

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()
국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

고유번호(발간등록번호)

11-1613000-002152-01

무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 개발 최종보고서

2018. 3. 15.

주관연구기관 / 울산과학기술원

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

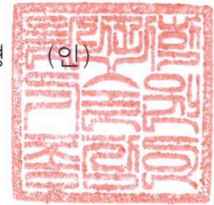
제 출 문

국토교통부장관 귀하

‘무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 개발’(연구개발 기간 : 2015.06.18 ~ 2017.12.16) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2018. 03. 15.

주관연구기관명 : 울산과학기술원 (대표자) 정 무 영 (인)



주관연구기관책임자: 심 성 한

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	16CTAP-C097436-02	해당 단계 연구 기간	2016.06.18.~ 2017.12.16	단계구분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	중사업명	창의도전연구분야			
	세부사업명	창조형모험			
연구과제명	대과제명	무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 개발			
	세부과제명	무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 개발			
연구책임자	심성한	해당단계 참여 연구원 수	총: 3 명 내부: 3 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:50,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:50,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 6 명 내부: 6 명 외부: 명	총 연구개발비	정부:100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계:100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	울산과학기술원			참여기업명	해당사항 없음
국제공동연구	해당사항 없음			해당사항 없음	
위탁연구	해당사항 없음			해당사항 없음	
				보고서 면수	83

요약

1. 장력계측 및 반 능동 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발

- 아두이노 메가를 무선센서 하드웨어 플랫폼으로 선정
- Xbee와 무선섀드를 이용하여 무선통신부를 개발
- MEMS형 가속도계(ADXL 335)를 가속도계로 선정하고 센싱 인터페이스 구성
- 진동법 기반 무선센서 플랫폼에 임베디드 가능한 장력측정 알고리즘을 개발
- 자기유변댐퍼 제어에 효과적인 Clipped optimal 반 능동 제어를 진동제어 알고리즘으로 선정
- 수치해석을 통해 장력측정 및 반 능동 제어 알고리즘의 최적화 수행
- 무선센서 기반 아두이노 플랫폼에 임베디드 가능한 반 능동 제어 알고리즘을 개발

2. 일체형 장치 시제품 제작 및 성능 평가

- 케이블 장력계측 및 진동제어 일체형 시스템 시제품 제작
- 일체형 시스템의 전원 공급을 위한 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작
- 실내 모형 케이블에 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템을 설치하여 테스트베드를 구성
- 실내실험을 통해 일체형 시스템의 장력측정 정확도와 진동감소 능력을 평가하고 시스템을 최적화

연구의 목적 및 내용	○ 최종목표 : 장대교량 케이블의 유지관리를 위한 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템 개발 - 무선센서의 임베디드 프로세싱을 이용한 빠른 케이블 장력 계측 - 무선센서 기반 자기유변댐퍼의 반 능동 케이블 진동 제어 - 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 시제품 개발 ○ 연구내용 1: 진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발 - 무선센서 플랫폼 선정 및 센싱 인터페이스 구성을 통한 하드웨어 개발 - 수치실험을 통한 진동법의 장력계측 성능 검증 및 최적화 - 무선센서에 임베디드 가능한 장력측정 소프트웨어 개발 ○ 연구내용 2: 자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발 - 자기유변댐퍼 관련 장비 및 시스템 구축 - 반 능동 제어 알고리즘 선정 - 무선센서에 임베디드 가능한 반 능동 제어 소프트웨어 개발 ○ 연구내용 3: 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 제작 및 성능평가 - 무선센서 플랫폼, 인터페이스, 소프트웨어를 통합한 일체형 시제품 제작 - 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작 - 실내실험을 통한 성능평가 및 최적화
연구개발성과	○ 시제품: 연구실 규모 케이블의 장력계측 및 진동제어가 가능한 시스템의 시제품 ○ 소프트웨어: 무선센서에 임베디드된 장력계측 및 반 능동 제어 소프트웨어 ○ 양적성과: SCI급 논문 3편(최소성과 1편), 특허등록 1건
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	1. 활용계획 ○ 장대교량의 유지관리에 활용도가 높은 연구로서, 교량 유지관리 주체와의 협력과 기술 이전 및 상용화를 진행할 수 있고, 원천기술 확보를 통한 세계시장 선점이 가능함 ○ 본 연구는 무선센서, 진동계측, 구조제어, 임베디드 프로세싱과 같은 최신기술을 활용하는 연구로, 최신기술을 통한 건설기술의 선진화를 유도하는데 활용 할 수 있음 ○ 본 연구를 통해 건설과 IT기술의 융합연구를 독려하고 관련 연구인력을 양성할 뿐 아니라, 학생들의 교육 및 연구능력 향상에 활용이 가능함 2. 기대효과 ○ 장대교량 케이블의 장력계측과 진동제어를 동시에 수행하는 일체형 장치를 최초로 개발함으로써, 원천기술을 확보 및 유지관리 산업의 촉진을 유도함 ○ 2000년대 전후로 건설된 다수의 장대교량의 유지관리 수요에 미리 대응하여 시장성을 확보함 ○ 장대교량 케이블의 유지관리 기술은 신흥국가뿐만 아니라, 선진국에서도 기술수요가 충분하므로, 해외시장에 기술수출이 충분히 가능함 ○ 장대교량의 안전성 향상을 통하여 국민의 불안감을 해소하고 및 민원을 감소시킬 수 있음
핵심어 (5개 이내)	장대교량 무선센서 케이블 장력 자기유변댐퍼 반 능동제어

< SUMMARY >

Purpose & Contents	○ Purpose : Development of Integrated Cable Tension Monitoring and Vibration Control System Based on Wireless Sensors for Long-span Bridge – Estimation of cable tension using embedded processing of wireless sensors – Semi-active vibration control of stay-cables using MR dampers – Development of a prototype possible to measure the tension of a cable (laboratory-scale) and control the vibration ○ Content 1: Vibration-based embedded processing software for tension estimation – Selection of wireless sensor platform – Numerical validation and optimization of tension estimation – Software development for wireless sensors ○ Content 2: Software development for MR damper control – Selection of appropriate MR damper system – Selection of a semi-active control algorithm for wireless sensors – Software development of the semi-active control for wireless sensors ○ Content 3: Development of a prototype integrated system and performance evaluation of a developed system – An integrated system with wireless sensing, tension monitoring/control hardware and software – Development of energy harvesting system based on solar energy – Laboratory-scale testing using a stay-cable model
Results	○ Prototype: Development of a prototype possible to measure the tension of cable (laboratory-scale) and control the vibration ○ Software: Software for tension measurement and semiactive vibration control with wireless sensor embedded ○ Quantitative outcome: Three SCI articles (minimum 1 SCI articles), One patent registration
Expected Contribution	○ Application of the outcome to cable control of actual long-span bridge ○ Technology transfer to cable vibration related authority after the additional experiment in the field ○ Development of additional and improved technology and transfer of technology with support of bridge management authority ○ Development of integrated monitoring system based on IoT for evaluation of bridge safety
Keywords	Long-span bridge Wireless Sensor Cable Tension MR Damper Semi-active Control

< CONTENTS >

1. Summary of Research Projects	7
2. Domestic and International R&D Trends	20
3. Research Contents and Results	33
4. Goal Achievements and Contribution on Related fields	60
5. Future Plan of R&D Results	61
6. International Scientific and Technology Information	62
7. Security level	63
8. Registered Research Facilities and Equipments on NTIS	64
9. Safety Action at Laboratory in the Research Process	65
10. Representative Research Results	66
11. Others	67
12. Reference	68
13. Appendix	70

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	7
2. 국내외 기술 개발 현황	20
3. 연구 수행 내용 및 성과	33
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	60
5. 연구개발성과의 활용 계획	61
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	62
7. 연구개발성과의 보안등급	63
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	64
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	65
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	66
11. 기타 사항	67
12. 참고 문헌	68
13. 부록	70

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구개발 최종목표

- (1) 최종목표: 장대교량 케이블의 유지관리를 위한 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템 개발

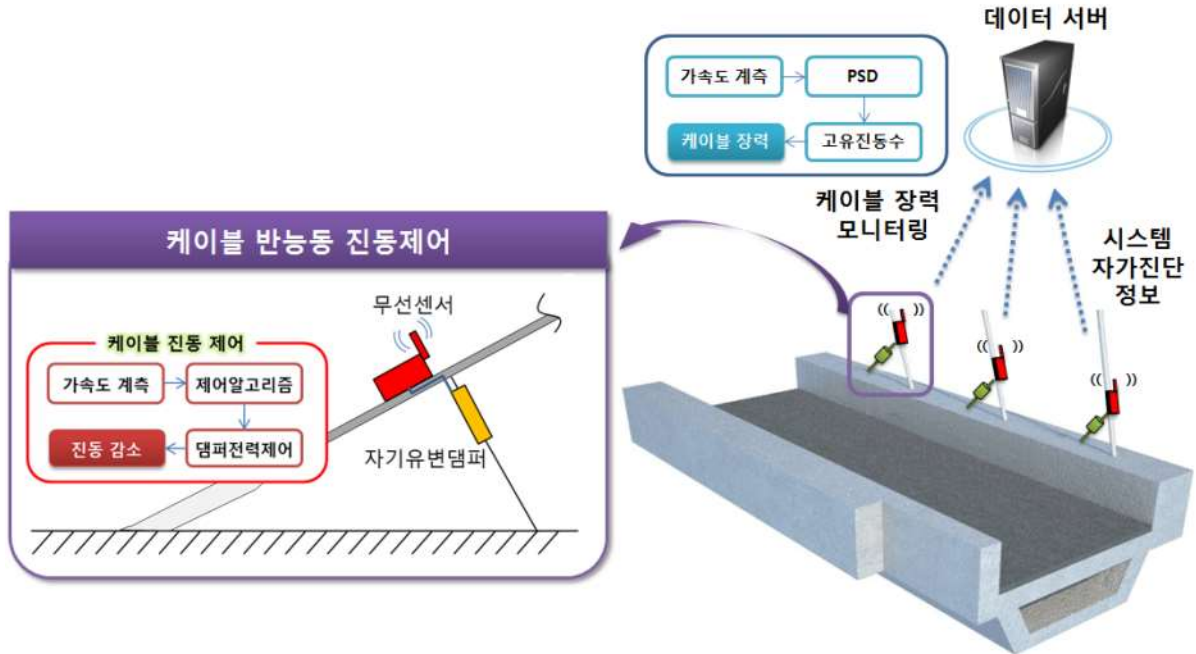


그림 1. 장대교량 케이블 유지관리를 위한 일체형 시스템

- 무선센서의 임베디드 프로세싱을 이용한 케이블 장력 계측
 - 무선센서로 케이블의 진동을 측정하고 임베디드된 진동법으로 장력을 산정
 - 케이블 형식에 따른 장력 산정 알고리즘 최적화
- 무선센서 기반 자기유변댐퍼의 반 능동 케이블 진동 제어
 - 자기유변댐퍼의 제어·계측·전력공급 장치를 무선센서로 통합 및 대체
 - 무선센서로 케이블의 진동을 측정하고 제어 신호를 계산
 - 무선센서 활용에 적합한 제어 알고리즘 적용 및 개선
- 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 시제품 개발
 - 일체형 시스템의 전원 공급을 위한 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작
 - 연구실 규모 케이블의 장력계측 및 진동제어가 가능한 시스템의 시제품 개발

(2) 최종 성과물

- 시제품: 연구실 규모 케이블의 장력계측 및 진동제어가 가능한 시스템의 시제품 개발
- 소프트웨어: 무선센서에 임베디드된 장력계측 및 반 능동 제어 소프트웨어

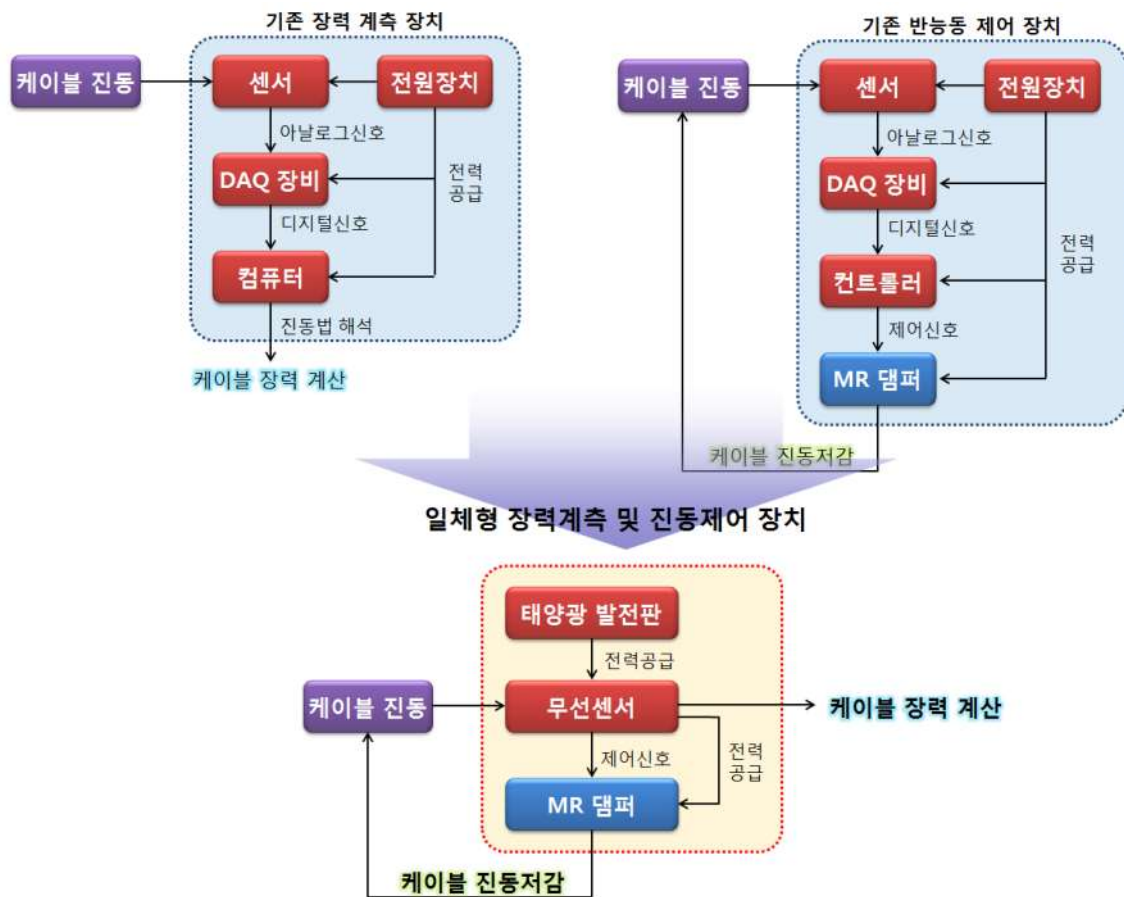


그림 2. 기존 시스템과 일체형 시스템 비교

나. 정량적 성과목표 및 성과지표

(1) 연구내용 별 정량적 성과목표

연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차 (1단계)	장력계측 및 반응동 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발	국내외 학술지 논문게재 건수	SCI(E)급 학술지게재 논문건수	1건	50%
		국내외 지적재산권 확보 건수	국내 특허 출원건수	1건	50%
	소 계				100%
2차 (2단계)	일체형 장치 시제품 제작 및 성능 평가	국내외 학술지 논문게재 건수	SCI(E)급 학술지게재 논문건수	2건	70%
		국내외 지적재산권 확보 건수	국내 특허 등록건수	1건	30%
	소 계				100%

(2) 최소 성과 목표

성과지표	성과목표	최소성과목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3건	1건
일반학술지 게재(1점)	-	-
특허출원(1점)	-	-
특허등록(2점)	1건	1건
디자인 등록(1점)	-	-
소프트웨어(1점)	-	-
하드웨어(1점)	-	-
기타(1점)	-	-
소계(점수)	8점	4점

다. 연차별 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요 연구내용
1차 년도	- 장력계측 및 반 능동 제어를 위한 하드웨어 및 소프트웨어 개발 - 무선센서 하드웨어 개발 - 장력계측 용 임베디드 소프트웨어 개발 - 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	- 무선센서 플랫폼 선정 - 가속도계 선정 및 센싱 인터페이스 구성 - 제어 인터페이스 구성 - 임베디드 장력계측 소프트웨어 개발 - 반 능동 제어 알고리즘 선정 - 수치실험을 통한 최적화 - 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어 개발
2차 년도	- 일체형 장치 시제품 제작 및 성능 평가 - 일체형 장력계측 및 반 능동 제어장치 시제품 제작 - 임베디드 소프트웨어 개선 - 성능평가 실내실험	- 무선센서 플랫폼, 인터페이스, 소프트웨어를 통합한 일체형 시제품 제작 - 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작 - 일체형 시스템 자가진단 기능 구현 - 개발된 소프트웨어의 수정 및 보완 - 실제 장대교량 케이블에 상사법칙을 적용하여 실내 모형 케이블 테스트베드 구성 - 실내실험을 통한 성능평가 및 최적화

2. 연구개발의 필요성

가. 연구개발과제의 설명

(1) 장대교량 수의 증가

- 전 세계적으로 장대교량의 수는 점점 증가하고 있는 추세이며, 점차 경간장도 길어지고 있음.
- 국내에서는 수치해석 기술의 발달과 고강도 강재의 국내 생산을 바탕으로, 1990년대 후반 부터 케이블을 이용한 장대교량의 건설이 급격히 증가하였음.
- 최근 건설된 장대교량들은 도서지역과 내륙을 연결하여 생활권을 향상시키고, 교통 및 관광산업 발전에 큰 역할을 수행하고 있음.
- 국내 장대교량의 시장 규모는 2000년대 들어 약 4.5조 규모가 되었으며, 현재는 약 6.7조 원에 이를 것으로 예상됨^[1]

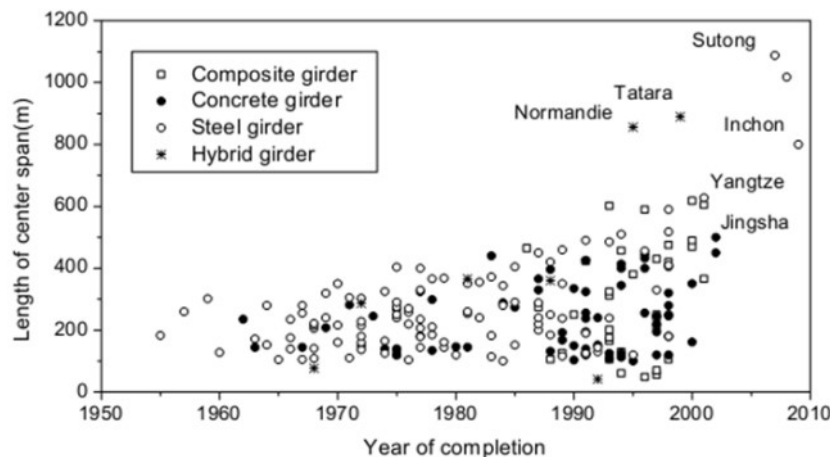


그림 5. 사장교 건설 및 경간장의 증가

(2) 장대교량의 케이블 유지관리 대책 필요성 증가

- 장대교량의 유지관리와 노후화 대비를 위하여, 장대교량의 현재 성능을 평가하고 열화를 막기 위한 다양한 연구가 필요함.
- 장대교량은 케이블을 이용하여 하중의 대부분을 지지하는 형식으로, 케이블의 건전성 및 동적 안정성이 성능을 평가하는 중요한 요소임.
- 케이블은 휨강성 및 자체 감쇠가 매우 낮기 때문에, 타 부재에 비하여 유해진동 발생 가능성과 그에 따른 피로손상 가능성이 많아, 적극적인 유지관리가 필요함.
- 장대교량 케이블의 유지관리 기법으로는 크게 케이블의 장력을 모니터링하는 방법과 케이블의 진동을 감소시키는 방법이 있음.



그림 6. 장대교량 케이블에 설치된 장력계측용 가속도계 (진도대교)



그림 7. 장대교량 케이블에 설치된 수동식 댐퍼 (좌: Arthur Ravenel Jr. Bridge, 우: 화명대교)

(3) 기존의 케이블 장력 모니터링 기법

- 주로 케이블의 고유진동수를 이용하여 장력을 추정하는 진동법이 많이 쓰임^[2]
- 유선 기반의 센서를 활용하기 때문에 비용이 많이 소요됨.
- 일부 주요 케이블에 대해서만 상시 모니터링을 수행하며, 기타 케이블에 대해서는 정기적/비정기적으로 계측을 수행함.
- 교량 전체의 안정성을 평가하는데 효율적이나, 가속도계가 설치되지 않은 케이블에 손상이 발생할 경우 찾기 어려움.

(4) 기존의 케이블 진동제어 시스템

- 케이블의 진동제어는 크게 케이블의 표면을 변화시키는 방법과 댐퍼 설치를 통하여 감쇠비를 증가시키는 방법이 있음.
- 케이블 표면을 변화시키는 방법으로는 Helical Fillet이나 Dimple 등이 있으며, 주로 풍우진동(Rain-wind Vibration)의 저감을 위하여 설치됨.
- 감쇠비 증가를 위하여 주로 설치되는 수동형(Passive) 댐퍼는 설계가 간단하고 경제적이거나, 제진 성능에 한계가 있으며 구조물 및 하중조건 등의 변화에 적응성이 매우 부족한 단점이 있음^[3]
- 반 능동형(Semi-active) 댐퍼의 경우 제진 성능이 우수하고 경제적이지만, 제어력 계산을 위한 계측기, 컴퓨터, 전력 공급 장치가 필요하여 실 구조물에는 잘 쓰이지 않음^[4]

(5) 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템 개발

- 본 연구에서는 무선센서를 이용하여, 케이블의 장력을 계측하고 진동을 제어하는 일체형 시스템을 개발하고자 함.
- 장력계측: 무선센서에 임베디드된 진동기반 장력계측 알고리즘을 이용하여, 계측한 가속도를 자체적으로 해석하여 장력계측을 수행함.
- 진동제어: 무선센서와 자기유변댐퍼 (MR Damper)를 결합하고, 자기유변댐퍼의 동작 및 제어를 위하여 필요한 부가장치(센서, 컨트롤러, 전원장치)를 무선센서로 대체함으로써, 독립적인 케이블 진동제어를 수행함.
- 두 가지 기능을 동시에 수행하는 일체형 장치를 개발할 경우, 최적의 케이블 유지관리를 수행할 수 있음.

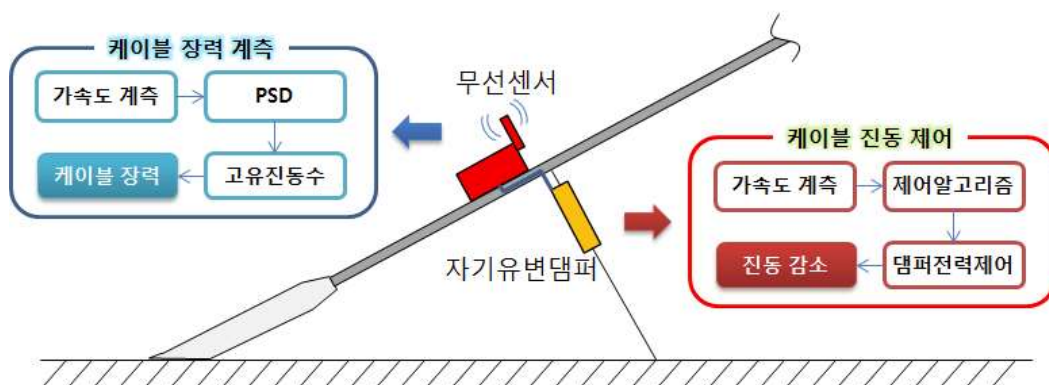


그림 8. 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템 개요

나. 연구개발과제의 중요성

(1) 기술개발의 중요성

- 기존 사회기반시설물의 유지관리 기법의 한계를 ICT 기술과의 융합을 통하여 극복하는 대표적 사례임.
- 신속한 원천 기술의 개발과 확보를 통하여 국내외 시장에서 점차 수요가 높아지게 될 장대교량 유지관리 기술을 선점할 수 있음.
- 장대교량의 성능 평가 및 유지관리 기술 개발을 통하여, 2015년 기준 6.7조원에 이르는 장대교량의 지속적 활용을 담보 가능함.
- 국내 장대교량의 수명을 연장시킴으로서, 미국의 금문교, 영국의 타워브리지와 같은 문화적 가치를 갖는 랜드마크로 발전시킬 수 있음.

(2) 정부지원의 필요성

- 장대교량의 관리 주체는 정부 및 공공기관이며, 정부의 지원을 통하여 본 기술의 지적재산권을 확보함으로써 향후 장대교량의 유지관리에 필요한 비용을 획기적으로 절감할 수 있음.
- 장대교량의 과다 진동 시 발생 가능한 민원을 신속하게 해결할 수 있는 사회 문제 해결형 기술로써의 가치가 있음.
- 향후 국가적 차원에서 개발할 것으로 예측되는 IoT (Internet of Things) 기반 통합 모니터링 시스템 개발에 필요한 하나의 단위기술로 사용될 수 있음.

다. 연구개발과제 단계

(1) 기술성숙도(Technology Readiness Level)

- 본 연구에서는 연구기간동안 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템을 개발하는 것을 목표로 하므로, 최종 연구개발 단계는 [실험단계]에 해당함.
- 개발된 장력계측 및 진동제어 시스템의 하드웨어와 소프트웨어는 [실험실 환경에서 그 성능을 검증]하게 되며, 이는 크게 TRL-4[실험실 성능평가 단계]에 해당함.

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

(2) 설정근거

- 본 연구를 통하여 얻게 될 최종성과물은 진동제어 장치 시제품과 장력계측 및 반 능동형 제어 소프트웨어로서, 각 성과물의 기술성숙도 설정근거는 아래 표와 같음.

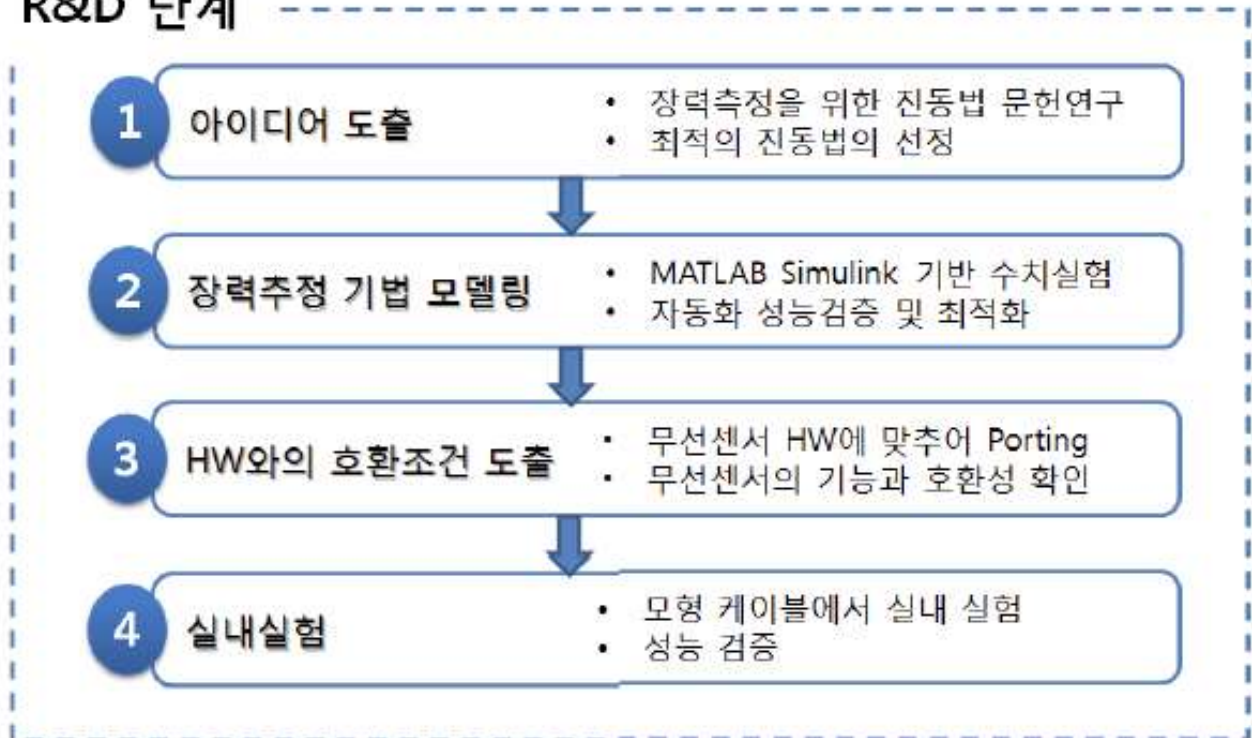
최종성과물	기술성숙도		설정근거
	유형	단계	
일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품	장비, 장치	4단계	제품의 실제 현장 검증 및 신뢰성을 평가하기 위해서는 실제 장대교량을 운영하고 있는 주체 또는 교량 시공사의 협조 및 협력을 통하여 다양한 현장에서의 실험을 수행하고 이를 검증하는 등의 추가적 연구를 필요하며 이는 연구기간과 연구비를 고려하면 쉽지 않음
장력계측 및 반 능동형 제어 소프트웨어	소프트웨어	4단계	핵심적인 기능 및 모듈을 고려하여 설계되고 실내실험을 통하여 성능이 검증됨 실교량에서의 예측 불가능한 환경까지 실내실험에서 모두 고려하기는 쉽지 않음

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 흐름도

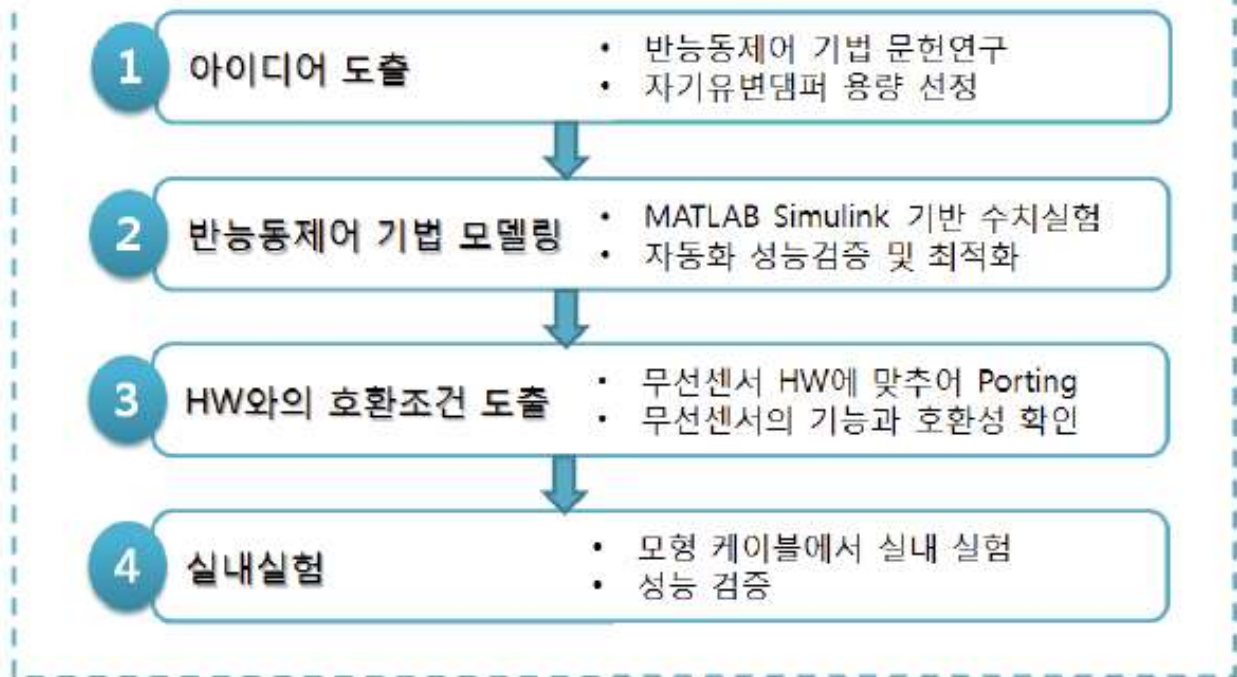
(1) 진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발

R&D 단계



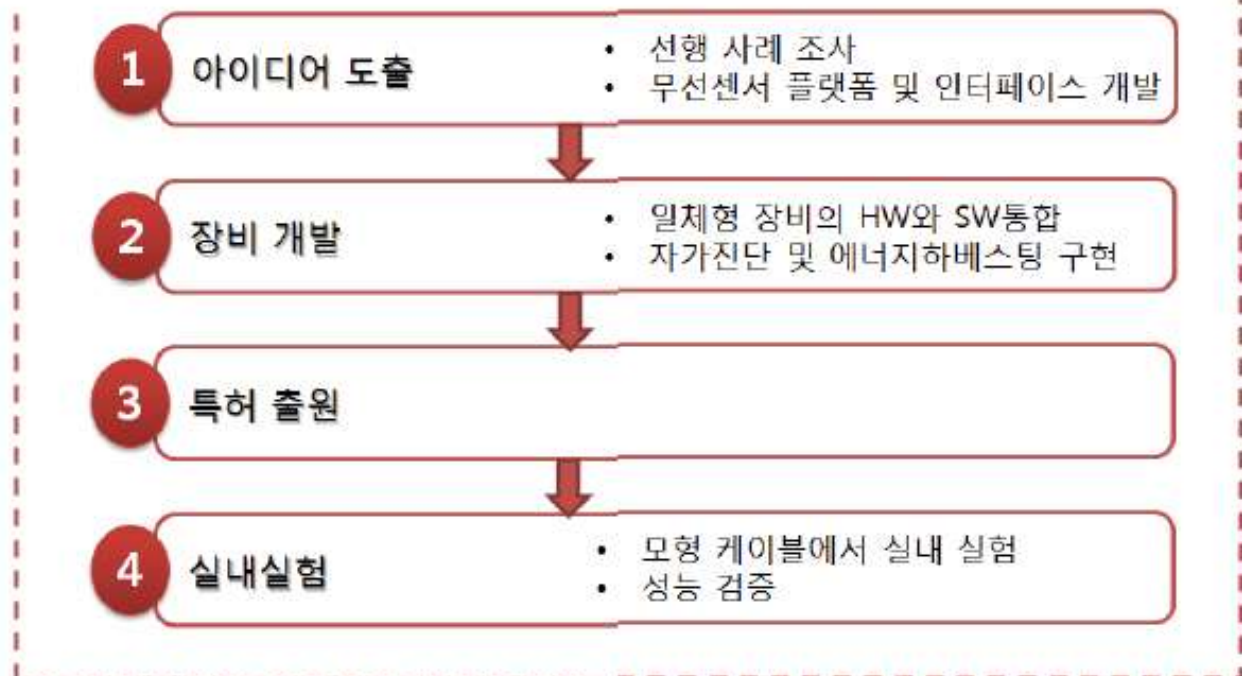
(2) 자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발

R&D 단계



(3) 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시제품 개발

R&D 단계



나. 연구개발 단계에 따른 세부연구내용

기간	단계별 주요 연구활동	세부추진내용
1단계 (’15.06~ '16.06)	장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발	- 적합한 무선센서 플랫폼 선정 - 가속도계 선정 및 센싱 인터페이스 구성 - 제어 인터페이스 구성
	장력계측을 위한 임베디드 소프트웨어 개발	- 문헌연구 및 장력계측 방법(진동법) 선정 - 수치실험을 통한 최적화 - 무선센서 임베디드 장력계측 소프트웨어 개발
	자기유변댐퍼 제어 기술 및 임베디드 소프트웨어 개발	- 문헌연구 및 반 능동 제어 알고리즘 선정 - 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어 개발 - 수치실험을 통한 최적화
2단계 (’16.06~ '17.12)	일체형 장치 시제품 제작	- 무선센서 플랫폼, 인터페이스, 소프트웨어를 통합하여 일체형 시제품 제작 - 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작 - 일체형 시스템 자가진단 기능 구현
	성능평가 실내실험 및 장력 계측 및 반 능동 제어 임베디드 소프트웨어 개선	- 실제 케이블 테스트베드 구성 - 시제품에 맞추어 개발된 소프트웨어의 수정 및 보완 - 개발된 소프트웨어의 최적화 - 실내실험을 통한 성능평가 및 최적화

다. 연구 성과목표 및 성과지표(성과점검기준표)

(1) 총괄 성과목표 및 성과지표(성과점검기준표)

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		최종 성과점검기준						해당 기관	예산 (백만 원)	양적 성과목표
					질적 성과지표		목표치	측정 방법	검증 방법	가중 치			
주관	A	진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발	A-1	MATLAB 기반 진동법 소프트웨어	①	장력오차	5%	수치 실험	보고서	2	UNST	10	SCI(E)급 학술지: 0.5 건 (성과 B와 합쳐서 1 건)
			A-2	무선센서에 임베디드 가능한 장력측정 소프트웨어	①	오동작률	1%	실험	보고서	2	UNST	5	
	B	자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	B-1	MATLAB 기반 반 능동 제어 알고리즘	①	케이블 진폭 감소	50%	수치 실험	보고서	2	UNST	15	SCI(E)급 학술지: 1.5 건
			B-2	무선센서에 임베디드 가능한 반 능동 제어 소프트웨어	①	오동작률	1%	실험	보고서	2	UNST	10	
	C	일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 개발	C-1	장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발	①	가속도 계측오차	3%	실험	보고서	2	UNST	30	특허 : 등록 1 건 SCI(E)급 학술지: 1 건
					②	DAC 출력정확도	5%	실험	보고서	2			
			C-2	일체형 장치 시제품 제작	①	에너지 하베스팅에 의한 충전능력	1일 1회 기능 수행 가능	실험	보고서	1	UNST	15	
					②	자기진단 기능 오차	10%	실험	보고서	1			
					③	시제품 패키징	일체화	케이스	사진	1			
			C-3	성능평가 실내실험	①	장력오차	5%	실험	보고서	2	UNST	15	
					②	케이블 진폭감소	50%	실험	동영상 증빙	2			
					③	오동작률	1%	실험	보고서	1			
	계									20		100	특허 : 등록 1 건 SCI(E)급 학술지: 3 건

(2) 연차별 성과목표 및 성과지표

○ 1차년도

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		1차년도 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만 원)	양적 성과목표	
					질적 성과지표	목표치	측정 방법	검증 방법	가중 치				
주관	A	진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발	A-1	MATLAB 기반 진동법 소프트웨어	①	장력 오차	5%	수치실 험	보고서	2	UNIST	10	SCI(E)급 학술지: 0.5 건 (성과 B와 합쳐서 1 건)
			A-2	무선센서에 임베디드 가능한 장력측정 소프트웨어	①	오동 작률	1%	실험	보고서	2	UNIST	5	
	B	자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	B-1	MATLAB 기반 반 능동 제어 알고리즘	①	케이블 진폭 감소	50%	수치 실험	보고서	2	UNIST	15	SCI(E)급 학술지: 0.5 건
			B-2	무선센서에 임베디드 가능한 반 능동 제어 소프트웨어	①	오동 작률	5%	실험	보고서	1	UNIST	5	
	C	일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 개발	C-1	장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발	①	가속도 계측 오차	3%	실험	보고서	1	UNIST	15	
					②	DAC 출력 정확도	5%	실험	보고서	1			
계										9		50	SCI(E)급 학술지: 1 건

○ 2차년도

구분	핵심성과 (level1)		단위성과 (level2)		2차년도 성과점검기준					해당 기관	예산 (백만 원)	양적 성과목표	
					질적 성과지표	목표 치	측정 방법	검증 방법	가중 치				
주관	B	자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	B-2	무선센서에 임베디드 가능한 반 능동 제어 소프트웨어	①	오동작률	1%	실험	보고서	1	UNIST	5	SCI(E)급 학술지: 1 건
	C	일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 개발	C-1	장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발	①	가속도 계측오차	3%	실험	보고서	1	UNIST	15	특허 :등록 1건 SCI(E)급 학술지: 1 건
					②	DAC 출력 정확도	5%	실험	보고서	1			
			C-2	일체형 장치 시제품 제작	①	에너지 하베스팅에 의한 충진능력	1일 1회 기능 수행 가능	실험	보고서	1	UNIST	15	
					②	자기진단 기능 오차	10%	실험	보고서	1			
					③	시제품 패키징	일체 화	케이스	사진	1			
			C-3	성능평가 실내실험	①	장력오차	5%	실험	보고서	2	UNIST	15	
					②	케이블 진폭감소	50%	실험	동영상 증빙	2			
					③	오동작률	1%	실험	보고서	1			
	계									11		50	특허 :등록1 건 SCI(E)급 학술지: 2 건

라. 연구개발 핵심성과

(1) 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형1)	연구기관	TRL
1	진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발	- 저비용의 무선센서의 기능을 최대한 이용하여, 가장 간단하게 케이블의 장력을 계측할 수 있는 무선센서 임베디드 소프트웨어를 개발함 - 새로 사용할 일체형 무선센서에 맞게 기존에 보유하고 있는 장력계측 소프트웨어를 일부 수정하여 활용함	소프트웨어	UNIST	TRL 4
2	자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	- 저비용의 무선센서의 기능을 최대한 이용하여, 자기유변댐퍼를 이용한 반 능동 제어를 수행할 수 있는 무선센서 임베디드 소프트웨어를 개발함 - 수치실험 및 실내실험을 통하여 자기유변댐퍼에 최적화된 반 능동 제어 알고리즘을 선정함	소프트웨어	UNIST	TRL 4
3	일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 개발	- 케이블의 장력계측과 반 능동 제어에 최적화된 무선센서 플랫폼 및 인터페이스 개발 - 무선센서 플랫폼과 인터페이스, 소프트웨어를 통합하여 일체형 장치 제작	장비·장치	UNIST	TRL 4

(2) 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1	진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발	
정의	소프트웨어	
목적	- 저비용의 무선센서의 기능을 최대한 이용하여, 가장 간단하게 케이블의 장력을 계측할 수 있는 무선센서 임베디드 소프트웨어를 개발함 - 새로 사용할 일체형 무선센서에 맞게 기존에 보유하고 있는 장력계측 소프트웨어를 일부 수정하여 활용함	
성능목표	(기존기술 수준) 장력측정 장비 및 케이블 설치, 연산 비용 채널 당 1천만원 선 (개발기술 수준) 케이블 설치 및 연산 비용 없음, 장력측정 장비 비용 채널 당 1백만원 선	
성과달성 책임자 (소속기관)	심성한(울산과학기술원)	
소요기간	'15.06 ~ '15.11(0년6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	본 소프트웨어와 “자기유변댐퍼 제어용 임베디드 소프트웨어”를 통합한 소프트웨어 개발 내용을 SCI급 논문에 발표할 예정(국외논문 0.5건)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 0건, 등록 : 0건
	논문	SCI(E) : 0.5건, 국내학술지 : 0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 2	자기유변댐퍼 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발	
정의	소프트웨어	
목적	- 저비용의 무선센서의 기능을 최대한 이용하여, 자기유변댐퍼를 이용한 반 능동 제어를 수행할 수 있는 무선센서 임베디드 소프트웨어를 개발함 - 수치실험 및 실내실험을 통하여 자기유변댐퍼에 최적화된 반 능동 제어 알고리즘을 선정함	
성능목표	(기존기술 수준) 자기유변댐퍼의 반 능동 제어를 위한 계측기, 전원부, 제어장치, 케이블 등의 부대장치가 필요함 (개발기술 수준) 무선센서만으로 자기유변댐퍼의 반 능동 제어를 위한 계측기, 전원부, 제어장치, 케이블 대체	
성과달성 책임자 (소속기관)	심성한(울산과학기술원)	
소요기간	'15.12 ~ '16.6(0년 6개월, 1년차)	
성과달성 확인방법	- 본 소프트웨어 개발 내용을 SCI급 논문에 발표할 예정(국외논문 1건) - 본 소프트웨어와 “진동기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어”를 통합한 소프트웨어 개발 내용을 SCI급 논문에 발표할 예정(국외논문 0.5건)	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 0건, 등록 : 0건
	논문	SCI(E) : 0.5건, 국내학술지 : 0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3	일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 장치 시제품 개발	
정의	장비, 장치	
목적	- 케이블의 장력계측과 반 능동 제어에 최적화된 무선센서 플랫폼 및 인터페이스 개발 - 무선센서 플랫폼과 인터페이스, 소프트웨어를 통합하여 일체형 장치 제작	
성능목표	(기존기술 수준) 케이블의 장력계측과 진동제어를 위한 별개의 시스템 필요 (개발기술 수준) 무선센서 만을 이용하여 케이블 장력계측과 진동제어를 수행	
성과달성 책임자 (소속기관)	심성한(울산과학기술원)	
소요기간	'16.06 ~ '17.12(0년3개월, 2년차)	
성과달성 확인방법	- 본 일체형 시스템에 관한 특허를 출원/등록할 예정(국내 특허 1건) - 본 시스템 개발 및 성능평가 실험 내용을 SCI급 논문에 발표할 예정(국외논문 1건) - 시제품 개발	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	출원 : 0건, 등록 : 0건
	논문	SCI(E) : 0건, 국내학술지 : 0건
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

제2장. 국내외 기술 개발 현황

가. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름

(1) 국가 연구개발사업 유사연구 실적

부처명	사업명	과제명	예산(억원)	비고
국토교통부	건설기술연구사업	- 케이블지지교량의 케이블진동 저감용 댐퍼개발 및 기준연구	652	- 과제 1 - 2006년~2009년
과학기술부	한국연구재단 선도연구센터 육성	- 토목구조물에 적합한 스마트 진동제어 기술 개발	3.5	- 과제 2 - 2002년~2010년
과학기술부	한국연구재단 중견연구자 지원	- 건설 구조물의 진동 사용성과 구조 성능 향상을 위한 스마트 피드백 구조제어 시스템 개발	2.45	- 과제 3 - 2008년~2011년
과학기술부	한국연구재단 글로벌 연구 네트워크 지원	- 사장교 건전성 모니터링을 위한 첨단 무선센서 기술 개발 및 국제 공동연구 테스트베드 구축	6.84	- 과제 4 - 2009년~2011년

- 과제 1은 [중장기간 케이블 지지교량에 적합한 수동형 케이블 댐퍼 제품군을 개발 및 상품화하고 실제 교량에 시범 적용하는 것]을 목표로, 기업 중심의 수동형 케이블 댐퍼 제품 개발이 연구주제임.
- 과제 2는 [자기유변댐퍼의 동작기계에 관하여 연구하고, 토목구조물에의 활용 가능성을 검증하는 것]을 목표로, 자기유변댐퍼를 이용한 구조물 진동제어의 기초연구를 수행하였음.
- 과제 3은 [일반 교량 구조물에 자기유변댐퍼를 활용하여 진동제어를 수행하기 위한 센서 및 피드백 시스템을 개발하는 것]을 목표로, 자기유변댐퍼의 제어 성능 향상과 스마트 피드백 시스템 개발을 수행하였음.
- 과제 4는 [대형 사장교에 첨단 무선센서를 이용하여 효과적으로 구조물의 응답을 예측하고 상태 평가를 수행하는 네트워크를 구성하는 것]을 목표로, 대형 사장교에 실제 무선센서를 이용한 네트워크 시스템을 구축하였음.
- 자기유변댐퍼 관련 연구(과제1-3)의 경우, 구조물 제어를 위한 자기유변댐퍼의 동작기제 (Mechanism) 및 활용가능성에 초점을 맞추어 연구를 진행하였으며, 무선센서 관련 연구 (과제4)의 경우, 구조물 응답의 효율적 예측과 센서 네트워크 구성에 초점을 맞추어 연구를 진행하였음.

○ 연구개발과제의 차별화 방안

- 무선센서를 이용한 케이블 장력 추정 및 진동 제어를 동시에 수행하기 위한 연구는 현재 까지 진행된 바 없어, 본 제안연구는 기존 연구와 완전히 차별화된 연구임.
- 케이블의 유지관리에 있어 필요한 두 가지 기술(장력추정, 진동제어)을 동시에 수행하는 일체형 시스템의 개발을 통하여, 케이블 유지관리의 신뢰도를 높이면서 경제성도 함께 확보할 수 있음.
- 무선센서를 이용한 케이블 장력추정에 관한 기술은 연구책임자에 의하여 기 개발된 기술로서, 원천기술로서의 가치를 가지고 있음.
- 케이블의 진동제어를 위한 자기유변댐퍼의 제어장치로서 무선센서를 이용하는 기술은 아직까지 국내에서 연구된 바 없으며, 본 연구를 통하여 원천기술로 개발될 수 있음.

(2) 관련분야의 국외 연구동향

1) 무선센서 기반 케이블 장력 측정 방법에 대한 문헌조사

○ 케이블의 장력 측정 방법

- 직접법(Direct Method)과 간접법(Indirect Method)이 있음.
- 직접법은 비용이 비싸고, 실제 사용 중에 있는 교량에는 설치가 어렵다는 큰 단점을 가지고 있음.
- 현재에는 진동법(Vibration Method)이라고 부르는 간접법을 많이 활용하고 있음.

○ 무선센서를 이용한 가속도 기반 장력 계측

- 케이블 형식에 따른 장력 산정 알고리즘 다양화함.
- 가속도를 이용한 장력계측법(진동법)은 운영중인 장대교량 케이블의 건전성을 효율적으로 평가하기 위하여 가장 많이 활용되는 방법임.
- 무선센서에 진동법을 임베드한 케이블 장력계측 시스템은 미국 미시간대학교 Lynch교수 연구그룹에 의하여 처음으로 개발되었으며, 실내실험에 의하여 그 성능이 평가되었음^[5].
- 개발된 시스템은 국내의 사장교인 제 2 진도대교에 적용되어 현장 성능이 검증되었음^[6].



그림 7. 무선 케이블 장력계측 시스템

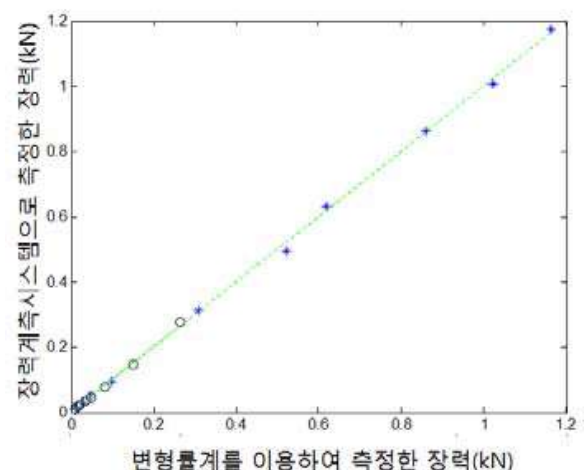


그림 8. 실내실험을 통한 장력계측 시스템의 성능 평가

○ 진동법(Vibration Method)

- 케이블의 진동을 계측하여 이로부터 케이블의 고유진동수를 추정하고, 추정된 고유진동수로부터 케이블의 장력을 역산하는 방법임.
- 진동법은 직접법에 비하여 정확도는 약간 떨어지나, 계측기의 설치가 용이하고 가격이 저렴하며 시공 중, 혹은 사용 중인 교량 모두에서 활용이 가능하다는 큰 장점을 가지고 있음.
- 진동법 중 최소자승법^[18]이 많이 이용됨. 최소자승법은 케이블의 휨강성과 새그를 고려하여 진동수와 각각의 모드수의 관계를 이용하여 장력을 계산함.

2) 자기유변댐퍼 활용에 대한 문헌조사

- 건물 및 교량 케이블에서 발생하는 진동을 감소시키기 위해 자기유변댐퍼를 활용한 연구에 대해 문헌조사를 실시하였음.
- 1990년 대 중반부터 자기유변댐퍼를 이용한 구조물의 진동 저감에 대한 연구가 S.J. Dyke와 B.F. Spencer, Jr.등의 연구진에 의해 본격적으로 이루어졌으며, 연구 초기에는 자기유변댐퍼의 성능(performance)을 분석하다가, 2003년에는 세계에서 처음으로 중국의 동팅호 사장교를 대상으로 케이블의 진동제어를 위해 자기유변댐퍼가 적용되었음.
- 자기유변댐퍼 활용에 대해 조사한 문헌[23-28]은 아래 표와 같음.

연구 제목	저자	저널/학회(년도)	주요내용
An experimental study of MR dampers for seismic protection	S.J. Dyke, B.F. Spencer, Jr., M.K. Sain, J D Carlson	Smart materials and structures, 7(5), 693 (1998)	■ 지반가속도가 가해지는 3층짜리 테스트용 구조물의 진동을 제어하기 위해 자기유변댐퍼와 함께 Clipped-optimal 제어 방법을 이용
Modeling of MR Damper with Hysteresis for Adaptive Vibration Control	Chiharu Sakai, Hiromitsu Ohmori, Akira Sano	Proceeding of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control (2003)	■ 자기유변댐퍼를 이용하여 3개의 자유도를 가지는 구조물의 진동을 제어하기 위해 자기유변댐퍼의 수학적 모델을 제시
MR Damping System on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge	Z.Q. Chen, X.Y. Wang, J.M. Ko, Y.Q. Ni, B.F. Spencer, Jr., G. Yang	Smart structures and materials(2003)	■ 중국 동팅호 사장교에 세계에서 처음으로 비-바람으로 인한 진동을 줄이기 위해 자기유변댐퍼를 적용
Experiments on Reduction of Cable Vibration Using MR Dampers	W.J. Wu, C.S. Cai, S.R. Chen	17th ASCE Engineering Mechanics Conference (2004)	■ 케이블의 진동을 제어하기 위해 자기유변댐퍼를 활용

Experimental Study Of Vibration Control Of A Cable With An Attached MR Damper	Marcin Maslanka, Bogdan Sapinski, Jacek Snamina	Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 45(4), 893-917 (2007)	자기유변댐퍼를 이용하여 케이블의 진동을 제어하기 위해 순환고리(feedback loop)로 이루어진 제어알고리즘을 제시
Development of Arduino Based Wireless Control System	Zhuoxiong Sun, Shirley J. Dyke, Francisco Pena, Alana Wilbee	SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring (2015)	무선 제어시스템 기반 자기유변댐퍼를 활용한 구조물의 진동 제어의 가능성을 제시

○ An experimental study of MR dampers for seismic protection

- Dyke et al.(1998)은 자기유변댐퍼가 구조물의 지진응답(seismic response)저감에 미치는 영향을 분석하였음^[23]
- 그림 9와 같이 단일 방향으로 지반가속도가 가해지는 3층짜리 테스트용 구조물의 진동을 제어하기 위해 자기유변댐퍼와 함께 Clipped-optimal 제어방법을 이용하였고, 또한 자기유변댐퍼의 성능(performance)을 분석하였음.
- 반 능동(semi-active) 제어 구조물에서 clipped-optimal 제어방법은 가속도에 의해 feedback 되는 방식으로 구조물의 거동 제어에 효과적임을 보였음.
- 자기유변댐퍼를 Clipped optimal 알고리즘과 함께 사용했을 때 그림 10과 같이 지진활동으로 인한 거동(변위 및 가속도)이 효과적으로 줄어듦.

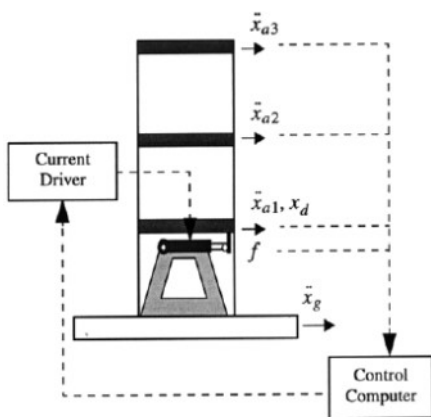


그림 9. 자기유변댐퍼 성능과악을 위한 실험 장비 구성^[23]

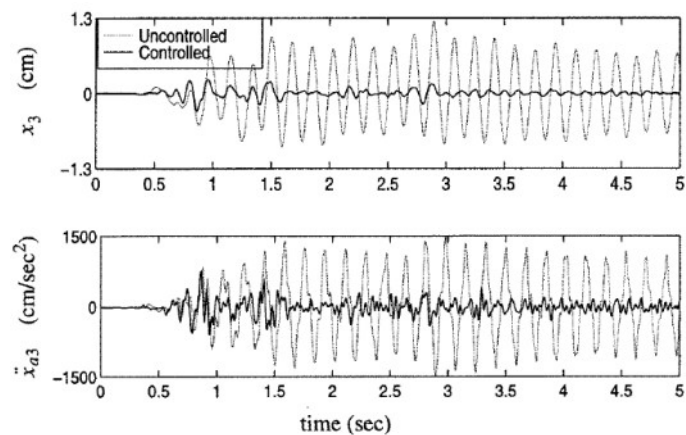


그림 10. 자기유변댐퍼 및 Clipped optimal 알고리즘 적용여부에 따른 EI Centro 지진에 의한 변위 및 가속도의 변화^[23]

○ Modeling of MR Damper with Hysteresis for Adaptive Vibration Control

- Sakai et al.(2003)은 자기유변댐퍼를 통해 구조물의 진동을 제어하는 연구를 진행하였음^[24]
- 3개의 자유도를 가지는 구조물을 대상으로 이력현상이 동적인 마찰 특성에 미치는 영향을 표현하기 위해 자기유변댐퍼의 수학적 모델을 제시하였고, 입력변수(속도, 내부상태, 전압)를 이용하여 자기유변댐퍼의 감쇠력(damping force)을 예측하였음.
- 또한 구조물에 적절한 감쇠력을 만드는데 필요한 입력변수(전압)를 결정하기 위한 동적 모델을 구성하는데도 제시된 수학적 모델이 이용되었음.

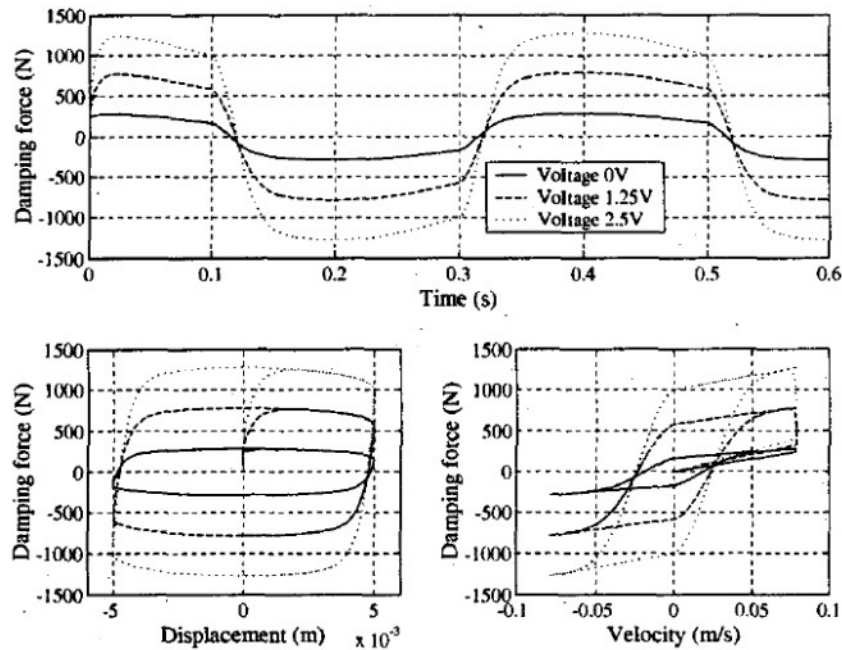


그림 11. 입력변수(전압)의 변화에 따른 감쇠력의 변화^[24]

- 3개의 자유도를 가지는 구조물의 지반에 가속도를 가하여 자기유변댐퍼의 유무에 따른 가속도를 시간영역에서 비교함으로써(그림 12 참조) 제시한 수학적 모델의 효과를 검증하였음

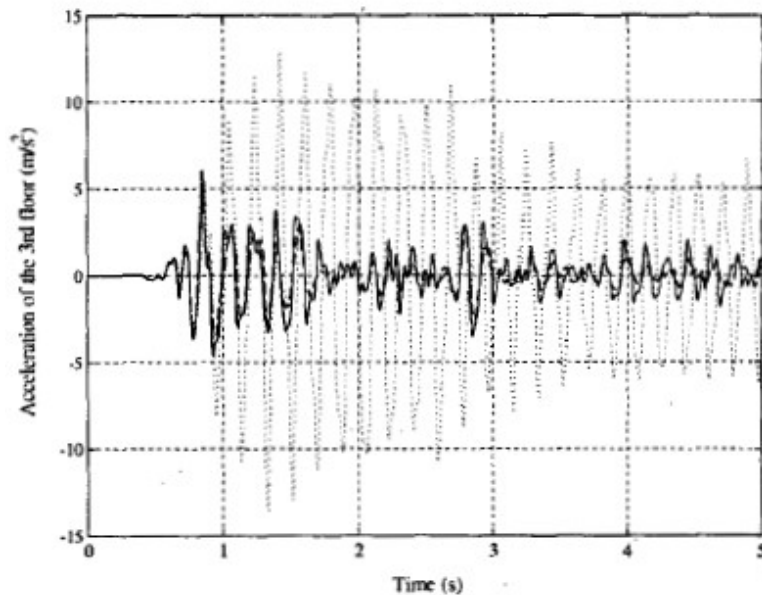


그림 12. 자기유변댐퍼 설치 시 가속도(실선)와 미설치 시 가속도(점선)의 차이^[24]

○ Experimental Study Of Vibration Control Of A Cable With An Attached MR Damper

- Maślanka et al.(2007)은 수평방향의 현수 케이블(suspended cable)의 지지대 근처에 횡단 방향으로 자기유변댐퍼를 부착하여, 케이블에서 발생하는 자유진동(free vibration)의 진폭에 순환고리(feedback loop)로 이루어진 제어알고리즘을 이용한 자기유변댐퍼가 미치는 영향을 실험을 통해 분석하였음^[25].
- 제어알고리즘은 케이블에 부착된 가속도계 및 피스톤 변위 신호를 바탕으로 속도를 추정하는 것부터 시작하여, 속도 신호를 Primary Controller로 보내 진동을 제어하기 위한 적절한 감쇠력을 분석하고 Secondary Controller를 통해 자기유변댐퍼에 전달할 전류를 분석함.

- 연구결과, 케이블 진동 제어 알고리즘을 케이블에 적용했을 때 진동에 의한 케이블 진폭의 변화에 관계없이 점성댐퍼의 장점인 일정한 감쇠정도(damping level)가 나타남으로써 효율성을 검증함.

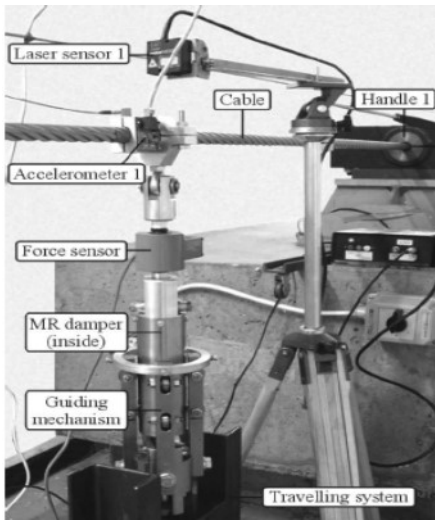


그림 13. 케이블의 진동제어를 위한 자기유변댐퍼 설치 방법^[25]

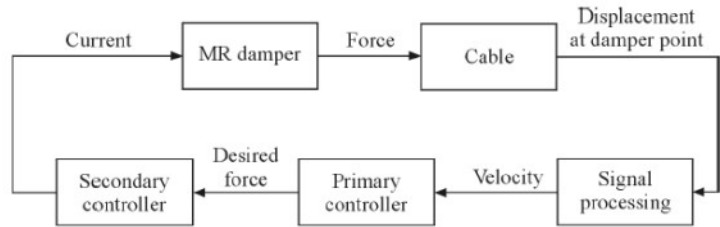


그림 14. 케이블 진동제어를 위한 알고리즘^[25]

○ Experiments on Reduction of Cable Vibration Using MR Dampers

- Wu et al.(2004)는 케이블의 진동을 제어하기 위해 Lord Corporation에서 제작하는 자기유변댐퍼를 활용하였음^[26].
- 아래 그림 15와 같은 케이블에서 자기유변댐퍼는 케이블의 진동을 줄이기 위해 B 지점에 설치하였고, D지점에 가속도계를 설치하였음.

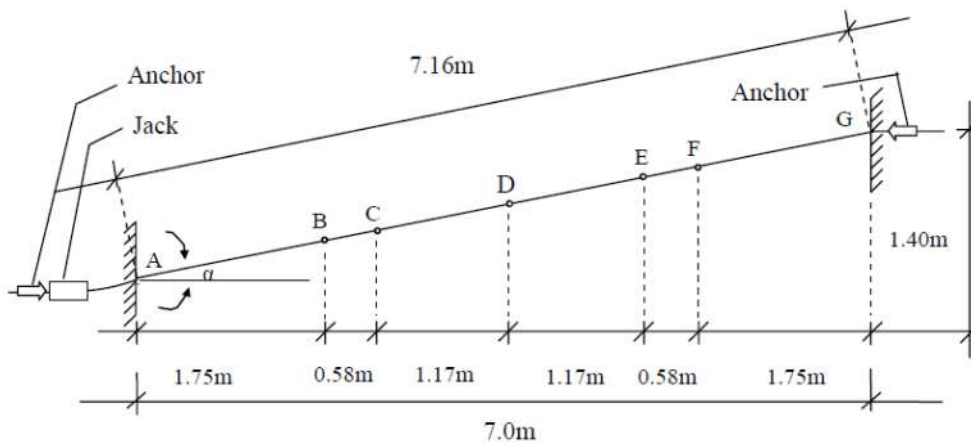


그림 15. 케이블 진동제어 실험^[26]

- 자기유변댐퍼의 성능(감쇠력과 변위 및 속도와의 관계)은 전류와 부하주파수/loading frequency)의 조절을 통해 실험적으로 분석하였음.
- 자기유변댐퍼가 케이블의 진동제어에 이용될 경우 전류가 흐르지 않아도 상당한 감쇠력을 나타냄을 실험을 통해 증명하였음.
- 전류가 증가함에 따라 케이블에서 발생하는 진동의 저감능력이 향상되었으며, 진동수와 관계없이 케이블의 진동을 줄일 수 있음을 보였음.

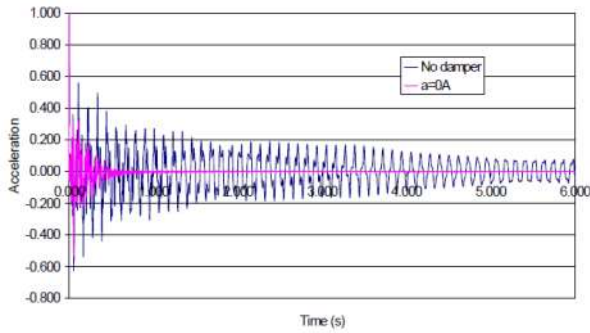


그림 16. 자기유변댐퍼 설치로 인한 케이블 진동감소^[26]

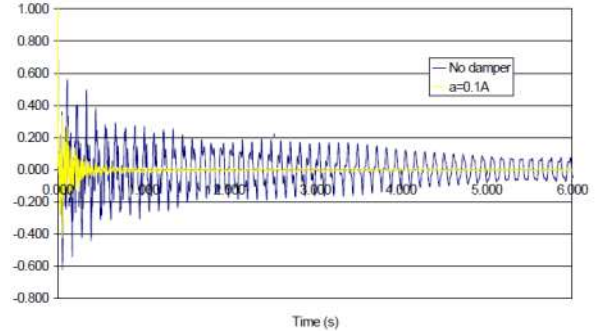


그림 17. 전류가 증가한 자기유변댐퍼로 인한 케이블 진동감소^[26]

○ MR Damping System on Dongting Lake Cable-Stayed Bridge

- Chen et al.(2003)은 양쯔강과 접하는 동팅호(Dongting Lake)를 가로지르는 동팅호 사장교를 대상으로 비-바람에 의해 발생하는 케이블의 진동을 줄이기 위해 자기유변댐퍼의 활용가능성을 분석함^[27].
- 자기유변댐퍼는 동팅호 사장교에서 제일 긴 케이블에 설치되었음(2001년 7월 설치시작, 2002년 6월 설치완료). 이는 비-바람으로 발생하는 진동을 줄이기 위해 사장교에 자기유변댐퍼를 적용한 세계에서 첫 번째 사례임.
- 자기유변댐퍼를 설치하지 않았을 때, 비와 바람으로 인해 야기되는 진동으로 동팅호 사장교는 최대 800mm까지 변위가 발생하여 눈으로 인식이 가능한 정도였음.
- 자기유변댐퍼를 설치했을 때 댐퍼에 가해지는 전압에 따라 0.1%에서 0.8~1.2%까지 모드감쇠(modal damping)를 보여주며 눈으로 감지가 되지 않을 정도로 케이블의 진동이 감소하였음.



그림 18. 동팅호 사장교에 설치된 자기유변댐퍼의 모습^[27]

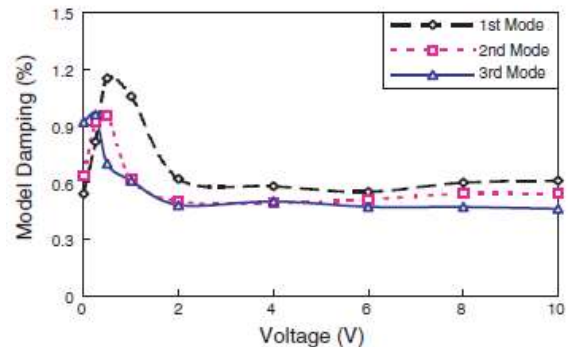


그림 19. 전압에 따른 케이블-댐퍼시스템의 모드감쇠^[27]

○ Development of Arduino Based Wireless Control System

- Sun et al.(2015)은 수치해석을 통해 자기유변댐퍼를 장착한 3층 구조물의 지반에 가속도를 가하고, 이 때 발생하는 구조물의 진동을 제어하기 위한 무선 제어시스템을 Arduino 기반으로 개발하여, 유선 제어시스템과 성능을 비교하였음^[28].
- 수치해석을 이용하여 무선 제어방법을 RMS Drift의 관점에서 자기유변댐퍼로 제어되지 않은 경우, 자기유변댐퍼에 전압이 흐르거나 흐르지 않는 경우와 비교했을 때, 무선 제어방식이 구조물의 거동을 효과적으로 감소시켰음.

- 구조물에 부착된 자기유변댐퍼의 최대 감쇠력이 구조물 전체무게의 3%정도 밖에 되지 않았지만 무선 제어시스템을 통해 구조물의 진동을 많이 감소시켰음.

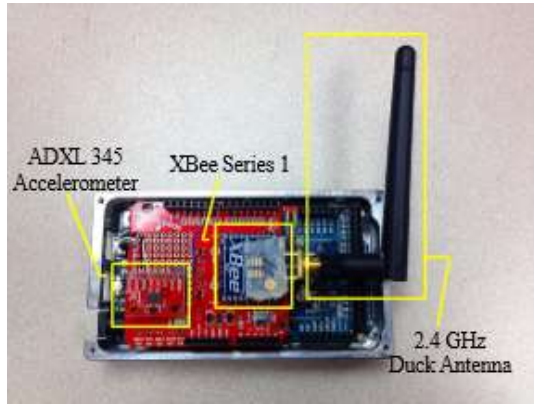


그림 20. Arduino 기반 센서 보드^[28]

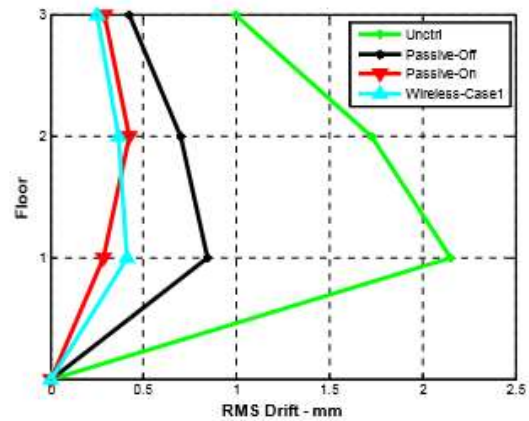


그림 21. RMS drift 비교^[28]

3) 반 능동형 제어에 대한 문헌조사

○ 자기유변댐퍼를 활용한 반 능동형 제어

- 미국을 중심으로 기존 수동 제어와 능동 제어의 단점을 극복하기 위해, 자기유변댐퍼를 활용한 반 능동형 제어에 대한 연구가 활발하게 진행되었음^[7-10]
- 자기유변댐퍼는 자기유변유체를 이용하여 감쇠력 조절이 가능하도록 만들어진 장치로, 유체 내에 자성을 가진 입자를 분산시켜 자기장이 가해지면 입자들이 정렬되어 유체의 유동을 제한하고 항복 강도(80kPa 이상)를 발생시킴으로서 감쇠비를 증가시킴.

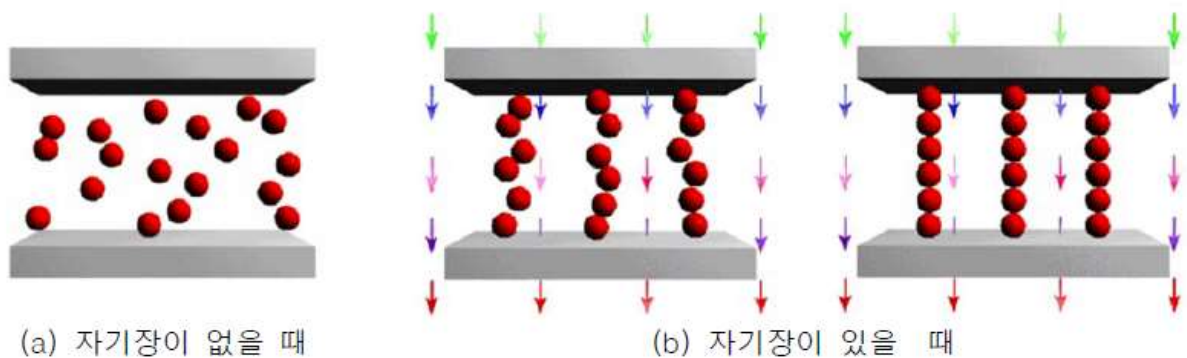


그림 22. 자기유변댐퍼의 작동 원리

- 자기유변댐퍼는 배터리 수준의 낮은 전력 요구량, 높은 감쇠능력, 외부 환경 적응성 등 그 우수한 특징으로 주목받고 있으나, 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급장치, 전선 + 부대 장치가 너무 많은 단점이 있음.
- 중국의 Binzhou 사장교와 Dongting Lake 사장교의 케이블도 각각 256개와 40개의 자기 유변댐퍼가 설치되었으나^[11], 계측기, 컴퓨터 등 부대장치 설치의 어려움으로 반 능동형 이 아닌 수동방식으로 활용하고 있음(그림 23 참조).



(a) Binzhou 사장교



(b) Dongting Lake 사장교

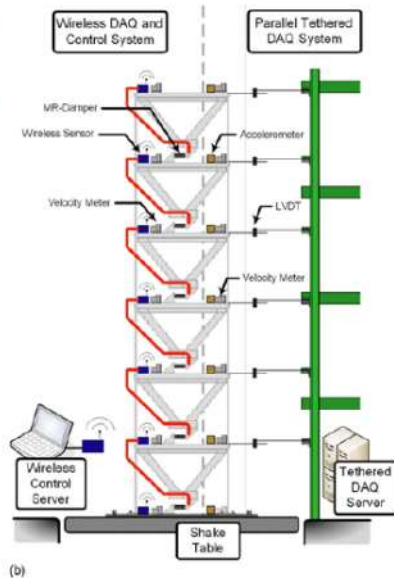
그림 23. 중국 사장교 케이블에 설치된 자기유변댐퍼

○ 무선센서를 이용한 반 능동형 진동제어

- 미국의 미시간대학교와 대만의 국립대만대학교는 LQR (Linear Quadratic Regulation) 알고리즘을 무선센서에 임베드하여 3층 전단구조물을 제어하는 실험을 수행하였으나, 실 운영을 고려하지 않은 제어시스템의 설계와 무선센서의 제한된 리소스로 인하여 제어 알고리즘 구현에 제약을 받았음^[12].
- 미국 미시간대학교 연구팀은 구조물에서의 케이블 작업을 줄이고 제어의 활용성을 높이기 위하여 무선센서 자체적으로 댐퍼를 제어할 수 있는 분산 제어(Decentralized)를 6층 전단 구조물에 구현하였으나, 수동제어(Passive)와 비슷한 수준의 제어 성능을 보이는 것에 그쳤음^[13].
- 무선센서를 사용하여 케이블에서 반 능동 진동제어를 수행한 국외연구사례는 보고된 바 없음.

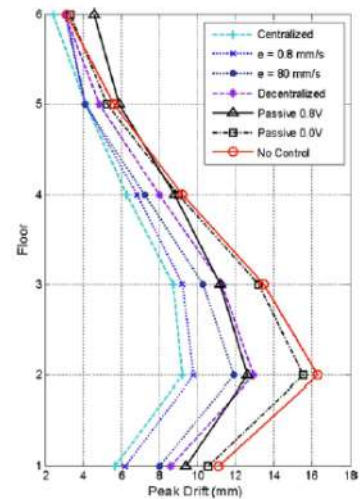


(a)



(b)

(a) 무선센서를 이용한 반능동 진동제어 실험



(b) 진동제어 방법에 따른 각 층별 최대 변위

그림 24. 무선센서를 이용한 전단빌딩의 진동제어 연구^[13]

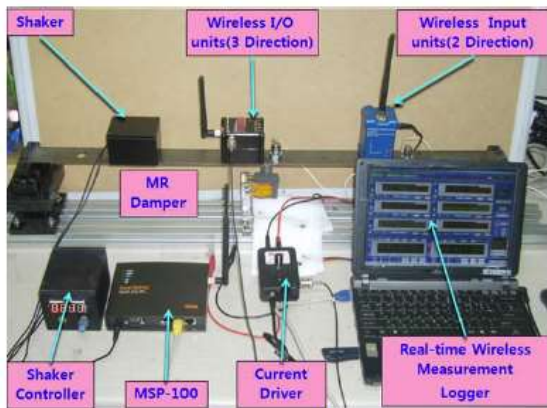
(3) 관련분야의 국내 연구동향

○ 자기유변댐퍼를 활용한 반 능동형 제어

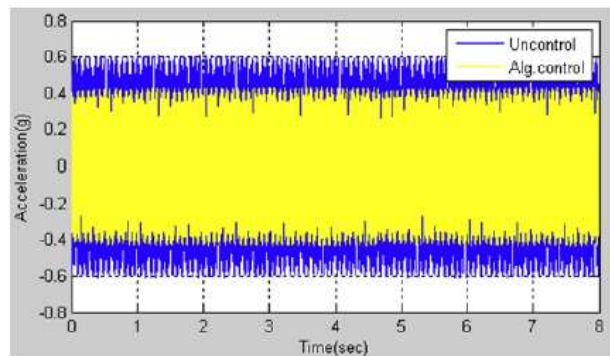
- 국내에서는 한국과학기술원, 서울대학교를 중심으로 자기유변댐퍼를 이용한 구조물의 반 능동형 진동제어 방법론에 관한 연구가 주로 수행되었음.
- 한국과학기술원에서는 자기유변댐퍼의 제어장치를 대체할 수 있는 전자기유도시스템을 개발하여 케이블 실험을 통하여 그 성능을 평가하였으나^[14], 전원장치가 따로 필요함.
- 서울대학교에서는 자기유변댐퍼를 이용한 반 능동 제어를 위하여 퍼지(Fuzzy) 제어 기법을 개발한 바 있으며, 미국에서 개발한 사장교의 벤치마크문제^[15]에 이를 적용하여 성능을 평가하였음^[16].

○ 무선센서를 이용한 반 능동형 진동제어

- 국내에서는 자기유변댐퍼의 제어를 위하여 무선센서를 사용한 사례가 보고되었으나^[17] 무선센서는 구조물의 응답만을 측정하는데 사용되었으며, 제어 알고리즘은 무선센서에 임베드되지 않고 컴퓨터에 의하여 계산되었음(그림 25(a) 참고).
- 구조물의 반 능동형 제어를 위하여 매우 단순한 제어 알고리즘을 활용하였으나, 반 능동형 제어를 수행한 경우 수동형으로 자기유변댐퍼를 활용한 경우보다 좋은 성능을 내는 것을 보였음(그림 25(b) 참고).



(a) 보구조물 진동제어 실내실험



(b) 댐퍼 유무에 따른 제어 성능 평가

그림 25. 무선센서를 이용한 반 능동형 진동제어 사례

나. 국내외 관련 기술 특허 동향

(1) 국내 관련 기술 특허

- 국내의 장대교량 케이블의 유지관리와 관련한 특허는 주로 진동법 기반의 케이블 장력 측정, 감쇠 장치 개발, 그리고 유지관리 장치(로봇 등)의 개발 분야에서 출원되었음.
- 자기유변유체와 관련한 특허가 있지만, 이는 케이블 개발 시 자기유변유체를 내장하는 내용으로 본 연구와 무관함.

국적	IPC	특허명	출원인	내용
한국	G01L 5/10	케이블의 동적 특성을 이용한 교량케이블의 장력 측정장치	장승필	진동법 기반 케이블 장력 추정 방법
한국	G06F 19/00	유한요소 해석 및 민감도 해석에 의한 교량 케이블의 장력추정방법	삼성물산(주)	시스템인식기법을 이용한 진동법 기반 케이블 장력 추정 방법
한국	E01D 11/00	사장교 케이블의 진동저감유닛 및 그 진동저감방법	한양대학교 산학협력단	고감쇠 고무를 이용한 감쇠장치와 그 활용방법
한국	E01D 11/00	MR유체 케이블 및 그 시스템	포항산업과학연구원	자기유변유체를 케이블 충진재 대신 사용하여 댐퍼기능을 하게하는 케이블 개발
한국	E01D 22/00	이동로봇을 이용한 케이블 점검 시스템	한국유지관리	촬영유닛과 비파괴 검사유닛을 탑재한 케이블 검사용 이동로봇

(2) 국외 관련 기술 특허

- 국외 특허 중 장대교량 케이블의 유지관리와 관련한 특허는 주로 케이블의 효율적 진동 감쇠를 위한 댐퍼 개발, 케이블 손상 탐지 기법, 진동법 기반 케이블 장력 추정 기법과 관련한 내용으로 출원되었음.
- 일본, 중국, 우리나라를 중심으로 많은 장대교량이 건설되면서, 다양한 케이블 장력 추정 기법이 특허 출원되었음.

국적	IPC	특허명	출원인	내용
미국, 유럽, 러시아 등	F16F 9/19	Method of Damping the Vibrations of Stay Cables and Associated System	SOLETANCHE FREYSSINET	효율적인 케이블 진동 감쇠를 위한 진동제어 시스템 및 장치
미국	F16F 7/10	Cable vibration control with a TMD-MR damper system	Chunsheng Cai	TMD와 자기유변댐퍼를 함께 활용하는 케이블 진동 제어 시스템
유럽, 일본, 중국	G01N 29/14	인장 상태의 케이블을 모니터 하는 방법 및 장치	Pure Technologies Inc.	음향센서를 이용한 사장케이블 손상 탐지 및 모니터링
중국	G01L 5/04	Method for determining basic frequency of stay cable when testing cable tension of cable stayed bridge by using vibration method	Zhejiang University	진동법 기반 케이블 장력 추정 방법

(3) 특허 침해 가능성

- 국외 특허 중 장대교량 케이블의 유지관리와 관련한 특허는 주로 케이블의 효율적 진동 감쇠를 위한 댐퍼 개발, 케이블 손상 탐지 기법, 진동법 기반 케이블 장력 추정 기법과 관련한 내용으로 출원되었음.
- 장대교량 케이블과 관련한 특허는 대부분 장대교량 케이블 시공법과 관련한 내용으로, 본 연구와는 무관함.
- 진동법 기반의 케이블 장력 측정 기법은 매우 다양하게 개발되고 그 중 일부는 특허로 등록되었으나, 실교량에서 성능을 검증받은 기법들^[18-19]은 이미 논문으로 공개되어 있으므로 특허침해 소지가 없음.
- 무선센서를 이용하여 장력을 추정하는 기기 개발과 관련한 연구는 이미 연구책임자에 의하여 논문으로 공개되어 특허침해 소지가 없음.
- 자기유변댐퍼는 회사(LORD Corporation 등)에서 제작한 제품을 사용할 것이므로, 특허침해 소지가 없음.
- 무선센서와 자기유변댐퍼를 결합하여 케이블에 적용한 연구는 아직까지 발표된 바 없으므로, 특허침해 소지가 없음.

다. 국내외 시장분석 및 산업동향

- 케이블 진동제어를 위한 댐퍼
 - 사장교 케이블의 진동 저감에 대한 필요성은 보편적으로 인식되어 많은 연구가 수행되었으나, 현장에서의 선호도로 인하여 산업계에서는 아직 수동댐퍼를 주로 사용하고 있음.
 - 국내에서는 자기유변 댐퍼를 제작하는 업체가 없으며, 케이블텍(주)와 VSL코리아(주) 등에서 수동 댐퍼 위주로 제작, 사용하고 있음.
 - 국외에서는 미국의 Lord Corporation, 일본의 Sanwa Tekki Corporation에서 자기유변 댐퍼를 제작하여 판매하고 있음.
- 토목구조물을 위한 무선센서 기술
 - 사장교 케이블의 진동 저감에 대한 필요성은 보편적으로 인식되어 많은 연구가 수행되었으나, 현장에서의 선호도로 인하여 산업계에서는 아직 수동댐퍼를 주로 사용하고 있음.
 - 무선센서는 1990년대 말에 토목구조물의 응답 계측을 위해 도입된 이후로 학계, 산업계에서 지속적으로 연구·생산되고 있음.
 - 미국의 MEMSIC社는 대표적인 무선센서인 MICAz, IRIS, TelosB와 측정 물리량(가속도, GPS, 변형률 등) 별로 센서보드를 판매하고 있음.
 - 국내 산업계에서는 (주)한국유지관리 및 (주)스마트제어계측 등에서 무선센서를 개발하였으나, 내부 연산기능을 제공하지 않으며 스트리밍 방식의 데이터 계측만 가능함.
- 제안연구 미래 시장성
 - 현재 건설·교통·안전 기술은 보수적인 기술로 인식되는 경향이 강하며, 대형인프라 구축 기술(초장대교량, 초고층 빌딩, 스마트교통기술 등)을 제외하면 미래기술로서 활용할 기술을 찾기 어려운 것이 현실임.
 - 건설분야의 미래 유망기술의 수는 타 분야에 비해 그 수가 작은 편이며, 약 2016~2017년 수준이면 구현이 거의 완료될 예정임(그림 26 참고).
 - 미래 기술의 실현이 매우 빠르게 일어나고 있는 정보전자분야와의 융합 및 협력연구를 통하여 새로운 미래기술의 창출이 필요한 시점임.

- 본 제안 연구는 연구개발이 선행된 무선센서기술과 케이블 유지관리기술의 융합을 통하여 틈새시장의 기술을 개발하는 연구로서, 2년간의 연구기간동안 시장가치를 갖는 미래 기술로 개발될 가능성이 매우 높음.

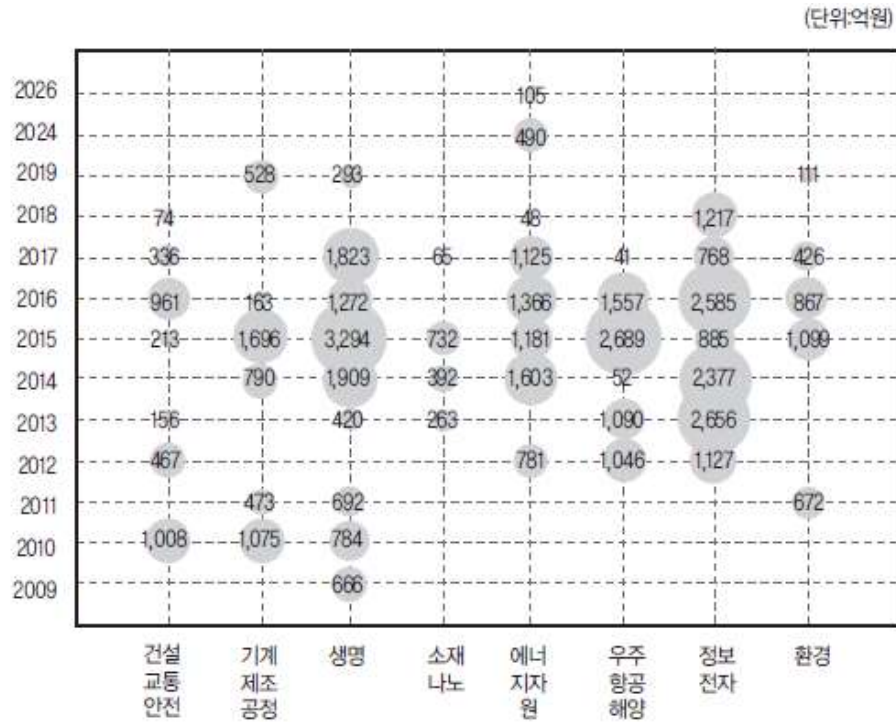


그림 26. 미래 유망기술 실현시기별 포트폴리오^[20]

- 수동댐퍼의 경우 지진, 태풍 등과 같은 급격한 가진상황에 대처하기 어려우므로, 자연재해의 불확실성이 점차 증가하면서 자기유변댐퍼와 같은 반 능동, 능동제어장치의 수요가 점차 증가할 것으로 예상함.
- 장기적으로는 댐퍼 제작 기술을 개발하는 것이 중요하며, 단기적으로는 본 연구와 같이 댐퍼의 현장 적용성을 높임으로서 충분한 가격경쟁력을 갖추는 연구가 필요할 것으로 예상됨.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

가. 연구개발결과 요약

(1) 1차년도 연구내용 및 세부추진내용

연 차	연구 내용	세부추진내용
1단계 (‘15.06~ ’16.06)	장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발	—적합한 무선센서 플랫폼 선정 —무선센서 prototype 제작: 센싱부 및 무선통신부 개발 —무선센서 prototype 성능 평가
	장력계측을 위한 임베디드 소프트웨어 개발	—무선센서 기반 케이블 장력 측정 방법에 대한 문헌조사 —장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발 —장력계측용 임베디드 소프트웨어의 성능 평가 —아두이노를 위한 장력계측용 임베디드 소프트웨어 포팅
	자기유변댐퍼 제어 기술 및 임베디드 소프트웨어 개발	—자기유변댐퍼 활용에 대한 문헌조사 —무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어 개발 —수치실험을 통한 최적화

(2) 2차년도 연구내용 및 세부추진내용

연 차	연구 내용	연구 결과
2단계 (‘16.06~ ’17.12)	▪ 일체형 장치 시제품 제작	—무선센서 플랫폼, 인터페이스, 소프트웨어를 통합한 일체형 시제품 제작 —태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작 —일체형 시스템 자가진단 기능 구현
	▪ 성능평가 실내실험 및 장력 계측 및 반 능동 제어 임베디드 소프트웨어 개선	—실내 모형 케이블 테스트베드 구성 —개발된 소프트웨어의 수정 및 보완 —실내실험을 통한 성능평가 및 최적화

나. 연구개발 주요내용

(1) 장력계측 및 반 능동 제어에 적합한 무선센서 개발

1) 적합한 무선센서 플랫폼 선정

○ 무선센서 개발 개요

- 기존의 상용 무선센서보다 더 다양한 기능을 갖는 무선센서를 저비용으로 구현하기 위하여, 최근 많이 이용하고 있는 소형컴퓨터 플랫폼인 아두이노 메가를 하드웨어 플랫폼으로 선정함.
- 아두이노의 통합 개발 환경(IDE, Integrated Development Environment) 소프트웨어를 이용하여, 무선센서 운용을 위한 프로그램을 개발하였음.
- 아두이노는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 DAC를 모사하고 있으므로, 진동 제어에 PWM을 이용하여 아날로그 제어신호를 출력함.
- 아두이노의 PWM은 8bit로 출력 시 오차율은 $1/2^8 \approx 0.4\%$ 정도임 (DAC 출력정확도).



그림 27. 아두이노 메가 2560

2) 아두이노(Arduino) 기반 무선센서 prototype 제작

○ 아두이노 센싱부 개발

- 가속도계: 그림 28와 같이 저주파 계측이 용이하고 민감도가 높은 MEMS형 가속도계 (ADXL335)를 사용함.
- ADXL335와 같은 아날로그 가속도계를 사용하기 위해서는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC (Analog-to-Digital Converter)가 필요하며, 아두이노 메가는 내부에 ADC를 내장하고 있음.



그림 28. 아날로그 가속도계(ADXL335)

○ 아두이노 무선통신부 개발

- 아두이노 플랫폼을 이용해 무선으로 제어하고, 계측된 데이터를 무선으로 전송받기 위하여 무선통신부를 개발하였음.
- 개발된 무선통신부는 아두이노용 Wireless Shield와 무선센서 네트워크 통신용으로 개발된 Xbee 카드(Zigbee 통신 프로토콜 이용)를 사용하여 개발하였음.
- Wireless Shield는 SD 카드 슬롯이 있어 무선통신으로 받은 데이터를 SD 카드에 저장할 수 있는 부가적 기능도 가지고 있음.

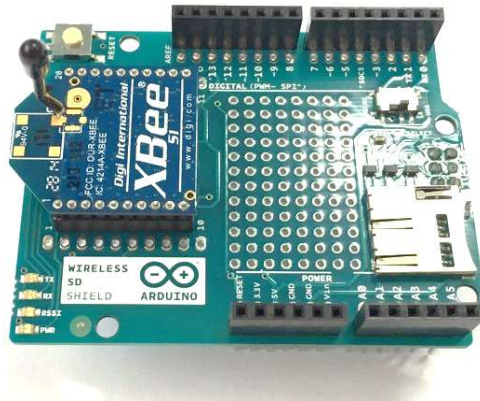


그림 29. 아두이노용 무선 통신부

3) 아두이노 기반 무선센서 prototype 성능 평가

○ 가속도 계측 성능 평가 - 전단빌딩을 대상으로

- 개발한 아두이노 기반 무선센서의 계측 성능을 평가하기 위하여, 그림 7과 같이 1층 전단빌딩을 이용한 진동시험을 수행하였음.
- 1층 전단빌딩에 고민감도를 갖는 유선가속도계(PCB 353B)와 개발한 무선센서를 아래 그림 30과 같이 설치한 뒤, 이를 흔들려 가속도를 계측함.
- 그림 31에서 보듯, 고민감도 가속도계의 응답과 무선센서를 이용하여 계측한 응답이 거의 동일하였음.
- 무선센서로 계측한 가속도계의 경우 감쇠가 충분히 일어난 뒤 다소 높은 노이즈레벨이 관측되었으나, 본 연구의 대상구조물인 케이블의 경우 통상 가속도 레벨이 높아 계측에 문제가 없을 것으로 판단됨.

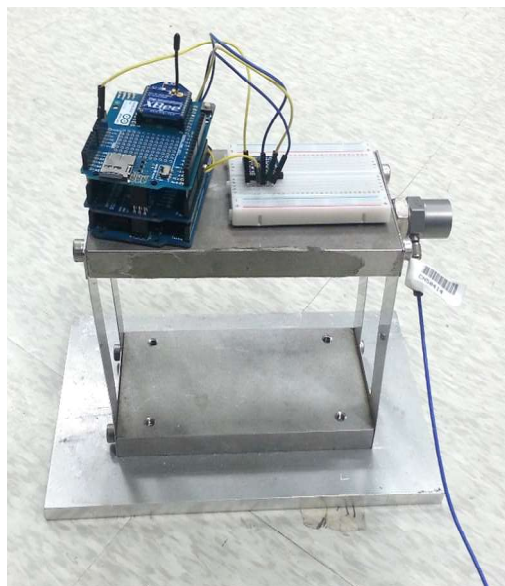


그림 30. 가속도 계측 성능 평가 시험

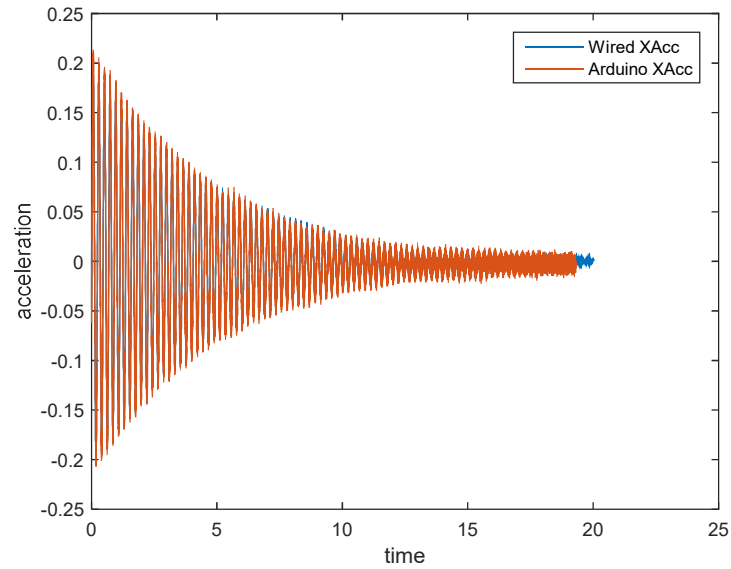


그림 31. MEMS형 가속도계 테스트 실험 결과

○ 가속도 계측 성능 평가 - 본 연구의 실내실험 케이블을 대상으로

- 개발한 아두이노 기반 무선센서의 계측 성능을 평가하기 위하여 본 연구에서 구축한 실내 실험 케이블을 대상으로 진동시험을 수행하여 유선가속도계(PCB 353B)와 비교하였음.

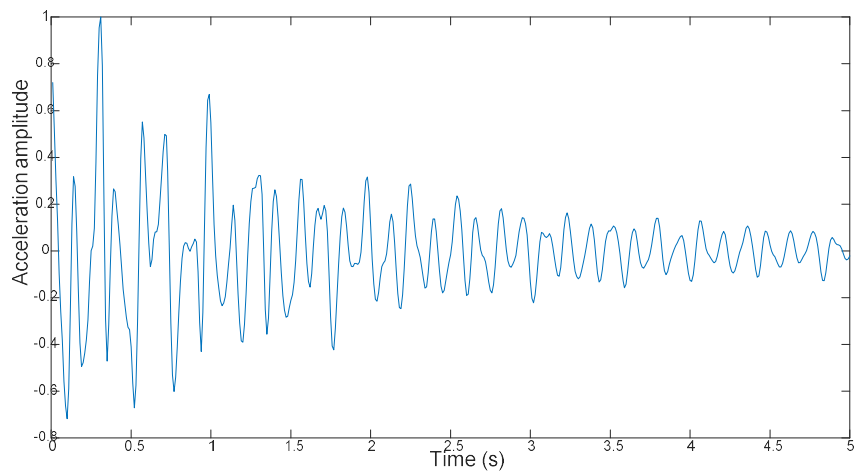


그림 32. 유선가속도계를 통해 계측한 케이블의 가속도

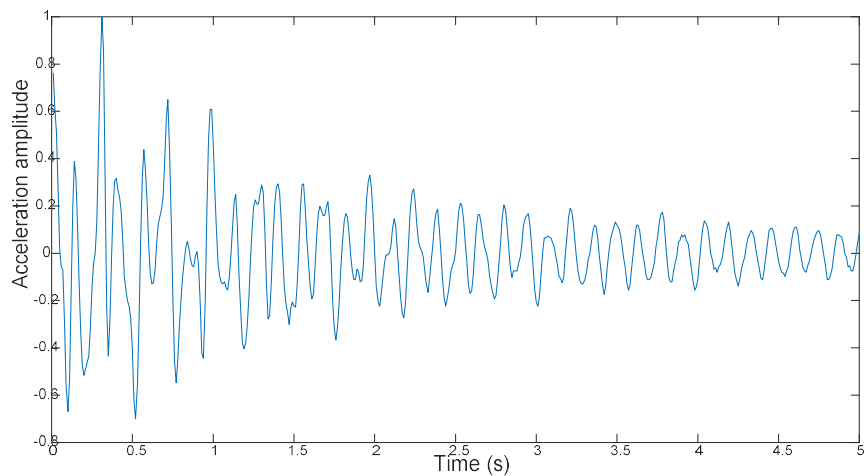


그림 33. 아두이노 기반 무선센서를 통해 계측한 케이블의 가속도

- 아두이노 기반 무선센서의 계측 성능을 판단하기 위해 peak와 peak사이의 크기를 비교하여 가속도 계측 오차를 계산하였음. 계측 오차를 계산하기 위해 0초에서 0.5초사이의 유선 가속도와 아두이노 기반 무선센서로 계측한 케이블의 가속도는 아래 그림과 같음.

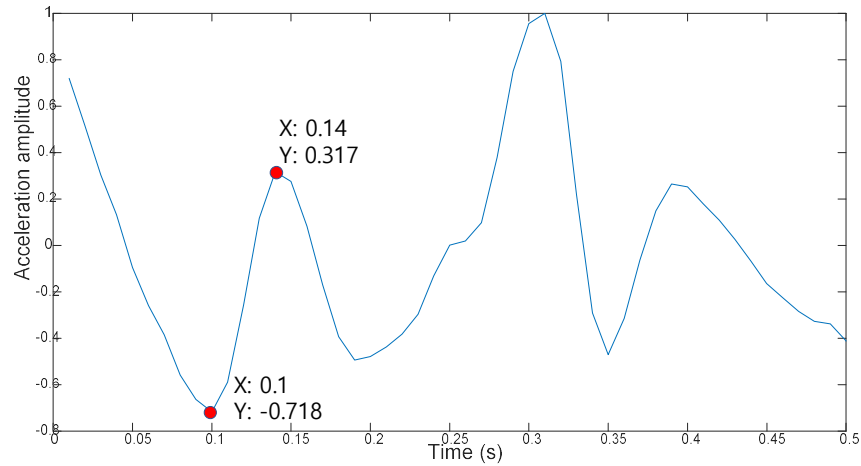


그림 34. 유선가속도계를 통해 계측한 케이블의 가속도(0~0.5초)

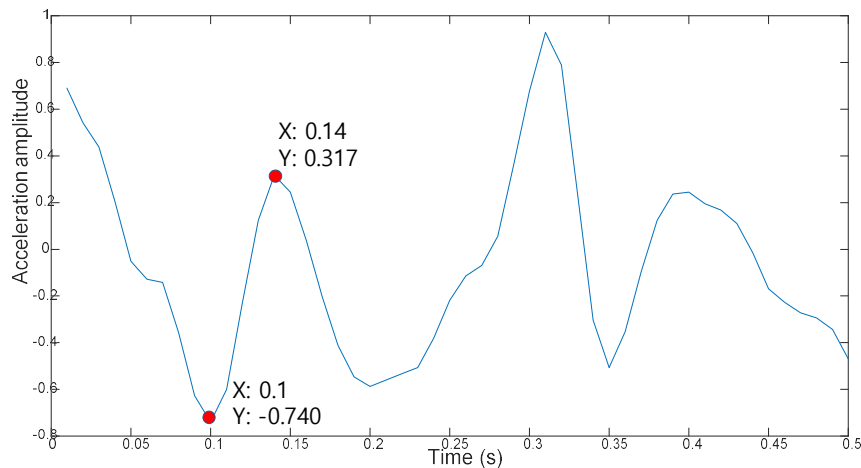


그림 35. 아두이노 기반 무선센서를 통해 계측한 케이블의 가속도(0~0.5초)

- 유선가속도계 및 아두이노의 가속도 Peak-to-Peak 값을 비교했을 때, 평균 3%의 오차를 보였음

○ 무선 통신성능 평가

- 두 개의 무선센서를 이용하여 아래 그림과 같은 간단한 무선센서 네트워크를 구축한 뒤 통신성능을 평가함.
- 계측용 아두이노는 1층 전단 빌딩의 응답을 계측하며, 컴퓨터와 UART기반으로 연결된 통신용 아두이노는 계측용 아두이노에 가속도 계측을 무선으로 명령하거나, 계측된 가속도를 무선으로 획득하여 컴퓨터에 저장하는 역할을 수행함.
- 무선으로 가속도 계측을 성공적으로 명령하였으며, 마찬가지로 계측된 가속도를 성공적으로 획득하였음.
- 중력에 의하여 Z방향으로 1g에 가까운 응답이 계측되었으며, 전단 빌딩이 움직이는 방향인 X방향으로 자유진동 응답이 정확히 계측되었음.
- 실내실험의 특성 상 통신장애로 인한 데이터 계측 실패가 없었으나, 실제 구조물 적용 시에는 무선통신의 성능을 향상시키기 위한 신호증폭기가 필요할 것으로 예상됨

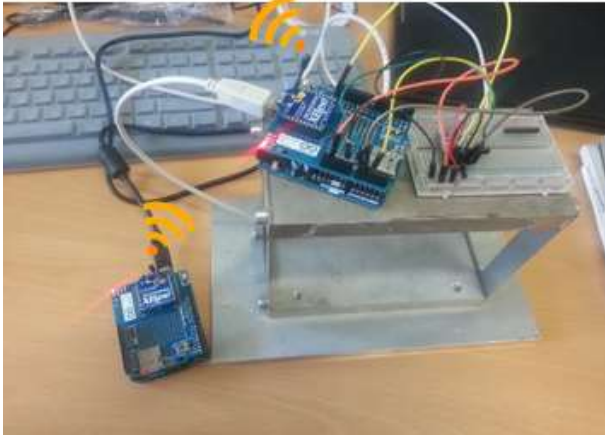


그림 36. 무선센서 통신 성능 평가 시험

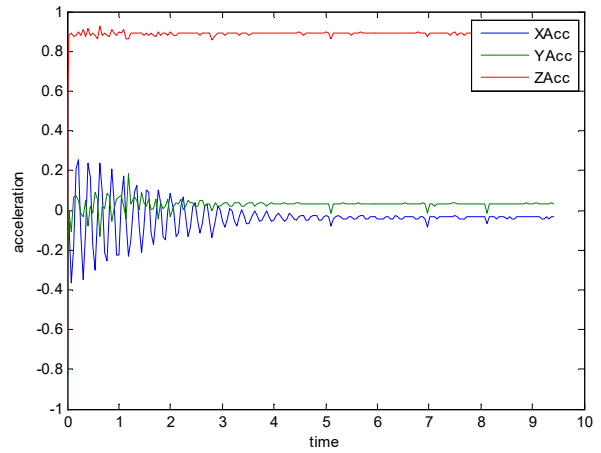


그림 37. 통신성능 평가시험 계측 결과

(2) 무선센서 기반 케이블 장력계측을 위한 임베디드 소프트웨어 개발

1) 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발 방법

○ 임베디드 가능한 진동법의 결정

- 가속도 데이터를 이용한 진동법을 이용하였음
- 아래 식과 같이 케이블의 단위 길이 당 질량(w), 총 길이(L), 중력가속도(g), 고유 진동 모드(n)에 따른 고유 진동수(f_n)를 알면 케이블의 장력과 $(f_n/n)^2$ 사이의 선형회귀분석을 통해 장력을 산출할 수 있음^[18].

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

○ 장력추정을 위한 주요 모듈 작성

- 주파수영역 계산 모듈: 계측한 상시진동(가속도)로부터 주파수영역 데이터를 효율적으로 획득하기 위한 모듈임.
- 피크 추출(Peak-picking) 모듈: 주파수영역 데이터로부터 케이블의 고유진동수를 추정함.
- 장력추정 모듈: 케이블의 고유진동수와 기타 케이블 특성(길이, 무게 등)을 이용하여 최소 자승법을 이용하여 장력을 자동적으로 산정함.

○ 주파수영역 계산 모듈

- 긴 시간의 상시진동 데이터를 취득하여 이를 분할하여 주파수영역으로 변환한 뒤 평균화(Averaging)함으로써, 제한된 무선센서의 메모리를 이용하여 정확한 케이블의 고유진동수 획득이 가능함.
- Welch방법^[22]을 적용하여 정확한 주파수영역을 획득함.
 - ① 긴 상시진동 데이터를 계측
 - ② 이를 Overlap된 여러 개의 조각신호(Segment)로 분할
 - ③ 각각의 조각신호에 Hanning Window를 씌움
 - ④ FFT를 이용하여 조각신호들의 주파수영역 데이터 획득
 - ⑤ 주파수영역 데이터의 평균값을 구함

○ 피크 추출(Peak-picking) 모듈

- Peak Picking 방법은 구조물의 고유진동수를 추정하기 위하여 잘 활용되지만, 노이즈 등에 의해 실제 고유진동수를 자동으로 추정해내는 것은 쉽지 않음.
- 케이블의 경우, 일반 구조물에 비해 응답이 크고 고유진동수가 선명하게 나타나는 특성 때문에 적절한 가진과 함께 적절한 고유진동수 추출 조건을 제시할 경우, 고유진동수를 비교적 정확하게 추정할 수 있음.
- Peak-picking 방법
 - ① 주파수영역 계산 모듈에서 얻은 주파수영역 데이터를 이용함.
 - ② Peak 자동 추출을 위한 기준 고유 진동수 설정(유선가속도계를 이용해 최소자승법으로 산출한 Peak을 Peak 자동 추출을 위한 기준으로 설정)
 - ③ 주파수영역 데이터에서 설정된 기준 고유 진동수 주변의 에너지를 비교하면서 제일 에너지가 높은 Peak의 위치를 찾음('wingsize'라는 개념을 도입하여, 기준 고유진동수의 좌우 spectral line에 위치해있는 Peak중에 에너지가 제일 높은 지점을 선택)
 - ④ 기 설정된 기준 고유 진동수 개수만큼 Peak이 추출되면 이를 주파수 단위로 변환함
 - ⑤ 고유진동수와 그에 따른 모드수를 바탕으로 선형회귀분석을 통해 장력을 추정함
 - ⑥ ①~⑤를 여러 번 반복하여(아두이노 코드 내에서 'average_num') 평균 장력 값을 추출함

2) 무선센서 기반 아두이노를 이용한 장력계측용 임베디드 소프트웨어 개발

○ 아두이노 메가를 이용한 장력계측 알고리즘 개발

- 장력계측 알고리즘은 크게 5가지 단계로 이루어져 있으며, 각각의 단계에 대한 설명과 해당하는 아두이노 코드는 다음과 같음. 아두이노 전체 코드는 부록에 수록되어 있음.
- 무선센서 기반 아두이노를 이용한 임베디드 장력계측용 소프트웨어 등록을 진행 중임.
- 1단계: ADXL335 MEMS 가속도계로 외부 하중에 의한 케이블의 가속도를 측정함.

```
if (i < 1024) {  
  j = 0;  
  int data = analogRead(2);  
  zAcc[i * 2] = 0; // 짝수항은 0  
  zAcc[i * 2 + 1] = data; // 홀수항은 가속도 데이터  
  Serial.print(zAcc[i * 2]);  
  Serial.print(zAcc[i * 2 + 1]);  
  i = i + 1;}  

```

- 2단계: FFT를 통해 시간에 대한 케이블의 가속도를 주파수 도메인으로 전환하고, 실수와 허수값을 추출함.

```
fftcomplex(zAcc - 1 , 1024 , -1); // fft
```

- 3단계: 케이블의 고유치 분석을 통해 설정한 기준 고유진동수 주변에서 제일 에너지가 높은 Peak 값을 추출함.

```
for(j = 0; j<512;j++) {
    double n1; double n2;
    n1 = zAcc[j*2] / average_num;
    n2 = zAcc[j*2+1] / average_num;
    double nn12 = n1 * n1 + n2 * n2;
    nn12 = sqrt(nn12);
    fft_result[j] += nn12;}
i=0;
if(count2 >= average_num) {
    for(j = 0; j<512;j++) {
        zAcc[j] = fft_result[j];
        zAcc[j] = abs(zAcc[j]);
        Serial.print(zAcc[j]);}
```

- 4단계: Peak점에 해당하는 고유진동수를 추출함.

```
for (int n = 0; n <= modenum-1; n++) { // f[n] 값들 출력
    int number = cable_fn[n] * nfft / fs;
    int max_value = zAcc[number];
    max_value = abs(max_value);
    int max_num = number;

    for (int r = number - wingsize; r <= number + wingsize; r++) {
        int Fn = zAcc[r];
        if (max_value < Fn) {
            max_value = Fn;
            max_num = r;
        }
    }
    Serial.println(max_num+1);
    fn[n] = fs / nfft * (max_num+1);
    mode_num[n] = n+1;
    Serial.println("Value of fn");
    Serial.println(fn[n]);
}
```

- 5단계: 선형회귀분석을 통해 모드수와 고유진동수에 따른 케이블의 장력을 출력함.

```
double calculate_tension(double cable_mass, double cable_length, double fn[], int
    mode_num[], int nmodes)
{
    double xv[nmodes];
    double yv[nmodes];
    for (int i = 0; i < nmodes; i++)
    {
        xv[i] = (double)mode_num[i] * mode_num[i];
        yv[i] = fn[i] * fn[i] / xv[i];
    }
    linearRegression(xv, yv, nmodes);
    return 4.0 * cable_mass * cable_length * cable_length * reg[1] / 9.80665;
}
```

(3) 반 능동 제어용 임베디드 소프트웨어 개발

1) 자기유변댐퍼 관련 장비 및 시스템 구축

- 국내에서는 자기유변댐퍼 관련 장비를 제작하는 업체가 없어, 미국의 자기유변댐퍼 제작 업체인 Lord Corporation을 통해 관련 장비를 구매함.

○ 자기유변댐퍼(MR Damper)

- Lord Corporation에서 제공하는 자기유변댐퍼 중에서 RD-1097-01 Type의 자기유변댐퍼를 본 연구에 활용하였음.



그림 38. 본 연구에서 활용된 자기유변댐퍼

- 본 연구에 활용된 자기유변댐퍼의 특징은 아래 표와 같음.

표 1. 자기유변댐퍼의 일반적 특징^[27]

목록	수치
Stroke (mm)	-25 ~ 25
Response time (ms)	less than 25 (under a step change of the current from 0 A to 1 A for 51mm/sec piston velocity)
Maximum damping force (N)	100 (51mm/sec, 1 A)
Minimum damping force (N)	< 9 (passive-off mode, 200mm/s)

- 본 연구에 활용된 자기유변댐퍼의 변위, 속도, 입력 전류에 대한 관계는 Wu and Cai (2006)의 연구^[29]를 바탕으로 도출하였음.

○ Wonder Box Controller Kit

- 자기유변댐퍼를 이용해 구조물의 진동을 제어하기 위해 필요한 감쇠력을 만들어 주기 위해 적절한 전류를 흘려주는 장치가 필요함.
- 본 연구는 Lord Corporation에서 제작하는 Wonder Box Device Controller Kit을 활용하였음.
- Wonder Box Device Controller Kit은 아래 그림과 같이 구성되어 있음. 전력공급은 A를 통해 이루어지며, B부분을 통해 바나나플러그를 이용하여 자기유변댐퍼와 Wonder Box가 연결됨.
- 자기유변댐퍼에 입력되는 전류 값은 C부분을 돌리면서 조절이 가능하며, D부분을 통해 0-5볼트의 DC 제어 신호의 입력이 가능함. 마지막으로 E를 통해 자기유변댐퍼로 흐르는 전류의 Power off 및 Power on이 가능함.



그림 39. Wonder Box의 구성

- Wonder Box Device Controller Kit의 특징은 아래 표와 같음.

표 2. Wonder Box Controller Kit의 일반적 특징(Lord Corporation)

목록	수치
Overall Dimensions (LxWxH) (mm)	63.5 x 27.9 x 88.9
Input Receptacle	2.1 mm Female
Pulse Width Modulation (PWM) frequency (kHz)	30
Output Current (Amp)	2 (max)

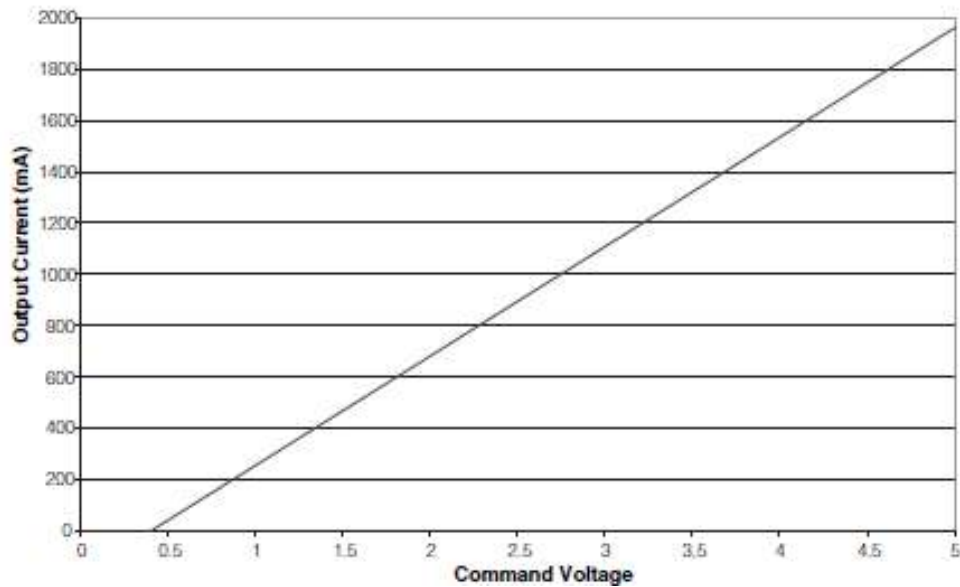


그림 40. 전압의 제어에 따른 전류의 출력값 (Lord Corporation)

- 일반적으로 입력전압과 출력전류는 Wonder Box 내부의 저항에 따라 관계가 달라지며, 저항값이 4Ω과 8Ω일 때의 관계는 아래 표와 같음.

표 3. Wonder Box Controller Kit의 일반적 특징(Lord Corporation)

Input Voltage	Output Current (4Ω)	Output Current (8Ω)
~ 0.4~0.6V	0mA	0mA
2V	750mA	600mA
3.2V		1,300mA
4.3V	1,800mA	

2) 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어 개발

○ 케이블의 운동방정식 도출

- 사장케이블은 일반적으로 큰 장력이 가해지기 때문에 매우 작은 처짐(1% sag-to-length ratio or less)을 갖는다. 이와 같은 작은 처짐을 가질 때 아래 그림과 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블로 모델링 할 수 있으며^[21], 이때 케이블의 지배 미분 방정식은 아래 식과 같음.

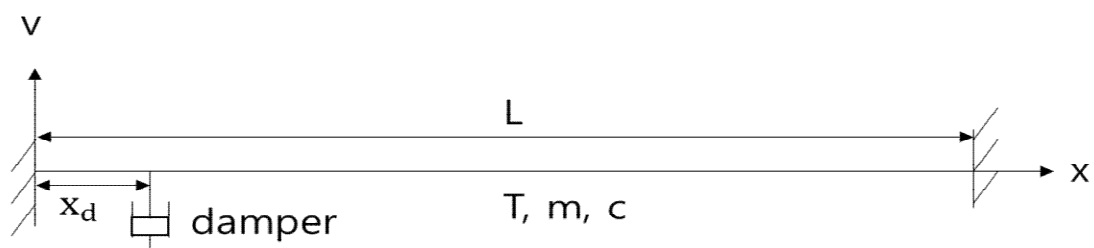


그림 41. 제진장치가 설치된 케이블 모델

$$m\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}(x,t) - T\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}(x,t) + cv(x,t) = f(x,t) + F_d(t)\delta(x - x_d)$$

$$v(0,t) = v(L,t) = 0 \text{ for all } t$$

- 여기서, L 은 케이블의 길이, $v(x,t)$ 는 케이블의 연직방향의 변위, c 는 케이블 길이 당 감쇠 계수, T 는 케이블의 장력, m 은 케이블의 길이 당 질량, $f(x,t)$ 는 케이블의 가진을 위한 외부 하중, $F_d(t)$ 는 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, x_d 는 케이블 하단부로부터 감쇠기까지의 길이임.
- 케이블의 수직방향의 변위 형상이 유한한 케이블의 모드들로 표현되어 진다고 가정하면 케이블의 응답은 아래와 같이 근사 할 수 있음.

$$v(x,t) = \sum_{j=1}^m q_j(t)\phi_j(x)$$

- 여기서, m 은 고려된 모드의 개수, $q_j(t)$ 일반화된 변위, $\phi_j(x)$ 는 형상 함수이다. 케이블의 변위를 잘 표현하기 위해 정현 함수를 형상 함수로 사용하는 것이 일반적이나 감쇠기가 설치된 경우 케이블의 거동을 모사하기 위해서는 수백개의 정현 함수가 필요하기 때문에 이는 수치 해석뿐만 아니라 제어기를 설계할 때에도 많은 문제점들을 유발함.
- 이러한 문제를 해결하기 위하여 Johnson 등(2000)^[30]은 감쇠기가 설치된 지점에서 감쇠력에 의하여 유발된 케이블의 변형 형상을 형상함수로 도입함으로써 정현 함수를 사용한 경우보다 필요한 형상 함수의 개수를 크게 감소시키는 동시에 케이블의 거동을 보다 정확하게 모사 할 수 있음을 보였음.
- 아래 식을 형상함수로 사용하고 표준 Galerkin Method를 이용하면 사장케이블의 지배방정식을 도출할 수 있음.

$$\phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & (0 \leq x \leq x_d) \\ (L-x)/(L-x_d) & (x_d \leq x \leq L) \end{cases}, \quad \phi_n(x) = \sin(n-1)x \quad (2 \leq n \leq m)$$

- 위 형상함수를 이용하여 도출된 사장케이블의 지배방정식은 아래와 같음.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = f + \phi(x_d)F_d(t)$$

- 여기서, M 은 질량 행렬, K 는 강성 행렬, C 는 감쇠 행렬, f 는 하중 벡터, 그리고 $\phi(x_d)$ 는 감쇠력 벡터이다. 각각에 대한 값들은 아래와 같이 구할 수 있음.

$$M=[m_{ij}], \quad m_{ij} = m \int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx$$

$$C=[c_{ij}], \quad c_{ij} = c \int_0^L \phi_i(x)\phi_j(x)dx$$

$$K=[k_{ij}], \quad k_{ij} = -T \int_0^L \phi_1''(x) \phi_j(x) dx$$

$$\mathbf{f}=[f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_m]^T, \quad f_i = \int_0^L f(x,t) \phi_i(x) dx$$

$$\phi(\mathbf{x}_d)=[\phi_1(\mathbf{x}_d) \quad \phi_2(\mathbf{x}_d) \quad \dots \quad \phi_m(\mathbf{x}_d)]^T$$

- 사장케이블의 지배방정식을 상태 공간방정식(State-space form)으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있음.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{f}_c + \mathbf{G}\mathbf{f} & \mathbf{X} &= [\mathbf{q}^T \quad \dot{\mathbf{q}}^T]^T \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{f}_c + \mathbf{H}\mathbf{f} + \mathbf{v} & \mathbf{Y} &= [v(\mathbf{x}_d, t) \quad \ddot{v}(\mathbf{x}_d, t)]^T + \mathbf{v} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\phi \end{bmatrix} \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \phi^T & 0 \\ -\phi^T \mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\phi^T \mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}, & \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \phi^T \mathbf{M}^{-1}\phi \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix}, & \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \phi^T \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

○ LQG 제어 알고리즘을 이용한 제어력 산출 및 진동제어 검증

- MATLAB을 통해 케이블 진동에 따른 제어력을 산출하고, 진동제어 여부를 검증하였음.
- 케이블 진동에 따른 제어력을 산출하기 위해, LQG (Linear Quadratic Gaussian) 제어를 이용하였음.
- 본 제어방법은 외부 하중에 따른 케이블의 응답을 바탕으로 Kalman filter를 이용해 케이블의 상태(state)를 예측하고, 예측된 케이블의 상태를 LQR (Linear Gaussian Regulator) 이론을 기반으로 아래 손실함수를 최소화하는 제어력을 산출하는 것을 목표로 함.

$$J_t = \int_0^{\infty} [\mathbf{X}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{X}(t) + R f_c^2(t)] dt$$

$\mathbf{Q}$ = State weight matrix
 R = Weight factor for control
 $\mathbf{X}(t)$ = system state

- 여기서, $\mathbf{Q}$ 는 상태하중행렬, R 은 제어를 위한 하중요소, $\mathbf{X}(t)$ 는 시스템 상태, f_c 는 구하고자 하는 제어력임.
- 위 손실함수를 최소로 하는 제어력은 아래와 같이 $\mathbf{K}$ (Control gain)와 케이블의 응답을 기반으로 Kalman filter를 통해 예측된 상태(state)의 식으로 나타낼 수 있음.

$$\mathbf{f}_c = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{X}}(t)$$

- LQG 제어를 그림으로 나타내면 아래와 같음. 케이블의 응답(Acceleration)을 바탕으로 Kalman filter를 통해 케이블의 상태를 예측하고, LQR 기반으로 손실함수를 최소화하는 Control gain ($\mathbf{K}$)을 구함. 케이블의 예측된 상태와 Control gain을 곱하여 제어력을 산출하고 Clipped Optimal 제어 알고리즘을 통해 최종적으로 자기유변댐퍼를 제어함.

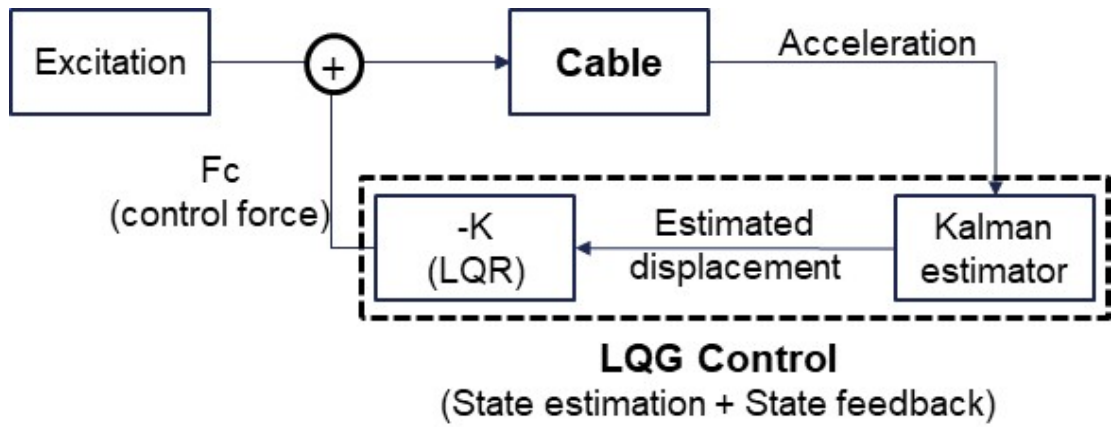


그림 42. LQG 제어 개요

- 케이블의 길이가 6.95m, 장력이 379.2N, 질량이 0.314kg/m, 총 4개의 형상함수를 사용한 케이블을 대상으로 크기가 1인 백색소음(White Noise)을 하중으로 주었을 경우의 케이블 진동을 분석하기 위해 MATLAB과 SIMULINK를 이용해 LQG 제어를 모의하여 수치 해석을 수행하였음.
- 수치해석 결과 아래 그림과 같이 진동제어를 하지 않았을 때보다 LQG 제어를 하였을 때 케이블의 진동이 감소하는 것을 확인할 수 있음. 60초 동안 진동제어를 하지 않았을 때의 최대 변위 폭은 1.0221이었으나, LQG 제어 이후에 최대 변위 폭이 0.1164로 86.6%의 진동 저감 효과를 보였음.

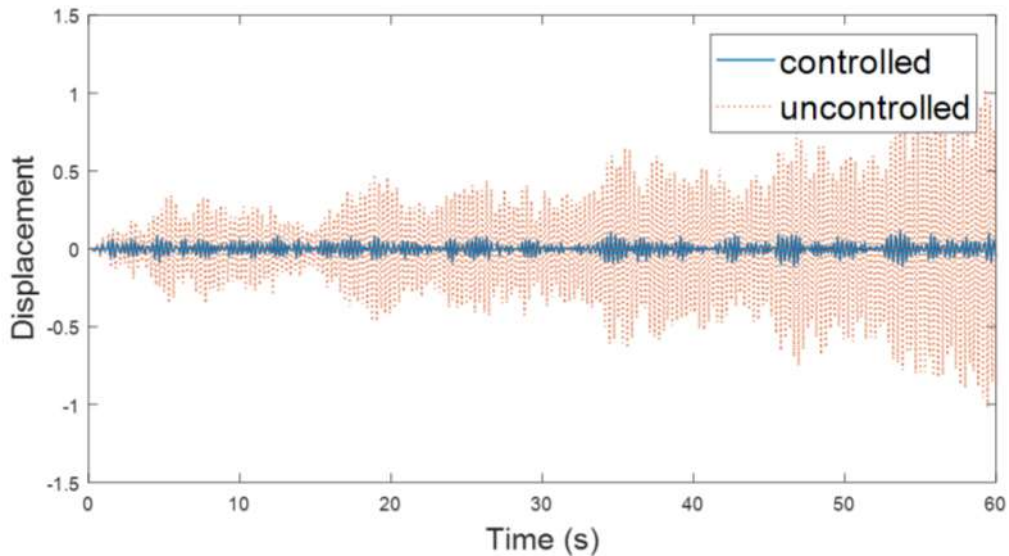


그림 43. LQG 제어와 제어를 하지 않았을 때의 케이블 진동의 차이

○ 무선센서 임베디드 반 능동(Semi-active) 제어 소프트웨어 개발

- 자기유변댐퍼의 특성을 잘 나타내도록 Dyke(1996) 등이 제안한 Clipped optimal 제어 알고리즘을 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어 개발에 이용하였음^[31].
- 본 알고리즘은 자기유변댐퍼의 특성상 구조물의 반응에 제한되어 작용하기 때문에 아래 식을 통하여 반 능동 댐퍼가 최대한 산출된 제어력과 유사한 제어 효과를 발휘하도록 유도하는 알고리즘임.

$$v = V_{\max} H\{(f_c - F_d)F_d\}$$

- 여기서 f_c 는 계산된 제어력이고 F_d 는 피드백을 통하여 확인된 제어력임. 즉, 아래 그림에서 보면 알 수 있듯이 자기유변댐퍼의 실제 제어력과 계산된 제어력을 비교하여, 제어력이 더 큰 경우에는 입력전압을 최대값으로 취해주고, 그렇지 않은 경우에는 입력전압을 0으로 하는 알고리즘임.

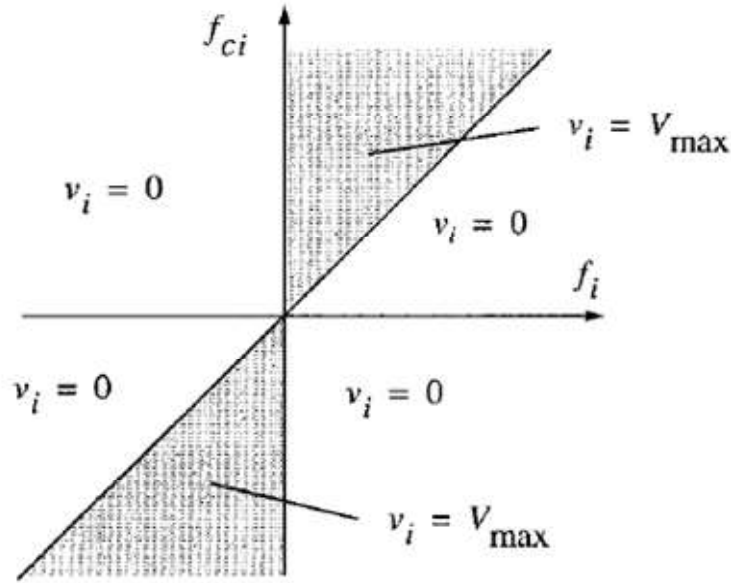


그림 44. Clipped optimal 제어 알고리즘^[31]

- 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어의 전반적인 개요는 아래 그림과 같음.
- 외부 하중에 의한 케이블의 응답(Acceleration)을 바탕으로 Kalman filter를 통해 케이블의 변위를 추정하고, LQR 이론에 따른 손실함수를 최소화 하는 Control gain을 구하여 제어력을 산출함(LQG 제어).
- LQG 제어를 통해 산출된 제어력과 자기유변댐퍼의 실제 제어력을 Clipped optimal 제어 알고리즘을 이용해 비교하여 자기유변댐퍼를 제어하는 전압을 결정함.
- 입력 제어전압은 Wonder Box Controller를 통해 전류로 전환되어 자기유변댐퍼로 전달되고, 입력전류에 따라 감쇠력이 결정되어 케이블의 진동을 제어하게 됨.

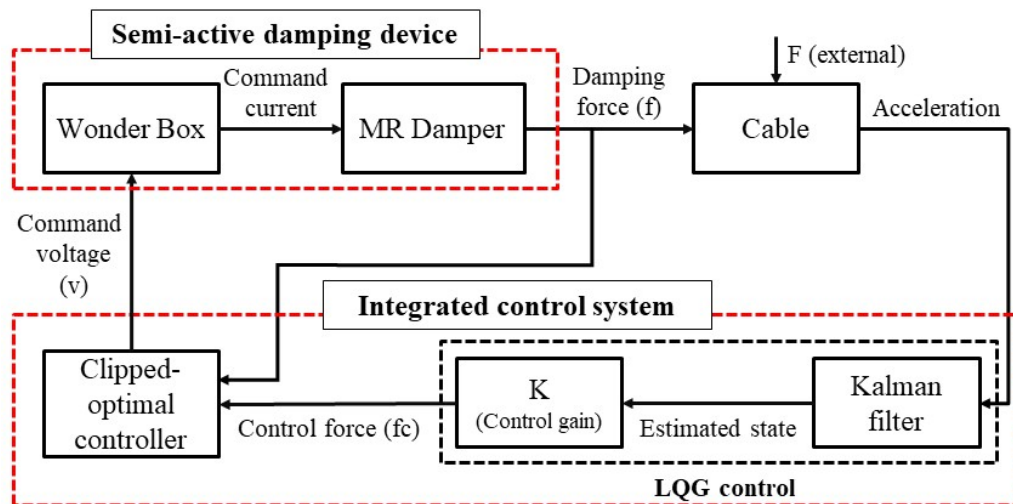


그림 45. 무선센서 임베디드 반 능동 제어 소프트웨어의 작동 원리

- 아두이노를 이용한 반 능동 제어 알고리즘의 전체 코드는 부록에 수록되어 있음.
- 무선센서 기반 아두이노를 이용한 반 능동 제어 임베디드 소프트웨어 등록을 진행 중임.

(4) 통합 하드웨어/소프트웨어 구성

1) 시스템 구성

- 아두이노 기반 시스템을 다음 그림과 같이 구성하였음

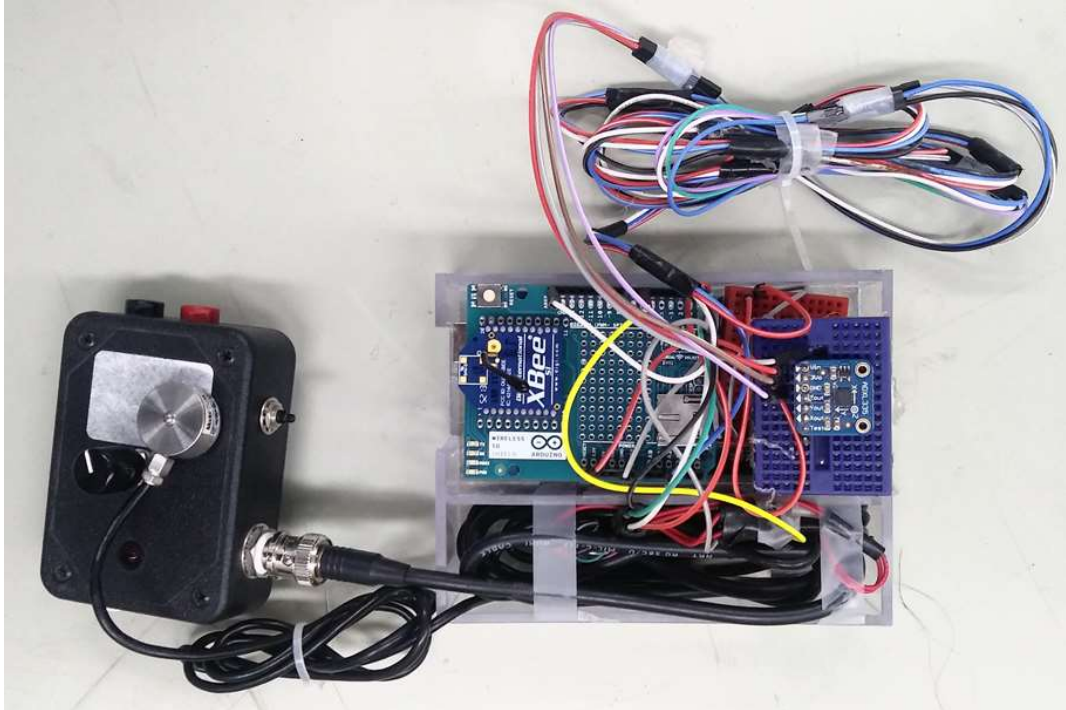


그림 46. 무선센서 기반 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템

○ 케이블 장력계측

- 장력계측용 아두이노 시스템은 MEMS 가속도계를 이용해 케이블의 센서 수직방향 (Z축) 가속도를 측정하고, 측정된 가속도 값을 FFT를 통해 주파수 대역으로 전환한 후, Peak 부분의 고유진동수를 구하고, 모드차수와 고유진동수 값을 바탕으로 선형회귀분석을 통해 최종적으로 장력을 추정한 후, 무선통신을 통해 장력 값을 송출하는 노드와 장력 데이터를 송신 받는 노드로 구성됨.

○ 케이블 진동제어

- 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템을 아래 그림과 같이 구성하였고, 각각의 구성요소에 대한 설명은 다음과 같음.
- 아두이노 메가(Arduino Mega): MEMS 가속도계(ADXL 335)를 통해 케이블의 응답을 측정하고, 측정된 응답을 바탕으로 아두이노 메가에 임베디드 된 케이블 장력계측 및 진동제어 알고리즘을 구동하여 케이블의 장력을 계측하고 제어전압을 자기유변댐퍼(MR 댐퍼)로 전달하여 케이블의 진동을 제어하는 역할을 함.
- ADXL 335: 외부 하중에 의한 케이블의 응답을 계측하는 MEMS 기반 가속도계임. 아두이노 메가에 임베디드 된 케이블 장력계측 및 진동제어 알고리즘을 통해 케이블의 장력을 계측하고, 진동을 제어하기 위해 필요한 케이블의 응답(특히, 가속도)를 센싱하는 역할을 함.
- Xbee Pro S1: 무선통신기능을 위하여 Zigbee 사용 무선 모듈인 Xbee Pro S1는 무선섀드(Shield)와 함께 무선통신부의 역할을 함.
- 자기유변댐퍼와 Wonder Box Controller: 아두이노 메가에 임베디드된 진동제어 알고리즘을 통해 생성된 제어전압을 Wonder Box Controller를 통해 제어전류로 변환하여 자기유변댐퍼를 케이블의 진동을 감소시키는 방향으로 제어할 수 있음.

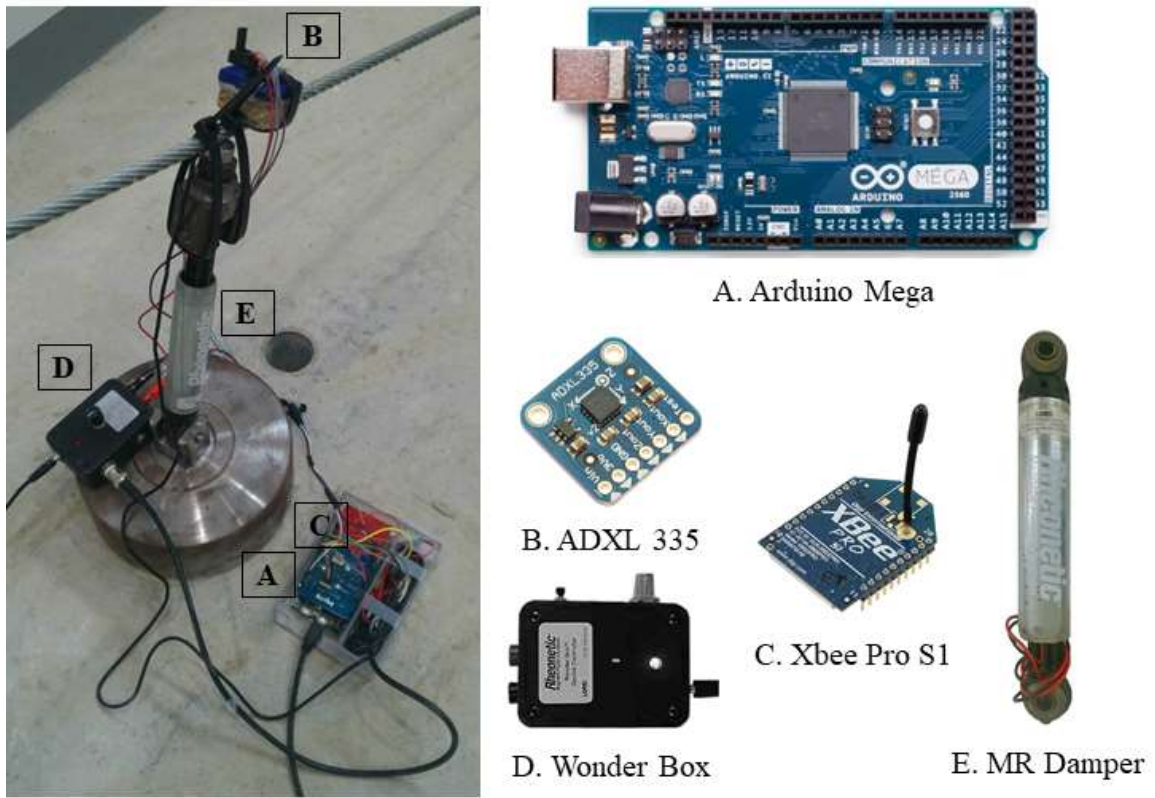


그림 47. 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 구성

- 각각의 구성요소에 대한 자세한 특징과 가격은 아래 표와 같음.

표 4. 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 구성요소(하드웨어)

구성요소	특징	가격
아두이노 메가 (Arduino Mega)	- ATmega2560 micro controller - 16 Analog Inputs - 16MHz Clock Speed - 256K Flash Memory - 5V operating voltage	\$45.95 (US)
MEMS digital accelerometer (ADXL 335)	- 3-axis - Low power: 350 uA - Sensitivity: 300 mV/g	\$3 (US)
Zigbee wireless communication module (Xbee Pro S1)	- For wireless communication - 3.3 operating voltage - 8 digital IO pins	\$37.95 (US)
Damping device (MR Damper with Wonder box)	- Lord Corporation - RD-1097-01 (MR damper) - RD-3002-03 (Wonder Box)	\$750 (US)

2) 통합 하드웨어/소프트웨어 자가진단 기능

○ 이상상태 판별

- 아두이노 기반의 무선센서 시스템에 진동법과 반 능동제어 알고리즘을 내장하여, 저렴한 비용으로 케이블의 장력을 측정하고, 케이블의 진동을 제어할 수 있는 무선 장력측정 및 진동제어 시스템을 개발하였음.
- 케이블 장력계측을 예로 들어 자가진단 기능을 살펴보면, 진동법에서는 케이블의 고유진동수들을 추출한 뒤, 이들을 선형회귀하여 장력을 추출함. 따라서, 고유진동수를 올바르게 추출하지 못하는 경우 장력에 큰 오차가 발생함.
- 만일 센서나 센서 시스템, 또는 데이터에 이상이 발생하는 경우 주파수영역 데이터에서 고유진동수를 정확하게 찾기 어렵게 되므로, 초기에 케이블에서 획득한 고유진동수와 너무 차이가 크게 발생하는 경우에, 이를 찾아내고 오류메시지를 전송하는 알고리즘을 개발하고 내장 프로그램에 추가하였음.
- 측정과정에서 발생하는 오류란 다음과 같음. 가속도계로 가속도를 측정하여 고유진동수를 추출해내는 과정에서, 프로그램은 미리 획득하였거나 알려져 있는 케이블의 고유진동수($f_n^*, n = n_1, \dots, n_m$)를 기준으로 하여 좌우 일정 간격(여기에서는 wingsize로 지칭함) 안에서 최댓값을 찾는 방식으로 피크를 추출해냄.
- 만일 데이터가 정상적일 경우 피크 진동수의 변화는 크지 않으며, 그에 따라 그림 50(a)과 같이 기준 고유진동수(f_n^*) 주변에서 모든 피크 진동수(f_n)를 정확하게 찾을 수 있음.
- 만일 데이터에 문제가 있을 경우 그림 50(b)과 같이 일부 또는 전체 피크 진동수의 변화가 크게 발생할 것으로 예상할 수 있음. 만일 이 변화가 wingsize를 넘어서는 경우, 최댓값은 좌우 wingsize의 변두리에서 얻어지게 됨. 이 경우, 데이터에 오류가 있다고 판별하고 이를 사용자에게 통지함으로써 문제를 수정할 수 있도록 하였음.
- 예를 들어, wingsize를 3으로 주었다면(즉, 탐색구간을 $\pm 3\Delta f$ 로 가정하였다면), 정상적 데이터의 경우에는 $f_n^* \pm 2\Delta f$ 범위 중 하나의 값에서 피크를 찾게 됨.
- 하지만, 피크가 $f_n^* \pm 3\Delta f$ 에서 찾아지는 경우에는 데이터에 오류가 있다고 볼 수 있음.

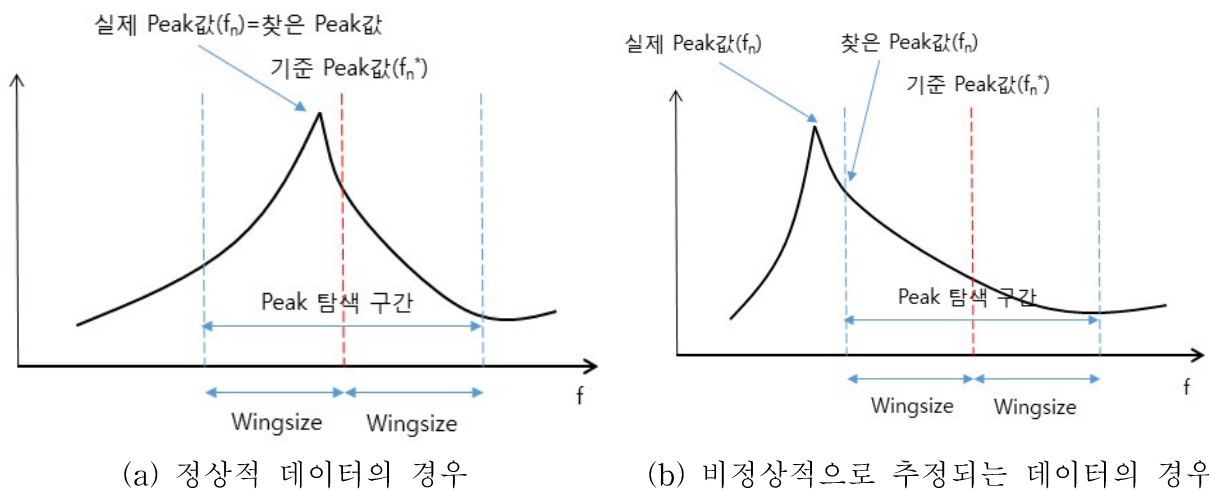


그림 48. 이상상태 판별 사례

○ 이상상태 판별 코드

- 이상상태 판별 코드는 그림 50과 같이 4가지 단계를 수행하도록 구성되었음.
- 단계 1. 기준 고유진동수 f_n^* 과 n 을 입력받는다.

- 단계 2. f_n^* 의 좌우로 $wingsize(=\pm k\Delta f)$ 내에서 최댓값을 찾고 이를 f_n 으로 저장한다. 이 때, k 는 이상상태에 대한 신뢰도에 따라 적절하게 설정할 수 있다.
- 단계 3. $\Delta f_n = f_n - f_n^*$ 이 $f_n \pm (k-1)\Delta f$ 내에서 찾아지는 경우, 정상 데이터로 보고 n 과 f_n 을 이용한 선형회귀를 수행하여 장력을 찾는 다음 과정으로 넘어간다.
- 단계 4. Δf_n 이 $f_n^* \pm k\Delta f$ 에서 찾아지는 경우, 비정상 데이터로 보고 오류 메시지를 출력 후 종료한다.

○ 실험 결과

- 실제 케이블에서 측정한 데이터를 활용하여 위 코드의 성능을 검증하였음.
- 현재까지 개발된 코드에서 총 7회의 평균화를 수행하여 주파수 영역 데이터를 계산함을 감안하여, 7,168개($=1024 \times 7$)개의 데이터로 이루어진 데이터셋을 총 13개 만들었음.
- 13개 데이터셋을 아두이노에 입력하고 실제 목표한 f_n 값과 프로그램을 통하여 얻어낸 f_n 값을 서로 비교하여, 이 값이 서로 일치하는가를 비교하였음.
- 데이터는 100Hz의 샘플링주파수(f_s)로 측정되었으며, 1회의 FFT를 수행한 데이터의 수 (nfft)는 1024임. 따라서 주파수 해상도(Δf)는 $100/1024 = 0.098\text{Hz}$ 이며, wingsize를 위한 k 의 크기는 3임. 즉, 찾아낸 f_n 이 $f_n^* \pm 2 \times 0.098(\text{Hz})$ 범위 내에서 발견될 경우 정상으로 판별하며, 그렇지 않을 경우 비정상으로 판별함. 그림 49는 위의 데이터를 FFT하여 얻은 주파수영역 데이터임.

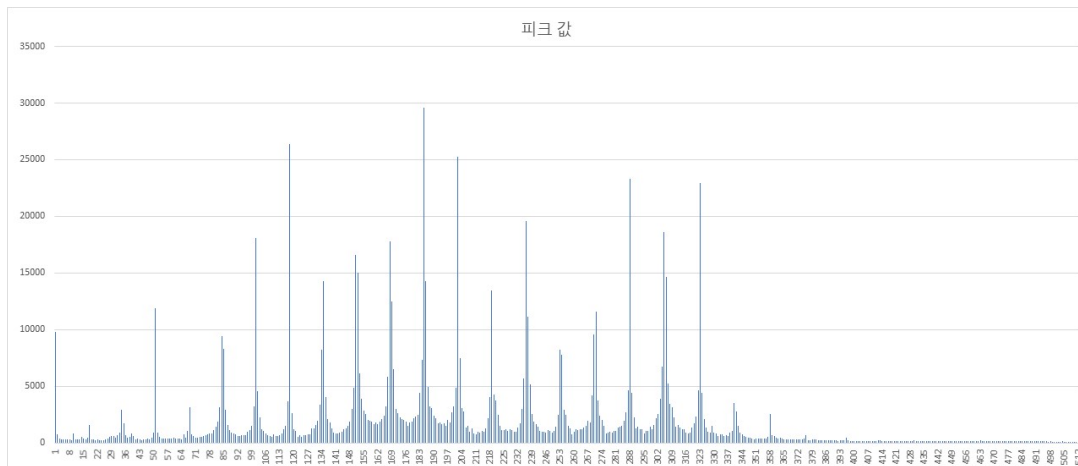


그림 49. 실험에 사용된 데이터의 주파수영역 데이터

- 다음 표는 위의 4가지 단계를 수행하도록 작성된 코드와 그 설명이다.

표 5. 이상상태 판별 코드와 설명

<pre> if(count2 == 0) { myFile = SD.open("acc11.txt"); } else if(count2 == 1) { myFile = SD.open("acc12.txt"); } </pre>	count2 변수 값에 따라 다른 데이터 파일을 불러온다.(다른 input data 1024개를 읽기 위함)
	count_check 값이 0이면(첫 시도일 경우) 미리 입력된 데이터를 가지고 peak를 찾는다. perfect_check 변수는 모든 peak를 잘 찾았을 때만 1이 유지된다.

<pre> if(count_check == 0) { myFile = SD.open("cable3.txt"); j = 0; while (st[j - 1] != '\0') { st[j] = myFile.read(); j++; } Split(st, '\0'); } int perfect_check = 1; </pre>	
<pre> for (int n = 4; n <= modenum + 3; n++) { // f[n] if(count_check == 0) { number = cable_fn[n - 4] * nfft / fs; } else { number = wing_check[n-4]; } Serial.print("목표 fn 위치 : "); Serial.println(number); Serial.print("목표 엑셀 fn 위치 : "); Serial.println(number+1); } </pre>	modenum의 개수만큼 반복을 하면서 count_check값에 따라 찾는 peak 위치를 다르게 입력 후, 첫 시도에만 파일에 있던 내용으로 찾는다.
<pre> if(number != max_num) perfect_check = 0; Serial.print("찾은 fn 위치 : "); Serial.println(max_num); Serial.print("찾은 엑셀 fn 위치 : "); Serial.println(max_num+1); if (max_num == number - wingsize) { Serial.println("side에서 찾음"); } else if(max_num == number + wingsize) { Serial.println("side에서 찾음"); } else { Serial.println("잘 나옴"); } } </pre>	최댓값이라고 찾은 위치가 처음 찾은 peak 위치에서 Wingsize를 더하거나 뺀 위치 ($f_n^* \pm k\Delta f$)에 있을 경우, 이를 Notice합니다.

- 위의 코드를 기반으로 13개 데이터에 대해 이상상태 판별을 수행하였음.
- 일반적으로 실제 케이블에서는 잘 탐지되지 않는 저차모드(1-4차 모드)는 사용하지 않았으며, 5차 모드부터 14차 모드까지 총 10개의 모드를 탐지하도록 하였음.
- 기준값에 변화를 주기 위하여, 7,168개의 데이터로 이루어진 1번 데이터셋에서 처음 1024개만을 뽑아 피크를 찾기 위해 초기에 주어지는 기준 고유진동수(f_n^*)를 찾았음.
- 그리고 이를 기준으로 이용하여 실제 13개 데이터셋에 대해 고유진동수를 찾았으며, 그 결과는 표 6에 정리하였음.
- 결과를 살펴보면, 13개 데이터셋 모두에 대해 기준 고유진동수 부근에서 피크를 찾았으며, 그 결과는 데이터에 따라 9차 모드와 15차 모드에서 미세하게 다르게 나타났음(표 6에서 밑줄로 표시).
- 하지만, 그 변화량은 크지 않았으며, 모든 데이터셋에 대하여 차이는 $(k-1)\Delta f = 0.20Hz$ 이내로서, 모든 결과에 대해 정상적으로 데이터 처리가 수행된 것으로 나타났음. 즉, 100%의 정확도로 자가진단을 수행함을 확인하였음.

- 비록 본 실험에서는 자가진단의 오차가 0%로 나타났으나, 실제 정확한 통계를 위해서는 다양한 환경변수(온도, 습도, 장력 등)를 달리하며 실험을 수행할 필요가 있음.
- 하지만, 그에 따른 정확도의 차이는 크지 않을 것으로 판단되며, 자가진단 알고리즘이 충분히 실제 케이블에 적용될 수 있을 것으로 판단됨.

표 6. 이상상태 탐지 결과

모드 차수(n)		5차 (Hz)	6차 (Hz)	7차 (Hz)	8차 (Hz)	9차 (Hz)	10차 (Hz)	11차 (Hz)	12차 (Hz)	13차 (Hz)	14차 (Hz)	15차 (Hz)
1024개 데이터를 이용한 기준 고유진동수 (f_n^*)		8.11	9.86	11.43	13.18	14.94	16.50	18.26	19.82	21.58	23.15	24.90
탐지한 고유 진동수 (f_n)	1번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	2번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	3번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	4번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	5번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	6번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	7번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	24.71
	8번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>
	9번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>
	10번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>
	11번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>
	12번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	14.75	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>
	13번 데이터셋	8.23	9.86	11.52	13.18	<u>14.84</u>	16.41	18.07	19.73	21.39	23.05	<u>24.80</u>

3) 태양광 기반 에너지 하베스팅 장치 제작

○ 태양광 기반 에너지 하베스팅 시스템 구성

- 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템을 안정적으로 구동하기 위해 태양광 기반의 에너지 하베스팅 시스템을 아래 그림과 같이 구성하였음.
- 태양광 기반의 에너지 하베스팅 시스템에는 태양전지 모듈과 전지를 충전할 수 있는 태양광 컨트롤러, 그리고 태양광 전용 축전지로 이루어져 있음.

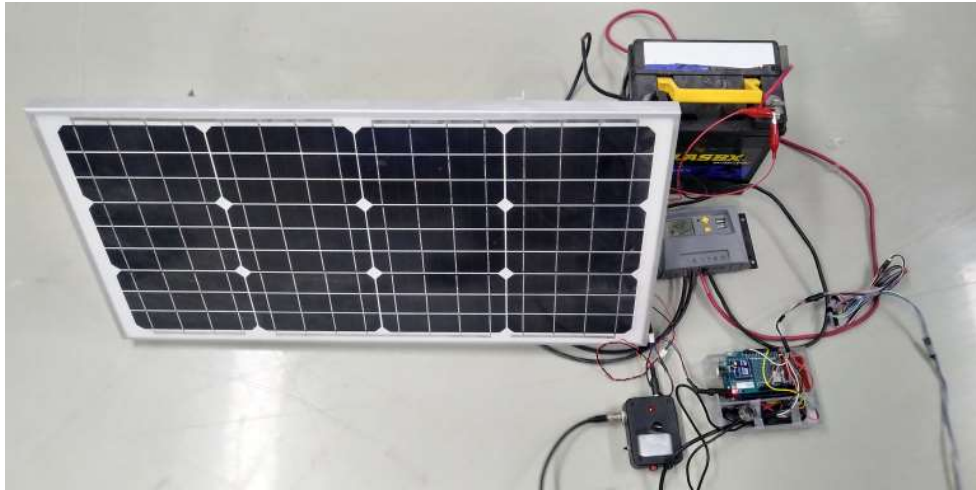


그림 50. 태양광 기반 에너지 하베스팅 시스템

○ 무선센서 기반 일체형 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 소비전력

- 태양광 기반 에너지 하베스팅 시스템을 통해 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템을 안정적으로 구동할 수 있는 여부를 파악하기 위해 개발된 일체형 시스템의 소비전력을 산출하였음.
- 아두이노 메가의 경우, 자체 마이크로프로세서에서 시간당 250mA를 소비하고 아두이노 Wireless Shield는 무선송수신에 따라 60mA에서 많게는 500mA까지 전류를 소비함.
- 태양광 패널로 충전된 전지에서 9V의 전압으로 아두이노 시스템을 구동할 때 시간당 310mA에서 750mA의 전류가 소비되며, 소비전력으로 산출하면 2.79W/h에서 6.75W/h가 소비됨.
- 개발된 일체형 시스템은 실시간으로 작동하는게 아니라 특정 시간 간격으로 한 번씩 작동하거나 케이블의 진동이 기준을 넘었을 때 작동되기 때문에 태양광 기반 에너지 하베스팅 시스템으로 충분히 구동이 가능함.

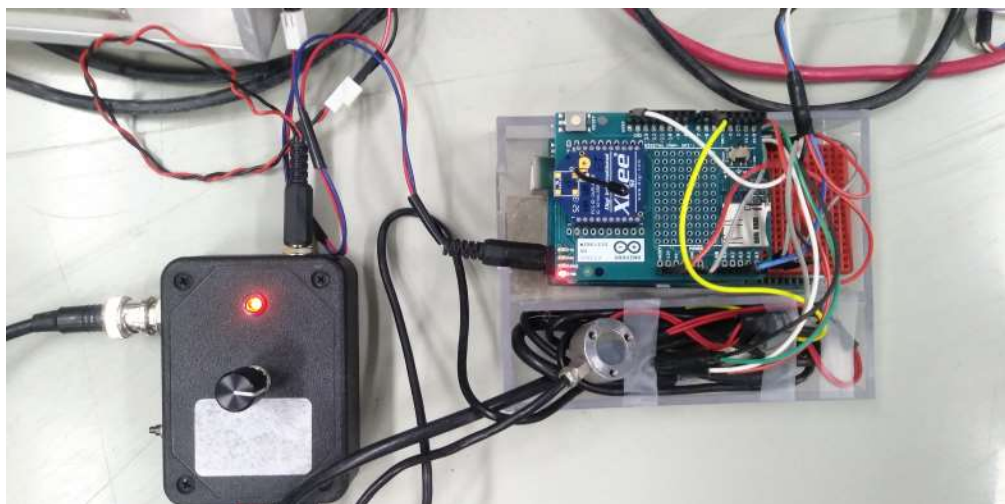


그림 51. 태양광 기반 에너지 하베스팅으로 구동되는 아두이노

(5) 성능평가 실내실험 및 임베디드 소프트웨어 개선

1) 실내 모형 케이블 테스트베드 구성

○ 실내실험을 위한 케이블 재원 및 실험 세팅

- 무선센서 기반 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템의 성능을 평가하기 위해 실내 모형 케이블 테스트베드를 구성하였고, 실내 모형 케이블의 재원은 아래 표와 같음.

표 7. 실내실험을 위한 케이블 재원

Length (m)	Inclined angle (°)	Tension (N)	Mass (kg/m)	Diameter (mm)	Break load (Ton)	Cable type	Natural frequency (Hz)		
							First	Second	Third
6.95	43	379.2	0.314	10	5.46	IWRC	2.5	5.0	7.5

- 길이는 6.95m, 설치 기울기는 43°, 장력은 379.2N(진동법을 통해 계측), 단위 길이 당 질량은 0.314kg/s, 케이블의 지름은 10mm, 고유진동수는 각각 2.5Hz, 5Hz, 7.5Hz, 파괴하중은 5.46Ton인 IWRC형 케이블을 실내실험용 케이블로 설치하였음.
- 무선센서 기반 진동제어 시스템의 성능을 평가하기 위해 아래와 같이 실내 모형 테스트베드를 구성하였음.
- 일체형 케이블 진동제어 시스템은 케이블 하단 끝에서 17% 지점에 위치하며, 케이블에 외부하중을 가하기 위해 Shaker를 케이블의 중앙에 설치하여 3번째 고유진동수(7.5Hz)로 sine wave로 가진 하였음(첫, 두 번째 고유진동수로 가진 하였을 경우, 실험용 케이블의 물리적 한계로 인해 가진이 이루어지지 않았음).

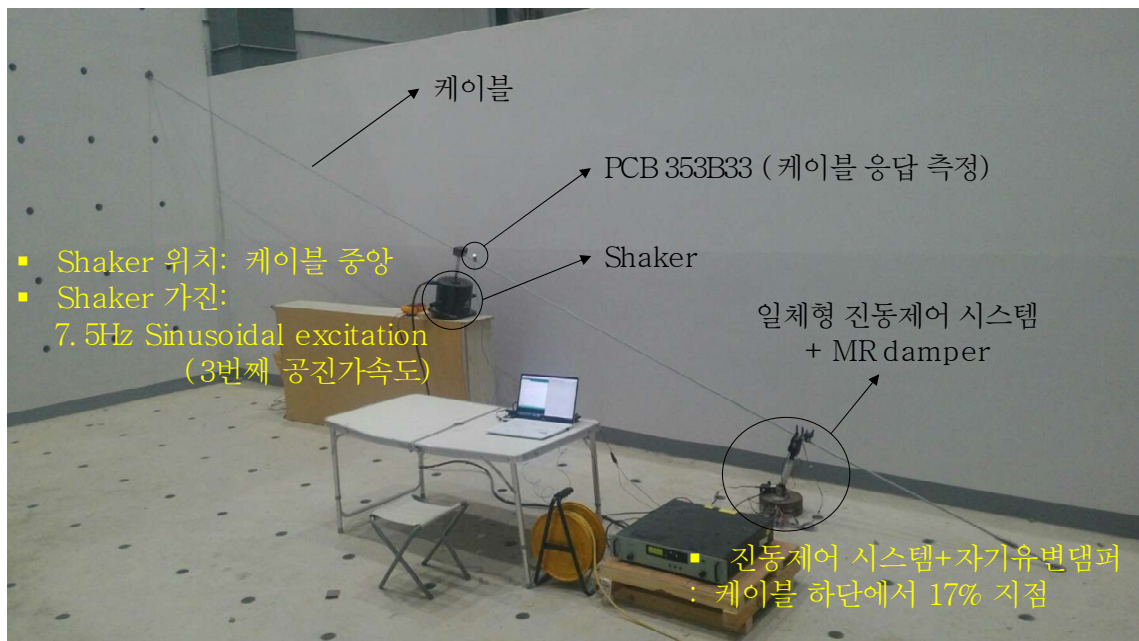


그림 52. 케이블 장력계측 및 진동제어 시스템 성능평가 테스트베드

- 진동제어 시스템의 성능평가를 위해 케이블 중앙에 유선가속도계(PCB 353B33)를 설치하여 진동을 하지 않았을 경우(uncontrolled), 수동제어(passive off와 passive on) 및 진동제어 시스템에 임베디드 된 반 능동제어(semi-active)를 하였을 때의 가속도를 비교하였음.
- 장력계측 시스템의 성능을 평가하기 위한 실내 모형 케이블의 재원은 고유진동수와 그에 따른 장력을 제외하고 진동제어 시스템의 실내 모형과 동일함. 장력계측 시스템의 성능은 케이블의 장력을 변화시킨 후 장력을 모르는 상태에서 유선가속도계로 얻은 가속도로 산출한 고유진동수와 그에 따른 장력값과 비교하여 성능을 검증하였음.

2) 실내실험을 통한 성능평가 및 임베디드 소프트웨어 개선

○ 무선센서 기반 아두이노를 이용한 장력계측용 임베디드 소프트웨어 성능평가

- 실내실험을 통해 아두이노를 이용한 장력계측용 임베디드 소프트웨어의 성능을 평가하면서, 실험을 하면서 생기는 오류를 실시간으로 개선하였음.
- 기준 고유 진동수의 설정을 위해 외부 하중에 따른 케이블의 가속도를 유선가속도계를 이용해 측정한 후, 최소자승법으로 peak과 peak이 위치한 고유 진동수를 도출하였음. 아래 그림은 유선가속도계를 이용해 얻은 외부 하중에 의한 시간에 따른 케이블의 가속도 데이터임.

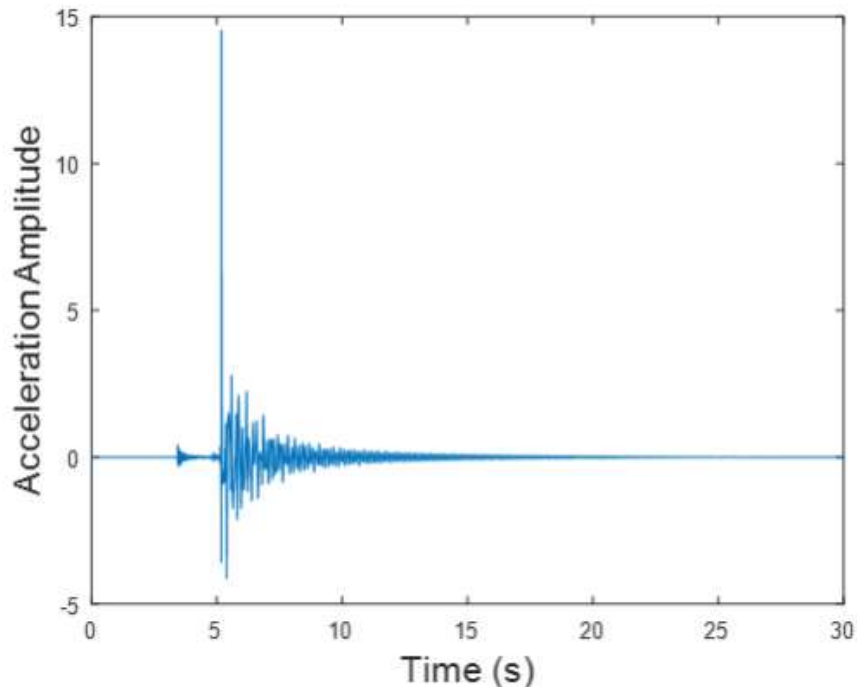


그림 53. 외부 하중에 의한 시간에 따른 케이블 가속도 데이터

- Peak이 있는 고유진동수를 도출한 결과, 3.063Hz, 7.188Hz, 12.060Hz, 17Hz, 22Hz 5개 모드를 도출하였고, 무선센서 기반 아두이노를 이용한 장력계측용 임베디드 소프트웨어의 기준 고유 진동수로 설정하였음.

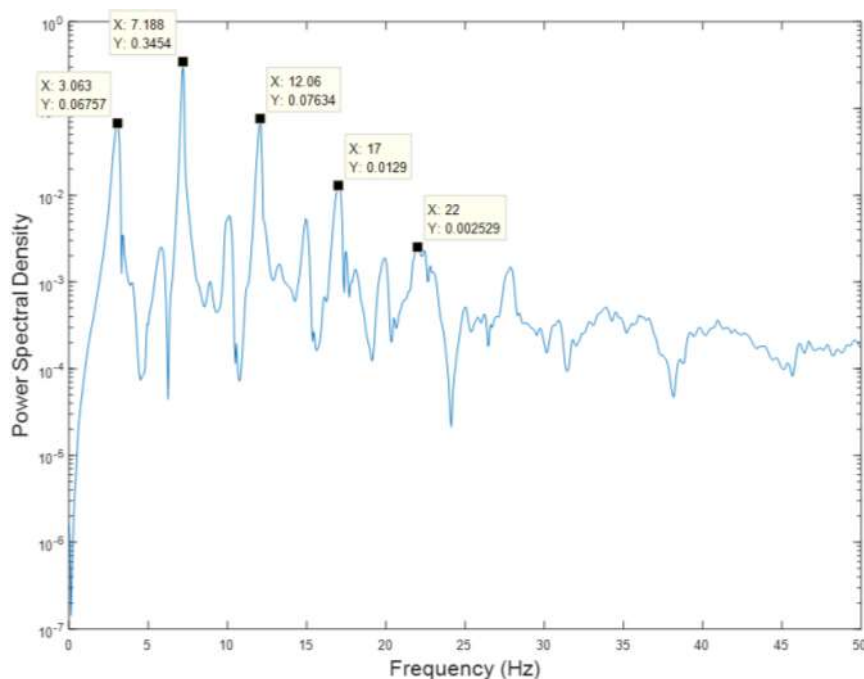


그림 54. 유선가속도계를 이용한 기준 고유진동수

- 위에서 구한 기준 고유진동수와 아래 표의 항목들을 아두이노 기반 장력계측용 임베디드 소프트웨어에 입력하였음.

표 8. 장력계측 임베디드 소프트웨어의 입력값

항목	의미	수치
fs	Sampling rate	100(Hz)
nfft	Number of nfft	1024
wingsize	기준 고유진동수 기준 양 옆 3개의 spectral line 까지 검토	3
mode_num	Mode number	5
average_num	장력계측 반복횟수(2번을 반복하여 장력을 계측한 후 평균값을 산출)	2

- 아래 그래프는 실내 모형 케이블 테스트베드를 대상으로 임펄스 응답을 하중으로 가했을 때 무선센서 기반 아두이노를 이용해 케이블의 가속도를 측정된 후, 장력계측용 임베디드 소프트웨어를 통해 도출한 FFT 결과를 나타낸 것임.

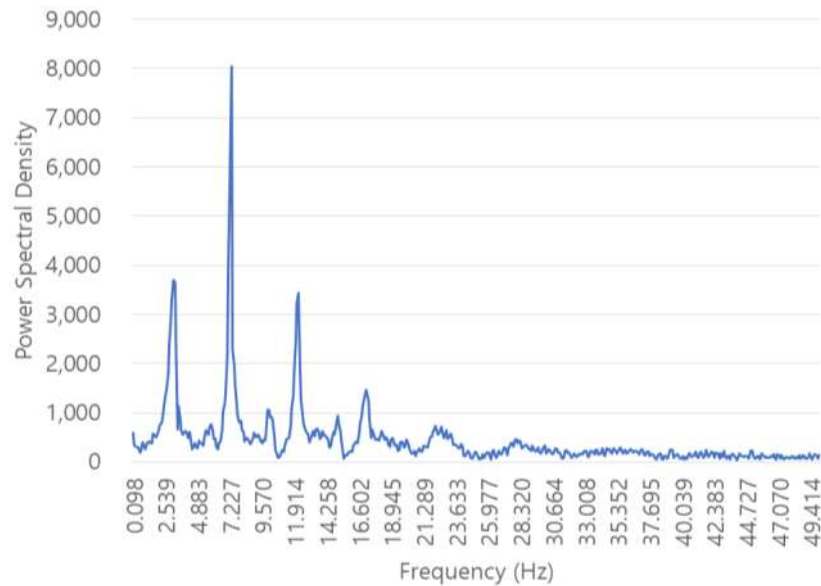


그림 55. 장력계측 소프트웨어를 통해 도출한 FFT 결과

- 아래 표는 도출한 FFT 그래프를 통해 기준 고유진동수 부근(wingsize 크기로 기준점 양 옆)에 위치한 spectral line에서 제일 높은 에너지를 나타내는 spectral line의 위치와 그에 따른 고유진동수를 나타내고 있음. 첫 번째 고유진동수는 3.125Hz이고 5번째 고유진동수는 22.168Hz로 유선가속도계로 도출한 고유진동수와 비슷한 값을 보였음. 유선가속도계와 비교했을 때, 오차는 최대 2.02%에서 최소 0.53%를 보였음.

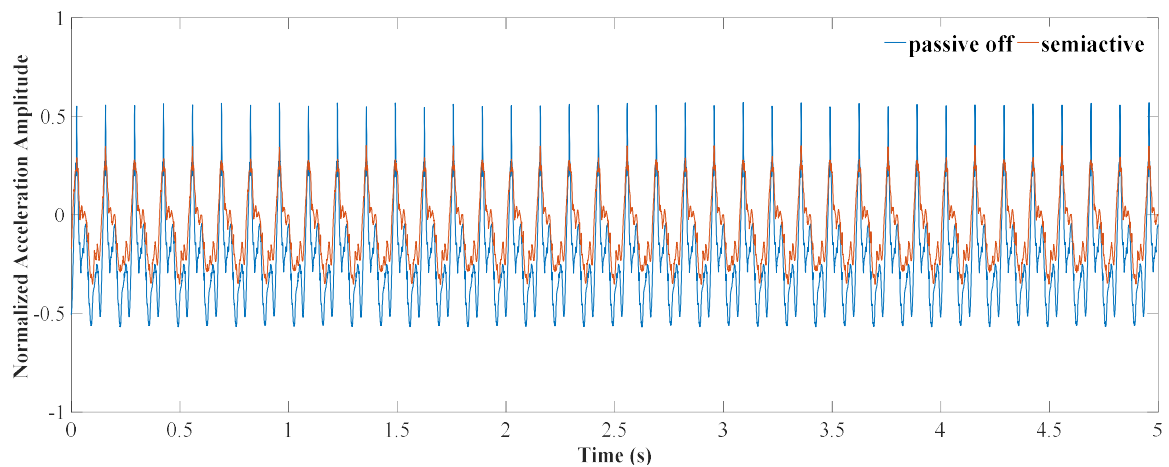
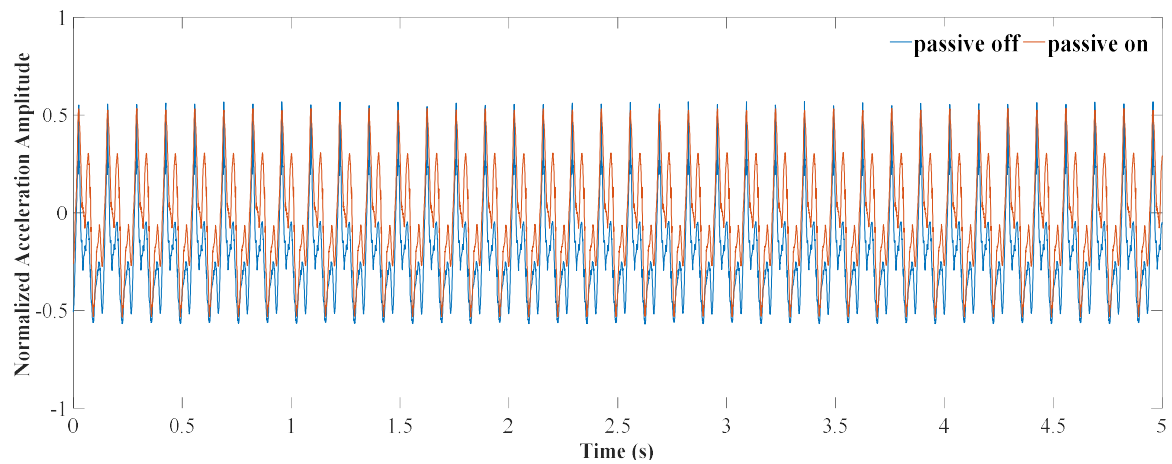
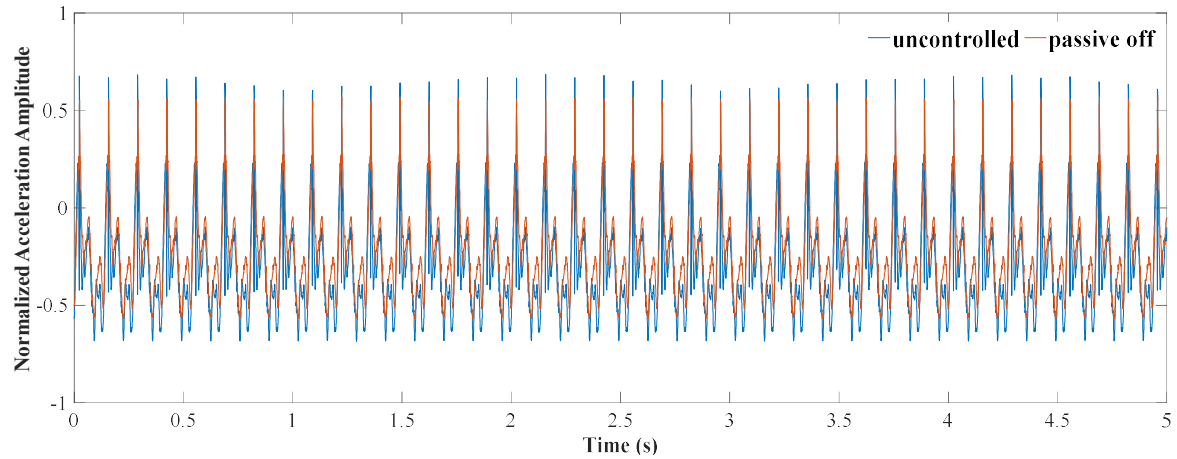
표 9. MEMS형 가속도계와 유선가속도계를 통한 모드수 및 고유진동수 비교

Mode number	Natural frequency (MEMS형 가속도계)	Natural frequency (유선가속도계)	오차(%)
1	3.125	3.063	2.02
2	7.324	7.188	1.89
3	12.207	12.060	1.22
4	17.090	17.000	0.53
5	22.168	22.000	0.76

- 고유진동수와 그에 따른 모드를 바탕으로 선형회귀분석을 통해 도출한 케이블 테스트베드의 장력은 689.05N으로 나타났음.

○ 무선센서 기반 아두이노를 이용한 케이블 진동제어 임베디드 소프트웨어 성능평가

- 실내실험을 통해 아두이노를 이용한 케이블 진동제어 임베디드 소프트웨어의 성능을 평가하면서, 실험을 하면서 생기는 오류를 실시간으로 개선하였음.
- 무선센서 기반 아두이노에 임베디드 된 반 능동제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 제어를 하지 않았을 경우(uncontrolled), 수동제어를 이용하였을 경우(passive off: 입력 전압 0V, passive on: 일정한 입력전압), 그리고 반 능동제어(semi-active)를 이용하였을 경우에 같은 조건의 입력하중(7.5Hz sine wave 가진)에 따른 케이블의 진동(가속도)을 비교하였고, 결과는 아래 그림과 같음.



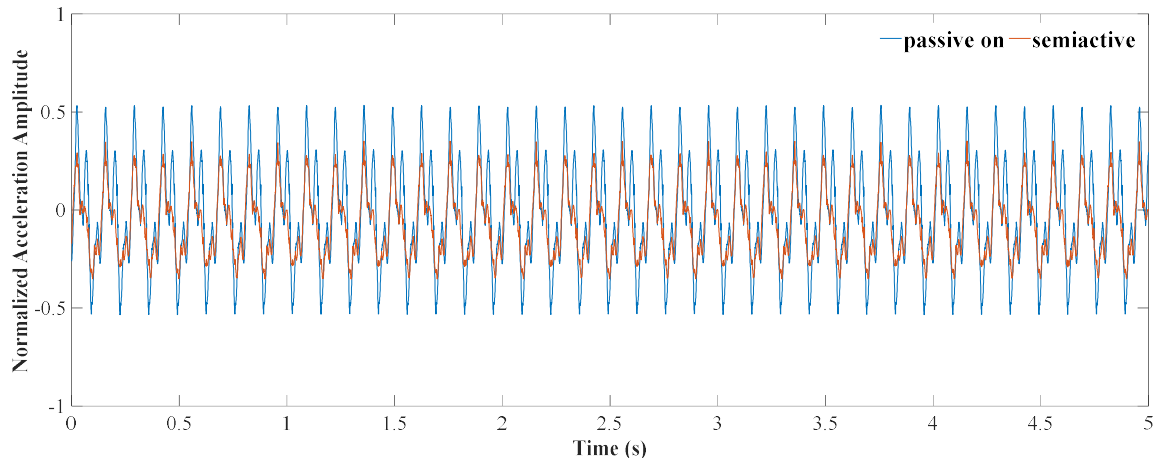


그림 56. 케이블 진동제어에 따른 진동 크기 결과

- 실내실험 결과, 아래 표와 같이 수동제어를 하였을 경우 가속도의 표준편차가 각각 0.2306, 0.2645였고 최고 가속도는 0.5682, 0.5336으로 진동제어를 하지 않았을 때 보다 최대 가속도가 각각 16.86%와 21.02%가 감소하였음.
- 반 능동제어의 경우 진동제어를 하지 않았을 때와 비교했을 때 48.6%의 최대 가속도 감소를 보였고, 수동제어에 비해 월등히 높은 진동제어 능력을 보여주었음.
- 무선센서 기반 일체형 장력계측 및 진동제어 시스템의 성능을 검증할 수 있었으며, 저비용 저전력으로 효과적으로 외부하중에 따른 케이블의 진동을 제어할 수 있음을 확인하였음.

표 10. 진동제어 여부에 따른 실내실험용 케이블의 진동변화

Cases	Standard Deviation	Maximum acceleration(m/s ²)	Control efficacy(%)
Uncontrolled	0.2440	0.6834	/
Passive-off	0.2306	0.5682	16.86
Passive-on	0.2645	0.5336	21.02
Semi-active	0.1731	0.3513	48.60

(6) 후속연구의 방향

○ 케이블 장력계측 자동화

- 케이블의 장력이 변할 수 있는 경우에도 장력을 측정할 수 있는 무선센서 기반 장력계측 자동화 시스템 개발이 필요함.

○ 다양한 제어알고리즘의 적용

- 본 연구과제는 clipped optimal 제어 알고리즘을 이용하였으나, 그 이외의 다른 알고리즘 (bang-bang control, modulated homogeneous friction control 등)의 적용 또한 필요함.

○ 실규모 케이블 실험

- 실험실 규모의 테스트베드 용 케이블을 대상으로 본 연구과제에서 개발한 무선센서 기반 장력계측 및 진동제어 시스템을 검증하였음. 실제 교량의 케이블을 대상으로 장력계측 및 진동제어 시스템의 적용을 위한 후속연구가 필요함.

○ 에너지 사용의 최적화

- 무선센서 기반 아두이노를 이용한 장력계측 및 진동제어 시스템의 에너지 사용의 최적화에 관한 후속연구가 필요함.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

(1) 목표 달성도

- 양적성과 측면에서 목표로 한 최소성과목표는 ‘SCI(E)급 학술지 게재 1건’, ‘특허등록 1건’이었으나, 현재 ‘SCI(E)급 학술지 게재 2건(게재 승인 포함)’, ‘특허출원 1건’을 달성하여 특허등록 1건을 달성하지 못하였음.
- 예기치 못한 연구책임자 변경(전임 연구책임자의 타 학교 전출)으로 인하여 연구진행이 지연된 측면이 있으나, 전임 연구책임자가 설정한 성과지표를 모두 달성하기 위해 연구진들이 성실하게 연구를 수행하였으며, 특허등록을 제외한 나머지 양적성과들을 달성하였음
- 전임 연구책임자가 연구시작 6개월 만에 특허출원을 완료하였으나, 이후 등록이 거절되었음. 전임 연구책임자가 계획하였던 특허등록 달성을 위하여 현 연구진과 특허법인이 긴밀하게 협력하여 보정서를 제출하였으나 최종적으로 등록이 거절되었음.
- 추가적으로 본 연구를 바탕으로 2편의 논문을 작성 중에 있음.

표 11. 최소성과목표 및 목표달성 여부

성과지표	성과목표	최소성과목표	목표달성 여부
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	3건	1건	달성(2건)
일반학술지게재(1점)	-	-	-
특허출원(1점)	-	-	1건
특허등록(2점)	1건	1건	미달성
디자인 등록(1점)	-	-	-
소프트웨어(1점)	-	-	2건
하드웨어(1점)	-	-	-
기타(1점)	-	-	-
소계(점수)	8점	4점	7점

(2) 관련 분야 기여도

- 장대교량의 유지관리에 활용도가 높은 연구로서, 교량 유지관리 주체와의 협력과 기술이전 및 상용화를 진행할 수 있고, 원천기술 확보를 통한 세계시장 선점에 기여할 수 있음.
- 본 연구는 무선센서, 진동계측, 구조제어, 임베디드 프로세싱과 같은 최신기술을 활용하는 연구로, 최신기술을 통한 건설기술의 선진화를 유도하는데 기여할 수 있음.
- 본 연구를 통해 건설과 IT기술의 융합연구를 독려하고 관련 연구인력을 양성할 뿐 아니라, 학생들의 교육 및 연구능력 향상에 기여할 수 있음.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

(1) 연구개발성과의 활용방안

- 기술수요처의 의견을 수렴하고 테스트베드를 제공받아 향후 실제 장대교량의 케이블 제어에 적용할 수 있음
- 개발된 시제품은 각 장대교량의 관리주체 및 건설회사 등의 협조를 얻어 현장에서 추가적인 실험을 수행한 뒤, 그 결과를 바탕으로 관련 전문업체에 기술 이전을 수행함으로써 실구조물에 활용 가능하도록 개발할 예정
- 가장 큰 수요처인 교량관리주체의 지원과 협력을 통하여 추가기술 개발 및 기술이전을 수행함으로써, 미래의 수요를 선형 확보할 수 있음
- 독립적인 일체형 시스템들을 무선으로 연결하여 센서 및 제어 네트워크를 구성함으로써, 교량 전체의 건전성을 평가하고 이 정보를 IoT (Internet of Things) 기반으로 관련주체 기관에 바로 제공하는 통합 모니터링 시스템 개발로 확장될 수 있음

(2) 기대효과

- 기술적 측면
 - 장대교량 케이블의 장력계측과 진동제어를 동시에 수행하는 장치를 최초로 개발함으로써, 원천기술을 확보함
 - 무선센서, 진동계측, 구조제어, 임베디드 프로세싱과 같은 최신키술을 모두 활용하는 연구로서, 최신 기술의 노하우를 축적하여 건설기술의 선진화를 유도할 수 있음
- 경제적·산업적 측면
 - 2000년대 전후로 건설된 다수의 장대교량의 유지관리 수요에 미리 대응하여 시장성을 확보함
 - 장대교량 케이블의 유지관리 기술은 신흥국가뿐만 아니라, 선진국 등에서도 기술수요가 충분하므로, 해외시장에 기술수출이 충분히 가능함
- 사회적 측면
 - 근래 기후변화로 인하여 급증하는 자연재해에 대응하여, 지진, 태풍 등에 의한 장대교량 케이블의 안전성 및 진동문제를 해결하기 위한 수단으로 활용함으로써, 국가 주요 SOC인 장대교량의 안전성을 크게 향상시킬 수 있음
 - 장대교량의 안전성 향상을 통하여 국민의 불안감을 해소하고 및 민원을 감소시킬 수 있음

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

※ 해당사항 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	본 연구과제에서 창출될 논문, 특허, 보고서원문 등을 「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제25조의제13항에 따른 연구성과 분야별 관리·유통 전담기관에 등록 또는 기탁하는데 이의가 없음	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

※ 해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

가. 연구실 안전조치 이행계획

(1) 연구실 안전조치 개요

1) UNIST 연구실 안전관리 항목

순	항 목	적 용 범 위	관련기관	비고
가	연구실 입입안전점검 (매일)	과학기술분야 모든 연구실	연구실사용자	UNIST 연구실 안전환경관리자 UNIST 시설팀 (정): 한지우 운영사 (부): 이동찬
	연구실 정기안전점검 (년 1회)	과학기술분야 모든 연구실	안전진단 전문업체	
	연구실 정밀안전진단 (2년 1회 이상)	유해물질 및 유해인자 취급 연구실 정기점검 결과 추가점검 필요 연구실	안전진단 전문업체	
다	연구활동종사자 안전교육	과학기술분야 연구활동종사자 (학기별 6시간이상)	국가과학기술 인력개발원(KIRD)	
라	연구종사자 건강검진 (매년 실시)	유해물질 취급 연구활동종사자	특수건강 검진기관	
마	연구실 안전공제 (매년 가입)	과학기술분야 연구활동종사자	교육시설 재난공제회	

(2) 항목별 상세계획

1) 연구실 정기 안전점검, 정밀안전진단

○ 대상 연구실

- 과학기술분야 모든 연구실
- 연구개발활동에 「유해화학물질 관리법」 제2조 제7호에 따른 유해화학물질을 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 「산업안전보건법」 제39조에 따른 유해인자를 취급하는 연구실
- 연구개발활동에 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실

■ 연구실 안전교육

○ 교육대상

- 과학기술분야 연구실에 종사하는 연구활동종사자 전원
- 연구실(실험·실습실)을 출입하는 자(대학생, 대학원생, 교수, 연구원)

○ 안전교육 시간

- 학기별 6시간 과학기술분야 전문 교육기관(국가과학기술인력개발원)을 통한 온라인 교육 시행

■ 연구활동종사자 건강검진

○ 검진대상자 및 검진대상 물질

- 산업안전보건법에 따른 유해인자(메탄올외 176종)취급 연구활동종사자

○ 건강검진 종류

- 학생 일반검진
- 유해인자별 건강검진: 특수검진

■ 연구실 안전공제 보험가입

○ 가입대상: 연구활동종사자 중 대학생, 대학원생

- 전임교원: 사학연금(재해보상금)/비전임교원, 연구원: 산재보험

○ 보상범위

- 사망, 후유장해: 1억원 한도
- 상해: 1천만원 한도

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번 호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기 타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Probabilistic Assessment of High-Throughput Wireless Sensor Networks	UNIST	공동 저자	Sensors	IF = 2.964 (2016)	2016.05.31	단독 사사	SCI/인용횟수 =3
2	논문	Integrated cable vibration control system using Arduino	UNIST	주저자	Smart Structures and Systems	IF = 1.382 (2016)	게재 예정	단독 사사	SCI
3	특허	무선센서 기반 케이블 장력 계측 및 진동 제어 장치, 그 방법 및 그 시스템	UNIST	발명자	대한민국		2015.12.24		특허출원
4	S/W 등록	아두이노 기반 케이블 장력계측 프로그램	UNIST	발명자	대한민국		2018.02.07		S/W 등록
5	S/W 등록	아두이노 기반 케이블 진동제어 프로그램	UNIST	발명자	대한민국		2018.02.07		S/W 등록
6	기타	유한요소 모델 기반 가속도-변형률 융합을 통한 교량의 변위 계측	UNIST	공동 저자	대한민국		2015.10.30	단독 사사	국내 학술발표대회 (대한토목학회)
7	기타	무선센서 기반 일체형 진동제어 시스템 개발	UNIST	주저자	대한민국		2016.10.20	단독 사사	국내 학술발표대회 (대한토목학회)
8	기타	Integrated Cable Vibration Control System using Wireless Sensors	UNIST	주저자	미국		2017.03.29	단독 사사	국외 학술발표대회 (SPIE. Smart Structures NDE)
9	기타	일체형 케이블 진동제어 시스템 개발	UNIST	주저자	대한민국		2017.09.19	단독 사사	국내 학술발표대회 (대한토목학회)

제11장. 기타 사항

※ 해당사항 없음

제12장 . 참고 문헌

- [1] 한국건설신문, 2014.07.16.일자 기사 - 국내장대교량 시장규모 6.7조원 예상.
- [2] Cho, S., Yim, J., Shin, S.W., Jung, H-J., Yun, C-B., and Wang, M.L. (2013)“Comparative Field Study of Cable Tension Measurement for Cable-stayed Bridge,”*Journal of Bridge Engineering-ASCE*, 18(8): 748-757.
- [3] 안상섭 (2002) “사장교 케이블용 수동 댐퍼의 설계,” *한국강구조학회지*, 14(2): 76-83.
- [4] 정형조, 장동두 (2011) “스마트 제진장치를 이용한 구조물 내진/제진 기술 개발 사례,” *한국면진제진협회지*, 13: 57-66.
- [5] Cho, S., Lynch, J.P., Lee, J-J., and Yun, C-B. (2010) “Development of an Automated Wireless Tension Force Estimation System for Cable-stayed Bridges,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(1): 361-375.
- [6] Sim, S-H., Li, J., Jo, H., Park, J-W., Cho, S., Spencer, Jr., B.F., and Jung, H-J. (2014) “A Wireless Smart Sensor Network for Automated Monitoring of Cable Tension,” *Smart Materials and Structures*, 23(2): 025006.
- [7] Spencer, Jr., B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D. (1997) “Phenomenological model for magnetorheological dampers,” *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 123(3): 230-238.
- [8] Yang, G., Spencer, Jr., B.F., Carlson, J.D., and Sain, M.K. (2002) “Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations,” *Engineering Structures*, 24(3): 309-323.
- [9] Wang, Y., Swartz, R.A., Lynch, J.P., Law, K.H., Lu, K.C., and Loh, C.H. (2007) “Decentralized civil structural control using real-time wireless sensing and embedded computing,” *Smart Structures and Systems*, 3(3): 321-340.
- [10] Loh, C.H., Lynch, J.P., Lu, K.C., Wang, Y., Chang, C.M., Lin, P.Y., and Yeh, T. H. (2007) “Experimental verification of a wireless sensing and control system for structural control using MR dampers,” *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(10): 1303-1328.
- [11] Li, H. and Huo, L. (2010) “Advances in Structural Control in Civil Engineering in China,” *Mathematical Problems in Engineering*, 2010: Article ID 936081.
- [12] Lynch, J.P., Wang, Y., Swartz, R.A., Lu, K.C., and Loh, C.H. (2008) “Implementation of a closed loop structural control system using wireless sensor networks,” *Structural Control and Health Monitoring*, 15(4): 518-539.
- [13] Swartz, R.A., and Lynch, J.P. (2009) “Strategic network utilization in a wireless structural control system for seismically excited structures,” *Journal of structural engineering*, 135(5): 597-608.
- [14] Jung, H.J., Kim, I.H., and Koo, J.H. (2011) “A multi-functional cable-damper system for vibration mitigation, tension estimation and energy harvesting,” 7(5): 379-392.
- [15] Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G., Bergman, L.A., and Hague, S. (2003) “Phase benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges,” *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 129(7):857-872.
- [16] Ok, S. Y., Kim, D. S., Park, K. S., & Koh, H. M. (2007). Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers. *Engineering structures*, 29(5), 776-788.
- [17] 허광희, 김충길, 안의중 (2012) “무선센서 네트워크를 이용한 실시간 Feedback 진동제어 시스템 개발,” *한국구조물진단유지관리공학회 논문집*, 16(3): 60-66.
- [18] Shimada, T. (1994) “Estimating method of cable tension from natural frequency of high mode.” *Proc. JSCE*, 501 (1 - 29): 163 - 171 (in Japanese).
- [19] Zui, H., Shinke, T., and Namita, Y. (1996) “Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method.” *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 122(6):651-656.
- [20] 배용호 외 (2008) “포트폴리오 분석을 통한 국가연구개발사업 투자방향 설정,” *과학기술정책*,

- [21] Irvine, H. M. (1981), *Cable structures*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- [22] Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on audio and electroacoustics*, 15(2), 70–73.
- [23] Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1998). An experimental study of MR dampers for seismic protection. *Smart materials and structures*, 7(5), 693.
- [24] Sakai, C., Ohmori, H., & Sano, A. (2003, December). Modeling of MR damper with hysteresis for adaptive vibration control. In *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on* (Vol. 4, pp. 3840–3845). IEEE.
- [25] Chen, Z. Q., Wang, X. Y., Ko, J. M., Ni, Y. Q., Spencer, B. F., Yang, G., & Liu, S. C. (2003, March). MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge. In *Proc. SPIE* (Vol. 5057, pp. 229–235).
- [26] Wu, W. J., Cai, C. S., & Chen, S. R. (2004). Experiments on reduction of cable vibration using MR dampers. In *Proceedings of 17th ASCE Engineering Mechanics Conference*.
- [27] Maślanka, M., Sapiński, B., & Snamina, J. (2007). Experimental study of vibration control of a cable with an attached MR damper. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 45(4), 893–917.
- [28] Sun, Z., Dyke, S. J., Pena, F., & Wilbee, A. (2015, March). Development of Arduino based wireless control system. In *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (pp. 94351D–94351D). International Society for Optics and Photonics.
- [29] Wu, W. J., & Cai, C. S. (2006), “Experimental study of magnetorheological dampers and application to cable vibration control”, *Journal of Vibration and Control*, 12(1), 67–82.
- [30] Johnson, E. A., Baker, G. A., Spencer Jr, B. F., & Fujino, Y. (2000, March), “Mitigating stay cable oscillation using semiactive damping”, In *Proceedings of SPIE– The International Society for Optical Engineering*, 3988, 207–216.
- [31] Dyke, S. J., Spencer Jr, B. F., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1996), “Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction”, *Smart materials and structures*, 5(5), 565.

제13장. 부록

1) 케이블 장력계측 아두이노 코드

```
#include <SPI.h>
#include <MsTimer2.h>
#include <FFT.h>
#include <SD.h>

int count2 = 0;
char starting;
int i = 0;
int j = 0;
static int zAcc[2048];
char val[20];
char st[350];
float v;
int acc;
double peak, n1, n2;
static int modenum = 0;
static int cable_num = 1;
double fs = 100;
double nfft = 1024;
double tension;
int wingsize = 3;
double fn[5];
int mode_num[5];
double cable_fn[5];
int fft_result[512];
static double reg[2];
double average_num = 2;
File myFile;
File file;
int check_time = 0;
int count = 0;
void setup() {

    Serial.begin(9600);

    for(int i=0;i<512;i++) {
        fft_result[i] = 0;
    }

    for(int i=0;i<5;i++) {
        mode_num[i] = 0;
        cable_fn[i] = 0;
    }
}
```

```

while ( !Serial ) {
    true;
}

MsTimer2::set(10, TimerISR);

Serial.print("Initializing SD card...");

pinMode(10, OUTPUT);

if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    return;
}

Serial.println("initialization done.");
}

void loop() {

    while (Serial.available()) {
        delay(1000);
        MsTimer2::start();
        delay(3000);
        if ( i == 1024 ) {
            myFile.close();
            count2++;
            fftcomplex(zAcc - 1 , 1024 , -1); // fft
            delay(1000);

            for(j = 0; j<512;j++) {
                double n1;
                double n2;
                n1 = zAcc[j*2] / average_num;
                n2 = zAcc[j*2+1] / average_num;
                double nn12 = n1 * n1 + n2 * n2;
                nn12 = sqrt(nn12);
                fft_result[j] += nn12;
            }
            i=0;
            Serial.println("");

            if(count2 >= average_num) {
                for(j = 0; j<512;j++) {
                    zAcc[j] = fft_result[j];
                    zAcc[j] = abs(zAcc[j]);
                    Serial.print(zAcc[j]);
                    Serial.println("");
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    myFile = SD.open("cable.txt");
    j = 0;
    while (st[j - 1] != '\r') {
        st[j] = myFile.read();
        j++;
    }
    Split(st, '\t');
    for (int n = 0; n <= modenum-1; n++) { // f[n] 값들 출력
        int number = cable_fn[n] * nfft / fs;
        int max_value = zAcc[number];
        max_value = abs(max_value);
        int max_num = number;

        for (int r = number - wingsize; r <= number + wingsize; r++) {
            int Fn = zAcc[r];
            if (max_value < Fn) {
                max_value = Fn;
                max_num = r;
            }

        }
        Serial.println(max_num+1);
        fn[n] = fs / nfft * (max_num+1);

        mode_num[n] = n+1;
        Serial.println("Value of fn");
        Serial.println(fn[n]);
    }
    tension = calculate_tension(0.000314, 6.95, fn, mode_num, modenum);
    myFile.close();

    Serial.println("Value of reg[1]");
    Serial.println(reg[1]);

    Serial.println("Tension(N)");
    Serial.println(tension*9.80665*1000);

    Serial.println("");
    i = 1025;

}
}
}
}

void TimerISR() {
    if (i < 1024) {

```

```

j = 0;
int data = analogRead(2);
zAcc[i * 2] = 0; // 짝수항은 0
zAcc[i * 2 + 1] = data; // 홀수항은 가속도 데이터.

Serial.print(zAcc[i * 2]);
Serial.print(" ");
Serial.print(zAcc[i * 2 + 1]);
Serial.println("");
i = i + 1;
if (i == 1024) {
    MsTimer2::stop();
}
}
}

void Split(String sData, char cSeparator)
{
    int nCount = 0;
    int nGetIndex = 0 ;
    int x = 1;
    modenum = 0;
    String sTemp = "";

    String sCopy = sData;

    while (true)
    {
        nGetIndex = sCopy.indexOf(cSeparator);
        if (-1 != nGetIndex)
        {
            sTemp = sCopy.substring(0, nGetIndex);
            sCopy = sCopy.substring(nGetIndex + 1);
            if (x >= 3 && x % 2 == 1) {
                modenum = modenum + 1;
            }
            if (x >= 3 && x % 2 == 0) {
                char doublebuf[32];
                sTemp.toCharArray(doublebuf, sizeof(doublebuf));
                cable_fn[x - 2 - x / 2] = atof(doublebuf);
            }
            x = x + 1;
        }
        else
        {
            char doublebuf[32];
            sCopy.toCharArray(doublebuf, sizeof(doublebuf));
            cable_fn[x - 2 - x / 2] = atof(doublebuf);

```

```

        break;
    }

    ++nCount;
}
}

double calculate_tension(double cable_mass, double cable_length, double fn[], int
mode_num[], int nmodes)
{
    if (nmodes < 2)
    {
        return 0.0;
    }

    double xv[nmodes];
    double yv[nmodes];

    for (int i = 0; i < nmodes; i++)
    {
        xv[i] = (double)mode_num[i] * mode_num[i];
        yv[i] = fn[i] * fn[i] / xv[i];
    }
    linearRegression(xv, yv, nmodes);
    return 4.0 * cable_mass * cable_length * cable_length * reg[1] / 9.80665;
}

void linearRegression(double x[], double y[], int n)
{
    int i;
    double mean_x = 0, mean_y = 0, mean_xy = 0, mean_x2 = 0;

    for (i = 0; i < n; i++)
    {
        mean_x = mean_x + x[i];
        mean_y = mean_y + y[i];
        mean_xy = mean_xy + x[i] * y[i];
        mean_x2 = mean_x2 + x[i] * x[i];
    }
    reg[0] = (n * mean_xy - mean_x * mean_y) / (n * mean_x2 - mean_x * mean_x);
    reg[1] = mean_y / n - reg[0] * mean_x / n;
}

```

2) 케이블 반 능동(semi-active) 진동제어 아두이노 코드

```
#include <stdio.h>
#include <MsTimer2.h>

float ReadingA_Strain1 = 509.0;
float LoadA_Strain1 = 1.4; // (Kg,lbs..)
float ReadingB_Strain1 = 515.0;
float LoadB_Strain1 = 3.1; // (Kg,lbs..)

#define ADD 1
#define SUB 2
#define MUL 3
#define DIV 4

struct MATRixa{
    double** value;
    int x;
    int y;
};
typedef struct MATRixa Matrixa;

Matrixa* Construct(int, int);
void Destruct(Matrixa*);
void Print(Matrixa*);

Matrixa* Transpose(Matrixa*);
Matrixa* ScalaCalc(Matrixa*, double, int);
Matrixa* MatrixCalc(Matrixa*, Matrixa*, int);

Matrixa* Construct(int x, int y)
{
    Matrixa* matrix;
    int i, j;

    matrix = (Matrixa*)malloc(sizeof(Matrixa));
    matrix->x = x;
    matrix->y = y;
    matrix->value = (double**)malloc(sizeof(double*) *x);
    for(i=0; i<x; i++)
    {
        matrix->value[i] = (double*)malloc(sizeof(double) *y);
        memset(matrix->value[i], 0, sizeof(double) *y);
    }
    /*
        for(j=0; j<y; j++)
            matrix->value[i][j] = 0;
    */
}
```

```

    return matrix;
}

void Destruct(Matrixa* matrix) {
    int i;
    if(matrix==NULL)
        return;
    for(i=0; i<matrix->x; i++)
        free(matrix->value[i]);
    free(matrix->value);
    free(matrix);
    matrix = NULL;
}

Matrixa* Transpose(Matrixa* ori) {
    if(ori==NULL)
        Serial.println("NULL MATRIX");

    Matrixa* matrix;
    int i, j;
    matrix = Construct(ori->y, ori->x);
    for(i=0; i<ori->x; i++) for(j=0; j<ori->y; j++) matrix->value[j][i] = ori->value[i][j];

    return matrix;
}

Matrixa* ScalaCalc(Matrixa* m1, double val, int type) {
    if(m1==NULL)
        Serial.println("NULL MATRIX");

    int i, j;
    Matrixa* matrix;
    matrix = Construct(m1->x, m1->y);
    switch(type) {
case MUL:
        for(i=0; i<matrix->x; i++) for(j=0; j<matrix->y; j++) matrix->value[i][j] = m1->value[i][j] *
val;
        break;
case DIV:
        for(i=0; i<matrix->x; i++) for(j=0; j<matrix->y; j++) matrix->value[i][j] = m1->value[i][j] /
val;
        break;
    }

    return matrix;
}

```

```

Matrixa* ScalaCalc2(double val, Matrixa* m1, int type) {
    if(m1==NULL)
        Serial.println("NULL MATRIX");
    int i, j;
    Matrixa* matrix;
    matrix = Construct(m1->x, m1->y);
    switch(type) {
case MUL:
        for(i=0; i<m1->x; i++) for(j=0; j<m1->y; j++) matrix->value[i][j] = val *
m1->value[i][j];
        break;
case DIV:
        for(i=0; i<m1->x; i++) for(j=0; j<m1->y; j++) matrix->value[i][j] = val /
m1->value[i][j];
        break;
    }

    return matrix;
}

Matrixa* MatrixCalc(Matrixa* m1, Matrixa* m2, int type) {
    if(m1==NULL||m2==NULL)
        Serial.println("NULL MATRIX");
    int i, j, k;
    Matrixa* matrix=NULL;
    switch(type) {
case ADD:
        matrix = Construct(m1->x, m1->y);
        for(i=0; i<m1->x; i++) for(j=0; j<m1->y; j++) matrix->value[i][j] = m1->value[i][j] +
m2->value[i][j];
        break;
case SUB:
        matrix = Construct(m1->x, m1->y);
        for(i=0; i<m1->x; i++) for(j=0; j<m1->y; j++) matrix->value[i][j] = m1->value[i][j] -
m2->value[i][j];
        break;
case MUL:
        matrix = Construct(m1->x, m2->y);
        for(i=0; i<m1->x; i++) for(j=0; j<m2->y; j++) for(k=0; k<m1->y; k++) matrix->value[i][j]
+= m1->value[i][k] * m2->value[k][j];
        break;
    }

    return matrix;
}

void Print(Matrixa* matrix) {
    if(matrix==NULL)
    {

```

```

    Serial.print("NULL");
}
int i, j;

for(i=0; i<matrix->x; i++) {
    for(j=0; j<matrix->y; j++)
        Serial.print(matrix->value[i][j], 4);
    Serial.print("\t");
}
// Serial.print();
}

float readAcc(int port)
{

    int value=analogRead(port); // reads the value returned by AD converter
    int miliVolts=map(value,0,1023,0,3300)-3300/2; // transforms read value in mV
    float acc=(float)miliVolts/360-0.9167; // ADXL335 generates a 360mV/g

    return acc;
}

float load()
{
    float newReading_Strain1 = analogRead(0); // analog in 0 for Strain 1
    float load_Strain1 = ((LoadB_Strain1 - LoadA_Strain1)/(ReadingB_Strain1 - ReadingA_Strain1)) * (newReading_Strain1 - ReadingA_Strain1) + LoadA_Strain1;

    return load_Strain1;
}

// Global variable
int ndof = 2, fc = 5;
float rn = 1e-10,qn = 1e-2, fs = 15.15, pi = 3.141592, pi2 = pi*pi, T = 379.2, pi2T = pi2*T;
Matrixa *temp1=NULL;
Matrixa *temp2=NULL;
Matrixa *temp3=NULL;
Matrixa *temp4=NULL;
Matrixa *temp5=NULL;
Matrixa *temp6=NULL;
Matrixa *Klqr = NULL;
Matrixa *Rn = NULL;
Matrixa *R = NULL;
Matrixa *Qn = NULL;
Matrixa *Q = NULL;
Matrixa *A = NULL;
Matrixa *At = NULL;
Matrixa *H = NULL;

```

```

Matrixa *Ht = NULL;
Matrixa *phi = NULL;
Matrixa *G1 = NULL;
Matrixa *G1t = NULL;
Matrixa *G1QG1t = NULL;
Matrixa *P = NULL;
Matrixa *Pp = NULL;
Matrixa *acc = NULL;
Matrixa *K = NULL;
Matrixa *qe1 = NULL;
Matrixa *qe = NULL; // xe = zeros(2*ndof, 1)
Matrixa *qep = NULL;
//Matrixa *x = NULL;
Matrixa *Fcc = NULL;
Matrixa *Fc = NULL;
Matrixa *F = NULL;

// Control gain (LQR)
float Klqr1[1][2] = {0.00393403718238711, 0.950589655577445};
float R1[1][1] = {rn};
float a[2][2] = {{0.0975442519810541, 0.0413665495040852},
{-22.2043825058633, 0.0898906552496816}};
float at[2][2] = {{0.0975442519810541, -22.2043825058633},
{0.0413665495040852, 0.0898906552496816}};
float H1[1][2] = {-498.268125740107, -0.898171667513690};
float H1t[2][1] = {{-498.268125740107}, {-0.898171667513690}};
float phi1[2][1] = { { 1.000 }, {0} };
float G11[2][1] = { { 0 }, {-1} };
float G11t[1][2] = { 0, -1 };
float G11Q1G11t[2][2] = {{0, 0},
{0, 0.0006601}};
float P2[2][2] = {{2.04783104361742e-8, 2.75670741786427e-9},
{2.75670741786427e-9, 7.42523732854059e-10}};

void MatrixaAssaignment()
{
    // Control gain (LQR)
    Klqr = Construct(1,2); // - Klqr (-Klqr1)
    H = Construct(1,2);
    G1t = Construct(1,2);
    qe1 = Construct(1,2);
    for (int i = 0; i<1; i++)
        for (int j = 0; j<2; j++)
        {
            Klqr->value[i][j]=-Klqr1[i][j];
            H->value[i][j]=H1[i][j];
            G1t->value[i][j]=G11t[i][j];
            qe1->value[i][j]=0;
        }
}

```

```

// Noise
Rn = Construct(1,1);
Fcc = Construct(1,1);
Fc = Construct(1,1);
F = Construct(1,1);
for (int i = 0; i<1; i++)
    for (int j = 0; j<1; j++)
    {
        Rn->value[i][j]=R1[i][j];
        Fcc->value[i][j]=0;
        Fc->value[i][j]=0;
        F->value[i][j]=0;
    }

// System matrix and others for kalman estimator (discrete form)
A = Construct(2,2);
At = Construct(2,2);
G1QG1t = Construct(2,2);
P = Construct(2,2);
for (int i = 0; i<2; i++)
    for (int j = 0; j<2; j++)
    {
        A->value[i][j]=a[i][j];
        At->value[i][j]=at[i][j];
        G1QG1t->value[i][j]=G11Q1G11t[i][j];
        P->value[i][j]=P2[i][j];
    }

Ht = Construct(2,1);
phi = Construct(2,1);
G1 = Construct(2,1);
qe = Construct(2,1);
for (int i = 0; i<2; i++)
    for (int j = 0; j<1; j++)
    {
        Ht->value[i][j]=H1t[i][j];
        phi->value[i][j]=phi1[i][j];
        G1->value[i][j]=G11[i][j];
        qe->value[i][j]=0;
    }
R = ScalaCalc(Rn, fs, DIV);
}

int controlVoltage = 6;

void setup()
{
    // put your setup code here, to run once:

```

```

Serial.begin(250000);
//eAnalogReference(EXTERNAL); // DUE 용 (가속도)
analogReference(EXTERNAL); // MEGA, UNO 용 (가속도)
MatrixaAssaignment();
//Timer.getAvailable().attachInterrupt(kalman).setFrequency(10).start(); //call a function
100 times a second (100HZ)
MsTimer2::set(66, kalman); // 66 - 15.15HZ
MsTimer2::start();

pinMode(controlVoltage, OUTPUT);
}

void loop()
{

}

void kalman()
{
    long time1 = millis();
    Serial.print(time1);
    Serial.print(" ");

    ///// Time update
    // qep = A*qe;
    Destruct(qep);
    qep = MatrixCalc(A, qe, MUL); // A*qe;

    // Pp = A*P*A' + G1*Q*G1'
    Destruct(temp1);
    temp1 = MatrixCalc(A, P, MUL); // A*P
    Destruct(temp2);
    temp2 = MatrixCalc(temp1, At, MUL); // A*P*A'
    Destruct(Pp);
    Pp = MatrixCalc(temp2, G1QG1t, ADD); // Pp = A*P*A' + G1*Q*G1'

    // K = Pp*H'/(H*Pp*H'+R)
    Destruct(temp1);
    temp1 = MatrixCalc(H, Pp, MUL); // H*Pp
    Destruct(temp2);
    temp2 = MatrixCalc(temp1, Ht, MUL); // H*Pp*H'
    Destruct(temp3);
    temp3 = MatrixCalc(temp2, R, ADD); // H*Pp*H' + R
    Destruct(temp4);
    temp4 = ScalaCalc2(1, temp3, DIV); // 1/H*Pp*H' + R
    Destruct(temp5);
    temp5 = MatrixCalc(Pp, Ht, MUL); // Pp*H'
    Destruct(K);
    K = MatrixCalc(temp5, temp4, MUL); // K = Pp*H'/(H*Pp*H'+R)

```

```

///// Measurement update
// qe = qep + K*(ddx(st) - H*qep)
Destruct(temp1);
temp1 = MatrixCalc(H, qep, MUL); // H*qep
Destruct(acc); // acceleration at damper location
acc = Construct(1,1);
acc->value[0][0]= readAcc(2);
// Serial.print("Measured acc = ");
//Serial.print("acc: ");
Print(acc);
Destruct(temp2);
temp2 = MatrixCalc(acc, temp1, SUB); // ddx(st) - H*qep
Destruct(temp3);
temp3 = MatrixCalc(K, temp2, MUL); // K*(ddx(st) - H*qep)
Destruct(qe);
qe = MatrixCalc(qep, temp3, ADD); // qe = qep + K*(ddx(st)-H*xep)
//Serial.print("qe: ");
//Print(qe);

// P = Pp - K*H*Pp
Destruct(temp1);
temp1 = MatrixCalc(K, H, MUL); // K*H
Destruct(temp2);
temp2 = MatrixCalc(temp1, Pp, MUL); // K*H*Pp
Destruct(P);
P = MatrixCalc(Pp, temp2, SUB); // Pp - K*H*Pp
//Serial.print("P: ");
//Print(P);

//Desired control force
Destruct(Fc);
Fc = MatrixCalc(Klqr, qe, MUL); // -Klqr*qe
Destruct(Fcc);
Fcc = ScalaCalc(Fc, pi2T, MUL); // Fd*pi^2*T
//Serial.print("Fcc: ");
Print(Fcc);

///// output - Controlled displacement
Destruct(qe1);
qe1 = Transpose(qe); // qe = qe';

///// output - clipped optimal
Destruct(F); // Force measured at damper (force generated by the MR Damper,
measured force using load cell)
F = Construct(1,1);
F->value[0][0] = load()*9.8-157.7; //
Print(F);

```

```

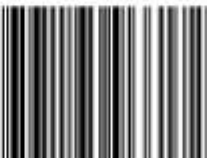
if (F->value[0][0] > 0 && Fcc->value[0][0] > 0)
{
    if (Fcc->value[0][0] >= F->value[0][0])
    {
        analogWrite(controlVoltage, 80);
        Serial.println("5");
    }
    else
    {
        analogWrite(controlVoltage, 0);
        Serial.println("0");
    }
}

else if (F->value[0][0] < 0 && Fcc->value[0][0] < 0)
{
    if (F->value[0][0] > Fcc->value[0][0])
    {
        analogWrite(controlVoltage, 80);
        Serial.println("5");
    }
    else
    {
        analogWrite(controlVoltage, 0);
        Serial.println("0");
    }
}
else
{
    analogWrite(controlVoltage, 0);
    Serial.println("0");
}
}

```

비매품/ 무료

93530



9 791195 966172

ISBN 979-11-959661-7-2