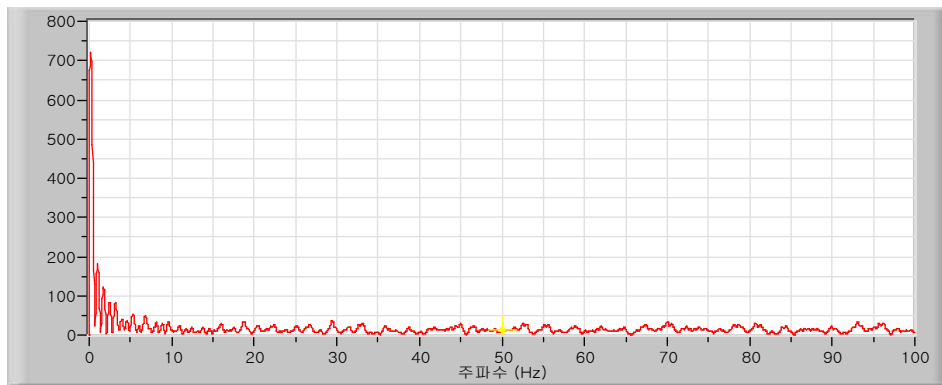
2번케이블 3축가속도 aY



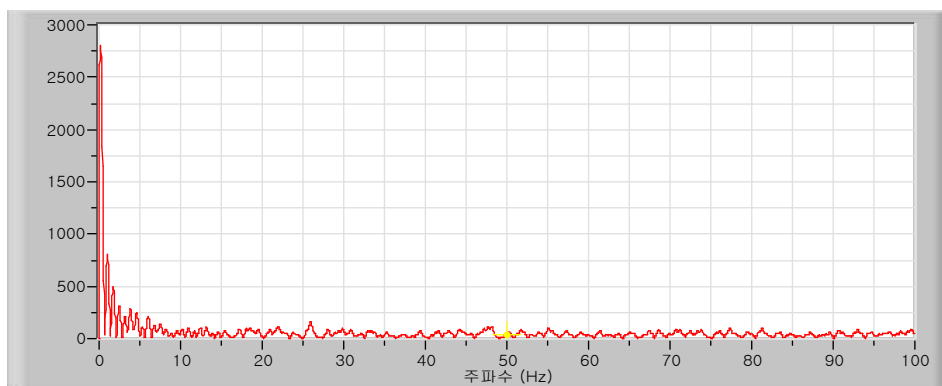
2번케이블 3축가속도 aZ



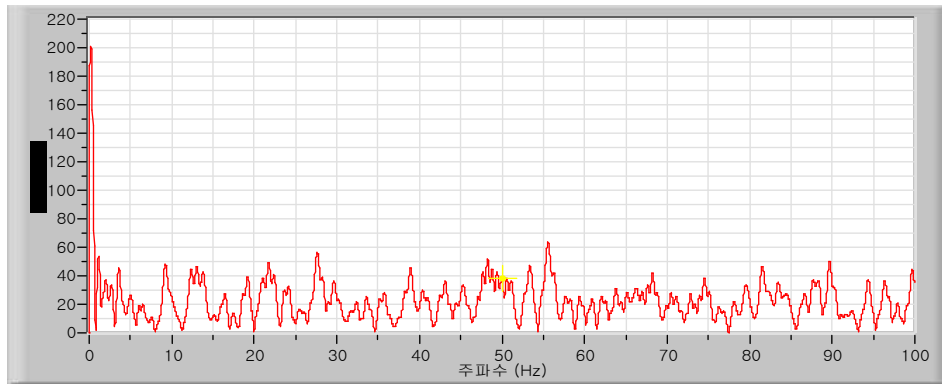
1번케이블 3축가속도 aX



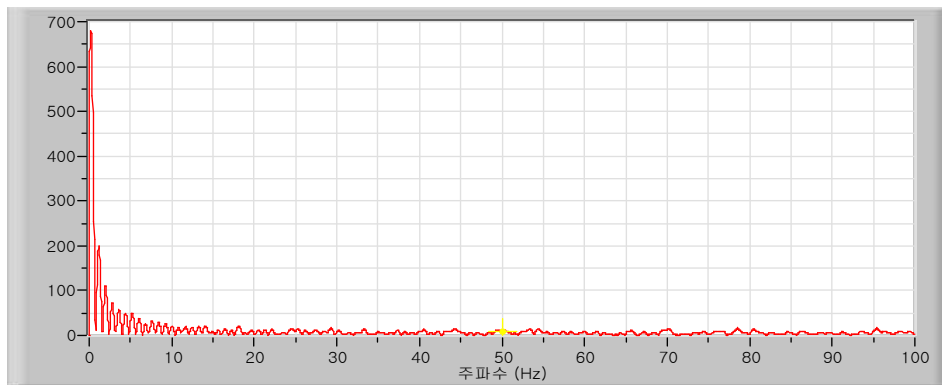
1번케이블 3축가속도 aY



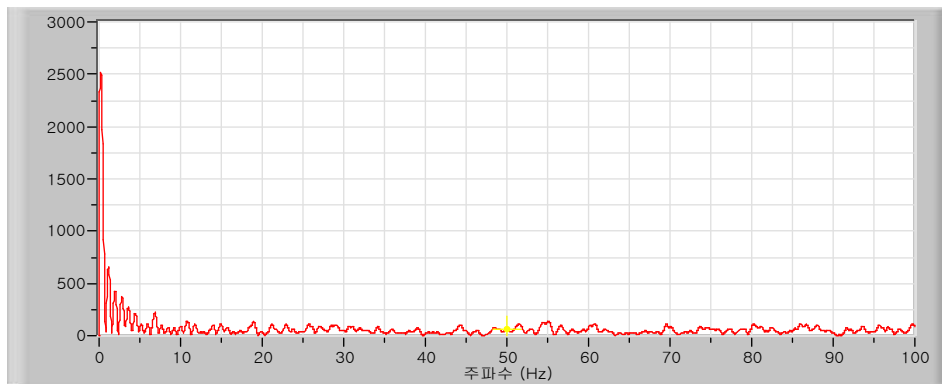
1번케이블 3축가속도 aZ



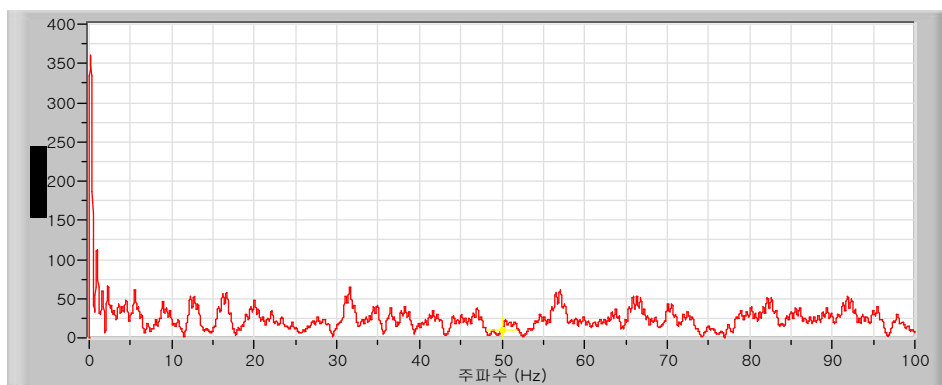
1번케이블 3축가속도 a_X



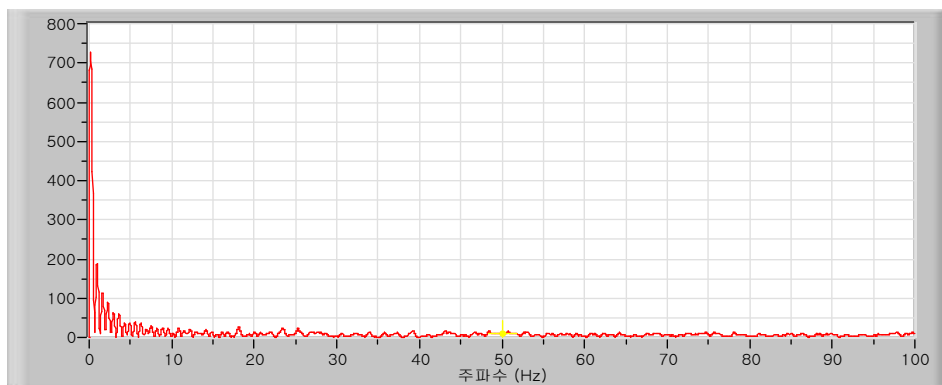
1번케이블 3축가속도 a_Y



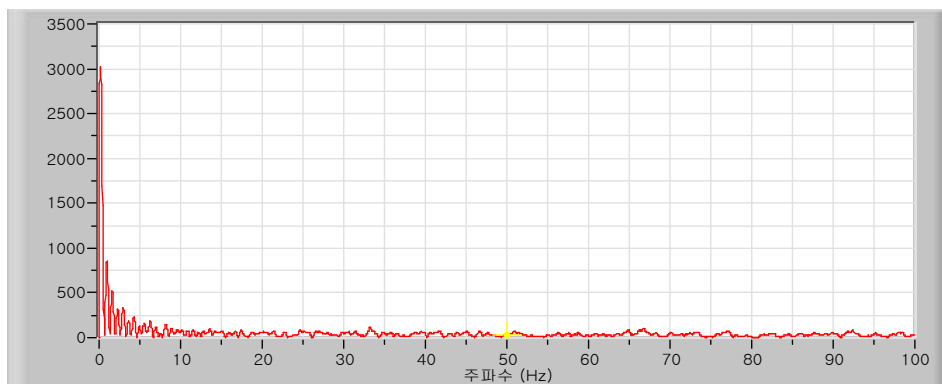
1번케이블 3축가속도 a_Z



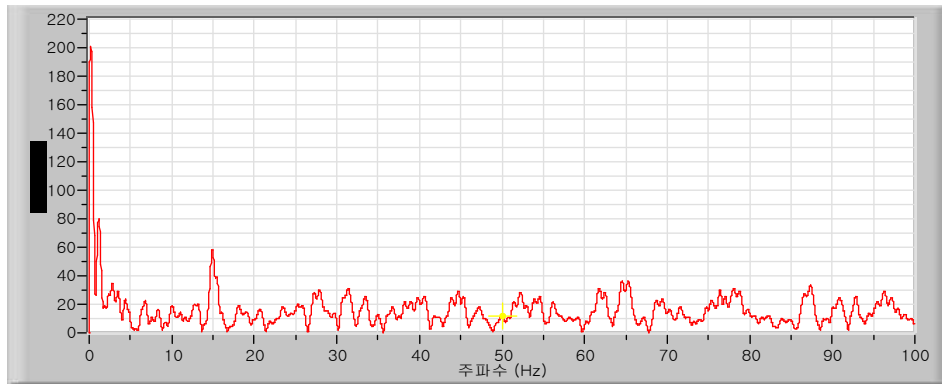
2번케이블 3축가속도 a_X



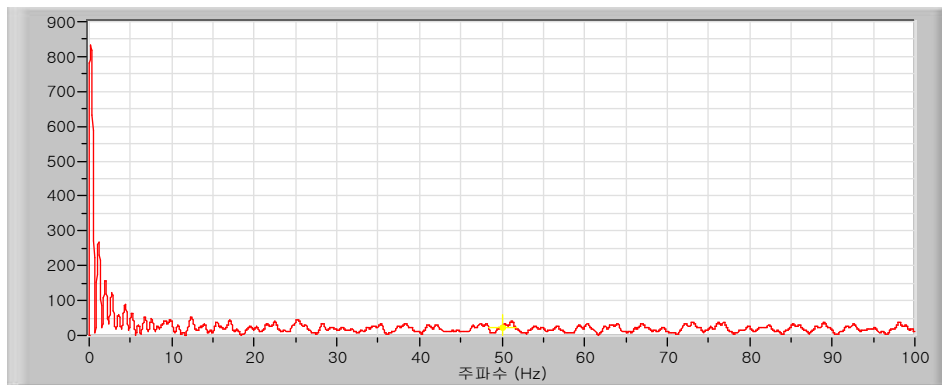
2번케이블 3축가속도 a_Y



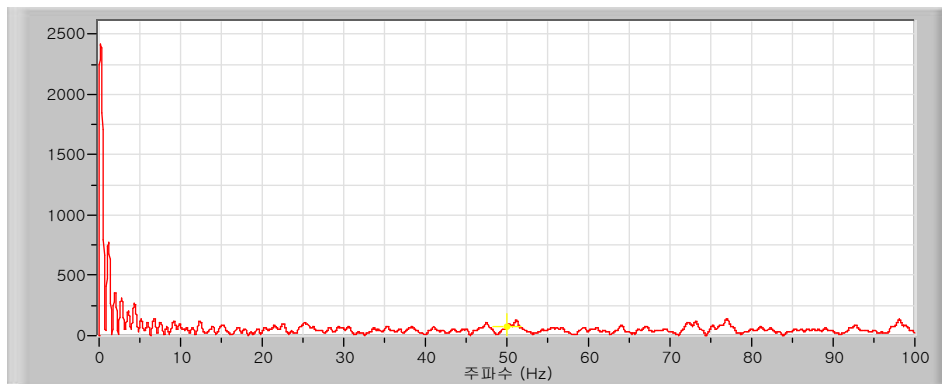
2번케이블 3축가속도 a_Z



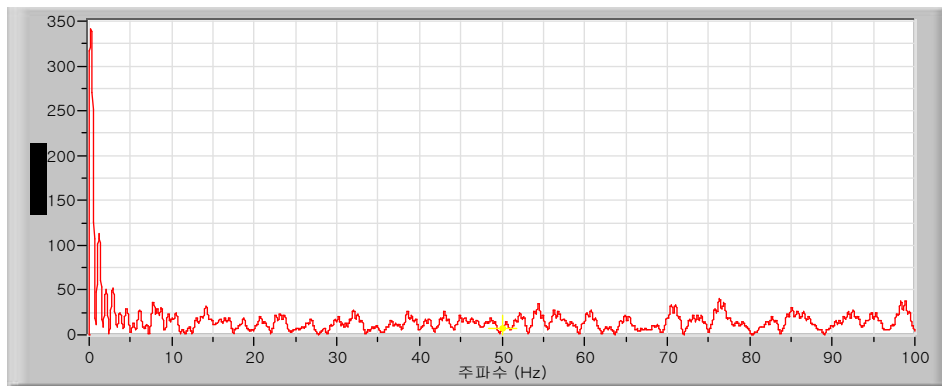
2번케이블 3축가속도 a_X



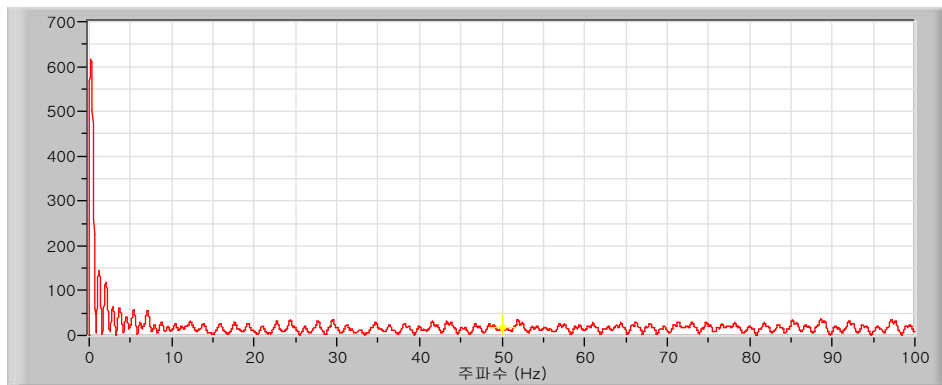
2번케이블 3축가속도 a_Y



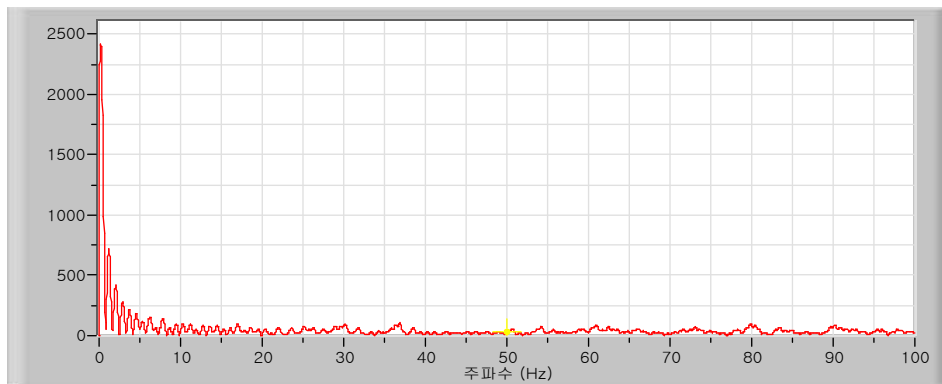
2번케이블 3축가속도 a_Z



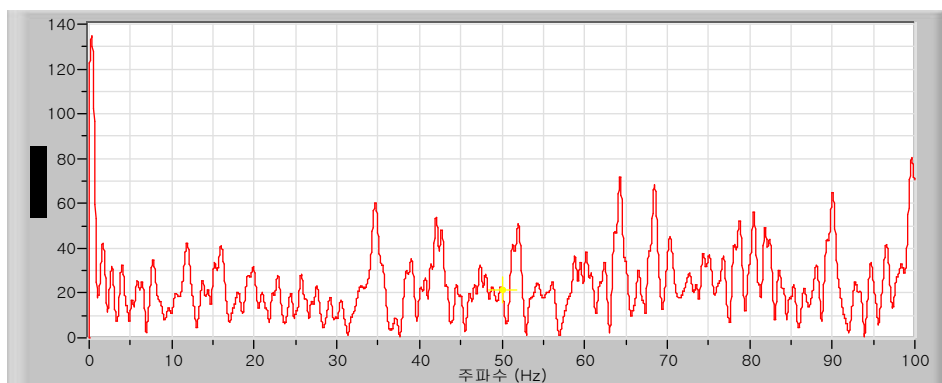
1번케이블 3축가속도 aX



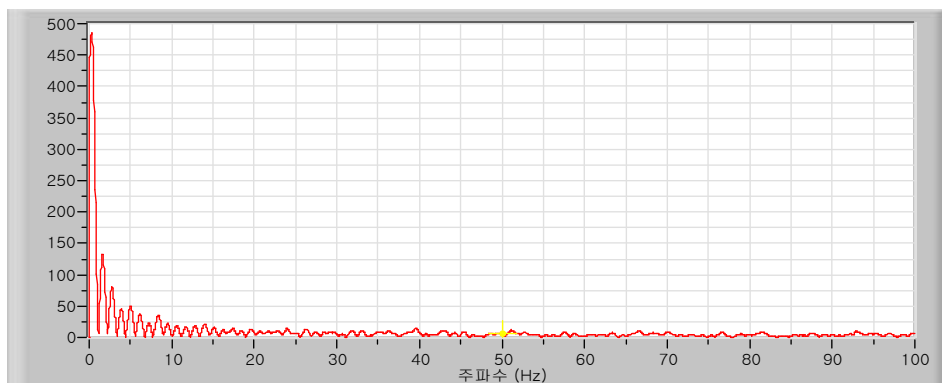
1번케이블 3축가속도 aY



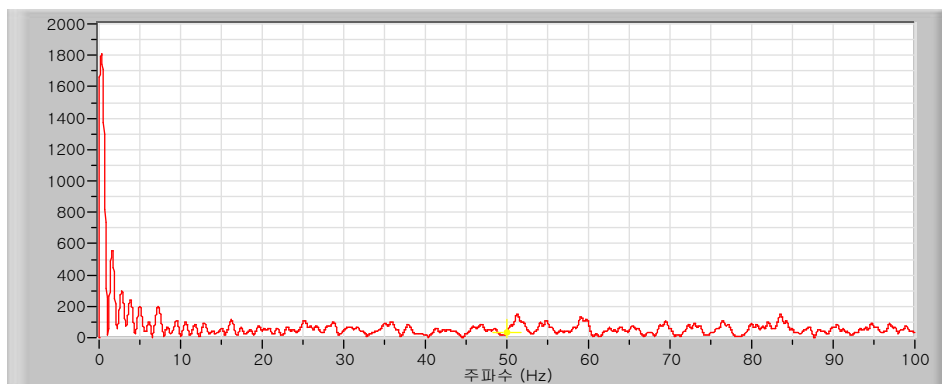
1번케이블 3축가속도 aZ



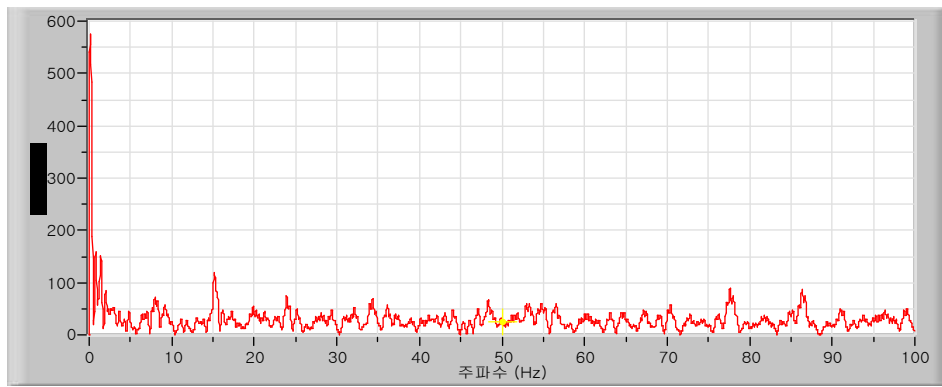
1번케이블 3축가속도 a_X



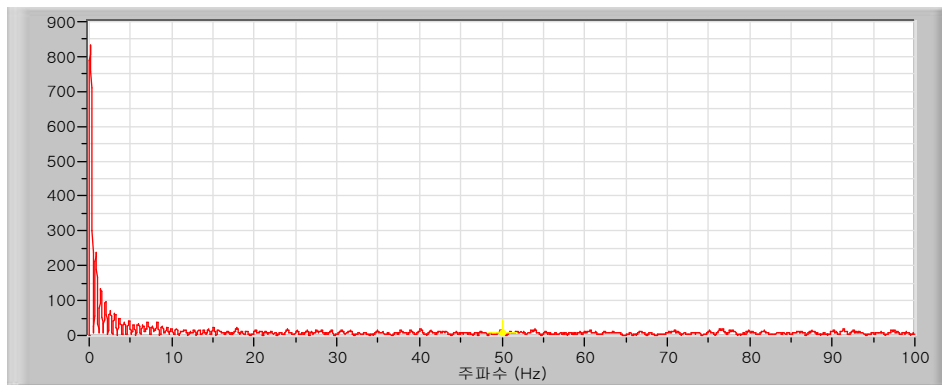
1번케이블 3축가속도 a_Y



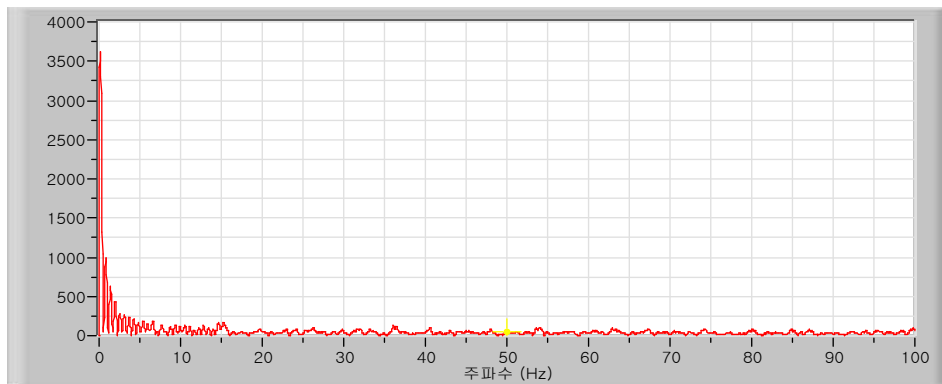
1번케이블 3축가속도 a_Z



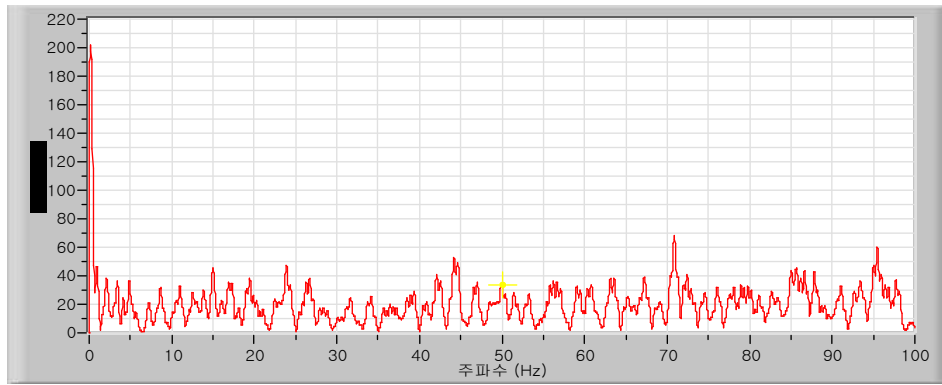
2번케이블 3축가속도 aX



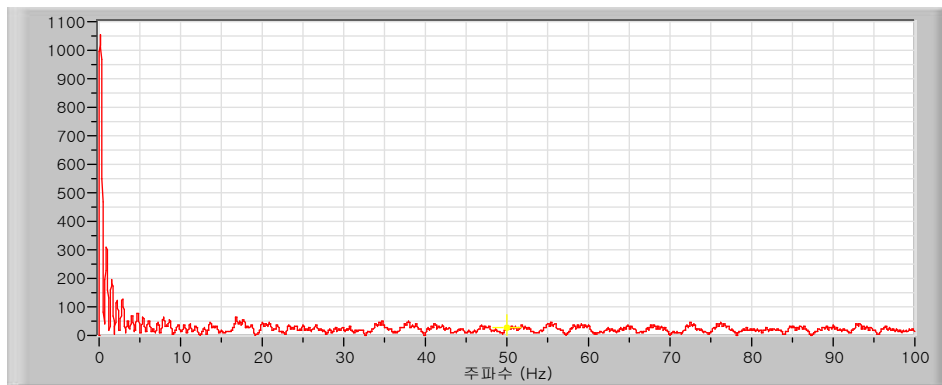
2번케이블 3축가속도 aY



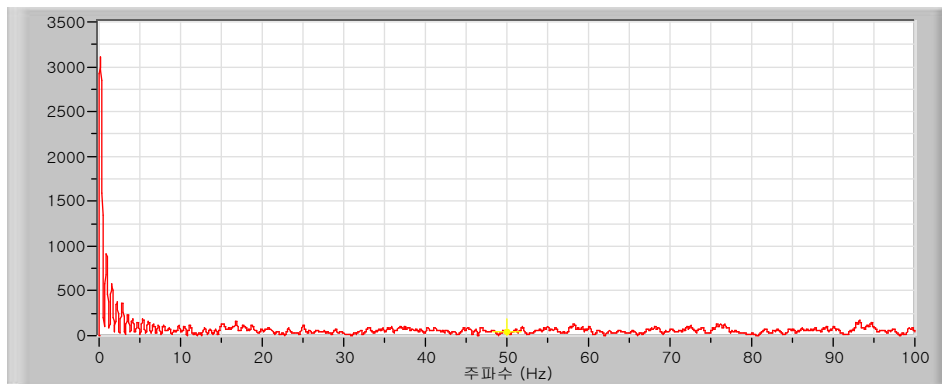
2번케이블 3축가속도 aZ



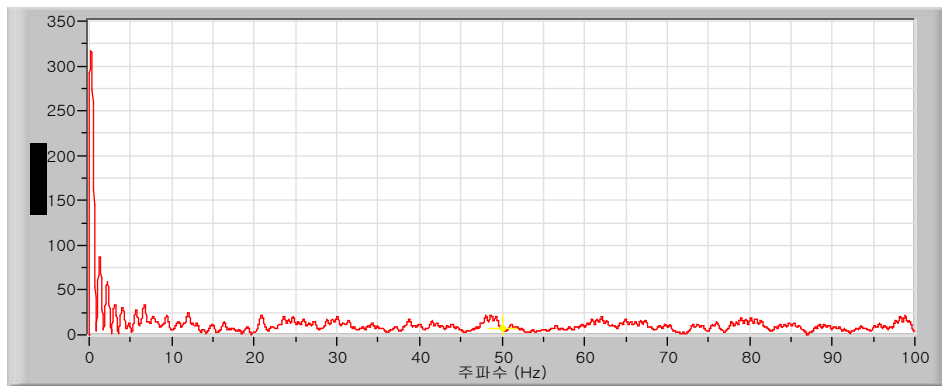
2번케이블 3축가속도 aX



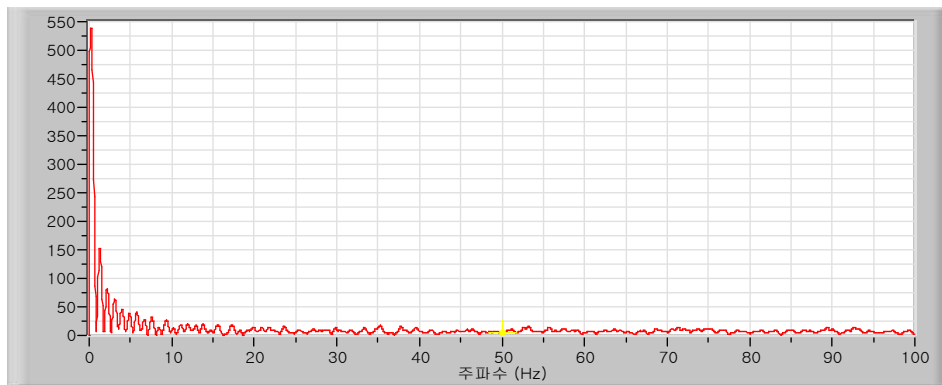
2번케이블 3축가속도 aY



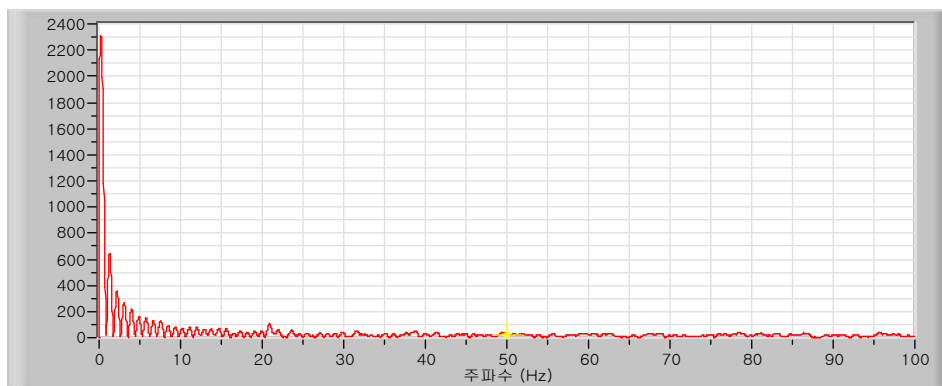
2번케이블 3축가속도 aZ



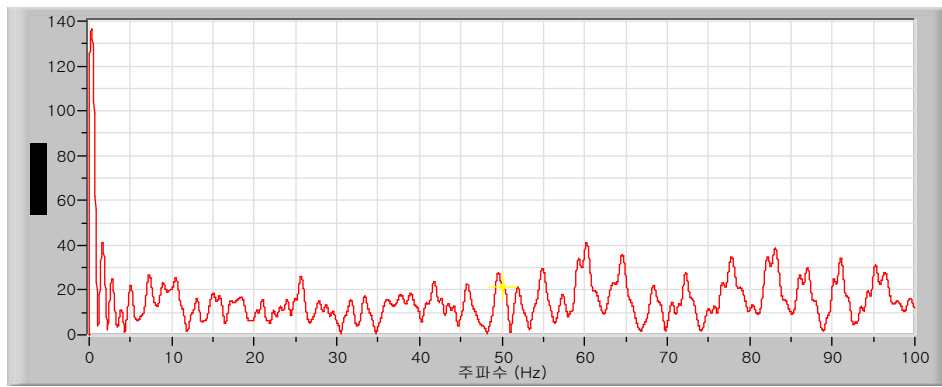
1번케이블 3축가속도 aX



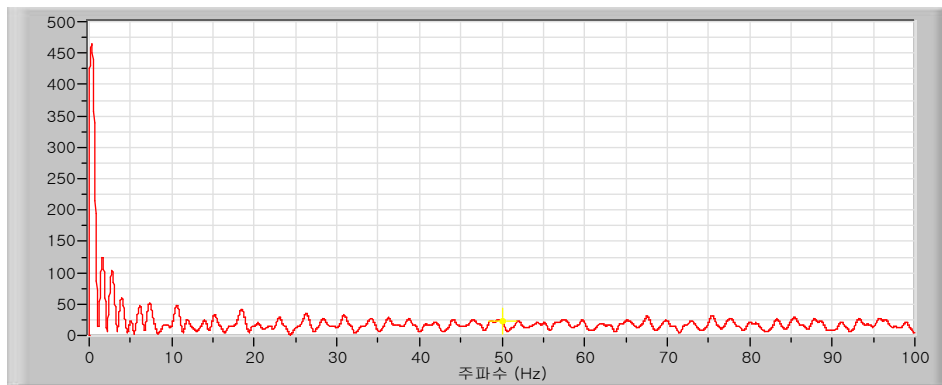
1번케이블 3축가속도 aY



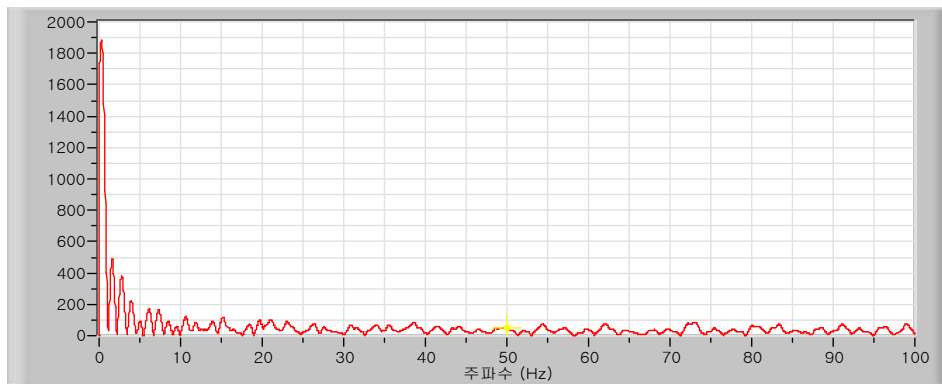
1번케이블 3축가속도 aZ



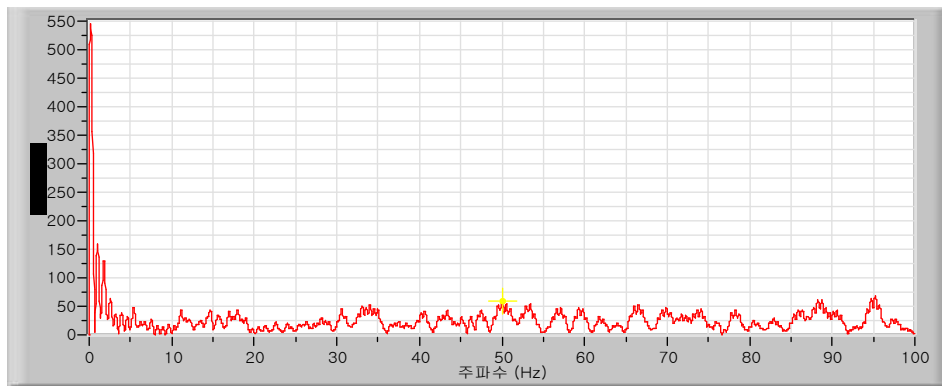
1번케이블 3축가속도 a_X



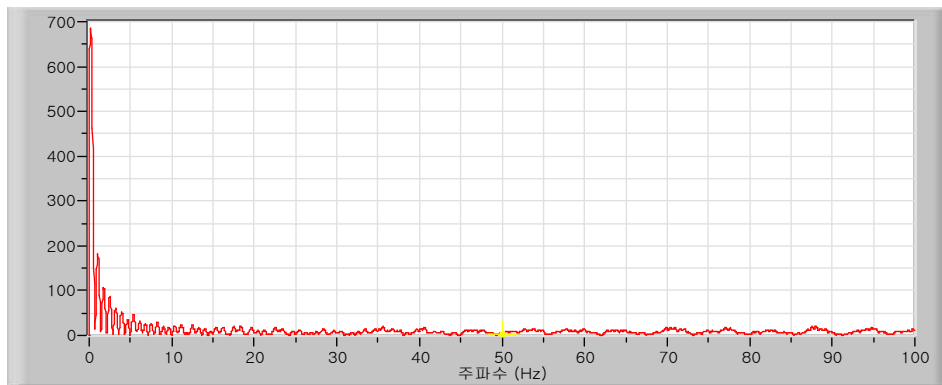
1번케이블 3축가속도 a_Y



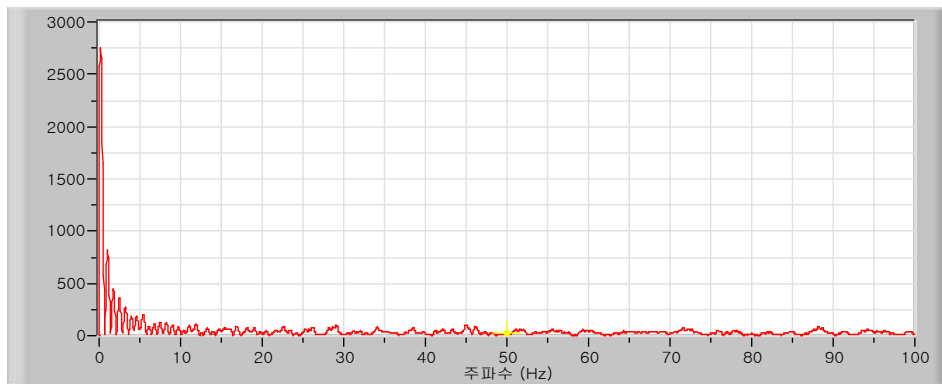
1번케이블 3축가속도 a_Z



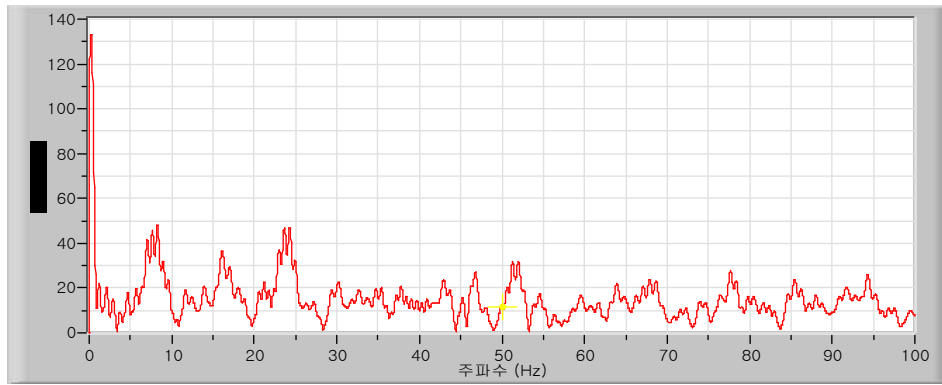
2번케이블 3축가속도 a_X



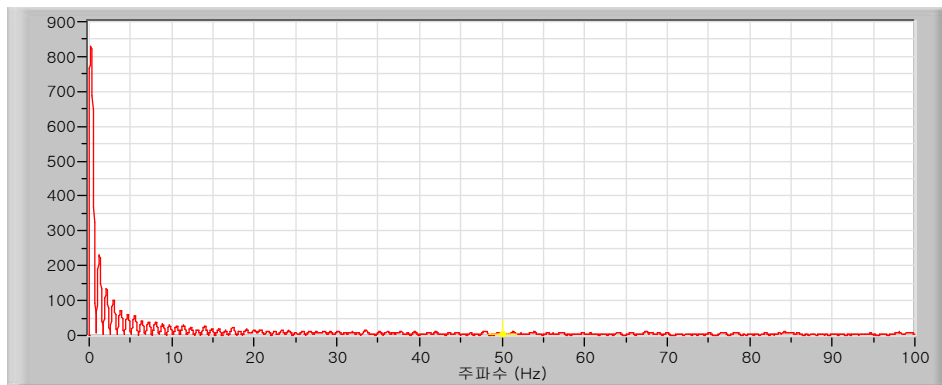
2번케이블 3축가속도 a_Y



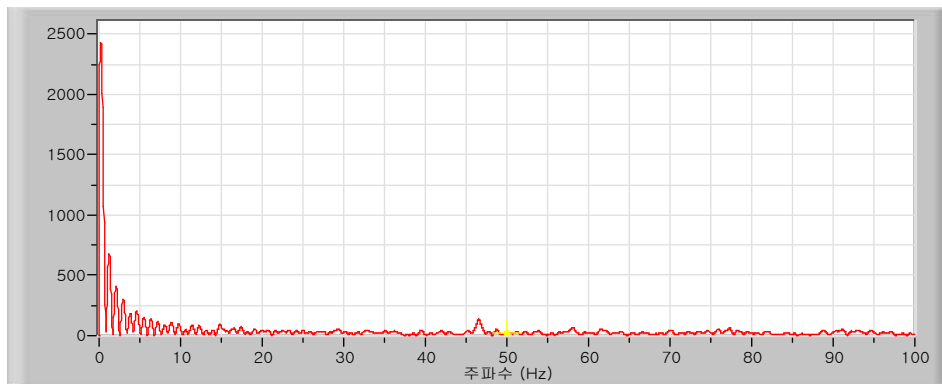
2번케이블 3축가속도 a_Z



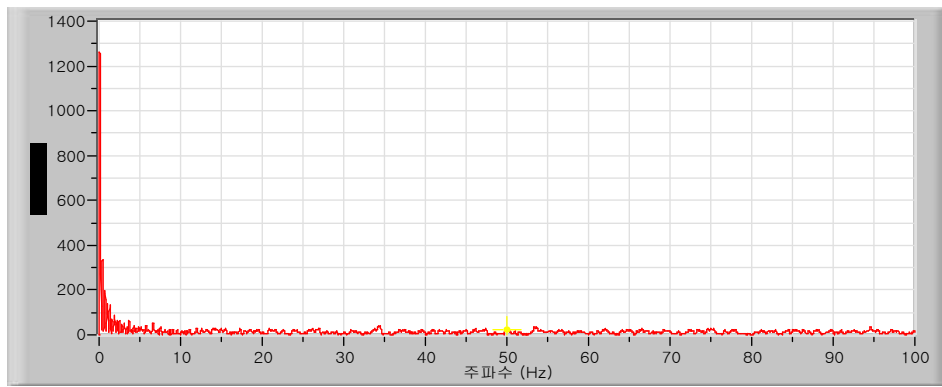
2번케이블 3축가속도 a_X



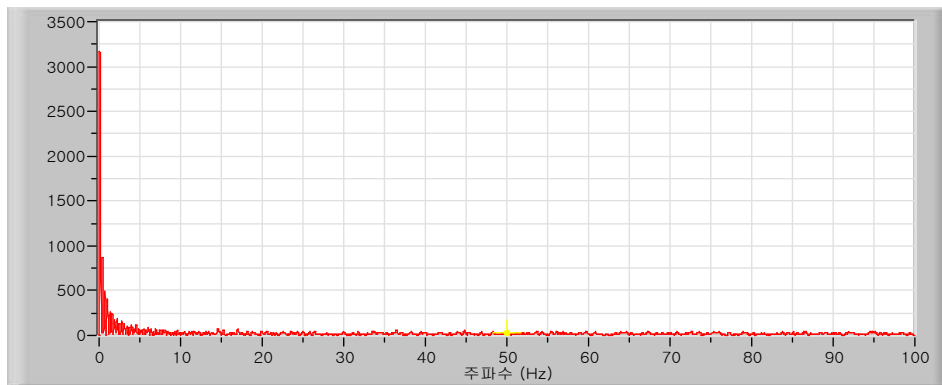
2번케이블 3축가속도 a_Y



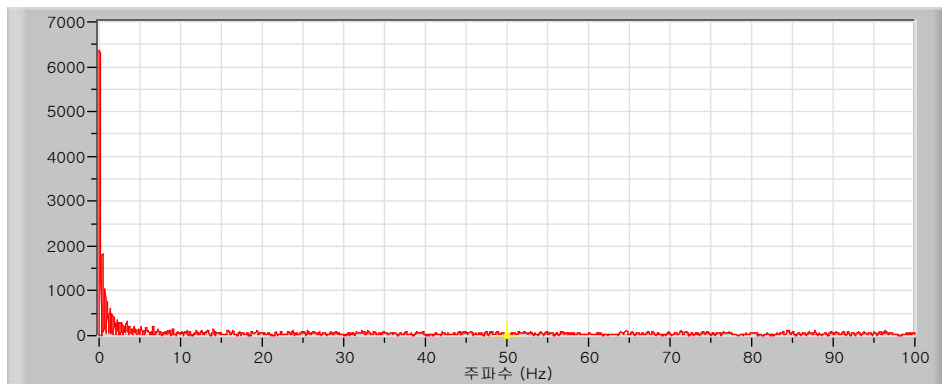
2번케이블 3축가속도 a_Z



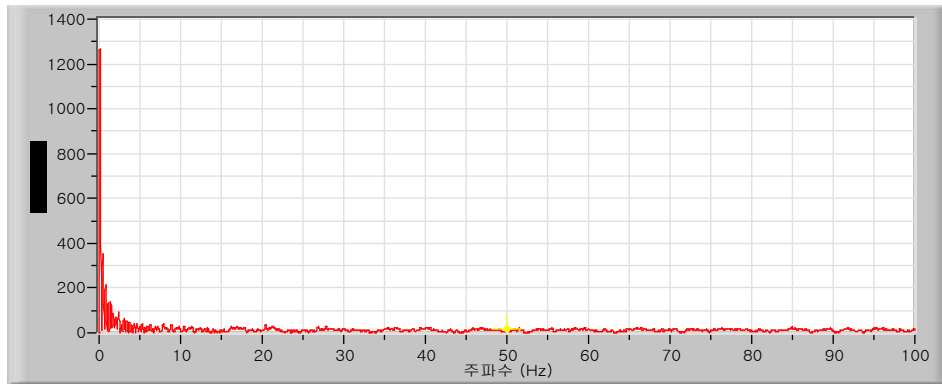
1번케이블 3축가속도 a_X



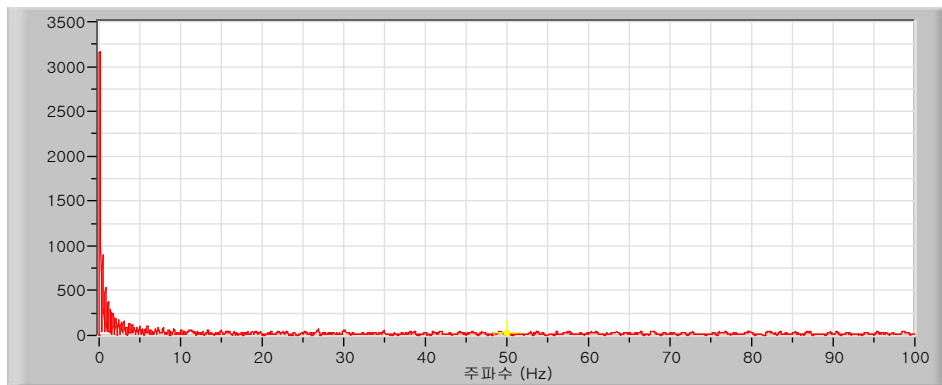
1번케이블 3축가속도 a_Y



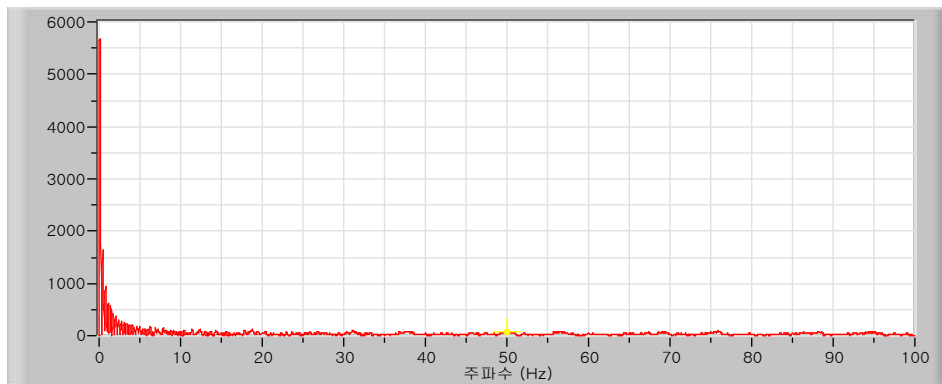
1번케이블 3축가속도 a_Z



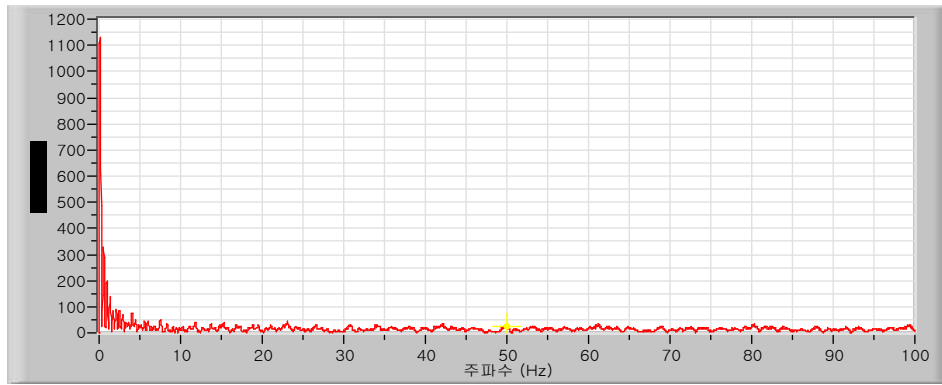
2번케이블 3축가속도 a_X



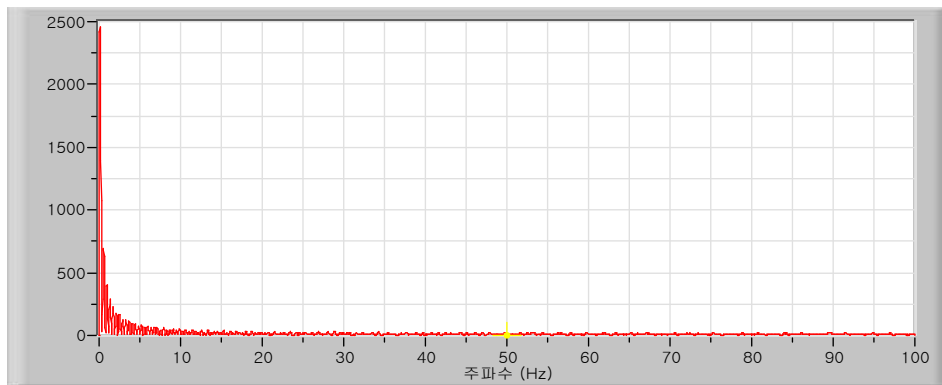
2번케이블 3축가속도 a_Y



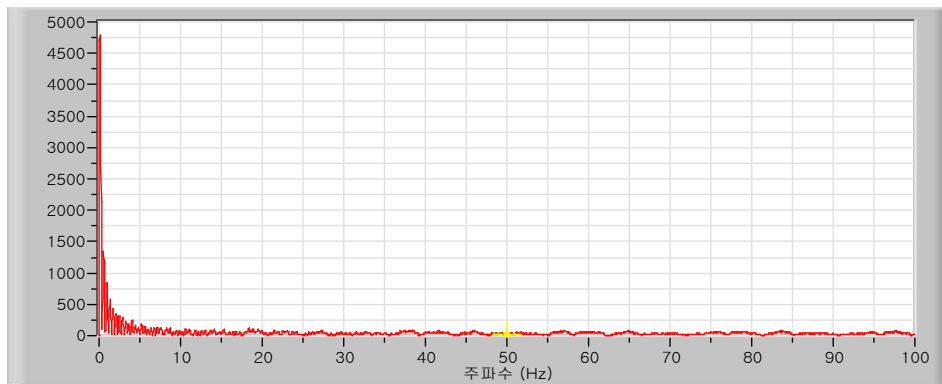
2번케이블 3축가속도 a_Z



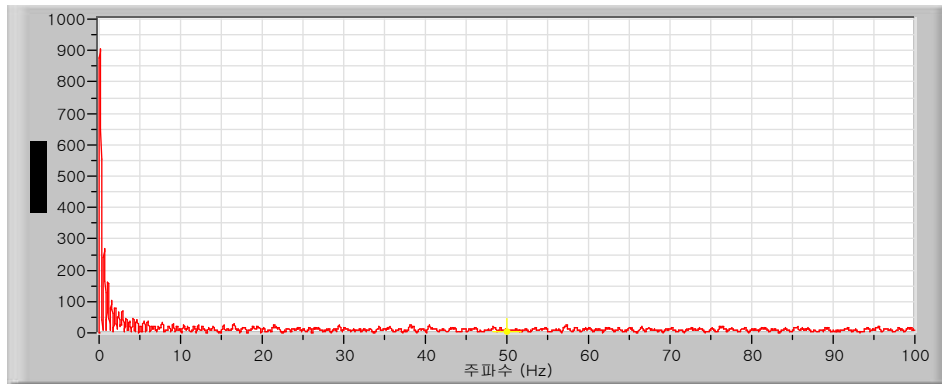
1번케이블 3축가속도 aX



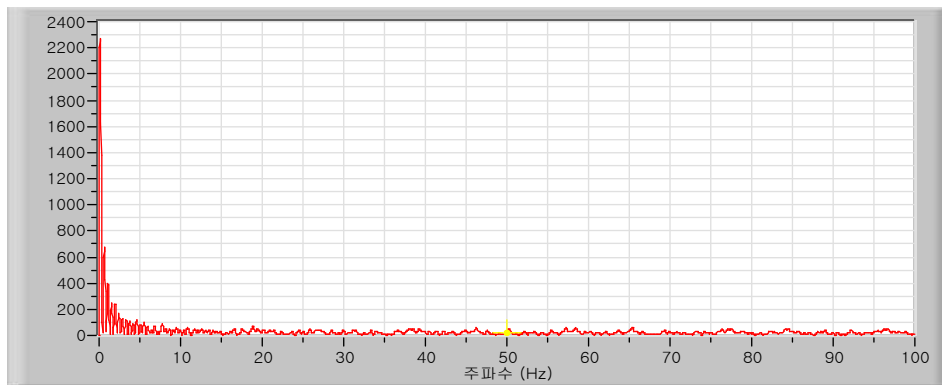
1번케이블 3축가속도 aY



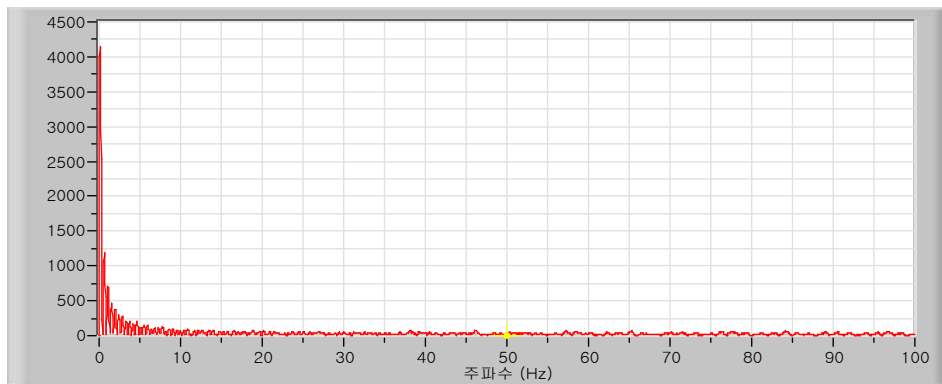
1번케이블 3축가속도 aZ



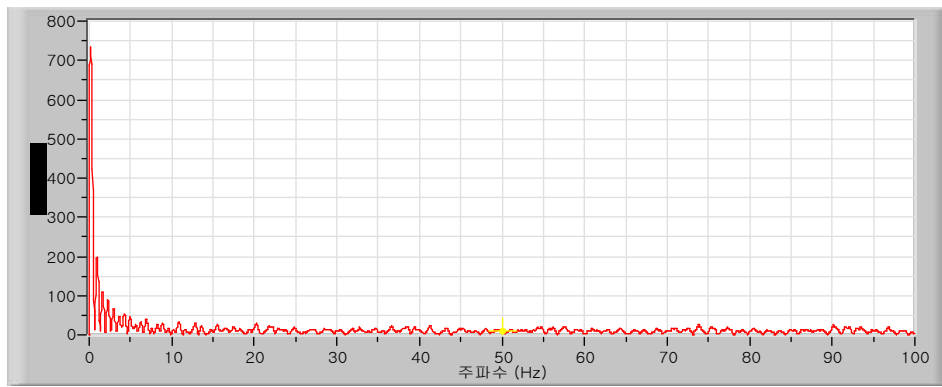
2번케이블 3축가속도 a_X



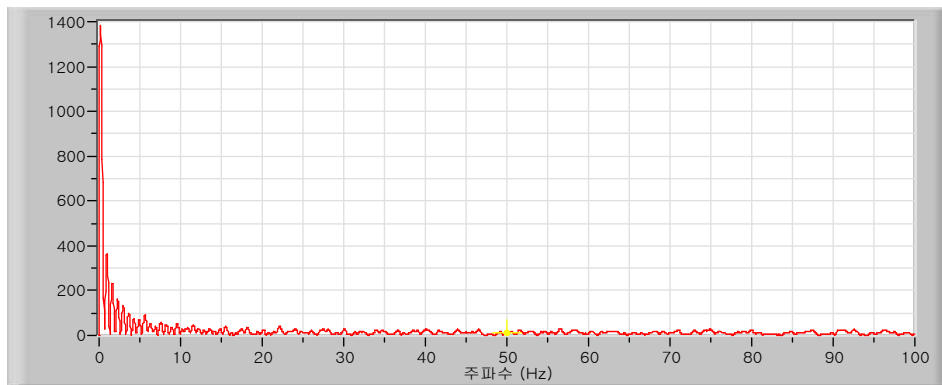
2번케이블 3축가속도 a_Y



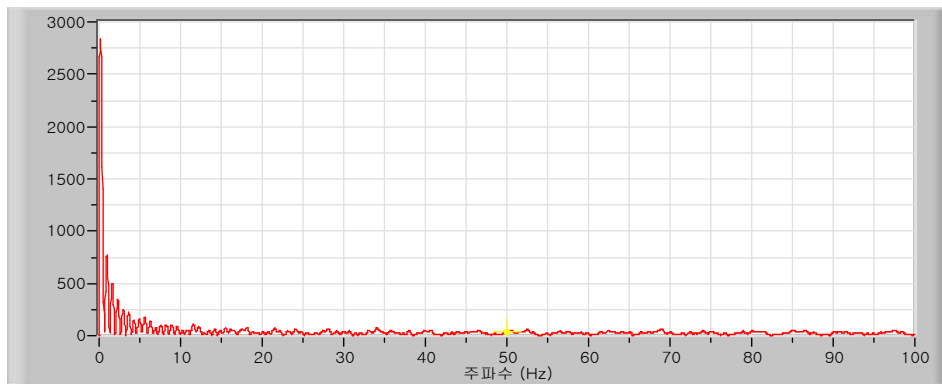
2번케이블 3축가속도 a_Z



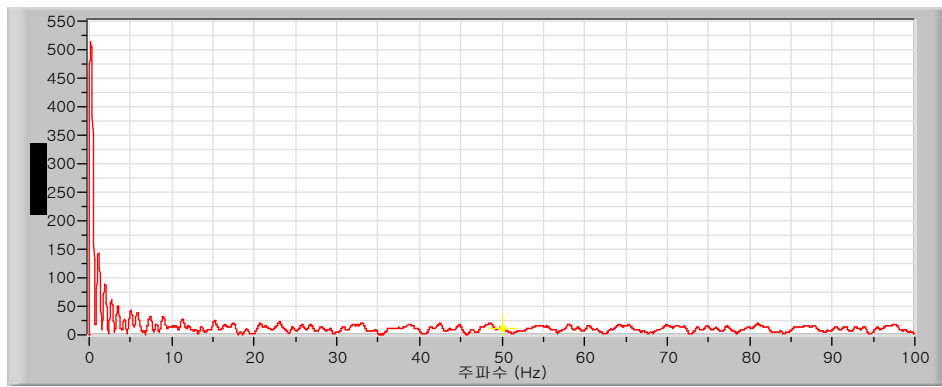
1번케이블 3축가속도 aX



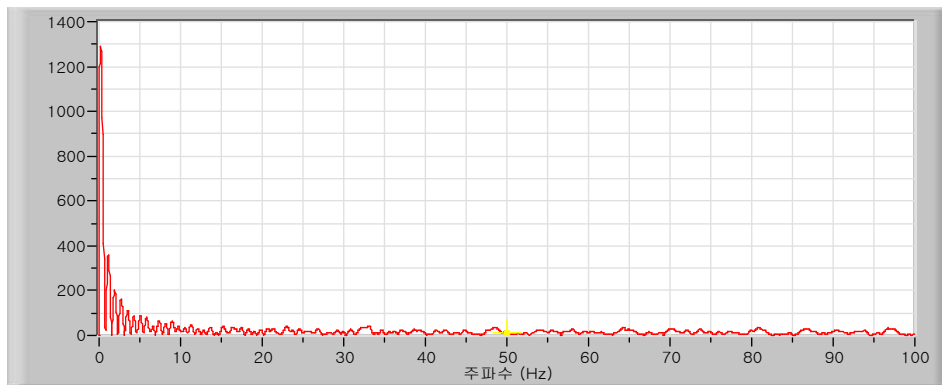
1번케이블 3축가속도 aY



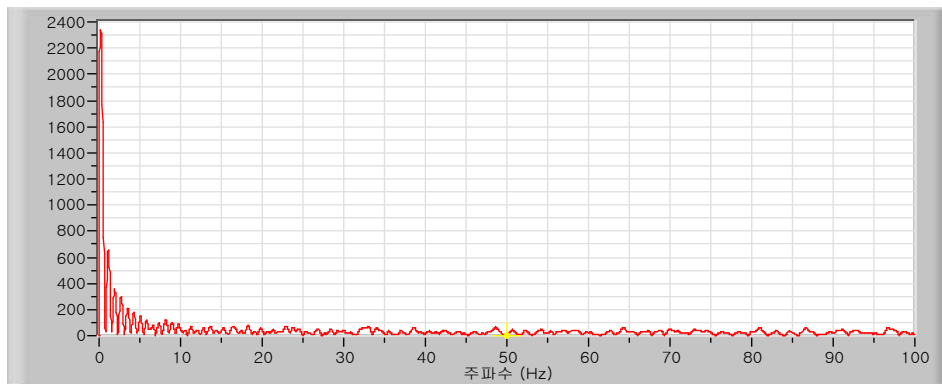
1번케이블 3축가속도 aZ



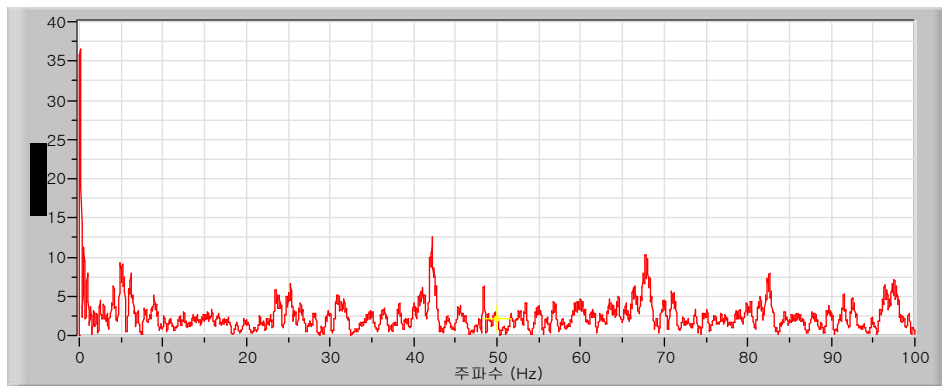
2번케이블 3축가속도 a_X



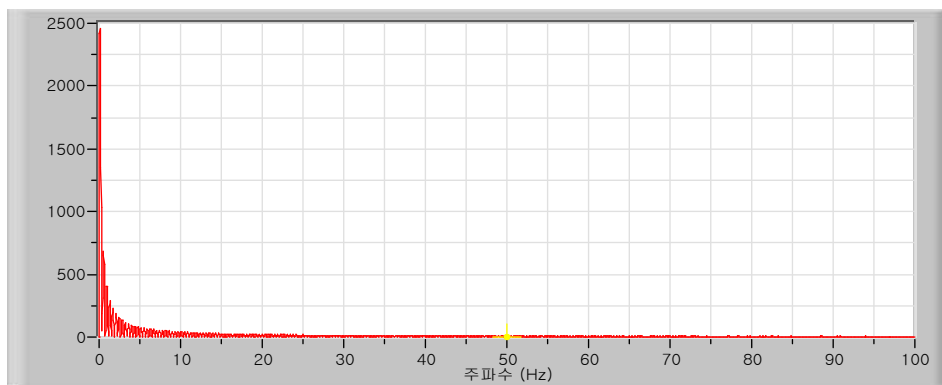
2번케이블 3축가속도 a_Y



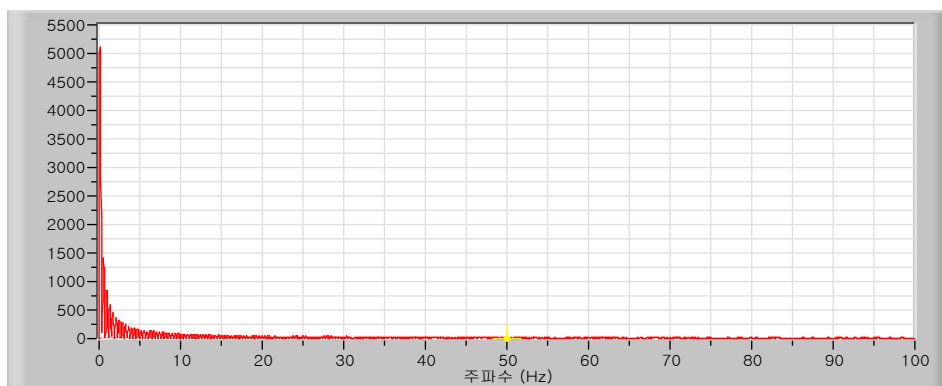
2번케이블 3축가속도 a_Z



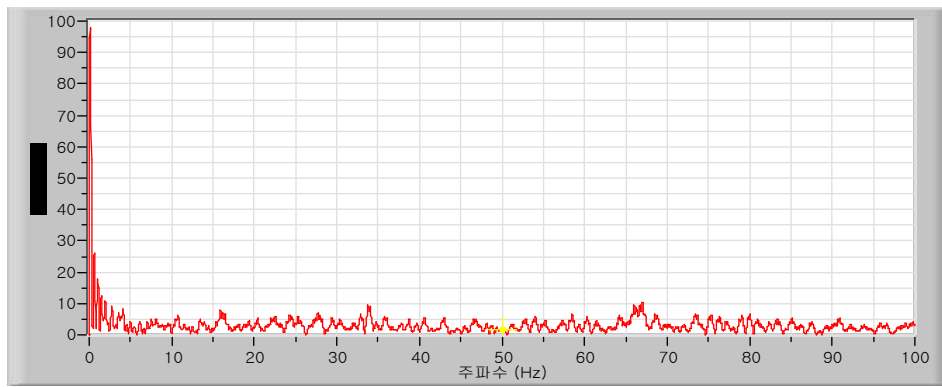
1번케이블 3축가속도 a_X



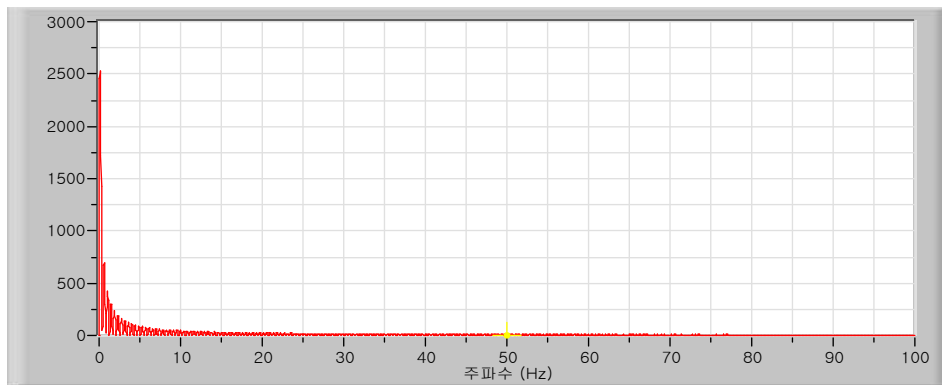
1번케이블 3축가속도 a_Y



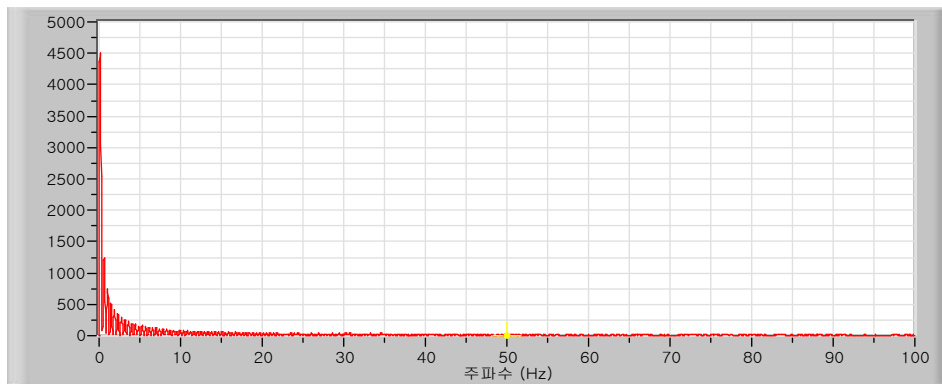
1번케이블 3축가속도 a_Z



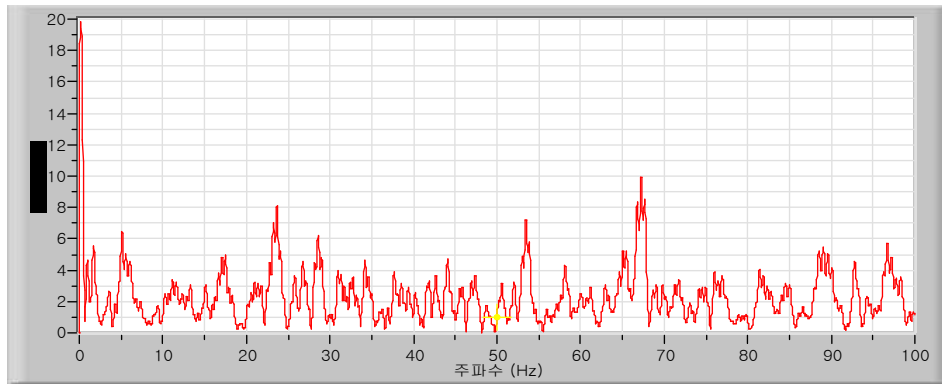
2번케이블 3축가속도 aX



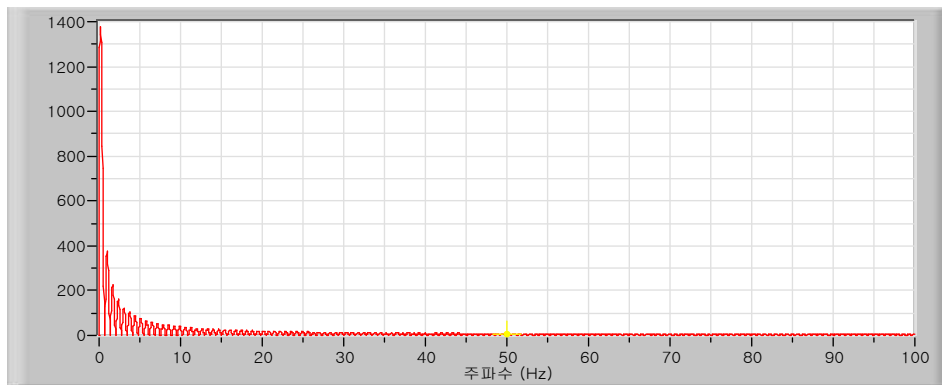
2번케이블 3축가속도 aY



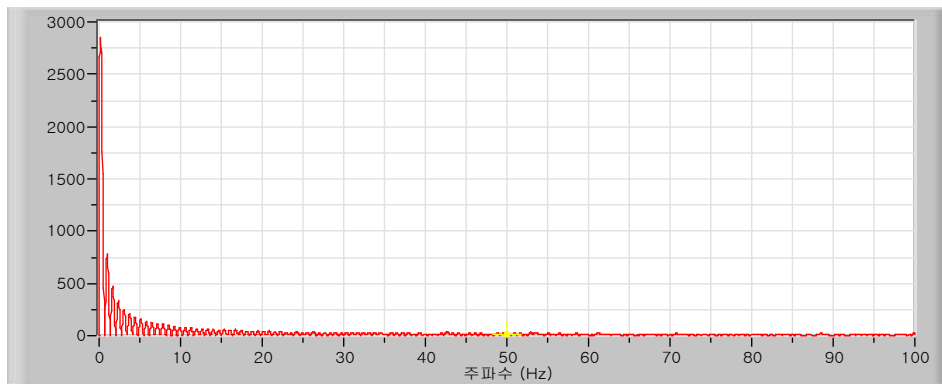
2번케이블 3축가속도 aZ



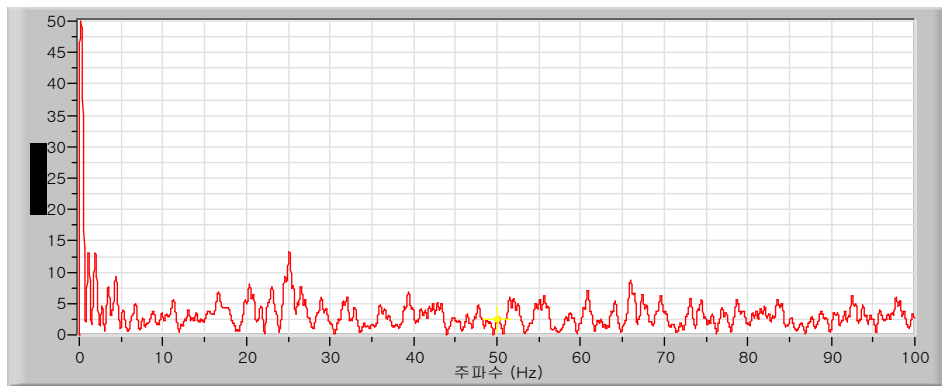
1번케이블 3축가속도 aX



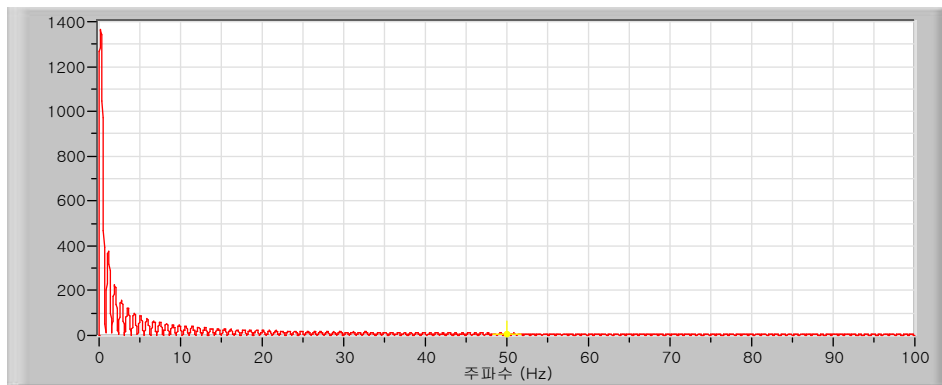
1번케이블 3축가속도 aY



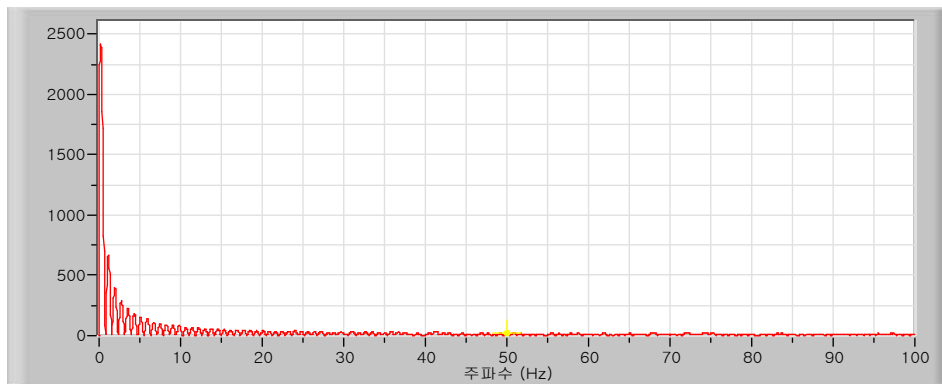
1번케이블 3축가속도 aZ



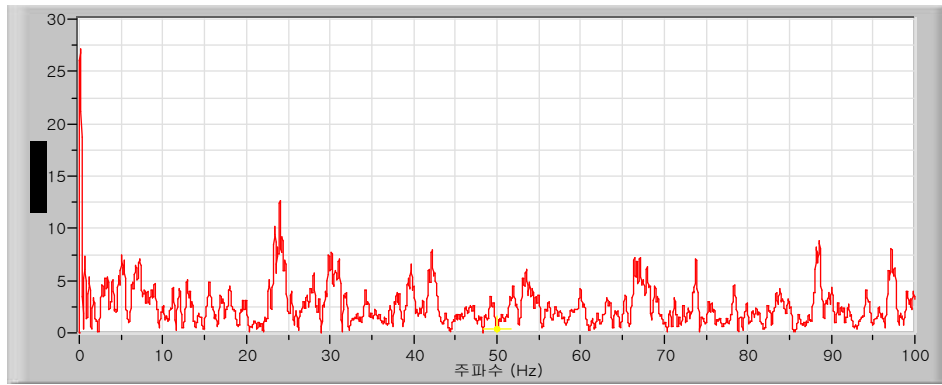
2번케이블 3축가속도 aX



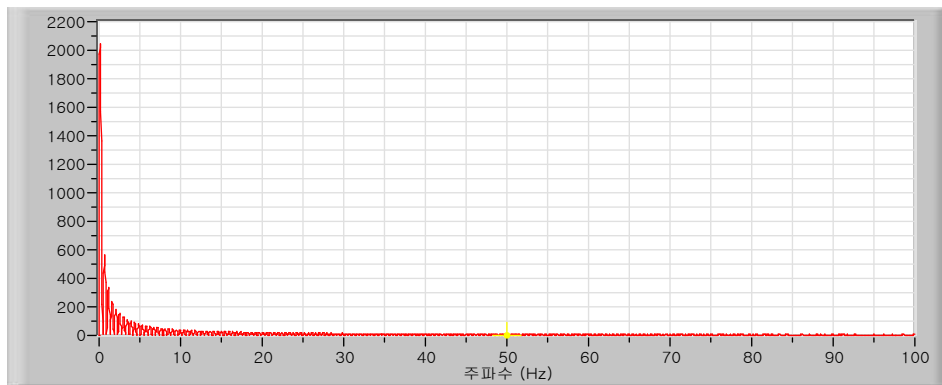
2번케이블 3축가속도 aY



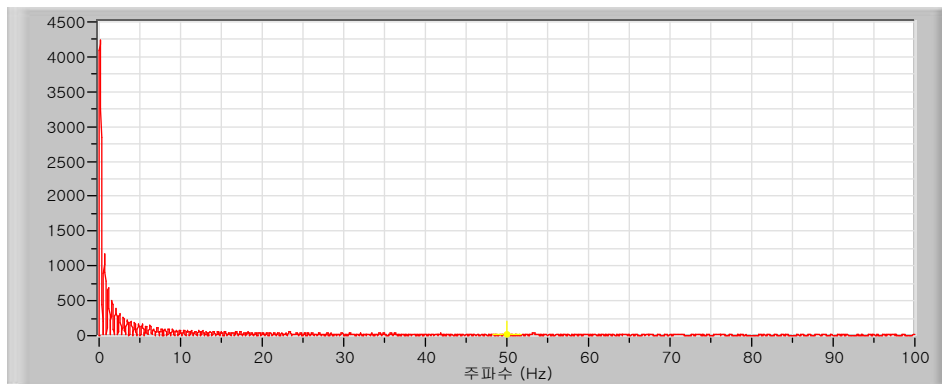
2번케이블 3축가속도 aZ



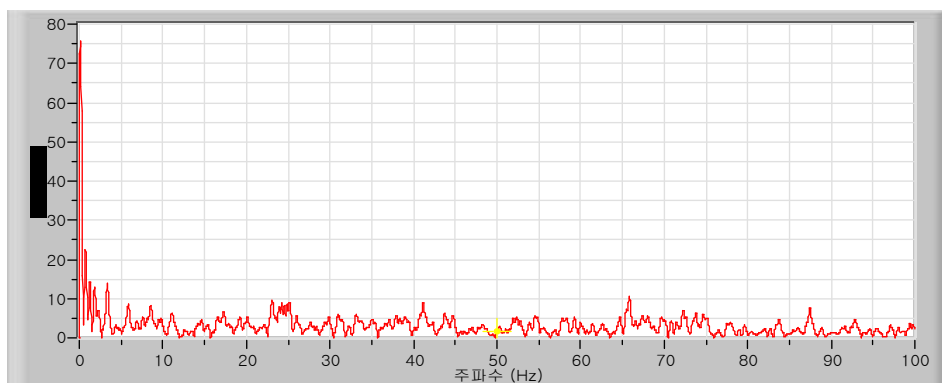
1번케이블 3축가속도 a_X



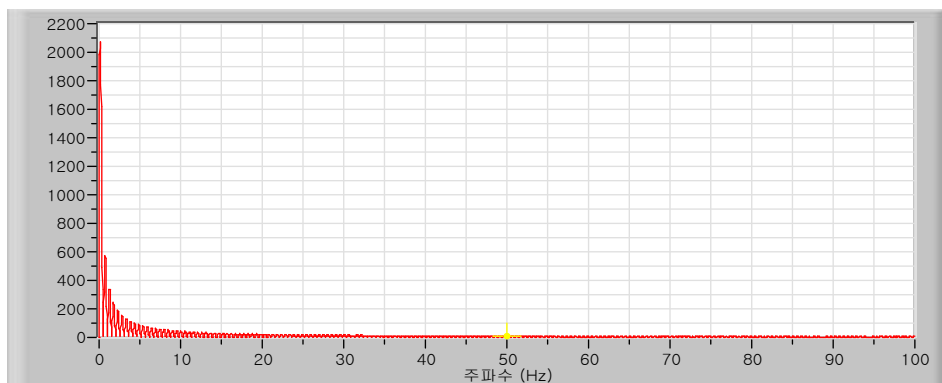
1번케이블 3축가속도 a_Y



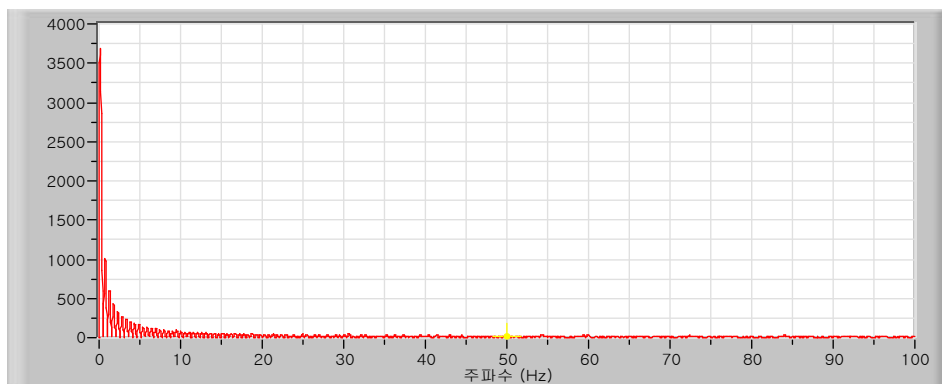
1번케이블 3축가속도 a_Z



2번케이블 3축가속도 aX

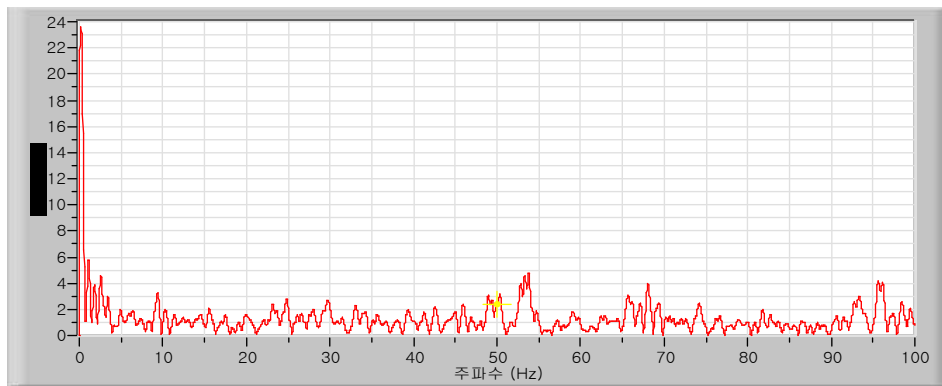


2번케이블 3축가속도 aY

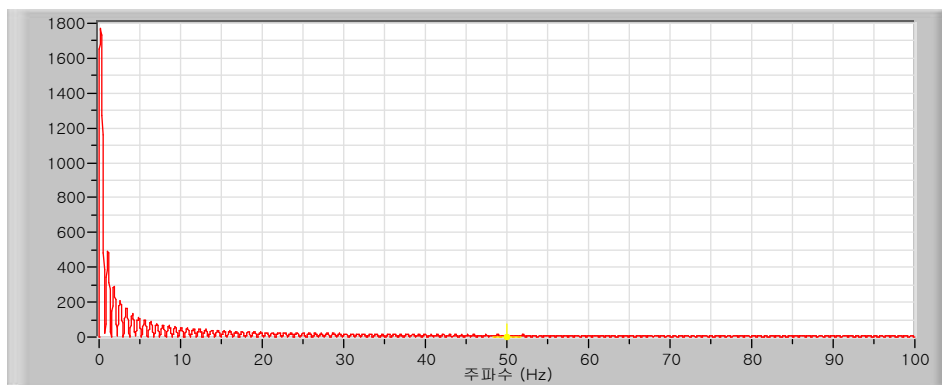


2번케이블 3축가속도 aZ

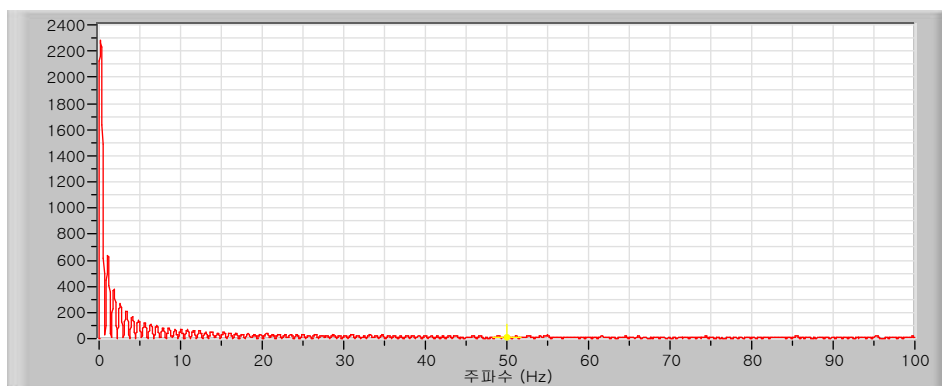
고유진동수 그래프(백석대교 - 9 AXES MOTION SENSOR SYSTEM - 1차)



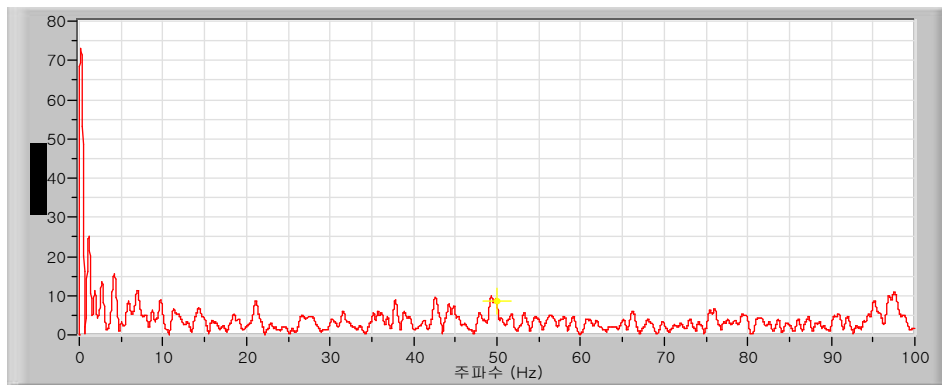
1번케이블 3축가속도 aX



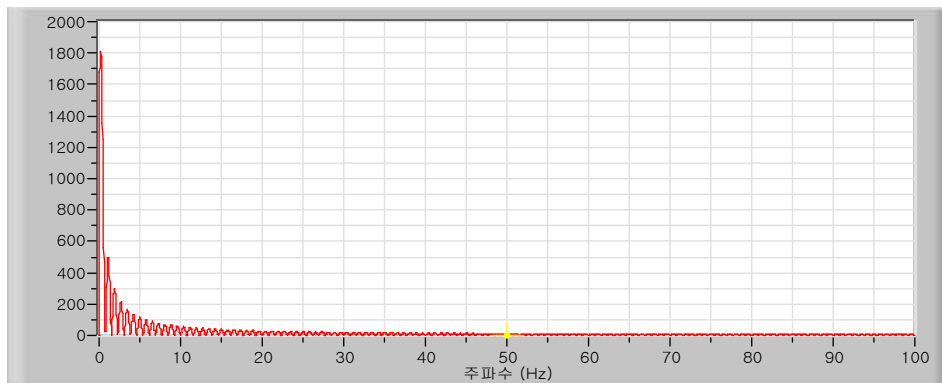
1번케이블 3축가속도 aY



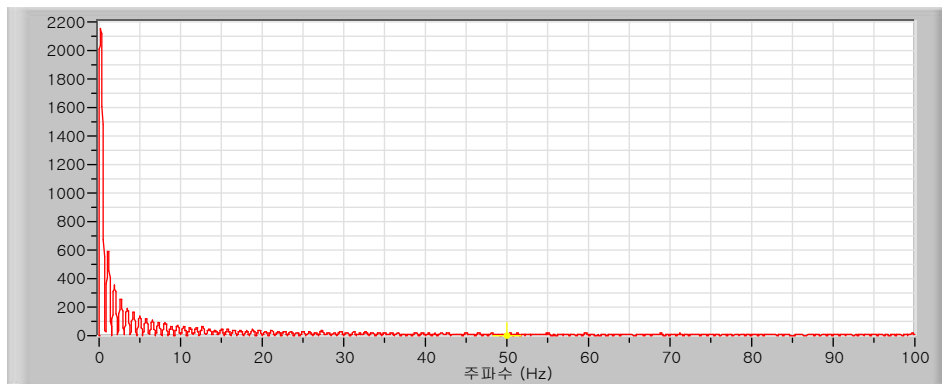
1번케이블 3축가속도 aZ



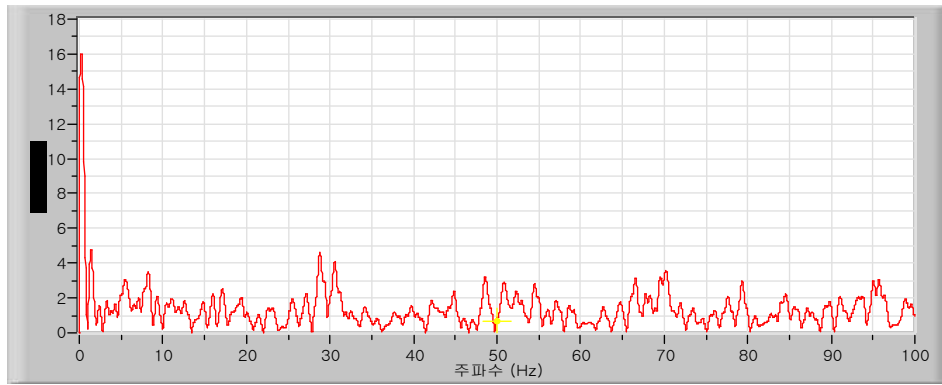
2번케이블 3축가속도 aX



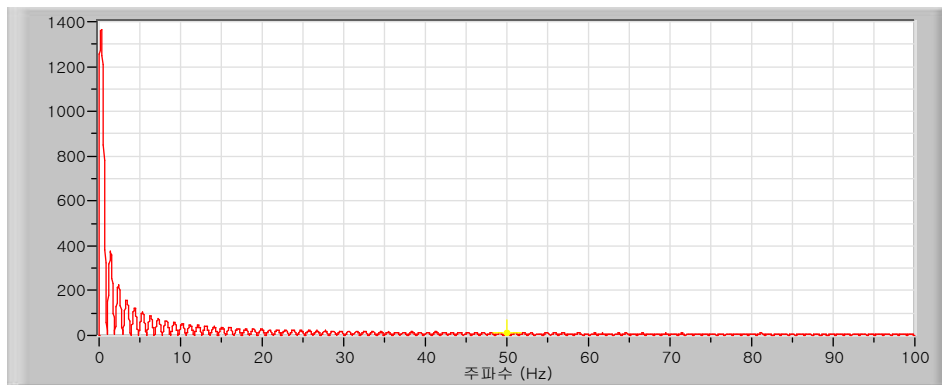
2번케이블 3축가속도 aY



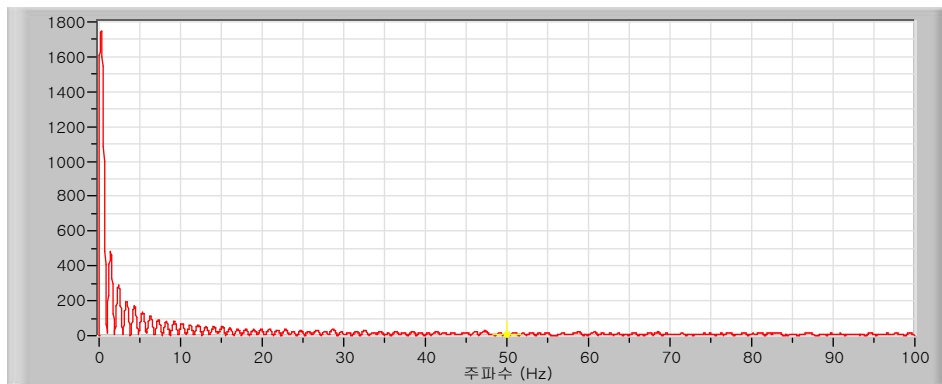
2번케이블 3축가속도 aZ



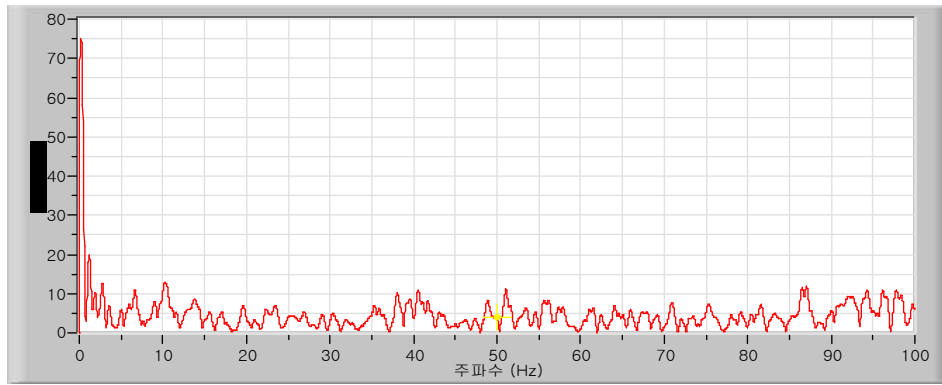
1번케이블 3축가속도 a_X



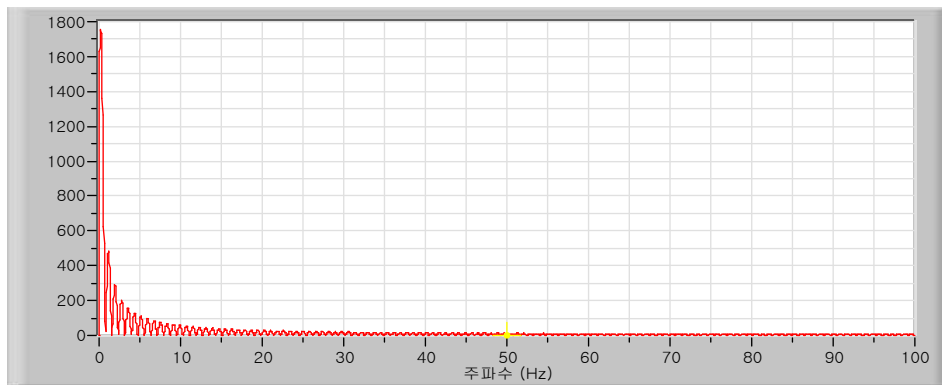
1번케이블 3축가속도 a_Y



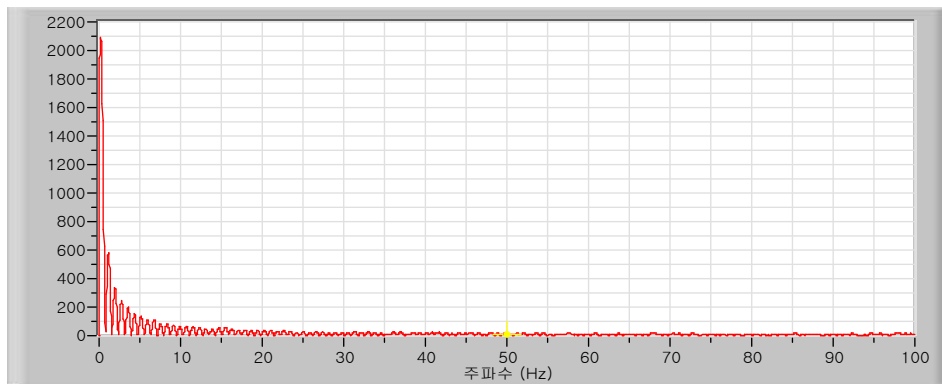
1번케이블 3축가속도 a_Z



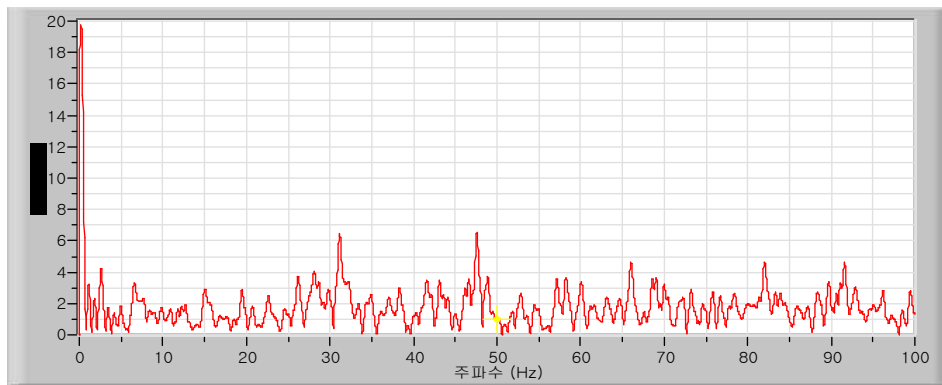
2번케이블 3축가속도 aX



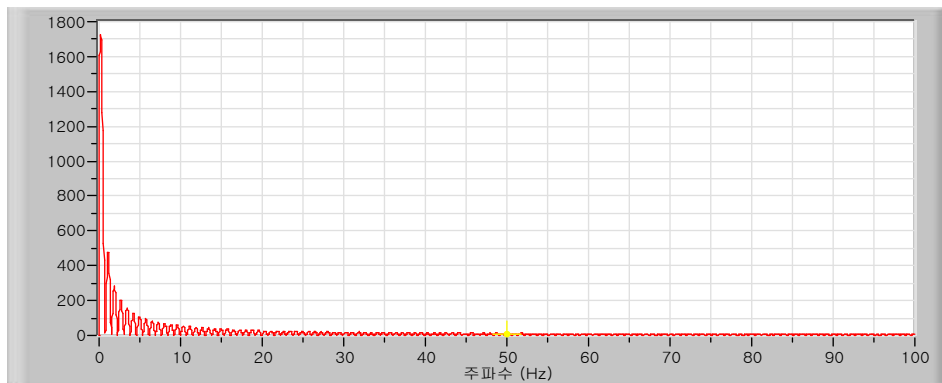
2번케이블 3축가속도 aY



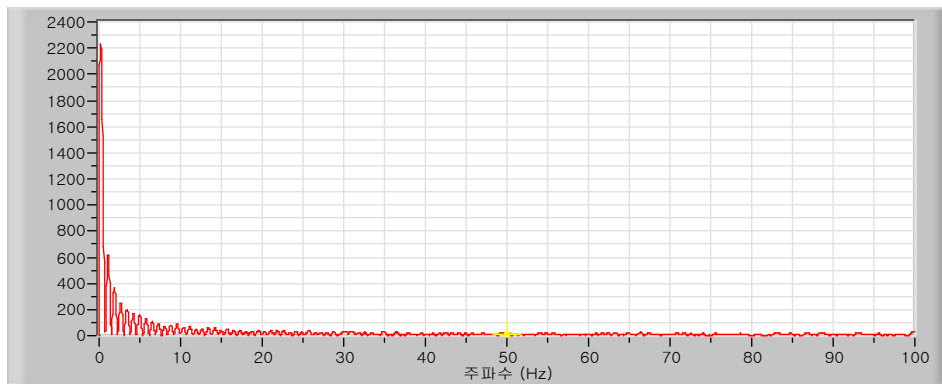
2번케이블 3축가속도 aZ



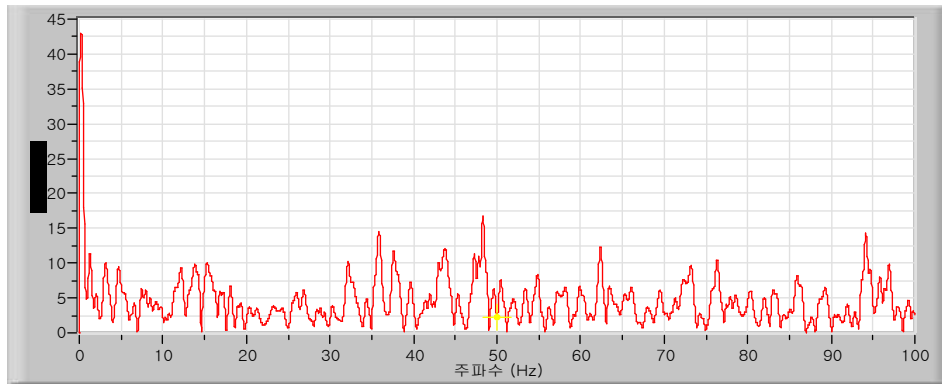
1번케이블 3축가속도 a_X



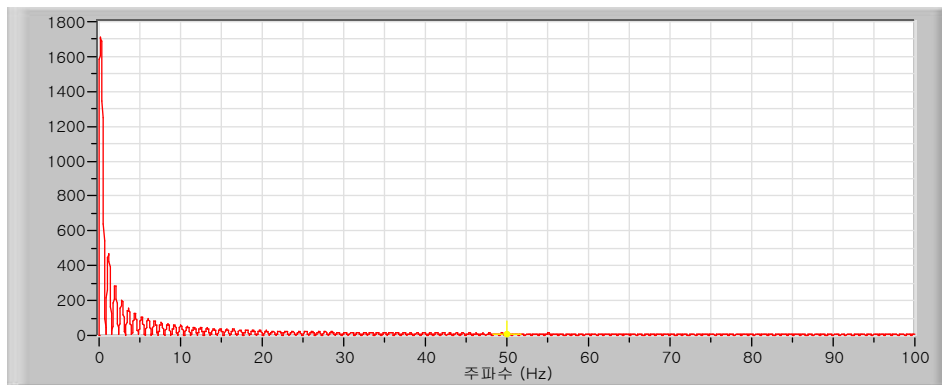
1번케이블 3축가속도 a_Y



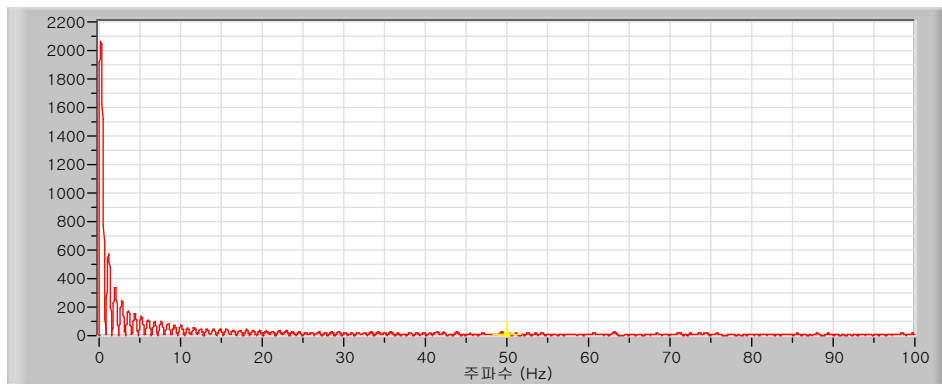
1번케이블 3축가속도 a_Z



2번케이블 3축가속도 a_X



2번케이블 3축가속도 a_Y



2번케이블 3축가속도 a_Z

주 의

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