제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 "IT기반 스마트 교량내진장치 개발에 관한 연구"과제의 보고서로 제출합니다.

2011. 12. 27

주관연구기관명 : 건국대학교
주관연구책임자 : 하 동 호
연 구 원 : 추 프랑솨
〃 : 박 관 순
〃 : 박 장 호
협동연구기관명 : 부산대학교
협동연구책임자 : 김 남 식
위탁연구기관명 : 부경대학교
위탁연구책임자 : 신 성 우

보고서 요약서

<table>
<tr><td rowspan="2">과제고유번호</td><td>10CCTI-C
054254-02</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2009.12.28.~
2011.12.27.</td><td>단 계 구 분</td><td>2단계</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5">건설기술혁신사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="5">IT기반 스마트 교량내진장치 개발</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">하동호</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 30명
내부 : 명
외부 : 명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부 : 298,000천원
기업 : 105,000천원
계 : 403,000천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 31명
내부 : 명
외부 : 명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부 : 613,000천원
기업 : 210,000천원
계 : 823,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">건국대학교</td><td>참여기업명</td><td colspan="3">(주)케이이엔씨
(주)에스코알티에스</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="3">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명 : 부경대학교 연구책임자 : 신성우</td></tr>
<tr><td colspan="5">요 약</td><td>보고서면수</td><td>275</td></tr>
<tr><td colspan="7">자료수집, 모델정립, 초기의 개별모형실험, 모형실험에 의한 제품개발 완료
(1) 스마트 복합감쇠기 개발
- 감쇠기 관련 자료수집, 개선된 장치의 고안, 모형제작, 특성실험 실시
- 지진시 구조물을 보호할 수 있는 감쇠기와 상시 및 지진시의 거동을 계측하고 모니터링 하는 All-in-1 타입의 시스템 개발
(2) IT기반 받침형 내진장치 개발
- 국내외 문헌조사를 통한 IT기반 받침형 내진장치의 개념 확립
- FBG/PZT센서를 기반으로 하는 받침형 내진장치의 설계 및 제작
- 받침형 내진장치의 성능검증 시험 수행</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어</td><td>한 글</td><td colspan="6">스마트내진장치, 스마트교량받침, 모니터링, FBG센서, PZT센서</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="6">smart seismic devices, smart seismic bearing, monitoring, FBG sensor, PZT sensor</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

IT기반 스마트 교량내진장치 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

구조물의 원격모니터링과 안전제어가 가능한 IT기반 스마트 내진장치의 개발 및 성능시험기준 정립

구조물의 상시 모니터링과 지진시의 응답 및 손상을 계측하고 이를 통한 구조물의 안전성과 신뢰성향상이 필요. IT기술의 접목을 통하여 시공단계 및 공용중인 교량의 응답을 모니터링 할 수 있는 스마트 내진장치의 개발하여 향후 증가될 내진보강시장에서의 경쟁력 확보. 증가하는 노후교량의 안전대책과 구조물 장수명화에 기여함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

자료수집, 모델정립, 시제품실험, 기준제시

(1) 스마트 복합감쇠기 개발

- 댐퍼, 센서 및 무선통신을 병합한 스마트 댐퍼 개발
- 상시와 지진시 모니터링 가능한 장치개발
- 개발된 장치의 성능 검증
- 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축

(2) IT기반 받침형 내진장치 개발

- 기존내진받침에 FBG센서를 결합하여 정착방법과 이에 따른 모니터링 시스템 개발
- 상시와 지진시 모니터링 가능한 시스템개발 (대변형 수용할 수 있는 시스템)
- 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축

(3) 압전센서를 이용한 모니터링 시스템 구축

- 신개념의 센싱장비를 이용하여 상시 모니터링 시스템에 대한 활용가능성 모색 및 개발
- 상시 모니터링 가능한 시스템 개발 (평상시 및 지진 후 받침의 거동을 평가할 수 있는 데이터베이스 구축)

Ⅳ. 연구개발결과

연구개발계획서 상의 제품개발, 특성시험, 지침개발이 완료됨

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

수직하중 및 수평변위 계측이 가능한 IT기반 스마트 내진장치를 통하여 교량구조물의 모니터링시스템과 교량관리시스템과 연계 운용. 지진시의 응답 및 손상을 계측하고 이를 통한 구조물의 안전성과 신뢰성향상. 구조물의 장수명화로 사회적 비용절감

SUMMARY

With the recent increase of strong seismic activities worldwide, the evaluation of the seismic risks and improvement of seismic safety of infrastructures have gained critical importance. There have been many researches on monitoring and control of large structures. Many seismic devices like oil damper and bearing have been proposed and developed in order to mitigate the seismic responses of the structures.

Besides, IT (Information Technology) has become essential in our everyday life and is today applied in various forms in diversified fields of engineering. One example is the monitoring systems in civil engineering. The introduction of monitoring systems in important structures is today recognized as part of the design and construction processes.

However, most of control systems and monitoring systems are applied independently. It is also noteworthy that monitoring systems focus essentially on the health of the structure itself while disregarding the operational state of the control system. Therefore, combining these two systems into an integrated system which enables measuring and controlling the structural responses simultaneously could be more natural efficient and natural. In this study, we have developed new smart seismic devices with embedded IT-features together with corresponding manuals and specifications for their performance tests.

The research is subdivided in three projects intending to develop new IT-based seismic devices:

- a project developing a displacement sensor-embedded oil damper with wireless data transmission,
- a project for the integration of FBG sensor in conventional seismic bearing,
- a project developing a monitoring system applying piezoelectric sensors.

This report presents the development process of these new systems including their concept, manufacture and tests. Results show their feasibility and demonstrate their efficiency in improving the safety and reliability of bridge structures through continuous monitoring not only during earthquake events but also under service loads. Further study should implement protocols and algorithms to link these new devices to realtime monitoring systems as well as bridge maintenance systems.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction

1.1 Basic concept

1.2 Demand on the research

1.3 Research scope

Chapter 2. State-of-the-art

2.1 Market of structural control

2.2 Smart earthquake protection devices

Chapter 3. Details and output of study

3.1 Complex damper with embedded sensor

3.2 FBG sensor based earthquake protection bearing

3.3 Piezoelectric sensor based earthquake protection bearing

Chapter 4. Achievement and contribution to related fields

4.1 Rating achievement of research objective

4.2 Distribution to related field of study

Chapter 5. Plan to apply the output

Chapter 6. Related overseas information

Chapter 7. References

목 차

제1장 연구개발과제의 개요
제1절 연구개발 개요
제2절 연구개발 필요성
제3절 연구개발의 범위

제2장 국내외 기술개발 현황
제1절 국내외 제진시장 현황 및 예측
제2절 국내외 스마트 내진장치기술 현황

제3장 연구개발수행 내용 및 결과
제1절 감쇠기 계측 시스템 개발
제2절 FBG센서 기반 받침형 내진장치를 이용한 스마트 모니터링 시스템 구축
제3절 압전센서 기반 받침형 내진장치를 이용한 하중모니터링시스템 개발

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도
제1절 연구개발목표 달성도
제2절 관련분야에의 기여도

제5장 연구개발결과의 활용계획

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제7장 참고문헌

부록1 Damper 성능평가 및 유지관리 매뉴얼

부록2 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침의 성능평가 매뉴얼(안)

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발 개요

오늘날의 대형 구조물들은 정해진 종류나 범위의 외부하중에 대하여 정적인 하중에 의한 응답뿐만 아니라 동적응답에 대한 요구조건들까지도 만족하도록 설계된다. 특히, 지진이나 바람과 같은 자연재해에 대해서는 내진 및 내풍 설계개념이 실제 구조물에 적용되고 있다. 그러나 현재까지의 설계방법들은 주로 부재의 질량과 강성을 조절하는 방법에 의존하고 있어서, 선택 가능한 설계안들이 크게 제한적일 뿐 아니라 특정한 설계제한조건을 만족시키기 위하여 지나치게 많은 강성 또는 부재가 요구되거나, 저효율적일 수밖에 없는 설계, 심미적이지 못한 설계안이 도출되는 경우가 발생하기도 한다.

국내에서는 지진재해대책법 시행령이 2008년 3월에 공포되었으며 2009년 3월에 개정되어 내진보강대책 및 내진설계기준과 관련된 법규(제정 2009.3.26 소방방재청령 제72호)에 의해 기존시설물의 내진보강이 의무화되고 이에 따라 관련분야의 정부예산이 향후 크게 증가될 것으로 전망이다. 그러나 내진장치 등에 대한 국내 연구개발이 미흡한 상태이므로, 이 분야에 대한 국내 기술개발이 이루어지지 않으면 향후 크게 증가될 내진보강 시장에서 국외제품들이 시장을 독점할 가능성이 높다.

한편, 여러 분야에 있어서 현대 과학기술은 비약적인 발전을 하고 있으며 건설 산업에서도 새롭게 발전된 첨단 기술을 이용하여 보다 안전하고 효율적인 구조시스템을 추구하려는 노력이 지속되고 있다. 그 중 대표적인 것이 모니터링 시스템과 진동제어 시스템이라고 할 수 있다. 이 연구는 모니터링 시스템과 진동제어 시스템을 결합한 IT기반 스마트형 내진장치로서 제진과 계측을 동시에 하는 장점을 가지고 있다.

따라서 기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적으로 향상시켜야 하며 이를 위해서는 핵심재료의 성능고도화와 IT기반 기술과 접목한 내진장치의 모니터링기술과 제진성능 효율성 강화 및 저비용화가 필수적이다. 교량의 작용하중이 집중되어지는 지점에 존재하는 내진장치와 실시간 계측시스템을 통합한 것을 “스마트 교량 내진장치(Smart Bearing)"이라고 한다. 실시간 계측시스템을 통하여 내진장치에 가해지는 하중 및 변형률을 계측함으로써 통과차량의 하중과 속도를 예측(BWIM: Bridge Weigh-In-Motion system)할 수 있으며 교량 관리 시스템(BMS: Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량의 유지 관리를 최적화하고 비용감소를 도출할 수 있다. 또한 시설물 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하고 단부에 단차가 발생할 수 있는데 이는 시설물의 구조손상을 야기하여 사용성을 크게 떨어뜨리므로 이를 상시적으로 계측하여 보정할 수 있는 받침형 스마트 교량 내진장치가 유용할 것으로 판단된다.

또한 2000년대 이후 신설교량의 건설이 감소하고 노후교량의 수는 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 경향은 교량성능의 유지관리와 개선이 필요한 교량이 점점 증가하고 있다는 것을 시사해준다. 노후화된 교량의 유지관리와 더불어 내진성능 향상의 필요성도 증대되고 있다. 하지만 국내의 내진설계 그 적용역사가 길지 못하여 내진설계를 적용한 교량이 적다. 따라서 비내진 교량에 대한 내진성능 향상이 필요하다. 교량의 장수명화를

위하여, 내진성능 향상뿐만 아니라 교량성능의 유지관리에도 효과적인 스마트 내진장치를 제안하고자 한다.

제안된 장치의 필요성을 확인하기 위하여, 교량받침으로 널리 사용되는 포트받침을 선택하여 노후화에 따른 마찰면의 마모량과 마찰계수 증가가 교량에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 실험결과 포트받침의 노후화에 따라 마찰계수가 약 40배까지 증가할 수 있으며, 이에 대해 교량은 상시와 지진 시 교각의 전단응력과 휨응력이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 교량의 유지관리를 위하여 교량의 이동량 계측을 통한 교량받침 상태의 파악이 필요하다. 이를 위하여 내진성능 향상과 교량의 이동량 계측이 가능한 스마트 내진장치를 개발하였다. 스마트 내진장치는 점성 감쇠기와 동적 변위계, 그리고 무선계측시스템으로 구성되어 제안된 스마트 내진장치가 교량 유지관리의 효율성 향상과 동시에 내진성능 향상기능을 확보하고 있음을 확인하였다. 향후, 스마트 내진장치는 노후 교량에 대한 유지관리와 내진성능 향상을 위한 새롭고 효율적인 대책이 될 것으로 기대된다.

제2절 연구개발 필요성

사회가 발전함에 따라 삶의 질 향상을 위하여 사회기반시설물들에 대해 친환경적·친인류적 개념의 선진화된 건설기술이 요구되고 있다. 최근에 와서는, 이러한 경향이 고도화된 과학기술과 접목되어, 기능성과 더불어 심미성까지 추구하는 랜드마크적인 장대 교량의 건설이 크게 증가하는 추세를 보이고 있다. 이러한 구조물들은 더욱 더 슬림해지고 유연해 짐에 따라 낮은 감쇠비를 갖는 동적 특성을 지니게 되며, 이러한 동적 특성은 바람, 지진 등의 불규칙한 외부하중 및 사용하중에 매우 취약해 질 수 있기 때문에 적절한 대책이 필요하다. 이러한 필요성에 의하여 많은 제진시스템이 연구되어 왔으나 현재 급속도로 발전하고 있는 IT 기술을 접목하여 구조물의 상태를 동시에 평가하는 시스템은 개발되고 있지 않다. 제안하는 연구는 급속도로 발전하고 있는 IT기술을 제진기술과 접목하여 제진성능과 계측을 동시에 가능케 하는 효율적인 시스템을 제시하고자 한다.

지진격리장치는 구조물의 주기 이동을 통하여 지진력 감소를 도모하는 것으로 내진설계 목적을 달성하는데 경제적인 수단으로 사용된다. 그러나 고베지진시 파괴된 많은 교량들의 경우, 가장 주목할 만한 파괴인자는 내진받침의 손상이나 파괴였다. 받침의 파괴나 이상거동으로 인하여 상부구조의 낙교 또는 하부구조의 손상이 발생하면서 교량의 기능을 상실하게 되었다. 따라서 받침의 성능은 항시 유지되어야 하고, 내진받침의 성능의 파악을 위해 육안검사는 한계가 있으며, IT 기반 모니터링 기술의 접목을 통한 상시계측으로 받침뿐만 아니라 전체구조계의 성능과 안전성을 확보할 수 있다.

1. 교량의 누후화

최근 몇년 동안 신설교량의 수는 매년 꾸준히 감소하고 있고 노후교량의 수는 꾸준히 증가하고 있다. 그림 1.1에서 볼 수 있듯이 2000년대 이후 800~1100개소의 교량이 꾸준히

건설되어 왔지만 최근 400여개소로 신설교량의 증가가 둔화되고 있다. 교통정체구간의 해소 , 국토균형개발 촉진, 국가경쟁력 제고 등은 물론 도로이용자들의 교통안전을 위해서라도 지속적으로 도로건설에 대한 투자가 이루어져야 하나, 도로 부문의 투자비중이 축소되는 경향을 보이고 있고, 그에 따라 향후 신설교량의 증가추세는 둔화될 것이다.

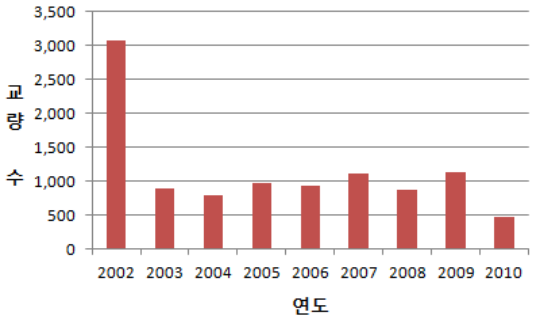


그림 1.1 우리나라 연도별 교량 증가 수

노후교량의 경우, 표 1.1에서 볼 수 있듯이 20년 이상 된 교량과 30년 이상 된 교량의 개소는 2004년부터 2010년까지 지속적으로 증가하고 있다. 이와 같은 최근의 교량현황은 교량성능을 확보하기 위한 교량성능 보완과 유지의 필요성이 증대되고 있다는 것을 시사해준다 (국토해양부, 2010).

표 1.1 20년 이상 된 교량의 수

	교량 수(30년 이상)	교량 수(20년 이상)
2004년	1687 개소	3989 개소
2007년	1739 개소	4274 개소
2010년	1999 개소	5342 개소

최근 교량의 노후화로 인하여 피해가 국내외에서 보고되고 있으며, 그 하나의 예로 2007년 미국 미네소타에서는 40년 이상 된 교량인 I35W 고속도로의 교량이 노후화로 파괴되었다. 이는 노후교량에 대한 지속적인 점검과 유지관리의 중요성을 다시 한 번 일깨워주고 있다. 그림 1.2와 그림 1.3은 미국 I35W 고속도로 교량이 붕괴된 모습이다.



그림 1.2 붕괴된 미국 I35W 고속도로 교량 1



그림 1.3 붕괴된 미국 I35W 고속도로 교량 2

노후교량의 유지관리와 더불어 지진에 대한 준비의 필요성도 증대되고 있다. 2011년 8월 발생하였던 동일본 대지진에서 볼 수 있듯이 지진은 국가 인프라와 인명에 막대한 피해를 초래한다. 지진에 의한 피해는 단 1회에 의해서도 매우 클 수있기 때문에 철저한 대비가 필요하다. 그러나 우리나라는 판 경계지역이 아니므로 지진의 발생빈도가 낮아 지진에 대한 경각심이 크지 않다. 하지만 판 내부 지역도 지진이 불규칙적으로 발생하여 예측이 힘들고 이에 대한 이론이 정립되어 있지 않기 때문에 지진에 대한 위험성을 무시할 수 없다. 따라서 우리나라도 지진에 대한 더 큰 관심을 가지고 교량과 같은 구조물의 내진성능보완이 필요하다.

1994년 미국의 Northridge 지진과 일본의 Hyogo-ken Nambu 지진의 경우를 보면 최대 지반가속도가 중력가속도에 근접하거나 초과하는 모습을 보여주었다. 중력가속도에 근접한

최대 지반가속도를 설계지진으로 고려하는 경우, 현재까지의 내진설계개념으로는 설계가 불가능 하거나. 경제성 및 사용성이 극도로 나빠진다. 하지만 우리나라는 내진설계 적용기간이 길지 못하여 2009년 12월 기준으로 내진설계 적용 교량이 36.5%일 정도로 내진성능을 갖춘 교량이 부족하다. 따라서 내진설계가 반영되어 있지 않은 교량과 내진장치의 기능이 미흡한 교량의 내진성능향상이 필요하다. 또한 최근의 건설되는 교량의 추세를 보면 친환경적-친인류적 개념의 선진화, 고도화된 과학기술을 바탕으로 기능성과 심미성까지 추구하는 랜드마크적 장대 교량의 건설이 크게 증가하고 있다. 이러한 구조물들은 더욱 슬림해지고 유연해짐에 낮은 감쇠비를 갖는 동적 특성을 지니게 되며, 이러한 동적 특성은 바람, 지진 등의 불규칙한 외부하중 및 사용하중에 매우 취약해 질 수 있기 때문에 적절한 대책이 필요하다.

이를 위한 교량성능 유지관리와 보완의 방안의 하나로 교량받침에 대하여 검토하였다. 교량받침은 온도에 따른 교량 거더의 수평거동을 원활하게 해주고 상부구조의 하중을 하부구조로 전달하는 역할을 하는 교량구조의 중요한 요소이다. 1995년 일본의 Hyogo-ken Nambu지진에서 파괴된 많은 교량들의 경우, 교량받침의 손상이 가장 주목할 만한 파괴인자 중 하나였다. 받침의 파괴나 이상거동으로 인하여 상부구조의 낙교 또는 하부구조의 손상이 발생하면서 교량으로서의 기능을 상실하게 되었다. 따라서 교량받침의 성능은 항시 유지되어야 하고, 교량받침의 성능파악을 위한 육안검사는 한계가 있으므로 모니터링 기술을 이용한 상시계측을 통하여 교량받침의 성능을 유지시켜 전체구조계의 안정성과 성능을 확보하는 것이 필요하다 (하동호 등, 2000).

이를 위하여 본 연구에서는 새로운 내진장치를 제안하게 되었다. 교량의 장수명을 위한 유지관리 방안의 하나로 교량받침에 대하여 검토하였다. 교량받침으로 가장 많이 이용되고 있는 것 중 하나는 포트받침이다. 포트받침은 마찰계수가 적은 판을 이용하여 교량의 수평거동을 원활하게 해준다. 포트받침은 그림 1.4와 같이 마찰면에 PTFE (Poly-tetra-fluoro- ethylene) 와 스테인리스 스틸 (SUS316) 로 구성되어 있다 (하동호 등, 2000).

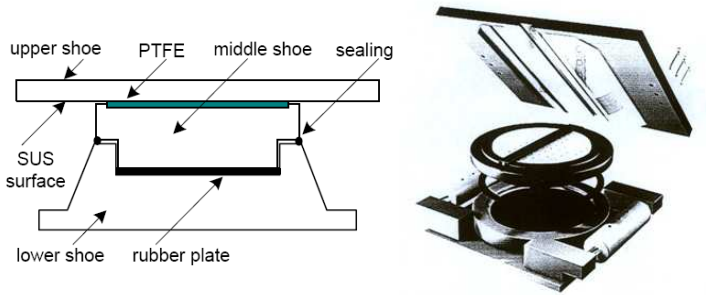


그림 1.4 포트받침의 구성

2. 교량받침 PTFE의 마모특성

1980년대에 처음 소개된 PTFE 불소수지판은 강도가 약하여 마모되는 성질을 가지고 있다. 이런 이유로 판에 딤플을 만들어 고체윤활유를 도포하여 마모를 줄이고는 있지만 장기간 사용할 경우 고체윤활유가 점차 소모되고 불소수지판에 마모되어 교체해야하는 문제점이 있다. 또한 마찰계수가 증가하여 교량에 영향을 끼치는 문제점이 생긴다. PTFE 불소수지판의 초기 마찰계수는 0.005 정도이지만 장기간 사용하여 고체윤활유가 소모될 경우 마찰계수는 점점 증가하여 0.2 정도까지 증가하는 경향을 보인다.

그림 1.5는 포트받침의 구성과 실제 교량에 적용된 모습을 보여주고 있다. 그림1.4 의 위 판의 반짝이는 부분이 스테인리스 스틸이고 아래쪽의 희색의 반달 모양의 부분이 PTFE 불소수지판이다 (유니슨이엔씨, 2009).



그림 1.5 현장에 적용된 포트받침

포트받침의 마찰면으로 구성되어 있는 PTFE 불소수지 판은 장기간 사용 시 고체윤활유가 소모되고 마모되어 교체가 필요하게 된다. 이런 이유로 독일에서는 PTFE에 대하여 Standard Endurance Test를 수행하였다. Sliding speed는 저온에서 0.4 mm/s, 상온에서 2.0 mm/s로 실험하였다. 온도 크리프, 그리고 건조수축에 대해서는 무시해도 될 정도였지만 작은 변위의 이동이 매우 많이 발생하여 축적된다면 베어링에 치명적인 손상을 가져올 수 있는 결과를 보였다.

2010년 'Smart Highway 장수명 교량 부속시설물의 개발 과제'에서는 포트받침의 PTFE 마모시험을 수행하였다. 실험은 그림1.6에서 보여주는 바와 같이 PTFE 시트에 수직력을 가한 상태에서 스테인레스 스틸 시트를 수평방향으로 힘을 가하여 왕복수평운동을 하여 PTFE 불소수지판과 스테인레스 스틸 시트의 마찰을 통하여 PTFE 불소수지판의 마모정도를 알아보았다. 표1.2과 같이 수직방향으로 30 MPa의 압력을 가하고 수평방향으로 80 mm/s로 1 stroke가 200 mm가 되도록 변위 컨트롤을 하여 총 2600 cycle (1040 m) 동안 실험하였다.

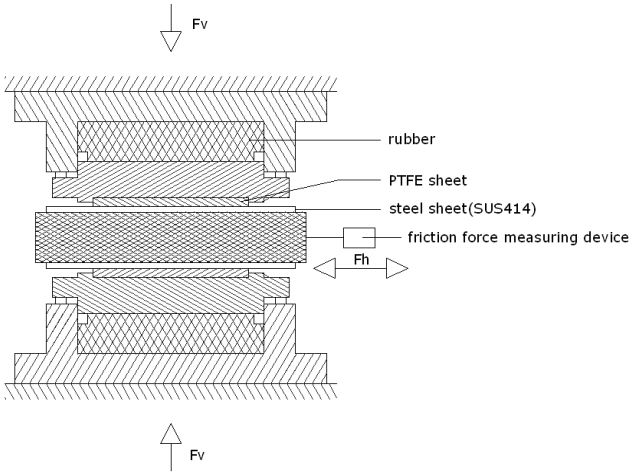


그림 1.6 PTFE의 Standard Endurance Test 개요도

표 1.2 PTFE Standard Endurance Test 재하조건

수직방향	재하하중 30 MPa
수평방향	80 mm/s 로 총 2600 cycle (1040 m) displacement control

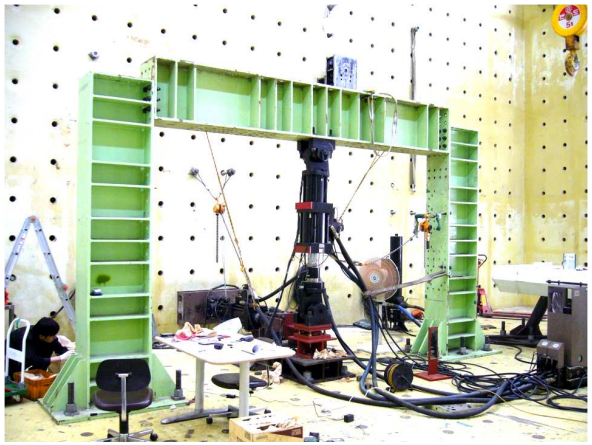


그림 1.7 PTFE 마모시험 전경

그림 1.7과 그림 1.8은 실험 당시의 전경 사진과 실험 모습을 담은 사진이다. 수직방향과 수평방향으로 엑츄에이터가 설치되어 있으며 수평방향 엑츄에이터에 연결된 스테인레스 스틸 시트가 수평운동을 하여 PTFE 불소수지판의 마모를 일으킨다.

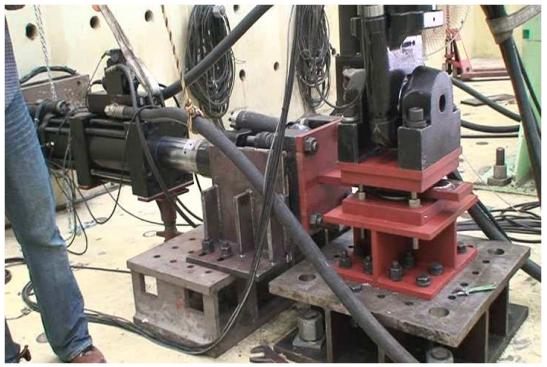


그림 1.8 PTFE 마모시험 상세

재료는 KS F 4424 규정에 의거하여 표 1.3과 같은 특성의 불순물일 첨가되어있지 않은 하얀 색의 순수 PTFE를 사용하였다. PTFE 불소수지판의 딤플의 지름은 8±1 mm, 깊이는 0.5~2.0 mm의 규격을 따른다. PTFE 불소수지판의 딤플에 실리콘 구리스란 고체윤활유를 채우고 표면에 고르게 발라주었다. 실험 결과는 표1.3와 같이 총 1400 cycle에서는 −1.507 mm가 마모되었다. 1400 cycle이 되었을 때 시료인 PTFE 불소수지판의 표면이 거의 마모되어 계획된 2600 cycle까지 진행하지 못하고 중단하게 되었다

표 1.3 PTFE Standard Endurance Test 결과

Cycle (1 cycle: 400 mm)	마모량 (mm)
0	0
200 cycle (80 m)	−0.267
400 cycle (160 m)	−0.39
600 cycle (240 m)	−0.504
800 cycle (320 m)	−0.724
1000 cycle (400 m)	−0.884
1200 cycle (480 m)	−1.227
1400 cycle (560 m)	−1.507

그림 1.9는 실험 전 PTFE 불소수지판의 모습이다. 그림 1.10은 PTFE 불소수지판을 sheet에 부착하여 지그에 설치하기 전의 모습이다. 그림 1.11은 1400 cycle (560 m) 의 마모시험이 완료된 후의 모습이다. 원 판 위로 올라온 PTFE 불소수지판이 거의 마모된 상태로 PTFE 불소수지판과 원 판이 거의 평평한 상태를 이루고 있다. PTFE 불소수지판 주위에는 PTFE 불소수지판에서 갈려나간 검은색 가루들이 많이 있다. 그림 1.12는 1400 cycle (560 m) 후의 PTFE 불소수지판의 옆모습으로 마모되고 눌려 옆으로 조금 퍼져있는 상태를 볼 수 있다. 그림 1.13은 실험 후의 스테인레스 스틸 시트의 모습으로 마모된 PTFE의 가루를 확인할 수 있다 (한국건설교통기술평가원 2010).

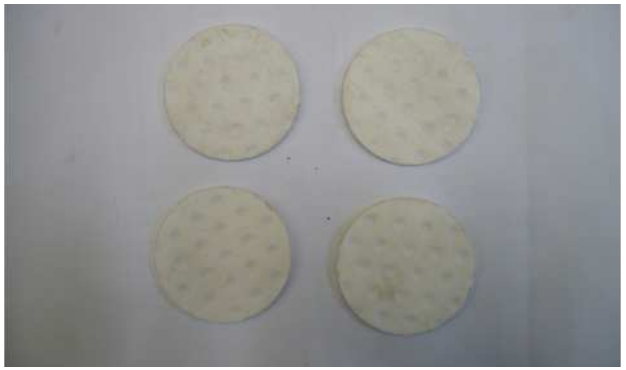


그림 1.9 시험 전 PTFE 샘플



그림 1.10 시트에 부착된 PTFE



그림 1.11 1400 cycle 후의 PTFE 앞면



그림 1.12 옆에서 본 1400 cycle 후의 옆면

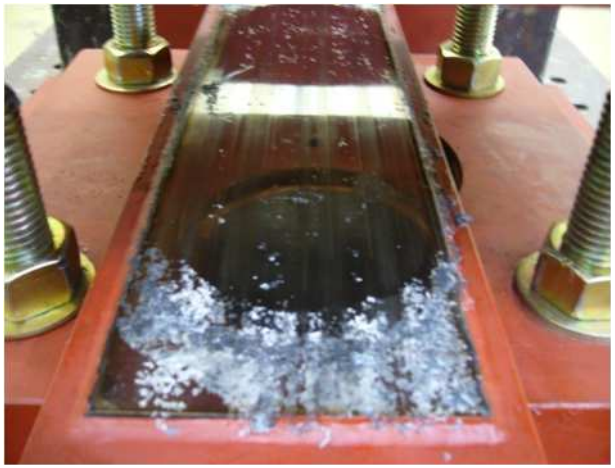


그림 1.13 시험 후의 스테인레스 스틸 시트

그림 1.14는 Cycle 과 마모량의 관계이고 그림1.15 는 이동거리와 마모량의 관계이다. 위의 시험결과는 그림 1.14와 그림 1.15에서 보여주듯이 교량 받침의 이동량과 마모량이 거의 비례하는 나타내었고 선형회귀분석을 통하여 $y=ax+b$ 의 일차식으로 그림 1.14, 그림 1.15 과 같이 나타내었다. $y=ax+b$ 의 식에서 $a=1.015\times10^{-3}$ 이고 $b=-2.258\times10^{-2}$ 이다. 식(1.1)과 식(1.2) 는 선형회귀분석 방법을 통하여 나타낸 것이다.

$$y=ax+b \tag{1.1}$$

$$a=\frac{n\Sigma x_i y_i-\Sigma x_i \Sigma y_i}{n\Sigma x_i^2-(\Sigma x_i)^2} \tag{1.2}$$

$$b=\bar{y}-a\bar{x} \tag{1.3}$$

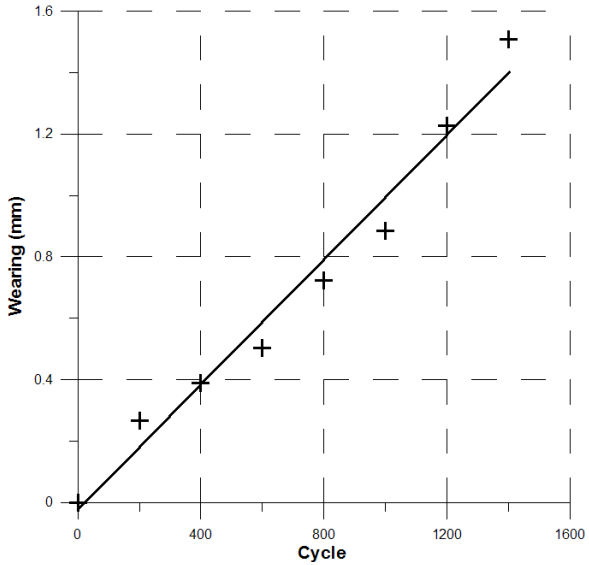


그림 1.14 반복횟수에 따른 PTFE의 마모량

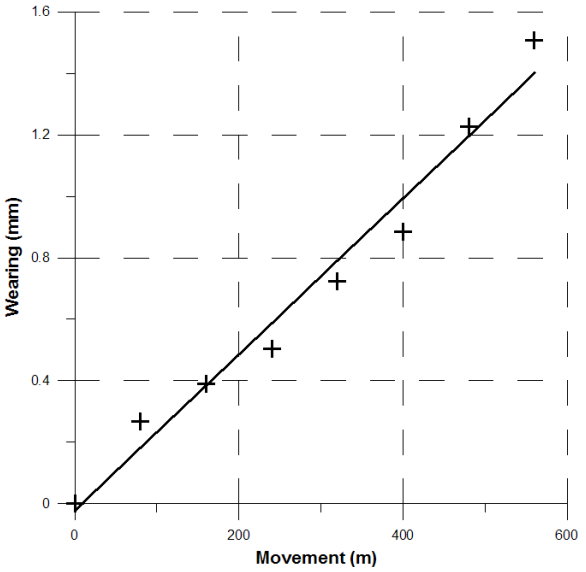


그림 1.15 이동량에 따른 PTFE의 마모량

3. 온도하중에 따른 PTFE 마모량

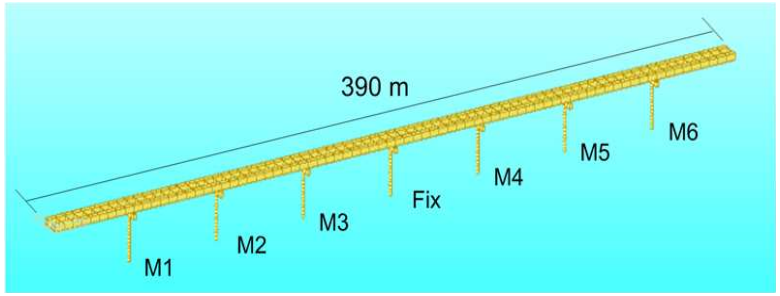


그림 1.16 해석에 사용된 교량

제2절의 PTFE 마모시험 결과를 바탕으로 온도하중에 따른 교량받침의 PTFE 마모량에 대하여 검토하였다. 그림 1.16과 같이 총 연장이 390 m인 8경간 steel box교량에 대하여 교대부에서의 교량받침의 PTFE 불소수지판의 마모량을 알아보았다. 주거더의 재료는 SM490으로 가정하였다. 우리나라에서 일교차가 가장 큰 곳을 고려하여 위의 교량의 교대부의 이동량을 알아보았다. 기상청이 최근 30년간 평균 일교차를 측정한 자료를 보면 우리나라에서 평균 일교차가 가장 큰 곳은 경상북도 의성지역으로 13.7 도의 일교차를 기록하고 있다. 이를 이용하여 1일 교량의 교대부분의 이동량은 식(1.4) 을 이용하여 식(1.5)와 같이 계산하였다. SM490의 온도계수는 1.25×10^{-5}이다. 계산결과 1일 교대부분의 이동량은 0.032 m 이고 1년 동안의 이동량은 11.68 m이다. 교량받침의 평균수명을 20년으로 고려하였을 때 20년 동안의 교량받침의 총 이동량은 234.023 m가 된다. 이를 그림 1.16의 교량에 적용시키면 그림 1.17과 같이 0.57 mm의 마모량이 나온다.

$$\delta l = \alpha \cdot \delta t \cdot L \tag{1.4}$$

$$\triangle l = 12\times10^{-5} \cdot 13.7 \cdot (390/2) \tag{1.5}$$

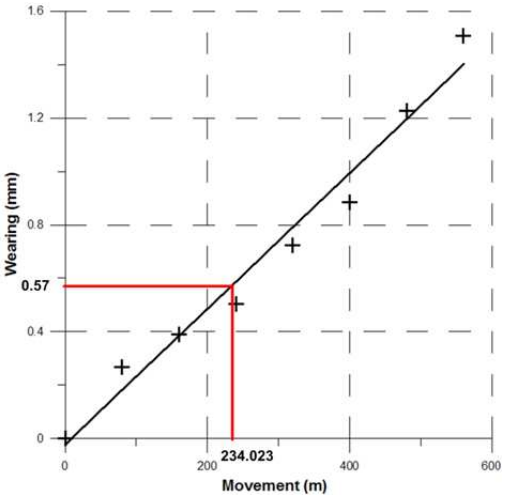


그림 1.17 온도하중에 따른 20년 후 시험교량의 마모량

Steel box 교량으로 연속교라고 가정하여 그림 1.16의 교량과 같은 방법으로 교대부분 교량받침의 PTFE불소수지판의 마모량에 대하여 계산을 하였다(표 1.4). 교대부분에서 일반적으로 사용되는 포트받침의 경우 스테인레스 스틸 시트와 PTFE 불소수지판의 높이 차이는 1.5 mm정도이다. 따라서 마모 허용량을 1.5 mm로 볼 때 1000 m 이상의 연장을 가진 교량은 20년이 지날 경우 PTFE 불소수지판의 마모량이 1.5 mm를 초과하게 되고 교량받침의 파괴 가능성을 높아지게 된다.

표 1.4 20년 사용 시 연속교 교량받침의 마모량

교량 총연장 (m)	교량받침 이동량 (m)	PTFE 마모량 (mm)
390	234.023	0.57
500	300.030	0.74
750	450.045	1.12
1000	600.060	1.50

4. 교량받침 손상사례

현재 교량받침 중 포트받침은 회전기능과 수평거동을 위해 부식이 없는 소재인 PTFE 불소수지판을 사용한다. 이 소재는 1980년대에 처음 소개되었고 PTFE의 표면에 오목한 딤플을 만들어 불휘발성의 고체 윤활유를 도포하여 마찰을 주여서 마모를 줄이고 있다. 그러나 장기간 사용 시 고체윤활유의 지속적인 잔류에 대한 의문과 함께 PTFE의 마모가 심하였다. PTFE는 마모에 대한 내구성이 우수하지 못하기 때문에 고체윤활제가 없을 경우 매우 심하게 마모되는 단점이 있다. 따라서 PTFE 불소수지판이 마모되거나 탈락되는 경우가 발생하고 있다 (한국건설교통기술평가원 2010).



그림 1.18 PTFE의 탈락 1

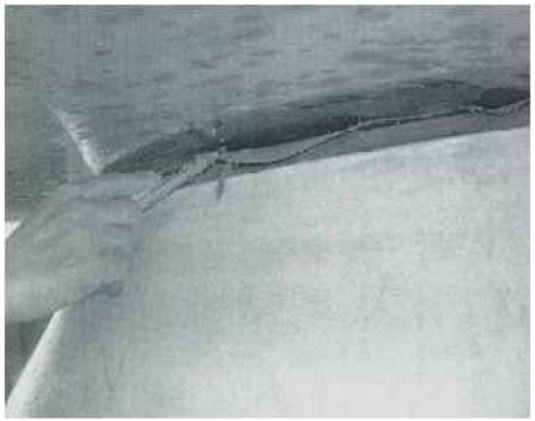


그림 1.19 PTFE의 탈락 2



그림 1.20 PTFE의 탈락 3



그림 1.21 PTFE의 마모와 고무패드 탈락

그림 1.18, 그림 1.19 그리고 그림 1.20는 PTFE 불소수지판이 마모되고 탈락한 사례이다. 그림 1.21 역시 PTFE 불소수지판이 마모되고 고무판이 탈락하여 교량받침의 성능이 제대로 유지하지 못하고 있다. 이와 같은 파손으로 인하여 교량 받침의 잦은 교체가 이루어지고 있다. 또한 교량의 손상까지 유발하고 있다. 따라서 적절한 유지관리와 보완이 필요하다(한국시설안전공단, 2011).

5. 교량받침의 노후화와 교각의 거동

교량받침의 노후화로 인하여 교량의 어떠한 영향을 끼치는 지 검토하였다. 교량받침 중 하나인 포트받침이 장기간 사용하면 마찰계수가 0.005에서 0.2까지 증가하게 된다. 이 때 교량의 어떠한 영향을 끼치는 지 알아보았다. 그림 1.22와 같은 교량에 대하여 교량받침에서 PTFE 불소수지판의 마찰계수 증가에 따른 교량의 영향을 알아보았다.

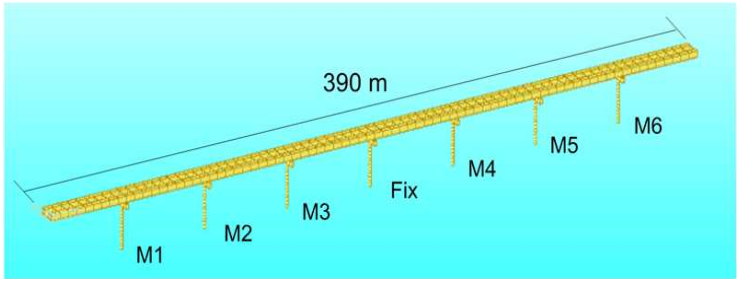


그림 1.22 해석에 사용된 교량

그림 1.22의 교량을 대상으로 FEM 범용구조해석 프로그램인 Midas Civil을 이용하여 교량받침이 받는 수직하중을 계산하였다. 표 1.5와 같은 수직하중을 구할 수 있었다.

표 1.5 교량받침의 수직하중

교량받침	수직하중 (kN)
Bearing1 (Pier M1)	1114
Bearing2 (Pier M2)	1039
Bearing3 (Pier M3)	1054

표 1.5의 수직하중을 이용하여 교량받침의 이동변위가 발생할 때의 교각의 응력을 알아보았다. $F=\mu N$ 을 이용하여 표 1.6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 표 1.6에서 보 수 있듯이 교량받침이 손상되어 마찰계수가 0.005에서 0.2까지 증가하였을 때 이동단 교각에 40배의 응력이 증가하게 된다. 따라서 교량받침에 손상은 교량의 수명에도 나쁜 영향을 끼칠 수 있다.

표 1.6 교량받침 마찰계수 증가에 따른 교각의 응력

교각	전단응력 (MPa)	전단응력 (MPa)	휨응력 (MPa)	휨응력 (MPa)
	μ=0.005	μ=0.2	μ=0.005	μ=0.2
Pier M1	0.003	0.126	0.261	10.42
Pier M2	0.003	0.118	0.243	9.718
Pier M3	0.003	0.119	0.247	9.864

6. 교량의 지진응답과 받침부의 손상

교량받침의 손상이 지진 시에는 교량에 어떤 영향이 나타나는지 검토하였다. FEM 범용구조해석 프로그램인 Midas Civil을 사용하여 그림1.22의 교량을 대상으로 지진 시 교량 교각에 교량받침의 손상이 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 해석에 사용된 지진파는 표 1.7과 같이 교축방향으로 최대지반가속도 0.214g의 1940, El Centro Site, NS, 교축의 직각방향으로는최대지반가속도 0.307g의 1940, El Centro Site, EW을 사용하였다.그림 1.23과 그림 1.24는 1940, El Centro Site, NS와 1940, El Centro Site, EW의 지진파를 보여준다.

표 1.7 해석에 사용된 지진파

	지진파	최대 지반가속도
교축방향	1940, El Centro Site, NS	0.214 g
교축 직각방향	1940, El Centro Site, EW	0.307 g

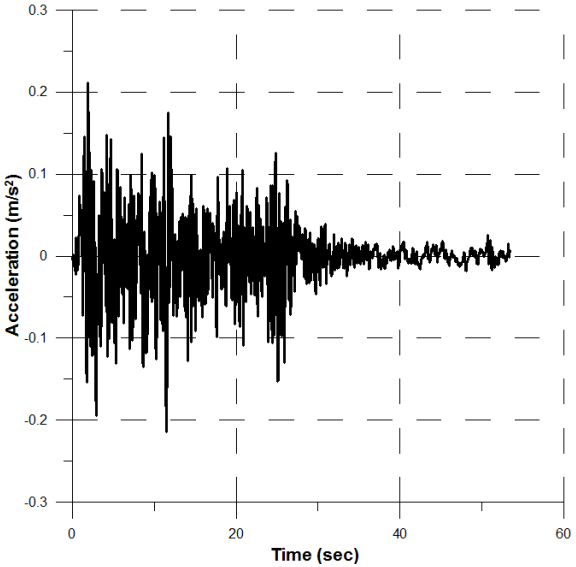


그림 1.23 교축 직각방향 지진파

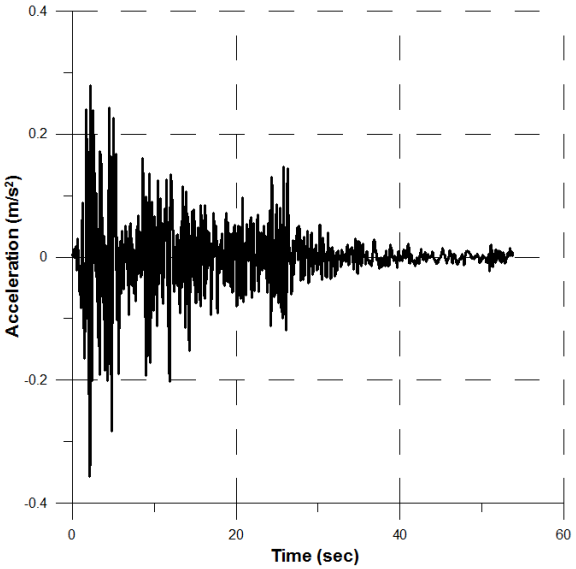


그림 1.24 교축방향 지진파

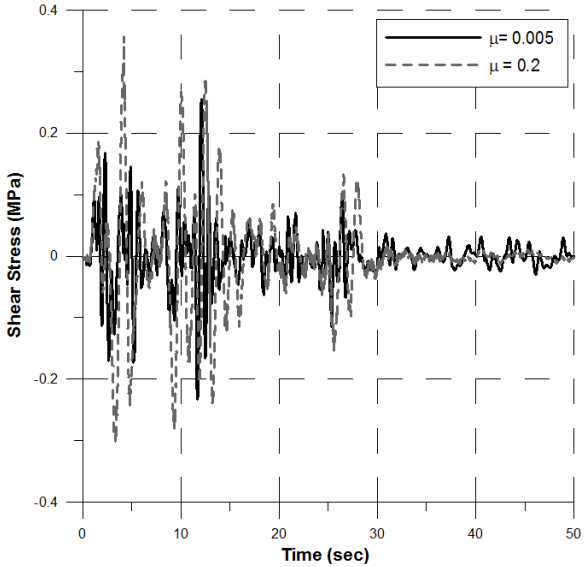


그림 1.25 이동단 교각 M1의 하부응력

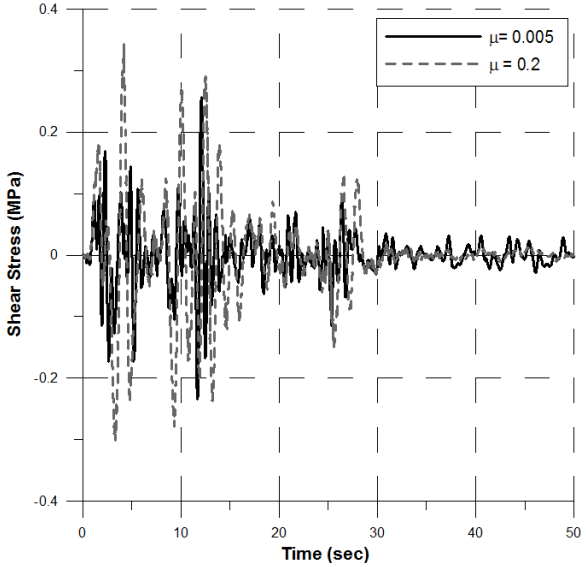


그림 1.26 지진 시 이동단 교각 M2의 하부응력

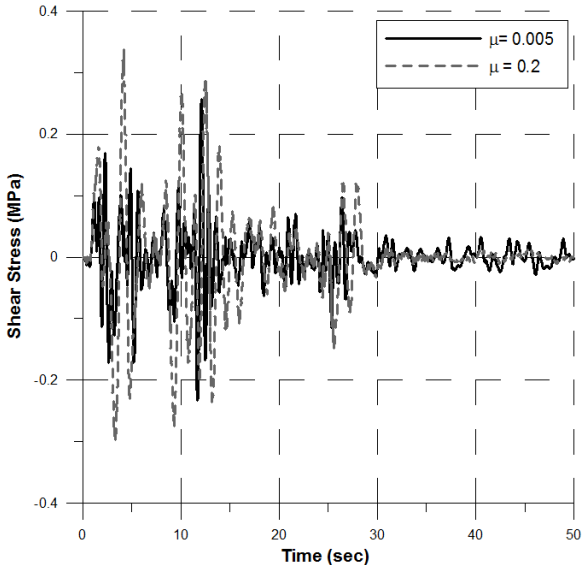


그림 1.27 지진 시 이동단 교각 M3의 하부응력

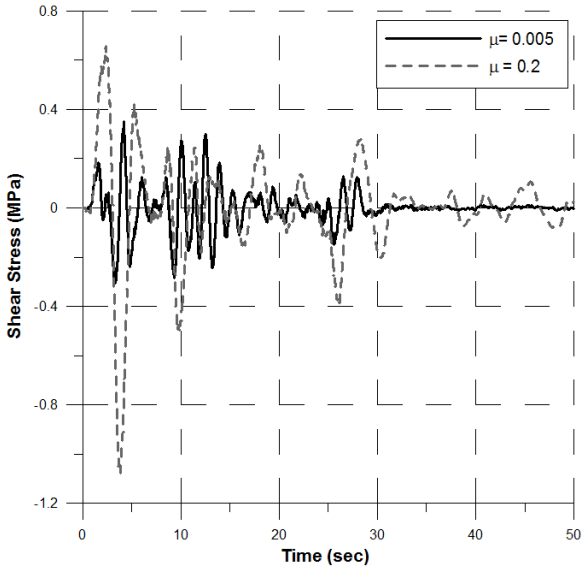


그림 1.28 지진 시 고정단 교각의 하부응력

그림 1.25, 그림 1.26, 그리고 그림 1.27은 지진 시 이동단 교각의 하부응력에 대한 시간응답해석 결과이다. M1, M2, M3 교각 모두 마찰계수가 0.005일 때보다 0.2일 때 교각 하부에 큰 응력을 받는다. 그림1.28과 같이 고정단 교각의 경우는 이동단 교각의 응력분배에 따라 마찰계수가 클 때 더 적은 응력을 받는다. 위의 결과로 교량받침의 마찰계수 증가로 인하여 지진 시 이동단 교각에 큰 응력이 가해지는 것을 볼 수 있었다. 교량받침의 노후화와 PTFE의 마모로 인한 이동단 교각의 지진시 응답을 표 8.1에서 비교하였다.

이러한 지진시의 응답비교로부터 확인할 수 있는 바와 같이, 교량받침의 손상으로 인하여 교량의 다른 부분까지 제 기능을 상실하지 않도록 교량받침의 유지관리와 보수가 적절하게 이루어져야 한다고 사료된다.

표 1.8 지진 시 마찰계수 증가에 따른 이동단 교각의 응력

교각별 응력 \ 마찰계수		0.005	0.2
전단응력 (MPa)	Pier M1	0.298	0.323
	Pier M2	0.302	0.325
	Pier M3	0.303	0.324
휨응력 (MPa)	Pier M1	132	183
	Pier M2	130	184
	Pier M3	130	183

지진응답해석에 의한 결과에서 상술한 바와 같이 지진시 교량받침의 손상은 교량구조 전체의 기능상실로 이어질 수 있으며, 지진시의 교량받침의 손상사례는 그림 1.29 ~ 그림 1.34에서 확인할 수 있다.



그림 1.29 3경간 연속 강거더교의
받침파괴로 인한 상부구조의
수평이동(Mukogawa교)

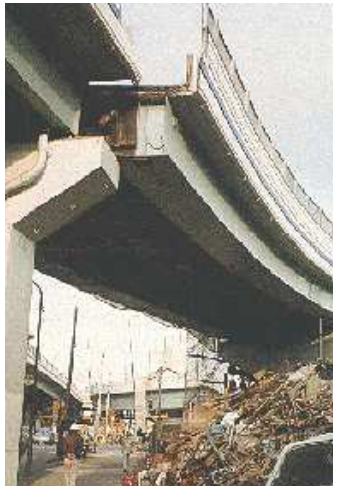


그림 1.30 받침파손으로 인한 상부구조
교축직각방향이동(Kobe 고가교)





그림 1.31 받침파손으로 인한 3m 대변위발생 (Rokko Island교, 일본)

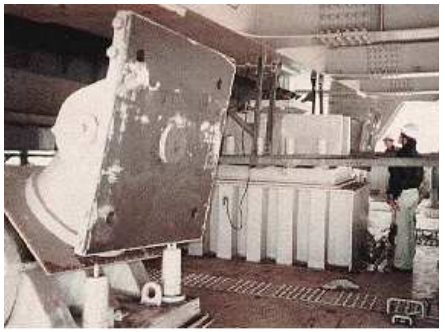


그림 1.32 Vane damper의 파괴로 사장교
상판 1m 상향이동(Higashi Kobe Bridge)



그림 1.33 받침파손으로 인한
상부구조의 교축직각방향
대변위발생(Hamate 고가교)





그림 1.34 교량 받침의 손상 사례

7. 내진장치와 IT기술에 의한 교량의 장수명화

내진장치의 적용은 교량의 내진성능향상에 효율적인 방법이지만 그 성능과 품질은 교량구조 전체의 내진안전성에 큰 영향을 끼친다.

선진국에서는 이를 이미 인식하여 내진장치의 기능강화를 위한 연구를 수행하고, 내진받침성능에 대한 평가기준을 수립하여 받침의 제작부터 설치까지의 기준을 마련하였다. 미국, 일본 등에서는 교량의 내진장치 설계 및 시방규정이 제정되어 내진받침을 이용한 교량의 내진장치 설계과정, 내진장치의 생산을 위한 품질 및 성능시험, 내진장치 설치 및 교체 시공이 통합된 규정하에 효율적으로 시행되고 있다. 그러나, 국내에서는 제품의 생산 공정에 필요한 부품의 품질 기준과 완제품의 요구 성능에 대한 기준 및 그 평가 기

준 등이 정립되지 않아서 각 업체들 자체적으로 자의적 기준을 적용하거나, 수입 판매하는 경우에는 원수출국의 기준을 그대로 적용하는 실정이다. 또한 설계당시 일부 공급업체 자료를 바탕으로 설계 반영하여 제품선정의 객관성이 부족할 수 있게 된다. 따라서 내진장치의 성능시험기준의 정립을 통하여, 현재 이들 기준이 부재하여 빚어지고 있는 혼선을 해결하고 내진장치의 신뢰성을 확보하며 국내외 내진관련 시장에서 기술적 경쟁력을 갖출 수 있도록 한다. 또한, IT기술의 접목을 통한 원격모니터링과 안전제어가 가능한 스마트 내진장치의 개발을 통하여 유지관리의 편의성 및 비용의 감소, 그리고 내진장치의 요구된 성능을 보장 할 수 있으므로, 내진장치의 오작으로 인한 구조물의 손상 및 파괴를 방지할 수 있을 것이다.

IT기반 받침형 스마트 내진장치의 개발을 통하여 시설물 시공단계 및 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하여 발생하는 시설물의 구조손상으로부터 야기될 수 있는 사용성문제에 대한 대응이 가능하다.

받침형 스마트 내진장치를 구현하는 가시적인 혜택은 유지관리의 편의성 및 비용의 감소, 그리고 지속적인 모니터링을 통한 상부구조물의 안전성과 신뢰성의 증가 등을 꾀할 수 있다.

기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적으로 향상시켜야하며 이를 위해서는 핵심재료의 성능고도화와 IT기반 기술과 접목한내진장치의 모니터링기술과 제진성능 효율성 강화 및 저비용화가 필수적이다.

한편, 최근에 구조물의 효율적인 유지 관리를 위해서 압전센서나 FBG 센서와 같은 스마트 센서를 이용한 모니터링 시스템 개발에 관한 연구가 매우 활발하다. 교량의 작용하중이 집중되어지는 지점에 존재하는 내진장치와 실시간 계측시스템을 통합한 것을 “스마트 교량 내진장치(Smart Bearing)"이라고 한다. 실시간 계측시스템을 통하여 내진장치에 가해지는 하중 및 변형률을 계측함으로써 통과차량의 하중과 속도를 예측(BWIM : Bridge Weigh-In-Motion system)할 수 있으며 교량 관리 시스템(BMS : Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량의 유지 관리를 최적화하고 비용감소를 도출할 수 있다.

광섬유 브래그 격자 센서 (FBG sensor: fiber optic Bragg-grating sensor)기반 스마트 교량내진장치는 수직변위 및 수평하중을 계측하여 교량의 상태를 파악할 수 있도록 하는 교량받침이다. 그림1.35과 같이 내진받침에 FBG센서를 설치하면 교량내진장치의 수직변위 및 수평하중을 계측할 수 있다.

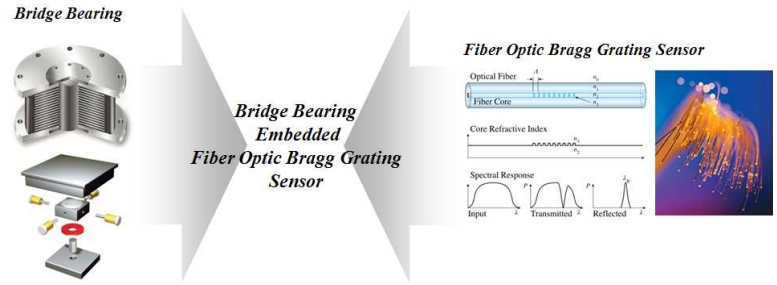


그림 1.35 FBG센서 기반 받침형 내진장치

이러한 FBG센서 기반 받침형 내진장치를 개발한다면 교량의 완공 후 부등침하, 시공오차 등을 파악할 수 있는 것과 동시에 그림 1.36과 같이 교량을 통과하는 통과차량을 파악 할 수 있을 것으로 판단된다. 교량에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중 및 피로하중으로 나타나게 됨으로 실제 교량에 주행하는 차량의 중량 및 통행특성을 파악할 수 있다면 교량의 유지관리에 효과적일 것이다.

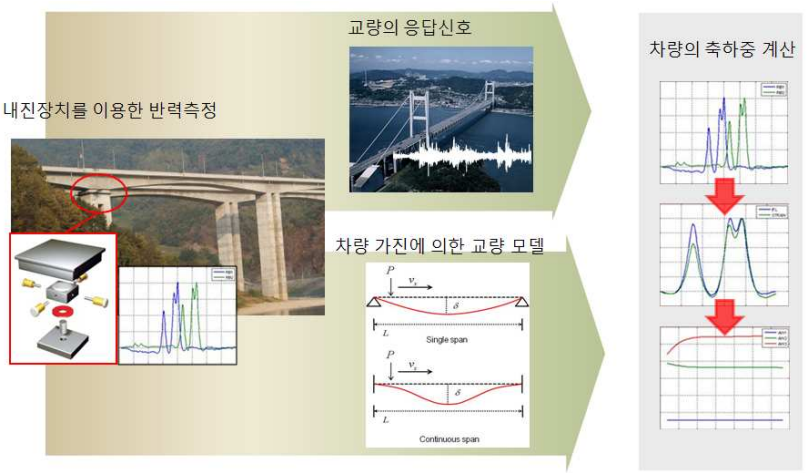


그림 1.36 Bridge Weigh-In-Motion(B-WIM) system의 적용

또한, 스마트 센서가 기존의 Off-the-shelf 센서에 비해서 가지는 장점은, 구조물에 직접 부착하거나 매립하기가 매우 용이하기 때문에 그림 1.37과 같이 구조 부재에 센서가 내장된 형태로 시공이 가능하다는 것에 있으며, 또한 가격이 매우 저렴하여 효율적인 모니터링 시스템의 구축이 가능하다는 것이다. 많은 연구자들이 스마트 센서의 이러한 장점을 이용하여 다양한 형태의 구조물에 대한 효율적인 모니터링 시스템 개발에 이를 적용하고자 하는 연구를 수행하고 있으며, 그중에서도 압전센서를 이용한 모니터링 시스

템 개발에 관한 연구가 최근에 매우 활발하게 이루어지고 있다. PZT, PVDF와 같은 압전 재료는 전기적 에너지를 역학적 에너지로 변환하고, 역으로 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 특성이 있으며, 따라서 그림 1.38과 같이 압전 재료는 센서로서 사용할 수 있을 뿐만 아니라 동시에 액츄에이터로서 사용이 가능한 기능성 재료이다. 따라서 압전 재료를 이용하면, 수동형 모니터링 시스템뿐만 아니라 능동형 모니터링 시스템에도 적용이 가능하며, 이에 따라 모니터링 목적에 맞는 최적의 센싱 기법을 적용하기에 용이한 장점이 있다. 또한, 압전 재료는 크기와 형상을 목적에 맞게 임의로 가공하기가 용이하며, 따라서 구조 부재의 형태를 변화하지 않고 부착 또는 매립이 가능한 장점도 있다.

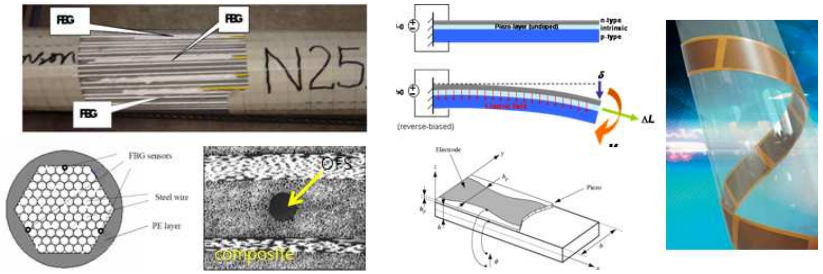


그림 1.37 FBG 센서가 내장된 스마트 텐던 (좌); 압전센서가 부착된 스마트 보(우)

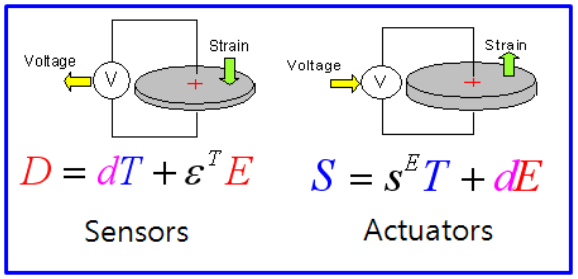


그림 1.38 압전 재료의 센서 기능 (좌); 액츄에이터 기능 (우)

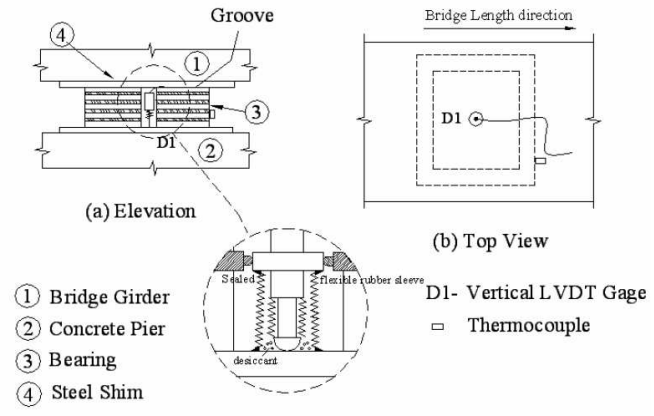


그림 1.39 LVDT 센서 내장형 교량 받침 하중 계측 시스템 [9]

교량 받침은 상부 구조의 수직 하중을 하부 구조로 전달하고, 상부 구조의 온도에 의한 수평 변형을 흡수하는 구조 부재이며, 따라서 교량 받침에 작용하는 하중과 변형은 교량 받침의 성능 및 상태 평가를 위한 주요 모니터링 항목이다. 이에 따라 교량 받침에 작용하는 하중을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 계측 시스템의 개발 필요성에 의하여 최근에 국외에서 초기 단계의 연구가 수행되었으나, 그림 1.39에 나타낸 바와 같이 하중 측정을 위한 센서의 설치를 위하여 교량 받침의 구조를 변경하는 방식으로 시스템이 개발되었다. 그러나 교량 받침의 구조를 변경하는 계측 시스템의 경우, 구조 변경에 따른 교량 받침의 성능에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하며, 이는 결국 교량 받침 설계 및 제작 과정에서 추가적인 노력을 필요로 하는 등의 비효율성을 야기하게 된다.

내진장치 등에 대한 국내 연구개발이 미흡한 상태이므로, 이 분야에 대한 국내 기술개발이 이루어지지 않으면 향후 크게 증가될 내진보강시장에서 국외제품들이 시장을 독점할 가능성이 크다.

제3절 연구개발의 범위

1. SWOT 분석

	S(강점)	W(약점)
O (기회)	1. IT강국 2. 생애주기비용(LCC)을 고려한 경제성 확보 3. 장대교량을 포함한 교량의 내진/내풍 안정성 및 신뢰성 확보 4. 도로교설계기준의 내진설계 강화 5. 국내교량 모니터링 기술의 선도적 위치 6. 유지관리의 편의성 및 비용의 감소 7. 지속적인 모니터링을 통한 상부구조물 안전성과 신뢰성 강화 8. 지진에 대한 대중들의 잠재적 위험성 인식 증가	1. 비내진 교량에 비하여 내진교량의 추가적인 시공비용 2. 기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적 향상 필요성 3. 부분적으로 외국기술에 의존하여 제작되고 있음
T (위험)	1. 경제적인 교량의 건설에 대한 요구 2. 국내 노후교량의 다수 3. 지진재해대책법 시행령 공포에 따라 기존 시설물의 내진보강 의무화 4. 내진장치의 국내기술수준은 부분적으로 외국기술에 의존하고 있음	1. 신기술 적용에 대한 막연한 거부감 2. 구조물 내진성능 향상에 대한 인식부족 3. 내진장치의 스마트화로 인한 장치의 비용 증가

2. 시사점

○ 많은 국내외기술이 개발되었으나, 국내 건설환경 및 기술에 맞지 않는 경우 적용에 실패하였으며. 실제 적용을 위해서는 국내 현실에 맞는 기술의 개발이 필요하다.

○ 접합부등의 요소기술 뿐만 아니라 생산, 시공 및 설계기술의 개발이 필요하다.

○ 현장에서는 단기적 경제성을 추구하므로 단기적 목표와 장기적 목표로 구분하여 기술개발이 필요하다. 장단기적 목표를 분할 설정하여 기술개발이 필요하다.

○ 경제성과 적용성을 위해서는 개발제품뿐만 아니라 구조물 전반적인 요구를 수용할 수 있는 기술 및 제품 개발이 필요하다.

○ 감쇠기-계측-모니터링 All-in-1 통합시스템은 동하중에 대한 안전성과 사용성을 극대화 시킬 수 있는 시스템으로서 외국에서도 그 연구 선례가 거의 없다.

○ 기존의 진동 저감 시스템은 내진성능과 이에 기반을 둔 기초적인 설계법등에 초점을 맞추었으며 실무에 적용할 수 있을 정도의 시공성 및 경제성까지 적절하게 고려되어 있지는 못하다.

○ 국내에서는 지진재해대책법 시행령이 2008년 3월에 공포되었으며 2009년 3월에 개정되어 내진보강대책 및 내진설계기준과 관련된 법규(제정 2009.3.26 소방방재청령 제72호)에 의해 기존시설물의 내진보강이 의무화되고 이에 따라 관련분야의 정부예산이 향후 크게 증가될 전망이다. 그러나 내진장치 등에 대한 국내 연구개발이 미흡한 상태이므로, 이 분야에 대한 국내 기술개발이 이루어지지 않으면 향후 크게 증가될 내진보강시장에서 국외제품들이 시장을 독점할 가능성이 높다. 따라서 기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적으로 향상시켜야 하며 이를 위해서는 핵심재료의 성능고도화와 IT기반 기술과 접목한 내진장치의 모니터링기술과 제진성능 효율성 강화 및 저비용화가 필수적이다.

3. 연구개발의 범위

○ 단기간 이내 고부가가치 창출 및 국내교량의 내진안전성을 극대화를 위한 원격모니터링과 안전제어가 가능한 IT기반 스마트 내진장치의 개발.

○ 원격모니터링과 안전제어가 가능한 IT기반 스마트 내진장치의 개발 및 성능시험기준 정립

○ 지진피해최소화를 위한 주요 핵심기술에 해당하는 내진장치의 국산화와 IT기술의 접목을 통하여 시공단계 및 공용중인 교량의 변위 및 응답을 모니터링 할 수 있는 스마트 내진장치를 개발하여 향후 크게 증가될 내진보강시장에서의 경쟁력 확보

○ FBG 및 PZT센서를 기반으로 하는 받침형 내진장치의 개발

○ 개발된 받침형 내진장치를 이용한 스마트 모니터링 시스템 개발

표 1.9 연구개발의 범위

	All-in-1 스마트 댐퍼시스템	IT기반 받침형 내진장치를 이용한 모니터링 시스템 구축	압전센서를 이용한 모니터링 시스템 구축
범위	장치개발: • 댐퍼, 센서 및 무선통신을 병합한 스마트 댐퍼 개발 • 상시와 지진시 모니터링 가능한 장치개발 • 개발된 장치의 성능 검증 • 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축	모니터링 시스템 개발: • 기존내진받침에 FBG센서를 결합하여 정착방법과 이에 따른 모니터링 시스템 개발 • 상시와 지진시 모니터링 가능한 시스템개발 (대변형 수용할 수 있는 시스템) • 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축	모니터링 시스템 개발: • 신개념의 센싱장비를 이용하여 상시 모니터링 시스템에 대한 활용가능성 모색 및 개발 • 상시 모니터링 가능한 시스템 개발 (평상시 및 지진 후 받침의 거동을 평가할 수 있는 데이터베이스 구축)
비고	(1) 이 과제인 IT기반 스마트 내진장치 개발은 IT기반에 중점을 두고 있음. 모니터링이 가능한 제품을 개발함으로써 향후 모니터링 기법이나 알고리즘을 개발할 수 있도록 관련 기술의 토대를 마련하고자 함. (2) All-in-1 스마트 댐퍼는 센서(변위계)를 댐퍼 내부에 장착하므로 기성 댐퍼와는 다른 융합기술임. 이에 따라 센서를 내부에 장착하는 설계과정을 통해 새로운 제작기술과 검증실험을 필요로 함. (3) IT기반 받침형 내진장치를 이용한 모니터링 시스템개발은 ESCO社에서 현재 제작 판매하고 있는 내진받침(EQS)에 FBG센서를 장착하여 모니터링 시스템을 구축하고자 함. 이에 따라 기성 내진제품에 모니터링 시스템을 packaging하는 것을 목표로 함. (4) 압전센서를 이용한 모니터링 시스템 구축 부문은 모니터링 시스템에의 신소재 적용 가능성을 모색하는 것이므로 연구의 범위를 활용가능성의 검증으로 좁혔음.		
제작	• 1차년도에 설계된 댐퍼-변위계 병합 prototype을 제작하여 댐퍼성능과 병합시스템의 계측성능을 검증하였음. • 2차년도에는 실물 크기의 동일제품을 2기를 제작하여 그 성능의 안정성과 실용성을 실험을 통하여 검증하였음.	• 1차년도에 FBG센서의 성능을 개별적으로 검증하여 기성 제품과의 병합 packaging기술을 개발하였음 (특허출원완료). • 2차년도에 2기 이상 제작하여 그 성능의 안정성과 실용성을 실험을 통하여 검증함.	• 1차년도에 이론적인 연구를 통해 최적화된 압전센서 장착방법을 도출하여 이를 탄성받침에 적용하여 실험을 수행하였음. • 2차년도에는 탄성받침에 적용시의 실용성 검증실험과 함께 타 교량받침에의 적용성을 타진함.
실험	• 설계된 댐퍼에 대한 성능실험과 최소 요구성능(품질시험, 성능시험, 내구성시험 등)에 대한 실험계획을 수립함. 또한 교량과 유사한 실험조건을 마련하여 상시 및 지진시 모니터링 실험을 실시함.	• 2011년도에 ESCO가 납품할 받침을 이용하여packaging화 된 다수의 제품을 대상으로 다양한 실험(품질시험, 성능시험, 내구성시험 등)을 실시함.	• 압전센서를 적용한 탄성받침의 동하중계측 및 개발알고리즘의 검증실험실시

제2장 국내외 기술개발 현황

제1절 국내외 내진시장 현황 및 예측

교량 산업은 유통망의 증가를 위한 항만, 도로의 구축 및 주택 공급 증가를 위한 신도시 개발 등의 사회 인프라 구축 증가로 인하여 시장의 확대가 이루어지고 있다. 이와 함께 교량의 구조물 안전 및 유지관리 산업은 70년대 이후 산업의 급성장으로 인해 시공된 기존 교량의 노후화와 교통량의 증가 및 성수대교 붕괴 이후 구조물 안전 및 유지관리 사업에 대한 관심 증대를 통해 수요가 증가하고 있다. 한편 최근에는 지진의 안전대로 여겨져 왔던 국내에서도 지진이 감지되어 시설물의 안전에 대한 경각심이 높아지고, 이에 대한 연구 개발의 진행을 통한 산업의 발전이 예측되고 있다.

우리나라의 교량은 소속된 도로에 따라 구분되며, 도로는 크게 고소도로, 국도, 지방도, 특별시도, 시도, 군도로 구분된다. 이 중 고속도로는 한국도로공사, 국도 및 지방도는 국토해양부, 시/군도는 해당 지자체에서 관리하며, 시구간 내에 포함되어 있는 국도는 해당 시가관리하고 있다. 또한 국토해양부가 관리하고 있는 국도는 지방의 각 국도유지건설사무소에서 유지보수 작업에 대한 계획을 수립하고 시행하는 책임을 갖고 있다.

국내 도로 시설물 유지관리를 위한 예산은 일반국도의 경우 1989년부터 도로사업 특별회계를 만들어 도로유지 관리를 위한 예산 배정을 하고 있다. 이 중 일부는 한국도로공사의 고속도로 신설 및 확장사업에 지원하고, 지방자치단체는 자체 예산을 재원으로 하여 해당도로의 건설과 유지관리를 하고 있다. 시 관내 국도는 국도의 기능과 도시 시설의 기능을 하고 있으나, 현행도로법상 관할시장이 관리하도록 되어 있어 시장이 중앙정부로부터 지방양여금을 받아 유지관리를 하고 있다. 현행 도로유지보수를 위한 예산은 고속국도에 대해서는 한국 도로공사가 국토해양부에서 받는 교통시설 특별회계 지원금과 자체 조달분으로 충당하고 있다, 일반국도는 교통시설 특별회계 계정분으로, 특별시도는 자체 예산으로, 광역시도, 지방도, 시·군도는 지방 양여금에 의한 국비지원금과 자체 지방비로 충당한다. 동사는 평가 대상의 사업화를 위해 이 같은 수용의 특성을 염두에 둔 사업 계획을 수립해야 할 것으로 보인다.

대상 기술은 하중계측 받침에 관한 것으로, 교량의 부속품인 교량받침에 속한다. 국가기간산업이자 사회 간접 자본인 교량의 건설이나 유지·보수는 주로 국가 기관이나 지방자치 단체에서 담당하고 있으므로 이러한 기관에서의 수요가 발생할 것으로 보인다.

현재 진행중인 77번 국도상의 장대교량 건설과 증가하는 고층건물의 취약한 진동특성으로 공사중 혹은 상용중에 제진장치를 적용하는 사례가 증가하고 있으며, 향후 내진보강의 주요한 대안으로 제진장치의 적용이 증가할 것으로 사료된다. 한국시설안전기술공단에 따르면 교량의 내진보강공사에 최근 5년간 감쇠기 등의 적용이 증가하고 있으며 (그림 2.1), 다수가 수입품 혹은 특허료를 지불하는 제품으로 알려져 있다.

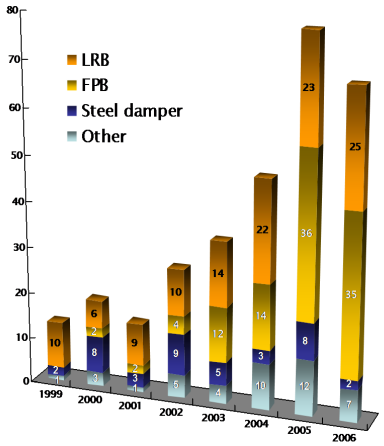


그림 2.1 최근 국내 내진장치 종류별의 적용통계

국내 교량 시장은 기존에 시공된 교량의 노후화와, 인구증가 및 차량 보급으로 인한 교통량의 증가, 산업 발전으로 인한 물류 수송의 증대 등으로 지속적으로 확장되고 있으며, 표 2.1과 같이 해마다 신설되는 교량의 절대 수는 감소하고 으나, 공사 계약 금액은 증가하는 추세를 보이고 있다. 이는 교량공사의 규모에 따른 차이가 어느 정도 영향을 미치겠지만, 대체적으로 기자재 및 부속품, 설계 공법 등의 발전으로 인해 교량 시장이 점진적으로 고부가가치의 시장으로 변화하는 양상 역시 반영하고 있는 것으로 보인다.

표 2.1. 국내 교량 공사 계약 건수 및 금액

연도		2002년	2003년	2004년	2005년	2006년
계약 건수 (건)	도로교량	5,665	5,692	5,059	4,822	3,313
	철도교량	314	297	389	233	202
	합계	5,979	5,989	5,448	5,055	3,515
계약 금액 (백만원)	도로교량	1,180,177	1,034,565	1,178,661	1,257,283	1,412,405
	철도교량	142,774	110,490	234,712	91,074	138,245
	합계	1,322,951	1,145,055	1,413,373	1,348,357	1,550,650
건당 평균 계약 금액 (백만원)	도로교량	208	182	233	261	426
	철도교량	455	372	603	391	684
	합계	221	191	259	267	441

(자료: 전문건설 업 통계연보(2002~2006년))

국내 수요처에서의 활용 실적을 토대로 해외 수요처를 발굴할 수 있을 것으로 보이며, 시장의 진출은 국내 수요처인 관련 건설사의 해외 건설부를 통해 이루어질 가능성이 크다. 또한 관련 전시회 등의 참가를 통해 해외 건설업체의 바이어 발굴 방안도 실현 가능한 해외 수요처 접근 방안으로 보인다. 선진국의 교량 건설은 국내에 비해 민간화 된 비중이 높으므로 선진국의 국가 기관 수요는 국내보다 발생 가능성이 낮을 것으로 보이나, 체계적인 해외 진출 전략을 토대로 점진적인 진출을 모색한다면 해외 수요처 발굴이 가능할 것으로 기대된다.

1. 국내 생산규모

국내의 내진 및 제진 시장은 최근 연간 1000억 수준으로 유지되고 있다(2005-12-09 머니투데이 게재). 국내의 SOC 관련 투자가 한동안 정체기에 접어 들 것으로 추정되나, 지진재해대책법과 내진보강사업으로 상기 규모의 시장은 유지될 것으로 사료된다.

교량받침을 비롯한 교량건설제품은 과거 수입에 의존하는 비중이 매우 높았으나, (주)케이알, (주)유니슨 및 (주)에스코알티에스 등 국내 업체들에 의한 교량부속품의 국산화가 추진되고 있다. 교량 받침을 포함한 이 같은 국산화 제품들이 국내 시장에 성공적으로 진입해 있으며, 정부의 사회간접 자본(SOC)투자확대에 따른 고속철도 노후 교량 교체 등 관련 산업의 활성화에 따라 시장규모가 지속적으로 확대되는 한편 국산화 비율이 높아지고 있는 추세이다. 업체의 추산에 따르면 2004년에 관련 제품에 대한 1,220억원의 매출이 일어난 것으로 보이며, 2005년에는 약 1,300억원, 2006년에는 1,350억 원의 매출이 발생한 것으로 추산하고 있다. 국내 생산 규모는 이들 업체의 매출과 일정 부분 비례할 것으로 예상되므로, 생산 규모 역시 다소 증가하였을 것으로 유추할 수 있을 것이다. 국내 기업들이 생산하여 교량에 적용된 주요 교량받침은 표 2.2와 같다.

2. 수출입 규모

한국무역협회의 최근 10년간 무역통계에 따르면 도로와 교량 부문의 수출입 규모는 다음 표 2.3과 같다. 국내 도로와 교량 부문 수출은 연도별로 증감이 크게 나타나나 1997년의 2천 달러 규모에서 2006년 2,882만 달러 규모로 대폭 증가한 것으로 보인다. 한편 수입 금액은 1997년의 836만 달러에서 2006년 218만 달러 규모로 나타나 대체로 수입이 감소하고 있는 추세인 것으로 보인다. 이 같은 수출입 규모 현황은 국내 관련 기술의 발전에 따른 국내 자재 및 부속품의 사용이 증가하는 추세를 반영한 결과로, 국내의 도로 및 교량 산업이 발전하고 있음을 알 수 있다.

표 2.2 현 재 국 내 에 서 사 용 중 인 교 량 받 침 별 비 교

분류	강제받침		고무받침			특수받침					
교량받침의 명칭	포트받침 Pot Bearing	스페리컬받침 Spherical Bearing	탄성받침 Elastic Bearing	납지진 격리받침(LRB) Lead Rubber Bearing	고감쇠받침(HDRB) High Damping Rubber Bearing	승강식받침 Adjustable Bearing	계측용받침 Measuring Bearing	마찰형포트받침(FPB) Friction Pot Bearing	강재댐퍼받침 Steel Damper	StLRB STU+Sliding+LRB	다이나 포트받침 Dyna Pot Bearing
형태											
상시 이동변위	•고정단 •양방향가동 •일방향가동 *기준:Guide	•고정단 •양방향가동 •일방향가동 *기준:Side Block	•고정단 •양방향가동 •일방향가동 *기준:폐기	전방향가동	전방향가동	•고정단 •양방향가동 •일방향가동	•고정단 •양방향가동 •일방향가동	•고정단 •양방향가동 •일방향가동	•고정단 •양방향가동 •일방향가동	전방향가동	•고정단 •양방향가동 •일방향가동
주요사용 재료	•몸체:강재(SM490B) •내부:고무판,PTFE •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커소켓	•몸체:구조용 합금강(SCMN2A) •내부:황동베어링 •외부추가:분리형플레이트 •상부연결: 앵커볼트(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트&전단키	•몸체:고무(NR,CR) •내부:적층강판 •상부연결: 스터드(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:스터드	•몸체:고무(NR,CR) •내부:납,적층강판 •상부연결: 볼트,스터드(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트&스터드	•몸체:고무(고감쇠) •내부:적층강판 •상부연결: 볼트,스터드(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트&(스터드)	•몸체:강재(SM490B) •내부:유압실린더,황동베어링 •외부:웰드펌프,유압계이지 •상부연결: 앵커볼트(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트&전단키	•몸체:강재 •내부:계측장치 •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커소켓&스터드	•몸체:강재 •내부:포트받침등일 •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커소켓&스터드	•몸체:강재 •내부:포트받침유사 •외부추가:강재댐퍼,STU •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트	•몸체:LRB •외부추가:STU,슬라이딩판 •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트&스터드	•몸체:포트받침 •외부추가:STU •상부연결: 앵커소켓(con`c코) Sole Plate 용접(Steel코) •하부연결:앵커볼트
특징	•토로교에 다수적용 •하중이 커질수록 경제성 증가 (상부판의 길이조정으로 수평변위 조절 용이)	•철도교에 다수 적용 •사교 및 곡선교 적용 용이 (선형상 최전과 많은 회전량) •유지관리 용이 (상부판부구조 탈부착용이) •부반력, 이동량제어가능 (Side Block) •그리스 도포 불필요(Graphite)	•지진시 하부구조에 지진력분배효과 •크기 및 높이제한 (허용압축력:153kgf/cm²) •장지간교량 설계시 상시신축량 검토필요	•탄성받침에 납에 의한 댐퍼기능추가 •납에 의한 초기강성 저님 •하부구조 경제적 설계유도 •장지간 교량설계 상시신축량 검토필요	•LRB의 납기능을 감쇠성능이 있는 고무자체로 대체 •LRB에 비해 가격저렴 •최근 턴키설계에 다수적용	•스페리컬받침 기능은 전부 갖춤 •연약지반에 매우 유리 (교량상판의 높낮이 조절가능) •시공단계별 정밀시공 유도함	•포트받침기능은 전부 갖춤 •교량반력, 변위 상시계측 •주요 교량에 설치요구됨 (과적차량,고속철도)	•일반 포트받침을 사용하며 지진해석시 PTFE의 마찰을 고려 •지진시 상판부상될 경우 마찰력에 의한 이력에너지감음	•기본적으로 포트받침기능 •지진시 강재변형으로 지진에너지흡수 •온도신축에 의한 반복변위에 대해 강재피로검토필요	•LRB의 기능은 전부 갖춤 •받침 높이제한을 대폭 줄여 장대교에 적용 유리	•지진시 STU의 고정화로 타점내진 용이 •현실적인 STU용량산정이 중요
반력범위	•수직력:50~3000 ton •수평력: 5~ 300 ton(일반) 10~ 541 ton(최대)	•수직력:50~1000 ton •부반력:4~80 ton(수직의8%) •수평력: 상 시:8~150ton(수직의15%) 지진시:24~462 ton(교축) 18~347 ton(교직)	•수직력:8~1000 ton(KSEB) •수평력:수직력의 10~40%	•수직력:100~1200 ton	*	•스페리컬과 상동	•포트와 상동	*	*	*	*
이동거리	•기본:± 50mm •최대:±100mm	•교축:±50mm * Side block 과 상부판의 간격	•상 시: (0.7T$_s$) •지진시: (1.5T$_s$) *허용전단변형량(도로교 받침편람 p.104)	*	*	•교축:±50mm •교직:±10mm	•기본:± 50mm •최대:±100mm	*	*		*
마찰계수 (도로교 설계기준)	0.05	0.15	–	–	_	0.15	0.05	0.03~0.11	*	*	*
회전량 (도로설계요령)	0.01~0.02 rad	0.04 rad	*	*	*	0.04rad	0.05rad	0.01~0.02 rad	*	*	*
도장사양	현장여건에 따라 2가지 분류 •150㎛도장 •250㎛도장	•250㎛(일명:우레탄색상도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②중도(100㎛) EH6270(코레폭스 HB) ③상도(100㎛) ET574(코레폭스에나멜)	•150㎛도장(일명:EM877도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②상도(100㎛) EM877(크레폭스 MIO)	•150㎛도장(일명:EM877도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②상도(100㎛) EM877(크레폭스 MIO)	•150㎛도장(일명:EM877도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②상도(100㎛) EM877(크레폭스 MIO)	•250㎛도장(일명:우레탄색상도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②중도(100㎛) EH6270(코레폭스 HB) ③상도(100㎛) ET574(코레폭스에나멜)	현장여건에 따라 2가지 분류 •150㎛도장 •250㎛도장	–	–	•150㎛도장(일명:EM877도장) ①하도(50㎛) EP170(코레폭스프라이머) ②상도(100㎛) EM877(크레폭스 MIO)	–

표 2.3 도로와 교량 부문 수출입 현황 (단위:천달러)

연도	수출금액	수입금액	무역수지
1997년	2	8,365	-8,363
1998년	217	3,839	-3,622
1999년	74	9,916	-9,842
2000년	371	2,744	-2,373
2001년	4,037	1,136	2,901
2202년	21,966	1,374	20,592
2003년	4,523	434	4,089
2004년	592	874	-282
2005년	508	270	238
2006년	28,822	2,181	26,641

3. 국내 주요관련업체

업체명	업체별 능력	비고
케이이엔씨	내진장치 판매 및 적용실적 다수 지주구조물의 제진장치 개발완료/적용 적극적인 제진사업 추진중	참여기업
대봉기계	오일감쇠기의 시제품제작 아직 실적 없음	
유니슨	국내 내진·제진 사업의 개척자 업종전환으로 풍력사업에 주력	
에스코	내진장치 판매 및 적용실적 다수 제진산업의 실적은 미미함	참여기업
협성	내진장치 판매 및 적용실적 다수 제진산업의 실적은 미미함	
삼영엠텍	교량 받침 및 부속장치 판매 및 적용실적 다수	

4. 국내시장동향

교량 시장은 정부의 사회 간접 자본 투자와 밀접한 연관이 있으며, 유통망의 증가를 위한 도로의 구축 및 주택 공급 증가를 위한 신도시 개발 등의 사회 인프라 구축 증가와 함께 교량 건설도 증가되고 있다. 특히 정부는 2020년까지 총 33조원을 투입하여 신도시 개발 확대로 인한 교통난 해소를 위하여 도로교통망과 철도를 연결하는 종합적인 대책을 수립, 대규모 수도권 고속도로망을 구축할 방침으로, 도로·철도의 구성요소인 교량 역시 이와 함께 구축될 전망이다.

또한 기존에 시공된 교량의 노후화 현상과 성수대교 붕괴 이후 증대된 안전에 대한 사회적 관심은 구조물 안전 및 유지 관리 사업에 대한 수요 증대로 이어지고 있으며, 안전하고 우수한 교량 부속품 개발이 주요한 경쟁요소로 대두되고 있다. 특히 2006년 국내에서 감지된 지진에 의해 지진의 안전지대로 여겨지던 우리나라의 내진 시설 안전성 문제가 크게 대두되고 있으므로, 교량 안전성의 확보에 중대한 역할을 담당하는 교량 받침 등 교량 부속품의 안전성 증대 필요성이 높아지고 있다.

교량 건설을 포함한 우리나라 해외건설은 증가하고 있는 추세로, 이 같은 해외 건설의 증가는 국내 교량받침 등 국산화 교량 부속품들이 동반 진출할 수 있는 단초가 될 것으로 보인다. 우리나라 건설기업 들의 해외 진출은 중동 지역에서의 건설을 통해 중흥되었으며, 저임금의 노동력을 경쟁력으로 건설 산업의 새로운 지평을 열었다고 평가된다. 우리나라가 1965년 처음으로 해외 건설 사업에 진출한 이래 연간 100억 달러의 대규모 수주는 1980년대에 3회, 1990년대에 2회, 2000년대에 1회 등 6회에 이르는 것으로 집계되었다.

2006년 해외건설 수주실적이 양호한 것은 중동의 오일머니 수혜와 함께 아시아 지역에서 토목·건축분야를 중심으로 수주경쟁력이 살아나고 있는데 원인이 있는 것으로 분석된다. 또한 신흥시장인 아프리카지역 시장개척 효과가 가시화된 영향도 받고 있다.

5. 해외 시장예측 및 발전전망

내진 및 제진 시스템 시장은 지속적인 성장세를 보일 것으로 기대된다. 특히 최근에 장대교량을 포함하여 건설되는 교량들에는 거의 예외 없이 내진 및 제진 시스템이 적용되고 있는데, 이는 내진과 진동제어 필요가 더욱 증가하여 관련 시스템에 대한 수요가 계속 늘어날 것임을 보여주고 있다. 또한 내진·제진 시스템은 일반 장치와 달리, 구조물 해석과 연계하여 최적의 성능을 내도록 제작되므로, 제진 장치 선정, 설계, 제작, 설치, 유지보수 작업이 하나의 토털 솔루션으로 제공되는 컨설팅 산업의 성격이 더해가고 있다. 이러한 산업 발전 동향을 볼 때 제진 시스템 관련 산업 분야는 본격적인 성장기에 들어선 것으로 판단되며, 전체 시장 규모도 꾸준히 확대 될 것으로 기대된다.

제2절 국내외 스마트 내진장치기술 현황

1. 스마트 교량장치

국내에서는 지진재해대책법 시행령이 2008년 3월에 공포되었으며 2009년 3월에 개정되어 내진보강대책 및 내진설계기준과 관련된 법규(제정 2009.3.26 소방방재청령 제72호)에 의해 기존시설물의 내진보강이 의무화되고 이에 따라 관련분야의 정부예산이 향후 크게 증가될 것으로 전망이다. 그러나 내진장치 등에 대한 국내 연구개발이 미흡한 상태이므로, 이 분야에 대한 국내 기술개발이 이루어지지 않으면 향후 크게 증가될 내진보강 시장에서 국외제품들이 시장을 독점할 가능성이 높다. 따라서 기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적으로 향상시켜야 하며 이를 위해서는 핵심재료의 성능고도화와 IT기반 기술과 접목한 내진장치의 모니터링기술과 제진성능 효율성 강화 및 저비용화가 필수적이다. 또한 시설물 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하고 단부에 단차가 발생할 수 있는데 이는 시설물의 구조손상을 야기하여 사용성을 크게 떨어뜨리므로 이를 상시적으로 계측하여 보정할 수 있는 받침형 스마트 교량 내진장치가 유용할 것으로 판단된다.

주요 기술선진국에서는 IT기반의 스마트 내진장치의 개발이 현재 활발히 진행되고 있으며, 고부가가치 창출을 위한 상용화에 초점을 맞추고 있다. 그러나 내진성능의 향상을 위한 교량내진장치의 개발 및 연구는 지속적으로 수행되어오고 있으나 IT기술의 접목을 통한 원격모니터링과 안전제어가 가능한 스마트 내진장치의 개발과 관련된 연구는 미흡한 실정이다.

내진장치에 해당하는 LRB, 점탄성댐퍼, 유압댐퍼 등에 대한 국내기술수준은 부분적으로 외국기술에 의존하여 제작되고 있는 실정이며 이들 제품에 대한 성능시험기준의 정립이 시급한 실정이다. 국내에서는 구조용 감쇠기를 연구개발하는 기업이 소수이고, 그 완성도가 충분하지 못하여 현재 장대교량에 설치된 감쇠기는 대부분이 일본, 유럽의 제품들이다. 서해대교의 경우에 외국산의 고점성유체를 이용한 충격전달장치와 감쇠기가 접속교에 설치되어있다.

국내기업 및 연구기관의 구조용 감쇠기 연구는 소수에 의해 주도되어 왔으나, 각종 감쇠기는 기계 및 재료와 관련된 축적된 노하우와 기술을 필요로 하기에 충분한 성과를 올리지 못한 것이 현실이다. 한국기계연구원과 건설기술연구원은 몇몇 기업과 함께 감쇠기 개발을 주도하였으나, 실제 교량 등의 구조물에 적용하지는 못하였다. 최근 국내에 장대교량 및 기존교량의 내진보강에 감쇠기를 적용하는 사례가 증가하고 있으나 국내제품의 적용은 부진한 상황이다.

스마트 센서를 이용한 센싱 기술은 해외에서 현재 가장 각광 받고 있는 연구 분야이다. 특히, 미국의 경우 NSF 등에서 차세대 첨단 기술로 IT 기반 스마트 센싱 기술을 선정하여 연구가 활발하게 진행중이다. 그러나, 아직은 연구/개발 단계로서 산업으로 발전하지 못한 상태이나, 현재 상용화를 위한 연구가 매우 활발하게 진행되고 있는 추세로 판단할 때, 향후 5년 이내에 IT 기반 스마트 센싱 기술에 관한 산업이 형성될 것으로 판

단된다.

교량의 작용하중이 집중되어지는 지점에 존재하는 내진장치와 실시간 계측시스템을 통합한 것을 “스마트 교량 내진장치(Smart Bearing)"라고 한다. 실시간 계측시스템을 통하여 내진장치에 가해지는 하중 및 변형률을 계측함으로써 통과차량의 하중과 속도를 예측(BWIM : Bridge Weigh-In-Motion system)할 수 있으며 교량 관리 시스템(BMS : Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량의 유지 관리를 최적화하고 비용감소를 도출할 수 있다.

그러므로 본 연구의 최종 연구목표는 지진피해 최소화를 위한 주요 핵심기술에 해당하는 내진장치의 국산화를 이루는 것이며, IT기술의 접목을 통한 원격모니터링과 안전제어가 가능한 스마트 교량 내진장치의 개발에 중점을 두고 있다. 그림 2.2와 같이 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침(마찰형 스마트 베어링)의 개발로 교량의 안전성을 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 2.2. 스마트 베어링의 적용

PZT/FBG 센서와 같은 스마트 센서를 이용한 센싱 기술은 현재 국내에서 부분적으로 연구가 수행되고 있으나, 대부분의 연구가 손상 모니터링이나 구조물의 거동 측정 등의 분야에만 국한되어 연구가 진행되고 있음. 이에 따라 아직까지 스마트 센서의 장점을 충분히 활용하지 못하고 있는 상태이나, IT 융합 기술의 요구로 인하여 점점 활용 분야를 넓히고 있는 추세이다.

받침형 내진장치를 이용하여 교량의 변위응답과 하중을 계측하기 위한연구가 국내외적으로 많이 진행되고 있지만 아직까지 상용화된 시스템의 개발은 되지 않은 상태이다. 교량 받침에 작용하는 여러 가지 하중을 측정하기 위한 Smart Bearing에 관한 개념적 연구는 유한 요소를 이용한 수치 해석적 연구로부터 시작되었으며, Subramaniam과 Nims et al.에 의하여 탄성 받침을 가진 교량에서 교량 상판의 차량 운행에 의한 교행하중이 교량 받침에 충분히 측정 가능한 변형을 유발하며, 따라서 교량 받침에 측정 장치를 부착할 경우에 차량 하중을 추정할 수 있음을 수치 해석적 연구로 증명하였다. 또한 교량 받침의 변형률이나 변위 응답을 측정하여 이로부터 하중을 추정하고자 할 때, 하중 추정의 정확성은 변형률이나 변위의 하중에 대한 민감도 보다는, 변형률/변위 응답

으로부터 역산하여 하중을 추정하는 역산알고리즘의 정확성에 매우 의존적임을 보였다. 이러한 수치 해석적 연구를 토대로 교량 받침에 작용하는 하중을 실제로 모니터링 할 수 있는 센싱 시스템 개발에 관한 연구가 이후 순차적으로 수행되었다.

로드셀을 받침에 적용하여 하중을 계측하는 연구가 진행된바 있으며, 유압시설을 이용하여 교량의 부등침하나 시공오차를 보정할 수 있는 받침이 개발된바 있다. 또한 LVDT를 이용하여 교량받침의 수직변위 및 수평변위를 계측하는 연구와 광섬유센서를 로드셀 형식으로 제작을 하여 받침에 적용한 연구가 진행된바 있다. 압력센서를 이용하여 받침의 하중을 계측하는 연구가 진행된바있으며, 변형률센서나 가속도센서를 받침에 부착하여 교량의 변위응답을 계측하는 연구가 수행되었다.

그림 2.3은 하중계측용받침으로써 교량받침 내부에 계측센서(load cell)를 내장하여 교량받침에 전달되는 연직하중의 크기를 계측할 수 있도록 한 것이다. 그림 2.4는 승강식 받침으로 받침에 유압장치 등을 설치하여 필요시에 간단한 작업을 통해 상부구조를 승강시킬 수 있도록 한 교량받침이다.

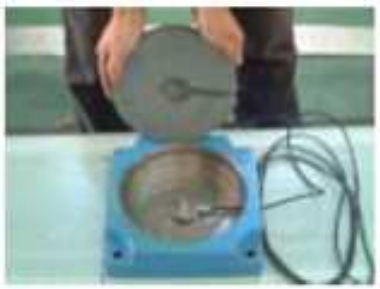
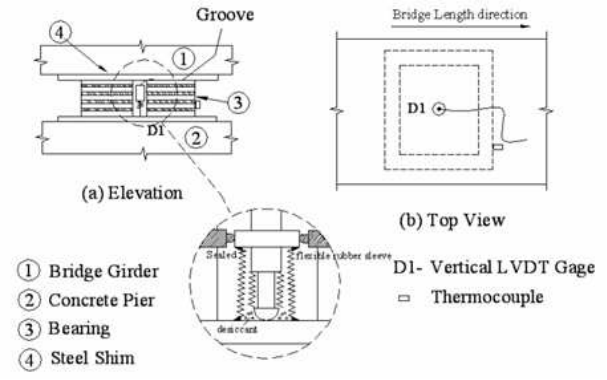


그림 2.3 하중계측용 받침(loadcell)

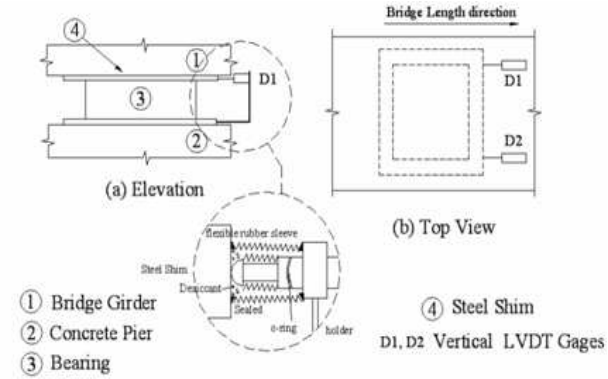


그림 2.4 승강식받침(유압시설)

그림 2.5와 같이 교량받침에 LVDT를 적용하여 수직변위 및 수평변위를 계측하는 연구가 진행 되었다. 그러나 이 경우 LVDT의 특성상 정적이 변위응답의 계측은 가능하나 진동수가 높은 고주파수의 변위응답의 계측은 부정확하다.



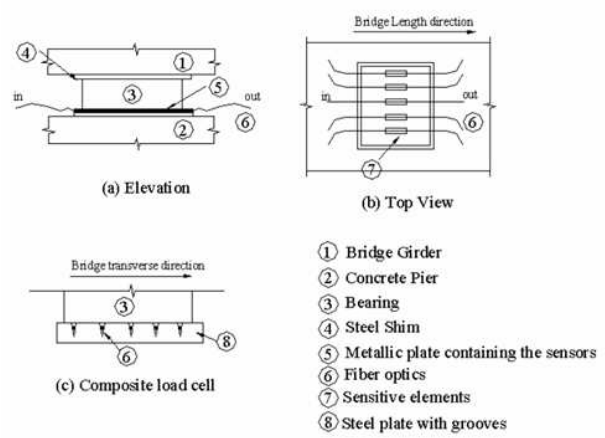
(a) 수직변위 계측이 가능한 받침



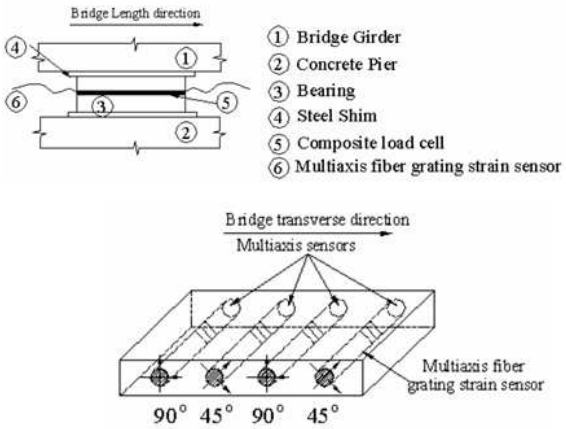
(b) 수평변위 계측이 가능한 받침

그림 2.5 LVDT를 적용한 교량받침

그림 2.6은 광섬유센서를 적용하여 교량의 수직하중을 계측하는 방법이다. 그림 2.6(a)는 광섬유센서를 교량받침의 하부판에 광섬유센서를 매설하는 방법이고, 그림 2.6(b)는 광섬유센서를 이용한 load cell을 제작하여 교량받침에 적용하는 방법이다.



(a) 광섬유센서 매설



(b) Load cell 형식으로 적용

그림 2.6 광섬유센서를 적용한 교량받침

그림 2.7은 교량받침의 4방향에 압력센서를 적용하고 압력의 평균값을 이용하여 수직하중을 계측한다. 이렇게 계측된 수직하중으로부터 수직변위를 추정할 수 있다.

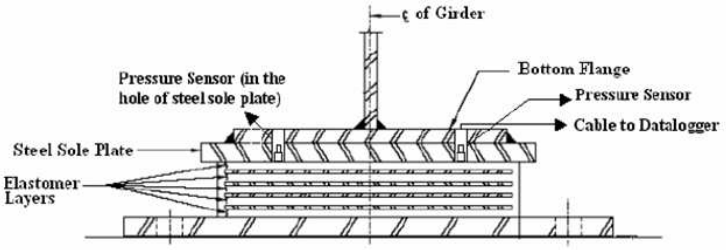


그림 2.7 압력센서를 이용한 교량받침

그림 2.8은 전기저항식 변형률센서를 이용하여 교량받침형 형상변위를 계측하고 이렇게 계측된 형상으로부터 하중과 수직변위를 계측하는 방법이다. 그리고 그림 2.9는 교량받침에 가속도센서를 적용하여 가속도신호를 계측하고 계측된 가속도신호를 두 번 적분하여 변위응답을 추정하는 방법이다.

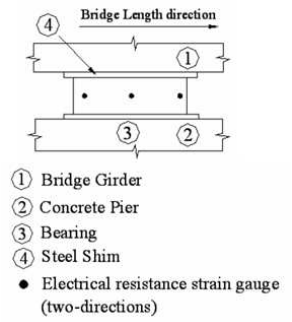


그림 2.8 전기저항식 변형률센서 적용

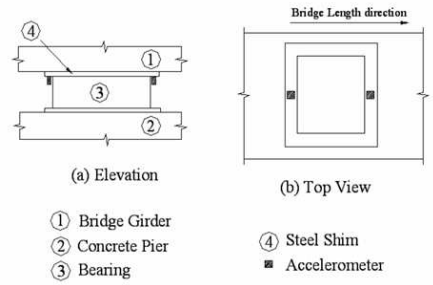


그림 2.9 가속도센서 적용

이렇게 기존에는 전기저항식 변형률센서, 가속도센서, LVDT등을 이용하여 수직하중을 계측하였다. 그러나 본 연구에서는 교량의 수직하중, 수직변위 그리고 수평변위, 수평하중을 계측하기 위하여 광섬유센서를 사용한다.

센싱 시스템 개발에 관한 최초의 연구는 주로 Fiber Optic Sensor (FOS)를 이용하는 방향으로 진행되었으며 1990년대 중반부터 후반까지 미국의 Blue Road Research Company와 Oregon DOT가 공동으로 수행하였다. 이들은 연구를 통하여 그림 2.10과 같은 FOS 내장형 로드셀에 대한 개념 설계를 시작으로 하여, 그림 2.11과 같이 Fiber Optic Sensor가 내장된 Smart Bearing Prototype 시스템을 최종적으로 개발하고, 이 시

스템을 이용한 하중 추정 성능을 실험을 통하여 검증 하였다. 그러나 이들이 개발한 시스템은 FOS를 내장하기 위하여 탄성 받침의 내부에 Duct를 설치해야 하는 등 교량 받침의 구조를 변경해야 문제점뿐만 아니라, FOS의 가격과 설치에 소요되는 비용이 교량 받침 자체의 가격의 수배에 달할 정도로 고비용이 필요로 하여 실용화에 한계가 있는 것으로 지적되었다.

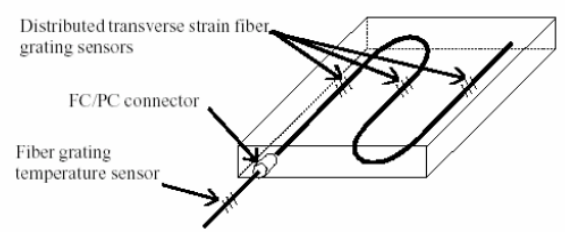


그림 2.10 FBG 센서가 내장된 로드셀의 개념도

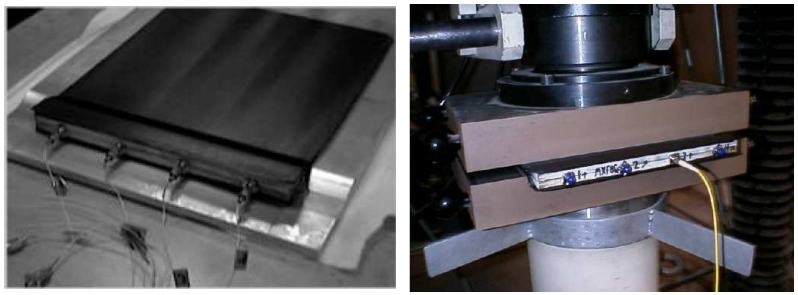


그림 2.11 FBG 센서가 내장된 Smart Bearing Prototype(좌) 및 이에 대한 재하 실험 (우)

한편, 과적 차량을 단속하기 위한 차량 축하중 측정 시스템의 개발을 위해서 Ghosh et al.은 저렴한 스트레인 게이지를 부착한 Smart Bearing 을 그림 2.12와 같이 개발하였다. Ghosh et al.은 이 시스템을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정하였으며, 측정된 변형률로부터 과적 차량을 식별하기 위한 알고리즘은, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 다양한 차량에 대한 변형률 응답을 수치적으로 구하고, 측정 응답을 수치 응답과 패턴인식 기법을 이용하여 비교함으로써 과적 차량을 식별하고자 하였다. 그러나 비록 Ghosh et al.의 시스템은 과적 차량의 식별에 효과적임이 실험적으로 증명되었으나, 과적 차량의 식별 과정에서 교량 받침에 작용하는 하중을 직접적으로 추정하지 않기 때문에, 교량 받침의 하중을 모니터링하기에는 적합하지 않다.

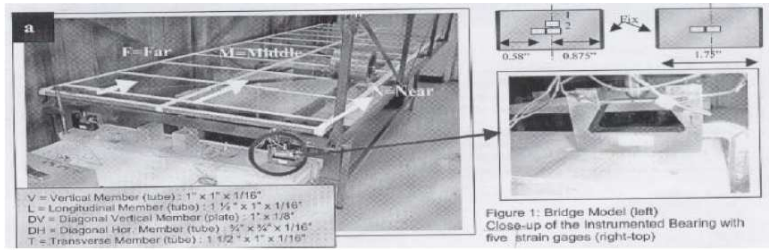


그림 2.12 과적 차량 단속을 위한 스트레인 게이지 내장형 Smart Bearing

Smart Bearing에 관한 가장 최근의 연구는 NY DOT의 지원에 받아 CUNY (City University of New York)의 Agrawal et al.에 의하여 수행되었다. Agrawal et al.의 연구에서는 두 가지의 서로 다른 종류의 교량 받침 하중 측정 시스템을 개발하고, 두 시스템의 교량 받침 하중 모니터링 적용 과정에서 소요되는 비용을 체계적으로 비교 분석하였다. 두 가지 서로 다른 시스템 중 첫 번째는 Blue Road Research Company의 FOS 기반 시스템을 개량한 시스템이며 (그림2.13), 두 번째 시스템은 앞 장의 그림11에 제시된 LVDT를 이용한 시스템이다. Agrawal et al.의 연구 결과 LVDT를 이용한 시스템은 센서, Data Logger, 설치비용까지 합해서 10개의 교량 받침이 설치된 5경간 연속 교량에 대하여 대략 50000 USD의 비용이 소요되는 반면에, 동일한 교량에 대하여 FOS 시스템은 대략 200,000 USD 이상이 소요가 되어 FOS 시스템은 경제적 실용성에 문제가 있음을 재차 확인하였다. 그러나, Agrawal et al.이 개발한 LVDT 시스템은 하중 추정 유효성에 관한 실험을 추후 연구로 남겨 두고, 이후에 LDVT 시스템의 하중 추정 성능에 대한 검증에 대한 보고가 없어서 하중 추정 시스템으로서의 신뢰성이 미확보된 상태일 뿐만 아니라, LVDT를 교량 받침 내부에 설치하기 위하여 교량 받침의 구조를 변경한 상태여서, 교량 받침으로서의 구조적 성능에 대한 추가적인 연구도 필요하다.

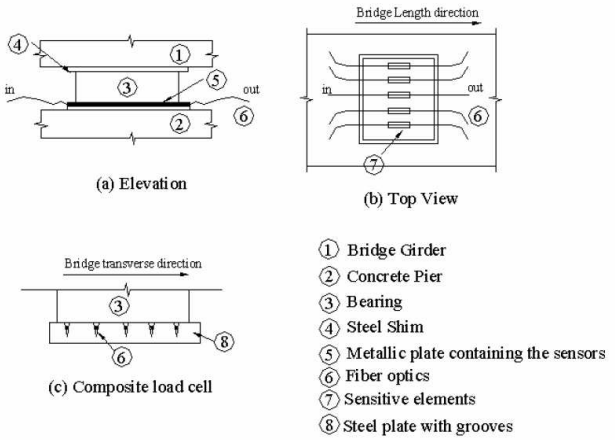


그림 2.13. FBG 센서가 내장된 하중 모니터링 가능한 탄성 받침 [12]

교량 받침에 작용하는 하중을 직접적으로 모니터링 할 수 있는 센서 내장형 교량 받침 (Smart Bearing)에 관한 국내외 연구 개발 현황 조사 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- Smart Bearing에 관한 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있으나, 실용적으로 사용할 수 있는 시스템의 개발은 아직 이루어지지 않았다.
- 현재까지 개발되고, 하중 추정 성능 평가가 진행된 시스템은 대부분 FOS를 이용한 시스템이지만, FOS 시스템의 구축에 소요되는 비용이 매우 고가이고, FOS를 교량 받침 내부에 매립하기 위한 추가 공정이 필요하여 교량 받침의 제작이 매우 까다로워 실용화하기가 매우 어렵다.
- 상대적으로 저렴한 센서 (LDVT)를 이용할 경우, 시스템의 구축비용은 상대적으로 저렴할 수 있으나, 교량 받침의 구조를 변경하여야 할 뿐만 아니라 변경된 교량 받침의 구조적 성능에 대한 신뢰성이 아직 확보되지 않은 상태이다.
- 본 연구에서 개발하고자 하는 압전센서 기반의 교량 받침 하중 모니터링 시스템은, 압전 재료의 특성상 교량 받침의 구조 변경 없이 센서의 내장이 가능하며, 또한 압전센서의 가격이 매우 저렴하여 저비용으로도 모니터링 시스템의 구축이 가능하기 때문에 개발에 성공할 경우 FOS나 LDVT 등을 이용하는 기존의 시스템에 비하여 실용화/상용화의 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.
- 압전센서 기반의 교량 받침 하중 모니터링 시스템 개발에 있어서 선행 연구에서 나타난 결과를 바탕으로 하여 고려해야 할 부분은, 압전센서의 전기-역학 연성 특성에 대한 충분한 이해를 바탕으로 한 하중 추정 역산 알고리즘의 개발과 교량 받침의 변형 응답을 안정적으로 측정할 수 있는 압전센서 부착 위치의 선정을 통한 센서 내장형 교량 받침을 개발해야 한다는 것이다.

2. 국내 전문가 및 연구기관 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황	수준 (국외대비)
내진기술 장대교 내진내풍 기술	윤정방	한국과학기술원	내진·제진기술관련 연구진행중 특허, 연구논문 등 실적 다수	90%
	박관순	동국대학교	구조물의 내진내풍관련 연구논문 등 실적 다수	90%
	김익현	울산대학교	교량 내진관련 연구실적 다수	85%
	신수봉	인하대학교	장대교 내진관련 연구실적 다수	90%
내진·제진 장치의 설계 및 시공	서주원	현대건설 기술연구소	제2진도대교 제진 등	85%
	안상경	삼성물산 건설부문	점탄성감쇠기 갤러리아팰리스 적용 등	70%
	박찬민	코비코리아	서해대교 제진 등 실적 다수	90%
	김윤석	티이솔루션	제진장치 시공실적 다수	85%
내진·제진 장치 개발	문석준	한국기계연구원	내진·제진장치 개발/연구 실적 다수	85%
	하동호	건국대학교	구조물용 지진격리 및 제진제품의 연구개발 및 적용에 다수 참여	85%
	김영진	한국건설기술 연구원	제진장치 개발/연구 실적 다수	80%
	여인호	철도기술연구원	철도교의 내진 제진연구 등	70%

3. 국내연구 인프라 수준

기술분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다우월
구조물의 제진기술	이론연구			O		
	인프라 구축정도		O			
	제품개발	O				
	실험연구		O			
	적용연구	O				
	실구조물 적용사례		O			

4. 국내 제진기술개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
제진기술 장대교 내진내풍 기술	UCB(미국), PWRI(일본)	이론연구에 활발하나, 실제 기술적용은 부족함	80%
제진장치의 설계 및 시공	미쓰비시중공업 카지마건설 (일본)	구조물에의 적용 경험 적음	60%
제진장치 개발	KYB (일본), FIP(이탈리아) Taylor Devices(미국)	제품화에 성공하여 적용된 사례 없음	50%

5. 주요국가의 시장규모

제진 시스템의 주요 기술 보유국 및 생산국은 일본, 미국, 독일 등이다. 제진 시스템의 시장 규모에 대해서는 정확히 알려진 바가 없으나, 주요 장치 생산 회사들의 수익 규모 등을 고려하여 추산해 볼 때, 전 세계적으로 제진 장치 자체에 대해서는 연간 수천억원~1조원 대의 시장 규모를 가지고 있는 것으로 판단된다.

6. 세계시장을 선도하는 주요 업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점 분야
Taylor Devices (미국)	교량 및 구조물 제진용 Viscous Damper 전문 제작	장치 제작
Kayaba (일본)	자동차용, 구조물용 각종 정밀 Damper 제작	장치 제작
GERB (독일)	TMD 및 구조물 제진용 Damper 제작	장치 제작, 컨설팅
Kawakin (일본)	내진·제진장치 개발 및 제작	개발 및 판매

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

이 연구에서는 IT기반 스마트 교량내진장치의 개발을 위해 감쇠기-계측-모니터링 시스템, FBG 센서 기반 받침형 내진장치 시스템 및 압전센서 기반 받침형 내진장치 시스템 등과 같이 크게 3가지로 연구를 나누어 연구개발을 수행하였다. 표 3.1은 이들 3개의 분야의 범위와 특성을 명확히 구분하고 있다. 제1절에는 감쇠기 계측 시스템 개발, 제2절에는 교량 받침하중 모니터링 개발, 그리고 제3절에는 압전센서를 이용한 모니터링 시스템 구축에 대해 연구개발 수행내용 및 결과를 각각 정리하였다.

표 3.1 연구과제의 특성에 따른 분류 및 범위

	All-in-1 스마트 댐퍼시스템	IT기반 받침형 내진장치를 이용한 모니터링 시스템 구축	압전센서를 이용한 모니터링 시스템 구축
	장치개발	모니터링 시스템 개발	모니터링 시스템 개발
범위	• 댐퍼, 센서 및 무선통신을 병합한 스마트댐퍼 개발 • 상시와 지진시 모니터링 가능한 장치개발 • 개발된 장치의 성능 검증 • 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축	• 기존내진받침에 FBG센서를 결합하여 정착방법과 이에 따른 모니터링 시스템 개발 • 상시와 지진시 모니터링 가능한 시스템개발 • 성능평가기준 및 유지관리 매뉴얼 구축	• 신개념의 센싱장비를 이용하여 상시 모니터링 시스템에 대한 용가능성 모색 및 개발 • 상시 모니터링 가능한 시스템 개발
제작	• 1차년도에 설계된 댐퍼-변위계 병합 prototype을 제작하여 댐퍼성능과 병합 시스템의 계측성능을 검증하였음. • 2차년도에는 실물 크기의 동일제품을 2기를 제작하여 그 성능의 안정성과 실용성을 실험을 통하여 검증하였음.	• 1차년도에 FBG센서의 성능을 개별적 으로 검증하여 기성 제품과의 병합 packaging기술을 개발하였음 (특허출원완료). • 2차년도에 2기 이상 제작하여 그 성능의 안정성과 실용성을 실험을 통하여 검증하였음.	• 1차년도에 이론적인 연구를 통해 최적화된 압전센서 장착방법을 도출하여 이를 탄성받침에 적용하여 실험을 수행하였음. • 2차년도에는 탄성받침에 적용시의 실용성 검증실험과 함께 타 교량받침에의 적용성을 타진하였음.
실험	• 설계된 댐퍼에 대한 성능실험과 최소요구성능(품질시험, 성능시험, 내구성시험 등)에 대한 실험계획을 수립할 것임. 또한 교량과 유사한 실험조건을 마련하여 상시 및 지진시 모니터링 실험을 실시하였음.	• 2011년도에 ESCO가 납품할 받침을 이용하여 packaging화 된 다수의 제품을 대상으로 다양한 실험(품질시험, 성능시험, 내구성시험 등)을 실시하였음.	• 압전센서를 적용한 탄성받침의 동하중계측 및 개발알고리즘의 검증 실험실시

제1절 감쇠기 계측 시스템 개발

감쇠기-계측-모니터링 All-in-one 시스템을 구축하기 위하여 시스템을 구성하는 감쇠기, 동적 변위 측정 장치, 데이터 통신 모듈에 대하여 조사 분석을 수행하고 이로부터 감쇠기-계측-모니터링 All-in-one 시스템에 적합한 요소들을 선정하였다. 이를 토대로 감쇠기-계측-모니터링 All-in-one 시스템을 제작하고 시험을 수행하였다.

수행과정을 정리하면 다음과 같다.

- ○ 동적 변위 측정 장치 분석 및 선정
- ○ 감쇠기 분석 및 선정
- ○ 데이터 통신 모듈 분석 및 선정
- ○ Smart damper system 구성
- ○ Smart damper system 제작
- ○ Smart damper system 시험

1. 동적 변위 측정 장치 분석 및 선정

동적 변위 측정에는 다양한 계측장치들이 사용되고 있다. dial gauge, potentiometer, LVDT (Linear Variable Differential Transformer), Linear position sensor 및 FBG (Fiber Bragg Grating) 등으로 분류할 수 있다. 이러한 계측장치들에 대하여 특징을 분석하였다.

- Dial Gauge
  - 크기가 작아 적용하기 쉬움
  - 계측결과 판독이 쉬움
  - 아날로그와 디지털(전기신호) 타입이 있음(대부분 아날로그 타입임)
  - 실험실 수준의 계측에 주로 사용
  - 동적 변위 측정 불가

- Potentiometer
  - 전기적으로는 가변저항으로 사용되며, 일반적으로는 음향장치의 음량 조절 등에도 사용되고 있음
  - 외력에 의한 변위를 전기저항의 변화로 출력
  - 저항을 사용한 접촉식 전위차계의 경우 마찰력에 의한 마모로 인해 수명이 짧고 측정 장소의 환경적인 영향에 민감하여 사용에 주의를 요함
  - 다양한 형태의 전위차계가 존재함 : string potentiometer, linear potentiometer, rotary potentiometer

• LVDT (Linear Variable Differential Transformer)
  – 상호인덕턴스(mutual-inductance)변화를 이용하는 소자
  – 기계적, 전기적으로 분리되어 움직이게 할 수 있는 코어 (core or armature)의 변위에 비례하여 전기적 출력이 발생
  – 코어와 코어 사이에 실질적인 접촉이 없기 때문에 기계적 부분이 마모되거나 약화되지 않음
  – 코어의 크기가 작고 마찰이 적으므로 동적 특성에 대하여 응답특성을 높일 수 있고 기계적 과부하에 대한 영향이 없음
  - 정적 변위, 동적 변위, 처짐 등의 측정에 다양하게 사용 가능
  - 고온이나 저온, 염기를 포함한 환경 등에서는 수명이 짧아지고 정상적인 동작을 기대하기 어려움

• Linear position sensor
  – 제한된 장소에 설치 가능
  – 콤팩트하며 압력에 강함.
  – 600 mm 까지 케이블 길이를 연장할 수 있음
  – Analog, SSI, CANbus, DeviceNet, Profibus, EterCAT 등의 출력을 얻을 수 있음
  – 정밀함과 고성능을 가지고 있음
  – 디지털 기반의 선형 피드백 기능에 활용

• FBG (Fiber Bragg Grating)
  – 내구성이 좋고 정확도 높음
  – 재질이 석영이므로 부식되지 않아 장기간 모니터링에 적합
  – 장기적 내부 결함이나 거동을 표시하고 예측하기에 적합
  – 전자기적 잡음에 의하여 방해, 간섭을 받지 않으므로 계측 안정성 높음
  – 센서 가격은 다른 센서와 비슷하나, Data-logger가 고가임

변위계 선정기준은 다음과 같이 작동환경, 범위 그리고 가격 등을 기준으로 설정하였다.

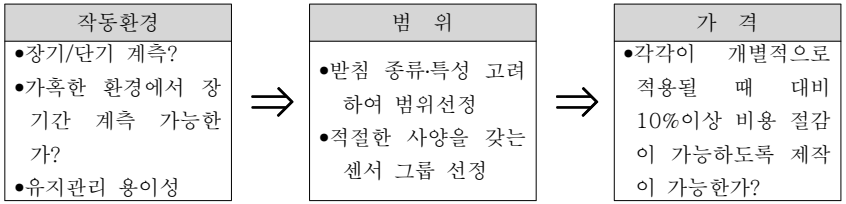


그림 3.1.1 변위계 선정기준

이외에 센서 보호등급(rating)을 고려하였다. 보호등급은 IP code으로 분류되어 전자기나 상자의 보호 구조에 대한 기준이 마련되어 있다. 앞의 숫자는 고체에 대한 등급이고, 뒤의 숫자는 액체의 대한 등급이다. 예를 들어, IP66(내진+고압분무기로 분사되는 물에 대한 보호)은 보안카메라에 적용되며, IP67(내진+잠정적 침수된 물속에서의 방수보호)은 수중카메라에 적용된다.

***첫째 코드번호**

등급번호	명칭	설명
0	비보호	특수한 보호방법으로도 단단한 외부 물체의침투를 막지 못함
1	대형의 단단한 외부 물체로 직경 부터 보호.	50mm이상의 커다란 외부 물체의침투를 막아줌.
2	중형의 단단한 외부 물체로 직경 부터 보호.	직경 12.5mm 이상의 중간 크기의 외부 물체의 침투를 막아줌
3	소형의 단단한 외부 물체로 직경 부터 보호.	직경 2.5mm 이상의 중간 크기의 외부 물체의 침투를 막아줌
4	입자 모양의 단단한 외부 물체로부터 보호	직경 1mm 이상의 중간 크기의 외부 물체의 침투를 막아줌
5	먼지의 침투로부터 보호	먼지의 침투는 완전히 막지는 못하지만 기기/ 장치의작동과 안전에는 영향을 주지 않는 수준
6	방진	먼지의 침투를 완전히 막아줌.

***둘째 코드번호**

등급번호	명칭	설명
0	비보호	특수한 보호 방법으로도 물의 침투를 막지 못함.
1	수직으로 떨어지는 물방울로부터 보호	기기/ 장치에 수직으로 떨어지는 물방울이 전혀 영향을 끼치지 않는 수준
2	수직이외의 각도로 떨어지는 물방울로부터 보호	물방울이 수직으로 부터 최고 15°까지 기울어진 장비에 떨어져도 해가 미치지 않는 수준
3	분무형태의 물로부터 보호	수직으로 부터 최고 60°까지 기울어진 각도로 분무되는 물로 부터 보호
4	튀기는 물로부터 보호	어떠한 방향에서 봉입부에 물을 튀기더라도 해가 미치지 않는 수준
5	분사되는 물로부터 보호	어떠한 방향에서 봉입부에 물을 분사하더라도 해가 미치지 않는 수준
6	강력하게 분사되는 물로부터 보호	어떠한 방향에서 봉입부에 물을 강력히 분사하더라도 해가 미치지 않는 수준
7	일시적인 잠수상태로부터 보호	봉입부 하단을 수중 1m 아래로 일시 담그더라도 봉입부에 들어가는 물의 양이 해를 끼치지 못할 정도로 적어야 함
8	계속적인 잠수상태로부터 보호	계속적 잠수 상태에서도 문제가 없는 장비임.조건은 장비생산자와 사용자가 개별적으로 합의하지만, 코드번호 7의 규정 수준 이상이어야 함.

그림 3.1.2 IP code

이와 같은 분석을 통해 설정된 선정기준으로 변위계를 비교하였다.

표 3.1.1 변위계 종류의 비교분석

변위계 종류	최대계측 범위	해상도	가혹한 환경에 대한 활용도	가격(만원)
Dial gauge	100mm	10-3mm	불량	저렴함 (30-50)
Potentiometer (linear type)	900mm	∞	중간	적절 (25-100)
LVDT	±630mm	0.315mm (0.05%)	중간	적절 (100-300)
Linear position sensor	5000mm	∞ (출력에 따름)	우수	적절 (100-300)
FBG	250mm	0.01mm이하	중간	Data-logger 가격이 매우 높음

Linear Potentiometer는 외부 환경에 영향을 적게 받지만, 마찰로 인한 손상 때문에 파괴가 발생할 수 있다. LVDT는 외부 환경에 영향을 많이 받으며, FBG는 빛으로 신호를 처리하기 때문에 전자적인 간섭을 덜 받고 효율적인 계측 성능을 보여주지만, Data-logger 가격이 비싸다. 반면 Linear position sensor는 콤팩트하며 압력에 강하며 접촉이 없어 실제적으로 기계적 손실이 발생하지 않는다. 이에 따라 동적 변위 측정 장치로 Linear position sensor를 선정하였으며, 선정된 모델명은 MTS社의 Temposonics-RD4 이다.



그림 3.1.3 MTS社의 Temposonics-RD4

Temposonics-RD4는 IP code가 IP67로 유압실린더에 매립하기에 적당하며, 도면 및 사양은 그림 3.1.4 및 표 3.1.2와 같다.

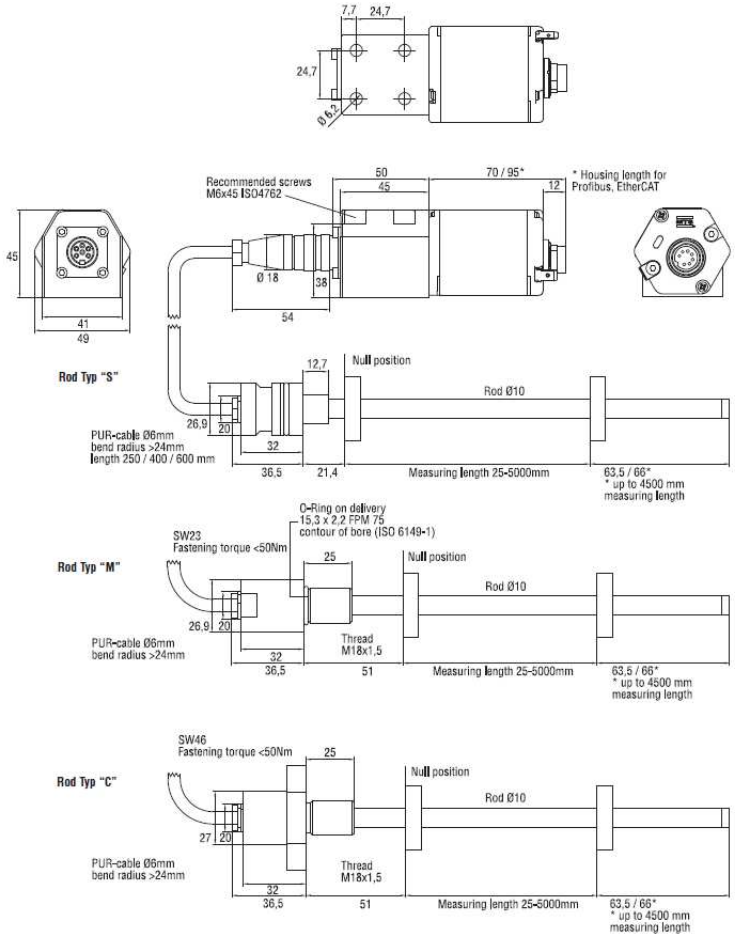


그림 3.1.4 Temposonics-RD4의 도면

표 3.1.2 Temposonics-RD4의 사양

Measured variables	Displacement
Measuring range	25 ~ 5000 mm
Interfaces	Analog, SSI, CANbus, Profibus-DP, EtherCAT
Resolution	Output dependent
Operating temperature	-40° C ~ +75° C
Protection	Sensor electronics IP67 for side cable entry IP65 for bottom cable entry IP30
Shock test	100g
Vibration test	10g/10-2000Hz

2. 감쇠기

이 연구에서 개발하는 감쇠기는 오일 유체 감쇠기(Oil fluid damper)로서, 설계 및 제작이 용이하고 비교적 큰 감쇠력을 얻는데 적합하여 구조물의 진동제어를 위한 smart damper system에 적용하는데 매우 적합하다. 이 절에서는 감쇠기 설계를 위한 기본 이론을 제시하고 35 kN 용량의 소형 스마트댐퍼와 100 kN 용량의 대형 스마트 댐퍼에 대한 기본 설계안을 개발한다.

가. 오일 감쇠기 모델

오일 댐퍼의 이상적 수학적 모델중 가장 단순한 것은 다음 식(3.1.1)과 같이 속도의 지수 승에 비례하여 감쇠력이 발현되는 것이다.

$$F = C\dot{x}^{\alpha} \qquad (3.1.1)$$

여기서 F는 감쇠력, C는 감쇠정수, α는 지수로서 $\alpha=1$일 때 속도에 비례하여 감쇠력이 발현되는 가장 단순한 선형 감쇠력을 표현하게 된다.

나. 원형(circular) dashpot을 사용한 오일 댐퍼

수학적 모델인 식(3.1.1)의 감쇠력을 얻는 기계적 장치로서 오일 댐퍼를 생각할 수 있다. 오일 댐퍼는 오일 유체로 채워진 실린더를 피스톤이 왕복운동할 때 발생하는 유체의 흐름에 의해 에너지가 소산되어 감쇠가 구현된다. 따라서, 식(3.1.1)로 표현되는 감쇠력을 얻기 위한 오일 댐퍼를 설계하기 위해서는 실린더와 피스톤의 기하학적 제원과 유체

의 오일, 감쇠력과의 관계를 알아야 한다. 이를 위해, 그림 3.1.5과 같이 원형 dashpot과 실린더와의 틈 사이로 유체가 지나가는 간단한 오일 댐퍼 모형을 고려한다.

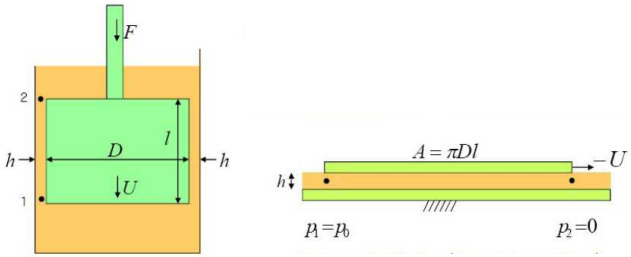


그림 3.1.5 원형 dashpot을 가진 오일댐퍼 모형

그림 3.1.5에 나타낸 바와 같이 길이 l, 직경 D의 원형 피스톤이 속도 U로 움직일 때 1점과 2점 사이의 폭 h의 좁은 틈 사이에는 오일 유체와 피스톤과의 상대 운동이 발생하게 된다. 이때 1점의 좌표를 $x_1=0$, 2점의 좌표를 $x_2=l$ 이라고 하면, 좁은 틈의 길이 방향 압력 분포는 다음 식(3.1.2)와 같은 Reynolds 방정식을 따른다.

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2}=0 \qquad (3.1.2)$$

피스톤의 움직임에 의해 1점의 면에서는 유체의 압력 p_0가 작용하게 되고 2점의 면에서는 압력이 작용하지 않으므로 식(3.1.2)의 경계조건은 다음과 같다.

$$p_1 = p(0) = p_0 \qquad (3.1.3)$$
$$p_2 = p(l) = 0$$

식 (3.1.2)와 식(3.1.3)의 경계조건으로부터 압력 분포 $p(x)$는 다음과 같이 결정된다.

$$p(x) = -\frac{p_0}{l}x \qquad (3.1.4)$$

즉, 실린더와 피스톤 사이의 좁은 틈 사의의 유체의 압력은 길이 방향으로 선형 분포를 따른다.

또한, 1점의 피스톤 전면에서 작용하는 유체의 압력과 피스톤에 작용하는 힘 F 는 평형을 이루므로,

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi D^2} \qquad (3.1.5)$$

의 관계가 성립하고, 이로부터 식 (3.1.4)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$p(x) = -\frac{4F}{\pi D^2 l} x \qquad (3.1.6)$$

한편, 속도 U로 움직이는 피스톤과 실린더의 좁은 틈 사이를 지나는 유체의 실린더 벽면으로부터의 거리 z에 따른 유속 분포 $u(z)$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u = \frac{1}{2\eta}\frac{\partial p}{\partial x}(z^2 - hz) - \frac{U}{h} z \qquad (3.1.7)$$

여기서, η 는 유체의 동점도(dynamic viscosity) 이다. 식 (3.1.7) 에 보인 것과 같이 유체의 유속은 실린더 벽면 경계에서 0이고 벽으로부터 멀어질수록 2차 함수 모양으로 증가하여 피스톤 경계에서 피스톤의 속도와 같은 U까지 이르게 된다. 식(3.1.7)의 압력 구배 $\frac{\partial p}{\partial x}$는 식(3.1.6)을 미분하여 얻을 수 있으며, 이를 대입하면 식(3.1.7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$u(z) = -\frac{2F}{\pi D^2 l\eta}(z^2 - hz) - \frac{U}{h} z \qquad (3.1.8)$$

이제 좁은 틈 사이를 지나는 유체의 유량 q_x 를 식(3.1.8)의 분포를 적분하여 표현하면 다음과 같고,

$$\begin{aligned} q_x &= \pi D \int_0^h u(z)dz \qquad (3.1.9) \\ &= \frac{\pi D h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\pi D U h}{2} \\ &= \frac{h^3}{3Dl\eta} F - \frac{\pi D U h}{2} \end{aligned}$$

식(3.1.9) 의 유량은 연속방정식에 따라 피스톤 전면부의 유량,

$$q = AU = \frac{\pi D^2 U}{4} \qquad (3.1.10)$$

와 같아야 하므로,

$$\frac{h^3}{3Dl\eta} F - \frac{\pi D U h}{2} = \frac{\pi D^2 U}{4} \qquad (3.1.11)$$

의 관계식이 성립하고 이로부터 속도 U로 움직이는 원형단면 오일 댐퍼의 피스톤에 작용하는 힘 F는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{3\pi D^3 l\eta}{4h^3}\left(1 + \frac{2h}{D}\right) U \qquad (3.1.12)$$

식 (3.1.12)와 식(3.1.1)을 비교하면, 원형 dashpot을 갖는 오일 댐퍼의 감쇠정수 C는,

$$C = \frac{3\pi D^3 l\eta}{4h^3}\left(1 + \frac{2h}{D}\right) \approx \frac{3\pi D^3 l\eta}{4h^3} \qquad (3.1.13)$$

와 같음을 알 수 있다. 즉, 감쇠정수 C 는 유체의 점도 η에 비례하고, 피스톤의 직경 D의 세제곱에 비례하고, 피스톤의 길이 l에 비례하며, 간극 h의 세제곱에 반비례한다. 식(3.1.13)에서 근사치는 h/D 가 작은 값일 경우일 때의 값이며 일반적으로 큰 감쇠력을 갖는 구조 제어용 오일 감쇠기의 경우 피스톤의 직경에 비해 간극이 작으므로 유효한 근사값이라고 할 수 있다.

다. RD4 변위계를 내장한 스마트 댐퍼

제3장 제1절 나. 에서 유도한 원형 dashpot 모델의 식을 이용하여, RD4 변위계를 내장한 스마트 댐퍼의 감쇠정수 C와 댐퍼의 제원 및 유체와의 관계식을 유도한다.

일반적은 원형 dashpot을 갖는 오일 댐퍼와 이 연구에서 제안하는 RD4 변위계 를 내장한 스마트 댐퍼와의 가장 큰 차이는 피스톤 rod 에 RD4 변위계를 내장하게 되므로, 이를 위한 공간을 고려해야 한다는 점이다. 따라서 RD4 변위계를 내장하는 스마트 댐퍼는 유체에 저항하는 피스톤의 면적이 RD4 변위계가 장착되는 rod의 면적만큼 줄어들게 된다.

유체가 저항하는 피스톤의 면적이 줄게 되므로, 식(3.1.5), 식(3.1.6)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{4F}{\pi(D_o^2 - D_i^2)} \qquad (3.1.14)$$

$$p(x) = -\frac{4F}{\pi(D_o^2 - D_i^2)l}x \qquad (3.1.15)$$

여기서, D_o는 피스톤의 직경, D_i는 RD4 변위계 가 관통하기 위한 rod의 직경이다.

간극을 통과하는 유량을 산정하기 위한 식(3.1.8),(3.1.9)는 피스톤의 직경을 고려해야 하므로,

$$\begin{aligned} q_x &= \pi D_o \int_0^h u(z)dz \qquad (3.1.16) \\ &= \frac{\pi D_o h^3}{12\eta}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\pi D_o U h}{2} \\ &= \frac{D_o h^3}{3(D_o^2 - D_i^2)l\eta}F - \frac{\pi D_o U h}{2} \end{aligned}$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (3.1.16)에서 압력구배 $\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{4F}{\pi(D_o^2 - D_i^2)l}$ 임에 유의해야 한다.

식(3.1.16)의 유량과 연속방정식에 의해 같은 유량을 나타내는 피스톤 전면부의 유량은 식(3.1.10)에서 rod 에 의해 감소된 면적을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q' = A'U = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)U}{4} \qquad (3.1.17)$$

식(3.1.16), (3.1.17)의 유량에 연속방정식을 적용하면,

$$\frac{D_o h^3}{3(D_o^2 - D_i^2)l\eta}F - \frac{\pi D_o U h}{2} = \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)U}{4} \qquad (3.1.18)$$

이고, 댐퍼에 작용하는 힘 F 와 피스톤의 속도 U 사이의 관계는 다음과 식(3.1.18)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F = \frac{3(D_o^2 - D_i^2)l\eta}{D_o h^3}\left[\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} + \frac{\pi D_o h}{2}\right]U \qquad (3.1.19)$$

식(3.1.19)와 식(3.1.1)을 비교하면 RD4 변위계를 내장한 스마트 댐퍼의 감쇠 정수 C는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{3(D_o^2 - D_i^2)l\eta}{D_o h^3}\left[\frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4} + \frac{\pi D_o h}{2}\right] \qquad (3.1.20)$$

라. 소형 스마트댐퍼 기본설계

(1) 설계 사양

식(3.1.1)과 식(3.1.20)을 사용하여, RD4 변위계를 내장한 소형 스마트 댐퍼의 기본설계를 수행한다. 설계 사양은 다음과 같다.

- 최대 감쇠력 : 3500 N @ 1.6 m/sec
- 감쇠 정수 : 2200 Ns/m
- 허용 스트로크 : ±(160+15) mm
- 사용오일 (DTE-25) viscosity : $44.2 \times 10^{-6}\, m^2/s$
- 사용오일 (DTE-25) 단위질량 : $0.876 \times 10^{3}\, kg/m^3$

설계 사양에서 감쇠정수는 댐퍼의 피스톤이 1.6 m/s의 속도로 움직일 때 감쇠력이 3500 N이 발휘되도록 정해진 값이며(식(3.1.1)), 이는 중립상태에서 압축이나 신장 방향으로 여유분 15 mm를 제외한 허용스트로크 범위를 0.1초에 다다를 수 있는 용량이다. 또한 사용오일의 동적 점도 η는 정적점도와 단위질량의 곱으로 나타내어지므로 $\eta = [44.2 \times 10^{-6}][0.876 \times 10^{3}]$ = 0.0387 Pa-sec 로 계산된다.

식 (3.1.20)에서와 같이, 주어진 C,η 값에 대하여 정해야 할 설계 변수는 피스톤의 외측지름 D_o, RD4 변위계 rod 가 통과할 피스톤의 내측지름 D_i, 피스톤과 실린더의 간극 h, 그리고 피스톤 길이 (간극의 오일 유체 통과 길이)l 이다. 이 설계에서는 D_i=50 mm 일 때, 외경 D_o 와 간극 h 값을 변화시켜가며 이에 대한 피스톤 길이 l을 결정하는 방법으로 설계한다.

댐퍼 제작 시 간극이 가장 중요한 변수가 되며, 간극이 너무 작을 시 가공시에 문제가 생긴다. 또한 피스톤의 직경이 너무 커지거나 길이가 길어지게 되면 댐퍼 전체의 크기가 늘어나게 되므로 비경제적이 된다. 최종 설계 제한 조건을 다음과 같이 고려하였다. 여기서 가공의 편의와, 수학적 모형의 오차를 고려하여 목포 감쇠 계수 C값의 오차는 ±10%를 고려하였다.

- $1mm \le h \le 3mm$
- $2 \le D_o/D_i \le 3$
- $C = 2200 \pm 22\ Ns/m$

(2) 기본 설계 결과

제시한 설계변수 값에 대하여 다음과 같이 설계를 수행하였다. 아래 표에서 l^*와 C^*는 각각 가공의 편의를 위하여 설계값으로 정한 피스톤 길이와 그때의 댐퍼 감쇠정수값이다.

표 3.1.3 피스톤 길이에 따른 댐퍼의 감쇠정수값

D_o(mm)	h(mm)	l(mm)	l^*(mm)	C^*(Ns/m)
100	1.0	41.8	42.0	2212.8
	1.5	139.1	140.0	2213.8
	2.0	325.6	325.0	2195.9
	2.5	628.0	630.0	2207.0
	3.0	1071.8	1070.0	2196.4
120	1.0	20.0	20.0	2196,6
	1.5	66.9	67.0	2201.9
	2.0	157.1	157.0	2198.0
	2.5	304.0	304.0	2200.2
	3.0	520.3	520.0	2198.9
150	1.0	8.9	9.0	2222.4
	1.5	29.8	30.0	2211.1
	2.0	70.2	70.0	2192,6
	2.5	136.2	136.0	2196.9
	30	233.6	233.0	2193.9

마. 대형 스마트댐퍼 기본설계

(1) 설계 사양

대형 스마트댐퍼의 설계 과정은 앞서 소형 댐퍼의 설계과정과 동일하다. 설계사양은 다음과 같다.

- 최대 감쇠력 : 100kN @ 300mm/sec
- 감쇠 정수 : 333,333 Ns/m
- 허용 스트로크 : ±(200+15) mm
- 사용오일 (신에츠, KF-96-100CS)

표 3.1.4 댐퍼에 사용된 오일의 사양

제품명	KF-96-100CS
외관	무색투명액체
점도 25℃(㎟/s)	100
점도 50℃(㎟/s)	64.6
점도 100℃(㎟/s)	31.3
비중 25℃	0.965
휘발분(%) 150℃/24시간	0.5 이하
굴절율 25℃	1.403
유동점 ℃	-50 이하
인화점 ℃	300 이상

(2) 기본 설계 결과

설계결과는 다음과 같다. 이 설계에서는 $D_i = 70mm$ 일 때, 외경 D_o 와 간극 h 값을 변화시켜가며 이에 대한 피스톤 길이 l을 결정하는 방법으로 설계한다.

표 3.1.5 외경과 간극의 변화에 따른 피스톤 길이

D_o(mm)	h(mm)	l^*(mm)	C^*(Ns/m)
100	0.2	120	359
105	0.2	90	369
	0.2	95	390
125	0.3	115	360
	0.3	120	376
130	0.3	95	358
	0.3	100	377
	0.3	105	395
135	0.3	80	358
	0.3	85	380
150	0.4	120	355

3. 데이터 통신 모듈 분석 및 선정

계측장치로부터 나오는 신호를 발송하는 방식에는 유선으로 통신하는 방식과 무선 전자파로 통신하는 방식으로 나눌 수 있다. 장치가 현장에 설치되어 장기간 사용되는 점을 고려하면 무선 전자파로 통신하는 방식이 적절하다. 무선 전자파 통신방식은 센서와 PCB 판, 전원장치 등을 비자성 재료로 만든 케이스 속에 고정하여 설치할 수 있도록 하였다.

주요 무선 전자파 통신방식에 대한 기술은 다음과 같다.

• Bluetooth 기술
  – 블루투스는 WPAN 개념의 무선통신기술로 2.4 GHz 대역의 ISM 밴드를 사용하여 초기에는 소출력 저가격의 정보/디지털가전 기기(휴대폰, 노트북PC, 디지털 카메라, 홈네트워크)간의 소규모 무선통신망 기술로 출발함
  – 블루투스를 이용한 소규모 무선통신망은 1개의 마스터노드에 다수의 Slave노드로 구성된 무선통신네트워크를 구성하여 구축함
  – 블루투스는 Philips, SONY, Toshiba 등을 중심으로 최근에는 홈네트워크에서 오디오, 비디오 파일전송, 소호사무실에서 네트워킹, 무선센서네트워크에서 이동연결성을 제공해주는 기술로 발전하고 있음
  – 블루투스는 1998년 Bluetooth Special Internet Group(SIG)으로 출발하여 1999년에는 Bluetooth ver. 1.0을 시작으로 현재는 ver. 2.0 이 출시되고 있음

• UWB 기술 (IEEE802.15.3a)
  – 국내 연구 개발은 정보통신부의 지원을 받아 현재 ETRI와 산연공동(공동연구기관: 신화정보시스템, 크로스반도체, 필아이티)으로 시스템 개발을 진행한 후 DMA UWB 시스템과 Multiband OFDM 시스템 개발을 완료

• Nanotron 기술
  – 센서네트워크를 위한 근거리 무선통신기술로 물리계층을 제외한 Data Link Layer(MAC)계층이상의 프로토콜은 Zig-Bee 기술과 동일하며, Zig-Bee Alliance임
  – Nanotron 기술의 물리계층은 무선전송을 위해 Chirp Spread Spectrum(CSS)기술을 사용함
  – CSS 무선변복조 기술은 노이즈 및 멀티패스 페딩에 강하고, 주어진 대역폭을 가장 효율적으로 사용할 수 있으며, 에코 제거를 위한 신호처리과정이 필요 없는 장점을 가짐

• ZigBee 기술
  – 지그비(Zigbee)는 IEEE 802.15.4표준 중 하나로 저전력, 저가격, 사용의 용이성을 자랑하는 무선센서네트워크의 대표적인 기술임
  – 반경 30 m안에서 250 Kbps의 속도로 데이터를 전송하며, 메시네트워크 구조를 이용하면 하나의 무선 네트워크에 약 255대의 기기를 연결 할 수 있음
  – 다른 무선 통신 기술과 달리 AA알카라인 건전지 하나로 1년 이상을 쓸 수 있을 정도로 전력 소모도 적고 싼 가격으로 제품을 구현할 수 있음
  – 쎄트리 마이크로 시스템즈에서는 CSMA/CA 방식의 IEEE 802.15.4 MAC을 FPGA 상태로 개발 완료하여 Evaluation 보드로 성능 검증
  – 레이디오펄스에서는 915 MHz/2.4 GHz의 듀얼밴드 ZigBee RF 모뎀을 개발

표 3.1.6 주요 무선 네트워크 기술 비교

	Bluetooth	UWB	Nanotron	Zig-Bee
표준화	802.15.1 완료	802.15.3a 완료	802.15.4 완료	802.15.4 완료
동작주파수 대역	2.4GHz (ISM band)	3.1~10.6GHz	2.4GHz	2.4GHz /915MHz
최대속도	~720kb/s	114Mb/s (~480Mb/s)	2~8Mb/s	250kb/s, 40kb/s,20kb/s
변조방식	FHSS 1600 hops/s	TH-PPM,PAM or Biphase pulse	CSS	MSK,BPSK
통달거리	<10m	<10m	<800m	<30m>
접속망형태	Peer-to-peer Master-slave	Peer-to-peer multi-hop	Peer-to-peer multi-hop	Star, Peer-to-peer
실시간성 지원	Yes	Yes	Yes	Yes
주요응용	Mobile phone Portable terminals	Home device	Sensor network, Home Network	Sensor network, Home Network

무선 전자파 통신방식 선정은 전력 소모량, 가격의 경제성, 사용의 용이성, 전파의 직진성 등을 고려하여 ZigBee 방식을 선정하였다.

이로부터 데이터 통신 모듈의 하드웨어를 다음과 같이 구성하였다.

가. USB to UART 장치

본 장치는 PC의 USB port를 이용하여 COM port를 생성하고, ATmega2560 board의 UART 신호를 PC에서 인식할 수 있도록 변경한다.

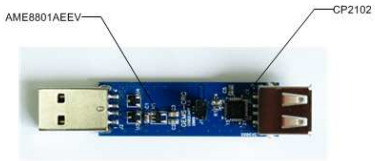


그림 3.1.6 USB to UART 장치

나. 노드(Node)

노드의 동작 전원은 DC 3.0 ~ 3.6 V, 동작 온도는 −30 ~ 80 ℃, 크기는 40 × 60 mm이며, 특성은 표 3.1.7과 같다.

표 3.1.7 노드의 특성

MCU	
Model	ATmega2560
Type	8-bit microcontroller
Flash memory	256Kbyte
EEPROM	4Kbyte
Crystal	7.3728MHz / 32.768KHz
External	
SRAM	256Kbyte
Interface	UART, I2C, 10bit ADC, INT 등

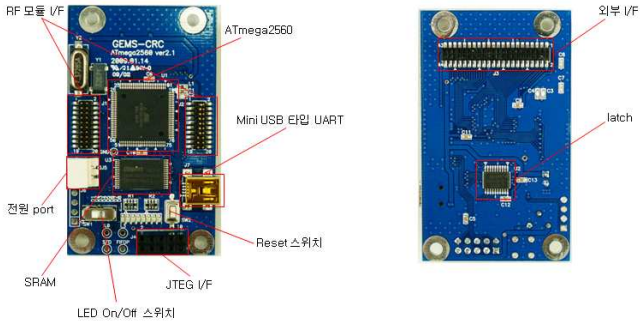


그림 3.1.7 노드

다. RF 모듈

RF 모듈의 특성은 다음과 같다.

- 동작 전원: DC 3.0 V ~ 3.6 V 범위에서 동작함
- 동작 온도: -30 ℃ ~ 80 ℃
- 주파수 : 2400 MHz ~ 2483.5 MHz
- 사용 채널: 16개
- 전송 속도: 250 kbps
- RF 출력 : Programmable output (max 10 dBm)
- 기타 : Digital LQI / RSSI 지원

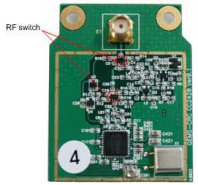


그림 3.1.8 RF 모듈

데이터 통신 모듈의 동작은 다음과 같이 설정하였다.

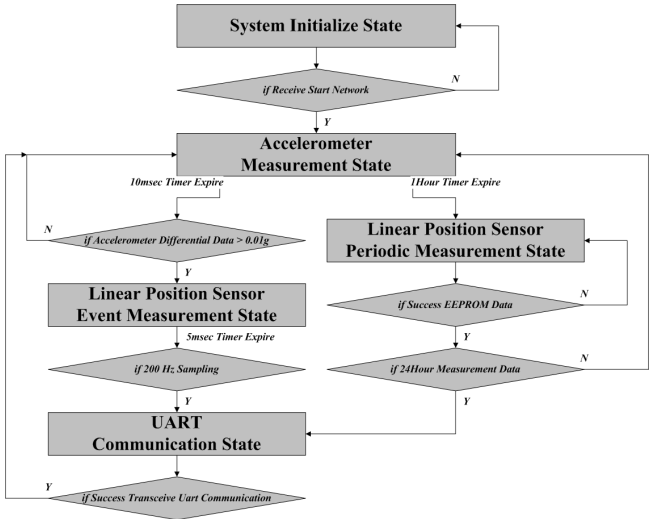


그림 3.1.9 작동 프로그램 흐름도

- 네트워크가 5초 주기로 정상적으로 동작할 때
- 센서보드는 5 msec 간격으로 3축 가속도 센서의 값을 측정하고
- 가속도 값이 0.01 G 이상으로 변화하면 가속도 센서의 값 측정을 중지하고
- 5msec 간격으로 동적 변위 센서의 값을 1분간 12,000번(1초당 200번) 측정하며
- 샘플링 완료 후 센서보드는 싱크노드까지 데이터를 RF 통신으로 전송하고
- 싱크노드는 즉시 PC로 데이터를 전송
- 또한 가속도 값의 변화와는 관계없이 1시간마다 거동량 센서의 값을 측정하여
- 싱크노드까지 전송하며
- 싱크노드는 자정까지 값을 측정하여 하루에 1개의 파일로 만들어 PC로 데이터를 전송

데이터 통신 모듈은 그림 3.1.10과 같이 2개를 제작하였다. 1차로 데이터 통신 모듈 제작하여 성능 시험을 수행하였고, 성능을 업그레이드하고 사용 및 설치의 편의를 위하여 크기를 줄여 2차로 데이터 통신 모듈 제작하여 실험을 수행하였다.

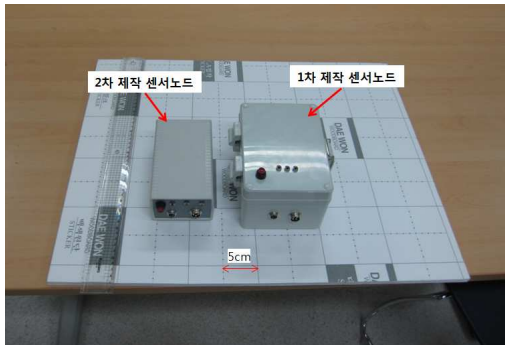


그림 3.1.10 데이터 통신 모듈

4. 결합/제작(integration)

가. 소형 댐퍼

소형 스마트 댐퍼 제작을 위해 가격이 비싼 외국산 댐퍼를 이용하지 않고 국내 댐퍼제작 전문기업인 동양시스템을 선정하여 all-in-one damper를 1차년도에 제작 하였다. 변위계 센서 통합형 감쇠기의 기본 설계, 상세도면 제작 및 가공을 순수 국내 기술로 완성하였다.

그림에서 나타낸바와 같이 RD4 변위계를 댐퍼 내부에 설치하여 제작하였다. 그림 3.1.11은 제작된 댐퍼를 보여준다. 선정된 감쇠기와 변위계를 결합한 시스템 도면은 그림 3.1.12와 같다.

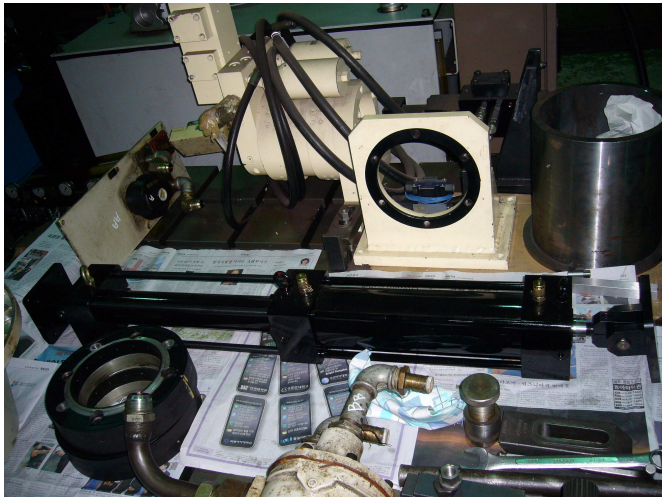


그림 3.1.11 제작된 소형 Smart damper (3.5 kN)

댐퍼의 사양은 다음과 같다:

○ 댐퍼사양
- 최대 감쇠력(Damping force) : 3,500 N
- Stroke : ±175 mm
- 감쇠정수(Damping coefficient) : 2,200 Ns/m

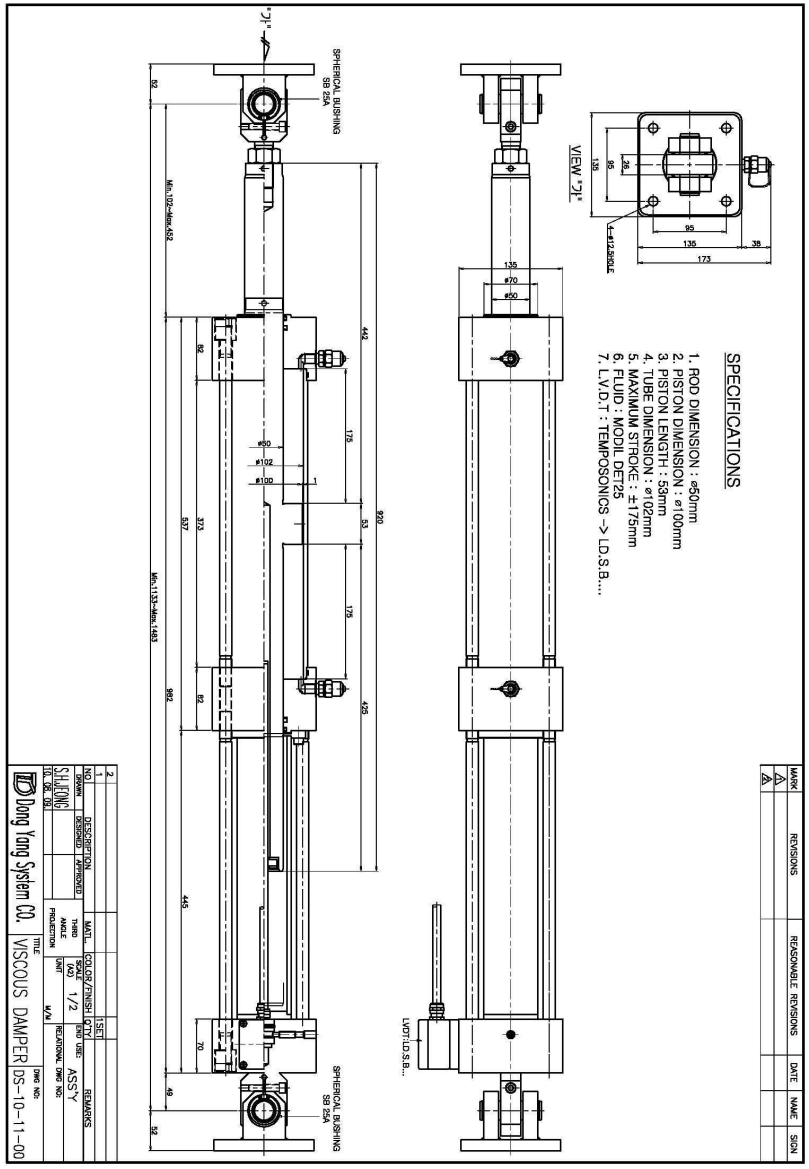


그림 3.1.12 소형 Smart damper(3.5 kN) 도면

나. 대형댐퍼

1차년도 소형댐퍼 제작 경험을 바탕으로 2차 년도에서는 100 kN 규모의 대형 스마트 댐퍼를 제작하였다. 그림 3.1.13에 제작된 대형 스마트 댐퍼를 나타내었다. 그림 3.1.14에는 감쇠기에 결합된 센서 신호검출부의 모양을 나타내었다. 선정된 감쇠기와 변위계를 결합한 시스템 도면은 그림 3.1.15와 같다.

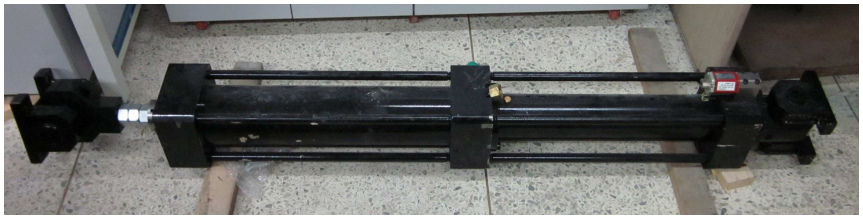


그림 3.1.13 제작된 대형 Smart Damper (100 kN)



그림 3.1.14 감쇠기에 결합된 센서 신호 검출부

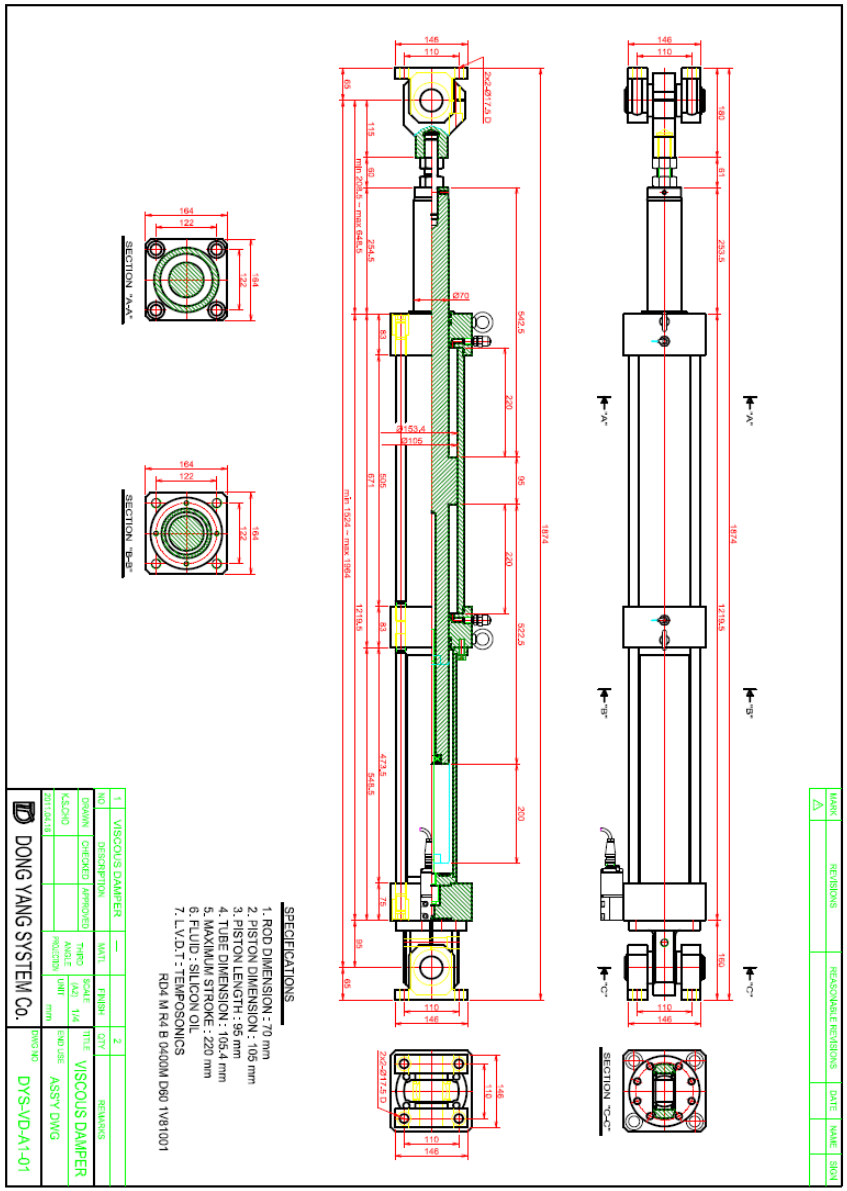


그림 3.1.15 대형 Smart damper (100 kN) 도면

5. 동적실험

제1장에서는 교량받침의 노후화에 따른 교량의 영향을 검토하였다. 교량받침 이동량 증가에 따라 교량받침의 기능이 저하되고 마모량과 마찰계수가 증가하여 교각 하부응력이 증가하여 교량의 수명을 저하시키는 영향을 주었다. 이를 개선하여 교량의 장수명화를 이루기 위해 본 연구에서는 스마트 댐퍼를 제안하게 되었다. 스마트 댐퍼는 구조물 거동 계측을 통하여 교량받침의 이동량을 파악하여 교량의 유지관리 효과를 증대시킬 수 있다. 또한 교량의 내진성능을 향상시키는 효과를 가져다준다. 표 3.1.8은 스마트 내진장치의 상시 와 지진 시 역할을 보여준다.

표 3.1.8 스마트 댐퍼의 역할

상시	– 교량의 동적 거동을 모니터링함으로서 교량받침의 유지관리를 통한 교량의 장수명화
지진 시	– 지진에너지를 흡수하는 감쇠기로서의 역할 – 지진에 의한 구조물의 동적 거동을 모니터링함으로서 발전된 정밀 동해석 개발을 위한 자료를 제공

이에 따라 제작된 댐퍼에 대해 동적실험을 이용하여 제작된 댐퍼의 실제 물성치를 파악하였다. 현장적용이 불가능하므로 제3장 제1절 6에서의 수치해석을 통해 댐퍼의 효율성과 제진효과를 평가하였다.

가. 소형 댐퍼

Smart damper 제작을 위해 가격이 비싼 외국산 댐퍼를 이용하지 않고 국내 업체인 동양시스템을 선정하여 All-in-1 Damper를 제작하기로 하였다. 또한 완제품으로 구입된 감쇠기에 변위계를 매립할 수 없으므로 감쇠기를 직접 제작하였다. 제작된 smart damper의 성능을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 실험의 목적은 오일감쇠기의 감쇠력 대 속도 곡선을 통해 감쇠기의 특성을 확인하기 위함이다.

실험은 2단계로 진행되었다. 1차 실험은 제작사의 시험장비를 이용하여 제품이 요구된 성능을 제대로 발휘하는지 확인하고, 2차 실험은 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 보다 정밀한 장비를 이용하여 수행되었다.

(1) 소형 댐퍼의 1차 실험

실험은 지그 설치와 철거를 제외한 2일 동안 수행하였으며 그 결과를 정리하였다.

우선 제작사에서 평상시 사용하는 실험장치를 이용하여 1차 실험을 수행하였다. 실험장치는 그림 3.1.16과 같이 댐퍼와 가력기가 모두 수직으로 설치되어 sinusoidal wave를

가하여 변위와 감쇠력과 같은 댐퍼의 응답을 계측하였다.



그림 3.1.16 제작된 소형 Smart damper의 실험 전경



그림 3.1.17 실험 전경

스마트 댐퍼의 실험은 표 3.1.9의 실험계획을 따라 실행되었다. Stroke를 ±125 mm으로 sinusoidal wave를 적용하여 0.05 Hz 간격으로 11 cycles를 2 set으로 수행하였다. 0.5 Hz 실험 시 최대 감쇠력 3,500 N을 초과하므로 0.6 Hz까지 11등분하여 실험을 실시하였다. Sampling frequency는 1000 Hz이다. 25 kN용량의 가력기가 사용되었다.

표 3.1.9 소형댐퍼의 실험계획 (1차 실험)

Frequency (Hz)	Duration (sec)	Vel(max)(mm/sec)
0.05	220.00	39.27
0.10	110.00	78.54
0.15	73.33	117.81
0.20	55.00	157.08
0.25	44.00	196.35
0.30	36.67	235.62
0.35	31.43	274.89
0.40	27.50	314.16
0.45	24.44	353.43
0.50	22.00	392.70
0.55	20.00	431.97
0.60	18.33	471.24

그림 3.1.18에서 그림 3.1.29까지의 그래프는 표 3.1.9에서 설정된 주파수별 스마트 댐퍼에 가해진 가력시간이력과 이에 따른 댐퍼의 힘-변위 관계를 도시한다.

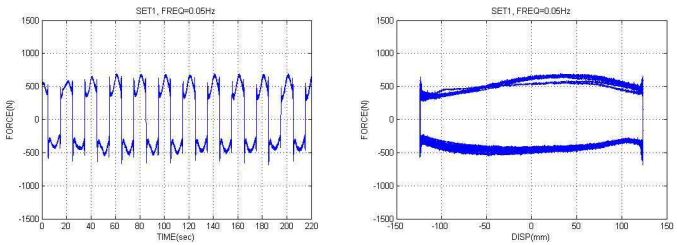


그림 3.1.18 0.05 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

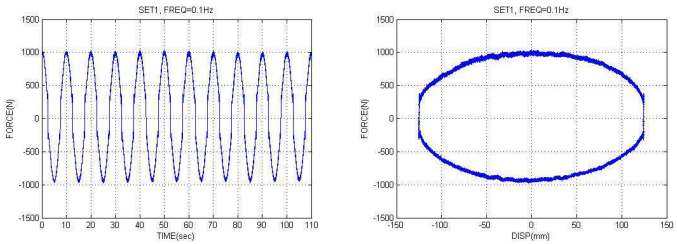


그림 3.1.19 0.10 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

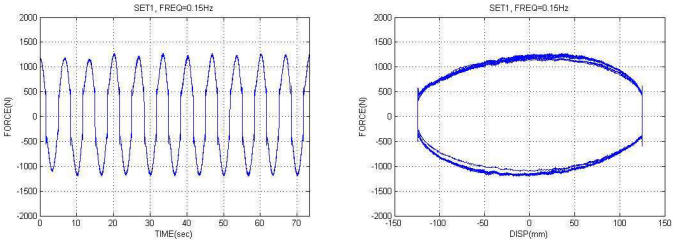


그림 3.1.20 0.15 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

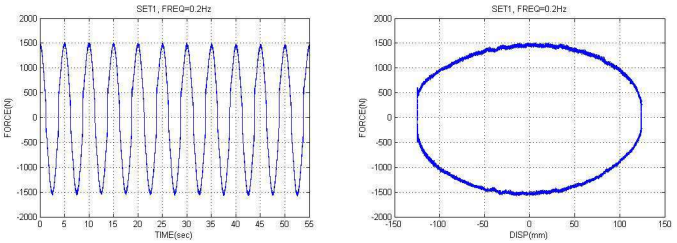


그림 3.1.21 0.20 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

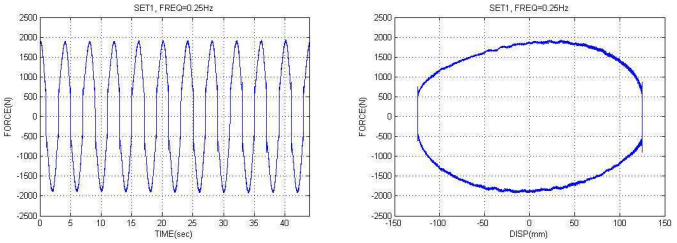


그림 3.1.22 0.25 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

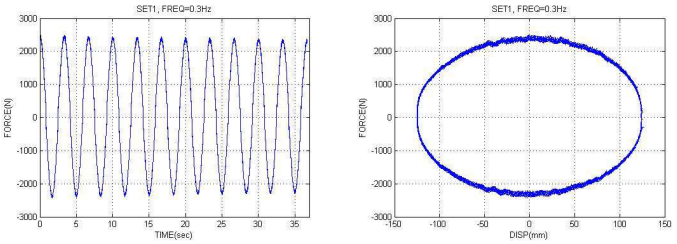


그림 3.1.23 0.3 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

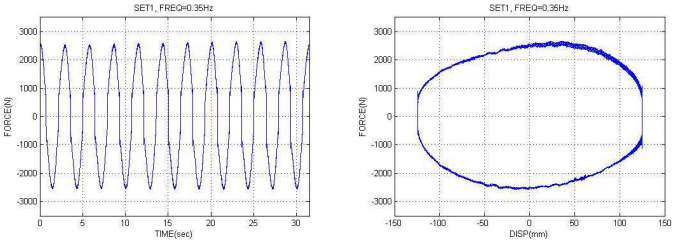


그림 3.1.24 0.35 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

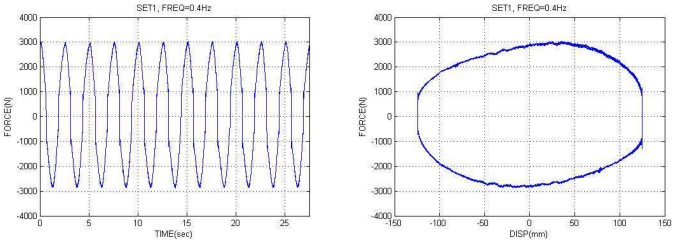


그림 3.1.25 0.40 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

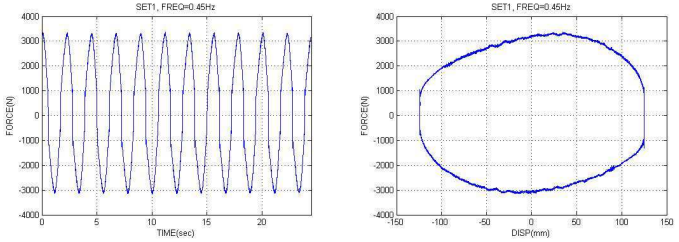


그림 3.1.26 0.45 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

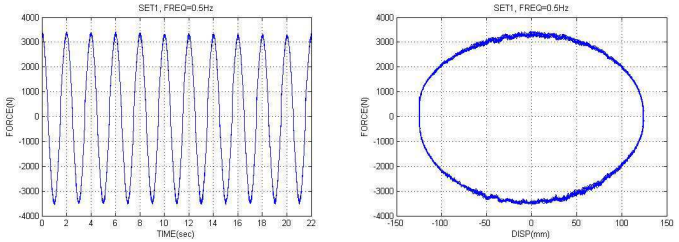


그림 3.1.27 0.50 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

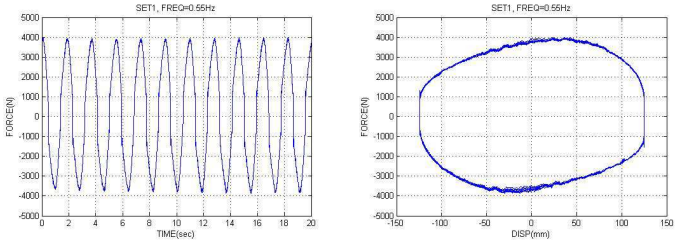


그림 3.1.28 0.55 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

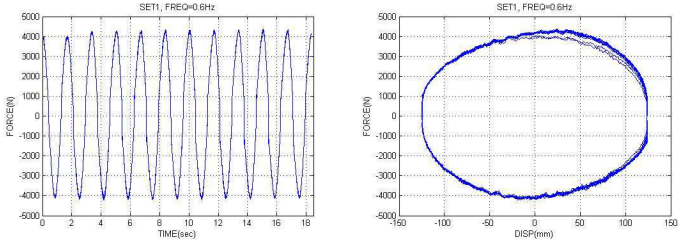


그림 3.1.29 0.60 Hz에서 가력이력 및 댐퍼의 변위이력

위 그림 3.1.18부터 그림 3.1.29까지 그래프의 힘-변위 관계는 오일감쇠기(Oil Damper)의 이론적인 관계와 유사함을 확인할 수 있다. 이를 검증하기 위해 그림 3.1.30에서는 가력속도에 따른 감쇠력을 도시하였다. 여기서도 역시 Oil Damper의 특성인 힘-속도간의 관계를 확인할 수 있다.

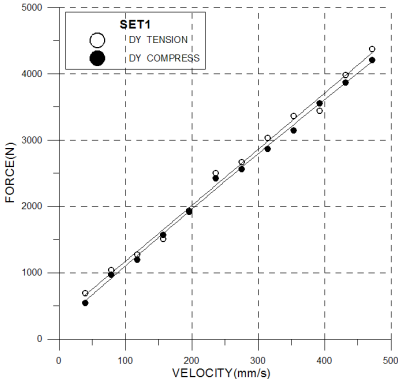


그림 3.1.30 속도에 따른 소형댐퍼의 최대감쇠력 곡선(동양)

그러나 그림 3.1.30에서 최대 가력에서 인장이 다소 압축보다 큰 것으로 나타났다. 이는 감쇠기가 수직으로 설치되었기 때문인 것으로 판단된다. 이를 검증하기 위해 댐퍼를 위-아래 거꾸로 매달려 재실험을 수행해야 하지만 제작사에 바쁜 스케줄로 인해 검증실험을 실행할 수 없었다.

따라서 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 상세 실험을 통해 이에 대한 확인을 할 수 있었다.

그럼에도 불구하고 모든 가력주파수에서 오일감쇠기의 이력곡선을 확인할 수 있었다. 이는 감쇠기가 제대로 제작되었다는 것을 증명한다. 이들 곡선을 통해 오일감쇠기의 특성치를 구할 수 있으며, 매립된 변위계의 정확한 작동도 확인 할 수 있었다.

(2) 소형 댐퍼의 2차 정밀 성능실험

정밀 성능실험은 오일감쇠기의 감쇠력-속도 관계를 통하여 감쇠기의 실제 감쇠정수를 파악하는데 중점을 두었다. 실험은 지그 설치와 철거를 포함하여 2010년 12월 7일부터 10일까지 4일간 진행되었다. 실험전경을 그림 3.1.31~3.1.34에 나타냈다.

여기서 장비의 제한이 없었으므로 스트로크를 최대인 ±175 mm에 육박한 ±160 mm으로 늘릴 수 있었다. 이에 따라 감쇠기의 최대성능을 파악할 수 있었다. 또한 온도의 영향을 검토하기 위하여 온도센서를 댐퍼측면에 부착하였다.

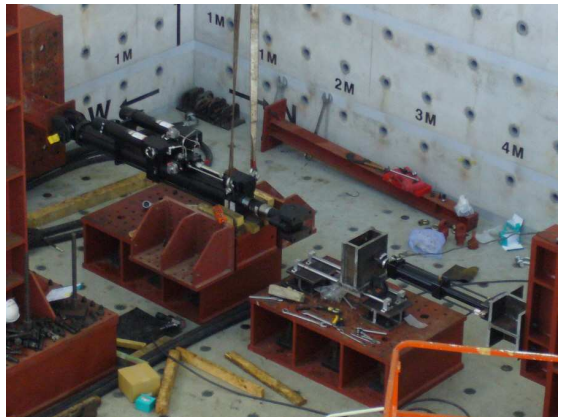


그림 3.1.31 가력기와 댐퍼의 연결부



그림 3.1.32 가력기와 연결전에 설치된 댐퍼



그림 3.1.33 수평이동 유지를 위한 가이드



그림 3.1.34 댐퍼 측면에 설치된 온도센서

소형 댐퍼의 성능실험은 sinusoidal wave로 표 3.1.10에 정리된 9개의 주파수에서 수행되었다. 각 주파수별 11개의 cycle로 반복운동을 시켜 댐퍼의 감쇠력-변위 관계를 계측하였다. 데이터는 sampling frequency 100 Hz 이상으로 획득하였다. 실험을 2회 (set 1/set 2) 수행하여 1회당 9개의 주파수를 모두 다 설정하여 진행되었다.

표 3.1.10 소형댐퍼의 실험계획 (2차 정밀 성능실험)

Frequency (Hz)	Duration (sec)	Vel(max)(mm/s)
0.40	27.50	401.737
0.35	31.43	351.599
0.30	36.67	301.430
0.25	44.00	251.233
0.20	55.00	201.013
0.15	73.33	150.776
0.10	110.00	100.525
0.05	220.00	50.265
0.02	550.00	20.106

실험에 사용된 가력기는 용량 ±250 kN, 스트로크 ±750 mm, 그리고 속도 750 mm/sec으로 소형 댐퍼를 실험하는데 충분하였다.

그림 3.1.35~3.1.43은 주파수별 계측된 감쇠력-변위 관계를 도시하고 있다.

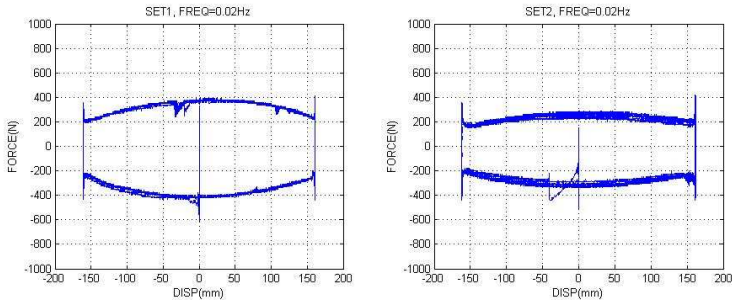


그림 3.1.35 0.02 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

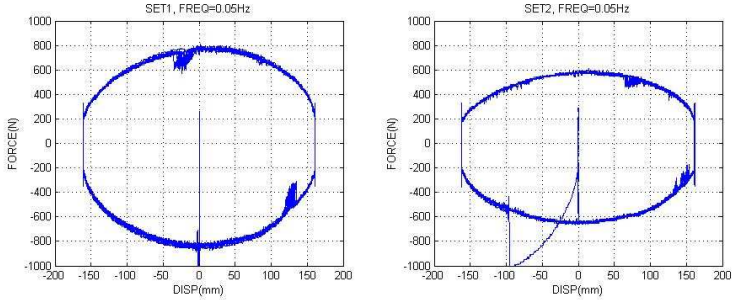


그림 3.1.36 0.05 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

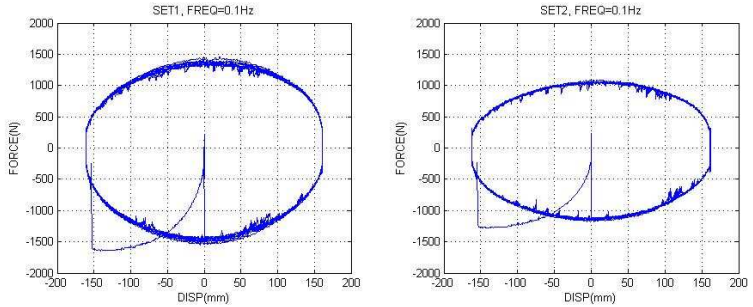


그림 3.1.37 0.1 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

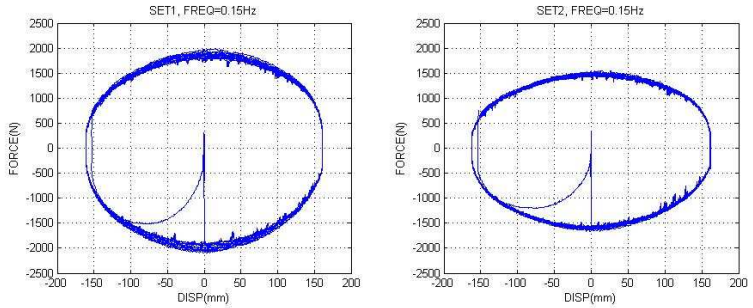


그림 3.1.38 0.15 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

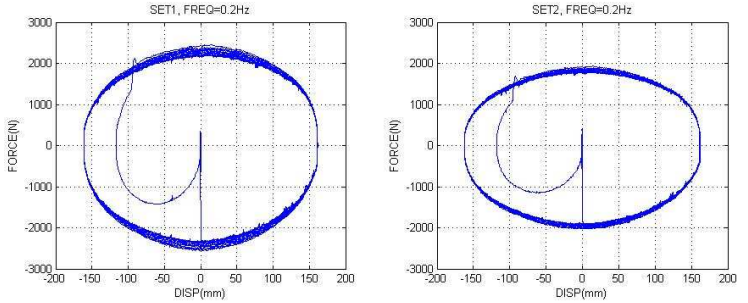


그림 3.1.39 0.2 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

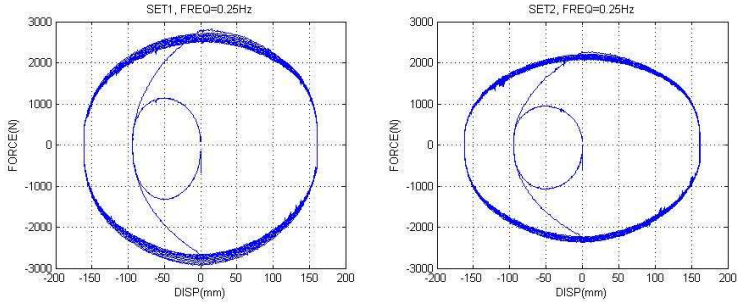


그림 3.1.40 0.25 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

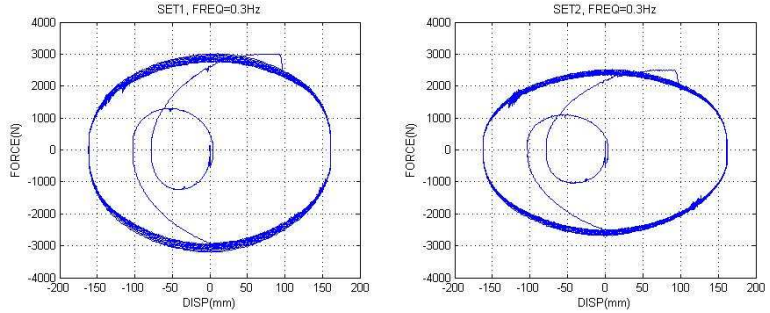


그림 3.1.41 0.3 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

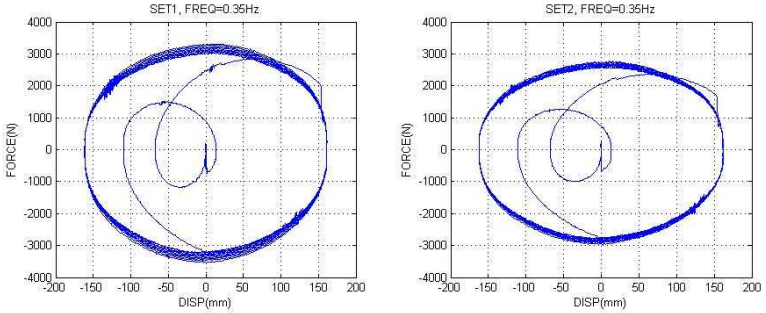


그림 3.1.42 0.35 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

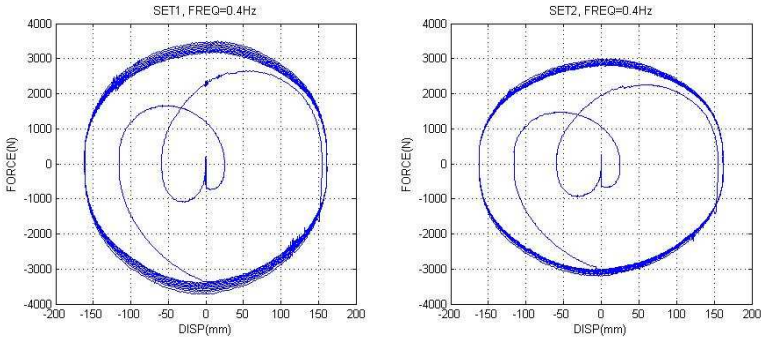


그림 3.1.43 0.4 Hz에서 댐퍼의 힘-변위이력(SET1/SET2)

그림 3.1.35~3.1.43의 그래프는 전형적인 오일감쇠기의 힘-변위의 이력곡선을 보여준다. 동일한 주파수 영역에서 감쇠력의 차이를 보이는 것은 온도의 영향으로 판단된다. 감쇠기 내의 오일의 냉각이 이루어지도록 충분한 시간적 여유를 가지고 실험을 수행해야 했지만 시험설비의 사용계약과 관련된 상황으로 단기간에 수행해야 했었다. 이러한 오일감쇠기의 온도의존성은 대다수의 제품에서 확인되는 것으로 진동의 에너지가 감쇠기에 의해 열에너지로 변화되며 에너지 소산이 이루어진다. 제품에 따라 이러한 온도의존성을 줄이기 위한 여러 가지 세부 기술들이 개발되어 있으나 본 연구에서는 본래의 기능에 충실한 오일감쇠기를 제작하였기에 온도의존성을 줄이기 위한 세부기술은 사용되지 않았다.

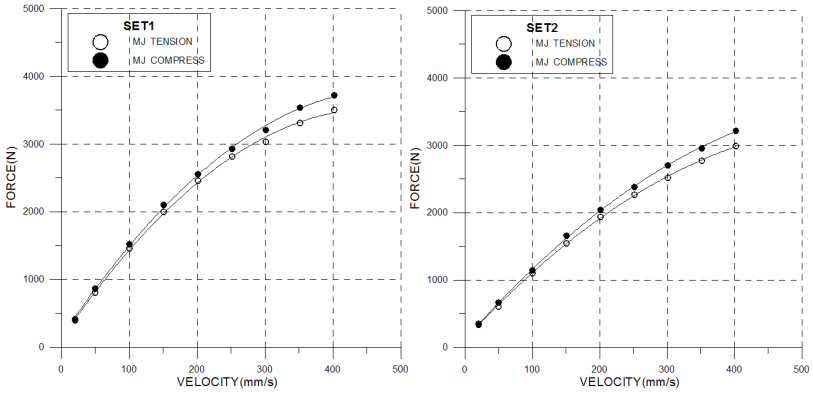


그림 3.1.44 속도에 따른 소형댐퍼의 최대감쇠력 곡선 (KOCED 실험)

그림 3.1.30과 같이 그림 3.1.44는 속도에 따른 소형댐퍼의 최대 감쇠력을 도시하고 있다. 여기서 다른 점은 더 이상 선형적인 관계가 나타나지 않은 것이다. 이는 KOCED 실험설비에 의한 실험시에 마찰이 좀 더 크게 관여되었고, 마찰의 경우 작은 변위에서는 큰 감쇠력의 증가로 나타나는 경향이 있어 이러한 부분이 고속영역에서 감쇠력이 저하되는 형태로 표출된다. 이 마찰은 그림 3.1.33의 Linear 가이드에서 기인한 것으로 두 강봉의 완전한 3차원적인 평행상태가 구현되지 않으면 피할 수 없는 것이었다. 이에 따라 2차년도 실험에서는 강봉 하나를 이용한 Linear 가이드로 교체하였다.

그림 3.1.45와 3.1.46은 제작사와 KOCED 실험센터에서 수행한 실험결과를 비교하고 있다. 그림 3.1.45의 경우 가이드의 마찰로 인해 KOCED 실험센터의 결과값이 상대적으로 큰 감쇠력을 보이고 있으며 그림 3.1.46의 경우는 연이어 수행한 KOCED 실험센터 결과값이 고열로 인해 감쇠력이 저하된 결과로 나타났다.

표 3.1.11은 KOCED 실험시설에서의 속도에 따른 댐퍼의 온도변화를 정리하고 있다. SET1에서 온도가 8.2℃에서 12.2℃로 상승하였으며 이어서 냉각 없이 SET2실험을 수행하여 12.3℃에서 14.2℃로 댐퍼측면에서의 온도가 상승하였다. 이는 실험 초기온도에서 73% 증가한 것이므로 이에 따라 오일의 특성도 약간의 변화가 생겼을 것으로 판단된다. 오일의 특성의 변화는 곧바로 댐퍼 감쇠력의 변화로 직결이 된다. 이것 또한 SET1과 SET2의 차이를 설명하고 있다.

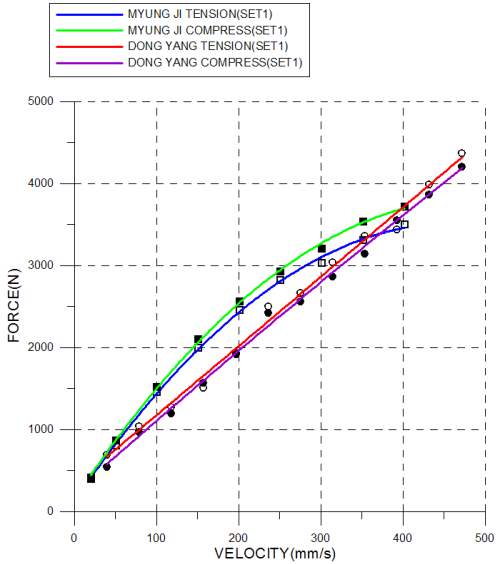


그림 3.1.45 속도에 따른 소형댐퍼의 최대감쇠력 곡선(동양, 명지1)

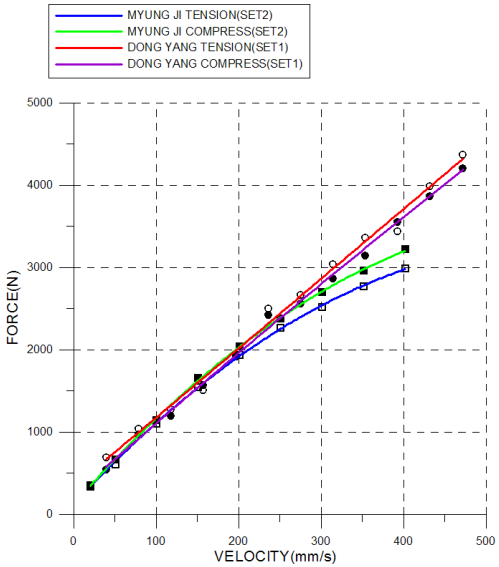


그림 3.1.46 속도에 따른 소형댐퍼의 최대감쇠력 곡선(동양, 명지2)

표 3.1.11 KOCED 실험시설에서의 속도에 따른 댐퍼의 온도변화

속도(mm/s)	SET1 온도(℃)	SET2 온도(℃)
20.106	8.2	12.3
50.265	8.2	12.1
100.525	8.4	12.2
150.776	8.5	12.6
201.013	9	12.8
251.233	9.4	13.2
301.430	10.2	13.3
351.599	11.4	13.8
401.737	12.2	14.2

나. 대형 댐퍼

1차년도에 3.5 kN의 소형 댐퍼를 제작하여 변위계 매립에 따른 제작가능성 및 성능을 확인하였다. 2차년도에는 평가의견에 따라 실물 크기의 댐퍼와 재연가능성을 입증하기 위하여 100 kN 용량의 스마트 댐퍼 2기를 제작하여 실험하였다.

대형 댐퍼의 크기로 인해 제작사의 시험장비를 사용할 수 없었으며 명지대학교 하이브리드구조실험센터에서 제작된 2기의 댐퍼 대상으로 성능시험을 수행하였다.

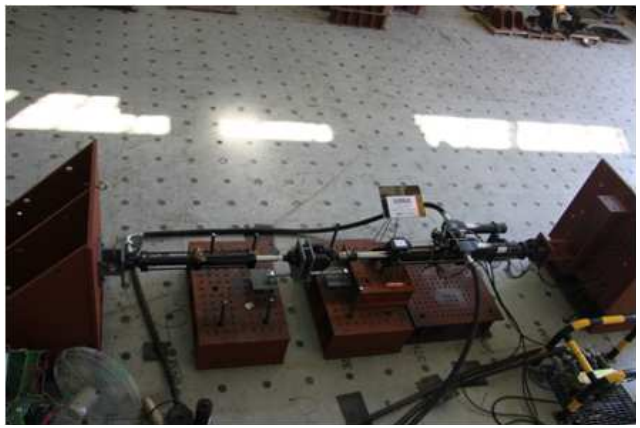


그림 3.1.47 스마트 내진장치 성능시험

그림 3.1.47과 같이 제작된 스마트 댐퍼의 성능을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험의 목적은 스마트댐퍼 감쇠력 대 속도 곡선을 통하여 감쇠기의 특성을 확인하는 것이다. 실험은 제작한 2개의 스마트 댐퍼를 대상으로 표 3.1.12와 같이 ±190 mm의 stroke로 11 cycle, 표 3.1.13과 같이 0.03 Hz부터 0.3 Hz까지 9등급의 frequency (Hz) 와 El Centro 지진파(50%), 그리고 El Centro 지진파 (100%) 의 11가지 방법으로 실험을 수행하였다. 항상 일정한 성능을 유지하는지 검증하기 위하여 0.16 Hz, 0.3 Hz, El Centro 지진파 (50%), 그리고 El Centro 지진파 (100%) 는 한 번의 실험을 더 수행하였다.

표 3.1.12 스마트 내진장치 성능시험 방법

Stroke (mm)	±190
Number of cycles (cycle)	11

표 3.1.13 스마트 내진장치 성능시험의 입력파

frequency (Hz)	vel_{max} (mm/s)
0.03	35.81
0.06	71.62
0.1	119.38
0.13	155.19
0.16	191.00
0.2	238.76
0.23	274.57
0.26	310.38
0.3	358.14
El Centro (50%)	
El Centro (100%)	

그림 3.1.48~3.1.53은 성능실험을 위해 설치된 장치와 주변기기의 배치를 보여준다. 그림 3.1.51은 1차년도 실험에서 지적된 Linear 가이드의 마찰문제를 해소하기 위해서 2 Rod 시스템이 아닌 단일 봉 시스템을 나타내고 있다.

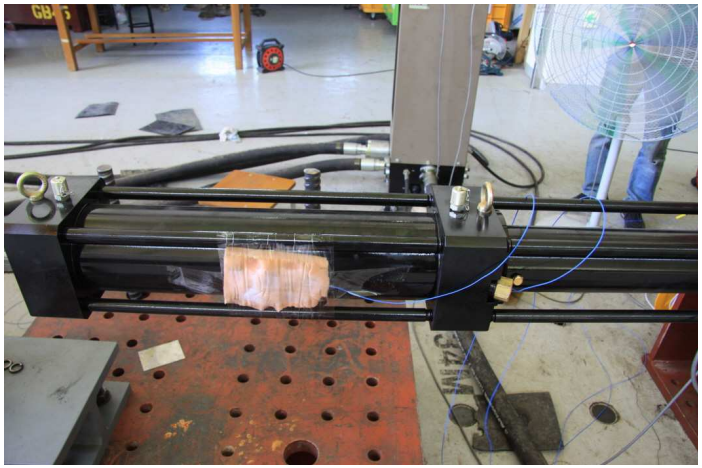


그림 3.1.48 댐퍼 냉각을 위해 설치된 대형선풍기

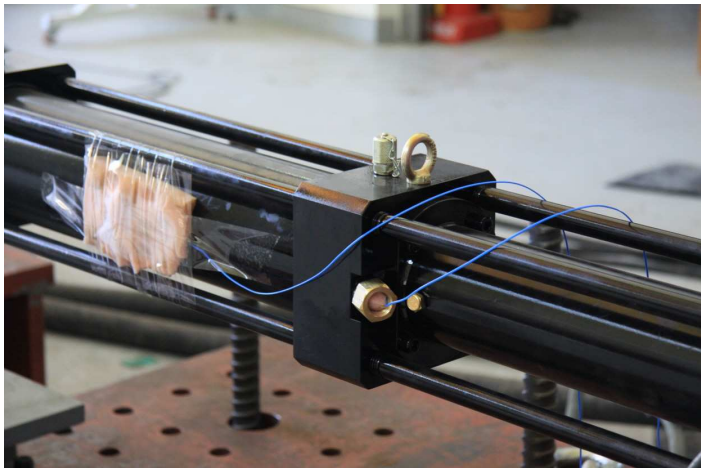


그림 3.1.49 댐퍼 측면에 부착된 온도센서



그림 3.1.50 댐퍼와 가력기 연결부



그림 3.1.51 수평이동을 위한 단일 봉 Linear 가이드



그림 3.1.52 반력벽에 장착된 댐퍼



그림 3.1.53 성능실험을 위해 설치된 댐퍼시스템

그림 3.1.54부터 그림 3.1.64까지는 KOCED 실험센터에서 수행된 댐퍼 2기에 대해 표 3.1.13의 각 주파수별 변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프이다. 여기서도 힘-변위 이력은 오일댐퍼의 전형적인 형태의 이력곡선을 보여준다. 1차년도에 소형댐퍼의 실험결과 분석을 통해 댐퍼의 감쇠력이 분명히 온도에 대한 의존성을 확인할 수 있었다. 당시 시간적 여유가 없어서 댐퍼가 냉각할 수 있는 시간을 마련할 수 없었다. 따라서 대형댐퍼 실험시 냉각을 위해 충분한 시간을 마련하려고 했으나 댐퍼의 온도가 1회 실험동안 평균적으로 약 10 ℃에서 30 ℃만큼 상승하는 것으로 계측되었다. 저속에서 온도상승폭은 10 ℃ 정도 였지만 속도가 높아짐에 따라 그 온도의 상승폭이 최대 35 ℃까지 증가하였다. 또한 온도에 따른 감쇠이력을 살펴보면 온도상승에 따라 감쇠력 저하가 분명히 나타났다. 이는 소형댐퍼 실험결과와 유사하게 고열로 인해 감쇠력이 저하된 결과를 확인할 수 있다.

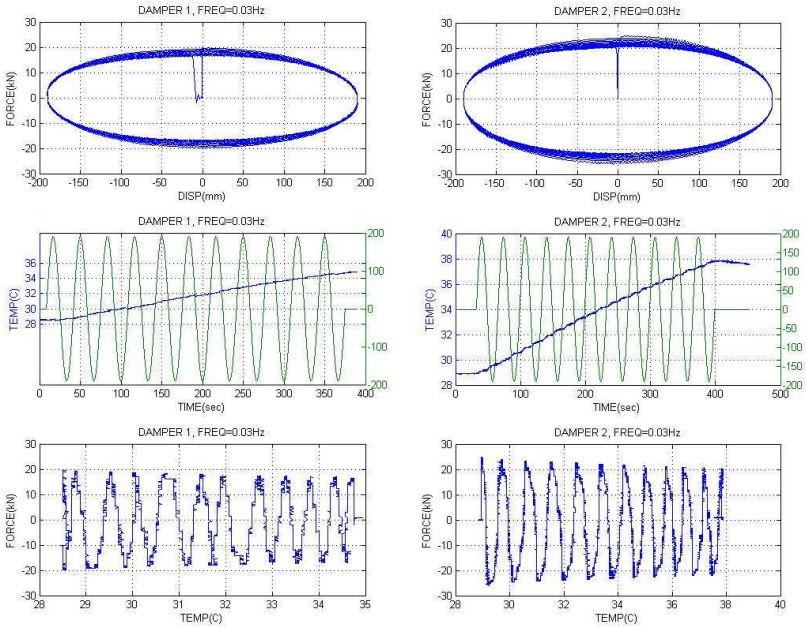


그림 3.1.54 0.03 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

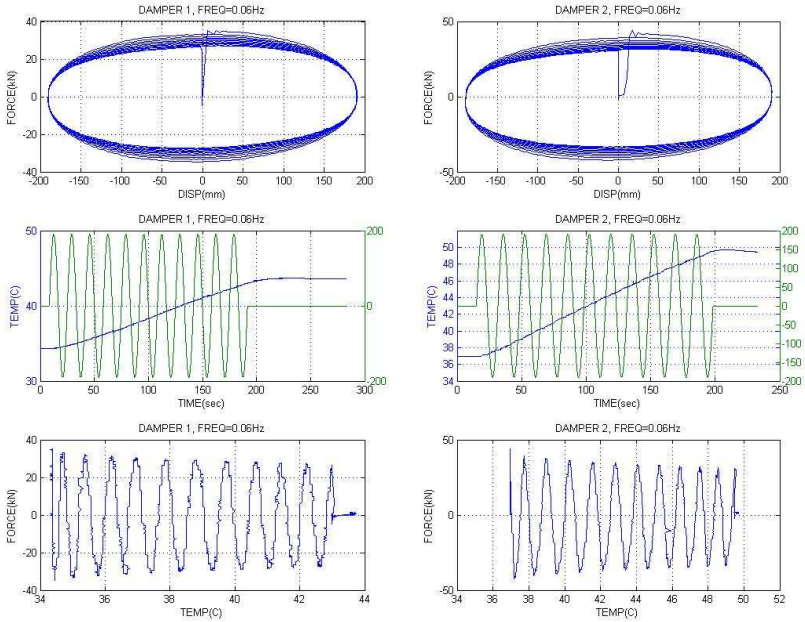


그림 3.1.55 0.06Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

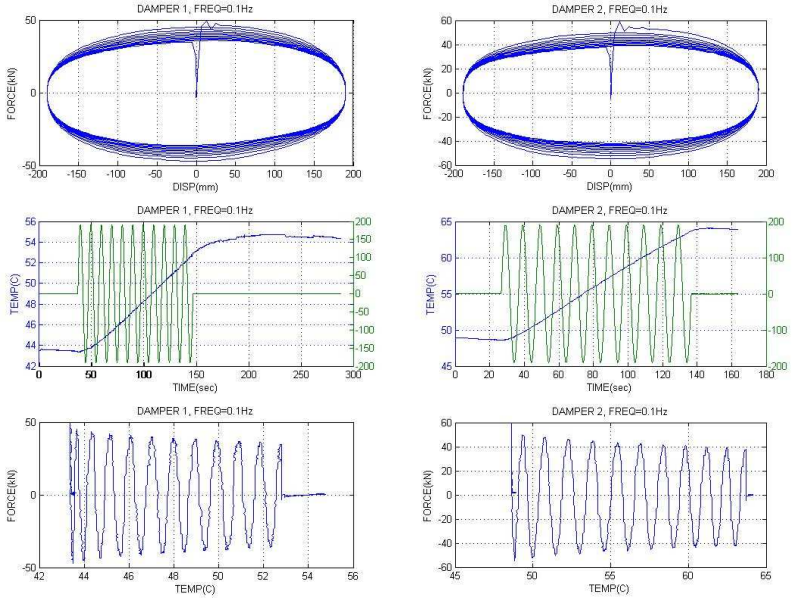


그림 3.1.56 0.10 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

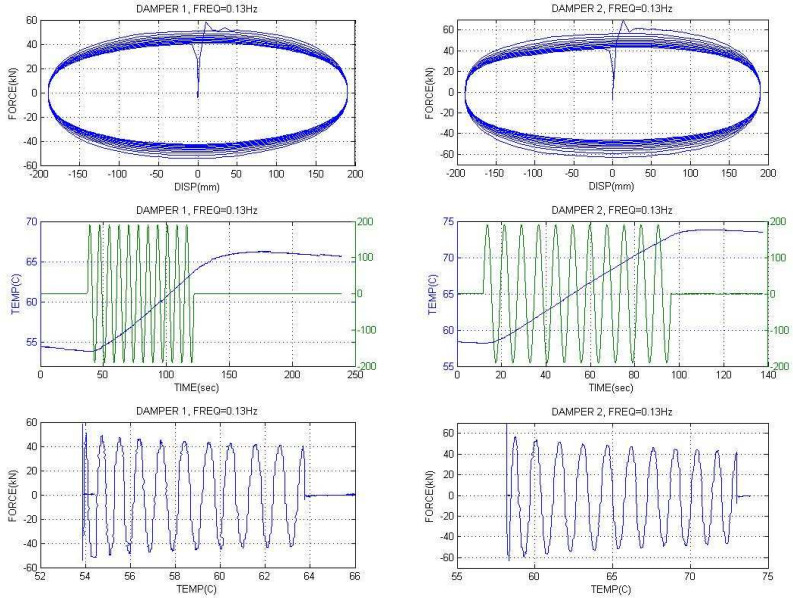


그림 3.1.57 0.13 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

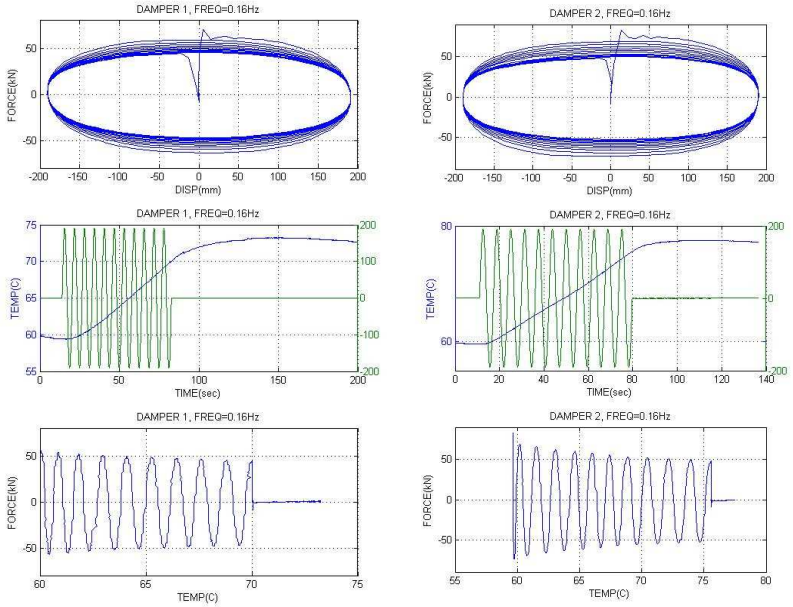


그림 3.1.58 0.16 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

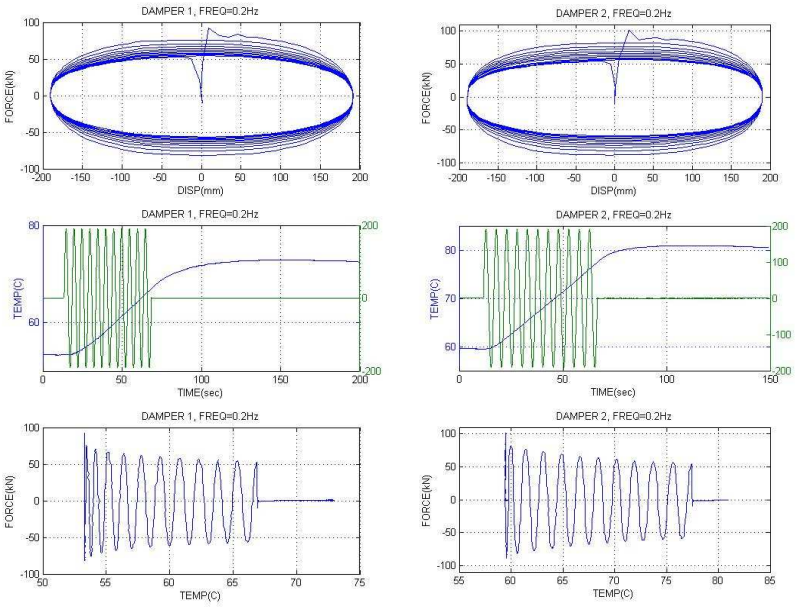


그림 3.1.59 0.20 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

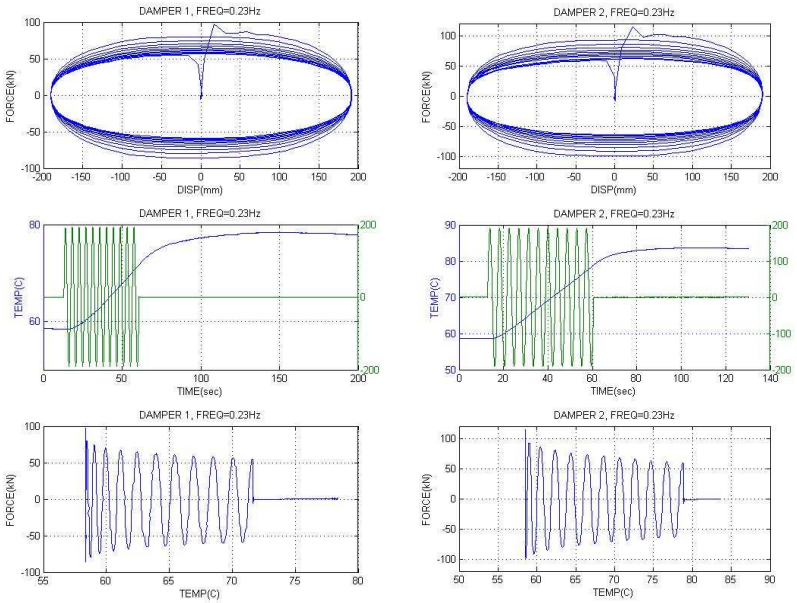


그림 3.1.60 0.23 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

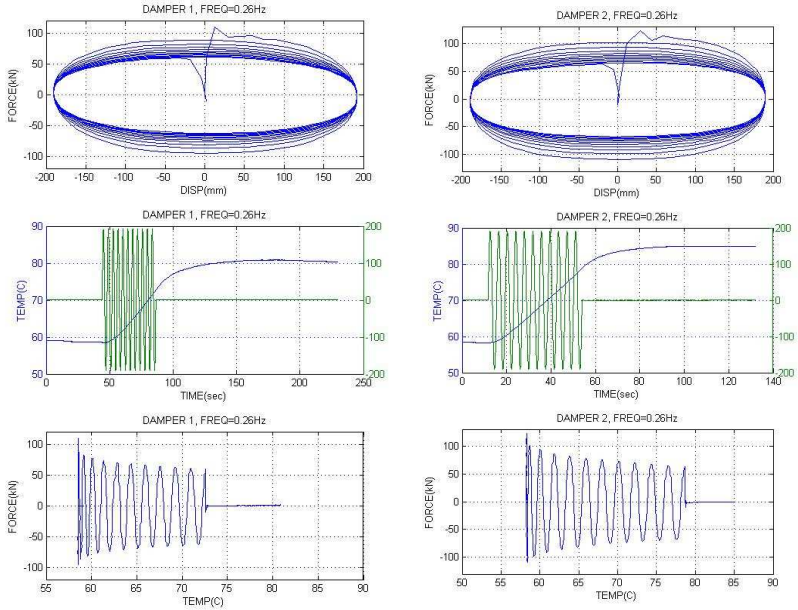


그림 3.1.61 0.26 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

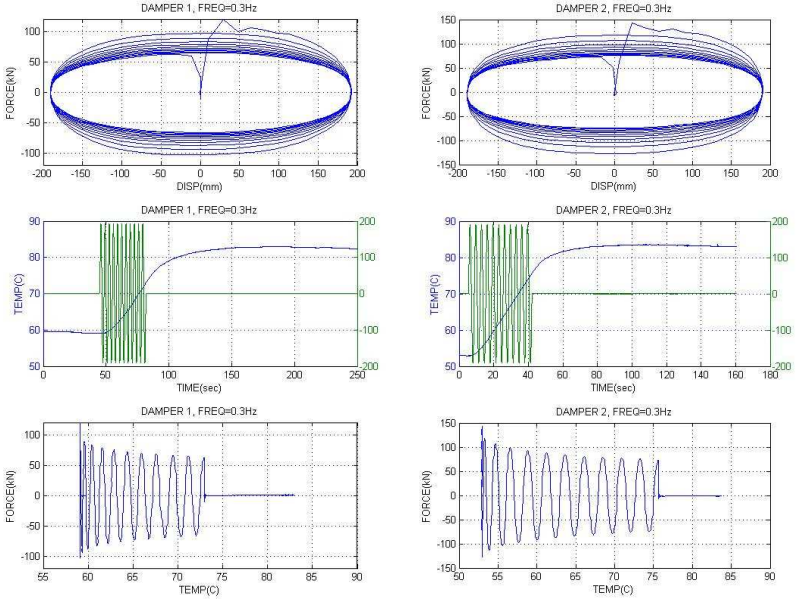


그림 3.1.62 0.30 Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

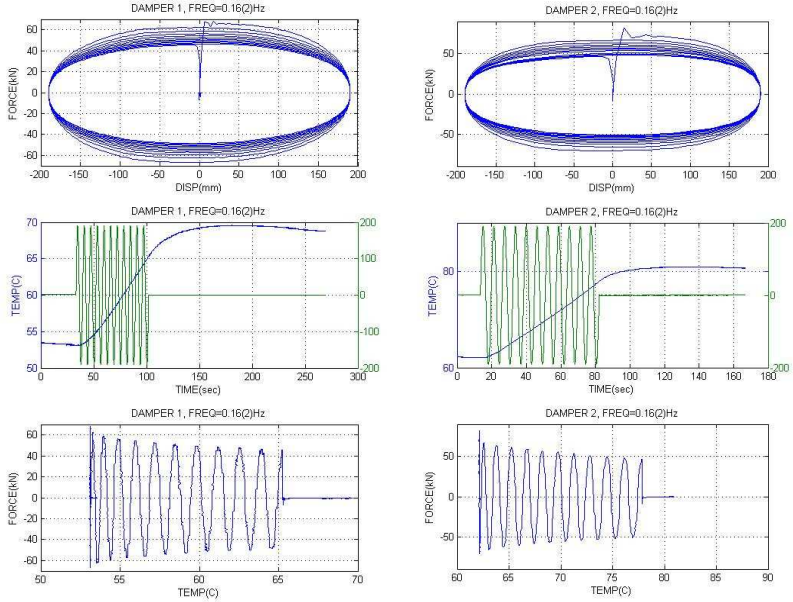


그림 3.1.63 0.16(2) Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

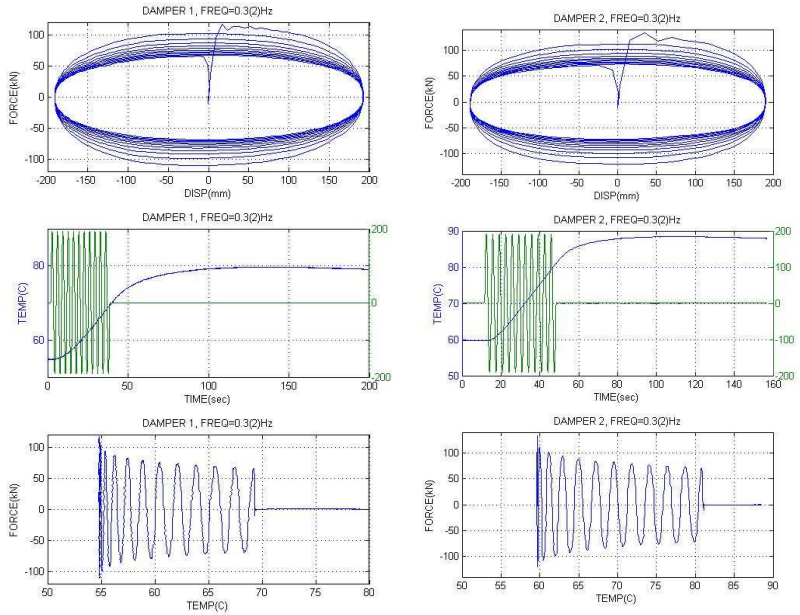


그림 3.1.64 0.30(2) Hz 입력파에서 오일 감쇠기의
변위-감쇠력, 시간-온도, 온도-감쇠력 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

그림 3.1.65~3.1.68은 각 주파수 별 최저온도와 최대온도에서의 감쇠력을 플로팅 하였다. 여기서 온도 상승에 따른 감쇠력 저하를 확연히 볼 수 있다. 이러한 오일감쇠기의 온도의존성은 대다수의 제품에서 확인되는 것으로 진동의 에너지가 감쇠기에 의해 열에너지로 변화되며 에너지 소산이 이루어진다. 제품에 따라 이러한 온도의존성을 줄이기 위한 여러 가지 세부 기술들이 개발되어 있으나 본 연구에서는 본래의 기능에 충실한 오일감쇠기를 제작하였기에 온도의존성을 줄이기 위한 세부기술은 사용되지 않았다. 또한 오일에 특성과도 직결되어 있으므로 온도의존성을 최소화를 위해 특수 오일의 사용으로도 실현될 수 있다.

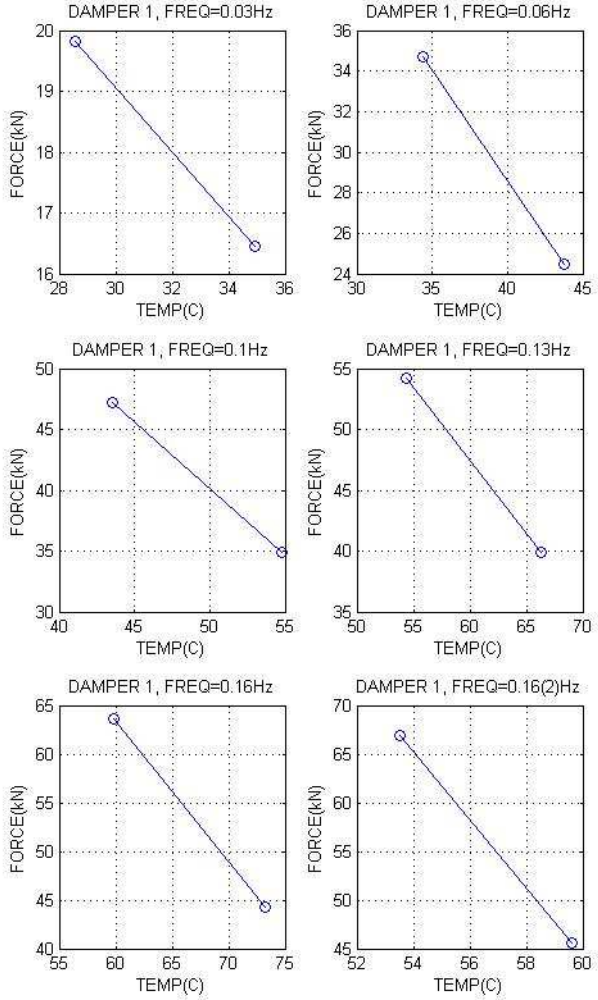


그림 3.1.65 온도에 따른 오일 감쇠기 감쇠력의 변화 그래프
(왼쪽 위부터 0.03Hz, 0.06Hz, 0.1Hz, 0.13Hz, 0.16Hz, 0.16Hz(2)(Damper1)

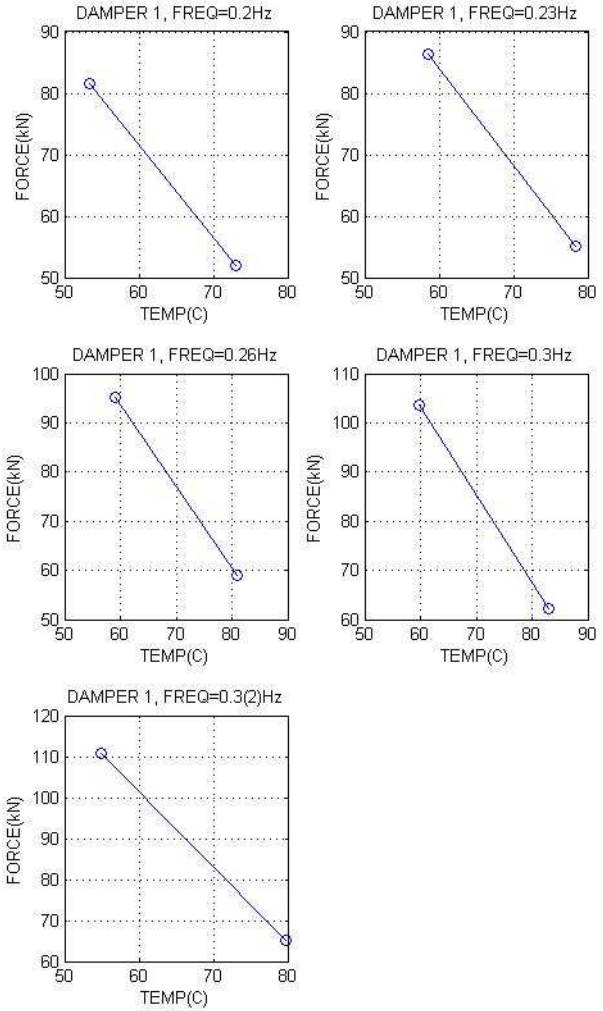


그림 3.1.66 온도에 따른 오일 감쇠기 감쇠력의 변화 그래프
(왼쪽 위부터 0.2Hz, 0.23Hz, 0.26Hz, 0.3Hz, 0.3Hz(2)(Damper1)

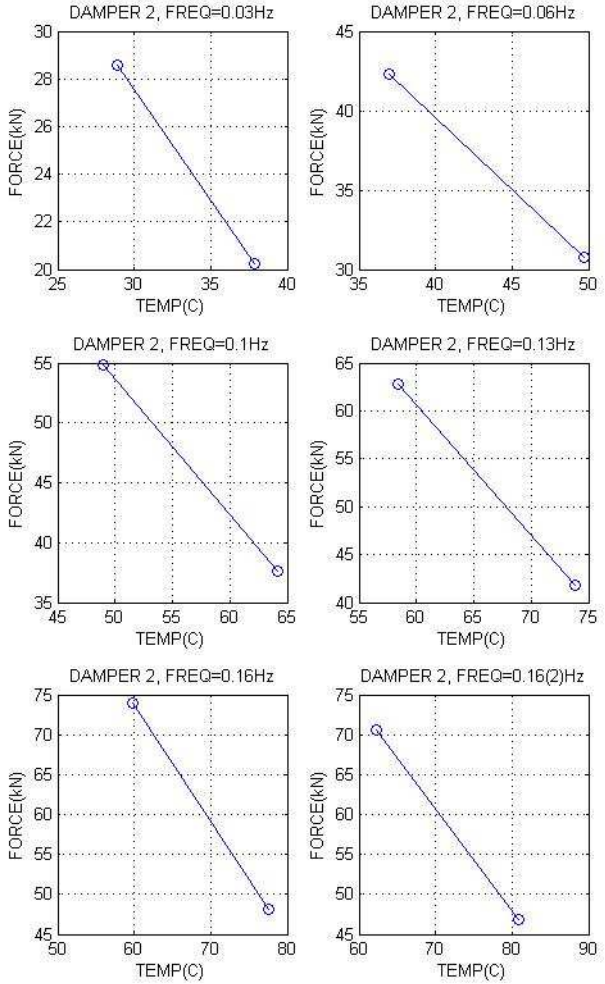


그림 3.1.67 온도에 따른 오일 감쇠기 감쇠력의 변화 그래프
(왼쪽 위부터 0.03Hz, 0.06Hz, 0.1Hz, 0.13Hz, 0.16Hz, 0.16Hz(2)(Damper2)

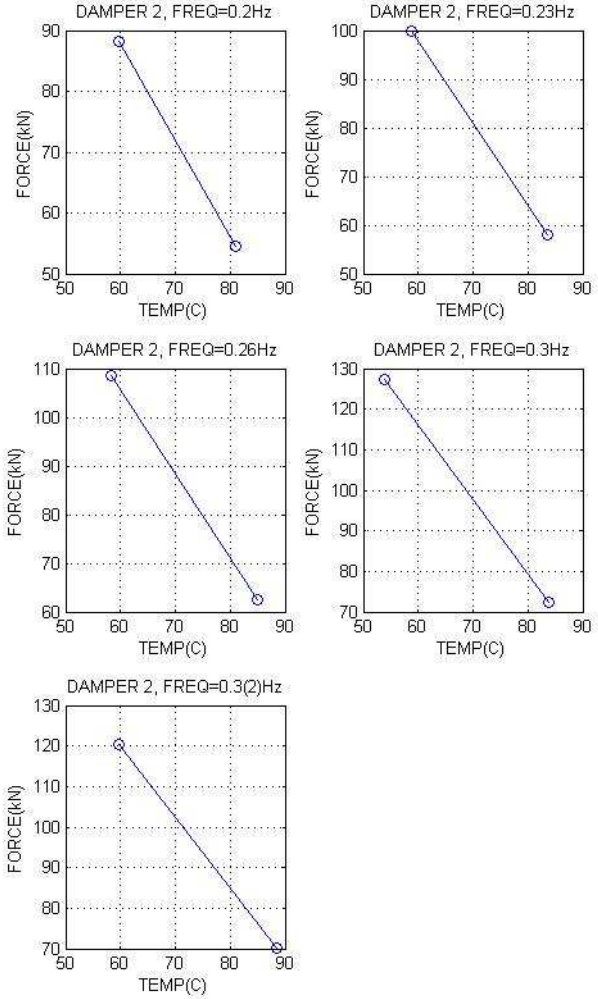


그림 3.1.68 온도에 따른 오일 감쇠기 감쇠력의 변화 그래프
(왼쪽 위부터 0.2Hz, 0.23Hz, 0.26Hz, 0.3Hz, 0.3Hz(2)(Damper2)

그림 3.1.69와 그림 3.1.70은 오일 감쇠기의 속도-감쇠력 이력을 나타낸다. 앞서 언급한 온도의존성에도 불구하고 제작된 스마트 댐퍼가 거의 선형적인 속도감쇠력 관계를 발휘하고 있는 것으로 나타나고 있다.

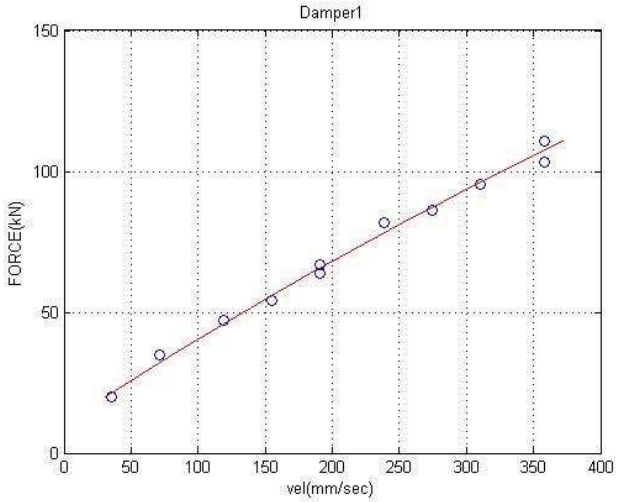


그림 3.1.69 오일 감쇠기의 속도-감쇠력 그래프(Damper 1)

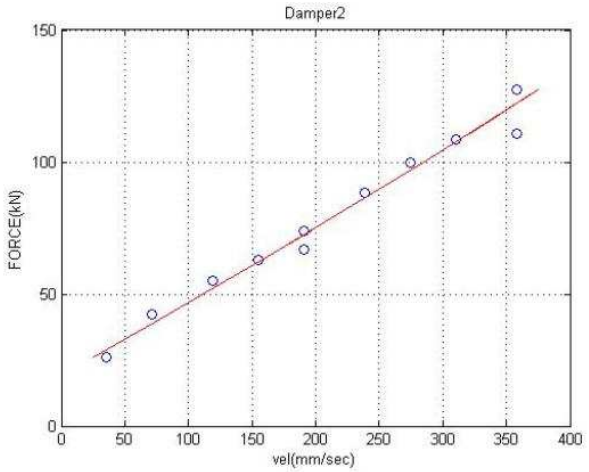


그림 3.1.70 오일 감쇠기의 속도-감쇠력 그래프(Damper 2)

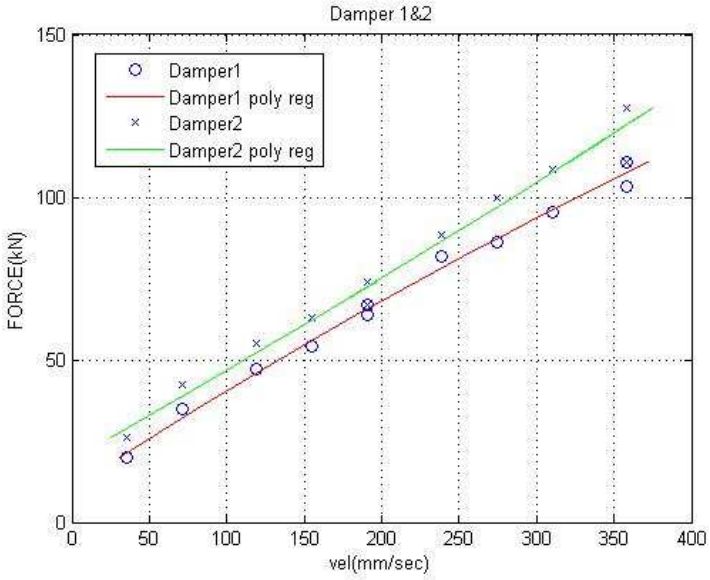


그림 3.1.71 속도에 따른 오일 감쇠기 감쇠력 비교(Damper 1 & Damper 2)

그림 3.1.71은 2기의 속도-감쇠력 이력을 비교하고 있다. 2기의 댐퍼가 유사한 거동경향을 보이지만 약간의 차이가 존재한다. 이는 대량생산이 아닌 단품 제작으로 만들어진 댐퍼 이므로 제작오차와 장기 실험으로 실험장비에 발생할 수 있는 약간의 유격으로 기인할 수 있다. 보다 더 정밀한 제작과 실험장비의 세심한 관리로 제품간의 차이를 충분히 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 3.1.72~3.1.75는 단순한 sinusoidal wave가 아닌 실제 지진이력 하에서 제작된 댐퍼의 거동을 평가하기 위해 수행된 실험결과를 나타낸다. El Centro 지진파에서의 시간-변위, 시간-감쇠력, 그리고 시간-온도 그래프를 나타내었다. El Centro 지진파를 100%를 가했을 때 온도가 약 6℃만큼 상승하였지만 지진파 50%를 가했을 때는 온도가 절반인 3℃만큼 상승하였다. El Centro 지진파의 50%나 100%에서 2기는 모두 다 제대로 작동하는 것으로 확인되었다. 또한 감쇠력도 큰 차이를 보이지 않았다.

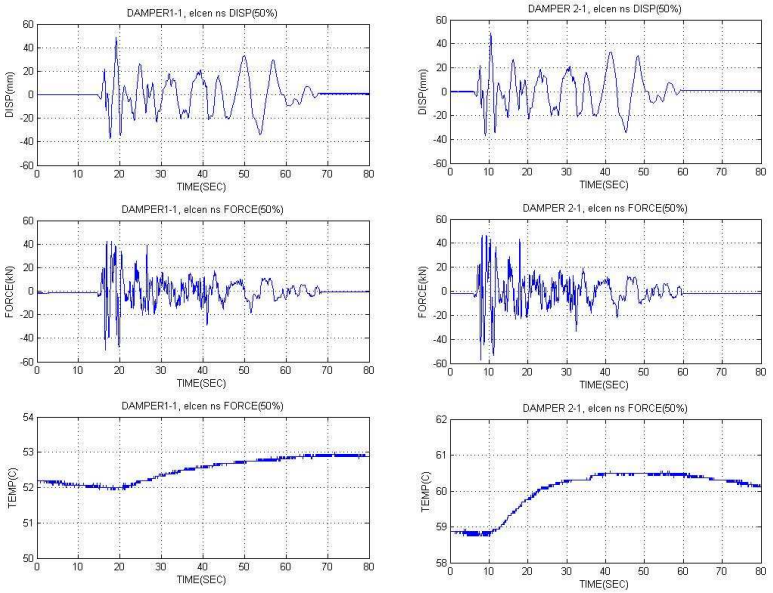


그림 3.1.72 El Centro 지진파(50%)(1)에서 오일 감쇠기의
시간-변위, 시간-감쇠력, 시간-온도 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

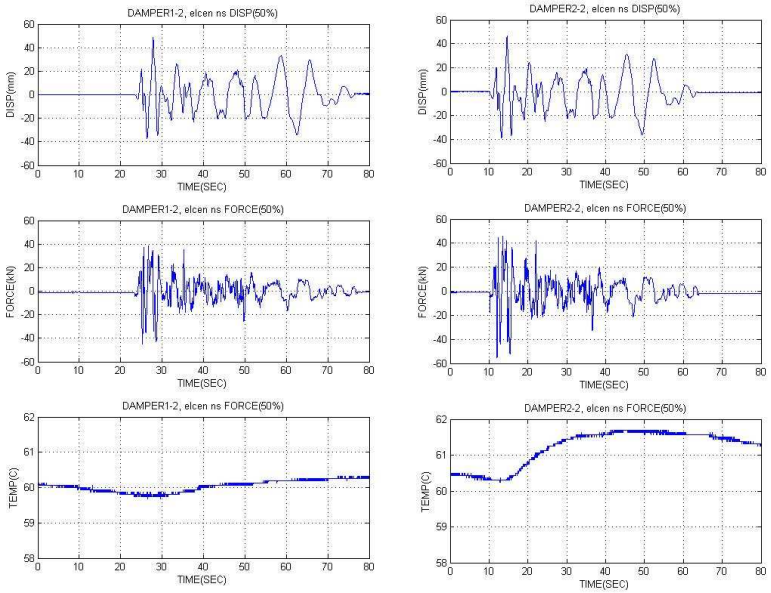


그림 3.1.73 El Centro 지진파(50%)(2)에서 오일 감쇠기의
시간-변위, 시간-감쇠력, 시간-온도 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

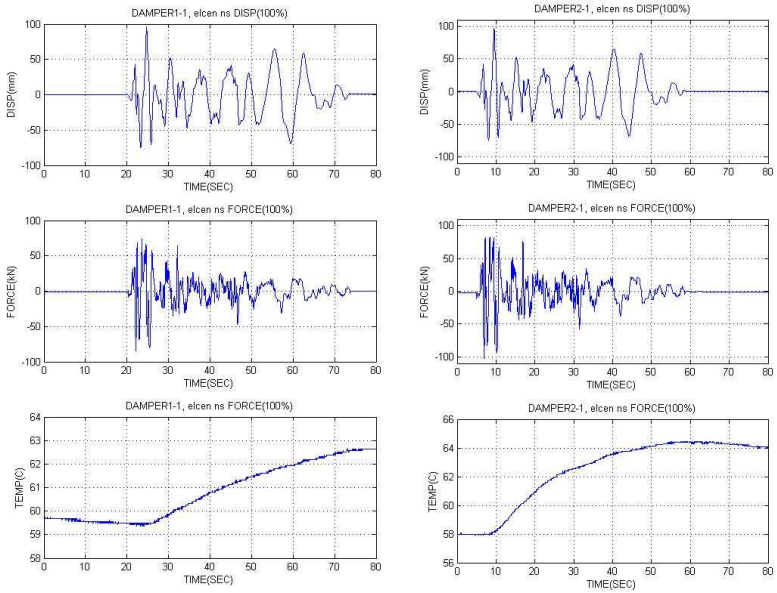


그림 3.1.74 El Centro 지진파(100%)(1)에서 오일 감쇠기의
시간-변위, 시간-감쇠력, 시간-온도 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

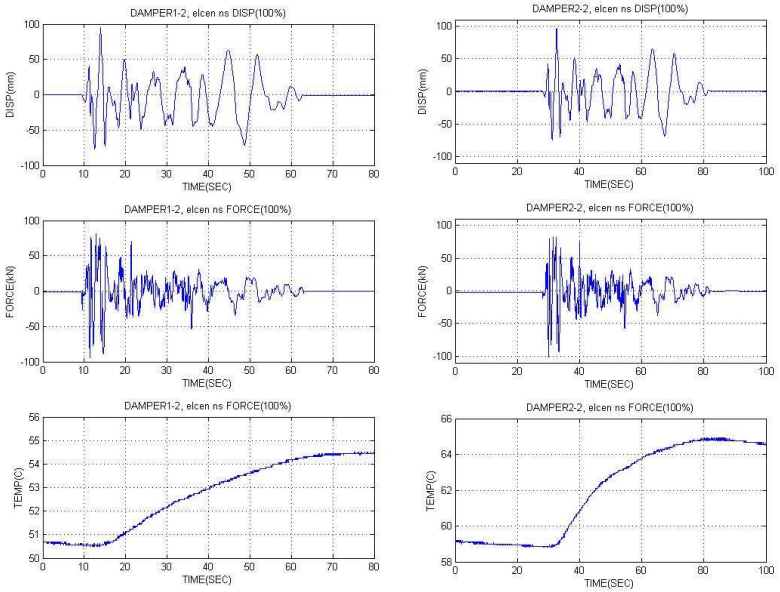


그림 3.1.75 El Centro 지진파(100%)(2)에서 오일 감쇠기의
시간-변위, 시간-감쇠력, 시간-온도 그래프 (Damper 1/ Damper 2)

실험결과 제작된 2기는 유사한 거동을 보여줬다. 결과의 차이는 단품으로 제작된 감쇠기와 실험장비의 장기 사용으로 설명할 수 있다. 특히 댐퍼 내에 매립된 변위계가 온도상승이나 오일로부터 영향을 전혀 받지 않고 제대로 작동하였다. 향후 댐퍼 내부에 특수 장치나 특수 오일의 사용으로 온도의존성을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 제작된 스마트 댐퍼가 상시나 지진 시에 보조적인 제진대책으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 개발된 댐퍼의 수치해석 및 검증

가. 개발된 댐퍼의 수치모형

일반적으로 오일댐퍼는 좋은 선형성을 가지게 되므로 속도에 비례하는 감쇠력이 발생하는 경우가 많으며, 해석상의 편의를 위하여 다음과 같이 선형모델로 가정하는 경우가 많다.

$$F = C \cdot V + \beta \qquad (3.1.21)$$

여기서, F는 감쇠력, C는 감쇠계수, V는 속도, β 는 초기감쇠력을 의미한다.

개발된 감쇠기의 경우, Curve fitting을 하여 감쇠계수에 해당하는 C값과 β 값을 찾아보면, C=234005.4 N sec/m, β=11936 N 이 된다. 그런데, 제작된 감쇠기는 속도에 정비례하는 것이 아니라 좀 더 복잡한 형태의 감쇠력을 나타내는 것으로 모델링하는 것이 보다 정확한 모델링이 될 수 있으며, 비선형특성이 존재하면 단순히 감쇠계수하나만으로는 비선형 특성을 보이는 실험결과를 제대로 설명할 수 없다.

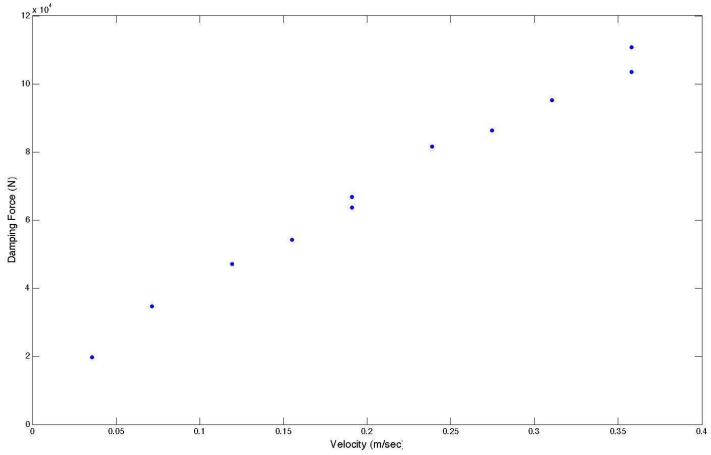


그림 3.1.76 실험으로 얻어진 속도-감쇠력 관계

그러므로 그림 3.1.76과 같이 실험에서 나타난 결과를 보다 정밀하게 모델링하기 위해서는 비선형모델이 필요하며 이 연구에서는 다음과 같은 비선형 모델을 사용하였다.

$$F = \beta + C \cdot V^{\alpha} \qquad (3.1.22)$$

여기서, F는 감쇠력, C는 감쇠계수, V는 속도, α와 β 는 각각 지수와 초기감쇠력을 의미한다.

식 (3.1.22)를 따르는 모델의 계수들은 Least Square Method (LSM)를 이용하여 구할 수 있으며, 이 연구에서는 Nonlinear Curve Fitting 기법으로서 LSM을 사용하고 최적화 알고리즘으로는 Genetic Algorithm을 적용하여 식 (3.1.22)에 있는 계수 값들을 추정하였다.

그림 3.1.77는 Genetic Algorithm을 통한 최적화 과정을 나타내고 약 250세대만에 최적 계수값으로 수렴함을 알 수 있다.

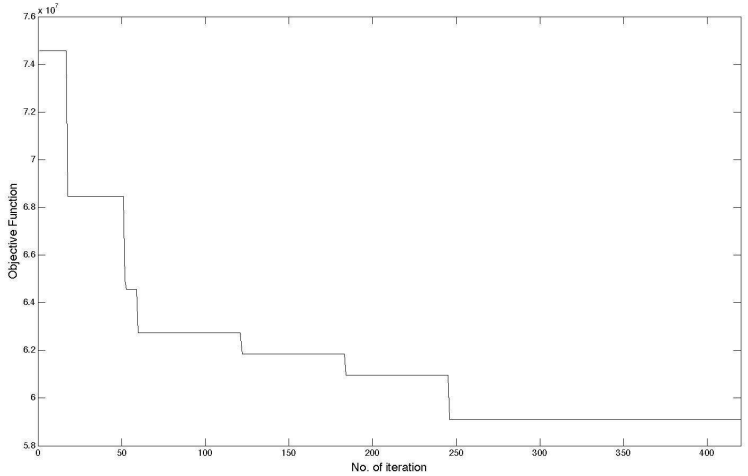


그림 3.1.77 최적화 과정에 따른 목적함수값

최적화 과정을 통하여 추정된 계수값들을 정리하면 다음 표 3.1.14과 같다.

표 3.1.14 추정된 최적계수값

C	232592.9 N sec/m
α	0.8048
β	4445.1 N

그림 3.1.78은 표 3.1.14의 추정값을 이용하여 비선형성을 고려해서 모델링된 값과 실험결과를 비교하여 도시한 것이다. 그림 3.1.78에서 보는 바와 같이 Nonlinear Curve Fitting을 사용하여 추정된 수치모형이 제작된 감쇠기의 동적응답특성을 보다 정확하게 묘사하고 있음을 알 수 있다.

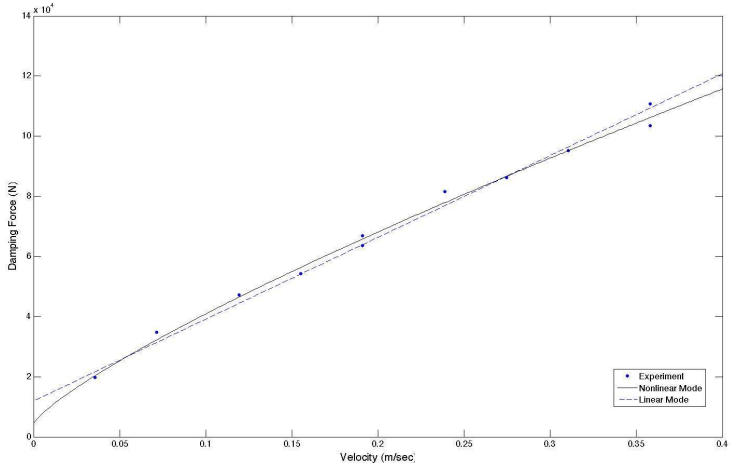


그림 3.1.78 선형모델과 비선형 모델의 비교

나. 제작된 댐퍼가 설치된 교량의 수치해석

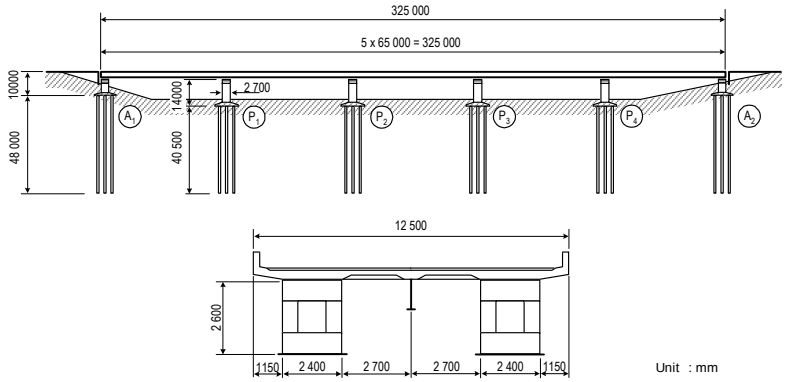


그림 3.1.79 해석에 사용된 교량의 제원

앞서 개발된 감쇠기 수치모형과 선형으로 모델링된 기존 감쇠기 모델과의 지진응답을 비교해보기 위하여 수치모사를 수행하였으며, 수치모사에 사용한 교량 모델은 그림 3.1.79에 나타나 있으며, 교량의 물성은 표 3.1.15와 같다.

표 3.1.15 해석에 사용된 교량의 물성

교각의 질량 (modal mass)	M_1 = 2080 t
교각의 강성	$K_{1primary}$ = 48806 tf/m
교각의 감쇠비	ξ_1 = 0.05
상부구조의 질량	M_2 = 5352 t
받침의 수평탄성계수	K_2 = 9582 tf/m

지진입력으로는 El Centro지진 가속도를 사용하였으며, 교량 상부와 교각사이에 제작된 감쇠기가 설치되어 상부구조와 교각의 응답 차에 의하여 감쇠효과를 발휘한다고 가정하였으며 해석법으로는 시간이력해석법을 사용하여 응답해석을 수행하였으며 해석결과를 그림 3.1.80, 그림 3.1.81, 그림 3.1.82에 나타내었다.

그림 3.1.80은 교각의 변위와 상부구조의 변위를 나타낸다. 해석모델에 따라 응답해석 결과가 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 선형모델의 경우가 전반적으로 응답이 적게 계산되는 것으로 나타났다. 교각의 경우 선형모델을 사용한 응답해석 결과가 비선형 모델에 비하여 최대응답을 기준으로 약 43.6% 적게 나타나며 상부구조의 경우 최대응답을 기준으로 역시 43.2% 적은 결과를 보여준다.

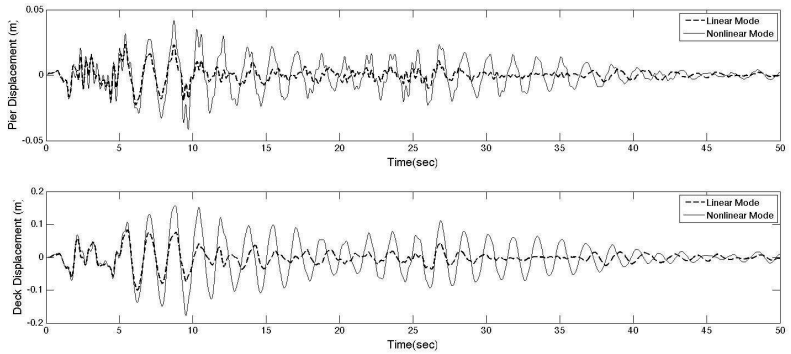


그림 3.1.80 교각과 교량상부구조의 변위

그림 3.1.81과 그림 3.1.82는 각각 교각하부에서의 바닥 전단력과 기초에서의 전도모멘트를 나타낸다. 변위응답과 마찬가지로 비선형 모델을 사용한 응답해석결과가 더 큰 값을 나타내며, 최대응답을 기준으로 볼 때, 선형모델의 응답이 바닥전단력은 약 45%, 전도모멘트는 약 23% 가량 적게 계산되는 것으로 나타났다. 이는 선형모델을 사용하는 경우, 비선형 모델을 사용한 지진응답해석 결과와 비교하여 큰 응답차이를 보이는 것으로서, 지진응답을 과소하게 평가하는 경향이 있는 것으로 판단된다.

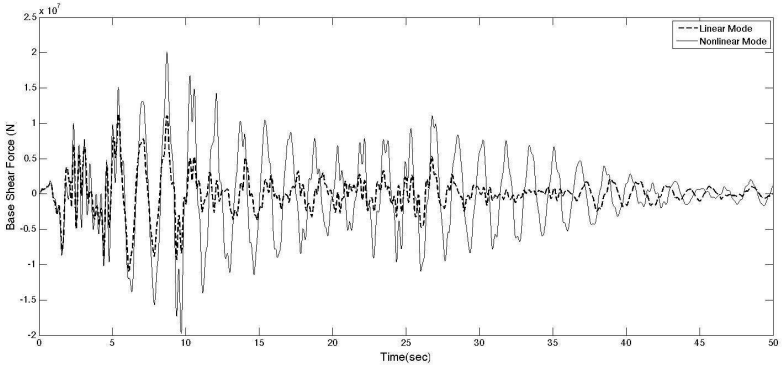


그림 3.1.81 교각하부에서의 바닥 전단력

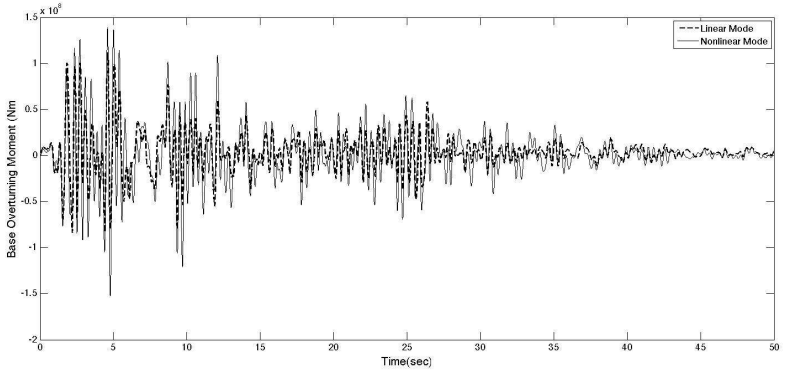


그림 3.1.82 교각하부에서의 전도 모멘트

7. 장기노출시험 및 실환경 적용 시 All-in-1 시스템의 거동 분석

All-in-1 시스템의 현장적용이 어려우므로 현장적용에 준하는 두 가지의 추가적인 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 현장적용과 유사하게 All-in-1 시스템이 장기적으로 외부환경에 노출되었을 때 그 거동과 센서노드로부터 얻어진 신호가 안전적인지 확인하기 위하여 장기노출시험을 수행하였다. 두 번째 실험은 지진이나 과다한 진동이 발생하였을 때 댐퍼의 거동과 센서노드가 단기간동안 제대로 작동하는지 알아보기 위해 All-in-1 시스템이 실교량에 설치된 조건을 모사하였다. 이를 위하여 교량축소모델을 제작하여 동적하중을 가하여 신호를 얻어 분석하였다.

가. 장기노출시험

개발된 All-in-1 시스템의 장기거동을 평가하기 위하여 댐퍼를 외부환경에 노출시켜 정기적으로 센서노드로부터 수신된 신호의 정확성을 분석하였다.

스마트 댐퍼는 교량에 설치되기 때문에 가혹한 외부환경에서도 정상적으로 작동이 되어야 한다. 따라서 실제 현장과 비슷한 조건으로 무선계측시스템이 제대로 작동하는 지 확인하기 위하여 그림 3.1.83과 같이 옥외폭로시험을 하였다. 옥외폭로시험은 댐퍼가 실제 교량 거더의 아래에 설치되기 때문에 지붕을 만들어 비와 눈을 피하게 하였고 바람, 온도, 먼지는 영향을 받을 수 있도록 통풍이 잘 되도록 하였다.



그림 3.1.83 All-in-1 시스템의 옥외폭로시험

그림 3.1.84는 그림 3.1.83과 같이 옥외에 설치된 All-in-1 시스템의 10일간의 변위데이터를 플로팅 한다. 데이터는 제3장 제1절의 3에서 기술된 센서노드를 통해 무선으로 송신되었다. 이들 데이터는 약 20 m 거리만큼 떨어진 연구실에서 노트북에 수신되었다. 계측기간은 2011년 10월 30일부터 11월 23일중 10일에 해당하며 그 기간 동안의 최저최고기온을 표 3.1.16에 정리하였다. 변위데이터는 현재 댐퍼가 176.5 mm만큼 압축상태임을 보여주고 있다. 사실 댐퍼가 고정되어 있지 않은 상태임을 감안하면 변위데이터는 제로상태로 되어 있는 것으로 가정해야 한다. 여기서 ±0.25 mm만큼의 변동 폭이 있는 것으로 나타나지만 이는 계측기의 노이즈와 무선통신과 주변의 통신주파수간에 간섭의 영향으로 기인할 수 있다. 노이즈는 제로노이즈에 특성을 띄고 있으며 센서노드의 안정적인 작동이 이루어진다고 볼 수 있다.

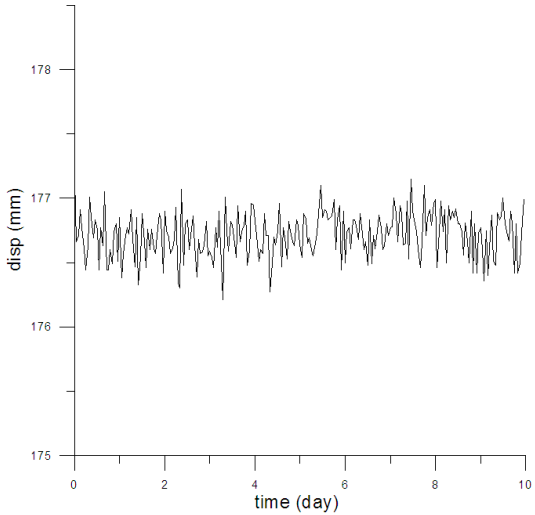


그림 3.1.84 All-in-1 시스템의 10일간 장기변위 데이터

표 3.1.16 장기계측 기간동안 실외온도 및 일교차(2011년)

	10/30	10/31	11/01	11/02	11/03	11/04	11/05	11/06	11/07	11/23
최저기온	11	9	10	13	10	15	16	13	13	-2
최고기온	21	22	23	22	24	23	26	19	19	7
일교차	10	13	13	9	14	8	10	6	6	9

센서노드가 평상시 계측데이터를 1시간마다 저장하여 하루동안 획득한 데이터를 한꺼번에 송신하도록 설정되있다. 그림 3.1.85는 그림 3.1.84에서 첫 날인 2011년 10월 30일에 24시간동안 계측치를 나타내고 있다. 그래프를 살펴보면 1일 변동폭이 ±0.25 mm로 나타나고 있다. 여기서도 역시 제로노이즈와 유사한 경향을 확인할 수 있으며 센서노드의 안정적인 작동을 입증하고 있다.

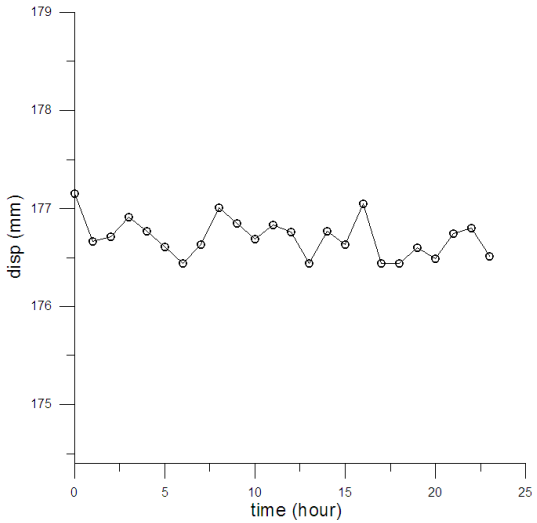


그림 3.1.85 2011년 10월 30일 All-in-1 시스템의 변위계측치

유사시 충격이나 지진과 같은 이벤트가 발생하면 센서노드에 내장된 가속도계의 계측치에 따라 sampling frequency가 200 Hz로 전환되어 60초 동안 변위데이터를 계측하도록 설정되었다. 이를 확인하기 위하여 댐퍼에 부착된 센서노드박스(그림 3.1.86)에 경미한 충격을 가하였다. 이에 따라 가속도계에 threshold를 초과하는 가속도응답이 계측되어 sampling frequency가 200 Hz로 전환되었다. 이들 데이터를 그림 3.1.87에 도시하였다. 여기서 역시 센서노드의 올바르고 안정적인 작동을 확인할 수 있다.

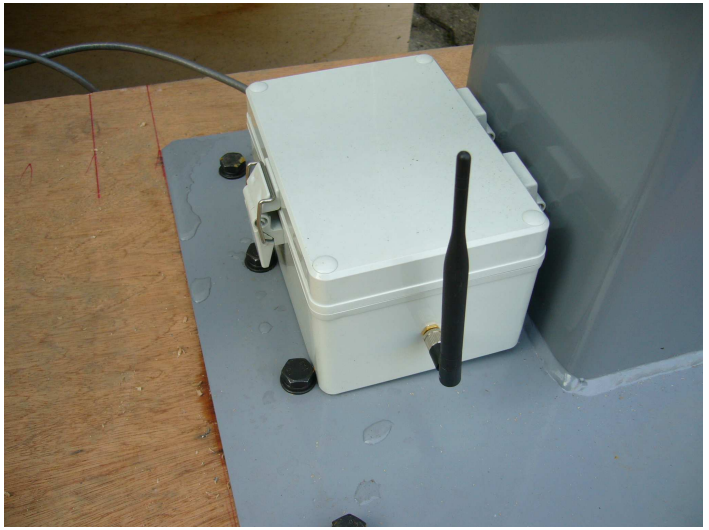


그림 3.1.86 가속도계가 내장된 센서노드박스

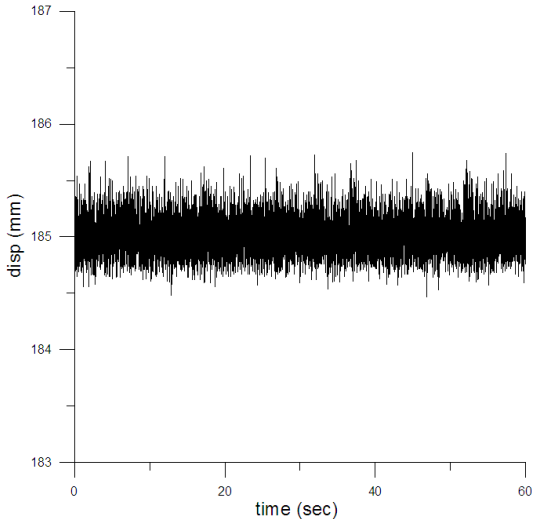


그림 3.1.87 유사시 All-in-1 시스템의 변위데이터

나. 축소교량모형 실험

일반적으로 댐퍼는 교량 상판 하부와 교대를 연결하여 설치된다. 그러나 이를 그대로 모사하기 위하여 모형의 높이와 규모가 과다하게 크지는 문제가 있다. 본 실험의 관점이 All-in-1 시스템의 거동이므로 상판의 휨에 의해 댐퍼가 축방향으로 반복 운동할 수 있도록 간단한 교량모형을 구상하였다.

스마트 댐퍼는 옥외폭로시험의 상태에서 스트로크의 동적 움직임을 관찰하기 힘들다. 따라서 합판의 탄성력을 별도의 장치를 제작하여 오일 감쇠기의 스트로크의 동적 움직임에 대해 관찰하였다. 그림 3.1.88~3.1.93과 같이 합판의 굽힘을 사용하여 복원이 반복할 수 있는 시스템을 설계/제작하였다. 여기서 모형의 규모를 고려하여 3.5 kN의 댐퍼를 사용하기로 하였다.

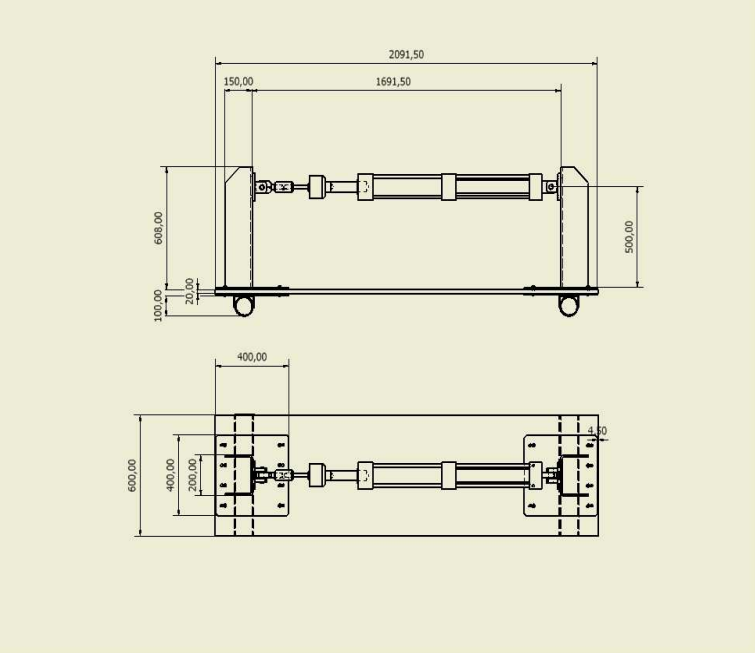


그림 3.1.88 축소교량모형 설계도면

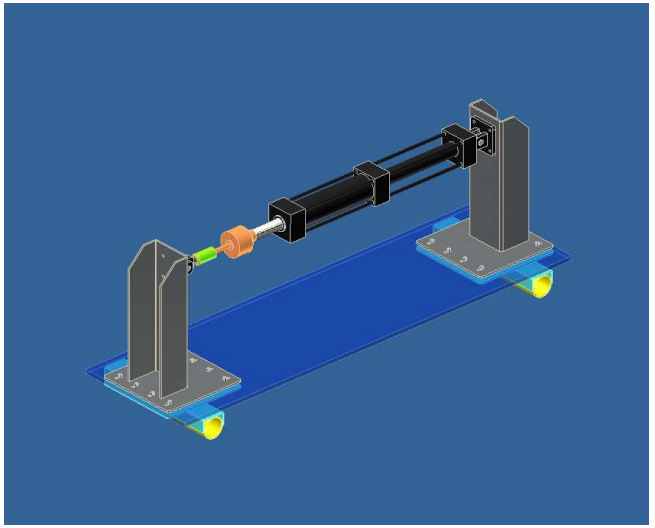


그림 3.1.89 All-in-1 시스템이 설치된 축소교량모형의 투시도

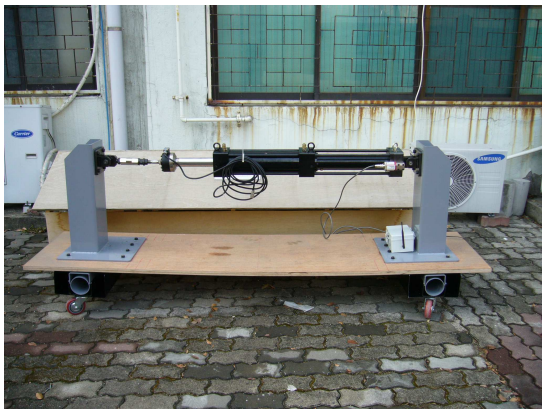


그림 3.1.90 교량축소모형에 설치된 All-in-1 시스템

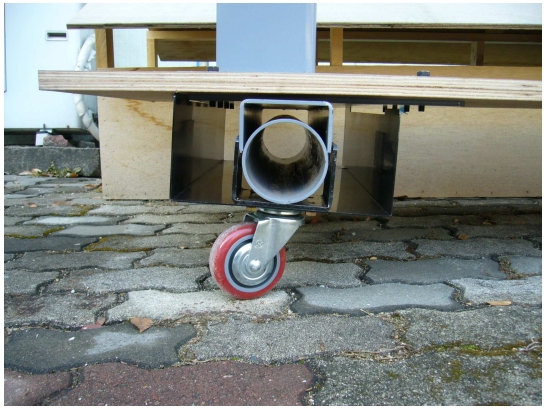


그림 3.1.91 교량축소모형의 지점부



그림 3.1.92 교량축소모형의 모멘트팔

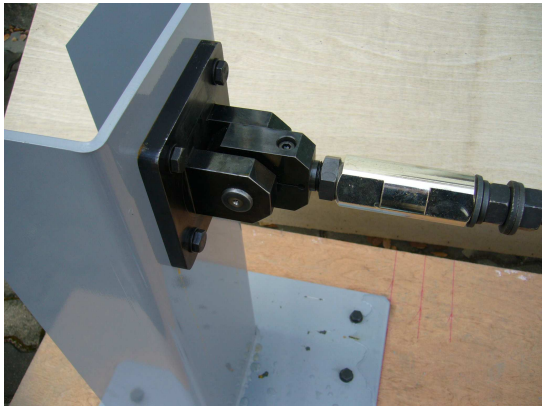


그림 3.1.93 All-in-1 시스템의 힌지 연결부

교량축소모형을 이용하여 사람의 자중으로 인해 댐퍼의 동적거동을 유도할 수 있었다. 그림 3.1.94와 같이 양 끝단에 두 사람의 동기화된 수직운동으로 댐퍼의 축방향 반복운동을 발생시킬 수 있다.



그림 3.1.94 교량축소모형의 동적실험(반복운동)

그림 3.1.95는 합판중앙에 사람에 자중을 작용시켜 합판의 굽힘으로 댐퍼에 압축거동을 유발시키는 모습이다. 여기서 합판의 탄성으로만 댐퍼의 복원이 불가능하므로 사람의 힘으로 양 끝단을 잡아당겨 복원시킬 수 있다.



그림 3.1.95 교량축소모형의 동적실험(압축실험)

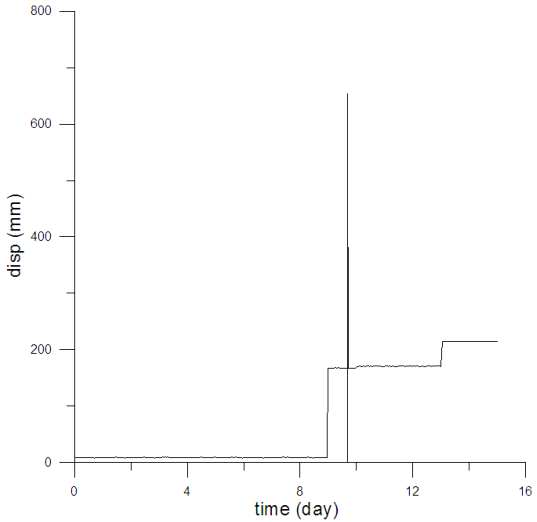


그림 3.1.96 교량축소모형에 의한 장기계측 데이터

교량축소모형에 의하여 약 2주간의 장기계측을 실시하였다. 이 기간은 2011년 11월 25일부터 12월 23일중 15일에 해당한다. 그 기간 동안의 최저최고기온을 표 3.1.17에 정리하였다. 그림 3.1.96은 인장상태에서 계측을 시작하여 그림 3.1.95와 같이 합판의 굽힘을 수차례 발생시켜 댐퍼를 압축시켰다. 복원없이 수차례 압축시킨 과정이 그림 3.1.96에 잘 나타나 있다. 9일째, 10일째, 13일째 압축을 발생시킨 사실을 확인할 수 있

고, 9일째의 실험은 반복하여 인장압축을 가한 사실을 확인할 수 있다. 그림 3.1.97은 반복 인장압축과정을 상세히 보여주고 있으며 sampling frequency 200 Hz, 데이터 취득 시간 60초를 확인할 수 있다.

표 3.1.17 교량축소모형에 의한 장기계측 기간동안 실외온도 및 일교차(2011년)

	11/25	11/26	11/27	11/28	11/29	11/30	12/01
최저기온	−1	2	9	14	9	3	4
최고기온	7	9	15	17	14	9	9
일교차	8	7	6	3	5	6	5
	12/02	12/07	12/08	12/21	12/22	12/23	
최저기온	3	2	−4	−1	−9	−10	
최고기온	8	6	4	5	1	−1	
일교차	5	4	8	6	10	9	

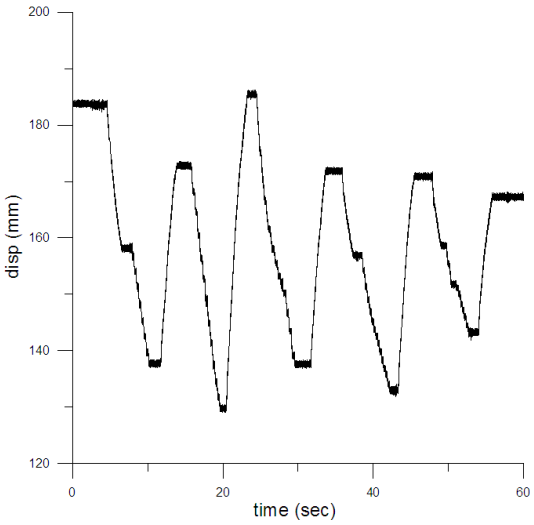


그림 3.1.97 반복인장압축실험에 의한 계측데이터 (60초간)

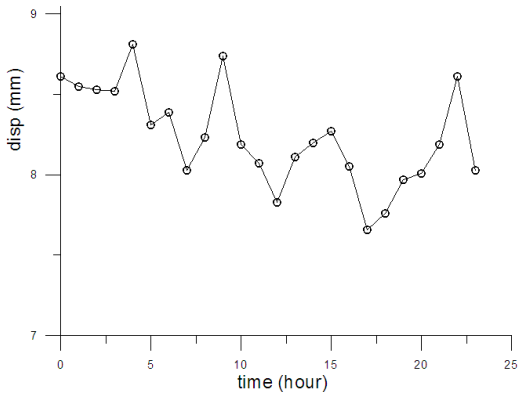


그림 3.1.98 1일간의 계측데이터

제작된 센서노드는 매 1시간마다 한 개의 데이터를 취득하고 있으며 그 사실은 그림 3.1.98의 24시간의 계측데이터로부터 확인할 수 있다. 이를 통해 상시에는 시간당 1개의 데이터를 이벤트(지진 혹은 충격) 발생 시에는 1초에 200개의 데이터를 1분 동안 취득하여, 센서노드가 설계요구사항을 제대로 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

2012년 1월, 2월에는 최저기온이 영하15도를 하회하는 저온상태가 1주일 이상 지속되었으며, 이 기간동안 옥외에 노출한 All-in-1 시스템의 계측결과를 그림 3.1.99에 나타내었다. 이를 통하여 개발된 시스템은 극한상태의 옥외에서도 그 성능을 유지하고 있음을 확인하였다.

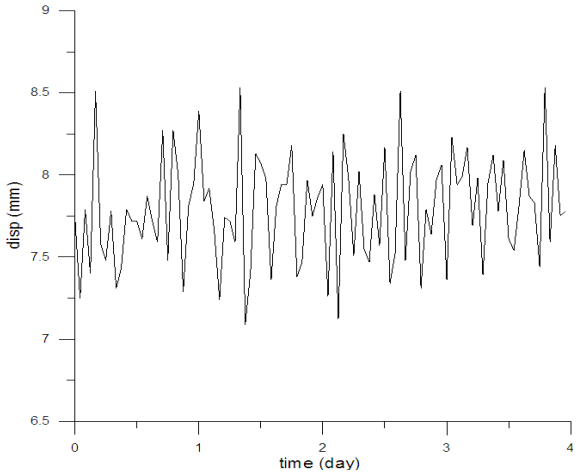


그림 3.1.99 극한상태에서의 계측결과

제2절 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침을 이용한 스마트 모니터링 시스템 구축

국내에서는 지진재해대책법 시행령이 2008년 3월에 공포되었으며 2009년 3월에 개정되어 내진보강대책 및 내진설계기준과 관련된 법규(제정 2009.3.26 소방방재청령 제72호)에 의해 기존시설물의 내진보강이 의무화되고 이에 따라 관련분야의 정부예산이 향후 크게 증가될 것으로 전망이다. 그러나 내진장치 등에 대한 국내 연구개발이 미흡한 상태이므로, 이 분야에 대한 국내 기술개발이 이루어지지 않으면 향후 크게 증가될 내진보강 시장에서 국외제품들이 시장을 독점할 가능성이 높다. 따라서 기존의 선진국제품에 비해 열위인 내진장치들의 주요 재료성능, 설계, 제작기술을 획기적으로 향상시켜야 하며 이를 위해서는 핵심재료의 성능고도화와 IT기반 기술과 접목한 내진장치의 모니터링기술과 제진성능 효율성 강화 및 저비용화가 필수적이다. 또한 시설물 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하고 단부에 단차가 발생할 수 있는데 이는 시설물의 구조손상을 야기하여 사용성을 크게 떨어뜨리므로 이를 상시적으로 계측하여 보정할 수 있는 받침형 스마트 교량 내진장치가 유용할 것으로 판단된다.

교량의 작용하중이 집중되어지는 지점에 존재하는 내진장치와 실시간 계측시스템을 통합한 것을 “스마트 교량 내진장치(Smart Bearing)"이라고 한다. 실시간 계측시스템을 통하여 내진장치에 가해지는 하중 및 변형률을 계측함으로써 통과차량의 하중과 속도를 예측(BWIM: Bridge Weigh-In-Motion system)할 수 있으며 교량 관리 시스템(BMS: Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량의 유지 관리를 최적화하고 비용감소를 도출할 수 있다.

그러므로 본 연구의 최종 연구목표는 지진피해 최소화를 위한 주요 핵심기술에 해당하는 내진장치의 국산화를 이루는 것이며, IT기술의 접목을 통한 원격모니터링과 안전제어가 가능한 스마트 교량 내진장치의 개발에 중점을 두고 있다. 그림 3.2.1과 같이 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침(마찰형 스마트 베어링)의 개발로 교량의 안전성을 평가 할 수 있을 것으로 판단된다.



그림 3.2.1 스마트 베어링의 적용

1. 광섬유센서의 원리

변형률을 계측하기 위하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 기존의 전기저항식 변형률 센서(conventional strain gauge)를 이용할 경우에는, 교량현장에서 원거리 계측케이블의 설치가 용이하지 않으며 계측케이블이 길어짐에 따라서 전기적인 노이즈로 인한 측정 결과의 신뢰성이 낮아진다. 또한 계측위치가 많을수록 설치비용이 증가하여 경제적인 부담을 간과할 수 없다는 것이다. 광섬유센서(fiber optic sensor)의 이용은 이러한 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 빛을 매체로 하기 때문에 근본적으로 전자기적인 노이즈의 영향이 없고 경량이며 소형이므로 현장 작업성의 개선이 기대된다.

현재 응용되고 있는 다양한 종류의 광섬유센서 중에 특히 하나의 광섬유로 다수의 측정 점을 구성할 수 있는 광섬유 브래그 격자 센서 (FBG sensor: fiber optic Bragg-grating sensor)는 다중측정(multi-point measurement)이 가능하기 때문에 설치비용 측면에서 특히 경제적이다.

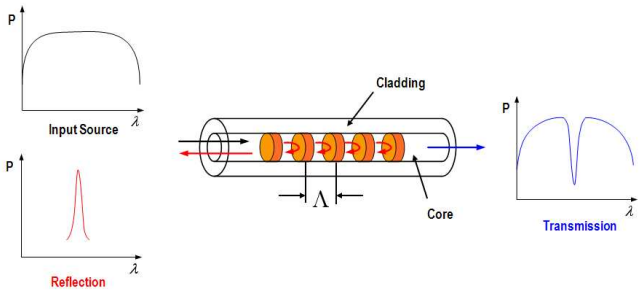


그림 3.2.2 FBG센서의 구조

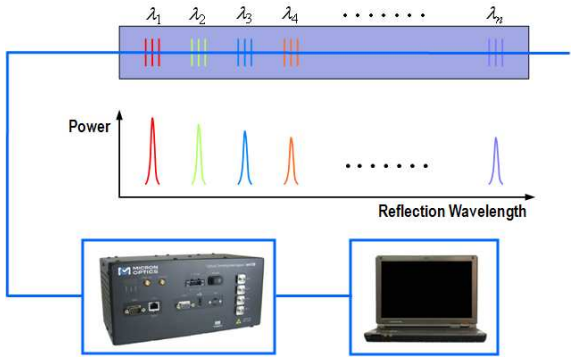


그림 3.2.3 FBG센서 계측시스템

그림 3.2.2와 같이 광대역의 스펙트럼을 광섬유에 입사시킬 경우, 조건식에 만족하는 파장 성분이 광섬유격자에서 반사되며, 나머지 파장 성분은 그대로 통과하여 광 스펙트럼 분석기에 나타난다. FBG센서 계측시스템 구성도는 그림 3.2.3과 같으며 그림에서 확인 할 수 있듯이 하나의 센서로 다중측정이 가능하므로 설치가 용이 하고 경제성이 우수함을 알 수 있다.

2. 내진장치를 이용한 모니터링 시스템 개발

광성유실험장치는 교량, 터널, 댐과 같은 시설물에 광섬유센서를 설치하여 구조물의 변형률신호를 계측함으로써 구조물의 상태를 파악 하여 교량의 유지관리에 유용하게 사용할 수 있는 장비 이다. 본 연구를 수행함에 있어 광섬유실험장치가 필요함에 따라 그림 3.2.4와 같은 장비를 구입하였으며, 장비사양은 표 3.2.1과 같다.



그림 3.2.4 장비 사진

표 3.2.1 장비 사양

제작사	Micron Optics, Inc.
모델명	sm130-500
Wavelength Range	1510-1590 nm
Scan Frequency	500 Hz
Max Sensors per Channel	125

본 연구에서 개발한 내진장치를 이용한 모니터링 시스템은 수직·수평하중 및 변위의 계측이 가능한 모니터링 시스템이다. 그림 3.2.5는 내진장치를 이용한 모니터링 시스템이다. 그림 3.2.5와 같이 교량에 개발한 마찰형 스마트 베어링을 설치하고 계측시스템으로부터 하중과 변위응답을 계측하게 된다. 계측응답은 광성유실험장치의 사양에 따라 크게 좌우된다고 할 수 있으므로 본 연구에서는 충분한 Scan frequency를 가지는 광성유실험장치를 선정하여 사용하였다. 또한 광섬유센서에서 계측되는 파장을 수직·수평하중 및 변위응답을 수집할 수 있도록 프로그래밍 하였다.



그림 3.2.5 내진장치를 이용한 모니터링 시스템

3. 교량내진장치의 수직변위 및 수평하중 계측센서 개발

교량내진장치의 수직변위 및 수평하중을 계측하기 위하여 (주)에스코알티에스에서 판매하고 있는 마찰형 베어링인 그림 3.2.6의 Eradi Quake System(EQS)에 FBG센서를 설치하여 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침을 개발하였다. EQS의 근본적인 기능은 상, 하부구조물 사이에서 복원력을 제공하며 회전을 수용하는 하중전달 베어링과 같은 기능이다.

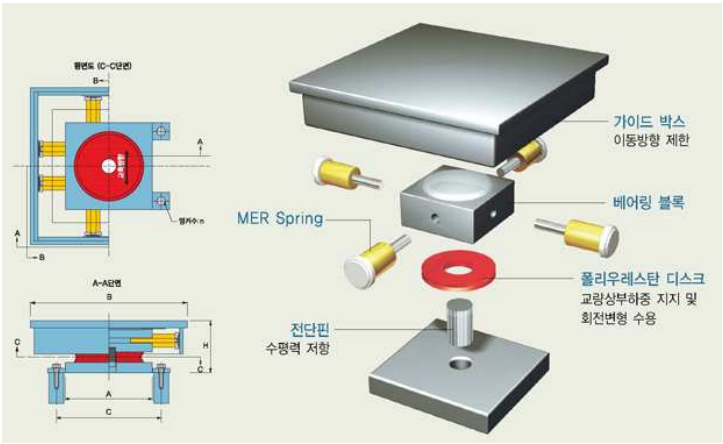


그림 3.2.6 Eradi Quake System(EQS)

그림 3.2.7은 EQS에 FBG센서를 적용하는 방법을 나타낸 것이다. 그림 3.2.7에서와 같이 수직하중을 수용하고 있는 폴리우레탄 디스크에 FBG센서를 적용하여 수직변위를 계

측하고, 수직변위로부터 수직하중을 계측하는 연구를 수행하였다. 또한 수평하중을 수용하는 부분인 MER Spring에 FBG센서를 적용한 Load Cell을 사용하여 수평하중을 계측하고 계측한 수평하중으로부터 수평변위를 계측하는 방법을 연구하였다.

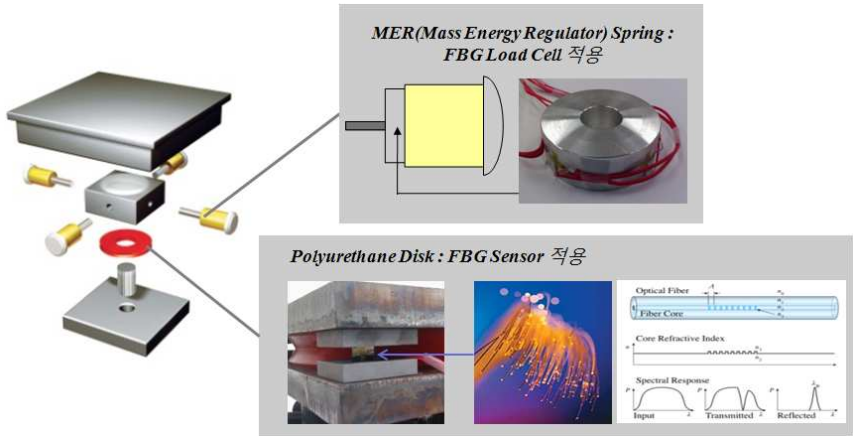


그림 3.2.7 EQS에 FBG센서의 적용

가. 수직변위센서의 개발

(1) 수치해석을 통한 폴리우레탄 디스크의 변형률 예측

수직하중을 계측하기 위하여 수직하중을 수용하는 폴리우레탄 디스크의 수직변형률을 예측하기 위하여 상용프로그램인 Abaqus 6.7을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 위치에 따른 변형률을 예측하여야 하므로 Solid 요소를 사용하였다. 그림 3.2.8은 하중이 작용하지 않은 경우의 폴리우레탄 디스크의 형상이고 그림 3.2.8은 하중이 작용하였을 경우의 폴리우레탄 디스크의 형상이다. 그림 3.2.9에서 확인 할 수 있듯이 폴리우레탄 디스크의 노치부분이 인장을 받아 부풀어 오르는 것을 확인 할 수 있다.

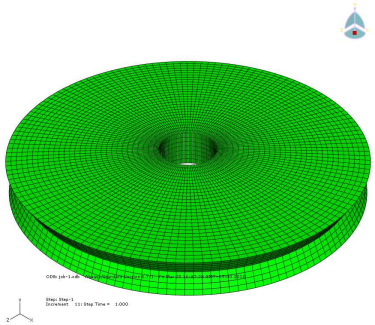


그림 3.2.8 하중 작용 전

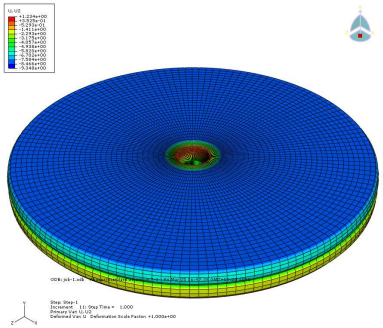


그림 3.2.9 하중 작용 후

표 3.2.2 모델별 폴리우레탄 디스크에 수직압력 작용시의 변위 및 변형률 비교

Model	Vertical pressure [MPa]	Displacement [mm]	Strain [ε]
EQS 135T	25	1.06	0.0461
EQS 1000T	25	3.53	0.0504
EQS 2300T	25	4.93	0.0503

용량이 다른 3개의 EQS모델(EQS 135T, EQS1000T, EQS2300T)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 표 3.2.2는 모델별 폴리우레탄 디스크의 수직압력에 따른 변위 및 변형률을 비교한 것이다. 표 3.2.2에서 확인 할 수 있듯이 최대하중을 압력으로 환산한 25MPa이 작용할 경우 50000$\mu\varepsilon$의 변형률이 발생함을 확인 할 수 있다. 그러나 FBG센서의 경우 10000$\mu\varepsilon$까지 계측이 가능하기 때문에 계측 가능한 범위를 초과함으로 폴리우레탄 디스크에 FBG센서를 수직으로 부착하는 것은 불가능 하다.

FBG센서의 부착 가능한 위치를 그림 3.2.10과 같이 선정하여 FBG센서를 직접 부착하여 변형률신호를 계측할 수 있는지 검토하였다. 그림 3.2.11은 그림 3.2.10의 위치에서의 변형률을 나타내는 그래프이며, 표 3.2.3은 모델별 폴리우레탄 디스크에 작용하는 하중에 따른 변형률을 나타낸 것이다. 표 3.2.3에서 확인 할 수 있듯이 FBG센서의 최대변형률계측이 가능한 10000$\mu\varepsilon$을 넘지 않는 부분은 Top-x 이다. 그러나 Top-x에 FBG센서를 부착하기 위해서는 홈을 만들어 FBG센서를 설치하여야 한다. 그러나 폴리우레탄 디스크의 변형으로 인하여 FBG센서의 손상이 우려되므로 FBG센서를 적용한 변위센서를 제작하여 간접적으로 수직변위를 계측하는 방법을 제안하였다.

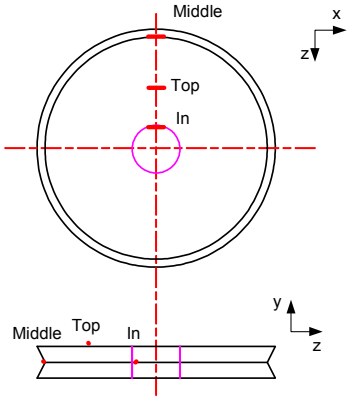
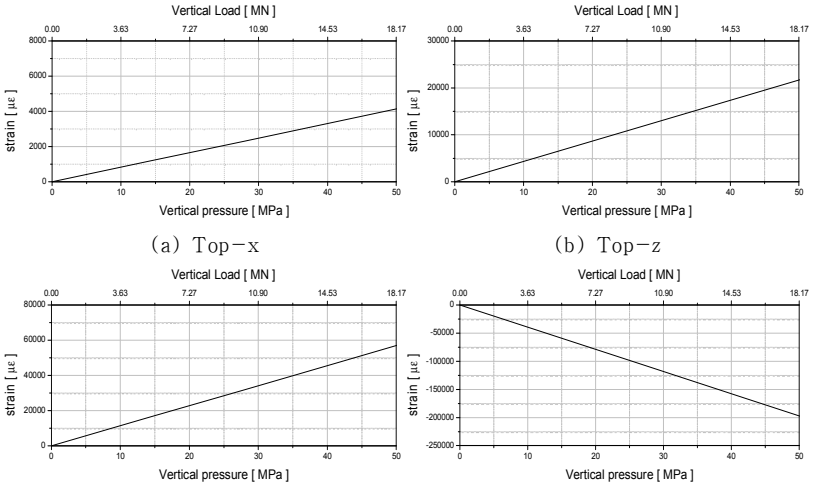
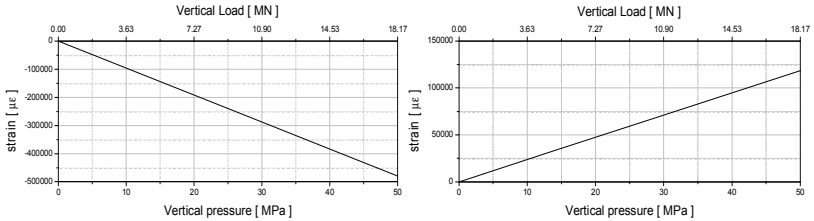


그림 3.2.10 변형률 신호 해석위치



(a) Top-x (b) Top-z

(c) Middle-x (d) Middle-y



(e) In-x (f) In-y

그림 3.2.11 폴리우레탄 디스크의 변형률(EQS 1000T)

표 3.2.3 모델별 폴리우레탄 디스크에 작용하는 하중에 따른 위치별 변형률

[단위: $\mu\varepsilon$]

모델명 / 위치	EQS 135T (135 ton)	EQS 1000T (1000 ton)	EQS 2300T (2300 ton)
Top-x	1800	2170	2360
Top-z	11000	12000	15300
Middle-x	29800	29900	28400
Middle-y	-105000	-108000	-109000
In-x	-272000	-254000	-204000
In-y	79400	65000	45200

(2) 변위센서의 형상

폴리우레탄 디스크의 변위응답을 추정하기 위하여 그림 3.2.12와 같은 형상을 가지는 변위센서를 제작하려고 하였으나 높이가 낮은 폴리우레탄 디스크에 설치하기 위해서는 핀 고정이 어려우며, 폴리우레탄 디스크의 변형이 크므로 설치가 용이하지 않을 것으로 판단된다. 그러므로 그림 3.2.13과 같은 변위센서를 제작하였다. 그림 3.2.13의 변위센서를 사용하였을 경우 변위센서의 설치 위치와 하중 작용시의 형상 변화는 그림 3.2.14와 같다. FBG센서부의 형상변화로부터 수직하중과 수직변위를 계측할 수 있다.

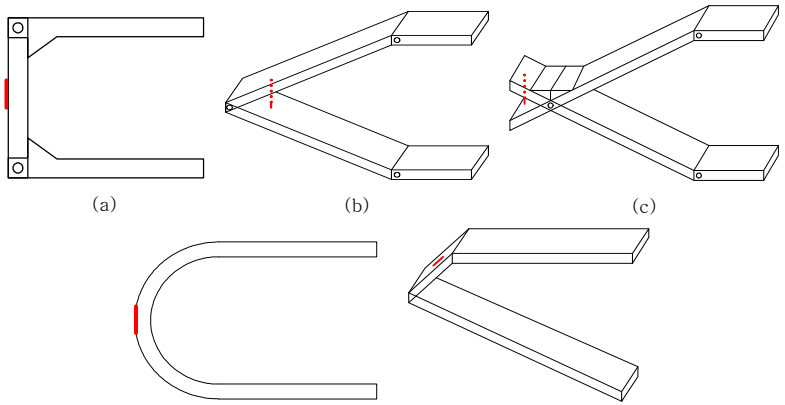


그림 3.2.12 지그 형상

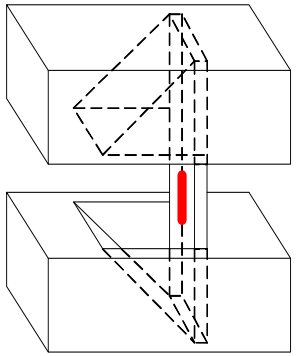


그림 3.2.13 수직변위센서

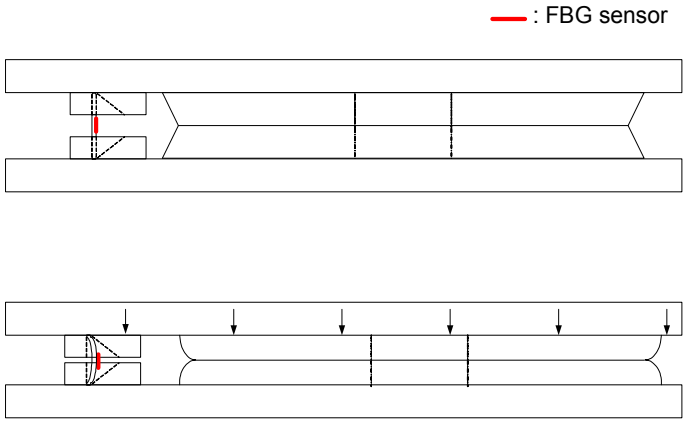


그림 3.2.14 지그설치 위치 및 하중 작용시의 지그형상 변화

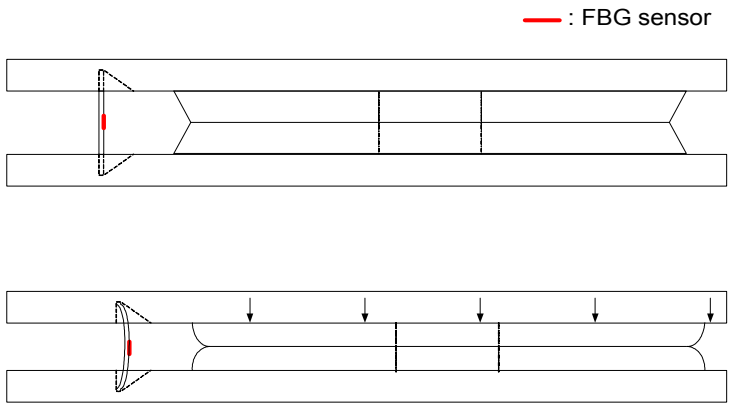


그림 3.2.15 지그설치 위치 및 하중 작용시의 지그형상 변화

그림 3.2.15와 같이 센서를 부착한다면 그림 3.2.13의 센서를 제작하지 않고 EQS에 센서를 직접 부착할 수 있다. 그림 3.2.15와 같이 하부판과 베어링 블록에 그림 3.2.13의 변위센서와 같이 홈을 파고 이곳에 FBG센서를 삽입하는 방법이다.

(3) 개발한 변위센서를 이용한 변위응답 추정 알고리즘

그림 3.2.16과 같이 연단거리가 δ이고 길이가 L인 빔을 휘었을 경우 곡률반경은 r은 식(3.2.1)과 같다. 여기서, ε는 표면부분의 변형률이다.

$$r=\frac{\delta}{\varepsilon} \tag{3.2.1}$$

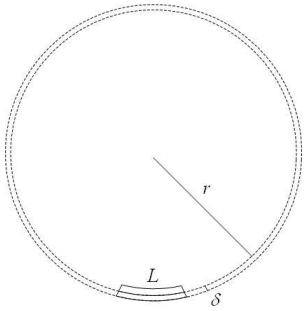


그림 3.2.16 빔이 휘는 모양

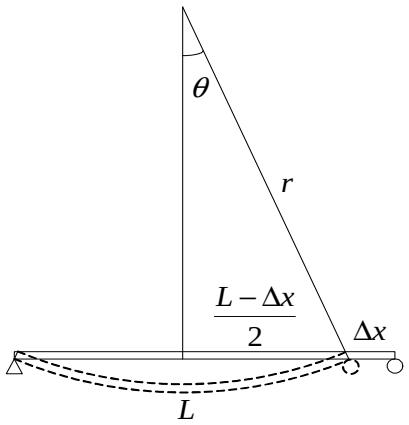


그림 3.2.17 단순보의 휨 형상

단순보에 하중이 작용하면 그림과 같은 모양으로 휨이 발생하게 된다. 그때의 지점부의 수평변위를 예측하는 방법을 이용한다면 지그가 압축을 받을 경우의 수직변위를 예측할 수 있다. 식(3.2.2)와 같이 θ를 구할 수 있다. 그림 3.2.17에서 $r\theta=L/2$이므로 식(3.2.3)과 같이 정의 할 수 있다.

$$\sin\theta=\frac{L-\triangle x}{2r} \tag{3.2.2}$$

$$\sin(\frac{L}{2r})=\frac{L-\triangle x}{2r} \tag{3.2.3}$$

그러므로 수평변위 $\triangle x$에 대하여 정리를 하면 식(3.2.4)와 같다. 연단거리 빔의 길이는 정해지므로 계측변형률신호로부터 수평변위를 계측할 수 있다.

$$\triangle x = L - 2r\sin(\frac{L}{2r}) \qquad (3.2.4)$$
$$= L - 2\frac{\delta}{\varepsilon}\sin(\frac{\varepsilon L}{2\delta})$$

(4) 개발한 변위센서의 검증

개발한 변위센서의 정밀도를 검증하기 위하여 1mm간격으로 변위를 변화시켜가며 변위응답을 계측하였다. 그림 3.2.18은 본 연구에서 제시한 변위센서의 정밀도를 검증하기 위하여 기존의 변위계로 계측한 변위와 본 연구에서 개발한 변위센서로 계측한 변위를 비교한 것이다.

본 연구에서 개발한 변위센서의 정확도와 정밀도를 확인하기 위하여 식(3.2.5)의 Percent error와 식(3.2.6)의 RMS(Root Mean Square) error를 사용하여 오차분석을 수행하였다. 여기서 n은 계측 데이터 수, δ_m는 변위계로 계측한 변위응답이며, δ_c는 본 연구에서 제안한 변위센서로 계측한 변위응답이다.

$$\text{Percent error} = \sum_{i=1}^{n}(\delta_m - \delta_c)^2 / \sum_{i=1}^{n}(\delta_m)^2 \qquad (3.2.5)$$

$$\text{RMS error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\delta_c - \delta_m)^2}{n}} \qquad (3.2.6)$$

표 3.2.4는 개발한 센서의 정밀도에 대한 오차분석 결과이다. 본 연구에서 개발한 변위센서를 4개 제작하여 정밀도를 검토함으로서 제작상의 정밀도를 확인하였다. 표 3.2.4에서 확인 할 수 있듯이 Percent Error는 0.01% 이하이며, RMS Error는 0.05 mm 이하이다. 그러므로 본 연구에서 개발한 변위센서의 오차가 적은 것으로 사료되므로 개발한 변위센서를 이용한다면 신뢰성 있는 변위응답의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

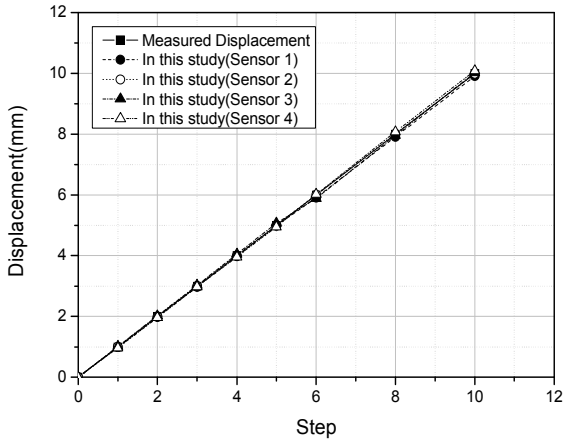


그림 3.2.18 센서의 정밀도 분석

표 3.2.4 개발한 센서의 정밀도에 대한 오차분석

	Percent Error(%)	RMS Error(mm)
Sensor 1	0.0094223	0.051201
Sensor 2	0.00019205	0.007382
Sensor 3	0.010042	0.053329
Sensor 4	0.0081303	0.048195
Average	0.006947	0.040027

나. 수평하중 계측센서 개발

(1) 수치해석을 통한 MER Spring의 변형률 예측

수평하중을 계측하기 위하여 수평하중을 수용하는 MER Spring의 수평변형률을 예측하여야 한다. 위치에 따른 변형률을 예측하여야 하므로 Solid 요소를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 3.2.19는 하중이 작용하지 않은 경우의 MER Spring의 형상이고 그림 3.2.20은 하중이 작용하였을 경우의 MER Spring의 형상이다. 그림 3.2.20에서 확인할 수 있듯이 MER Spring의 전체적으로 인장을 받아 부풀어 오르는 것을 확인 할 수 있다.

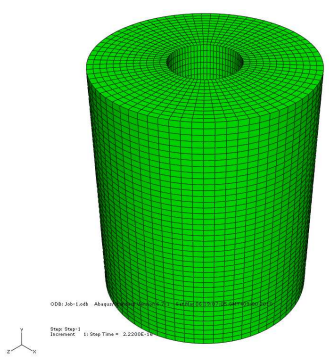


그림 3.2.19 하중 작용 전

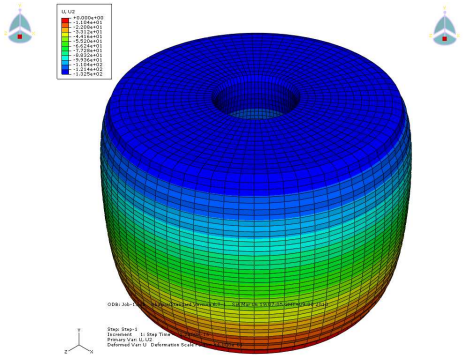


그림 3.2.20 하중 작용 후

표 3.2.5 모델별 MER Spring에 수직압력 작용시의 변위 및 변형률 비교

Model	Vertical pressure [MPa]	Displacement [mm]	Strain[ε]
EQS 135T	10	22.57	0.2508
EQS 1000T	10	38.4	0.237
EQS 2300T	10	36.37	0.2273

용량이 다른 EQS 3개의 모델(EQS 135T, EQS 1000T 그리고 EQS 2300T)을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 표 3.2.5는 모델별 MER Spring의 수평압력에 따른 변위 및 변형률을 비교한 것이다. 표 3.2.5에서 확인 할 수 있듯이 최대하중이 작용할 경우의 압력인 10MPa이 작용할 경우 250000$\mu\varepsilon$의 변형률이 발생함을 확인 할 수 있다. 그러나 FBG센서의 계측 가능한 범위를 초과함으로 MER Spring에 FBG센서를 직접 부착하는 것은 불가능 하다.

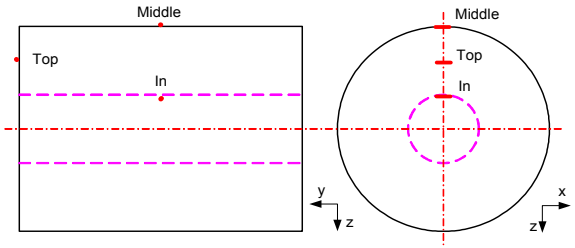
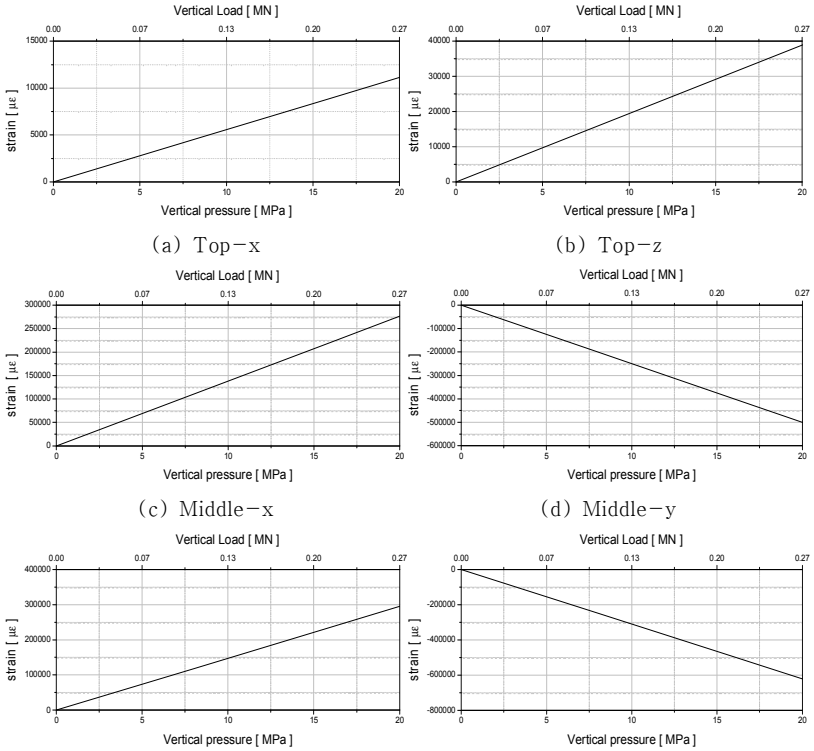


그림 3.2.21 변형률 신호 해석위치



(a) Top−x (b) Top−z

(c) Middle−x (d) Middle−y

(e) In−x (f) In−y

그림 3.2.22 MER Spring의 변형률(EQS 1000T)

표 3.2.6 모델별 MER Spring에 작용하는 하중에 따른 위치별 변형률 [단위: $\mu\varepsilon$]

모델명 / 위치	EQS 135T	EQS 1000T	EQS 2300T
Top−x	11400	11100	11900
Top−z	−52200	−50000	−44722
Middle−x	282000	276000	267000
Middle−y	−540000	−500000	−480000
In−x	301000	11100	286000
In−y	−587000	−500000	−612000

수치해석을 통하여 그림 3.2.21의 위치에서 변형률을 계산하였다. 그림 3.2.22는 그림 3.2.21의 위치에서 변형률을 나타낸 것이다. 표 3.2.6은 모델별 MER Spring에 작용하는 하중에 따른 변형률을 나타낸 것이다. 표 3.2.6에서 확인 할 수 있듯이 변형률이 FBG센서의 최대변형률인 10000$\mu\varepsilon$을 넘지 않는 부분이 없는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 MER Spring에 FBG센서를 직접 부착하는 것은 불가능하므로, FBG센서를 적용한 Load cell을 사용하여 하중 및 변위응답을 계측할 수 있도록 하였다.

(2) Load cell의 형상

MER Spring에 발생하는 변위를 계측하기 위하여 기존에 많이 사용되고 있는 Load cell을 이용하였다. 일반적으로 Load cell 탄성체의 형태는 굽힘형, 인장·압축형, 전단형이 있으며, 본 연구에서는 인장·압축형을 사용하였다. 그림 3.2.23과 같이 MER Spring을 조립과정에서 개발한 Load cell을 부착하여 하중응답을 계측할 수 있도록 하였다. 식(7)을 이용하여 수평변위에 의한 유효변형률신호를 계측하고, 유효변형률신호로부터 수평하중을 계측한다. 여기서 ε_{eff}는 유효변형률이며, v는 프와송 비, ε_1는 수평으로 부착된 센서로 계측한 변형률신호 그리고 ε_2, ε_3는 수직으로 부착된 센서로 계측한 변형률신호이다.

$$\varepsilon_{eff} = -\frac{\varepsilon_1}{v} + \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{2} \qquad (7)$$

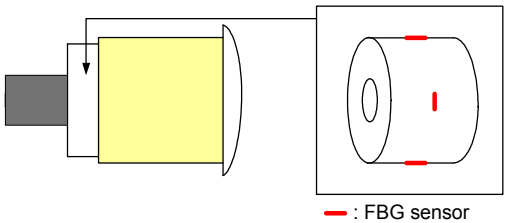


그림 3.2.23 Load cell을 이용한 변위응답 추정

4. 실험을 통한 검증

가. 압축실험을 통한 폴리우레탄의 변형률신호 계측

(1) 실험 개요

EQS(Eradi Quake System)의 근본적인 기능은 상, 하부구조물 사이에서 복원력을 제공하며 회전을 수용하는 하중전달 베어링과 같은 기능을 한다. 그러므로 EQS의 폴리우레탄 디스크와 MER Spring에 FBG센서를 부착하거나 간접적인 방법을 이용하여 EQS가

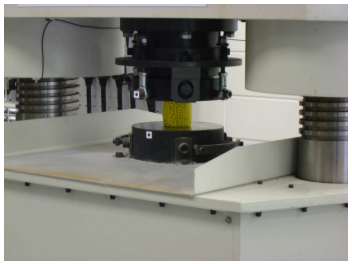
받는 하중에 따른 처짐과 수평하중을 계측할 수 있는 마찰형 스마트 베어링을 개발 하였다. 압축실험을 통하여 폴리우레탄 디스크와 MER Spring의 재료적 특성을 파악하고 센서의 부착가능성을 검토하였다. 압축실험은 계명대학교의 첨단건설재료실험센터에서 실시하였으며 압축실험에 사용된 시험기는 그림 3.2.24와 같으며, 표 3.2.7은 압축시험기의 사양이다. 그림 3.2.25는 MER Spring과 폴리우레탄 디스크의 압축실험 사진이다.

표 3.2.7 압축시험기 사양

실험장소	계명대학교 KOCED 첨단건설재료실험센터
Capacity	5MN
Dimensions of pressure plates	380×520 mm
Actuator Stroke	100mm
Load mesuring range	100 ~ 5000 kN



그림 3.2.24 실험 장비



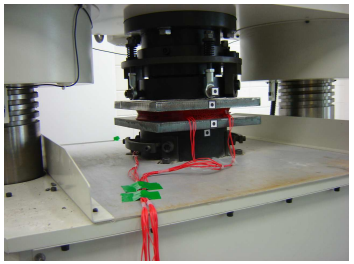


그림 3.2.25 압축실험 사진

(2) 실험 내용 및 결과

(가) 폴리우레탄 디스크

EQS 135T를 이용하여 압축실험을 수행하였다. EQS 135T는 수직 허용하중이 135ton 이므로 135ton까지 하중을 제하하였다. 폴리우레탄 디스크에 센서부착위치는 그림 3.2.26과 같다. 그림 3.2.26과 같이 노치 부분에 전기저항식 변형률센서를 부착하여 실험을 수행하였다. 전기저항식 변형률센서의 크기는 10*3mm이며, 노치부분에서 1mm 위에 부착하였으며, 폴리우레탄 디스크에 하중을 적재 할 경우의 노치부분이 횡방향으로 늘어난 길이를 계측할 수 있도록 vision system을 설치하였다. 수치해석으로 추정한 변형률 값은 그림 3.2.27과 같다.

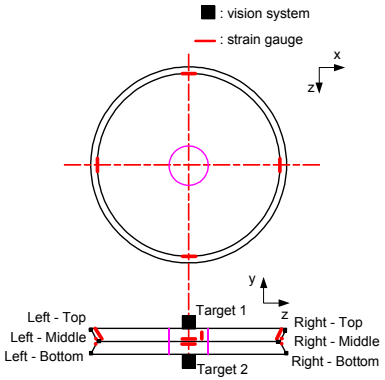
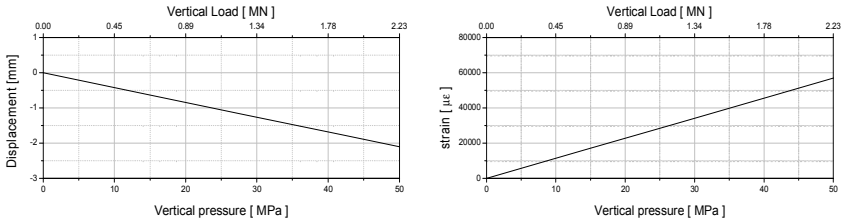
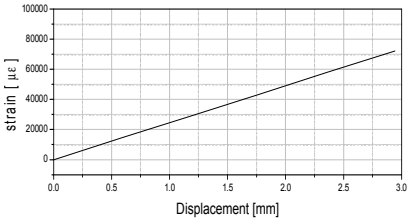


그림 3.2.26 센서의 부착위치

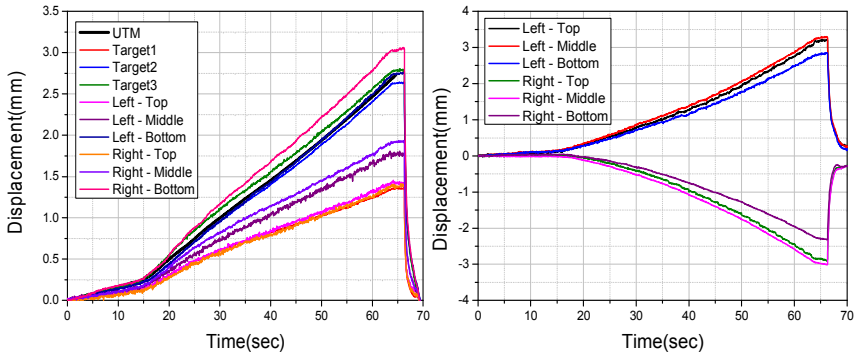


(a) 하중-변위 (b) 하중-변형률



(c) 변위-변형률

그림 3.2.27 노치부분의 응답(변형률(x),변위(y),하중(y)) 비교



(a) 수직 변위 (b) 수평 변위

그림 3.2.28 vision system을 이용한 계측 변위응답

그림 3.2.28은 vision system을 이용하여 계측한 변위응답이다. 그림 3.2.28(a)에서 수직변위를 확인 할 수 있으며 Right와 Left의 변위값이 일치함을 확인 할 수 있다. 또한 UTM으로 계측한 변위응답과 vision system을 이용하여 계측한 변위응답이 일치함을 확인 할 수 있다. 그림 3.2.29는 전기저항식 변형률센서로 계측한 변형률신호와 vision system으로 계측한 변위응답을 이용하여 추정한 변형률신호를 비교한 그래프이다. 전기저항식 변형률센서는 변형률신호를 3000$\mu\varepsilon$까지 계측이 가능하며, 그림에서 확인 할 수 있듯이 3000$\mu\varepsilon$까지는 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 그러므로 vision system으로 계측한 변위응답으로 변형률신호를 추정하여도 타당한 변위응답을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

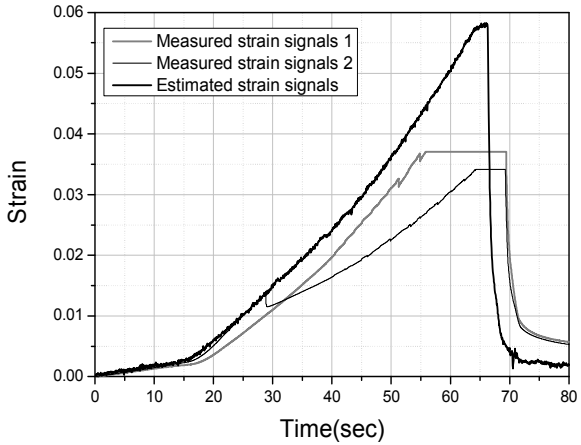


그림 3.2.29 계측 변형률신호와 추정 변형률신호의 비교

하중에 따른 하중과 변위의 관계는 vision system을 이용하여 계측한 변위응답과 UTM으로 계측한 하중을 이용하였다. 그림 3.2.30은 하중에 따른 변위의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 처음에 변위와 하중의 관계가 선형이 아니지만 하중이 증가하면서 선형에 가까움을 확인 할 수 있다. 그림 3.2.30을 이용하여 그림 3.2.31과 같이 응력과 변형률의 관계를 계산할 수 있다. 수치해석의 경우 경계조건이 폴리우레탄 디스크의 상면과 하면을 완전고정으로 하였으나 실제 실험에서는 완전고정이 되지 않아 그림 3.2.30과 같이 실험값과 수치해석 값이 오차가 발생한 것으로 판단된다.

실험결과에서도 변형률 값이 FBG센서의 최대변형률 값인 10000$\mu\varepsilon$을 초과함으로 FBG 센서를 폴리우레탄디스크에 직접 부착하는 것은 불가능 하다. 그러므로 변위센서를 제작하여 수직변위를 계측하는 방법을 사용하였다.

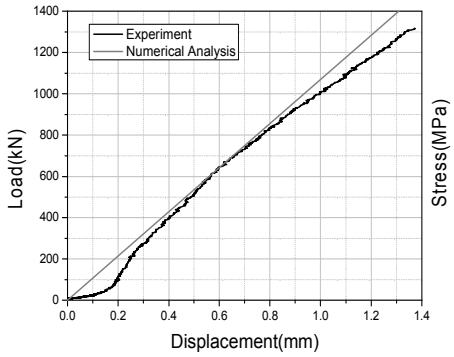


그림 3.2.30 하중과 변화량의 관계

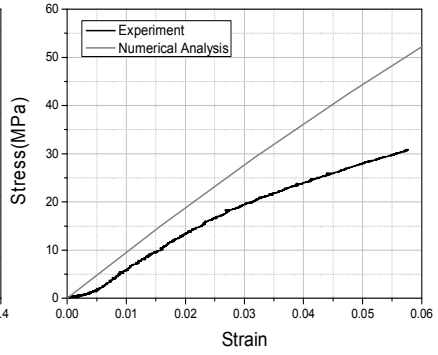


그림 3.2.31 응력과 변형률의 관계

(나) MER Spring

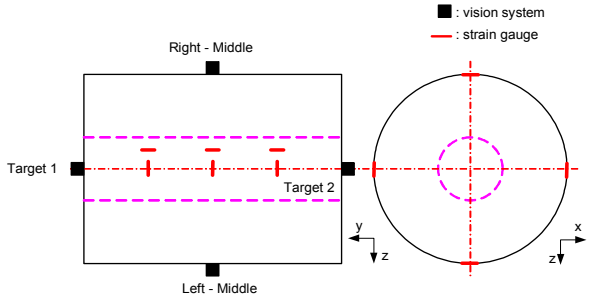
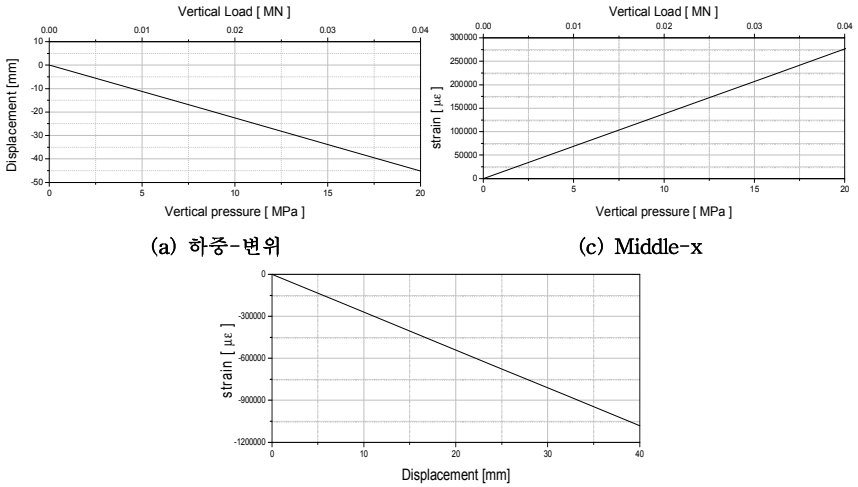


그림 3.2.32 센서의 부착위치

그림 3.2.32는 MER Spring의 전기저항식 변형률센서의 부착위치와 vision system의 target 위치이다. 그림 3.2.32와 같이 MER Spring의 1/4, 1/2, 3/4지점에 전기저항식 변형률센서를 수직(y),수평(z)으로 설치한다. 수치해석으로 추정한 변형률 값은 그림 3.2.33과 같다.



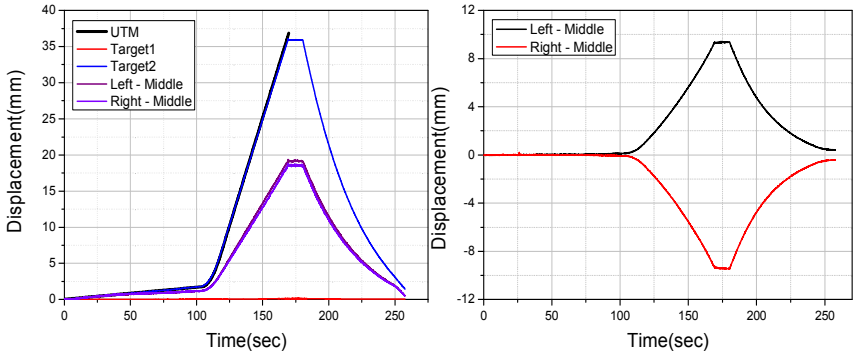
(a) 하중-변위 (c) Middle-x

(c) 변위-변형률

그림 3.2.33 중앙부분의 응답(변형률(z),변위(y),하중(y)) 비교

그림 3.2.34는 vision system을 이용하여 계측한 변위응답이다. 그림 3.2.34(a)에서 수직변위를 확인 할 수 있으며 Right와 Left의 변위 값이 일치함을 확인 할 수 있다. 또한 UTM으로 계측한 변위응답과 vision system을 이용하여 계측한 변위응답이 일치함을 확인 할 수 있다. 그림 3.2.35는 전기저항식 변형률센서로 계측한 변형률신호와 vision

system으로 계측한 변위응답을 이용하여 추정한 변형률신호를 비교한 그래프이다. 전기저항식 변형률센서는 변형률신호를 3000$\mu\varepsilon$까지 계측이 가능하며, 그림에서 확인 할 수 있듯이 3000$\mu\varepsilon$까지는 거의 일치함을 확인 할 수 있다. 그러므로 vision system으로 계측한 변위응답으로 변형률신호를 추정하여도 타당한 변위응답을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 수직 변위 (b) 수평 변위

그림 3.2.34 vision system을 이용한 계측 변위응답

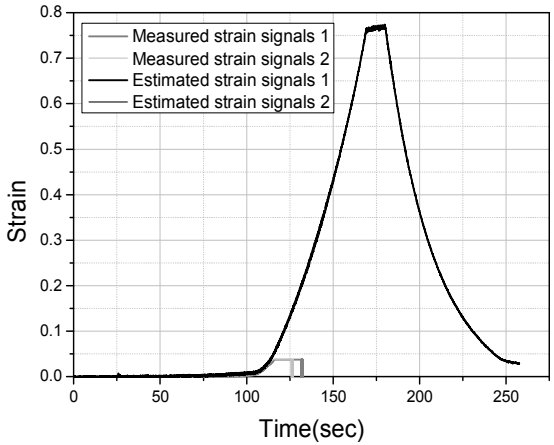


그림 3.2.35 계측 변형률신호와 추정 변형률신호의 비교

하중과 변위의 관계는 vision system을 이용하여 계측한 변위응답과 UTM으로 계측한 하중을 이용하였다. 그림 3.2.36은 하중에 따른 변위의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 처음에 변위와 하중의 관계가 선형이 아니지만 하중이 증가하면서 선형에 가까움을 확인 할 수 있다. 그림 3.2.36을 이용하여 그림 3.2.37과 같이 응력

과 변형률의 관계를 계산할 수 있다. 수치해석의 경우 경계조건이 MER Spring의 상면과 하면을 완전고정으로 하여 수치해석을 수행하였으나 실제 실험에서는 완전고정이 되지 않았으므로 그림 3.2.36과 같이 실험값과 수치해석 값의 오차가 발생하였다.

실험결과에서도 변형률 값이 FBG센서의 최대변형률 값인 10000$\mu\varepsilon$을 초과함으로 FBG센서를 MER Spring에 직접 부착하는 것은 불가능 하다. 그러므로 Lode cell 형식의 하중센서를 제작하여 수평하중을 계측하는 방법을 사용한다.

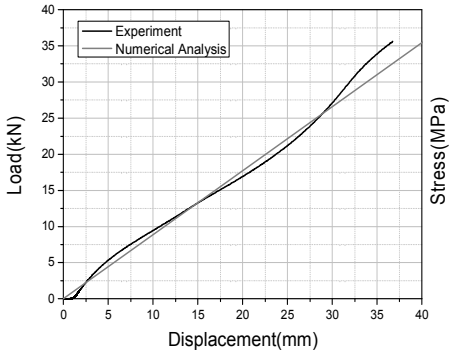


그림 3.2.36 하중과 변화량의 관계

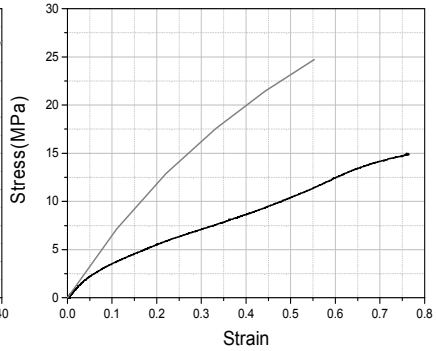


그림 3.2.37 응력과 변형률의 관계

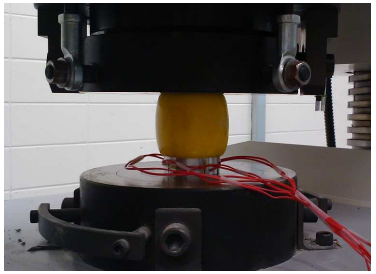
나. 압축실험을 통한 변위센서의 검증

(1) 실험 개요

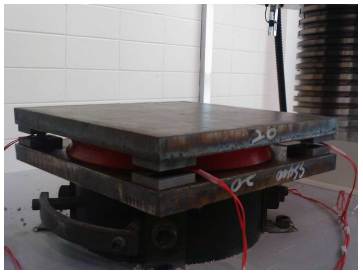
EQS(Eradi Quake System)의 근본적인 기능은 상, 하부구조물 사이에서 복원력을 제공하며 회전을 수용하는 하중전달 베어링과 같은 기능을 한다. EQS에는 수직하중을 수용하는 폴리우레탄 디스크와 수평하중을 수용하는 MER Spring이 내장되어 있다. 그러므로 폴리우레탄 디스크와 MER Spring에 FBG센서를 부착하거나 간접적인 방법을 이용하여 EQS가 받는 하중에 따른 처짐과 수평변위를 계측할 수 있는 마찰형 스마트 베어링을 개발하였다. 마찰형 스마트 베어링의 개발을 위하여 폴리우레탄 디스크와 MER spring의 수치해석 및 압축실험을 수행 하였다. 실험결과 폴리우레탄 디스크와 MER spring은 변형이 크므로 직접 FBG센서를 설치하는 것은 부적합하여 간접적인 방법을 사용하였다. 폴리우레탄 디스크에는 변위센서를 제작하여 부착하고, MER spring에는 load cell을 제작하여 적용하였다. 압축실험은 계명대학교의 첨단건설재료실험센터에서 실시하였으며 압축실험에 사용된 압축시험기는 그림 3.2.38과 같으며, 그림 3.2.39는 MER Spring과 폴리우레탄 디스크의 압축실험 사진이다.



그림 3.2.38 실험 장비



(a) MER Spring

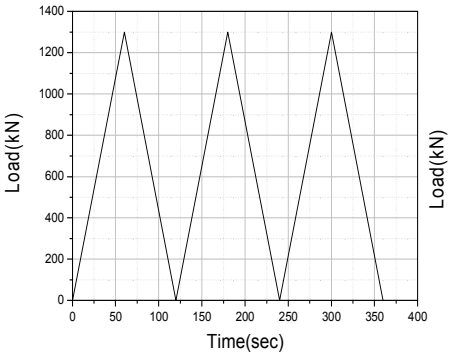


(b) 폴리우레탄 디스크

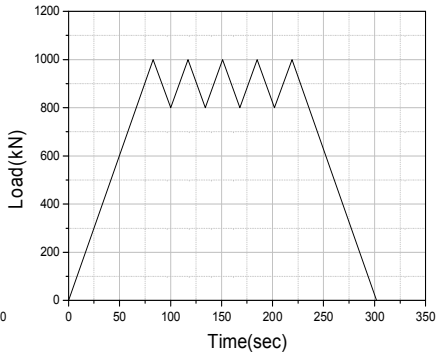
그림 3.2.39 압축실험 사진

(2) 실험 내용

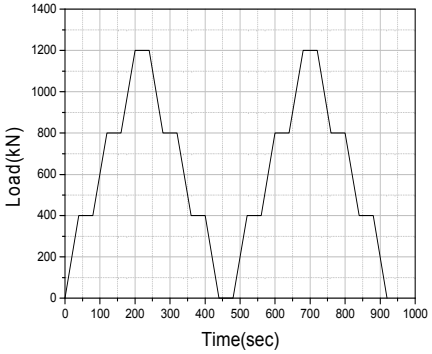
압축시험에서 폴리우리탄 디스크의 하중재하는 그림 3.2.40과 같은 최대하중인 1300kN(P_V)의 하중을 재하하고 하중을 제거하는 것을 반복하는 실험과 900kN의 하중을 재하한 상태에서 ±100kN의 하중을 반복적으로 재하하는 실험을 수행하였으며, 400kN의 하중을 증가시키면서 하중을 재하하고 400kN의 하중을 점차적으로 제거하면서 하중을 재하하는 실험을 수행하였다. 그리고 MER Spring은 그림 3.2.41과 같이 30kN의 하중을 재하하고 제거하는 것을 반복하는 실험과 15kN의 하중을 재하한 상태에서 ±5kN의 하중을 반복적으로 재하하는 실험을 수행하였다. 또한 10kN의 하중을 증가시키면서 하중을 재하하고 10kN의 하중을 점차적으로 제거하면서 하중을 재하하는 실험을 수행하였다.



(a) Case1($P_{Vmax} = 1.0P_V$)

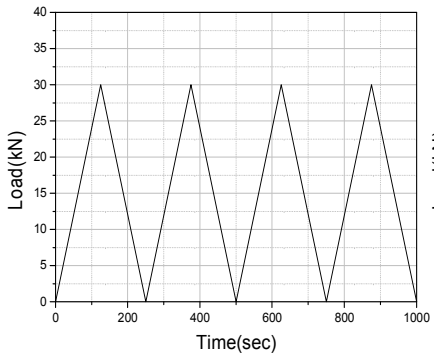


(b) Case2($f_V = (0.67 \pm 0.075)P_V$)

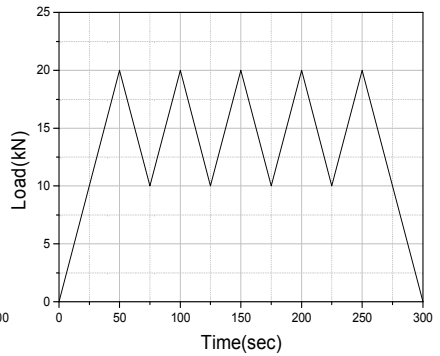


(c) Case3($P_V' = 0.3P_V,\ 0.6P_V,\ 0.9P_V$)

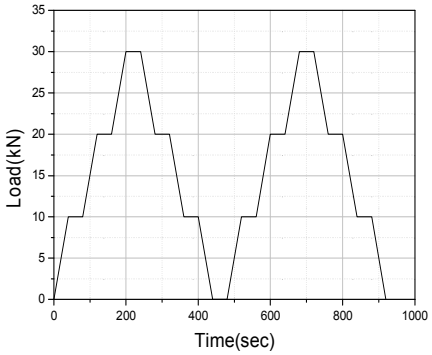
그림 3.2.40 폴리우레탄 디스크의 압축하중



(a) Case4($P_{Vmax} = 0.022P_V$)



(b) Case5($f_V = (0.011 \pm 0.004)P_V$)



(c) Case6($P_V' = 0.0073P_V, 0.0146P_V, 0.022P_V$)

그림 3.2.41 MER spring의 압축하중

(3) 실험 결과

(가) 폴리우레탄 디스크

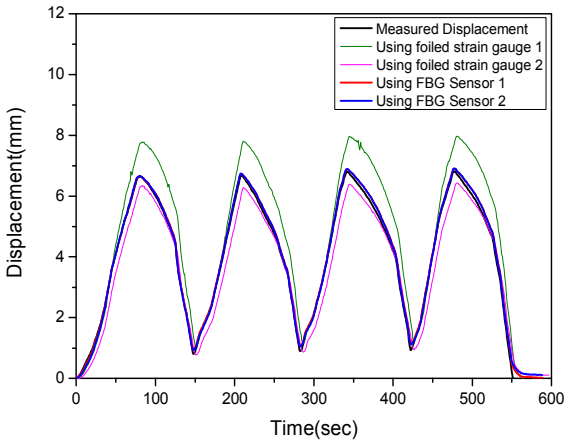


그림 3.2.42 Case1에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

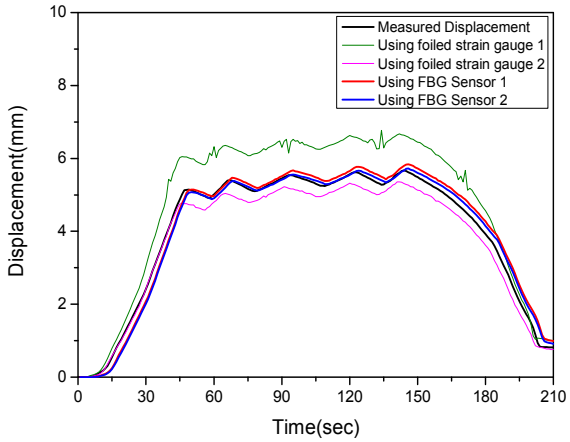


그림 3.2.43 Case2에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

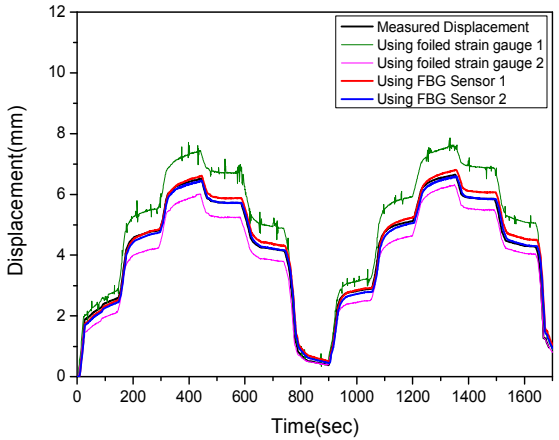


그림 3.2.44 Case3에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

그림 3.2.42~3.2.44는 계측변위응답과 추정변위응답을 비교한 것이다. 그림 3.2.42~3.2.44에서 확인 할 수 있듯이 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답은 LVDT로 계측한 변위응답과 잘 일치함을 확인 할 수 있으나, 전기저항식 변형률센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답은 오차가 크게 발생함을 확인 할 수 있다. 그 이유는 전기저항식 변형률센서를 이용하여 변형률을 계측할 경우 초기치를 조정하여야 한다. 그러나 본 연구에서 제안한 변위센서는 초기 하중을 적용한 상태에서 변위센서를 제작하여야 함으로 전기저항식 변형률센서를 사용할 경우 초기치를 조정할 수 없으므로 오

차가 발생하는 것으로 판단된다.

Percent error와 Root Mean Square(RMS) error를 이용하여 오차분석을 수행한 결과 표 3.2.8과 같이 FBG센서를 이용할 경우 Percent Error는 0.2% 이하의 오차가 발생하였으며, RMS Error는 0.2mm 이하의 오차가 발생하여 오차가 적은 것을 확인 할 수 있다. 그러나 전기저항식 변형률센서를 이용할 경우 Percent Error는 4.4% 이하의 오차가 발생하였으며, RMS Error는 1mm 이하의 오차가 발생하여 오차가 크게 발생한 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 전기저항식 변형률센서가 아닌 FBG센서를 적용한 변위센서를 사용한다면 신뢰성 있는 변위응답을 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.2.8 변위응답에 대한 오차분석

실험 Case	Percent Error(%)		RMS Error(mm)	
	Foiled Strain Gauge	FBG Sensor	Foiled Strain Gauge	FBG Sensor
Case 1	4.3793	0.065129	0.95355	0.11629
	1.0762	0.065247	0.47269	0.11639
Case 2	3.697	0.17308	0.84928	0.18376
	0.49234	0.097335	0.30993	0.1378
Case 3	2.5791	0.19297	0.74556	0.20393
	0.76993	0.10928	0.40735	0.15347

(나) MER Spring

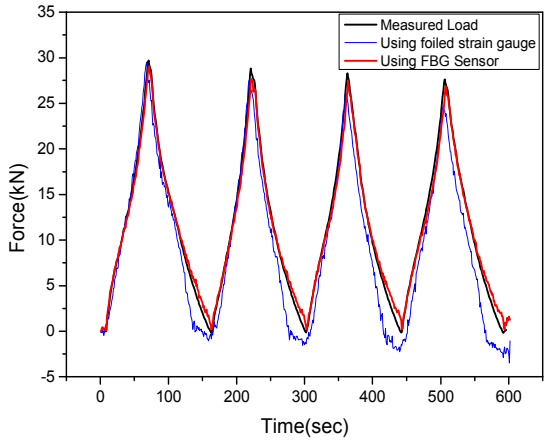


그림 3.2.45 Case4에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

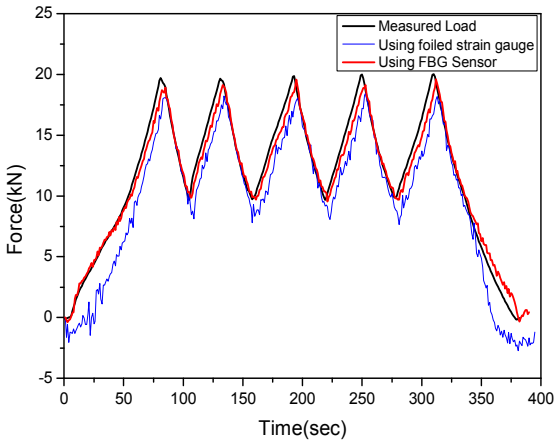


그림 3.2.46 Case5에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

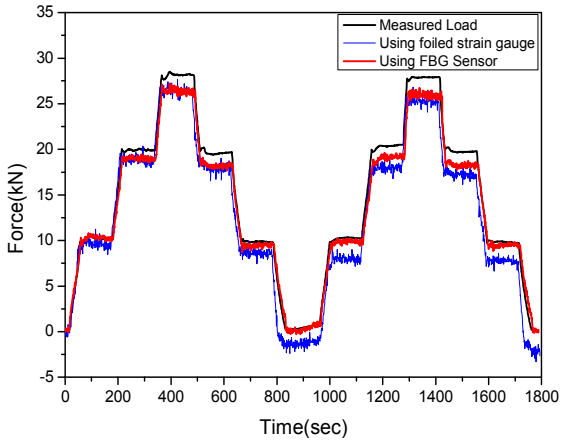


그림 3.2.47 Case6에 의한 계측변위응답과 추정변위응답 비교

그림 3.2.45~3.2.47은 압축시험기에서 계측한 하중응답과 Load Cell을 이용하여 계측한 하중응답을 비교한 것이다. 그림 3.2.45~3.2.47에서 확인 할 수 있듯이 FBG센서를 이용하여 제작한 Load Cell로 계측한 하중응답은 압축실험기로 계측한 하중응답과 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 전기저항식 변형률센서로 제작한 Load Cell을 이용하여 계측한 하중응답은 하중응답의 크기의 차이도 있으며, 노이즈의 영향으로 오차가 크게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 전기저항식 변형률센서를 이용하는 것보다 FBG센서를 이용한다면 신뢰성 있는 하중응답의 계측이 가능할 것으로 판단된다. 오차분석을 수행한 결과 표 3.2.9와 같이 FBG센서를 이용할 경우 Percent Error는 0.44% 이하의 오차가 발생하였으며, RMS Error는 1.2kN 이하의 오차가 발생하여 오차가 적은 것을 확인 할 수 있다. 그러나 전기저항식 변형률센서를 이용할 경우 Percent Error는 3.5% 이하의 오차가 발생하였으며, RMS Error는 2.7kN 이하의 오차가 발생하여 오차가 크게 발생한 것을 확인 할 수 있다. 그러므로 전기저항식 변형률센서가 아닌 FBG센서를 이용한 Load cell을 사용한다면 신뢰성 있는 하중응답을 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.2.9 변위응답에 대한 오차분석

실험 Case	Percent Error(%)		RMS Error(kN)	
	Foiled Strain Gauge	FBG Sensor	Foiled Strain Gauge	FBG Sensor
Case 4	3.4641	0.32848	2.6146	0.80513
Case 5	2.6249	0.24356	2.1156	0.64443
Case 6	1.6891	0.43749	2.2169	1.1283

다. EQS의 성능검사실험

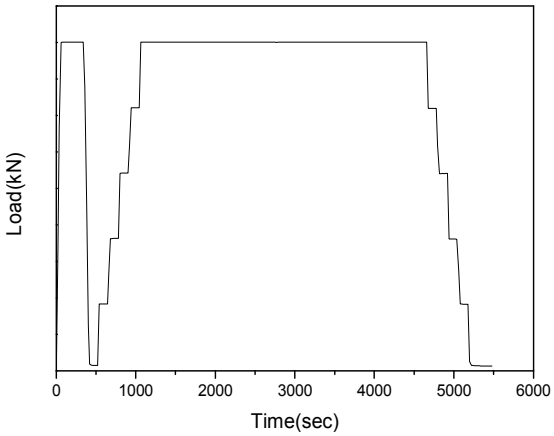
(1) 실험 개요

실험은 EQS 7500kN($P_V = 7{,}500kN$), EQS PLUS 7500kN($P_V = 7{,}500kN$), EQS 6000kN($P_V = 6{,}000kN$), EQS 5000kN($P_V = 5{,}000kN$)를 사용하여 실시하며, LVDT를 이용하여 계측한 변위응답과 본 연구에서 개발한 FBG센서를 적용한 변위센서로 계측한 변위응답을 비교분석 함으로서 본 연구에서 개발한 변위센서의 사용성을 검증하였다.

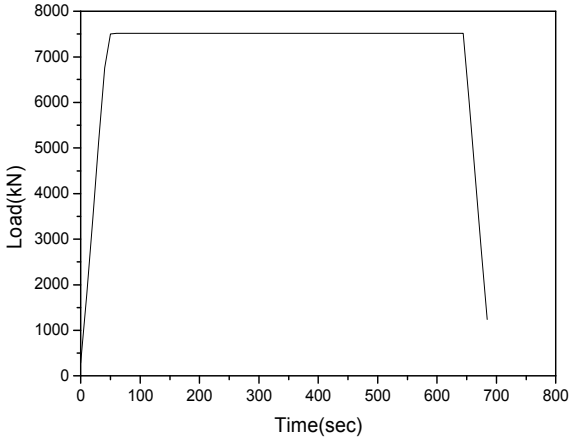
(2) 실험 내용

(가)수직 정적특성실험(폴리우레탄 디스크)

EQS의 조립 완성품에 대한 성능검사실험으로 수직하중 재하실험과 회전실험을 수행하였다. 시험방법 및 기준은 건설교통부 제정 도로교 표준시방서 및 미국도로환경안전협회 규격의 디스크 받침 재하시험 기중에 명시된 바에 준하여 실시하였다. 실험 Case 7(그림 3.2.48(a))은 수직하중 재하실험으로써 EQS의 최대하중보다 50%를 가산하여 시험 최대수직하중 값을 설정하여 실험을 수행하였다. 수직하중 재하실험의 실험방법은 최대수직하중 값을 5구간으로 나누어 구간별로 2분간 하중유지 후 최대수직하중에서 60분간 유지하며, 5구간으로 나누어 구간별로 2분간 하중을 제거하는 실험이다. 실험 Case 8(그림 3.2.48(b))은 회전실험으로써 1.14°기울여진 변단면판을 사용하여 설계하중에서의 최대수직하중을 재하 시키고 10분 동안 유지하는 실험이다. 수직하중제하 실험을 통하여 수직하중과 수직변위의 관계를 예측하였다.



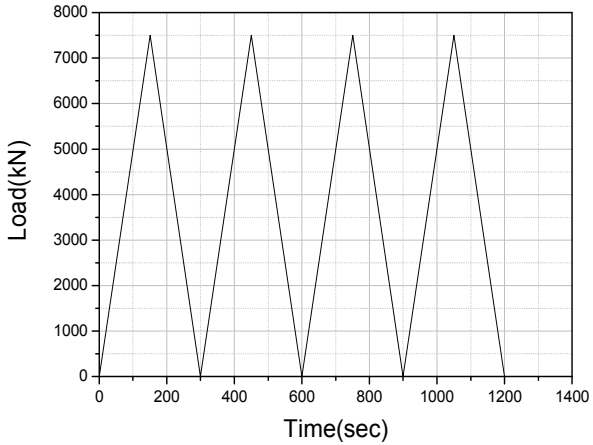
(a) Case7



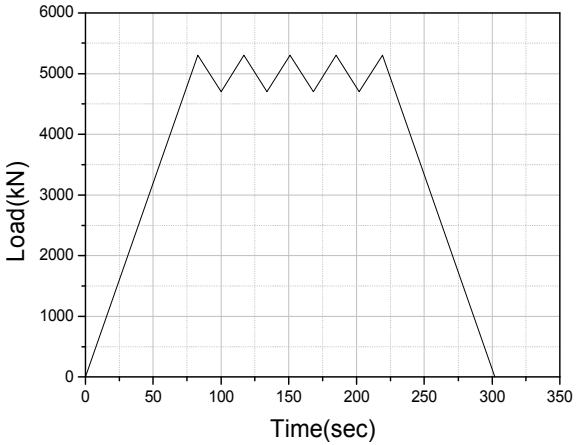
(b) Case8

그림 3.2.48 수직 정적특성실험

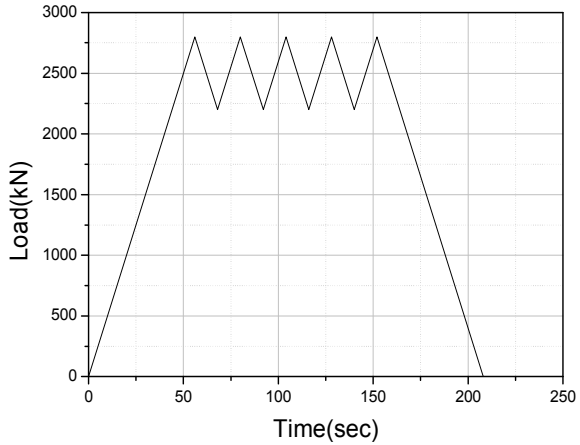
하중재하 형상에 따른 하중-변위곡선의 변화를 살펴보기 위하여 하중을 제어하여 다섯 종류(그림 3.2.49)의 실험을 더 수행하였다. 하중재하이력은 그림 3.2.49와 같이 하며, 정적인 움직임을 모사하기 위하여 loading rate을 50kN/sec로 하였다.



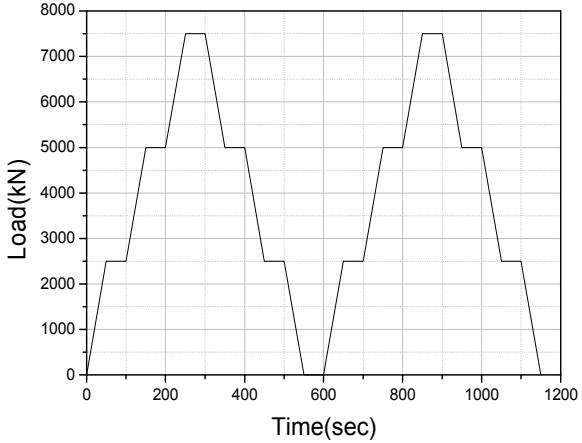
(a) Case9($P_{Vmax} = 1.0P_V$)



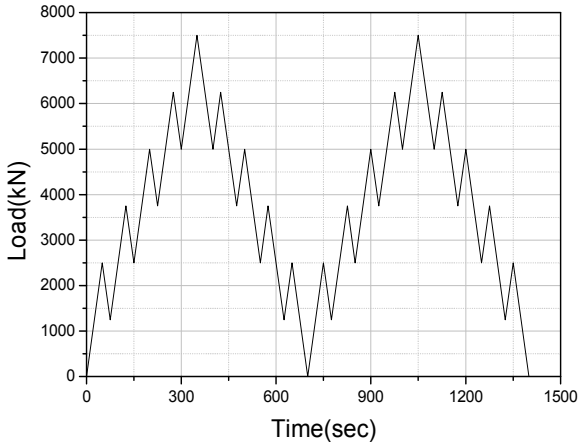
(b) Case10($f_V = (0.67 \pm 0.04)P_V$)



(c) Case11($f_V = (0.33 \pm 0.04)P_V$)



(d) Case12($P_V^{'} = 0.33P_V,\ 0.66P_V,\ 1.00P_V$)



(e) Case13($\triangle P_V^{'} = 0.167P_V$)

그림 3.2.49 수직 정적특성실험(loading rate:$50kN$/sec)

(나) 실험장비 및 압축실험

그림 3.2.50은 2축 동적시험기를 이용하여 Case 7, 8을 수행하였으며, 2축 동적시험기의 사양은 표 3.2.10과 같다. 그림 3.2.51의 압축시험기를 이용하여 Case 9-13을 수행하였으며, 압축시험기의 사양은 표 3.2.11과 같다. 그림 3.2.52는 압축실험 사진이다. 그림 3.2.52(a)는 회전실험 사진이다. 그림 3.2.53은 실험에 사용된 계측센서로서 변형률을 이용한 수직변위를 계측하는 센서와 LVDT 사진이다. 그림 3.2.54는 센서의 부착 위치이다. 그림 3.2.54에서 확인 할 수 있듯이 변형률로부터 변위를 추정하는 위치는 폴리우레탄 디스크의 수직변위를 계측하도록 설치하였으며, LVDT는 폴리우레탄 디스크의 수직변위의 계측이 불가능하여 EQS 전체의 수직변위를 계측하였다. 그러므로 FBG센서가 적용된 변위센서로 계측한 변위응답과 LVDT로 계측한 변위응답의 정확한 비교가 어려울 것으로 판단된다.

표 3.2.10 2축 동적시험기 사양(Case7, 8의 실험수행)

실험장소	에스코알티에스 화성공장
Vertical force	20,000kN
Vertical stroke	200mm
Horizontal force	±1,500kN
Horizontal stroke	±250mm
Horizontal speed	±130mm/sec
Test space	2,000×2,000×800

표 3.2.11 압축시험기 사양(Case9-13의 실험수행)

실험장소	에스코알티에스 안성공장
Vertical force	52,000kN



그림 3.2.50 2축 동적시험기(Case7, 8의 실험수행)



그림 3.2.51 압축시험기(Case9-13의 실험수행)



(a) EQS PULS 7500 (b) EQS 7500

그림 3.2.52 압축실험 사진



(a) 광섬유센서와 전기저항식센서를 이용한 변위계 (b) 변위계

그림 3.2.53 센서설치 사진

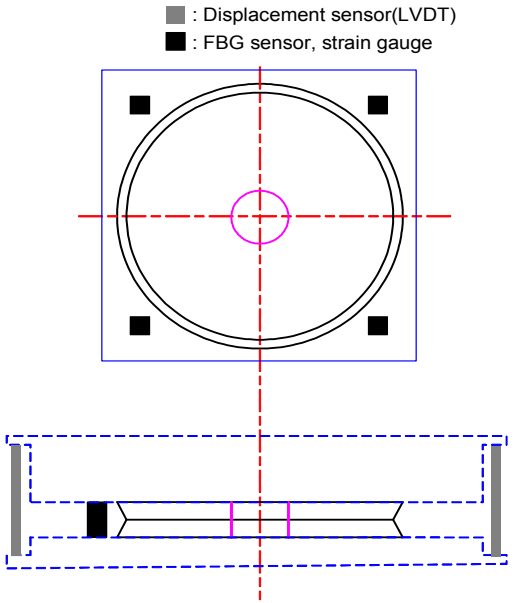


그림 3.2.54 센서설치 위치

(3) 실험 결과

(가) EQS의 용량별 계측응답 분석

그림 3.2.55~3.2.61은 LVDT로 계측한 변위응답과 본 연구에서 개발한 FBG센서와 전기저항식 변형률센서를 활용한 변위센서로 계측한 변위응답을 비교한 것이다. 그림 3.2.55(a)에서 확인 할 수 있듯이 LVDT로 계측한 변위응답이 본 연구에서 개발한 변위

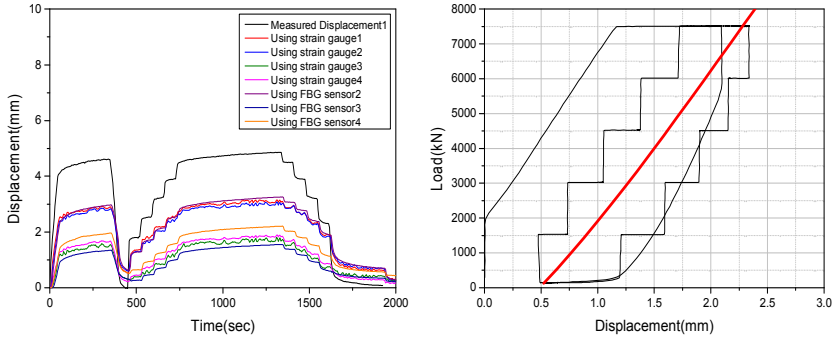
센서로 계측한 변위응답보다 크게 계측된 것을 확인 할 수 있다. 그 이유는 LVDT는 그림 3.2.54와 같이 EQS의 총 높이를 계측한 것이고 본 연구에서 개발한 변위센서로 계측한 변위응답은 폴리우레탄 디스크의 높이 변화를 계측한 것임으로 LVDT로 계측한 변위응답이 크게 추정된 것으로 판단된다.

그림 3.2.55~3.2.61에서 확인 할 수 있듯이 FBG센서로 계측한 변위응답과 전기저항식 변형률센서로 계측한 변위응답의 오차가 큰 것을 확인 할 수 있다. FBG센서는 계측당시에 초기치를 설정할 필요가 없지만 전기저항식 변형률센서를 초기치를 설정해야 한다는 단점이 있다. 인장하중이 발생한 상태의 변위센서를 제작하여야 함으로 전기저항식 변형률센서는 초기값을 설정 할 수 없었다. 그러므로 광섬유센서로 추정한 변위응답이 가장 정확할 것으로 판단된다. 그림 3.2.55(b)는 하중-변위곡선이다.

① EQS 7500

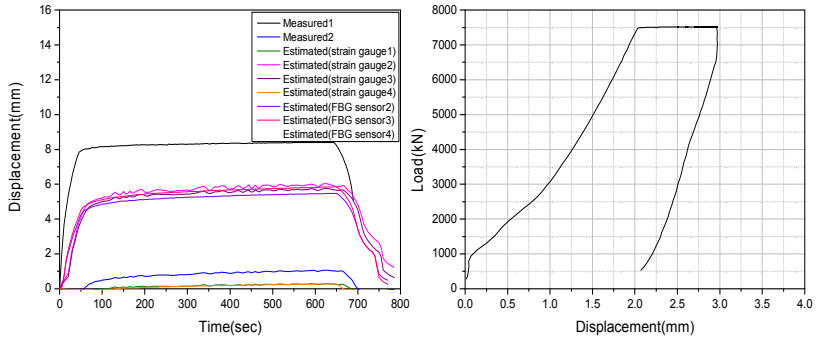
그림 3.2.55(b)의 하중-변위 곡선으로부터 추세선을 이용하여 EQS에 작용한 하중-변위 곡선을 구하였다. 이 곡선을 식으로 나타내면 식(8)과 같다.

$$y = 277.8x^2 + 3443.3x - 1788.4 \qquad (8)$$



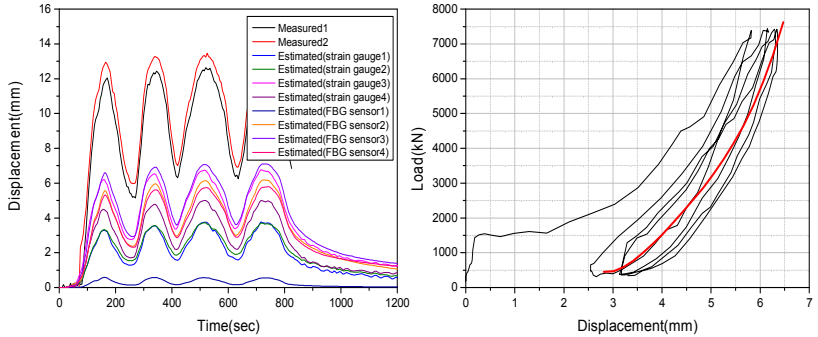
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.55 계측응답(Case7)



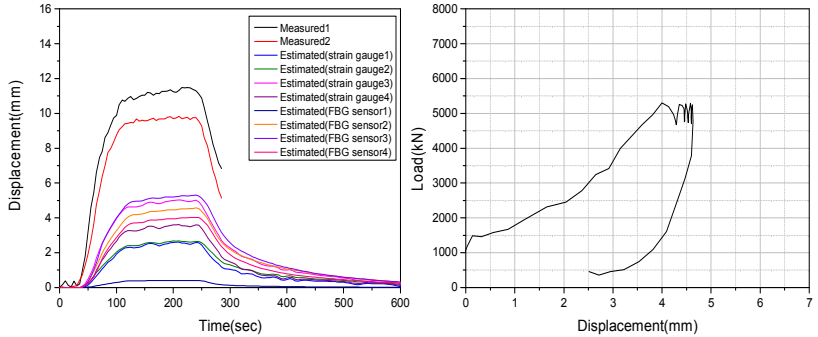
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.56 계측응답(Case8)



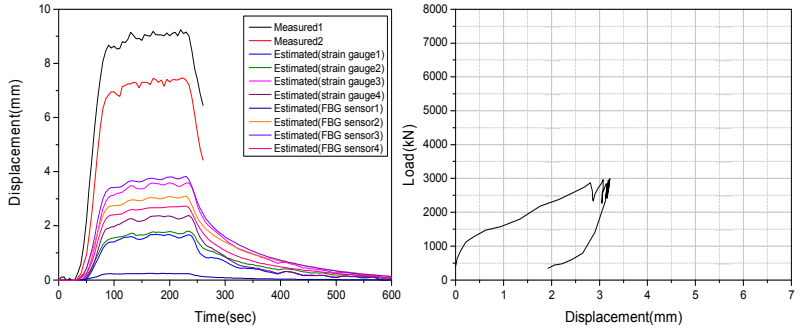
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.57 계측응답(Case9)



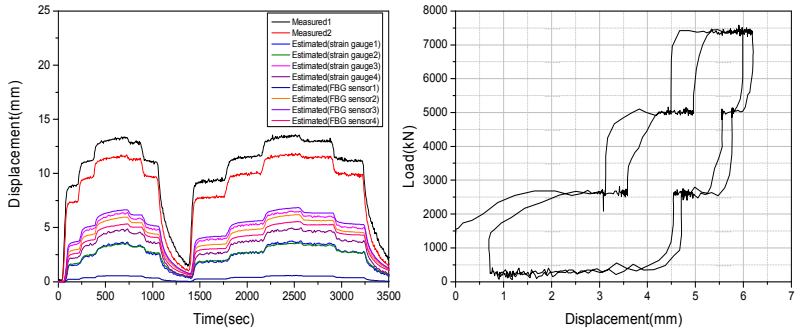
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.58 계측응답(Case10)



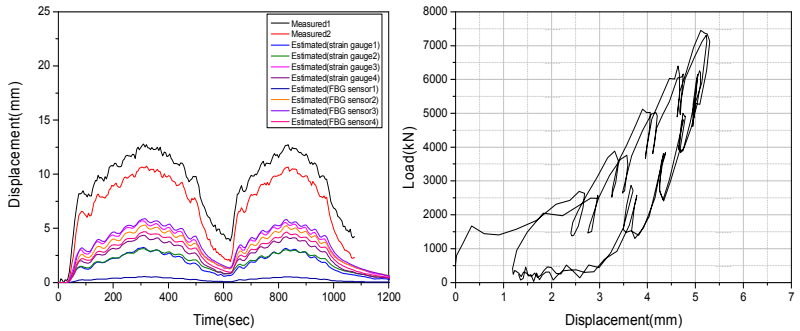
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.59 계측응답(Case11)



(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.60 계측응답(Case12)



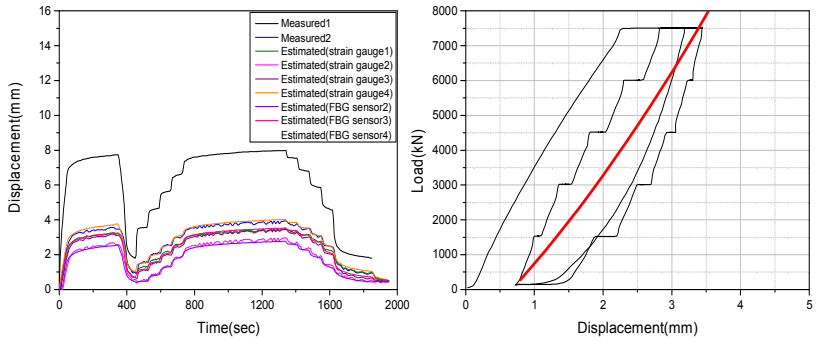
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.61 계측응답(Case13)

② EQS PLUS 7500

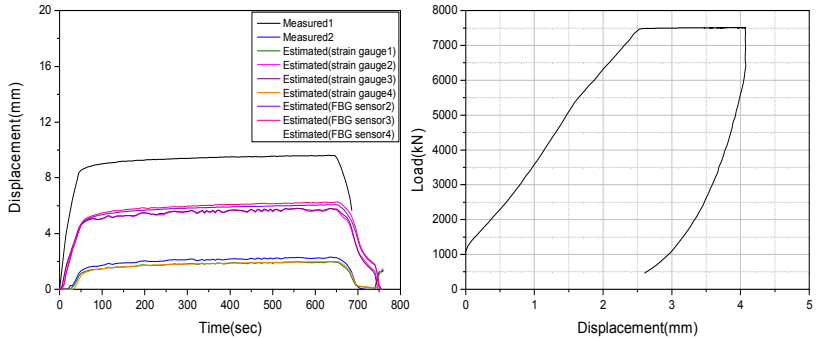
그림 3.2.62(b)의 하중-변위 곡선으로부터 추세선을 이용하여 EQS에 작용한 하중-변위 곡선을 구하였다. 이 곡선을 식으로 나타내면 식(9)와 같다.

$$y = 210.5x^2 + 1905.8x - 1374 \qquad (9)$$



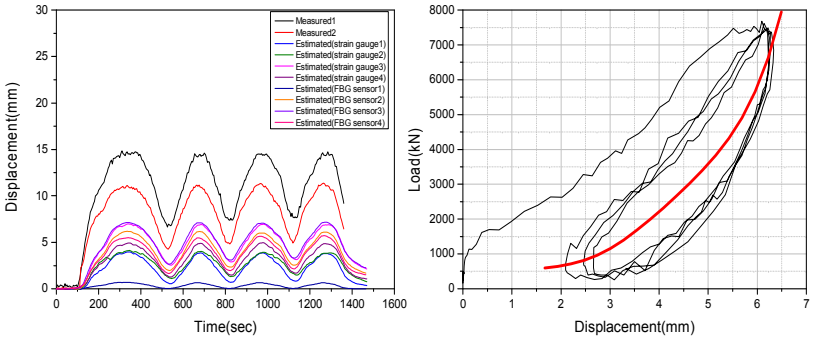
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.62 계측응답(Case7)



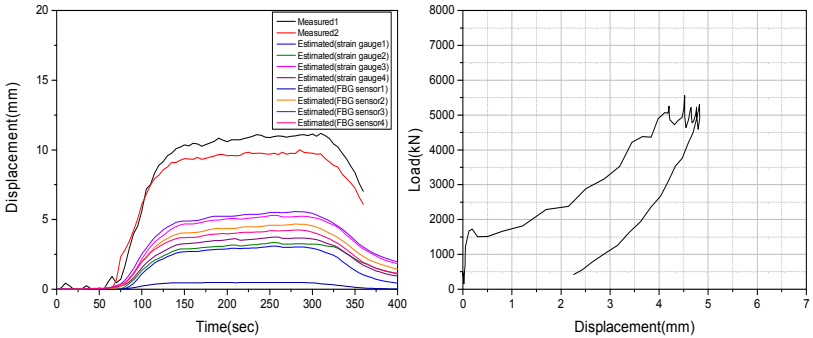
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.63 계측응답(Case8)



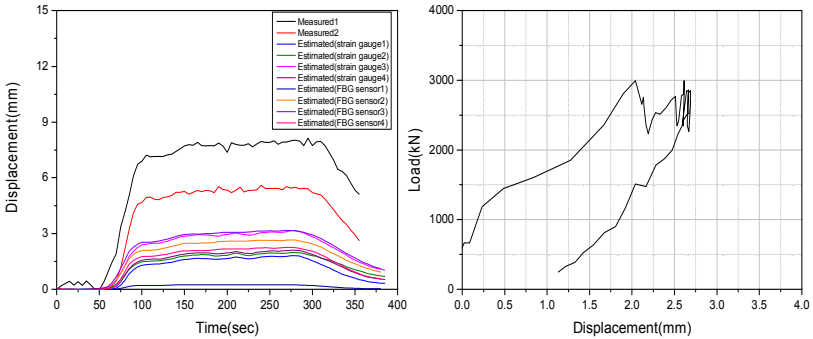
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.64 계측응답(Case9)



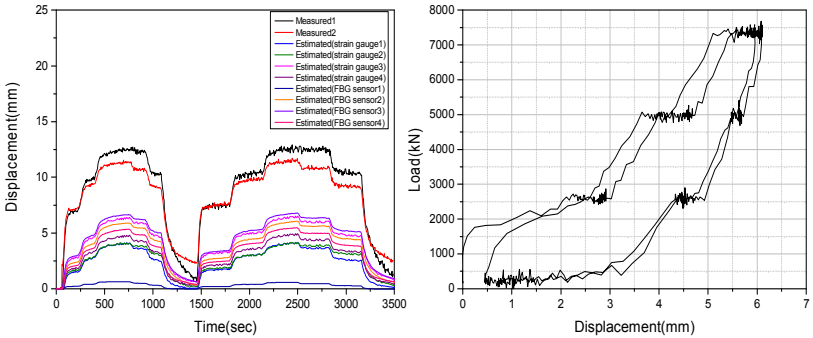
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.65 계측응답(Case10)



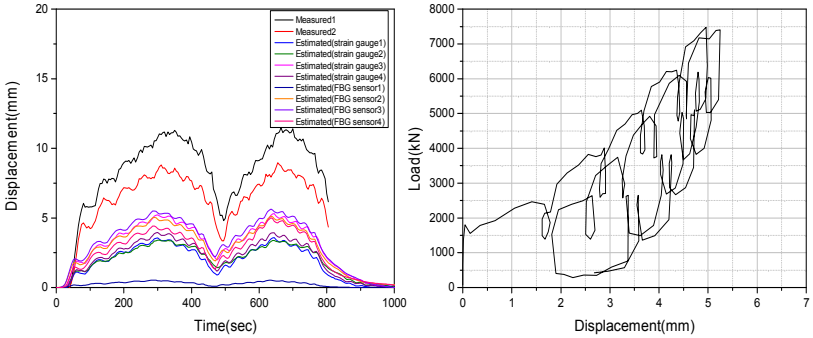
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.66 계측응답(Case11)



(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.67 계측응답(Case12)



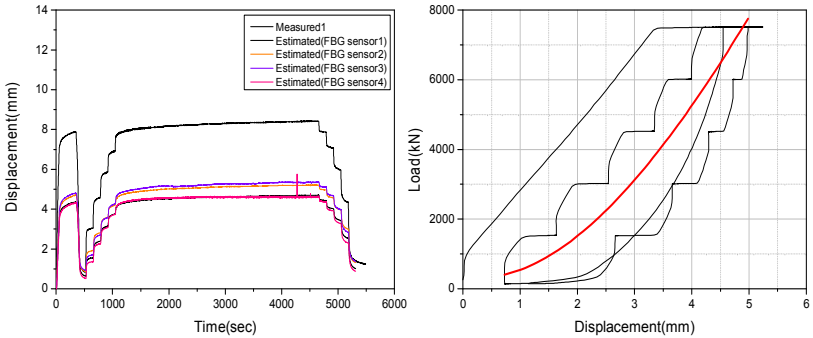
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.68 계측응답(Case13)

③ EQS 5000

그림 3.2.69(b)의 하중-변위 곡선으로부터 추세선을 이용하여 EQS에 작용한 하중-변위 곡선을 구하였다. 이 곡선을 식으로 나타내면 식(10)과 같다.

$$y = -19.4x^3 + 437.3x^2 - 207.1x + 332 \qquad (10)$$



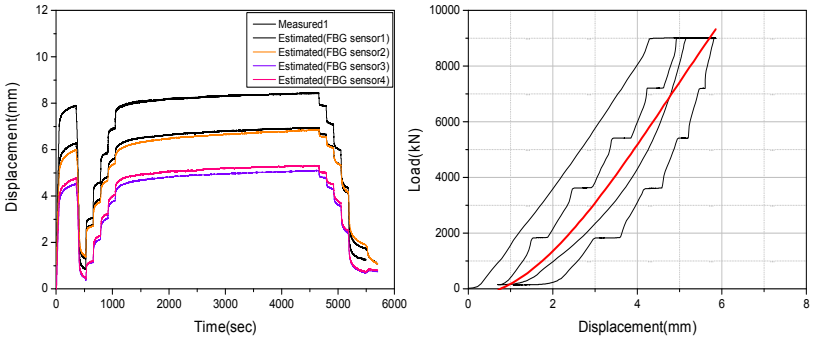
(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.69 계측응답(Case7)

④ EQS 6000

그림 3.2.70(b)의 하중-변위 곡선으로부터 추세선을 이용하여 EQS에 작용한 하중-변위 곡선을 구하였다. 이 곡선을 식으로 나타내면 식(11)과 같다.

$$y = -32.9x^3 - 474.1x^2 - 12.3x - 255 \qquad (11)$$



(a) 계측변위응답의 비교 (b) 하중-변위 곡선

그림 3.2.70 계측응답(Case7)

(나) 응력-변형률곡선

그림 3.2.69(b), 70(b)의 추세선을 응력-변형률 곡선을 그려보면 그림 3.2.71과 같다. 초기 변형이 발생한 이후이므로 변형률이 영점에서 시작하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 두 개의 실험이 정확히는 일치하지 않으나 유사한 경향으로 변형이 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 정확히 일치하지 않는 것은 폴리우레탄 디스크의 형상에 따라 약

간의 차이 있는 것으로 판단된다. 평균 응력-변형률곡선을 그려보면 그림 3.2.72와 같으며 식으로 나타내면 식(12)와 같다.

$$y = 0.935 - 11.522x + 3812.548x^2 - 1461.859x^3 \qquad (12)$$

변위와 하중의 관계 곡선을 이용한다면 폴리우레탄 디스크의 수직변위를 계측함으로써 교량받침에 작용하는 고정하중을 계측할 수 있을 것으로 판단된다. 고정하중을 계측함으로써 교량의 시공 시 시공오차를 줄일 수 있으며 교량의 완공 후 부등침하에 따른 단부에 단차가 발생하는 것을 감지하여 적절한 시기에 교량의 보수·보강이 가능할 것으로 판단된다.

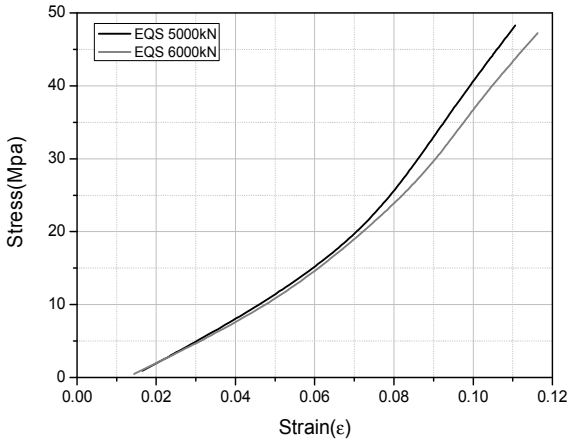


그림 3.2.71 응력-변형률 곡선의 비교

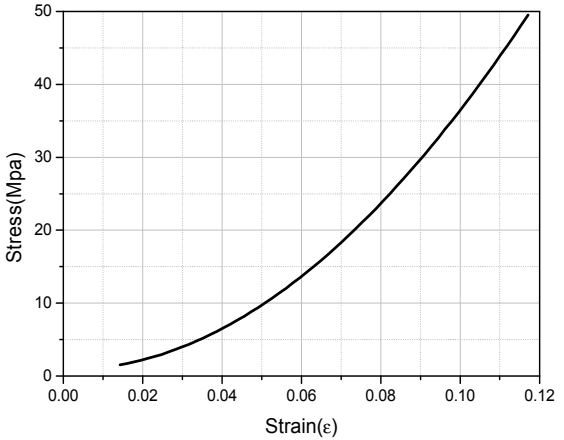


그림 3.2.72 평균 응력-변형률 곡선

라. 피로실험을 통한 내구성 검증

(1) 실험내용

본 연구에서 개발한 마찰형 스마트 베어링은 교량에 설치되는 장비로서 야외에 설치되는 것과 동시에 꾸준한 하중을 전달 받는 장치이다. 수직하중은 크게 고정하중과 이동하중으로 나눌 수 있는데 고정하중은 구조물의 사하중이고 이동하중은 차량하중이다. 차량의 교량통과 시 교량에 처짐이 발생하게 되고 이 처짐은 교량내진장치에 피로하중으로 작용하게 된다. 그러므로 교량에 작용하는 피로하중에 의한 마찰형 스마트 베어링의 내구성을 검증하여야 한다. 그러나 EQS는 기존에 상용화되어 사용되어지고 있는 제품이므로 피로하중에 대한 검증이 완료된 상태이다. 그러므로 마찰형 스마트 베어링에 내장되는 변위센서의 피로하중에 대한 내구성 검증이 필요하다.

피로실험의 장비는 그림 3.2.73의 피로시험기를 사용하였으며, 표 3.2.13은 피로시험기의 사양이다. 개발한 변위센서를 설치하기 위하여 그림 3.2.74와 같이 폴리우레탄 디스크에 위·아래로 평평한 철판을 삽입하여 피로실험을 수행하였다. 개발한 변위센서의 설치위치는 그림 3.2.75와 같다.

표 3.2.13 피로시험기 사양

실험장소	부산대학교 대형진동대실험실
Loading Frame	4 columns, 4,000*1,200*3,000
Maximum loading capacity	1,000kN
Maximum Stroke	300mm



그림 3.2.73 피로시험기

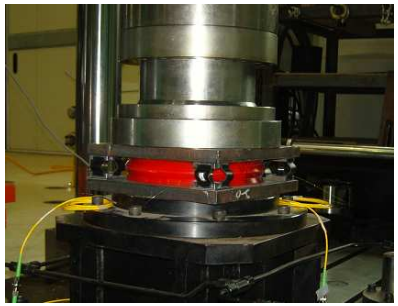


그림 3.2.74 변위센서의 피로실험

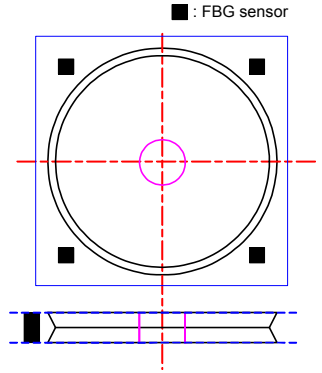


그림 3.2.75 FBG센서기반
변위센서의 설치위치

AASHTO LRFD(2007)에 근거해서 설계 규정을 채택한 국내 도로교설계기준(2005)은 200만회 수준의 반복횟수에서 다른 설계기준들보다 보수적인 응력변동폭을 제시하고 있다. 본 논문에서 개발한 변위·하중센서는 교체가 가능하며, 계측 필요시에만 센서의 설치가 가능함으로 20만회의 피로실험에 대한 내구성을 검토하였다. 따라서 피로실험은 고정하중이 500kN 이고, 200kN의 하중이 반복적으로 가력된다고 가정하여 그림 3.2.76과 같이 500~700kN의 하중을 3.0Hz로 20만회 반복하는 피로실험을 수하였다.

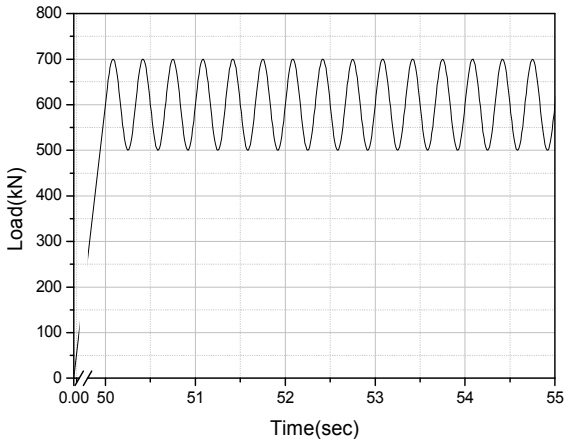


그림 3.2.76 피로실험 하중곡선

(2) 실험결과

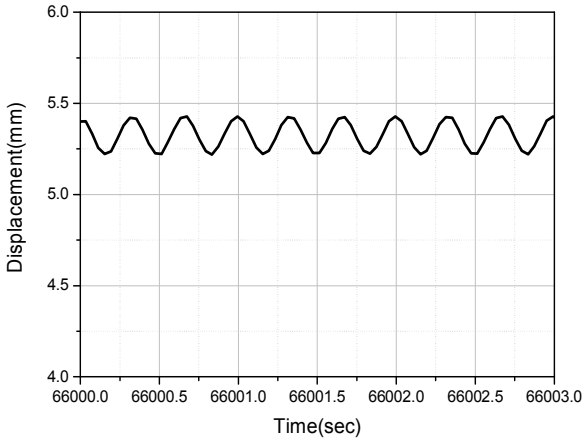


그림 3.2.77 피로실험 결과

하중재하를 500~700kN로 하고 진동수를 3.0Hz로하여 피로실험을 수행한 결과 개발한 변위센서로부터 그림 3.2.77과 같은 변위응답을 계측할 수 있었다. 그림 3.2.77에서 확인 할 수 있듯이 최대변위와 최소변위가 일정함을 확인할 수 있다. 그러므로 20만회의 피로하중 이후에도 충분히 변위응답을 계측할 수 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 변위센서의 외부적인 손상이 없었으며, 변위센서의 계속적인 사용이 가능하였다. 그러므로 개발한 변위센서는 피로에 대한 내구성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

5. 실교량 적용

가. 마찰형 스마트 베어링의 적용교량 선정

광섬유센서가 적용된 내진장치를 그림 3.2.78과 같이 교량에 설치하며, 설치조건을 고려하여 내진장치의 성능을 확인 할 수 있는 최적의 교량을 선정하였다. 설치조건은 접근성이 용이하여 설치 후 센서의 관찰이 가능하며, 단기간 내에 광섬유센서가 적용된 내진장치의 적용이 가능한 교량, 그리고 B-WIM system의 적용이 용이한 교량으로 선정하였다. 광섬유센서가 적용된 내진장치는 일반적으로 철도교량이나 도로교량에 많이 설치되고 있으며, 사장교와 현수교에서는 아직 설치가 되고 있지 않은 실정이다. 그러므로 장대교량에서의 실험은 시기적으로 불가능 할 것으로 판단되어 도로교량에 설치를 하는 것이 최적이라고 판단되므로 도로교에 마찰형 스마트 베어링을 설치하였다.

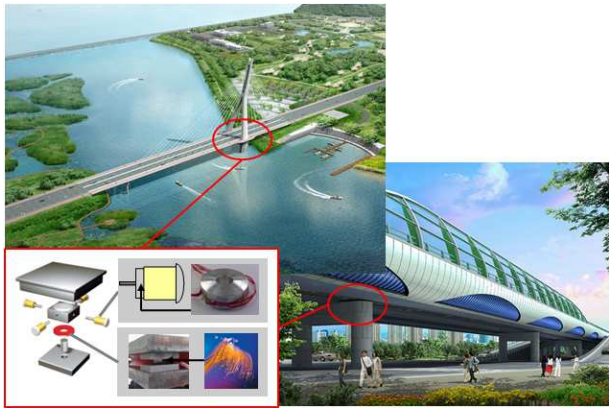


그림 3.2.78 광섬유센서가 적용된 내진장치의 설치 위치

교량적용가능성을 검토한 결과 냉정-부산 고속도로확장구간에 위치한 양산낙동강교를 선정하였다. 양산낙동강교는 기존교량을 확장하는 교량으로써 기존교량에는 EQS를 교체하는 작업을 수행하고, 확장부를 건설하여 연결하는 교량이다. 양산낙동강교는 그림 3.2.79와 같다. 양산낙동강교의 제원은 표 3.2.14와 같다.



그림 3.2.79 양산낙동강교

표 3.2.14 양산낙동강교 제원

교량명	교량형식	교량길이	교폭
양산낙동강교	강박스거더교 (4경간 연속)	70@4X4=1120m	33m

나. 교량의 동특성 분석

구조물의 상태를 파악하는 방법 중 하나인 구조물의 동특성을 계측하는 것은 구조물의 동적거동을 파악하는데 있어 중요한 요소이다. 기존에도 차량을 이용한 충격실험을 통하여 교량의 동특성을 추정한 연구나, 무선 가속도센서를 이용하여 사장교의 동특성을 추정한 연구가 수행 된 바 있다. 하지만 본 연구에서는 기존에 제시되어있는 방법인 가속도계를 설치하여 양산낙동강교의 동특성을 분석하였다. 동특성을 분석함으로써 마찰형 스마트 베어링에 작용할 하중과 구조적인 특성을 파악하고자 한다.

(1) 동특성 분석 알고리즘

(가) 고유진동수 추정기법

하나의 센서에서 계측된 가속도 신호로부터 퓨리에 변환을 이용하여 고유진동수를 구하게 되면 노이즈와 같은 불필요한 신호들이 발생하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 CSD함수(cross spectral density function)를 이용하여 계측응답의 위치에 따른 상관성으로부터 고유진동수를 추정하였다. 식(13)은 Cross-correlation Function이고 식(14)는 CSD함수이다. 여기서 x와 y는 계측응답이다.

$$R_{xy}(\tau)=\lim_{N\to\infty}\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}x_k(t_1)y_k(t_1+\tau) \qquad (13)$$

$$S_{xy}(f)=\int_{-\infty}^{\infty}R_{xy}(\tau)e^{-i2\pi f\tau}d\tau \qquad (14)$$

(나) 모드형상 추정기법

본 논문에서는 고유진동수의 앞과 뒤를 디지털 필터를 이용하여 모드분해하고 POD기법(proper orthogonal decomposition)4)을 사용하여 모드형상을 추정하는 방법을 제시하였다. 광안대교에 설치되어 있는 가속도센서와 유사하게 계측하기 위하여 한정된 위치에서 가속도신호를 계측하였으므로 1차 모드와 2차 모드의 모드형상을 추정하는 것에 초점을 두었다. POD기법은 시간, 공간적으로 불규칙한 변동장을 가장 효율적으로 표현하기 위한 좌표계를 찾는 과정으로 불규칙한 데이터를 모드분해 하여 모드형상을 추출하는 방법이다. 식 (15)는 계측위치의 수가 L, 계측된 데이터의 수가 N일 때의 계측응답을 나타낸 것이다. 여기서 $\{q\}$는 모드좌표계이고 $\{\phi\}$는 모드형상이다.

$$[X]=\begin{bmatrix}x_1(t_1) & x_2(t_1) & \cdots & x_L(t_1)\\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \cdots & x_L(t_2)\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ x_1(t_N) & x_2(t_N) & \cdots & x_L(t_N)\end{bmatrix}=\left[\{q\}_1\{\phi\}_1^T+\cdots+\{q\}_L\{\phi\}_L^T\right] \qquad (15)$$

계측응답 $[X]$의 상관함수(correlation matrix) $[R]$은 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[R]=\frac{1}{N}[X]^T[X] \qquad (16)$$

식(11)은 양변에 i번째 모드형상 $\{\phi\}_i$를 곱하면 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$[R]\{\phi\}_i=\lambda_i\{\phi\}_i \qquad (17)$$

식 (17)에서 λ_i를 모드좌표계 $\{q\}_i$로 나타내면 $\frac{1}{N}\{q\}_i^T\{q\}_j$이며, 고유치 λ_i와 모드형상 ϕ_i은 식 (17)을 이용하여 구하게 된다.

(2) 실험 내용

양산낙동강교에 그림 3.2.80과 같은 가속도 센서를 부착하여 차량에 의한 상시가속도 신호를 계측하였다. 이때 사용된 계측장치는 그림 3.2.80의 무선 데이터 계측장치이다. 가속도계의 부착위치는 강박스의 하단부이며, Sampling Rate은 100Hz이다. 그리고 데이터 수직량이 $2^{14}=16384$일 경우 Δf가 0.0061이 되므로 계측시간은 3분으로 하였다. 그림 3.2.82는 가속도센서의 부착위치이며 2번 거더인 그림 3.2.82(b)의 중앙부에 Reference point를 선정하였다. 양산낙동강교는 4경간 연속보이므로 그림 3.2.82와 같이 4경간으로 나누어 가속도신호를 계측하였다. Case 2, 4, 6, 8은 수직 모드형상을 파악하기 위하여 하나의 박스를 이용하여 동특성을 추정하였으며, Case 1, 3, 5, 7은 회전 모드형상을 파악하기 위하여 두 개의 박스를 이용하여 동특성을 추정할 수 있도록 하였다. 또한 CSD함수을 이용하여 8개 Case의 데이터를 하나로 이용하여 동특성을 추정할 수 있도록 하였다. 그림 3.2.83는 Reference point에서 계측한 가속도신호 이다.

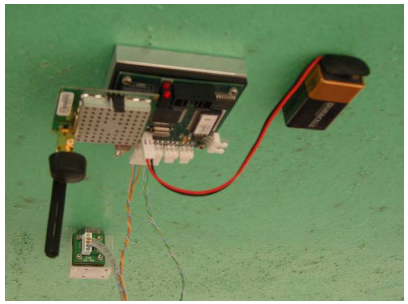


그림 3.2.80 가속도센서

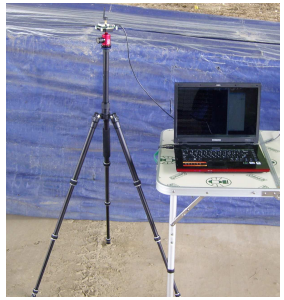


그림 3.2.81 계측 장비

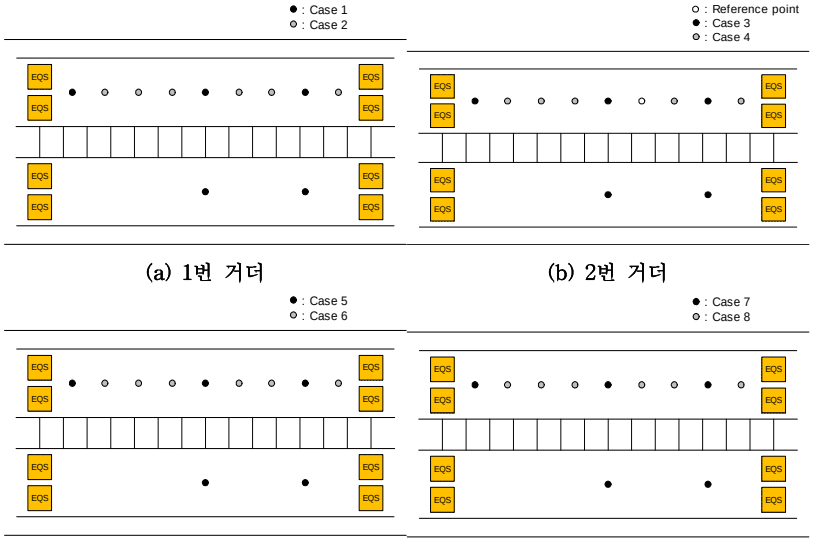


그림 3.2.82 가속도 계측위치

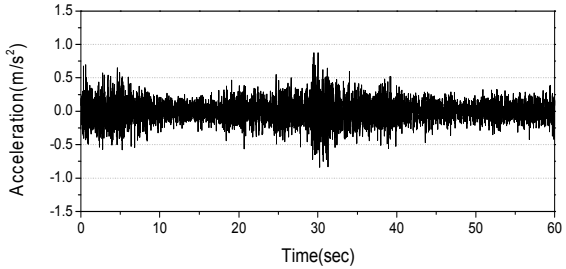


그림 3.2.83 Reference point의 가속도 응답

(3) 실험 결과

그림 3.2.82의 위치에서 가속도신호를 계측하였으며, 고유진동수는 CSD함수를 이용하여 추정하였다. 그림 3.2.84는 두 번째 경간에서 계측된 Reference point의 응답과 두 번째 경간의 Case 3의 처음 위치에서의 응답을 이용한 CSD함수를 나타낸 것이다. 추정한 고유진동수와 모드형상은 표 3.2.15와 같다.

모드형상 추정을 위하여 POD기법을 사용하였으며, 표 3.2.15와 같이 교량의 각 고유진동수에 대한 모드형상을 추정하였다. 분석된 모드형상에 따르면, 1~3번째 모드는 각 경간에서는 1차 수직 모드형상을 나타내고 있으나 4경간 연속보로 볼 경우 다른 모드형

상을 가진을 확인 할 수 있었다.

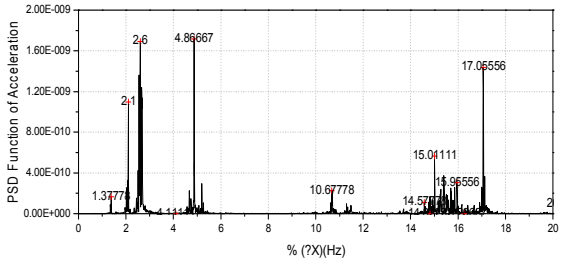


그림 3.2.84 CSD함수를 이용한 고유진동수 추정

표 3.2.15 교량의 고유진동수 [단위:Hz]

	Frequency	Mode shape
1st mode	1.38	
2nd mode	2.10	
3rd mode	2.60	
4th mode	4.867	Outside / Inside
5th mode	10.678	
6th mode	17.06	

다. 고정하중 계측

(1) 실험 개요

시설물 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하고 단부에 단차가 발생할 수 있는데 이는 시설물의 구조손상을 야기하여 사용성을 크게 떨어뜨리므로 이를 상시적으로 계측하여 보정할 필요성이 있다. 그러므로 본 연구에서는 마찰형 스마트 베어링을 실교량에 적용하여 고정하중을 계측하였다.

교량확장중인 양산낙동강교는 현재 공사가 진행 중이다. 양산낙동강교는 확장부에 EQS를 설치하며, 기존교량의 받침을 EQS로 교체하는 자업을 수행 하고 있다. 그러므로 본 연구에서 개발한 마찰형 스마트 베어링을 양산낙동강교에 설치하여 고정하중을 계측하고자한다.

(2) 실험 내용

양산낙동강교의 EQS 시공진행된 구간은 확장구간이므로 확장구간의 고정하중을 계측하도록 하였다. 확장구간에는 강박스의 시공단계에 있으므로 강박스에 의한 고정하중을 계측한다. 향후 연구로는 확장구간과 기존구간의 고정하중을 계측하고 최종완공 이후의 고정하중을 계측함으로서 교량의 연결 전과 후의 하중분배를 확인 할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3.2.85는 마찰형 스마트 베어링이며 그림 3.2.86은 계측장비이다.

실험 수행 시 중요한 계측인자중의 하나가 온도이다. 광섬유센서는 온도센서로 사용되는 온도에 민감한 센서이다. 그러므로 본 연구에서는 온도보정을 위하여 마찰형 스마트 베어링에 온도보정을 위한 FBG센서를 설치하여 온도에 대한 변형률응답을 제거 하였다.

실험은 본 연구에서 개발한 변위센서는 탈부착이 가능함으로 기존에 설치되어있는 EQS에 설치하여 수직하중 및 수직변위를 계측할 수 있다.

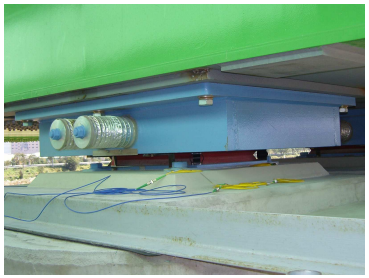


그림 3.2.85 FBG센서 기반 스마트 교량 내진장치의 실교량 적용



그림 3.2.86 계측실험 장비

(3) 실험 결과

정적특성실험을 통하여 구한 응력-변형률곡선을 이용하여 구조물의 고정하중을 계측하였다. 그림 3.2.87은 EQS의 평균 응력-변형률 곡선이다. 이와 같은 곡선을 이용하여 구조물의 고정하중을 계측하였다. 계측결과는 표 3.2.16과 같다. 표 3.2.16에서 확인 할 수 있듯이 계측하중과 설계하중의 차이가 발생함을 확인 할 수 있다. 양산낙동강교는 4경간 연속보로 되어있으나 본 연구에서는 공사일정으로 인하여 4경간의 모든 EQS에 대하여 고정하중을 계측하지 못하였다. 그러므로 4경간 연속보의 모든 고정하중을 계측하여 계측하중과 설계하중을 비교한다면 계측응답의 정확성을 판단할 수 있을 것으로 판단된다. 고정하중을 계측하기 위한 추가적인 실험은 계속 진행 중이다.

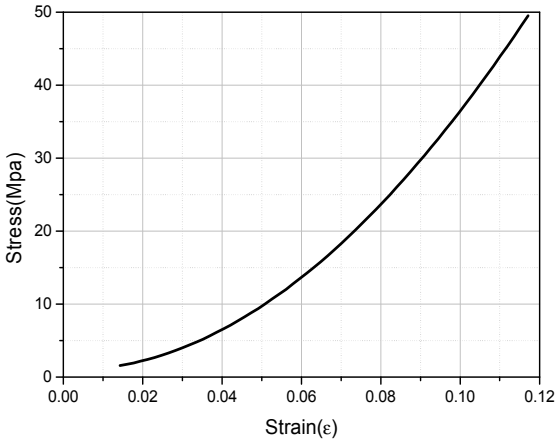


그림 3.2.87 평균 응력-변형률 곡선

표 3.2.16 EQS에 작용하는 하중

[단위:kN]

	EQS1	EQS2	EQS3
설계하중	956.90	568.75	975.20
계측하중	796.79	654.63	510.82

6. B-WIM(Bridge Weigh In Motion) system 개발

교량설계에 있어서 교량에 작용하는 하중을 정확하게 산정하는 것은 중요한 요소이다. 교량에 작용하는 중요한 하중으로는 교량의 사하중과 차량에 의한 활하중이 있다. 그러나 교량의 사하중은 정확히 알 수 있는 값이므로 교량에 작용하는 중요한 인자는 차량에 의한 하중효과라고 할 수 있다. 교량에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중 및 피로하중으로 나타나게 됨으로 실제 교량에 주행하는 차량의 중량 및 통행특성을 파악할 수 있다면 교량의 유지관리에 효과적일 것이다.

고속으로 주행하는 차량에 대해 중량을 계측하는 시스템으로는 포장제에 축중센서를 설치하여 계측하는 방법(WIM(Weigh-In-Motion))과 교량의 변형률응답으로부터 차량

의 하중을 계측하는 방법(Bridge Weigh-In-Motion(B-WIM))이 있다. WIM 시스템을 이용하는 방법은 포장제에 축중센서를 설치하여 계측하는 방법이므로 차량과 도로면의 상호작용으로 인한 오차가 크게 발생하여 정확한 계측이 어려우며, 또한 포장제 변형 및 파손에 의한 신호왜곡이 발생할 수 있다. 그리고 WIM 시스템으로 정확한 값을 계측하기 위해서는 차량이 저속으로 주행을 하여야 함으로 차량통행에 효과적이지 못하다는 단점이 있다.

그러므로 본 연구에서는 B-WIM system은 교량의 변형률로부터 차량의 하중을 추정하는 방법들이었다. 물리적 의미가 명백한 반력을 계측하여 차량의 하중을 추정한다면 더욱 정확한 차량의 하중을 계측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 기존의 B-WIM system을 활용할 경우 차량의 총하중의 오차범위는 5% 였으나 축하중의 오차범위는 20%이다. 그러므로 기존의 B-WIM system을 활용하여 축하중을 계측하는 것은 불확실성이 큰 것으로 판단된다. 그러므로 변형률신호가 아닌 지점부의 반력을 활용한 B-WIM system을 개발이 필요하다.

기존에 개발단계에 있는 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system의 적용은 그림 3.2.88과 같다. 광섬유센서가 적용된 내진장치를 이용하여 수직반력을 계측하고 계측한 반력으로부터 차량의 축하중을 추정하는 B-WIM system 알고리즘을 개발한다.



그림 3.2.88 B-WIM system의 적용

가. Bridge Weigh-In-Motion(B-WIM) 시스템

(1) 신호처리 과정

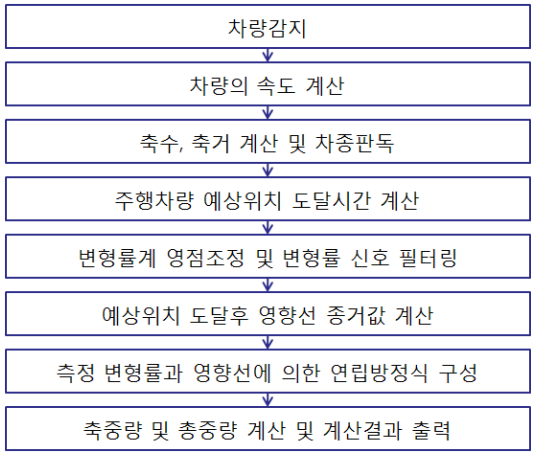


그림 3.2.89 Bridge Weigh-In-Motion(B-WIM) 시스템의 신호처리과정

B-WIM 시스템의 신호처리과정은 그림 3.2.89와 같다. 그림 3.2.89에서와 같이 차량을 감지하고 차량의 속도, 축수, 축거 및 차종을 판독하게 된다. 그리고 차량의 교량통과 시간을 계산하여 변형률신호와 이론적 영향선을 이용하여 차량의 축중량 및 총중량을 계산하게 된다.

(2) B-WIM시스템 알고리즘

대부분의 B-WIM시스템은 Moses(1979) 기반의 B-WIM 알고리즘을 사용하여 구현하였다. Moses의 B-WIM시스템 알고리즘은 교량의 정적인 영향선과 측정 변형률을 최소제곱 오차함수를 이용하여 축 중량을 계산하는 방식이다.

제하차량이 교량을 통과할 경우 휨모멘트는 개별축의 축거와 축중량을 곱한 값의 합과 같으므로 식(18)과 같다. 여기서, $M(x)$는 고량위의 차량위치 x에서의 휨 모멘트이고, w_n는 차량의 n번째 축중량 그리고 $I(x)$는 교량위의 차량위치 x에서의 영향선이다.

$$M(x) = w_1 I(x-s_1) + w_2 I(x-s_2) + w_3 I(x-s_3) \qquad (18)$$

식(18)을 모든 차선 및 거더별 휨모멘트를 시간함수로 전개하면 식(19)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, A_{kl}는 차선 l에서 k번째 축중량이며, $I_{kli}(t)$는 차선 l의 i번째 거더의 시간 t에서 k번째 축에 의한 영향선 종거값이다. 그리고 NL는 차선수, $Naxl(l)$는 차선 l에

서 총축수 이다.

$$M_i(t)=\sum_{l=1}^{NL}\sum_{k}^{Naxl(l)} A_{kl}I_{kli}(t) \qquad (19)$$

모든 거더의 정적인 영향선과 계측값을 이용하여 식(20)과 같이 최소 제곱오차함수를 구성한다. 여기서, E_i는 최소제곱 오차함수이고, $M_i(t)$는 i번째 거더의 이론적 모멘트 그리고 $M_i^*(t)$는 i번째 거더의 계측 모멘트이다.

$$E_i=\sum_{t=1}^{T}\left[M_i(t)-M_i^*(t)\right]^2 \qquad (20)$$

오차 값이 최소가 될 때 이론값과 계측값이 같아지므로 식(21)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, $I_{ni}(t)$는 i번째 차선의 n번째 축에 의한 영향선이다.

$$\sum_{i=1}^{NL}\sum_{t=1}^{T} I_{ni}(t)I_{mi}(t)\times w_n=\sum_{i=1}^{NL}\sum_{t=1}^{T} M_i(t)I_{mi}(t) \qquad (21)$$

식(11)을 행렬식으로 나타내면 식(22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{T=1}^{t\_sn} I_1(t)I_1(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_2(t)I_1(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_i(t)I_1(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} I_1(t)I_2(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_2(t)I_2(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_i(t)I_2(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} I_1(t)I_j(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_2(t)I_j(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} I_i(t)I_j(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{T=1}^{t\_sn} M_i^*(t)I_1(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} M_i^*(t)I_2(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} M_i^*(t)I_j(t) \end{bmatrix} \qquad (22)$$

이론적인 정적인 영향선을 교량의 동적효과를 반영하기 위하여 이론적 변형률을 사용할 경우 식(23)과 같이 나타낼 수 있게 된다. 여기서, f는 최소제곡 오차함수 이고, $\varepsilon_i(t)$는 시간 t에서 동적효과가 고려된 이론적 변형률이다. 그리고 $\varepsilon_i^*(t)$는 시간 t에서 계측변형률이다.

$$f=\sum_{t=1}^{T}\left[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_i^*(t)\right]^2 \qquad (23)$$

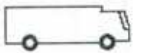
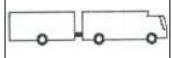
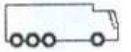
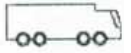
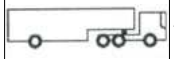
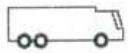
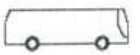
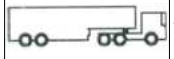
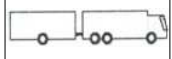
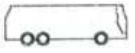
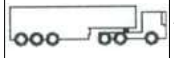
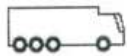
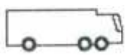
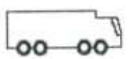
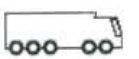
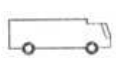
식(22)를 축중에 대하여 편미분하여 정리하면 식(24)와 같은 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_1(t)\varepsilon_1(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_2(t)\varepsilon_1(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i(t)\varepsilon_1(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_1(t)\varepsilon_2(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_2(t)\varepsilon_2(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i(t)\varepsilon_2(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_1(t)\varepsilon_j(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_2(t)\varepsilon_j(t) & \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i(t)\varepsilon_j(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_j \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i^*(t)\varepsilon_1(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i^*(t)\varepsilon_2(t) \\ \sum_{T=1}^{t\_sn} \varepsilon_i^*(t)\varepsilon_j(t) \end{bmatrix} \qquad (24)$$

(3) 차량구분

교량에 주행하는 차량은 형식이 매우 다양하며 같은 형식이더라도 축수 및 축거가 다를 수 있다. B-WIM 시스템으로 교통하중의 특성을 분석하기 위해서는 차량하중의 분류가 필요하다. 그러므로 정확한 축구조 및 축간거리의 규정이 있어야 정확한 교통하중 분석이 가능하다. 그러므로 본 연구에서는 최근 개정된 고속국도 12종 차종분류법을 적용하여 차종을 구분하다. 표 3.2.16은 도로에 주행 중인 대표적인 차량형태를 나타낸 것이다.

표 3.2.17 대표적인 차량형태

트랙터+ 트레일러			화물차 계열			덤프/믹서 계열		
형식	분류	차종	형식	분류	차종	형식	분류	차종
	T2R1	9		C2	4		D3	5
	T2R2	9		C2R1	8		D13	6
	T2R3	11		C2R2	8		D22	6
	T3R1	9		C3	5		B2	2/3
	T3R2	11		C3R1	8		B3	3
	T3R3	12		C3R2	10		V2	1
T : 트랙터 C : 카고 D : 덤프 B :버스 V,F : 승용차 P : 포터(소형화물차)				C13	6		V2R1	-
				C21	5		V2R2	-
				C22	6		F2	1
				C23	7		P2	4

나. B-WIM시스템의 종류

(1) 축감지기가 있는 B-WIM 시스템

축감지기가 있는 B-WIM 시스템은 차량정보를 교량의 변형률응답으로부터 획득할 수 없는 경우에 사용되며, 주로 빔형식 및 박스형 거더교에 주로사용되는 시스템이다. 축감지기가 있는 B-WIM 시스템의 센서설치 방법은 그림 3.2.90과 같다. 차량의 축수, 축거, 속도와 같은 차량의 정보를 획득하기 위하여 Piezo 센서를 사용하고, 주행차량의 축하중 및 총하중을 예측하기 위하여 변형률센서를 사용한다.

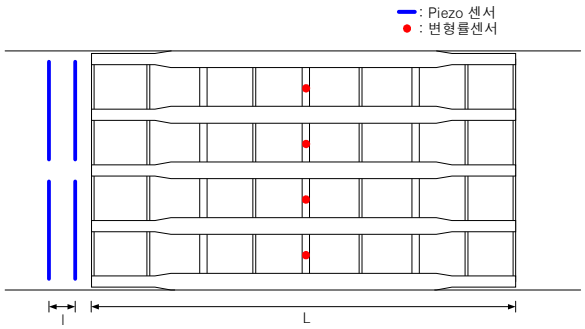


그림 3.2.90 센서설치 방법(축감지기가 있는 B-WIM 시스템)

축감지기가 있는 B-WIM 시스템은 축감지기를 이용하여 주행차량의 속도, 축수 및 축거를 파악한다. 차량의 속도는 식(25)와 같이 구하게 되는데 여기서 l은 Piezo센서의 간격이고 차축이 두 Piezo센서를 통과하는 시간은 ΔT이다.

$$v = \frac{l}{\Delta T} \qquad (25)$$

통과차량의 축수는 Piezo센서로 계측한 응답의 압축횟수 이며, 축거는 식(26)과 같다. 여기서, l_{AB}는 차량의 A축과 B축의 거리이며, Δt_{AB}는 자행차량의 A축과 B축이 하나의 Piezo센서를 통과하는 시간이다.

$$l_{AB} = v \times \Delta t_{AB} \qquad (26)$$

이와 같이 차량정보를 획득한 후 차량의 예상위치를 파악하여 영향선 종거값을 계산하고, Moses 기반의 B-WIM 알고리즘을 통하여 차량의 축중량 및 총하중을 계산하게 된다.

(2) 축감지기가 없는 B-WIM 시스템(Free of axle detector B-WIM(FAD B-WIM))

축감지기가 없는 B-WIM 시스템은 축감지기가 있는 B-WIM 시스템에 비하여 설치가 용이하고 저렴한 비용으로 시스템을 유지관리 할 수 있으므로 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 FAD B-WIM 시스템은 적용할 대상교량이 매우 제한적이며, 변형률 신호로부터 주행차량의 축 감지가 가능한 단순 슬래브교량에 적용이 용이하다.

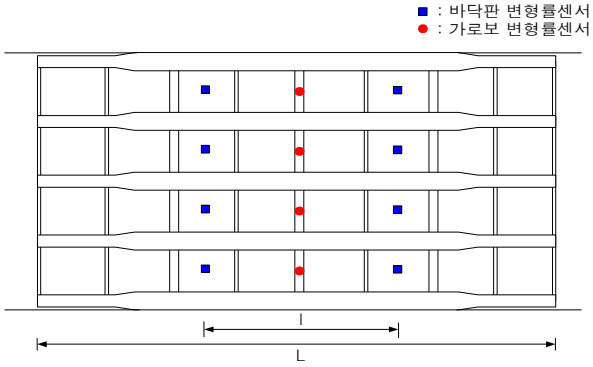


그림 3.2.91 센서설치 방법(축감지기가 없는 B-WIM 시스템)

FAD B-WIM 시스템은 그림 3.2.91과 같이 센서를 설치하게 된다. 여기서 바닥판 변형률센서는 축감지기가 있는 B-WIM 시스템에서 Piezo센서와 같은 역할을 하게 되며 통과차량의 속도, 축수, 축거등을 산출하는 역할을 하게 된다. 그리고 가로보에 설치된 변형률센서로부터 Moses 기반의 B-WIM 알고리즘을 통하여 차량의 축중량 및 총하중을 계산하게 된다.

다. 변형률센서와 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system의 개발

변형률센서와 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system은 기존의 축감지기가 있는 B-WIM system과 유사한 알고리즘이다. 변형률센서와 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system의 설치방법은 그림 3.2.92와 같다. 차량의 축수, 축거, 속도와 같은 차량의 정보를 획득하기 위하여 광섬유센서가 적용된 내진장치를 사용하고, 주행차량의 축하중 및 총하중을 예측하기 위하여 변형률센서를 사용한다.

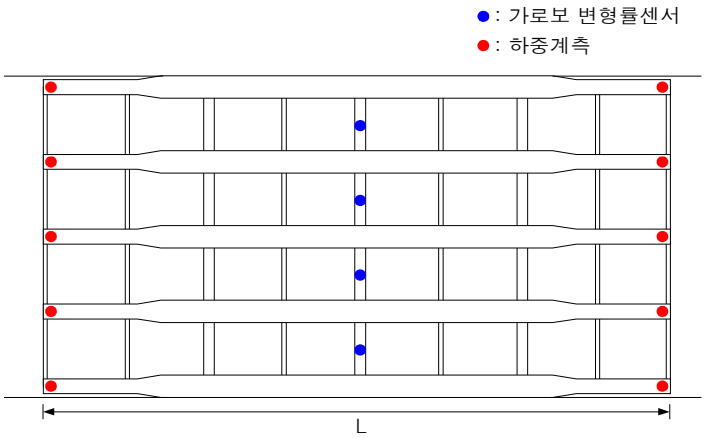


그림 3.2.92 변형률센서와 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system

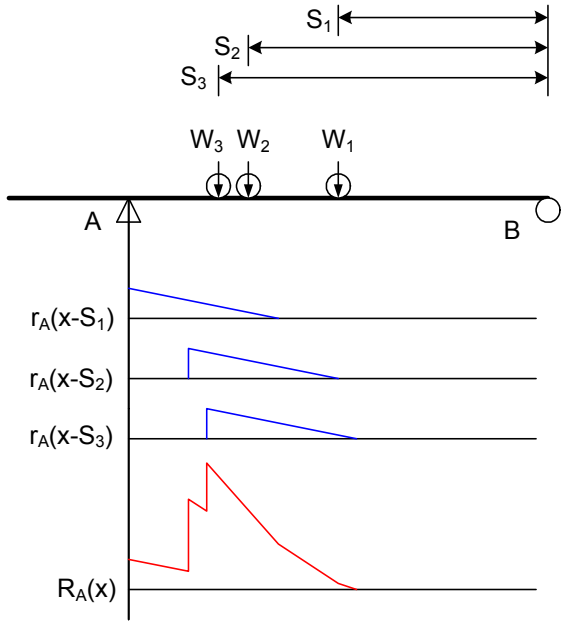


그림 3.2.93 지점A의 반력에 의한 영향선

그림 3.2.93과 같이 지점부의 영향선의 이용한다면 차량의 진입시간과 이탈시간을 파악할 수 있으며, 지점부의 영향선은 식(27)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $R_A(x)$는 반

력이며, W_n은 n번째 축 중량 그리고 $r_A(x)$는 교량위의 차량위치 x에서의 영향선이다. 식(28)을 이용하여 차량의 속도를 추정할 수 있게 되며, 여기서 L은 광섬유센서가 적용된 내진장치의 간격이고 차축이 두 광섬유센서가 적용된 내진장치를 통과하는 시간은 $\triangle T$이다.

$$R_A(x) = W_1 r_A(x-s_1) + W_2 r_A(x-s_2) + W_3 r_A(x-s_3) \quad (27)$$

$$v = \frac{l}{\triangle T} \quad (28)$$

통과차량의 축수는 광섬유센서가 적용된 내진장치로 계측한 응답의 압축횟수 이며, 축거는 식(29)와 같다. 여기서, l_{AB}는 차량의 A축과 B축의 거리이며, $\triangle t_{AB}$는 차행차량의 A축과 B축이 하나의 광섬유센서가 적용된 내진장치를 통과하는 시간이다.

$$l_{AB} = v \times \triangle t_{AB} \quad (29)$$

이와 같이 차량정보를 획득한 후 차량의 예상위치를 파악하여 영향선 종거값을 계산하고, Moses 기반의 B-WIM system 알고리즘을 통하여 차량의 축중량 및 총하중을 계산하게 된다.

라. 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system 개발

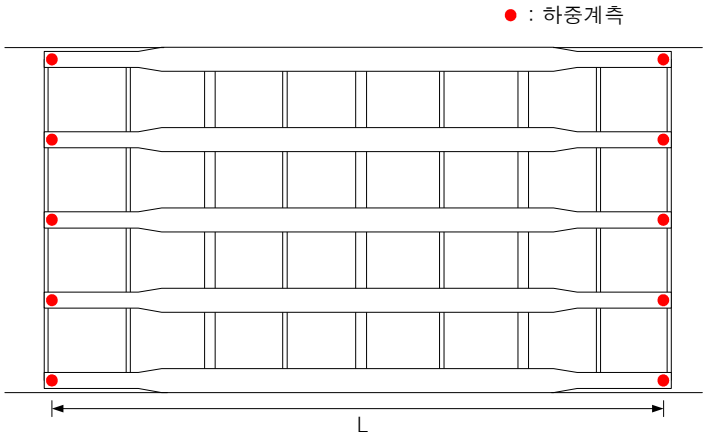


그림 3.2.94 광섬유센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system

변형률센서를 설치하지 않고 광섬유센서가 적용된 내진장치만을 이용하여 차량의 하중을 계측한다면 설치가 용이하고 저렴한 비용으로 시스템을 유지관리 할 수 있다. 광섬유

센서가 적용된 내진장치를 활용한 B-WIM system은 그림 3.2.94와 같이 센서를 설치한다.

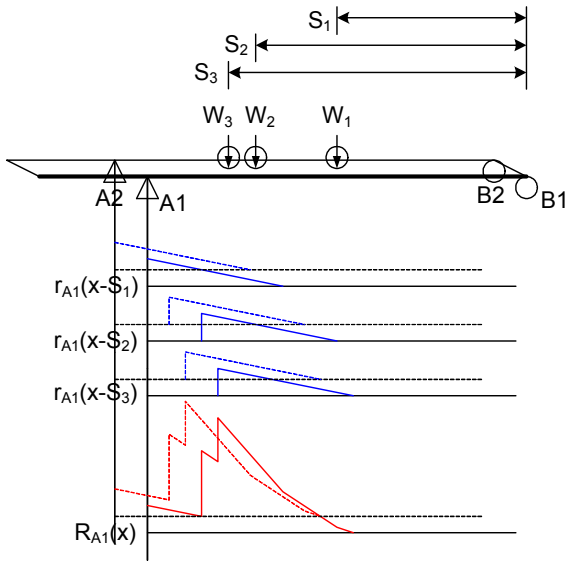


그림 3.2.95 지점의 반력에 의한 영향선

앞에서 언급한바와 같이 그림 3.2.95와 식(30)을 이용하여 통과차량의 속도, 축수, 축거등을 산출할 수 있다. 차량의 축중량을 계측하기 위하여 교량의 횡방향 지점부의 반력을 모두 계측하게 된다. 식(31)과 같이 횡방향의 지점부 반력을 합하게 되면 지점부를 지나가는 통과차량의 하중을 계측할 수 있게 된다. 여기서 $R_{A1}(x)$는 지점 $A1$에서의 반력, $R_{A2}(x)$는 지점 $A2$에서의 반력이고 $R_A(x)$는 지점 A의 횡방향 반력을 합한 것이다.

$$R_{A1}(x) = W_1 r_{A1}(x-s_1) + W_2 r_{A1}(x-s_2) + W_3 r_{A1}(x-s_3) \quad (30)$$

$$R_A(x) = R_{A1}(x) + R_{A2}(x) \quad (31)$$

7. 결론

본 연구에선 기존에 사용하고 있는 받침형내진장치에 수직변위와 수평하중을 계측할 수 있는 센서를 부착하여 수직변위와 수평하중의 계측이 가능한 마찰형 스마트 베어링을 개발하는 것이 목적이다. 기존에도 교량받침에 Load cell, 유압시설, LVDT, 전기저항식 변형률센서, 가속도센서 등을 이용하여 받침의 수직변위를 계측하려는 연구가 많이 진행된 바 있다. 그러나 본 연구에서는 수직변위 뿐만이 아니라 수평하중을 계측함으로서 3

축의 변화량을 계측할 수 있는 받침형 내진장치를 개발 하였다.

수치해석과 실내실험을 통하여 수직하중을 수용하는 폴리우레탄 디스크과 수평하중을 수용하는 MER Spring의 재료실험 및 변위를 계측하는 실험은 수행하였다. 수치해석 결과 폴리우레탄 디스크와 MER Spring에 직접 FBG센서를 부착하여 변형률신호를 계측하는 것은 불가능 하였다. 따라서 본 연구에서는 수직변위을 계측하기 위한 FBG센서를 적용한 변위센서를 개발하였으며, 수평하중을 계측하기 위한 Load cell을 제작하였다. 실험결과 수직변위 및 수평하중의 계측이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

개발한 변위센서의 사용성과 내구성을 검증하여 위하여 오차분석과 피로실험을 수행하였다. 오차분석결과 오차가 적은 것으로 사료되므로 개발한 변위센서를 이용한다면 신뢰성 있는 변위응답의 추정이 가능할 것으로 판단된다. 피로실험결과 피로하중 이후에도 센서의 외부적인 손상이 없었으며, 센서의 계속적인 사용이 가능하였다. 그러므로 개발한 변위센서는 피로에 대한 내구성이 우수함을 확인 할 수 있었다.

마찰형 스마트 베어링의 성능검사실험을 수행하였으며, 그 결과 변위응답의 계측이 가능하였다. 여러 종류의 하중재하실험을 통하여 마찰형 스마트 베어링의 수직거동을 파악하였다. 또한 응력-변형률곡선을 이용하여 계측변위응답으로부터 수직하중의 추정이 가능할 것으로 판단된다.

고속도로 확장구간에 있는 양산낙동강교를 대상으로 동특성실험과 고정하중 계측실험을 수행하였다. 동특성실험은 가속도센서를 이용하여 구조물의 고유진동수와 모드형상을 추정하였다. 동특성을 파악함으로써 마찰형 스마트 베어링의 거동을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 마찰형 스마트 베어링의 수직변위를 계측하여 마찰형 스마트 베어링에 작용하는 수직하중을 추정하였으나 교량에 설치되어있는 모든 마찰형 스마트 베어링의 계측을 수행하지 못하였다. 그러나 수직하중의 계측이 가능한 것으로 판단된다.

개발한 마찰형 스마트 베어링을 이용한다면 교량의 완공 후 부등침하, 시공오차 등을 파악할 수 있는 것과 동시에 B-WIM시스템을 활용하여 교량의 통과차량을 파악 할 수 있을 것으로 판단된다. 교량에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중 및 피로하중으로 나타나게 됨으로 실제 교량에 주행하는 차량의 중량 및 통행특성을 파악할 수 있다면 교량의 유지관리에 효과적일 것이다.

제3절 압전 센서를 이용한 교량받침 내장형 하중 모니터링 시스템 개발

1. 연구 목표 및 2차년도 주요 연구 주제

가. 연구 최종 목표 및 연차별 목표

본 연구의 목표는 “압전 센서를 이용한 교량 받침 내장형 하중 모니터링 시스템의 개발”에 있다. 이를 위하여 그림 3.3.1과 같이 1차년도에는 “압전 센서가 내장된 스마트 교량 받침을 개발”하고, 2차년도에는 “압전 센서의 응답을 이용한 하중 추정 알고리즘의 개발 및 하중 모니터링 시스템 성능 평가”를 수행하고자 한다.



그림 3.3.1 연차별 목표 및 주요 연구 내용

나. 2차년도 주요 연구 주제

2차년도 목표인 “소트트웨어 개발 및 통합”을 위한, 세부 연구 주제와 연구 추진 내용은 그림 3.3.2와 같다.

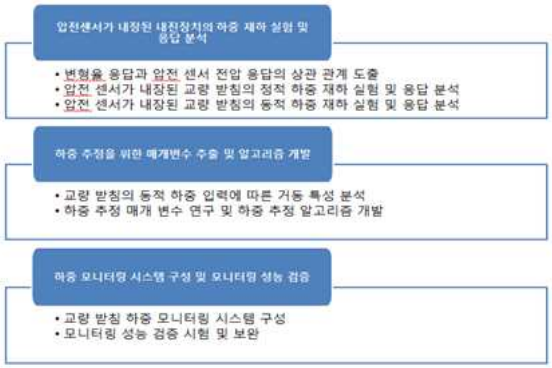


그림 3.3.2 2차년도 세부 연구 주제 및 내용

2. 압전 센서가 내장된 내진장치의 하중 재하 실험 및 응답 분석

가. 변형률 응답과 압전 센서 전압 응답의 상관 관계 도출

(1) 변형률 입력에 대한 PVDF 필름의 전압 응답 모델링

압전물질의 전기-역학 연성 구성방정식은 텐서 표기법을 이용할 경우 다음과 같은 식으로 표현 된다.

$$\epsilon_{ij} = S^E_{ijkl}\sigma_{kl} + d_{kij}E_k \quad (1-1)$$

$$D_i = d_{ikl}\sigma_{kl} + e^{\sigma}_{ik}E_k \quad (1-2)$$

여기에서, ϵ_{ij}와σ_{kl}는 각각 역학적 변형률과 응력 텐서이며, E_k와 D_i는 각각 전기장 벡터와 전기변위 벡터를 나타낸다. 또한, S^E_{ijkl}은 전기장이 0 일때의 단위 응력에 대한 압전체의 변형률 크기를 나타내는 역학적 컴플라이언스이며, d_{kij}와 d_{ikl}은 압전계수로써 각각 단위전기장에 대한 변형률 응답과 단위 응력에 대한 전하 응답을 나타낸다. 마지막으로 e^{σ}_{ik}는 응력장이 0일 때의 압전체의 절연유전율이다. 만약 외부 전기장이 없을 경우 ($E_k = 0$), 식 (1-2)는 식 (1-1)을 이용하여 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$D_i = d_{ikl}K^E_{klij}\epsilon_{ij} \quad (2-1)$$

여기에서 $K^{E_{klij}}$은 전기장이 0 일때의 단위 변형률에 대한 압전체에서의 응력의 크기를 나타내는 역학적 강성텐서이다. 변형률텐서의 대칭성을 이용하면, 식 (2-1)은 다음과 같이 행렬형태로 표현이 가능하다.

$$\{D\} = [d][K^E]\{\epsilon\} \quad (2-2)$$

압전체에 응력 또는 변형률이 가해졌을 때, 압전체의 표면에 발생하는 총전하량 (q)은 전기변위벡터를 압전체의 표면 면적에 대하여 적분하여 구할 수 있다.

$$q = \int_A \{D\}^T\{dA\} = \int_A \left([d]\left[K^E\right]\{\epsilon\}\right)^T\{dA\} \quad (3)$$

한편, 폭(b)과 길이(l)에 비하여 두께를 매우 얇게하여 그림 2-1과 같은 필름 형태로 가공한 PVDF (전기 분극 방향은 3축 방향)에 1축 방향으로 지배적인 변형률장 가 형성될 경우, 변형률과 총전하량의 관계는 다음과 같이 유도 된다.

$$q = d_{31} K_{11}^{E} b \int_{0}^{l} \epsilon_{11}(x) dx \tag{4}$$

만약, 1 축 변형률장 $\epsilon_{11(x)}$가 그림 3-3 으로 주어진 PVDF 필름의 길이에 걸쳐서 균일한 값인 $\epsilon_{11(x)} = \epsilon$을 가진다고 가정하면 (즉, $\epsilon_{11(x)}$의 값이 위치 x에 대하여 변화가 크지 않은 경우), 식 (4)는 다음과 같이 근사적인 평균 변형률 ϵ의 선형함수로 표현할 수 있다.

$$q \cong (d_{31} K_{11}^{E} bl)\epsilon = A\epsilon \tag{5}$$

여기에서 $A = d_{31} K_{31}^{E} bl$는 변형률의 크기와 관계없이 결정되는 PVDF 필름의 특성치이며, PVDF 제조사로부터 주어지는 PVDF의 물성과 필름 형태로 가공하였을 때의 크기를 이용하여 구할 수 있다. 식 (5)로부터 알 수 있듯이, PVDF 필름에 발생하는 전하량은 외부 전기장이 없을 경우에 변형률과 선형비례하며, 따라서 PVDF 필름에서 발생된 전하량을 측정하면, 역으로 PVDF 필름이 부착된 위치에서의 구조물의 변형률을 직접적으로 구할 수 있다는 것을 입증한다. 또한, 식(5)는 PVDF 필름을 변형률 측정에 사용하고자 할 때, 측정시스템의 구성면에서 매우 중요한 의미를 가진다. ESG를 이용한 변형률 측정은, 변형에 의하여 도선의 전기 저항이 달라지는 원리를 이용하며, 따라서 변형률의 측정을 위해서 도선에 전류를 공급하여, 달라진 전기 저항을 측정하여야 한다. 즉, 변형률 측정 과정에서 도선에 전류를 공급하는 외부 장치가 필요한 능동형 측정시스템을 구성하여야 한다. 그러나, 식(5)에서 알 수 있듯이, PVDF는 외부 전기장의 공급 없이도, PVDF에서 발생하는 전하를 측정하면 변형률을 구할 수 있으므로, 능동형 방식인 ESG에 비하여 보다 경제적으로 측정시스템을 구성할 수 있게 된다.

한편, PVDF를 이용하여 변형률을 계측하기 위해서는, 식 (5)와 같이 변형률 입력에 의해 생성된 PVDF 표면 전하량을 측정하여야 한다. 그러나, 오실로스코프 등과 같은 측정 장치의 입력 임피던스는 PVDF의 출력 임피던스에 비하여 일반적으로 매우 작은 값을 가지므로, 이 경우 PVDF에서 발생한 표면 전하량을 직접 측정하기가 매우 어렵다. 따라서, 이러한 입/출력 임피던스 차이를 보완하는 출력 조절 장치가 측정 과정에서 필요하다. 본 연구에서는 PVDF 필름에서 생성된 전하의 출력 조절을 위하여 피드백 저항이 R_f이고, 피드백 커패시턴스가 C_f인 Op-Amp를 이용한 전하증폭기(charge amplifier)를 출력 조절 장치로 이용하였다. 전하 증폭기를 고려한 변형률 응답 모델은 다음과 같은 전하(q)-전류(i) 관계를 이용하여 유도할 수 있다.

$$i = \frac{dq}{dt} = \dot{q} \tag{6}$$

전하증폭기가 이상적으로 거동한다고 가정하면, 최종 출력 전압(V_{out})에 대한 전하증폭기의 회로방정식은 식(6)을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{V}_{out} + \frac{V_{out}}{R_f C_f} = -\frac{\dot{q}}{C_f} \tag{7}$$

조화(Harmonic) 입력일 경우, 식 (7)의 주파수 영역 해는 다음과 같다.

$$V_{out}(w) = -C_1 \left[\frac{jwR_f C_f}{1 + jwR_f C_f} \right] \frac{q}{C_f} = C_1 H(w) \frac{q(w)}{C_f} \tag{8}$$

여기에서, C_1은 무차원 계수로써 전하증폭기의 output gain 조절 등에 대한 보정을 위한 값이며, $H(w)$는 전하증폭기의 전달함수로써 피드백 저항(R_f)과 피드백 커패시턴스(C_f)에 의해서 결정되는 값이다. 식 (5)를 식 (8)에 대입하면 변형률과 출력 전압에 대한 다음과 같은 관계를 최종적으로 유도할 수 있다.

$$V_{out}(w) = C_1 H(w) \frac{q(w)}{C_f} = C_1 H(w) \frac{A}{C_f} \epsilon(w) = H_1(w) \epsilon(w) \tag{9}$$

여기에서, $H_1(w)$는 PVDF 필름의 변형률 응답 계수로 정의할 수 있으며, 가진 주파수와 PVDF 필름의 물성치, 전하증폭기의 특성치 (피드백 저항, 피드백 커패시턴스)와 Output gain 을 알고 있을 경우에 결정되는 값이다.

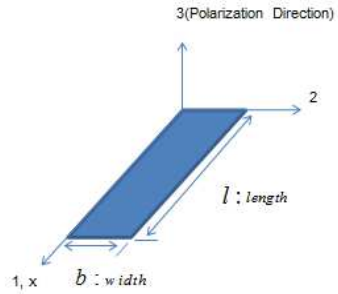


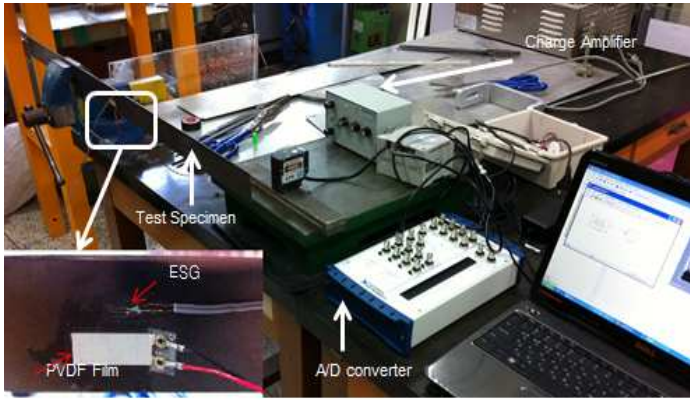
그림 3.3.3 PVDF 필름 방향

(2) PVDF 필름을 이용한 변형률 측정 실험

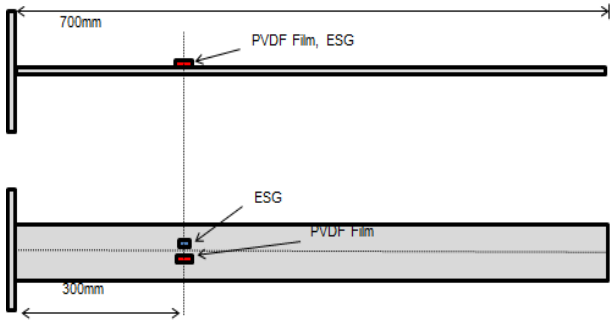
(가) 실험 구성

진동에 의한 구조물의 변형률을 PVDF 필름을 이용하여 측정하기 위해서, 그림 3.3.4

와 같이 길이 700mm, 폭 40mm, 두께 2mm 인 캔틸레버 보 실험체를 제작하여, 자유진동 실험을 수행하였다. 두께가 52 ㎛ 인 Sheet 형태의 PVDF를 길이 30 mm, 폭 10mm 크기의 필름 형태로 가공하여, 고정단 지지점에서 거리 300mm 인 위치에 에폭시를 이용하여 부착하였다. 사용된 PVDF 필름의 물성치와 크기를 표 3.3.1에 정리하였다. 한편, 이론적으로 유도된 전압-변형률 관계의 분석 및 검증을 위해, PVDF 필름이 부착된 위치와 동일한 위치에 ESG를 부착하였다. PVDF 필름의 출력 신호의 조절을 위한 출력조절기는, 10 Mega Ohm의 피드백 저항과 500 Nano Farad의 피드백 커패시턴스를 가진 전하증폭기(charge amplifier)를 사용하였으며, 전하증폭기의 Output power gain을 30 dB로 추가 설정하였다. 마지막으로 그림 3.3.5에 나타낸 바와 같이, 전하증폭기의 출력 신호는 16 bit A/D 변환기를 이용하여 Digital 신호로 변환하여 Laptop 컴퓨터에 저장되도록 하였다.



(a) 측정 셋업



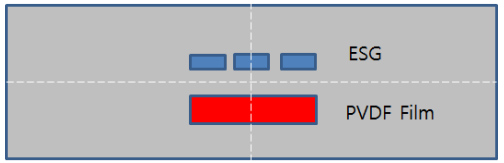
(b) Test specimen

그림 3.3.4 측정 실험 셋업과 Test Specimen의 형태

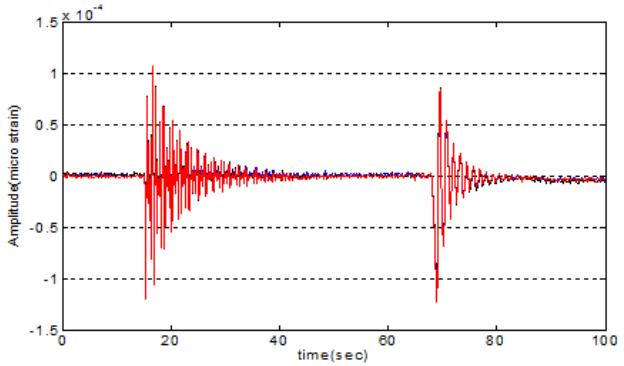
표 3.3.1 PVDF 필름의 제원

Length	Width	Thickness	d_{31} (Coulomb/Newton)	e_{33} (Farad/Meter)	K_{11}^{E} (Young's Modulus)
30 mm	10mm	52 ㎛	23×10^{-12}	106×10^{-12}	2 GPa

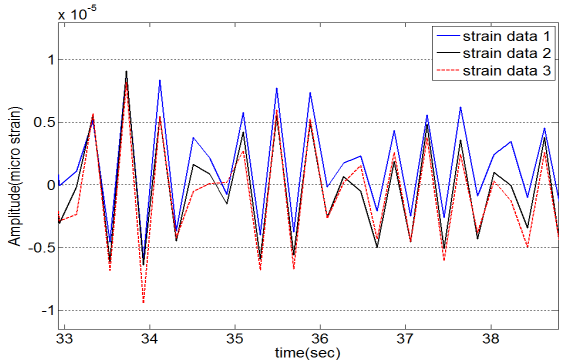
한편, 그림 3.3.4의 실험 셋업에서 확인 할수 있듯이 PVDF 필름과 ESG사이에는 다소 크기의 차이가 존재한다 따라서 PVDF 필름의 크기에 맞게끔 ESG를 3곳의 위치에 부착하여 측정 변형률의 값을 비교하여 그림 3.3.5에 나타내었다. 결과에서 알수 있듯이 세 위치에서의 측정값이 모두 매우 근소한 차이만을 보이며 대부분 일치하고 있음을 확인할수 있다. 따라서 그림 3.3.4에서의 실험 셋업의 ESG부착 위치와 개수는 올바르다고 판단되어 진다.



(a) ESG와 PVDF Film의 형태



(b) 위치별 strain gauge 측정 값 비교



(c) strain gauge 측정 값의 구간 확대

그림 3.3.5 위치별 strain gauge 측정 값 비교

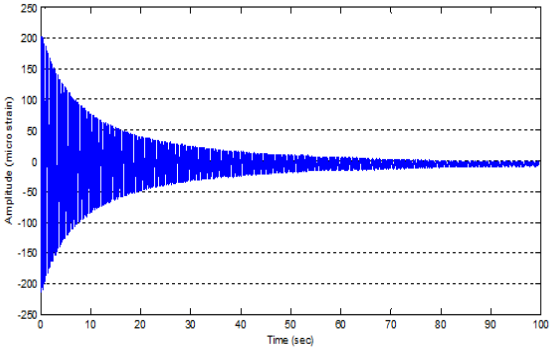
(나) 전압-변형률 관계의 검증

캔틸레버 보 실험체에 대하여 자유진동 실험을 수행하였다. 샘플링 주파수는 25Hz 이고, 100 초 동안 응답을 측정하였다. 그림 3.3.6에 실험을 통해 측정된 PVDF Film에서의 전압 이력과 ESG에서의 변형률 이력 그리고 각각에 대한 주파수 응답을 나타내었다. ESG에 의해 측정된 변형률 응답의 주파수는 3.71 Hz이고, PVDF 필름의 전압 응답의 주파수도 3.71 Hz 로 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형을 측정 가능하다는 것을 입증한다. ESG에 의해서 측정된 변형률과 PVDF 필름에서 측정된 전압의 상관 관계를 분석하기 위하여, 매 측정 시점 마다의 PVDF 필름 전압 응답 값과 ESG의 변형률 값을 추출하여 선형 회귀 분석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3.3.7에 나타내었다. ESG에서 측정된 변형률 값과 PVDF 필름에서 측정된 전압이 선형적인 관계를 나타내는 것을 그림에서 확인할 수 있으며, 선형회귀분석을 통해서 구한 전압-변형률 관계는 다음과 같다.

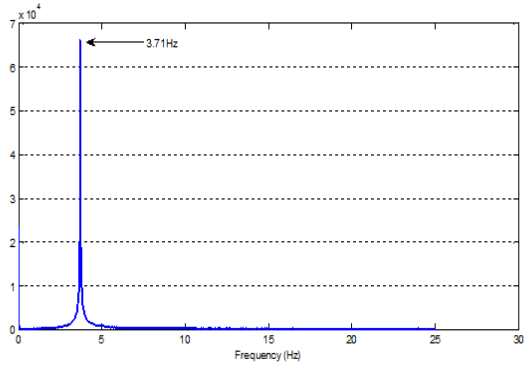
$$V_{out} = H_{1,\exp}\epsilon = (0.0236)\epsilon \qquad (10)$$

여기에서 변형률의 단위는 micro strain 이다. 실험을 통해서 구한 PVDF 필름의 변형률 응답 계수($H_{1,\exp}$)는 0.0236이며, 이 값을 식(9)의 이론적인 값과 비교하였다. 그림 3.3.8는 본 실험에 사용된 PVDF의 물성치와 전하증폭기의 특성치 및 Output gain 값을 이용하여 구한 주파수별 변형률 응답 계수 이다. 가진 주파수 3.71 Hz에서의 이론적인 변형률 응답 계수 값은 0.0275로써, 선형회귀분석으로 구한 값 0.0236과 비교할 때 약간의 오차가 있으나, 이론적인 해를 구하는 과정에서 전하증폭기의 거동을 이상화함으로써 발생하는 모델링 오차를 고려할 때, 실제 값에 매우 근사한 값을 나타내는 것을 알

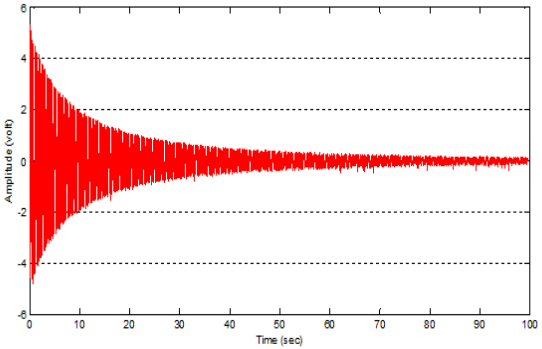
수 있다. 그림 3.3.9에는 이론적인 변형률 계수 값과 실험을 통해 구한 값을 적용한 PVDF의 변형률 응답 결과를 나타내었다. PVDF를 이용하여 측정한 구조물의 동적 변형률이 실제 변형률과 매우 동일한 양상을 나타내며, 상대적으로 잘 일치하는 것을 그림에서 확인 할 수 있다. 이러한 결과는 구조물의 동적 변형률 측정에 있어서 PVDF 필름을 적절히 적용할 경우에 기존의 ESG 만큼의 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다는 것을 입증한다.



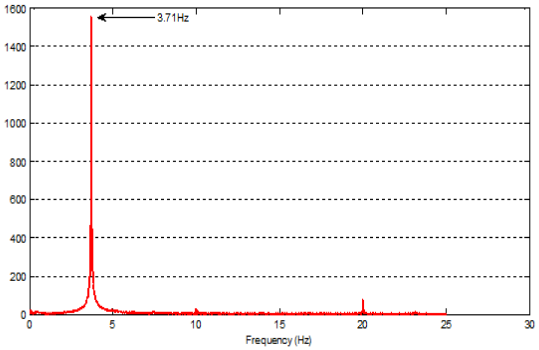
(a) Strain 응답 of ESG (단위 : micro strain)



(b) Frequency 영역 (ESG)



(c) Voltage 응답 of PVDF 필름 (단위 : volt)



(d) Frequency 영역 (PVDF 필름)

그림 3.3.6 ESG 와 PVDF 필름의 응답

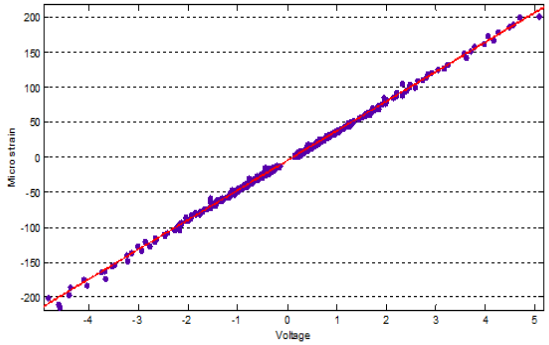


그림 3.3.7 Strain 과 Voltage의 실험적 관계 분석

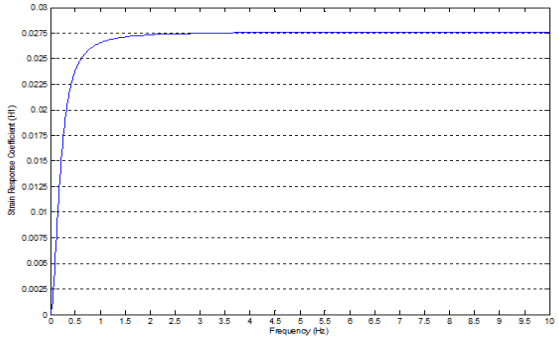


그림 3.3.8 Strain 응답 계수 (Feedback Resistance : 10 Mega Ohm)

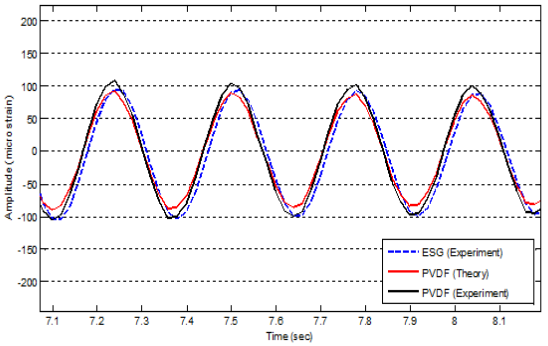


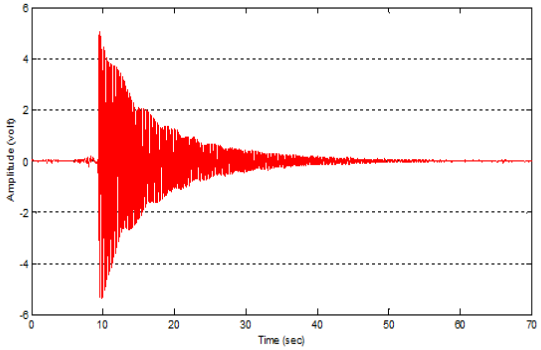
그림 3.3.9 보정된 PVDF 필름의 Strain 응답

나. 주파수별 변형률 응답

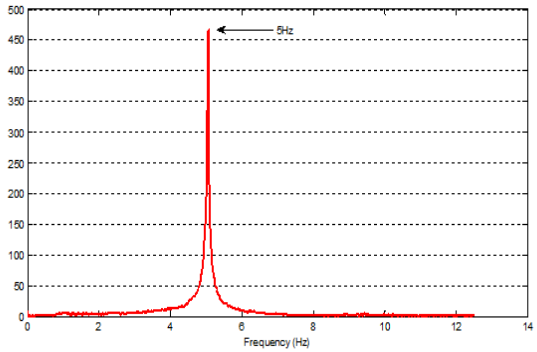
변형률 응답 계수의 값은 주파수에 따라 다른 값을 가진다는 것을 그림 3.3.8에서 알 수 있다. 이를 검증하기 위해서, 600mm와 800mm 길이의 캔틸레버 보 실험체에 대해서 각각 자유 진동 실험을 수행하였다. 자유 진동 실험을 통하여 측정된 PVDF 필름의 전압 응답 결과를 그림 3.3.10에 나타내었다. 600mm의 캔틸레버 보에서의 자유 진동 주파수는 5 Hz 이며, 800mm 는 2.91 Hz 로써, 각 주파수에 해당하는 변형률 응답 계수를 그림 3.3.8에서 구하면, 각각 0.0276와 0.0274의 값을 가진다. 변형률 응답 계수를 적용한 PVDF 필름의 변형률 응답과 ESG로 측정한 변형률 응답 결과를 그림 3.3.11에 나타내었다. PVDF 필름의 변형율 응답이 ESG로 측정한 변형률 응답에 매우 근사한 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다.

한편, 그림 3.3.8의 주파수별 변형률 응답 계수에서 알 수 있듯이, 동적 변형률 성분의

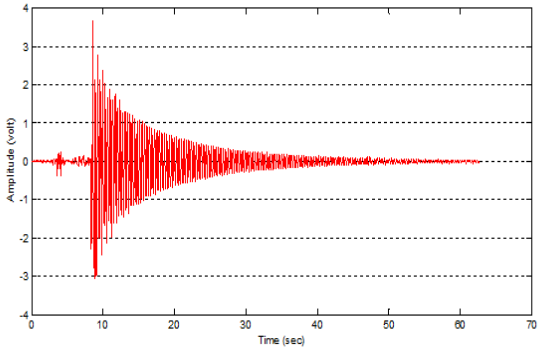
주파수가 2 Hz 이상 일 경우에는 변형률 응답 계수 값이 주파수에 따라 변화가 거의 없이 일정한 값을 가지지만, 2 Hz 이하일 경우에는 주파수에 따라 변형률 응답 계수 값이 변화하는 것을 알 수 있다. 특히, 1 Hz 이하의 주파수 대역에서는 값의 변화가 매우 급격하며, 이는 동적 변형률 계측 시에 1 Hz 이하의 저주파수 대역 성분은 실제 변형률을 크게 왜곡할 수 있다는 것을 나타낸다. 주파수별 변형률 응답 계수는 전하증폭기의 피드백저항과 피드백 커패시턴스 값에 따라 변화가 되며, 따라서 피드백 저항과 피드백 커패시턴스를 변화시킴으로써 저주파수 대역에서도 왜곡없이 변형률을 측정 가능하다는 것을 의미한다. 그림 3.3.12에는 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항 만을 100 Mega Ohm으로 변화시켰을 때의 주파수별 변형률 응답 계수를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 전하증폭기의 피드백 저항을 100 Mega Ohm으로 바꾸면 0.5 Hz의 저주파수 성분도 왜곡없이 측정할 수 있음을 알 수 있다. 따라서, PVDF 필름을 이용하여 구조물의 동적 변형률을 왜곡없이 측정하기 위해서는, 동적 변형률 성분의 주파수 대역에 맞도록 식(8)의 전하증폭기의 주파수 응답 함수를 조절하여야 한다.



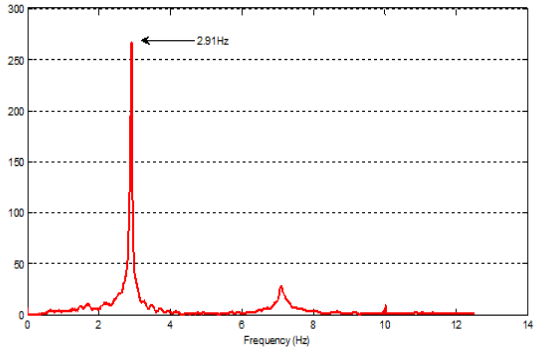
(a) 시간 영역 (Specimen 길이 : 800mm)



(b) Frequency 영역 (Specimen 길이 : 800mm)

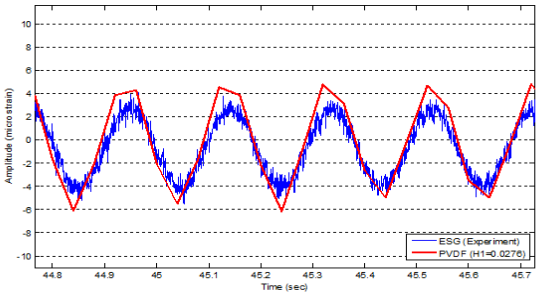


(c) 시간 영역 (Specimen 길이 : 600mm)

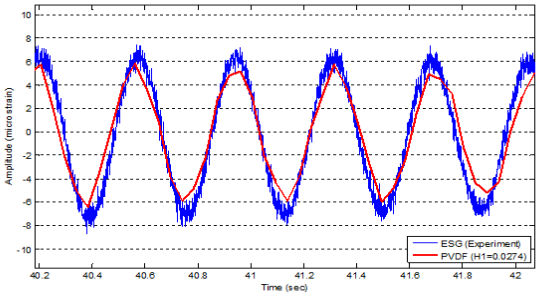


(d) Frequency 영역 (Specimen 길이 : 600mm)

그림 3.3.10 PVDF Film의 응답



(a) 보정된 Strain 응답 (Specimen 길이: 800mm)



(b) 보정된 Strain 응답 (Specimen 길이: 600mm)

그림 3.3.11 PVDF 필름의 보정된 Strain 응답

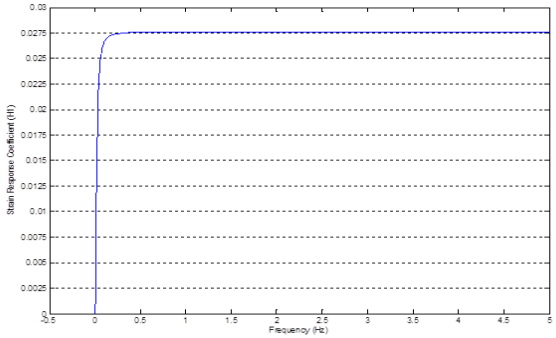
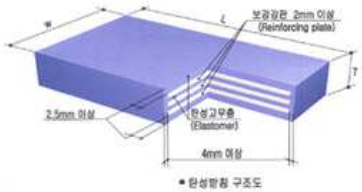


그림 3.3.12 Strain 응답 계수 (Feedback Resistance : 100 Mega Ohm)

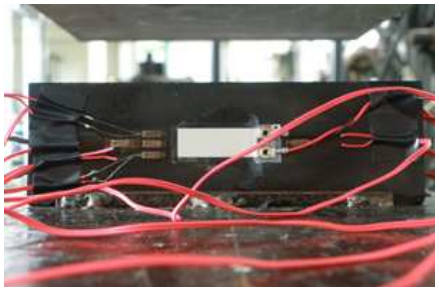
3. 교량받침의 정/동적 하중 재하 실험 및 응답 특성 분석

가. 정적 하중의 측정

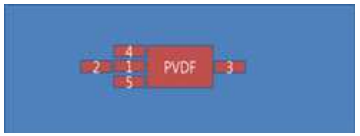
교량받침에 압전 필름를 부착한 후 동적 하중을 측정하기에 앞서 우선적으로 정적 하중 재하 실험을 수행하였다. 교량받침의 경우 실제 현장에서는 통상적으로 교량의 하중이 걸려져 있는 경우이기 때문에 이러한 정적 하중에 대한 압전센서의 응답을 살펴볼 필요성이 있다. 실험을 위해 탄성받침의 우측면, 좌측면에 스트레인 게이지와 압전 필름을 그림3.3.13 과 같이 부착하였다.



(a) 탄성 받침의 구조



(b) 탄성받침 실험 모습



(c) Strain gauge와 PVDF Film의 취치

그림 3.3.13 교량 받침(탄성받침) 측면(150mm)
- Strain gauge와 PVDF Film의 부착 위치

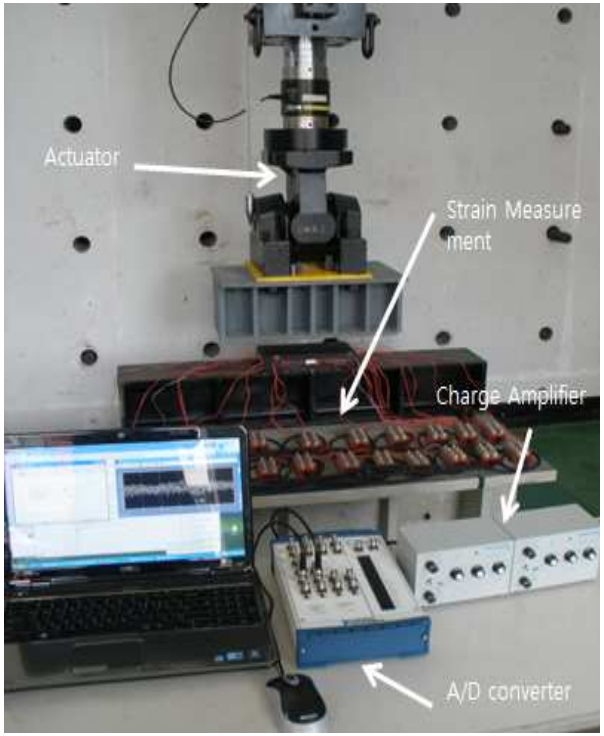


그림 3.3.14 실험 셋업

또한 본 연구에서는 스트레인 게이지의 변형률을 기준 변형률로 고려하였다. 스트레인 게이지의 기준 변형률에 대한 신뢰성을 위하여 ANSYS/Structural 모듈을 이용하여 해석 대상 교량 받침(탄성받침)을 유한요소로 그림 3.3.15와 같이 모델링하였다. 해석에 사용된 요소는 8절점 고체요소이며, mesh size는 5mm로 하였다. 경계조건은 받침 바닥면은 고정조건으로 처리하고, 하중이 부가되는 받침 상부면은 교량 상판에 고정되는 부위이기 때문에 수직 하중이 작용할 때 수평 변위와 회전 변위가 발생하지 않도록 경계조건을 부가하였다. 하중은 해석 대상 받침의 허용 하중이 350kN 인 점을 고려하여, 하중의 총합이 380kN 인 등분포 수직 하중을 가하였다. 게이지와 센서의 부착지점의 변형률을 살펴본 결과(그림 3.3.16)스트레인 게이지 및 압전 필름 센서의 부착위치에서 약 200 micro strain 가량의 변형을 측정할 수 있었다. 해석에 사용된 탄성받침의 제원은 표 3.3.2와 같다.

표 3.3.2 탄성받침의 제원

Materials	Length	Width	Height	Material properties			비 고
				Poisson's Ratio	Young's modulus	Density	
Steel	134mm	284mm	7mm	0.29	216 GPa	7900 kg/m³	3개층
Rubber	150mm	300mm	8mm	0.49	100 MPa	2100 kg/m³	4개층

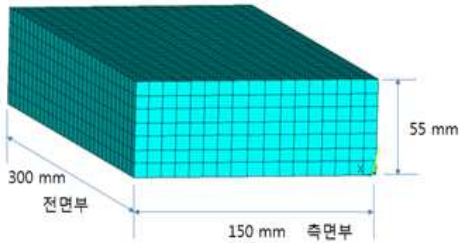


그림 3.3.15 탄성 받침 (적층고무받침)

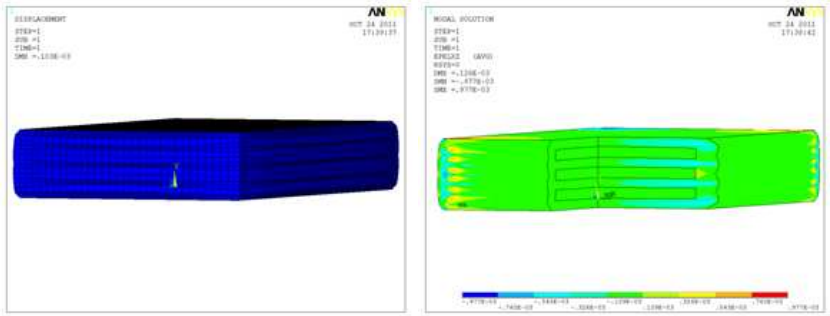


그림 3.3.16 유한요소 해석을 통한 변형률 측정

Load control 방식으로 실험을 수행 하였으며, 분당 100kN의 하중으로 재하하였다. 실험을 통해 살펴본 380kN의 최대 변형률은 평균적으로 약 350micro strain 이다. 이는 유한요소 해석과 실험의 경계조건의 차이나 실험환경을 고려하였을 때 스트레인 게이지의 변형률 값을 기준 값으로 생각할 수 있다. 한편, 정적 하중 실험의 결과를 보면 스트레인 게이지와 압전 필름에서의 응답 특성이 하중이 재하 되는 시점에서는 약간의 충격파 탓에 응답이 측정되는 듯하나 역시 전체적인 전압은 변하지 않는 특성을 보인다. 정적 하중 재하 실험의 결과를 토대로 압전 필름은 정적 하중을 추정하는데는 무리가 있다고 결론 지을 수 있다.

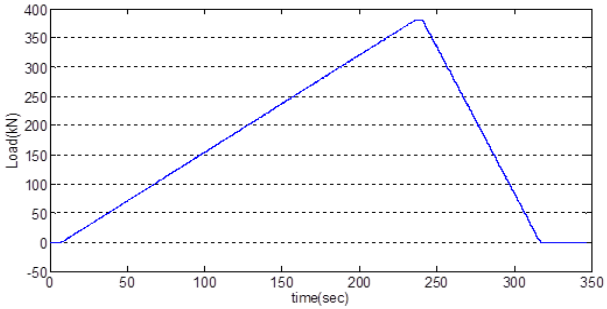


그림 3.3.17 정적 하중 380kN 하중

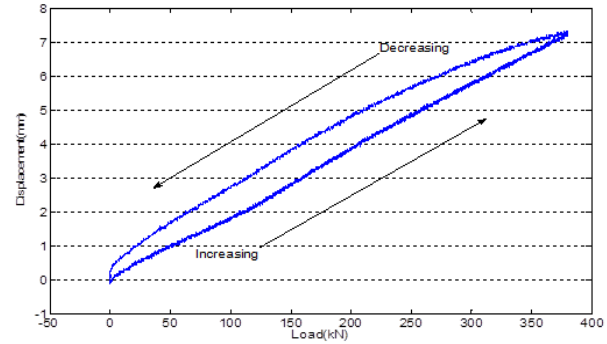


그림 3.3.18 정적 하중 380kN 하중-변위

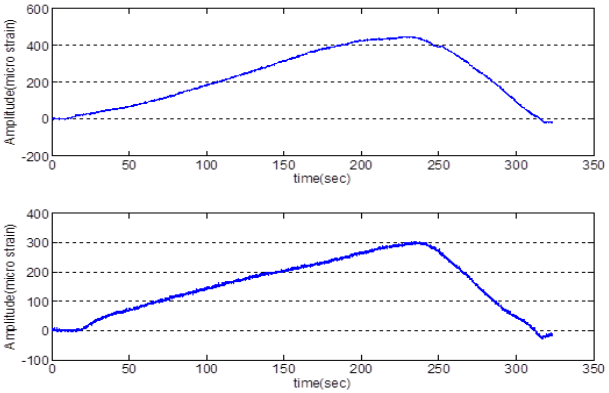


그림 3.3.19 정적 하중 380kN 우측, 좌측면 변형

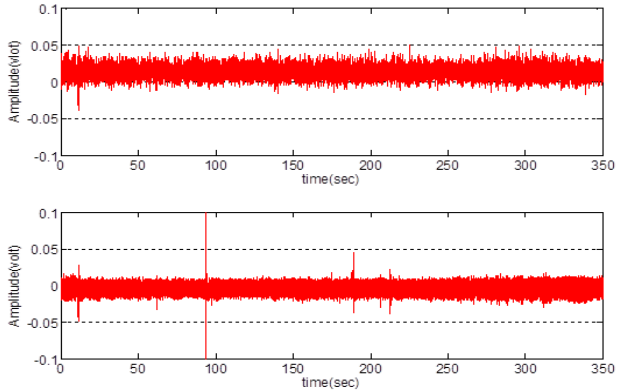


그림 3.3.20 정적 하중 380kN 우측, 좌측면 전압

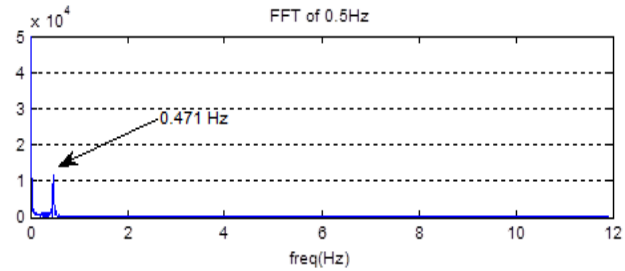
나. 동적 하중의 측정

교량의 상판에서는 차량의 교행등 동적인 외부 하중에 의하여, 교량 받침에서는 동적 하중이 재하 된다. 교량 받침에 작용하는 동적 하중에 대한 압전 필름의 전기 응답을 알아보기 위해서, 동적 하중에 대한 실험을 수행하였다. 측정을 위해 표 3.3.3과 같이 교량에 이미 부가되어 있는 Pre Load와 교량 상판의 외부 하중에 대한 Cyclic Load 그리고 하중이 가해지는 Frequency의 각 케이스에 따른 하중 재하 실험을 탄성받침의 우측, 좌측면에 대하여 수행하였다.

표 3.3.3 동적 하중 입력표

Preload level (kN)	Cyclic load level (kN)	Load control (frequency)		
100	25	0.5	1	2
	50	0.5	1	2
200	25	0.5	1	2
	50	0.5	1	2

또한, 각 주파수에서의 입력 하중을 FFT를 수행하여 그림 3.3.21에 나타내었다.



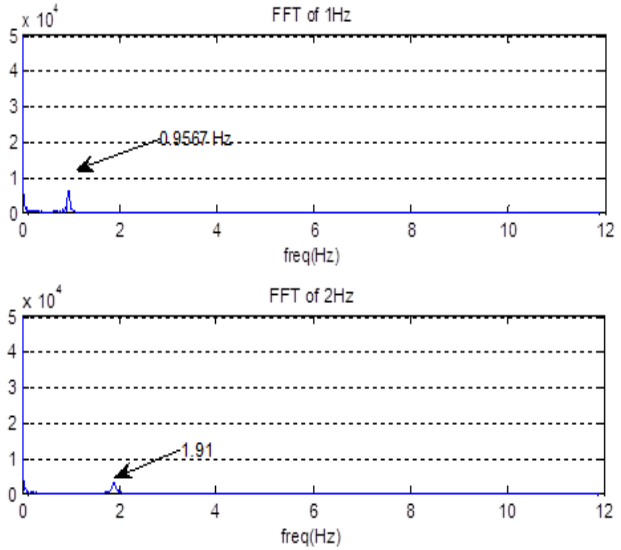


그림 3.3.21 하중 입력 주파수 영역

표 3.3.3에 의한 하중과 변위 데이터를 5장. 부록 에 정리 하였으며, 하중에 대한 우측면, 좌측면의 스트레인 게이지를 통한 변형률과 압전 필름을 통한 전압에 대한 데이터를 5장. 부록에 정리하였다.. 한편, 5장. 부록에서 나타난 데이터를 기반으로 하여 Pre Load에 따른 변형률과 전압을 그림 3.3.22에 나타내었다. Pre load에 따른 변형률과 전압의 변화는 그림 3.3.22에서 볼 수 있듯이 변화가 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 이는 압전 필름을 통한 측정에서 정적으로 재하된 상태의 하중이 얼마인가에 대해서는 알수 없음을 다시 한번 확인할수 있으며, 변형률에 있어서 Pre Load에 따라 전체적인 변형률 값이 높아지는 것은 5장. 부록에서 확인할 수 있지만, Pre Load의 값이 Cyclic Load값에 따른 동적 변형률에는 영향을 주지 않는다는 것을 확인할수 있다. 또한, 그림 3.3.23에서는 Cyclic Load에 따른 변형률과 전압의 변화를 나타내었다. 그림에서 확인 할수 있듯이 변형률과 전압에서 모두 선형적인 변화를 나타내고 있다. 이는 이후에 수행될 동적 하중의 측정에 대한 실험에서 선형성을 가정하여 실험이 가능하다는 가정을 가지게 될 수 있는 결과이다. 그림 3.3.24에서는 Load control(Frequency)에 따른 결과를 나타내었다. 변형률값은 주파수 대역에 따라 관계없이 일정한 값을 지니고 있음을 확인 할수 있지만 전압값에 있어서는 어느정도의 비례적인 관계를 보이고 있음을 알수 있다. 따라서 전압값을 이용한 변형률에 대한 추정에 있어서 주파수에 따른 관계를 분석해야 할 필요성을 보이고 있다. 그림 3.3.22. 그림 3.3.23, 그림 3.3.24에서 사용된 데이터의 수치적 값을 표 3.3.4에 정리하였다. 표 3.3.4에 나타낸 변형률과 전압에 대한 수치는 모두 동적 하중에 대한 출력값이다.

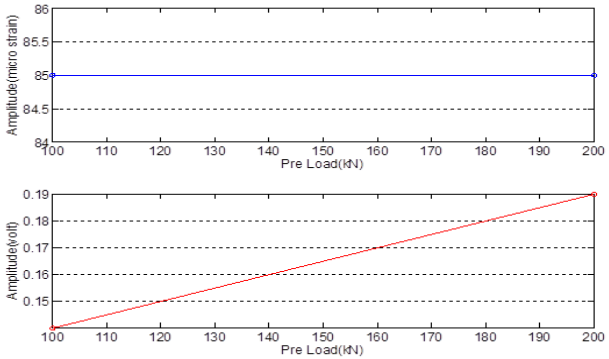


그림 3.3.22 Pre Load에 따른 변형률과 전압

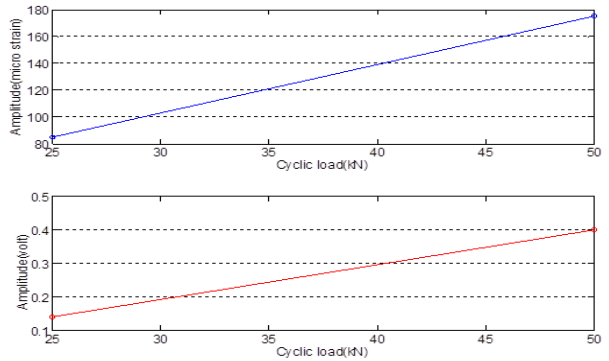


그림 3.3.23 Cyclic Load에 따른 변형률과 전압

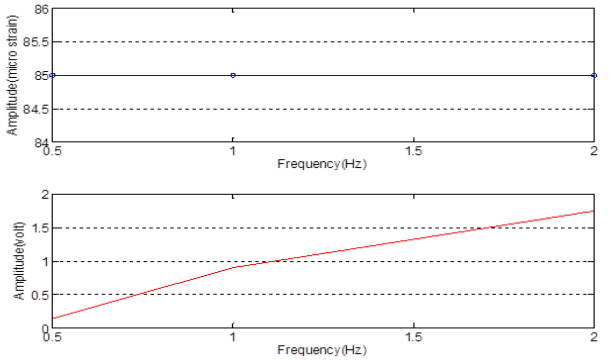
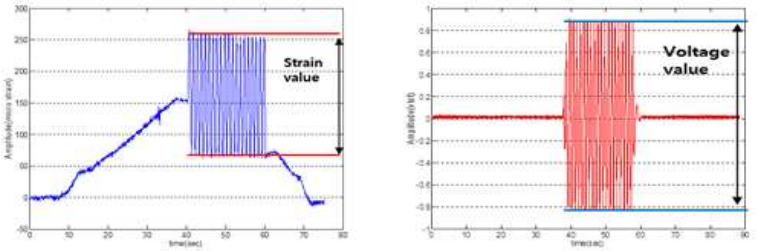


그림 3.3.24 Frequency에 따른 변형률과 전압

표 3.3.4 하중 입력에 따른 데이터값



우측면 (micro strain)	좌측면 (micro strain)	우측면 (voltage)	좌측면 (voltage)	주파수 (Frequency)
100	70	0.15	1.13	0.5
100	70	1.0	0.8	1
100	70	2	1.5	2

Pre Load - 100kN, Cyclic Load - 25kN

우측면 (micro strain)	좌측면 (micro strain)	우측면 (voltage)	좌측면 (voltage)	주파수 (Frequency)
200	150	0.42	0.38	0.5
190	150	1.9	17	1
200	150	3.95	3.2	2

Pre Load - 100kN, Cyclic Load - 50kN

우측면 (micro strain)	좌측면 (micro strain)	우측면 (voltage)	좌측면 (voltage)	주파수 (Frequency)
90	60	0.2	0.18	0.5
90	60	0.8	0.8	1
90	60	1.7	1.5	2

Pre Load - 200kN, Cyclic Load - 25kN

우측면 (micro strain)	좌측면 (micro strain)	우측면 (voltage)	좌측면 (voltage)	주파수 (Frequency)
200	120	0.4	0.25	0.5
200	120	1.1	0.7	1
200	120	2	1.8	2

Pre Load - 200kN, Cyclic Load - 50kN

다. 압전 필름을 이용한 동적 하중에 대한 변형률 측정

압전 필름을 통해 측정된 전압을 이용하여 변형률의 추정이 가능한지에 대해 알아보기 위하여 앞선 보여주었던 Gauge Factor를 적용하여 스트레인 게이지를 통한 변형률 값과 비교하였다. 한편, 실험적으로 분석해보았을 때 탄성 받침의 거동에 있어서 Gauge Factor 만으로는 스트레인 게이지의 변형률 값과 그 값이 맞아 떨어지지 않음을 확인 할 수가 있었다. 앞선 연구의 그림 3.3.24의 결과에서 알 수 있었듯이 입력 하중의 주파수에 대한 변형률과 전압의 값에는 차이를 지니게 된다. 따라서 실험에 사용된 입력하중의 주파수 성분에 따라 압전 필름 Gauge Factor의 증폭 계수를 산정하였으며, 그 결과를 식(11)과 그림 3.3.25에 나타내었다.

$$y_{(amplify)} = (-3.71)x_{(Frequency)} + 5.333 \quad (11)$$

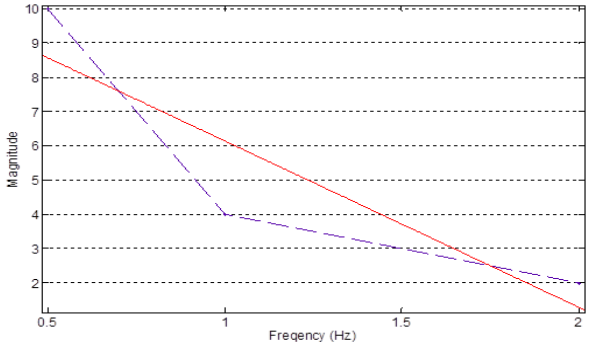
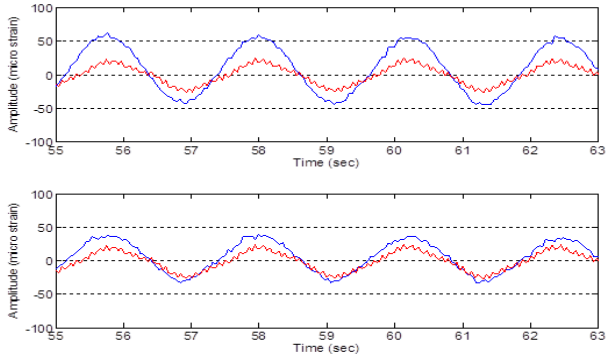
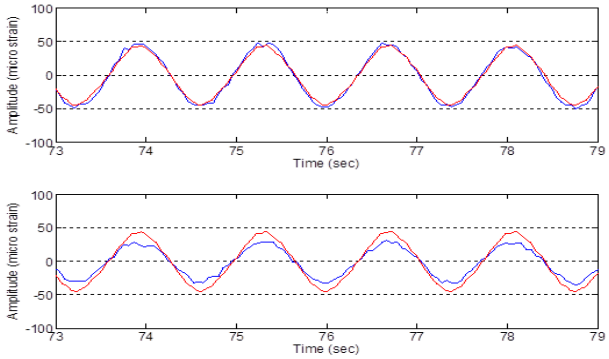


그림 3.3.25 입력하중 주파수에 따른 Gauge Factor의 증폭 계수

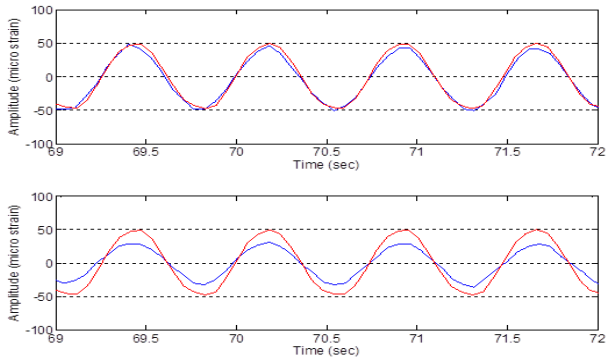
실험적으로 얻어낸 Gauge Factor의 증폭 계수와 앞서 구한 Gauge Factor를 압전 필름을 통해 측정된 전압에 적용하였으며, 그 결과를 그림 3.3.26에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 0.5Hz의 저 주파수 대역에 비해 1Hz와 2Hz 대역에서의 변환 전압 값들은 서로 큰 변동이 없으며 변형률값과 매우 근사하게 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 여러 케이스의 측정, 변환값에서 0.5Hz의 결과에서 보면 동일한 Gauge Factor와 증폭 계수를 적용했음에도 불구하고 측정 변형률과 일치하는 구간과 그렇지 않은 구간으로 나뉜다. 이는 압전 필름을 통한 변형률의 값 측정이 저주파수 대역에서는 어느정도의 오차를 감안해야 한다는 점을 알려주고 있다. 또한, Cyclic Load의 선형적 증가에 따라 변형률 역시 선형적 증가를 보이며, 이와 동일하게 변환된 전압값들 역시 선형적으로 증가했음을 알 수 있다. 이러한 결과는, 앞선 연구의 결과에 대해 저주파수대역의 PVDF 필름의 측정 성능에 대해 서로 어긋난 결과를 보이고 있다. 이는 PVDF 필름이 부착된 구조물의 재질에 따른 환경적 오차결과라고 판단이 되며, 앞선 연구에서의 실험과 같은 선형성이 뚜렷한 재질의 구조물의 경우 PVDF 필름은 저주파수에서 또한 주파수 응답함수의 조절에 따라 매우 근사한 값의 변형률 측정이 가능한 반면, 비선형성이 강한 탄성받침(고무재질의 복합재료)과 같은 경우에서는 저주파수에 대하여 다소 오차가 생기게 된다는 결과를 유추할 수가 있다. 또한 결과 값을 살펴보았을 때 , 고무의 비선형성에 의해 변환된 전압의 값이 앞선 2절의 연구 결과에 비해 매끄럽지 못한 것을 확인 할 수 있다. 이러한 원인으로 몇몇의 결과에 있어서는 변환 전압값이 피크점에서 위, 아래로 튀는 현상을 확인할수 있다(Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 보정후 우측, 좌측면 ; 참고). 이러한 경우를 배제 한다면 대부분의 경우 1,2Hz에서는 변환된 전압의 값이 측정된 변형률의 값과 매우 근사하게 일치함을 확인 할수 있으며, 따라서, 교량받침에 동적 하중이 가해지는 상황에 있어서 압전 필름을 통한 변형률의 측정이 가능함을 판단 할 수가 있다. 이러한 결과는 압전 필름을 통한 동적 하중의 추정에 대한 가능성을 판단 할 수 있게 된다..



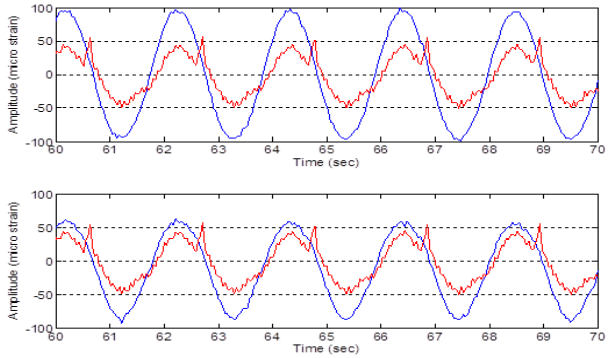
(a)Pre load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 0.5 Hz : 보정후 우측, 좌측면



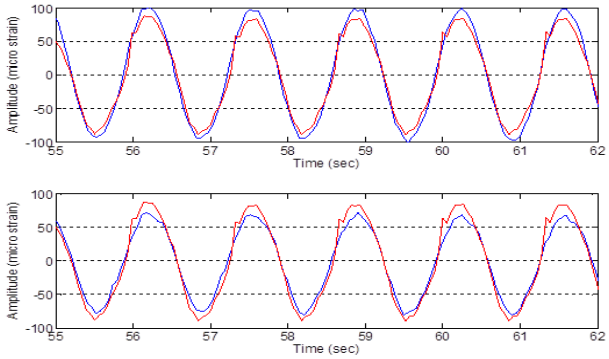
(b)Pre load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 1 Hz : 보정후 우측, 좌측면



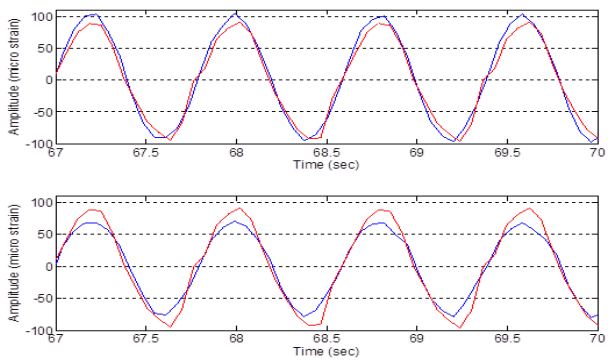
(c)Pre load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 2 Hz : 보정후 우측, 좌측면



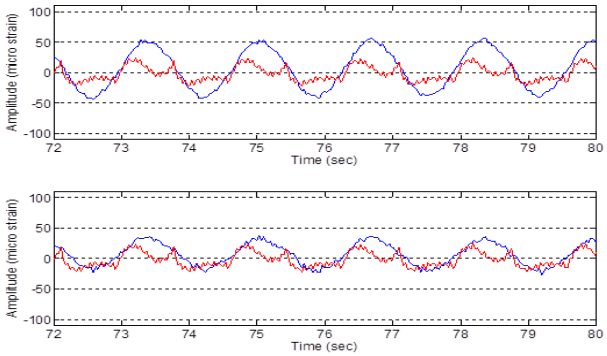
(d)Pre load– 100kN, Cyclic load– 50kN, Freq– 0.5 Hz : 보정후 우측, 좌측면



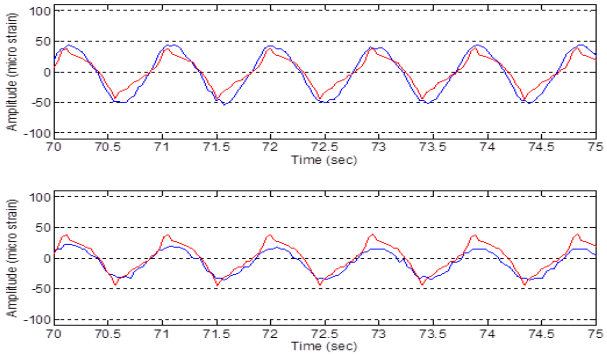
(e)Pre load– 100kN, Cyclic load– 50kN, Freq– 1 Hz : 보정후 우측, 좌측면



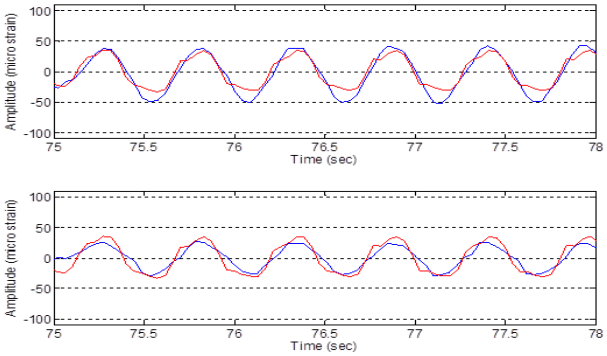
(f)Pre load– 100kN, Cyclic load– 50kN, Freq– 2 Hz : 보정후 우측, 좌측면



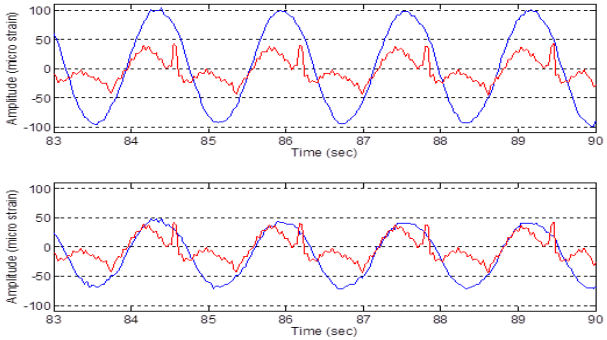
(g)Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 보정후 우측, 좌측면



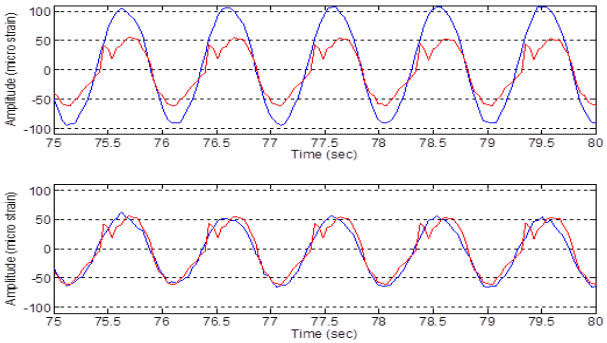
(h)Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 보정후 우측, 좌측면



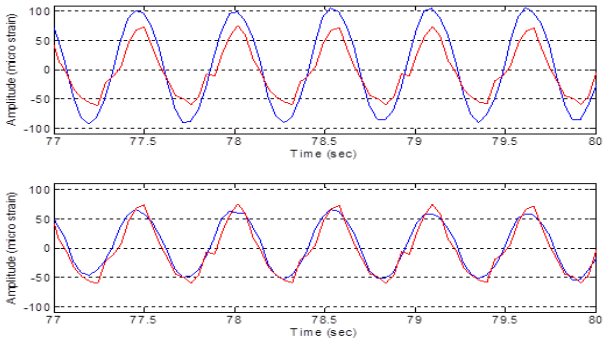
(i)Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 보정후 우측, 좌측면



(j)Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 보정후 우측, 좌측면



(k)Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 보정후 우측, 좌측면



(l)Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 보정후 우측, 좌측면

그림3.3.26 Gauge Factor를 적용한 전압 값과 변형률값의 비교

라. Random하중 입력에 따른 압전 필름의 전압 응답 특성

실제 교량 상부에서의 동적 하중은 앞선 실험과 같이 일정한 형태의 외부 하중이 입력되는 것은 아니다. 따라서 교량 받침에 임의의 하중이 가해지게 되는 경우에 대한 압전 필름의 전압 응답 특성을 살펴보기 위하여 표 3.3.5와 같은 Sine wave 형태의 하중 입력 표를 구성하였다.

표 3.3.5 Random 하중 입력 표

하중 입력(Sine wave) - Pre Load 100kN																	
step 1		step 2		step 3		step 4		step 5		step 6		step 7		step 8		step 9	
Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN	Hz	kN
1	30	2	60	0.5	30	2	10	0.5	60	1	10	2	30	1	60	0.5	10

하중 입력에 따른 strain gauge를 통한 측정 변형률과 PVDF 필름을 통한 측정 전압 결과를 그림 3.3.31에 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 측정 변형률과 측정 전압간의 결과가 다소 차이가 있음을 확인할 수가 있다. 표 3.3.5의 하중 입력표와 비교하여 살펴보았을 때 0.5Hz step에서 그 값의 차이가 확연하게 드러남을 확인할 수 있다. 자세한 분석을 위하여 그림 3.3.31의 결과 값을 앞선 동적 변형률 분석에서와 같이 Gauge Factor와 증폭계수를 적용하여 그림 3.3.32과 같이 나타내었다. 그림 3.3.32의 결과에서 볼 수 있듯이 입력 하중에 있어서 고주파수(2Hz)의 경우에서는 그 값이 비교적 잘 일치하며 1Hz에서 또한 변환된 전압 값과 측정 변형률 값 사이에서 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다. 하지만 앞서 말한 것과 같이 0.5Hz step 구간에서는 변환 전압 값과 측정 변형률 사이의 값이 차이가 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 0.5Hz 대역에 있어서 앞선 단순 동적 하중 입력의 경우보다 값의 신뢰도가 비교적 떨어지는 것을 파악할 수 있다. 따라서 결과를 바탕으로 압전 필름을 이용한 변형률 측정의 경우 비선형적 성질이 강한 재료에 있어서는 저주파수 대역에 있어서 측정에 다소 차이가 있음을 알 수 있고, 다음 장에 설명될 하중 추정에 있어서도 오차가 발생할 수 있다고 할 수 있다. 이는 압전 필름의 경우 저수파수 대역에서의 측정에 따른 단점을 보여주는 것이라 할 수 있다. 하지만 결과에서 확인 할 수 있듯이 주파수가 높아짐에 따라 신호 측정에 대한 신뢰도가 상당히 상승하게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 주파수의 대역이 높아짐에 따라 하중 추정에 있어서도 매우 근사한 값의 추정이 가능하다는 것 또한 생각할 수가 있다.

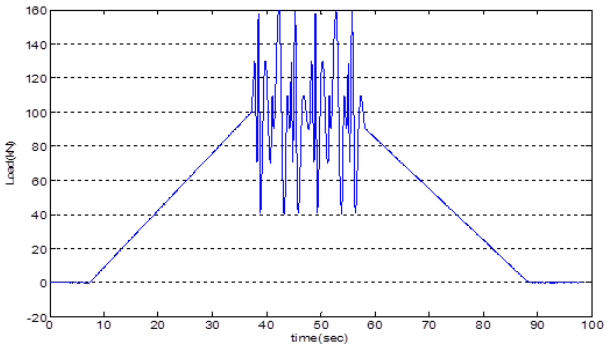


그림 3.3.27 Random 하중: 시간-하중

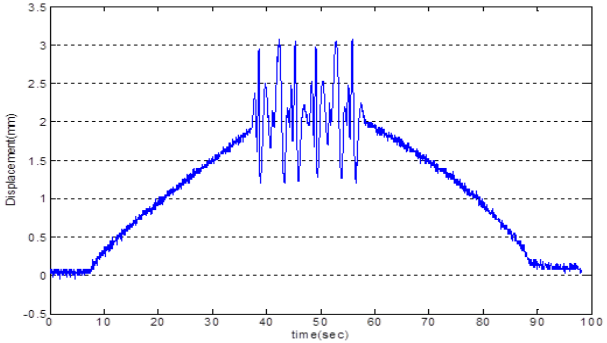
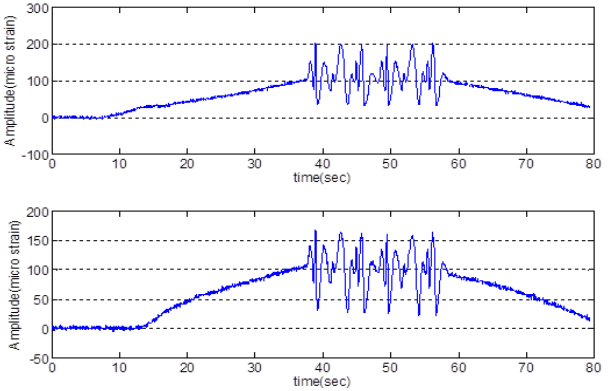
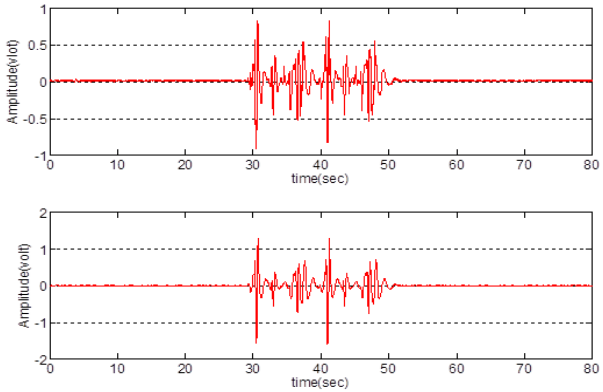


그림 3.3.28 Random 하중: 시간-변위



(a)Random 하중: 우측, 좌측면 변형률



(b)Random 하중: 우측. 좌측면 전압

그림 3.3.29 Random 하중 입력에 따른 변형률과 전압 출력값

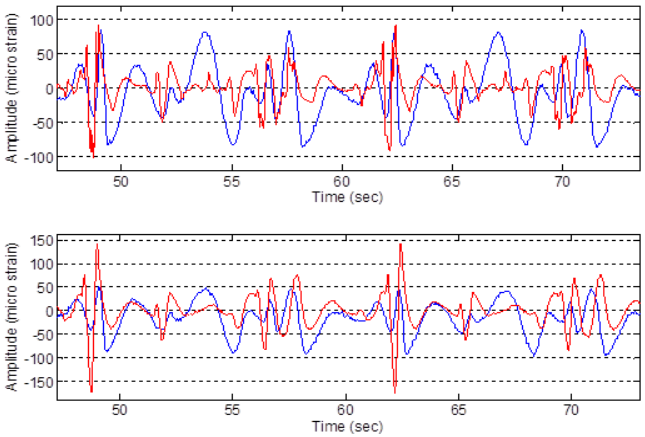


그림 3.3.30 Gauge Factor를 적용한 전압 값과 변형률 우측, 좌측면 값의 비교

4. 하중 추정을 위한 매개변수 추출 및 알고리즘 개발

본 연구의 목적은 PVDF 필름을 통해 측정한 전압을 역산하여 입력된 하중의 추정에 있다. 앞선 연구 결과를 토대로 압전 필름에 의해 측정된 전압을 통한 하중 추정을 위해 탄성받침의 각 면에 그림 3.3.31과 같이 strain gauge와 PVDF 필름을 부착하였다.

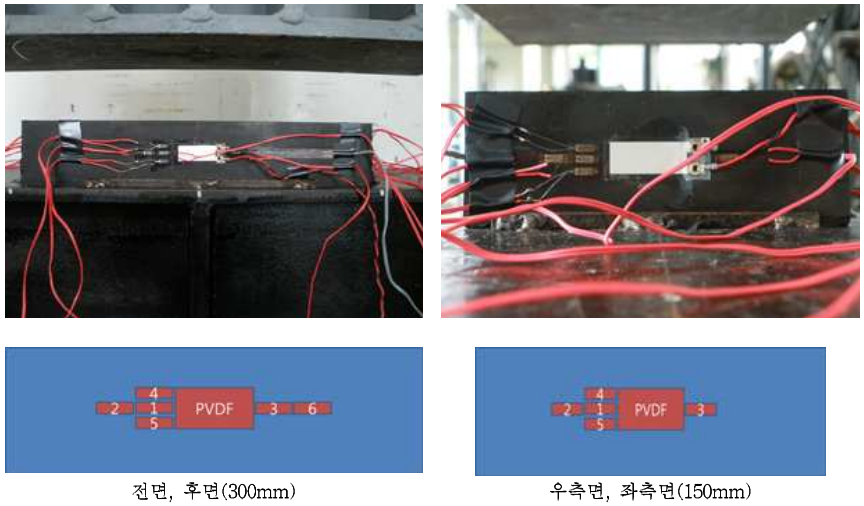


그림 3.3.31 strain gauge와 PVDF 필름의 부착 위치

하중 추정에 있어서 기본적인 방식은 측정된 전압을 이용하여 변형률을 계산하고 계산된 변형률을 사용하여 하중을 역산하는 방식이다. 이를 위해 변형률과 하중간의 관계를 파악할 필요성을 지닌다. 하중 추정을 위해 우선적으로 표 3.3.6의 동적 하중 입력중 Pre load100kN, Cyclic load 25kN의 케이스에 의해 측정된 각 strain gauge에서의 변형률 평균값과 이미 알고 있는 입력 하중의 값을 선형 회귀 분석을 통하여 관계식 도출하였다. 각 하중 주파수에 대한 관계식의 결과를 그림 3.3.32 에 나타내었다. 실험에서 구성된 랜덤 하중의 경우 성분 입력하중의 주파수는 0.5Hz, 1Hz, 2Hz로 이루어져있다. 따라서 세 주파수 성분으로 이루어진 관계식의 하중-변형률 사이의 계수를 평균 내어 하중-변형률의 계수로 사용하였다. 이를 이용하여 식(12)~(14)와 같이 하중과 전압간의 관계식을 유도하였다.

$$L = \alpha_{l-\epsilon}\epsilon = (1.36)\epsilon \tag{12}$$

여기서 $\alpha_{l-\epsilon}$은 하중과 변형률 사이의 상관계수이다. 변형률과 전압의 관계는 식 (12)

와 같다.

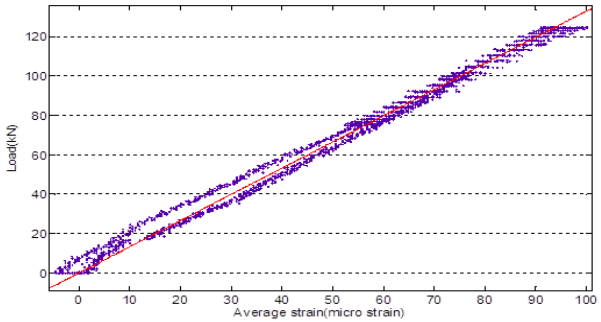
$$V_{out} = H_{1,\exp}\epsilon = (0.0275)\epsilon \qquad (13-1)$$

$$\epsilon = (36.36)\, V_{out} \qquad (13-2)$$

식(13-2) 을 식(12) 대입하여 하중과 전압간의 관계식을 유도해내었다.

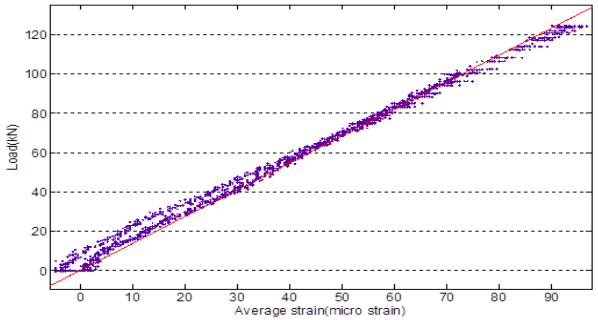
$$L = q_{s-v} H_{1,\exp} V_{out} = (1.36)(36.36)\, V_{out} \qquad (14)$$

식(14)의 하중-전압 관계식을 이용하여 단순 동적 하중 케이스에 대하여 하중 추정 결과를 그림 3.3.33에 나타내었다. 그림 3.3.33는 각각Pre load100kN, Cyclic load 25kN 의 각 주파수에 따른 하중 추정 결과 이다. 그림에서 알 수 있듯이 식 (14)를 이용하여 산출된 PVDF필름을 통해 측정된 전압을 통한 하중 결과가 입력 하중과 근사한 값을 보이고 있다. 2Hz에서는 장비의 측정 한계 탓에 매끄러운 그래프를 보여주지 못하고 있으나 전체적으로 하중 추정 식에 의한 값의 결과가 타당하다고 할 수 있다. 따라서 PVDF 필름을 사용한 탄성받침의 하중 추정에 있어 (14)식을 사용하여 하중의 역산이 가능하다는 것을 증명한다.



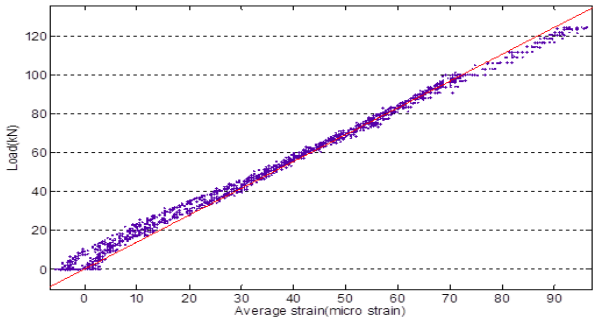
(Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5Hz)

$y_{(load)} = (1.33)x_{(ave-strain)}$



(Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1Hz)

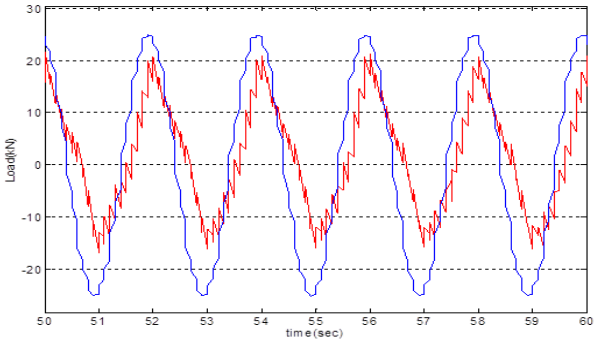
$y_{(load)} = (1.371)x_{(ave-strain)}$



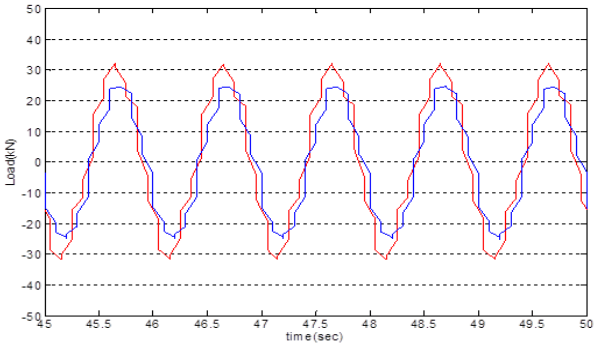
(Pre Load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2Hz)

$y_{(load)} = (1.383)x_{(ave-strain)}$

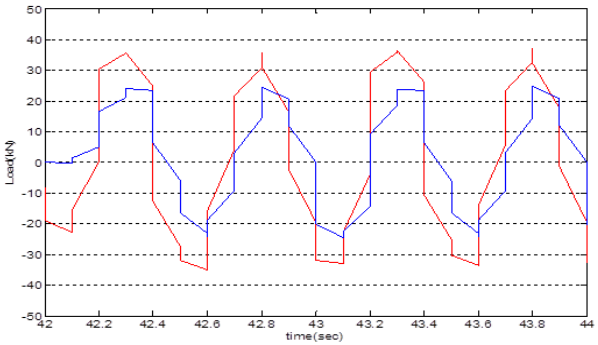
그림 3.3.32 선형 회귀 분석 통한 주파수별 하중 추정 관계식



Pre Load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 0.5Hz



Pre Load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 1Hz



Pre Load– 100kN, Cyclic load– 25kN, Freq– 2Hz

그림 3.3.33 관계식에 따른 주파수별 하중 추정 결과

5. 하중 모니터링 시스템 구성 및 모니터링 성능 검증

가. 모니터링 시스템 구성

하중 모니터링을 위한 시스템 구성을 그림 3.3.34과 같이 나타내었다. 먼저 하중 추정을 필요로 하는 구간, 혹은 구조물에 PVDF 필름을 부착한다. 그리고 구간, 혹은 구조물에 재하 되는 하중을 측정 하게 되는데 이에 필요한 계측 장비로써 A/D converter와 Charge Amplifier를 사용하게 된다. 계측 장비를 통해 측정된 전압 데이터를 하중 추정 알고리즘에 대입하여 수행된 계산 값으로써 하중 추정을 완료 하게 된다.

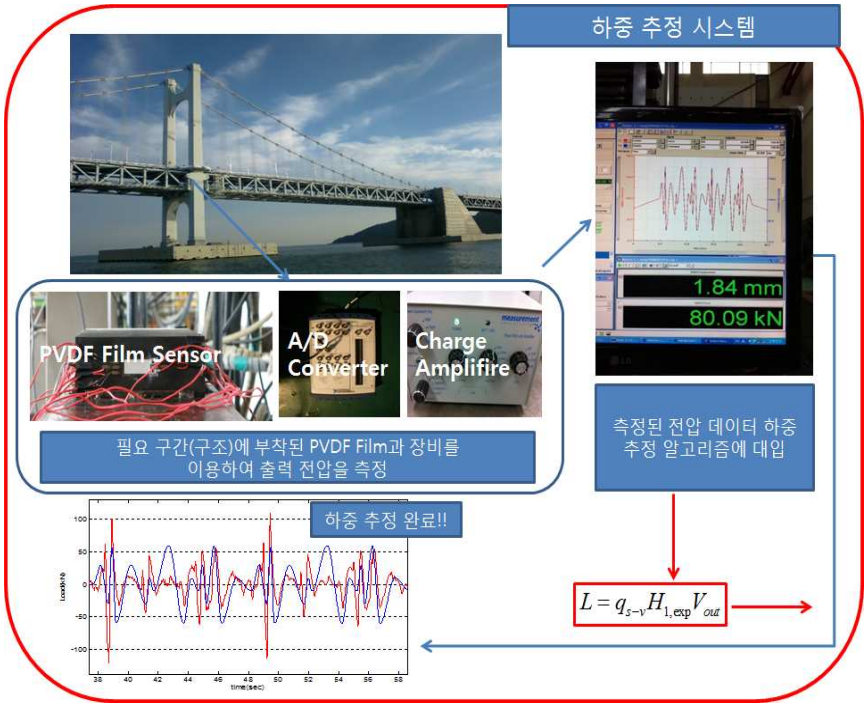


그림 3.3.34 하중 추정 시스템

나. 모니터링 성능 검증

그림 3.3.35와 같이 하중 재하 장비를 통하여 Random 하중 재하 실험을 수행하였으며, 입력된 하중의 형태와 크기는 그림 3.3.36과 같다. 하중 추정에 대한 성능 검증을 위하여 Random 하중에 대해 하중 추정을 수행하여 그림 3.3.37에 그 결과를 나타내었다. 하중 추정 결과를 살펴보면 앞선 Random 하중에 대한 변형률 측정 결과와 유사하게

PVDF 필름의 하중 추정 값과 입력 하중 값 사이에 오차가 발생하고 있음을 알 수 있으며 고주파수 대역에 비해 저주파수 대역의 오차가 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.3.38의 FFT를 통한 분석 결과를 살펴보면 1 Hz와 2 Hz 부근의 결과는 비교적 잘 일치 하고 있음을 확인할 수 있지만 0.5 Hz에서는 값의 오차가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 0.5 Hz 이하에서는 PVDF 필름을 통한 측정이 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 결과를 통해 확인 가능한 사실은 PVDF 필름의 경우 저주파수 대역보다 고 주파수 대역에서의 측정이 용이하며 값의 민감도 또한 좋다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 앞선 그림 3.3.8의 변형률 계수에서 확인 할 수 있듯이 1 Hz, 2 Hz 부근에서의 변형률 계수 값에서는 큰 차이가 없지만, 0.5 Hz에서는 변형률 계수의 차이가 상당히 큰 것을 볼 수 있는데 이것은 저 주파수 대역에서 측정을 하고자 할 때, 입력 하중 주파수에 맞도록 변형률 계수의 조절이 필요하다는 것을 의미한다. 따라서 저주파수의 측정을 고려한 상황에서는 PVDF 필름을 이용한 계측 전에 변형률 계수의 조정을 위한 증폭 장치 회로의 저항과 커패시턴스 값의 조절이 필요하다. 만약 변형률 계수 조절을 취하기 어려운 경우는 Random 하중 입력에 따른 변형률 측정 및 하중 추정의 경우 서로 각기 다른 주파수 대역에 대하여 불가피하게 Gauge Factor 증폭 계수의 평균값을 쓸 수밖에 없으며, 이에 따라 오차 가 발생할 수 있음을 감안하여야 한다. 따라서 저주파 대역이 포함된 하중 입력에 대하여 제안된 방법으로 정확한 변형률 및 하중 측정을 수행하기 위해서는 측정 하고자 하는 주파수 대역의 변형률 증폭 계수를 적절하게 자동적으로 조절 할 수 있는 방법론에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

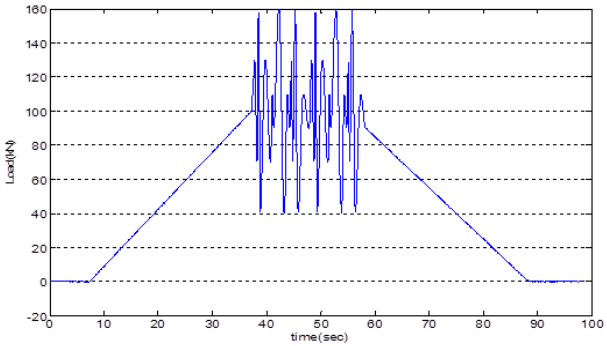


그림 3.3.35 Random 하중: 시간-하중

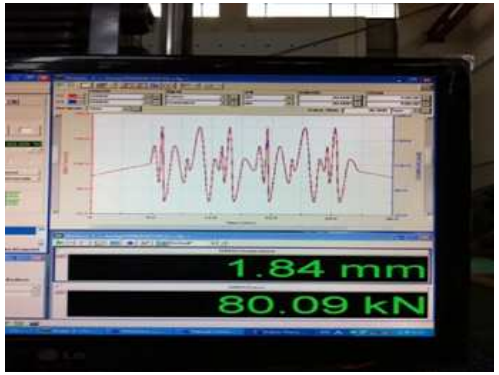


그림 3.3.36 Random 하중 재하 상황

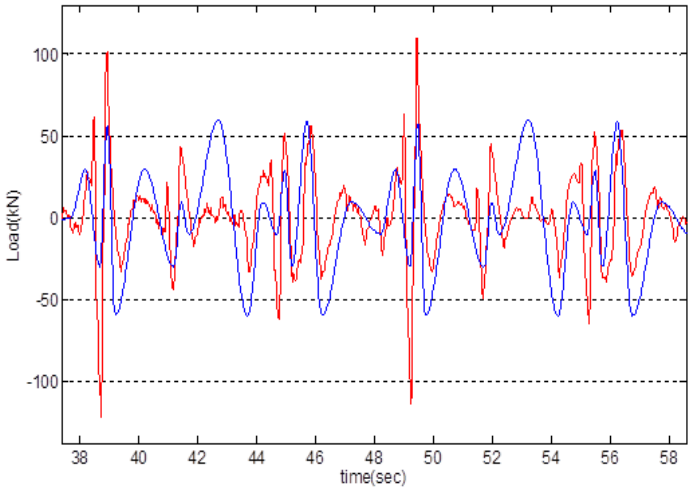


그림 3.3.37 하중-전압 관계식을 적용한 압전 필름의 출력전압과 입력 하중과의 비교

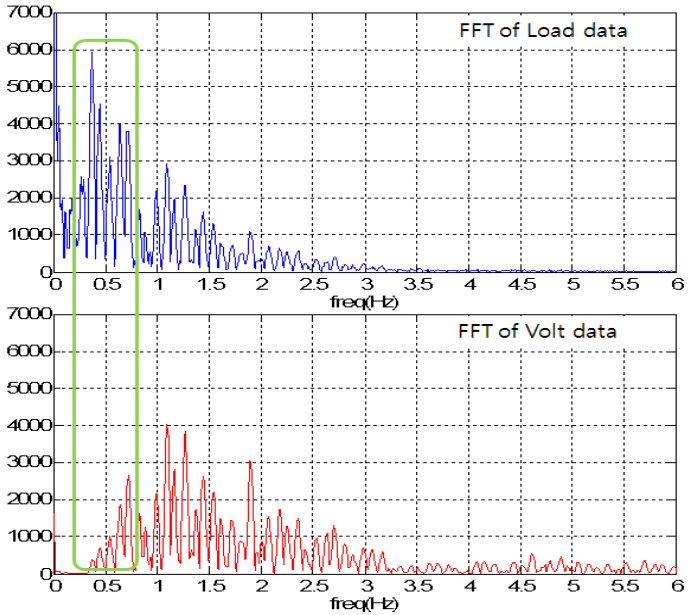


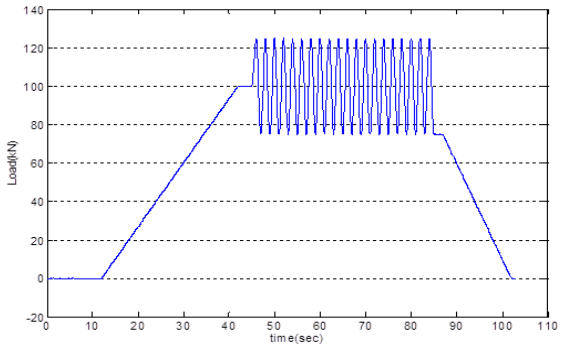
그림 3.3.38 압전 필름의 출력전압과 입력 하중의 FFT 결과

6. 추가자료

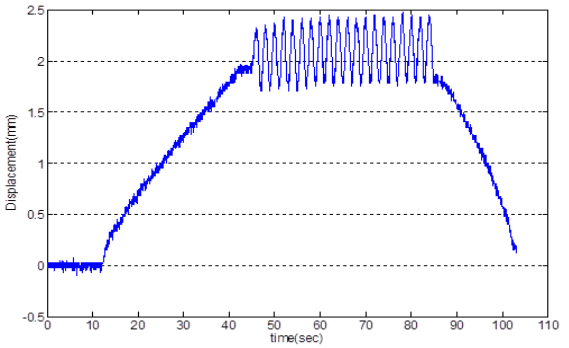
가. 압전 센서의 온도 보상 방안

압전체의 경우 온도에 민감한 것으로 알려져 있다. 따라서 변형률 계측시 온도에 대한 영향을 보정하기 위해 Dummy 압전 센서를 이용하여 온도에 따른 변형률을 측정하여야 한다.

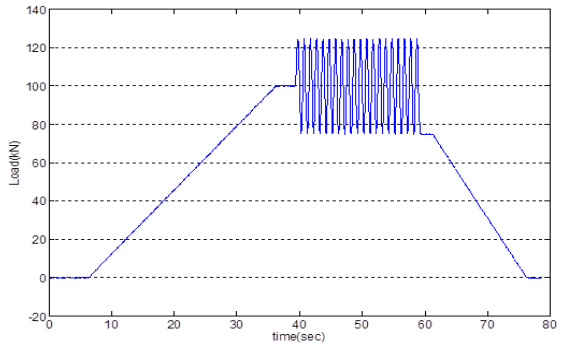
나. 표 3.3.4 실험 데이터



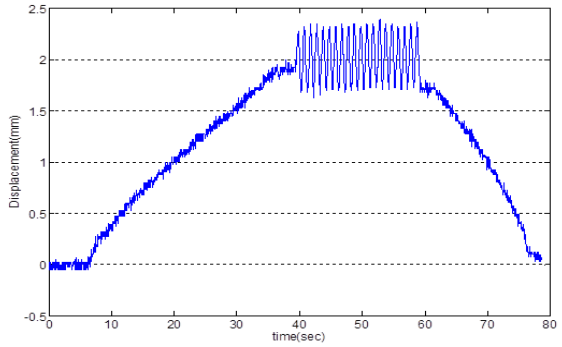
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-하중



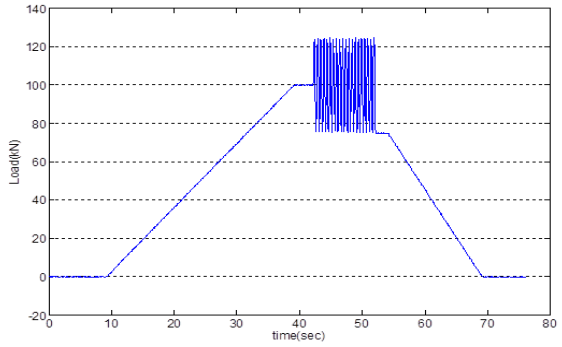
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz: 시간-변위



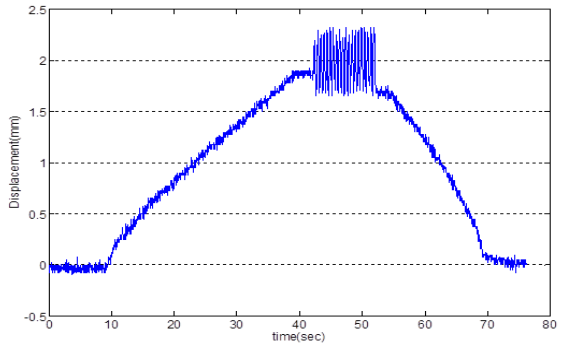
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 시간-하중



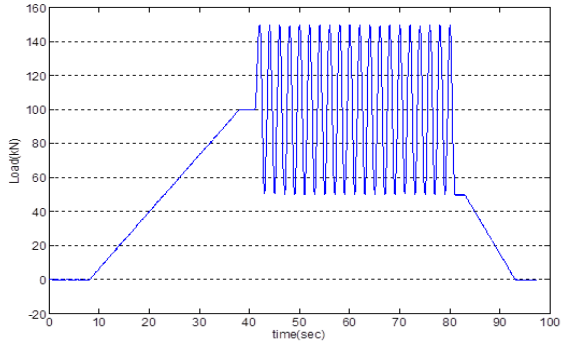
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 시간-변위



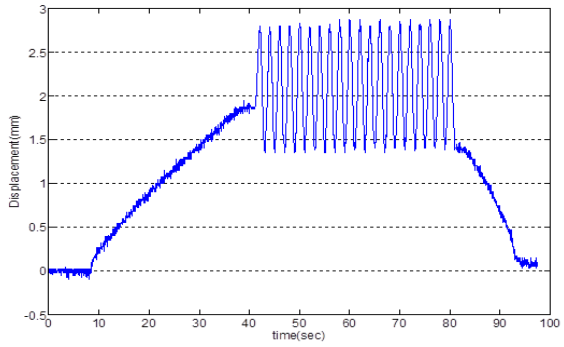
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 시간-하중



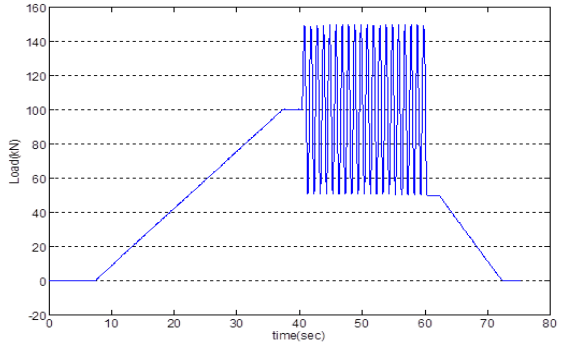
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 시간-변위



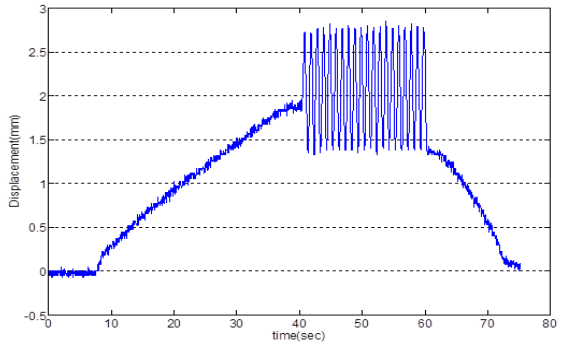
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-하중



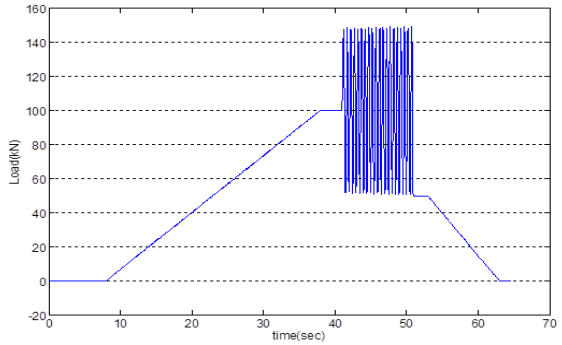
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-변위



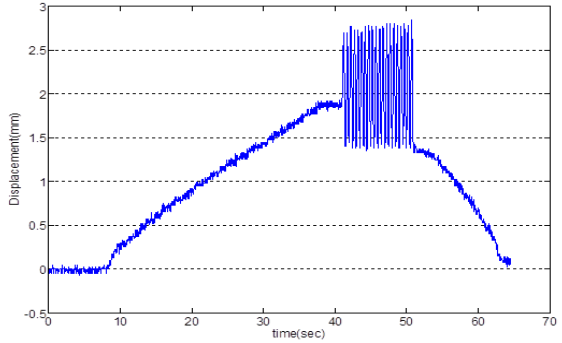
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 시간-하중



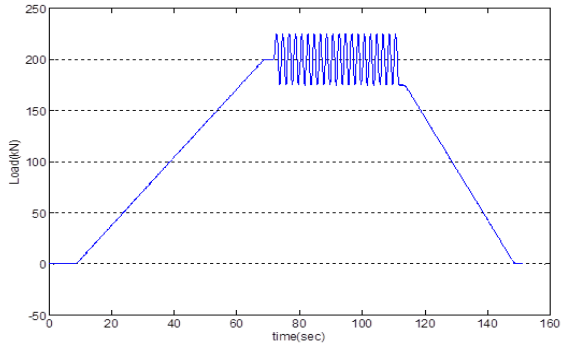
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 시간-변위



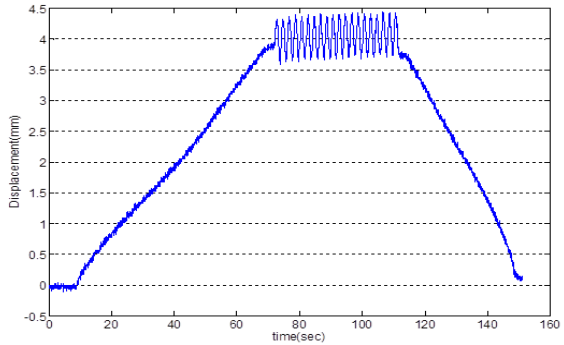
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 시간-하중



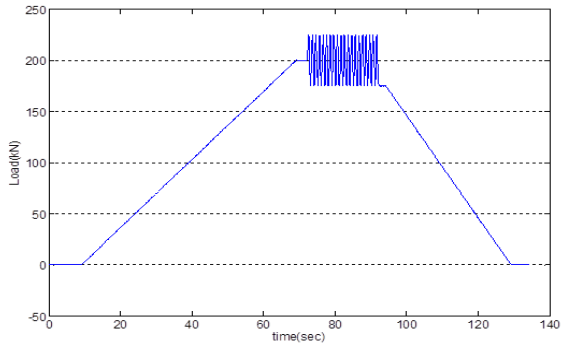
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 시간-변위



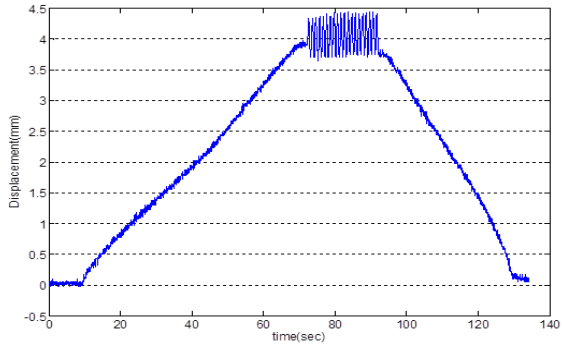
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-하중



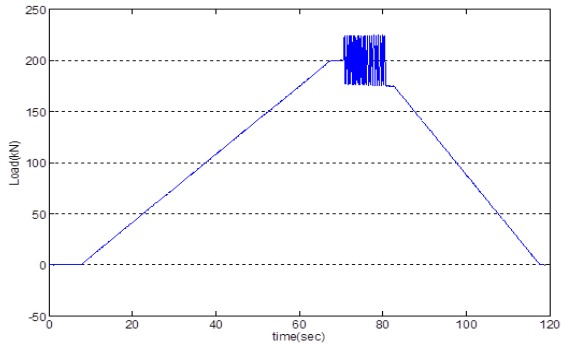
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-변위



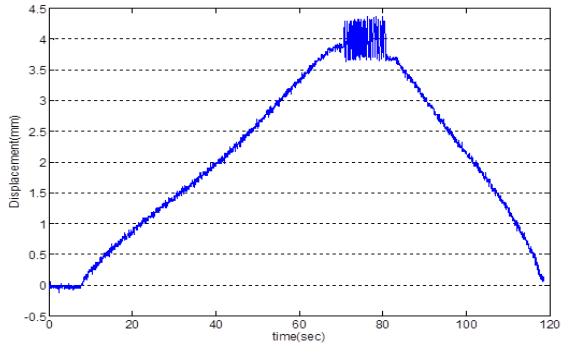
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 시간-하중



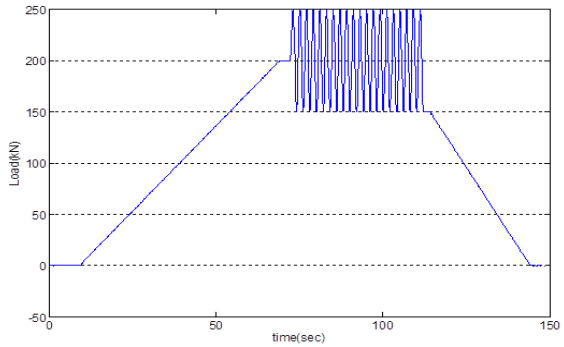
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 시간-변위



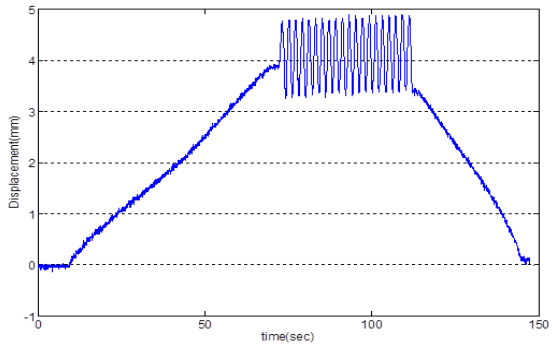
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 시간-하중



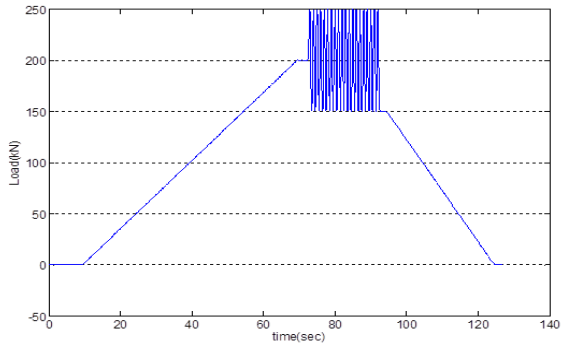
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 시간-변위



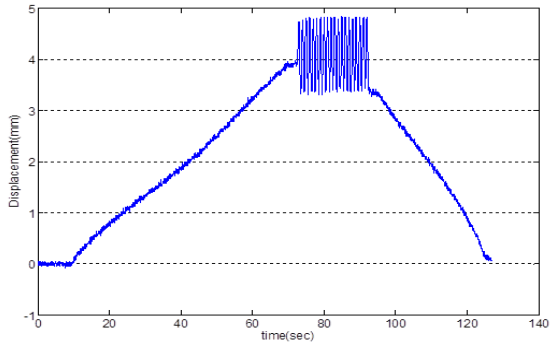
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-하중



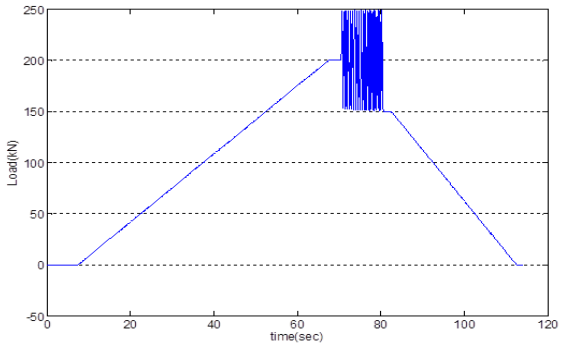
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 시간-변위



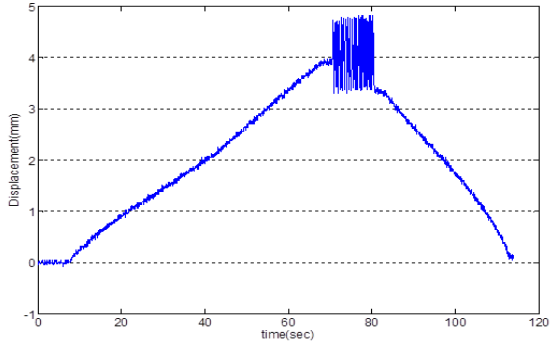
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 시간-하중



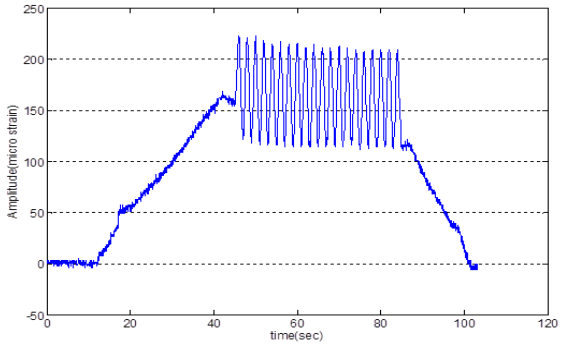
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 시간-변위



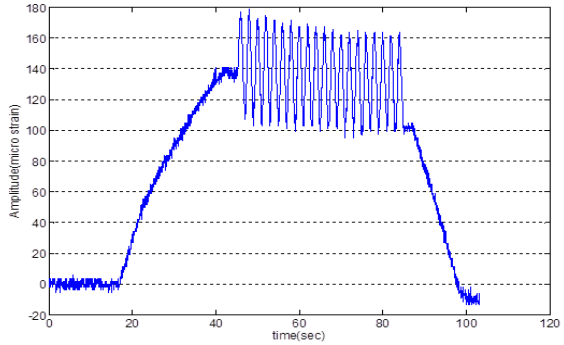
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 시간-하중



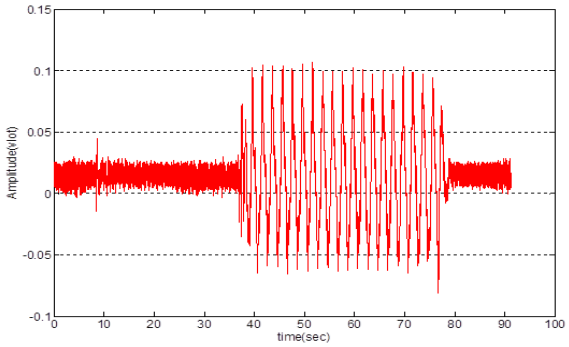
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 시간-변위



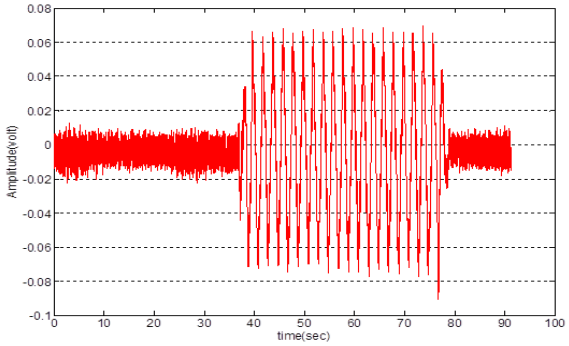
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 변형률



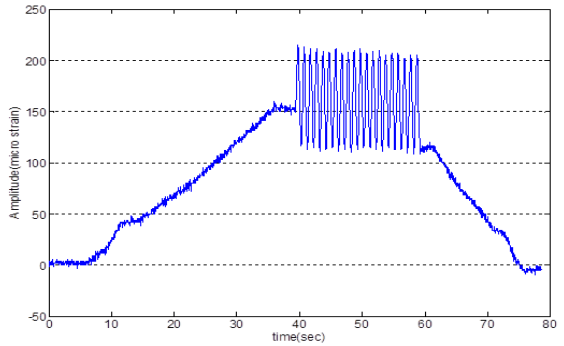
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 변형률



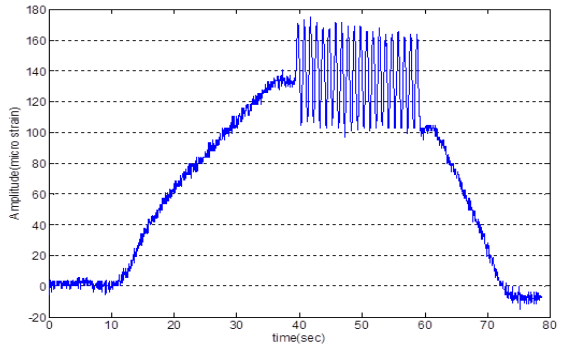
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 전압



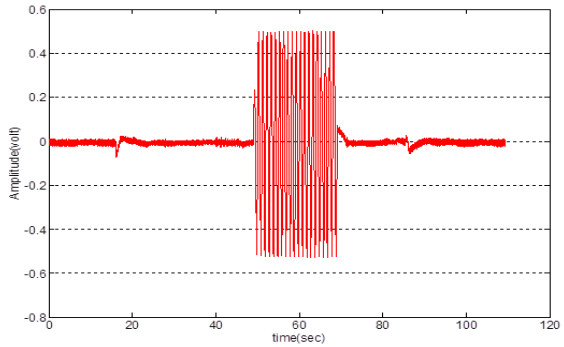
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 전압



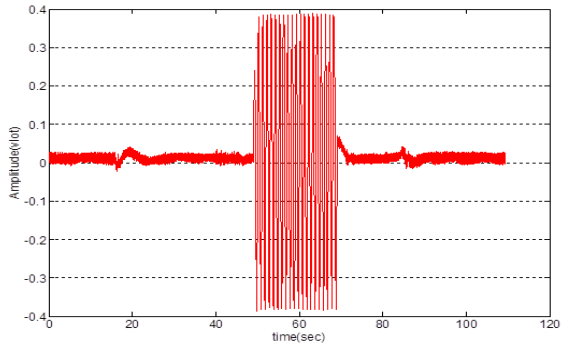
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 우측면 변형률



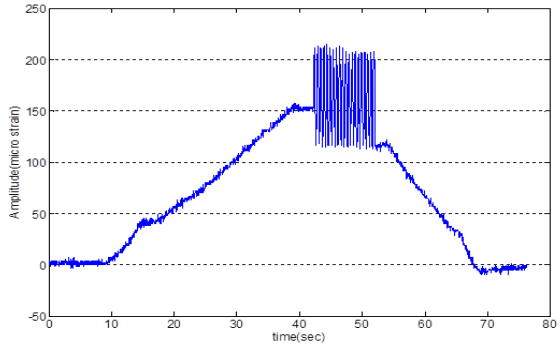
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 변형률



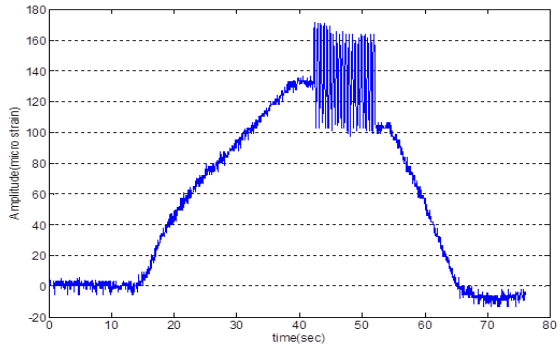
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 우측면 전압



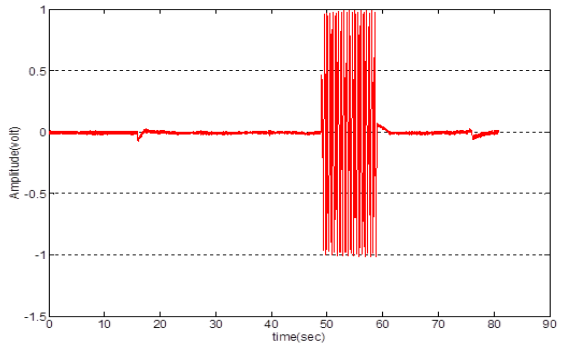
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 전압



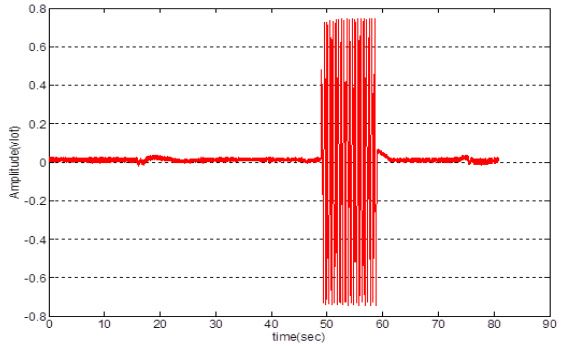
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 우측면 변형률



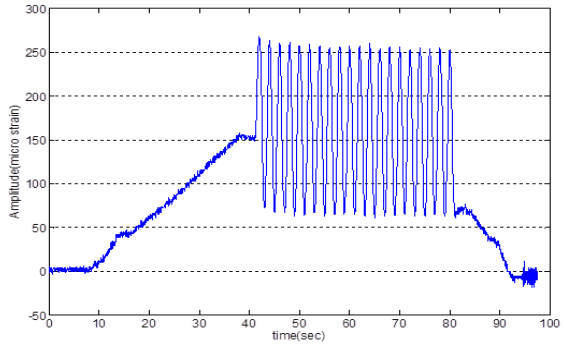
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 변형률



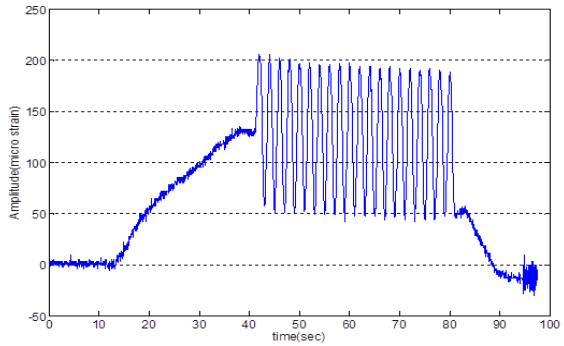
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 우측면 전압



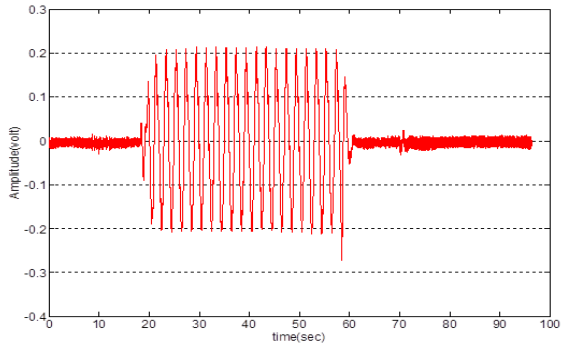
Pre load- 100kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 변형률



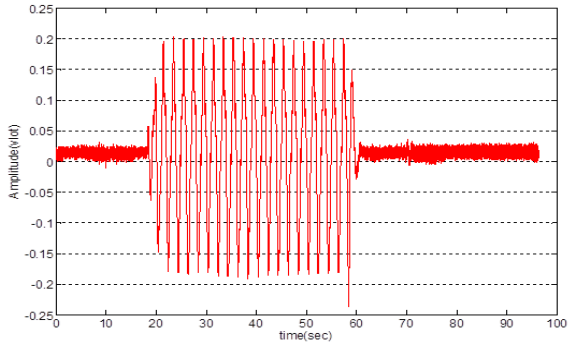
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 변형률



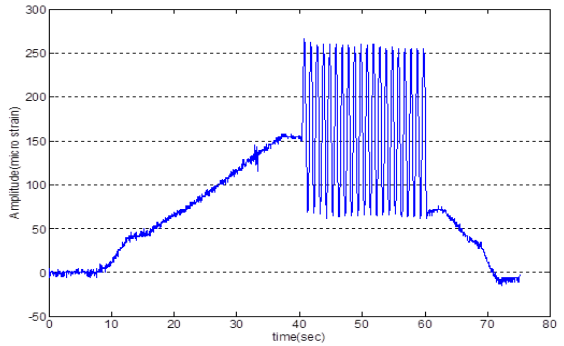
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 변형률



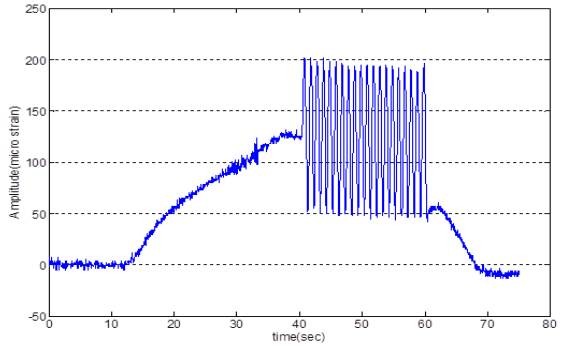
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 전압



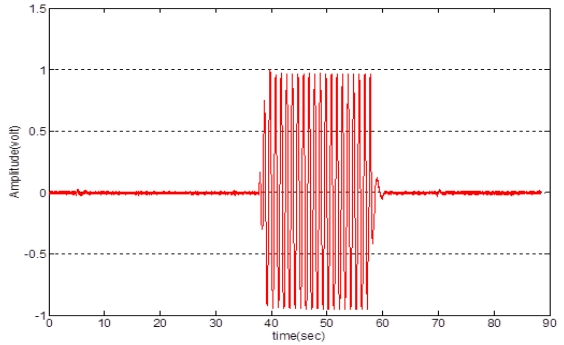
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면



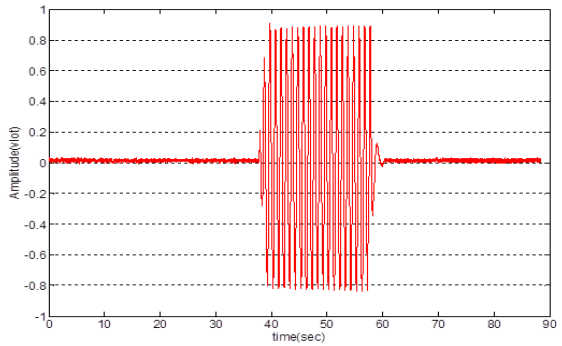
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 우측면 변형률



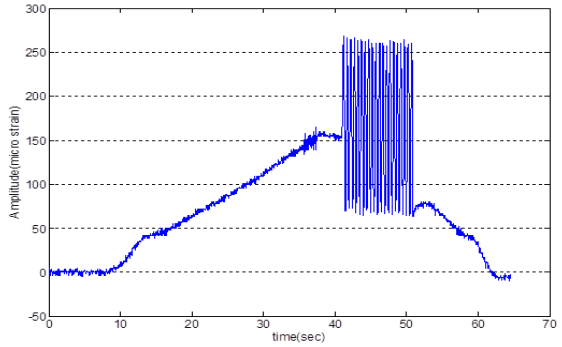
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 변형률



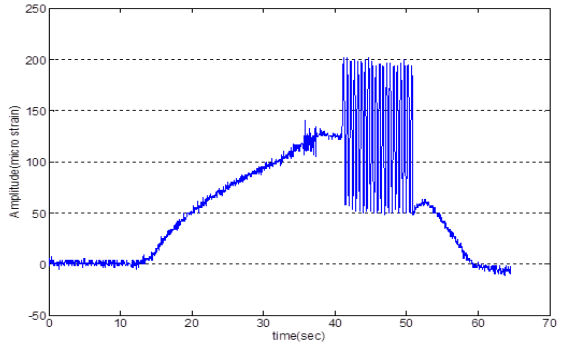
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 우측면 전압



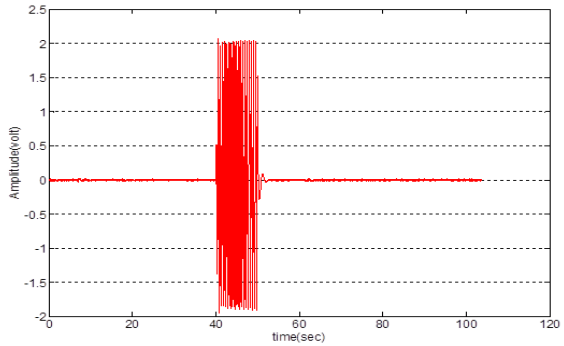
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 전압



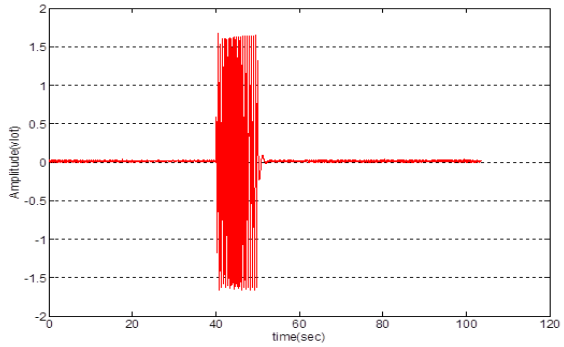
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 우측면 변형률



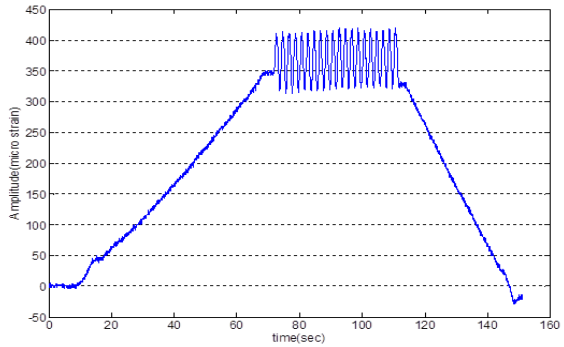
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 변형률



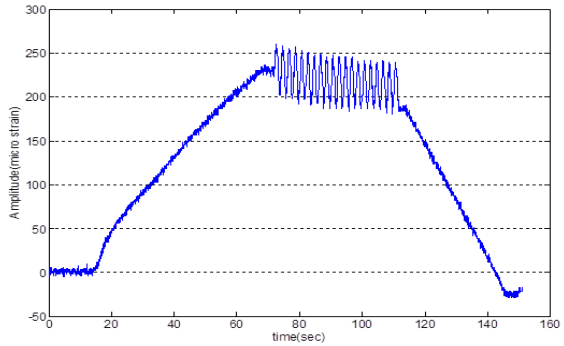
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 우측면 전압



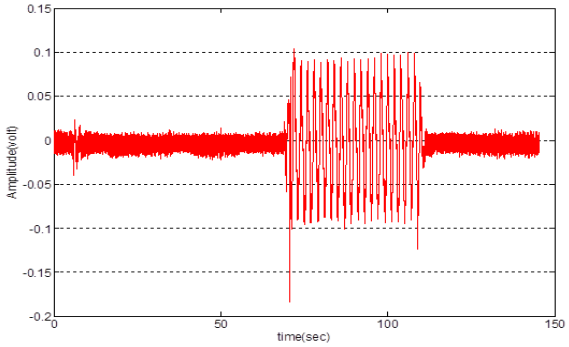
Pre load- 100kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 전압



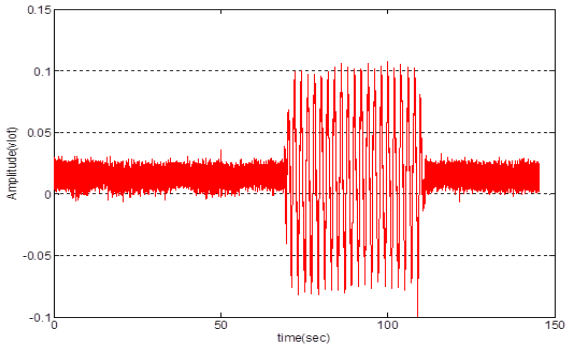
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 변형률



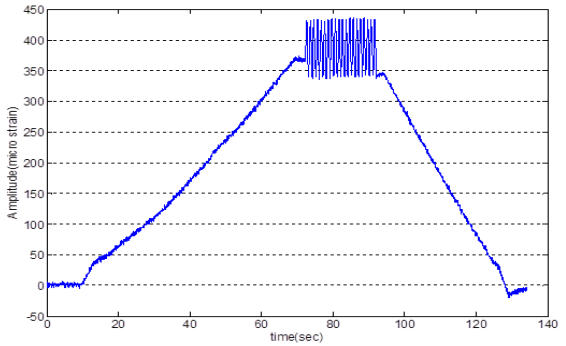
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 변형률



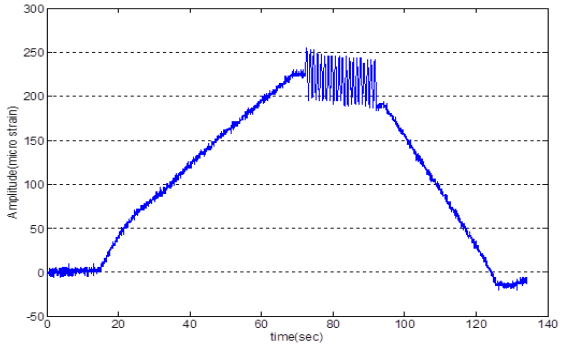
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 전압



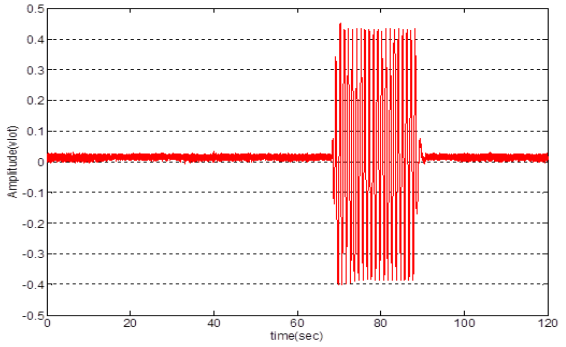
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 전압



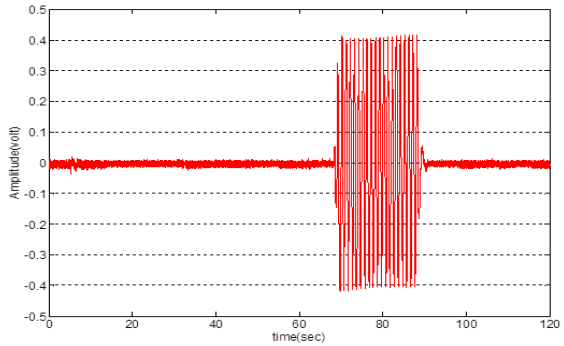
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 우측면 변형률



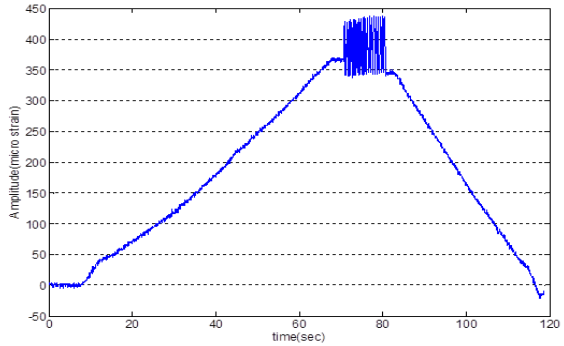
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 변형률



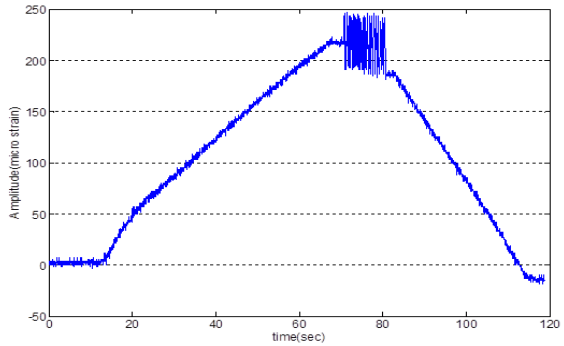
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 우측면 전압



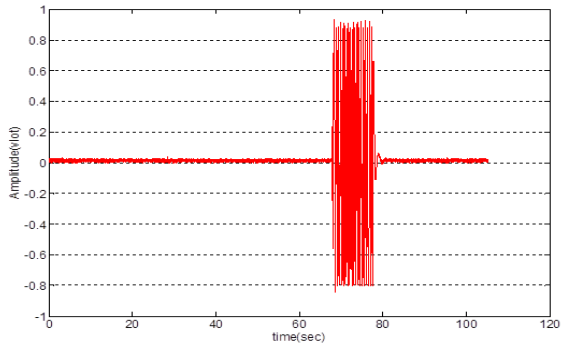
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 전압



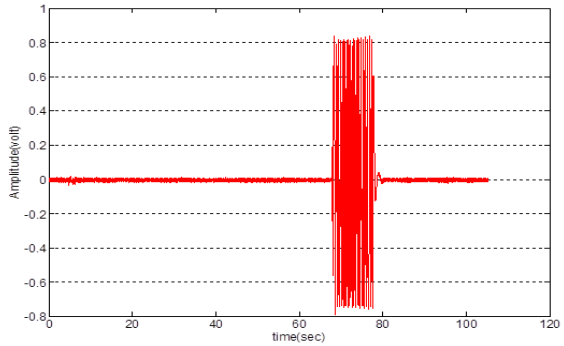
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 우측면 변형률



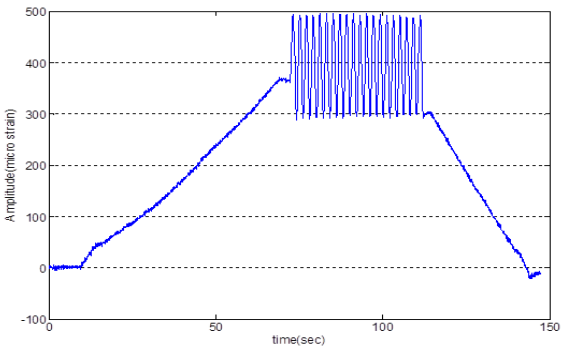
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 변형률



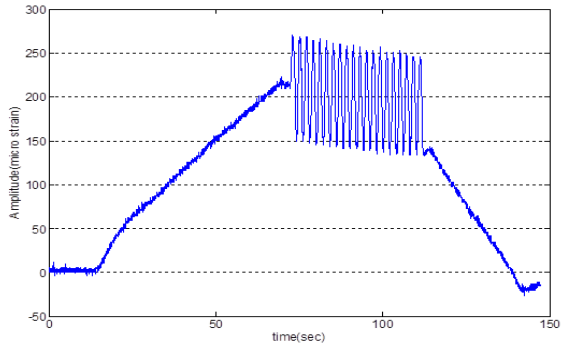
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 우측면 전압



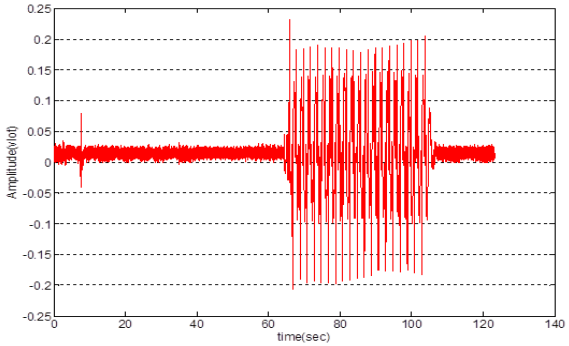
Pre load- 200kN, Cyclic load- 25kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 전압



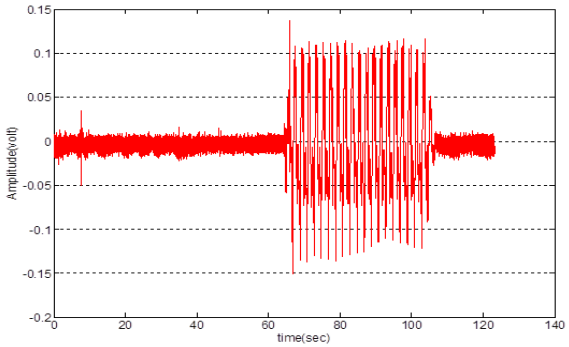
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 변형률



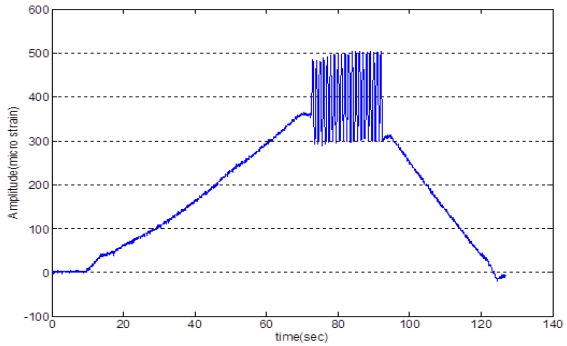
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 변형률



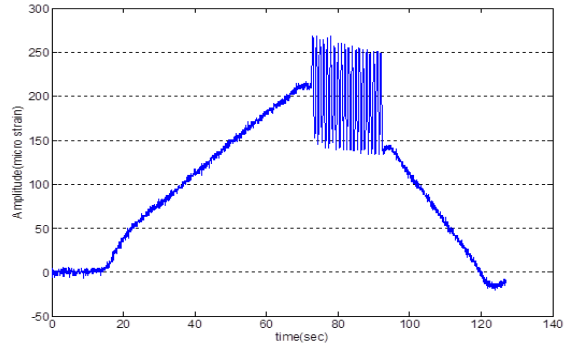
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 우측면 전압



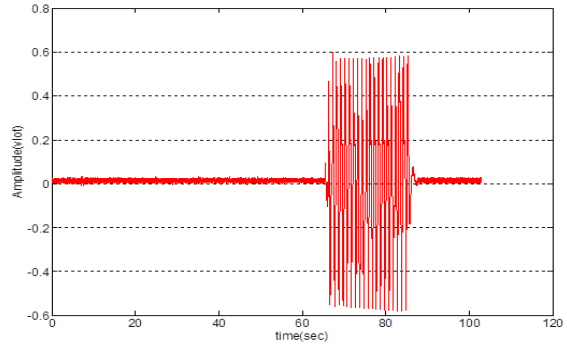
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 0.5 Hz : 좌측면 전압



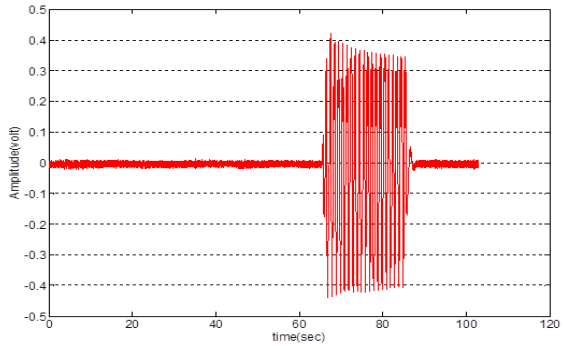
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 우측면 변형률



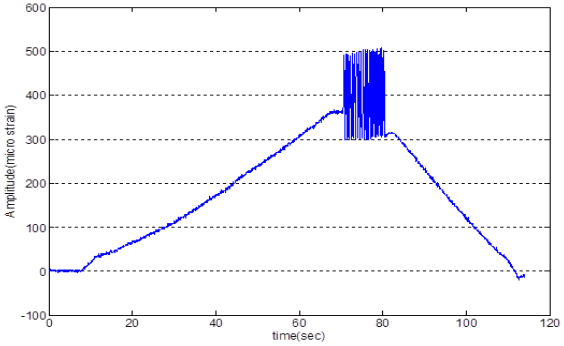
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 좌측면 변형률



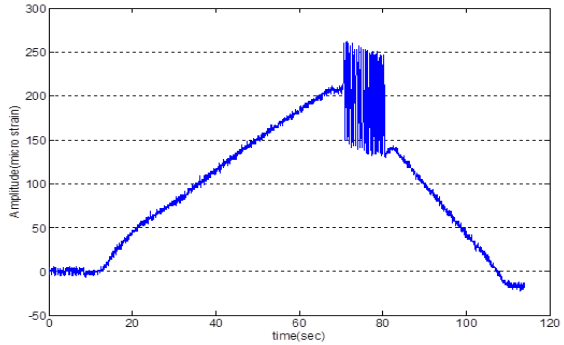
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 우측면 전압



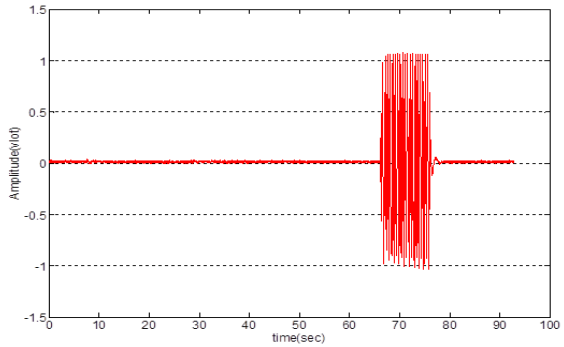
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 1 Hz : 우측면 전압



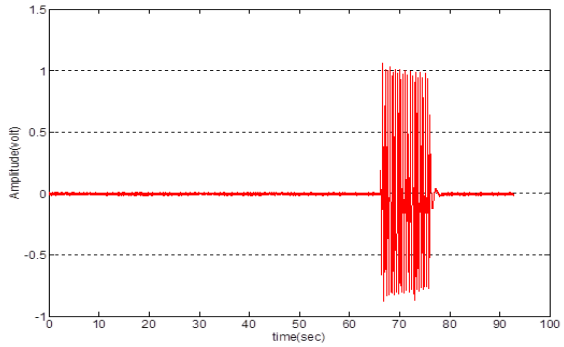
Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 우측면 변형률



Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 변형률



Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 우측면 전압



Pre load- 200kN, Cyclic load- 50kN, Freq- 2 Hz : 좌측면 전압

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절 연구개발목표 달성도

1. 연구개발 수행 진도율

연 구 내 용			추 진 일 정 (월) (2)차년도 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	성과물
주관 - 건국대학교	All-in-1 스마트 댐퍼시스템	감쇠장치 실물제작		
		성능인증기준제시		
		제시한 감쇠장치 성능 검증실험		
		감쇠기-계측 병합 시스템 검증		
		All-in-1 시스템 통합 방법 제시		
		All-in-1 시스템 성능 시험		
위탁 - 부경대학교	IT기반 받침형 내진장치를 이용한 모니터링 시스템 구축	압전센서가 내장된 내진장치의 하중 재하 실험 및 응답 분석		
		하중 추정을 위한 매개변수 추출 및 알고리즘 개발		
		하중 모니터링 시스템 구성 및 모니터링 성능 검증		

연 구 내 용			추 진 일 정 (월) (2)차년도 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	성과물
공동 - 부산대학교	IT기반 받침형 내진장치를 이용한 모니터링 시스템 구축	FBG센서를 기반으로 하는 받침형 내진장치의 설계 및 제작		FBG센서를 기반 교량내진 장치 개발
		FBG센서를 적용한 수직·수평하중 및 변위계측 실험 수행		
		2축 정·동적실험을 통한 IT기반 받침형 내진장치의 변위/반력의 계측실험 수행		
		FBG센서를 기반으로한 반력/변위 계측시스템 구축		
		2축 정·동적실험을 이용한 IT기반 받침형 내진장치 계측시스템 검증		
		성능인증기준 제시		성능인증 기준 제시

당초계획
실 적

2. 연구개발 목표의 달성도

성과목표	성과지표		측정방법	최종 목표치	당해연도 목표치	가중치 (0~1)	실적치
논문	1-1	학술지논문 건수(국내)	논문발표 수	2	2	0.1	2
	1-2	학술회의 발표 논문건수(국내)	논문게재 수	5	3	0.1	6
지식재산권	2-1	특허 출원건수(국내)	출원건수	3	2	0.1	4
	2-2	특허 등록건수(국내)	등록건수	1	1	0.1	-
	2-4	실용신안 출원건수	출원건수	3	2	0.1	-
	2-5	실용신안 등록건수	등록건수	2	1	0.1	-
비용절감효과	10-3	유지보수비용 절감효과	50년 기준 절감비율	20%	20%	0.1	-
지침/매뉴얼	19-1	지침/매뉴얼의 개발 및 보급	지침/매뉴얼 개발 건수	1	1	0.1	2
산학연협력	22-2	산학연 협력 네트워크 구축	산학과의 협력체계 구축건수	2	0	0.1	2
인력양성	29-1	분야별 인력양성 배출 실적	해당사업을 통해 양성된 인력의 전공분야별 배출실적	5	3	0.1	5

학술지 논문

	SCI(E)/일반학술지 구분	논문제목	게제일
부산대	일반학술지 (대한토목학회)	수직변위 계측을 위한 FBG센서 기반 스마트 교량받침의 개발	심사중 (2011. 11)
부경대	일반 학술지 (한국안전학회지)	압전 필름을 이용한 동적 변형률 측정 기법	게제 승인 (출판 예정: 2011년 12월)

학술회의 발표

	학술발표회 명	논문 제목	발표일
건국대	한국지진공학회	유체계 지진보호장치의 개발	2011.9.30
	한국안전학회	Development of a sensor embedded damping system for the control of seismic	2011.10.19
부산대	대한토목학회 정기학술대회	광섬유센서가 적용된 스마트 교량받침의 개발	2011. 11. 04
부경대	한국안전학회 (가을학술대회)	압전 센서가 부착된 교량 받침의 다중 물리 기반 유한 요소 해석	2010. 10. 20
	구조물진단 유지관리공학회 (가을학술대회)	압전 센서가 부착된 교량 받침의 전기-역학 연성 응답 해석	2010. 11. 19
	대한토목학회 (정기학술대회)	압전 PVDF 필름을 이용한 동적 변형률 측정	2011. 11. 4

특허

	구분	출원번호	특허명	출원일
건국대	출원	10-2011-0134182	감쇠력의 향상성을 유지하는 변위센서 내장형 오일댐퍼	2011. 12. 14
	출원	10-2011-0129449	구조물 진동 계측 및 제어를 위한 변위 및 속도 센서 내장형 오일댐퍼	2011.12.06
부산대학교 산학협력단, 주식회사 에스코알티에스	출원	10-2010-0109882	광섬유 브래그 격자 센서 기반 계측장치가 적용된 교량의 받침형 내진장치	2010.11.05
	출원	10-2010-0109891	광섬유 브래그 격자 센서 기반의구조물 변위 계측장치 및 그가 적용된 교량의 받침형 내진장치	2010.11.05

지침 및 매뉴얼

		지침명	비 고
건국대	매뉴얼	스마트 오일댐퍼의 성능시험 및 유지관리 매뉴얼(안)	(주)케이이엔씨
부산대	매뉴얼	FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침의 성능평가 매뉴얼(안)	(주)에스코 알티에스

인력양성 배출 실적

	과정명	졸업자성명	일시
건국대	석사	황병훈	2011-02
	석사	김대현	2012-02
	석사	박영호	2012-02
부산대	석사	박경록	2011-02
부경대	석사	김수민	2012-02

현장적용에 따른 비용절감 건수

	기술명	적용현장명 (예정)	공사기간	시공업체명
부산대	수직하중의 계측이 가능한 스마트 교량내진장치	양산낙동강 교	2011. 08 ~ 2012. 12	포스코건설

사업화, 제품화 건수

	사업화·제품화명	해당업체명	발생일자(예정)

참여기업의 사업화 활동

	홈페이지 게재 및 홍보	해당업체명	발생일자(예정)
	http://www.britec.co.kr/	(주) 케이이엔씨 (주) 브리텍	2011. 11. 30
	http://www.enrtech.co.kr/	(주) 에스코알티에스	2011. 12. 20



그림 4.1 참여기업의 홍보활동

제 2 절 관련분야에의 기여도

○ FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침의 개발을 통하여 시설물 시공단계 및 완공 후 부등침하, 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하여 발생하는 시설물의 구조손상으로부터 야기될 수 있는 사용성문제에 대한 대응이 가능함.

○ FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침을 구현하는 가시적인 혜택은 유지관리의 편의성 및 비용의 감소, 그리고 지속적인 모니터링을 통한 상부구조물의 안전성과 신뢰성의 증가 등을 꾀할 수 있음.

○ 개발된 FBG센서 기반 마찰형 지진격리 스마트 교량받침을 이용하여 시공단계 및 공용중인 교량의 변위 및 반력을 모니터링 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 시공중인 교량상부구조물의 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있음.

○ 개발된 받침형 내진장치를 이용한 하중 및 반력 모니터링시스템과 교량관리시스템(BMS : Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량 유지관리의 최적화 및 비용절감을 도출할 수 있음.

○ 개발한 B-WIM(Bridge Weigh-In-Motion) system을 활용하여 교량의 통과차량을 파악 할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 교량에서 차량에 의한 하중효과는 주로 활하중 및 피로하중으로 나타나게 됨으로 실제 교량에 주행하는 차량의 중량 및 통행특성을 파악할 수 있다면 교량의 유지관리에 효과적일 것임.

○ 구조물의 하중계측 분야에서 PVDF 센서적용은 새로운 시도이며, 센서의 독특한 진동수응답특성과 사후장착이라는 장점을 이용한 다양한 분야에의 적용이 기대된다. 신소재의 센서화라는 관련 분야연구를 통해 미래형 융합센싱기술의 개척에 기여할 수 있음.

○ 현행 교량 받침의 점검은 주기적/단속적으로 실시하여, 이전 점검일 이후의 교량 받침의 상태에 대한 정보는 없고 점검일 현재와 이전 점검일의 자료만을 확보하고 있기 때문에, 점검일 현재를 기준으로 교량 받침에 문제점이 있다고 판단된 경우, 이러한 문제점의 원인이 무엇인지를 파악하기가 어려우며, 따라서 보수/보강을 실시한다고 하더라도 추후에 동일한 문제점이 재발될 여지가 있다는 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는, 교량 받침의 상태를 연속적으로 측정하고 이를 Database로 구축하여 교량 받침의 상태 평가와 보수/보강에 지속적으로 활용하여야 한다. 특히, 교량 받침의 상태에 대한 Database를 구축하기 위해서는 공용중인 교량 받침에 작용하는 하중 이력이나 변형/변위 이력 등과 같은 물리적인 정보를 연속적으로 획득하고 저장할 수 있는 모니터링 시스템이 필수적이며, 본 연구를 통하여 교량 받침의 하중을 연속적으로 모니터링하는 시스템이 개발되면, 교량 받침 뿐만 아니라 교량의 유지 관리를 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

○ 교량 받침에 작용하는 하중을 모니터링할 수 있는 시스템의 개발에는, 교량 받침의 거동 특성 분석 기술, 센서 기술, 계측 기술 및 계측 데이터 처리 및 분석 기술 등과 같은 고도의 기술이 필요하다. 따라서, 본 연구를 통하여 교량 받침 거동 특성 해석 분야, 센서 모델링 및 해석 기술 분야, 계측 및 분석 기술 분야의 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

○ 교량받침의 이동량을 알 수 있다면 교량받침의 수명을 예측하여 효과적인 교량받침의 유지관리에 이용할 수 있다. 이동단 교량받침의 열화에 따른 PTFE 불소수지판의 마찰계수 변화에 따라 상시와 지진시 모두 교각의 하부응력이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 교량의 장수명화를 위하여 이동단 교량받침의 변위와 마찰계수를 확인하여 열화정도를 파악하는 것이 필요하다.

○ 센서노드를 이용한 무선계측시스템의 옥외폭로시험과 성능시험으로 무선계측시스템이 실제 현장에 설치되어 동적 변위계에서 계측한 신호를 컴퓨터로 전송하여 상시 계측이 가능함을 확인하였다. 스마트 내진장치는 교량의 거동을 모니터링함으로서 교량과 교량부속장치의 유지관리 능력을 향상시킬 수 있다. 지진 시에는 교량의 동적 거동을 파악하여 발전된 정밀 동해석기법 개발을 위한 자료를 제공할 것으로 기대된다. 또한 스마트 내진장치는 내진설계가 적용되어 있지 않은 교량의 내진성능을 향상 시킬 수 있다.

○ 수직하중 및 수평변위의 계측이 가능한 IT기반 받침형 스마트 내진장치의 개발을 통하여 교량의 완공 후 부등침하 및 시공오차 등 여러 요인으로 받침에 설계와는 다른 하중이 작용하여 발생하는 시설물의 구조손상을 미연에 방지 할 수 있음.

○ 개발된 받침형 내진장치를 이용하여 시공단계 및 공용중인 교량의 변위 및 반력을 모니터링 할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 시공중인 교량상부구조물의 안정성과 신뢰성을 확보할 수 있음.

○ 개발된 받침형 내진장치를 이용한 하중 및 반력 모니터링시스템과 교량관리시스템(BMS : Bridge Maintenance System)과 연계하여 교량 유지관리의 최적화 및 비용절감을 도출할 수 있음.

○ 교량 받침의 하중 모니터링 시스템 개발을 통하여, 교량 받침과 교량의 유지 관리에 효과적으로 활용하기 위해서는, 교량 받침의 상태 및 성능 평가 기술이 확립되어야 한다. 따라서 극한상태 실험환경에서의 장기노출시험 및 실환경 적용 시 시스템 거동 분석과 하중 모니터링 시스템을 실교량에 적용하여 하중을 계측하는 장기 계측에 관한 연구가 필요하며, 장기 계측 결과를 교량 받침의 상태 평가에 적용하는 기술에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

○ 압전 센서를 이용한 교량 받침의 하중 모니터링 시스템 개발에 관한 연구를 통하여 획득할 수 있는 주요 기술은 “압전센서 모델링 및 해석 기술”, “교량 받침의 하중 응답 특성 분석 기술”, “압전센서 설계 및 활용 기술”이다. 따라서 본 연구를 통하여 교량 받침의 하중 모니터링 시스템이 개발되면, 교량 받침의 유지 관리에 직접적으로 활용할 수 있을 뿐만 아니라, 최근에 많은 연구/개발이 이루어지고 있는 스마트 센서를 이용한 구조물 건전성 모니터링 분야의 연구에도 활용이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 압전센서는 역학적 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있기 때문에, 교량 진동을 이용한 에너지 하베스팅 기술 개발에도 직접적으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

해당 없음

제7장 참고문헌

건설교통부, (2006) 도로업무편람.

건설교통부, (2005) 건설교통통계연보.

고현무, 하동호, 옥승용, 이선영, 류효선 (2005), '중약진지역 특성을 고려한 실규모 지진격리교량의 동적실험', 대한토목학회 논문집, 제25권 6-A호, pp. 1043-1051.

국토해양부 (2010), '도로업무편람'.

국토해양부 (2007), '도로업무편람'.

김대현 (2009), '구조 건전성 모니터링을 위한 광섬유 브래그 격자 센서와 차동법을 적용한 로드셀 개발', 비파괴검사학회지, Vol. 29, No. 4, pp. 229-307.

김대현 (2012), '압전소자를 이용한 차량하중 계측방법 연구', 건국대학교 토목공학과 석사학위논문 (2012년 2월 졸업예정).

김세창, 전정현, 교량교좌장치분야 특허동향보고서, 한국특허정보원, KP105-01-003.

김영진, 조정래, 박성용, 김병석, 유문식 (2002), '고기능성 교좌 장치 개발 Ⅱ : 승강식 받침', 대한토목학회 학술대회논문집, pp. 384-387.

김용희 (2002), '교량용 교좌장치의 특허동향', 한국특허정보원.

김효범, 정길영, 음성우, 박종찬 (1999), 'PTFE 미끄럼받침을 적용한 지진격리교량의 해석적 연구' 대한토목학회 논문집 제19권 1-2호, pp. 149-159.

대한토목학회 (2008), '도로교설계기준 해설'.

(주)마이다스아이티, 'Midas Civil 2009 Index'.

박민석, 이정휘, 김성곤, 조병완 (2006) 'BWIM 시스템을 사용한 사장교의 차량하중 분석', Vol. 10, No. 6, pp. 1-8.

박영호 (2012), '교량 장수명화를 위한 스마트 내진장치의 적용', 건국대학교 토목공학과 석사학위논문 (2012년 2월 졸업예정).

박원석 (2011), '오일댐퍼의 설계', IT기반 스마트 교량내진장치 개발 자문보고서.

유니슨이엔씨 (2009), '교량받침 설명자료'.

이계희, 유상배, 하동호 (2010), '마찰받침이 있는 지진격리교량의 최적설계', 대한토목학회 논문집 30권 5A호, pp. 339-406.

이상배, 박종근 (1991), 회로이론, 희중당.

이재욱, 오주, 박진영, 이완하, 김기만 (2010), '면진형 디스크 받침의 따른 종류에 따른 특성비교', 2010 대한 토목학회 학술대회 발표자료.

전귀현 (1994), '가동받침 마찰을 고려한 다경간 연속교의 내진 해석 가동받침 마찰을 고

려한 다경간 연속교의 내진 해석', 대한토목학회 논문집 제14권 1호, pp. 63-70.

전문건설협회 (2002~2006), 전문건설업 통계연보.

정지원 (2009), '지진격리교량의 온도의존성을 고려한 최적설계연구', 건국대학교 토목공학과 석사학위논문.

조병완, 서석구, 태기호, 운영한 (2002), '점성유체감쇠기를 이용한 연속교량의 내진성능', 대한토목학회 학술대회 발표자료.

조정래, 김영진, 박성용, 김병석, 이준일 (2002), '고기능성 교좌 장치 개발 I : 하중계측용 받침', 대한토목학회 학술대회논문집, pp. 380-383.

조재용, 신수봉, 최광규 (2005), '가속도 계측데이터를 이용하는 BWIM 개발', 2005 대한토목학회 정기학술대회, pp. 635-638.

진법규, 장성진, 박경록, 김남식, 정득영 (2011) '원추형 마찰진자베어링의 내진성능평가', 한국지진공학회 논문집 제15권 2호 (통권78호), pp. 23-33.

하동호, 고현무 (2000), '마찰받침을 가진 지진격리교량의 지진응답 특성', 대한토목학회 논문집 20권 6-A호, pp. 11-20.

하동호, 박관순, 박원석, 편무욱, (2007), '복합감쇠기를 이용한 장대교량의 내진성능향상', 한국지진공학회 논문집 제11권 제3호 (통권 제55호), pp. 53-62.

한국건설교통기술평가원 (2010), '장수명교량 부속시물의 개발 보고서'.

한국도로공사 (1993), 교좌장치에 관한 연구.

한국시설안전기술공단 (2009), 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 : 교량편, 국토해양부.

한국시설안전기술공단 (2003), 교량받침의 평가기준에 관한 연구 (II),

한국시설안전공단 (2011), '기술자료-교량'.

황병훈 (2011), '지진격리받침의 온도의존성을 고려한 원자력발전소 격납구조물의 내진 성능에 대한 연구', 건국대학교 토목공학과 석사학위논문.

황의승, 배두병, 정경섭, 조재병,(1999) BWIM시스템을 이용한 중차량의 통행특성 분석, 한국강구조학회논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 223-232.

Agrawal, A.K., Subramaniam, K. and Pan, Y., (2005) 'Development of Smart Bridge Bearing System - A Feasibility Study', Final Report on Project # C-02-02, NYDOT, USA.

Ansari, F. ed., (2005) 'Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring', Springer, USA.

ANSYS Inc., (2009) Coupled Field Analysis Guide (ANSYS User Guide Series), USA.

Arnau, A., (2003) 'Piezoelectric Transducers and Applications, Springer', USA.

Caussignac, J.M., Barbachi, M. and Chabert, A., (1996) 'Bridge Bearings Equipped with Optical Fiber Sensor for Monitoring Vertical Load Through the Support', Proceedings of SPIE, Vol. 2719, pp. 220-228.

Eggert, H. and Kauschke, W., (2002) 'Structural Bearings', Ernst & Sohn Verlag, Germany.

Fleck, N.A., (1983) Some aspects of clip gauge design, Strain, Vol. 19, No. 1, pp. 17-22.

Ghosh, A.K., Maji, A., and Dasgupta, D., (2003) 'Smart Inspection Unit for NAFTA Trucking Problem', Technical Report to the New Mexico State Highway and Transportation Department, USA.

Glaser, S.D., Ming, H.L., Wang, L., Ou, J. and Lynch, J., (2007) 'Sensor technology innovation for the advancement of structural health monitoring: a strategic program of US-China research for the next decade', Smart Structures and Systems, Vol. 3(2), pp. 221-244.

Jacob, B., Feypell-de La Beaumelle, V. (2011) 'Improving truck safety: Potential of weigh-in-motion technology', IATSS Research, Vol. 34, No. 1, pp. 9-15.

Lahtinen, R., Muukkonen, T., Koskinen, J., Hannula, S. and Heczko, O., (2007) 'A piezopaint-based sensor for monitoring structure dynamics', Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp. 2571-2576.

Law, S.S., Chan, T.H.T., Zeng, Q.H., (1997) 'Moving Force Identification: A Time Domain Method', Journal of Sound and Vibration, Vol. 201, No. 1, pp. 1-22.

Lee, D.J., (1994) 'Bridge bearings and Expansion Joint', E & FN SPON.

Moses, F., (1979) 'Weigh-In-motion System Using Instrumented Bridge', Transportation Engineering Journal, ASCE, Vol. 105, TE 3, pp. 233-249.

Nims, D.K., Subramaniam, K., Parvin, A. and Aktan, A.E., (1996) 'The Potential for the Use of Elastomeric Bearings in an Intelligent Bridge System', Transportation Research Board 75th Annual Meeting, Washington D.C., USA.

Paul, R.C., (2001), 'Fundamentals of Electric Circuit Analysis', John Wiley & Sons, NY, USA.

Schulz, W.L., Udd, E., Seim, J.M. and McGill, G.E., (1998) 'Advanced Fiber Grating Strain Sensor Systems for Bridges, Structures, and Highways," Proceedings of SPIE, Vol. 3325, pp. 212-216.

Shin, S.W., Qureshi, A.R., Lee, J.Y. and Yun, C.B., (2008) 'Piezoelectric sensor-based nondestructive active monitoring of strength gain in concrete',

Smart Materials and Structures, Vol. 17 (5), 055002.

Sirohi, J. and Chopra, I., (2001) 'Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors', Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 11, pp. 246-257.

Specifications of Piezoelectric Film Sheet, Measurement Specialties Inc., USA (http://www.meas-spec.com).

Subramaniam, K.V., (1995) 'Feasibility of Using Instrumented Elastomeric Bearings for Bridge Monitoring and Condition Assessment', M.S. Thesis, University of Toledo.

Udd, E., Schulz, W.L., Seim, J.M., Corona-Bittick, K., Dorr, J., Slattery, K. T., Laylor, H.M., and McGill, G.E., (1999) 'Fiber optic smart bearing load structure', Proceedings of SPIE, Vol. 3587, pp. 40-48.

Worden, K., Bullough, B. and Haywood, J., (2003) 'Smart Technologies', World Scientific Publishing, UK.

Yang, J., (2005) 'An Introduction to the Theory of Piezoelectricity', Springer, USA.

Yang, J., (2006a) 'The Mechanics of Piezoelectric Structures', World Scientific Publishing, Singapore.

Yang, J., (2006b) 'Analysis of Piezoelectric Devices', World Scientific Publishing, Singapore.

Zhang, H., Galea, S.C., Chiu, W.K., and Lam, Y.C., (1993) 'An Investigation of Thin PVDF Films as Fluctuating-Strain-Measuring and Damage-Monitoring Devices', Smart Materials and Structures, Vol.2, pp. 208-216.