

[별지 14] 최종보고서 표준서식

최종보고서·요약서

I. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm * 세로297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
 - 가. 표지 200g/m² 양면 아트지
 - 나. 내용 80g/m² 모조지
4. 인쇄방법
 - 가. 표지 : 바탕 백색,활자 흑색
 - 나. 내용 : 흑색 지정활자

II. 편집순서

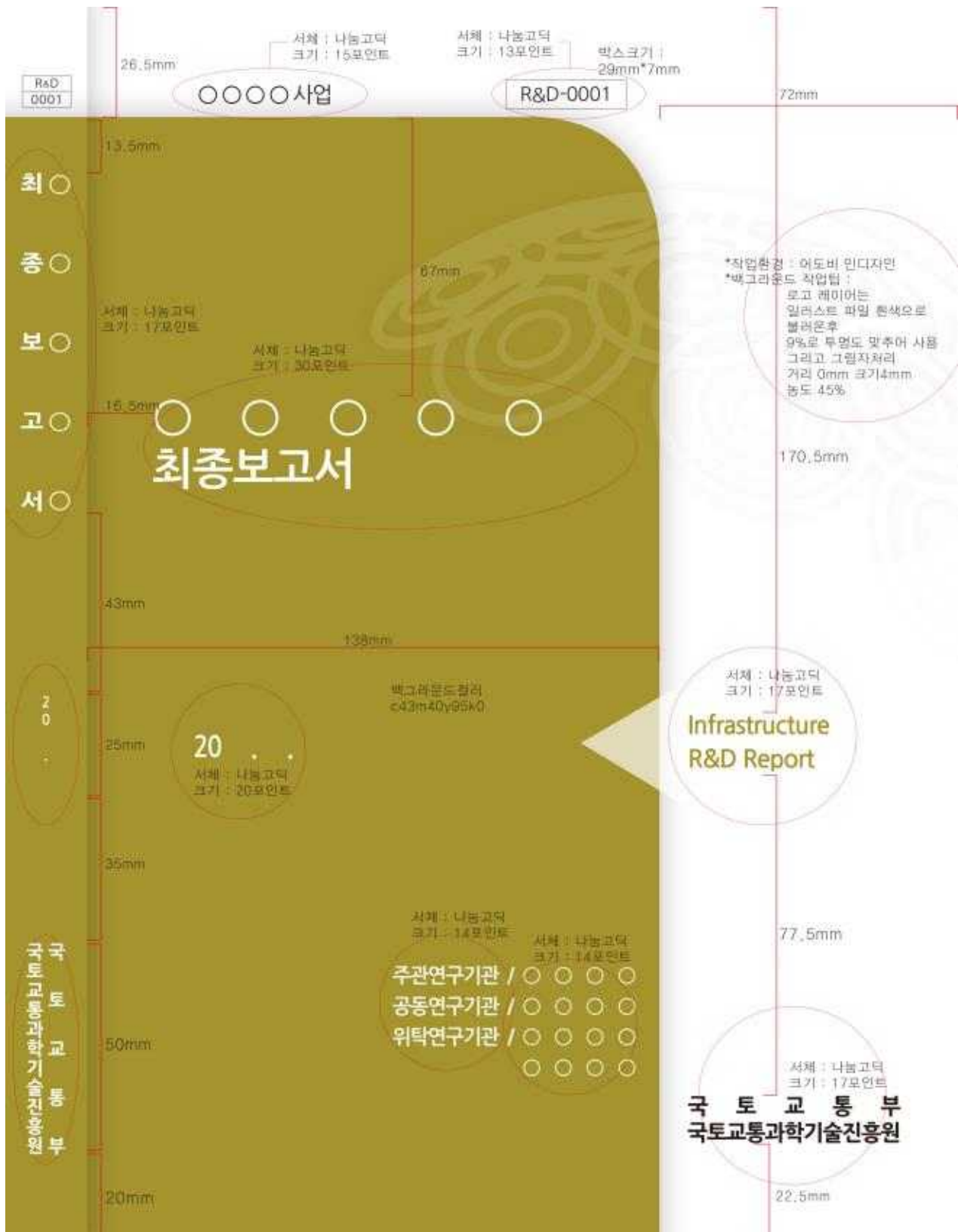
1. 표지
2. 제출문
3. 보고서 요약서
4. 요약문
5. 영문 요약서
6. 영문 목차
7. 목차
8. 본문
9. 뒷면지

III. 참고사항

전자조판 인쇄 시에는 이에 준한다.

IV. 편집순서별 서식

1. 표지



73mm

서체 : 나눔고딕
크기 : 10포인트

서체 : 나눔고딕
크기 : 12.5포인트

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 "압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 11. 17

주관연구기관명 : 건국대학교

주관연구책임자 : 하동호

연구원 : 구남서

" : 추프랑쵸

보고서 요약서

과제고유번호	11CCTI-C 061543-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2011.12.23.~ 2013.12.22.	단 계 구 분	
연 구 사 업 명	건설기술혁신사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	압전소자를 이용한 하중계측기능과 발전기능을 가진 교량 받침의 개발			
	단위과제명				
연 구 책 임 자	하동호	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 15 명 내부 : 12명 외부 : 3명	총연 구비	정부: 300,000 천원 기업: 107,000 천원 계: 407,000 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	건국대학교		참여기업명	(주)브리텍	
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약				보고서면수	
(1) 압전-복합재료 발전소자의 설계 및 제작 - 다양한 형태의 압전-복합재료 발전 소자를 제작하여 성능 비교 (2) d ₃₃ 모드 압전-복합재료 소자의 내구성 시험 - 모터 구동 레버 시스템설계 및 압전-복합재료 소자의 성능의 내구성 시험 (3) 하중에 따른 PCGE의 발생전압 측정 실험 - PCGE가 내장된 축소교량 받침 등을 이용한 다양한 실험을 수행 및 면압-발전량 상관관계 분석 (4) 에너지 신호회로 - 에너지저장회로 설계 및 LED작동 시뮬레이션 실시 (5) BWIM System 검증 - 교량 받침 반력을 이용한 중차량의 하중계측 시스템의 검증					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	교량 받침, 압전소자, 하중계측, 신재생에너지, 사회기반시설			
	영 어	bridge bearing, PZT, load measurement, renewable energy, infrastructure			

요 약 문

I. 제 목

압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 개발

II. 연구개발과제 개요

압전소자의 내구성과 발전효율성을 향상시키고, 이를 적용한 교량 받침 개발을 통해 고기능성 받침을 만들 수 있으며, 특히 기존 받침의 설계변경없이 효율적으로 연구 성과를 적용할 수 있음.

개발된 교량 받침은 하중계측기능을 포함하여 과적차량의 실시간 단속에 사용가능하고, 차량주행 시 신재생에너지 생산이 가능

교량구조물의 유지관리 효율성을 향상시켜, 사회기반시설의 장수명화에도 기여하고, 정부의 녹색성장 신재생에너지 정책에 부합되는 기술임

III. 연구개발 수행내용 및 결과

(1) 압전-복합재료 발전소자의 설계 및 제작

- 다양한 압전-복합재료 발전소자를 제작하여 성능 비교
- 압전-복합재료 발전 소자의 성형 잔류 응력 해석
- 발전 소자 상수의 실험적 연구
- 압전-복합재료 발전 소자의 성능 실험 및 일률 계산

(2) d₃₃ 모드 압전-복합재료 소자의 내구성 시험

- 모터 구동 레버 시스템설계
- 압전-복합재료 소자의 성능의 내구성 시험

(3) 하중에 따른 PCGE의 발생전압 측정 실험

- 충격시험을 진행하여 PCGE의 발전량 확인
- PCGE가 포트받침에 내장된 상태를 모사하여 고정하중이 작용하고 있는 상태에서 충격하중과 발전량의 상관관계를 확인
- PCGE가 내장된 교량 받침의 축소모형을 제작하여 실제 차량하중을 모사하여 동적 실험을 수행하여 면압-발전량 상관관계 분석
- PCGE가 내장된 포트받침 실험시험체를 제작하여 실제 차량하중을 모사하여 동적 실험을 수행하여 면압-발전량 상관관계 분석

(4) 에너지 신호회로

- PCGE 발전시스템의 전기적인 해석을 위해서 PCGE 변환기의 전기적 모델링을 수행
- PCGE의 출력 특성 시험 및 실험에 기초한 PCGE의 전기적 모델링
- 에너지저장회로 설계 및 LED작동 시뮬레이션 실시

- 트랜지스터의 스위치 기능을 이용한 전기에너지 신호회로 구성

(5) BWIM System 검증

- 단순보, 강합성 연속보 대상으로 이동하중의 속도변화에 따른 동적응답을 분석
- 단순보, 강합성 연속보 대상으로 유한요소해석을 통한 시스템 검증
- 개발된 교량 받침이 실제교량에 적용된 경우 교량상을 통과하는 중차량의 하중계측에 이용가능성 타진

IV. 최종 연구 성과 및 적용실적

- 전기에너지 신호회로 시스템구성 도면 작성
- PCGE를 이용한 발전회로 시뮬레이션 실시
- PCGE를 이용한 교량 받침 제작 및 성능시험
- 전기에너지 신호회로 구성
- PCGE의 발전 성능 시험 및 PCGE의 내구성 시험
- BWIM System 검증

V. 연구목표 달성 및 효과

이론적 실험적 연구로 통해 고내구성 압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 실현가능성을 확인하였고, 연구 성과물을 이용하여 새로운 BWIM System의 구축 및 교량구조물의 장수명화에 기여할 수 있음. 차량하중을 이용한 발생 에너지를 축전하여 이용할 수 있음을 확인하고, 발생하는 전기에너지는 현재까지 전혀 사용되지 않았던 차량하중을 신재생 에너지로 활용 가능하리라 판단됨.

VI. 연구 성과 활용계획

범정부적인 녹색산업 지원책에 부응한 기술 개발로 정부의 적극적 적용지원과 도로 공사 및 지자체 등에의 홍보 및 활용방안 논의. 교량모니터링 시스템과 연계하여 계측용 교량 받침 설계에 반영 가능하고, 노후 교량 받침 교체 시 완전한 대체가 가능함. 전원확보가 곤란한 지역이나 오지에서 안전관련장치(조명, CCTV 등)의 전원공급을 위한 신재생에너지원 제공 가능. 실구조물을 이용한 차후 연구를 통하여 성능 검증 및 향상 노력과 각 부분의 연구 성과를 일체화하고 제품화하는 지속적 노력의 필요.

SUMMARY

I. Title

Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material

II. Summary of R&D

A multi-functional bridge bearing can be achieved through the application of a piezoelectric element, of which durability and power-generating efficiency have been improved, to conventional bridge bearing without modifying the design of the bearing.

Apart from its original purpose, the developed bridge bearing can be exploited additionally (1) for real-time monitoring of overloaded vehicles by means of its load measuring function; (2) for the generation of electric power by means of energy harvesting function using traffic load.

This new bearing will help to enhance the maintenance and monitoring of the bridge structure in compliance with the Green Energy Development Policy of the Korean Government.

III. Contents and result of R&D

- (1) Design and manufacture of piezocomposite energy-generating element(PCGE)
- (2) Durability test of d_{33} mode PCGE
- (3) Measurement test of the output voltage of PCGE with respect to applied live load
- (4) Design of energy storage circuit for PCGE
- (5) Survey of state-of-the-art of BWIM and investigation of the applicability of the proposed bearing as BWIM System

IV. Achievements of R&D

- Switch System Design
- Circuit simulation using PCGE
- Fabrication and performance test of Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element
- performance test and Durability test of PCGE
- Evaluation of BWIM System

V. Results of R&D

- Theoretical and experimental verification of the feasibility of load measurement and energy harvesting efficiency of the bridge bearing with built-in PCGE
- Feasibility of a new BWIM System using the bridge bearing with built-in PCGE
- Feasibility of the exploitability of the energy generated by the bridge bearing with built-in PCGE using appropriately designed energy storage circuit
- Feasibility of the exploitation of traffic load as new energy source

VI. Prospects for the application of R&D outcomes

- Advertising of the new bridge bearing to related organizations (Korea Expressway Corporation, local authorities) and support of central government for future applications in the framework of the Green Energy Development Policy.
- Future connection with Structural Health Monitoring Systems of bridge structures
- Attractive product to replace degraded bridge bearings
- Supply of electric power to safety-related devices (lighting, CCTV, etc.) in remote areas

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
1.1 Summary of R&D	1
1.2 Necessity of R&D	2
 Chapter 2. Contents and results of R&D	9
2.1 Design and Manufacture of PCGE	10
2.2 Durability test of d_{33} mode PCGE	25
2.3 Loading test of PCGE	37
2.4 Energy Storage Circuit	90
2.5 Evaluation of BWIM System	102
2.6 Conclusions	132
 Chapter 3. Contents and result of R&D	133
 Chapter 4. Results of R&D	136
 Chapter 5. Prospects for the application of R&D	138
 References	140
 Appendix	143

목 차

제1장 연구개발과제의 개요	1
제1절 연구개발 개요	1
제2절 연구개발 중요성	2
제2장 연구개발수행 내용 및 결과	9
제1절 압전-복합재료 발전소자의 설계 및 제작	10
제2절 d_{33} 모드 압전-복합재료 소자의 내구성 시험	25
제3절 PCGE 하중재하별 발생전압 측정 실험	37
제4절 에너지 신호회로	90
제5절 BWIM System 검증	102
제6절 결론	132
제3장 최종 연구 성과 및 적용실적	133
제4장 연구목표 달성 및 효과	136
제1절 연구목표 및 내용	136
제2절 연구개발 목표의 달성도	137
제5장 연구 성과의 활용 및 추가연구 필요성	138
제1절 연구결과의 활용방안	138
제2절 추가연구 필요성	139
참고문헌	140
부록	143

표 목 차

표 1.1 연도별 교량 수 및 연장 증가 추이 [국토해양부, 2007]	4
표 2.1.1 미국 CTS 사의 3203HD의 물성치	11
표 2.1.2 압전-복합재료 발전 소자를 구성하는 재료의 물성치	16
표 2.1.3 PZT층의 평균 잔류 응력	16
표 2.1.4 유효 압전 상수 와 유효 전압상수 계산 결과	17
표 2.1.5 실험 조건	19
표 2.1.6 이론적 계산 결과와 실험 결과	22
표 2.1.7 출력전압과 평균 일률	23
표 2.2.1 모터 구동 레버 시스템의 변수들	27
표 2.2.2 ADAMS 해석 조건	29
표 2.2.3 모터 구동 레버 시스템의 제원	33
표 2.3.1 데이터수집장치 사양 (NI cDAQ-9178)	43
표 2.3.2 데이터수집장치 사양 (NI-9225)	43
표 2.3.3 데이터수집장치 사양 (NI-9237)	43
표 2.3.4 SB-500L (Load cell) 사양	44
표 2.3.5 SMN-200 (Load cell) 사양	45
표 2.3.6 충격하중실험조건 표	48
표 2.3.7 FB-50K (푸쉬풀 게이지) 사양	52
표 2.3.8 포트받침 모사실험 목록	55
표 2.3.9 동적 UTM 사양 비교	64
표 2.3.10 최적위치 결정 실험 계획	66
표 2.3.11 동적 UTM을 이용한 압축실험 계획	71
표 2.3.12 동적 UTM을 이용한 압축실험 계획 (2차년도)	77
표 2.3.13 축소모형에서의 기존 PCGE와 개선 PCGE의 최대발생 전압 비교	82
표 2.3.14 실물시험체에서의 기존 PCGE와 개선 PCGE의 최대발생 전압 비교	82
표 2.4.1 PCGE-F-0.25, 실물시험체	92
표 2.4.2 PCGE-F-0.25, 축소모형	93
표 2.4.3 PCGE-F-1.00, 실물시험체	93
표 2.4.4 PCGE-F-1.00, 축소모형	93
표 2.4.5 PCGE-F-0.25 (72 × 24), 직렬 3개	94
표 2.4.6 PCGE-F-0.25 (72 × 24), 병렬 3개	95
표 2.4.7 전해콘텐서의 용량과 시간에 따른 출력전압(실험결과)	98
표 2.5.1 차량 분류(교통량 정보제공 시스템)	103
표 2.5.2 합성형 단순보의 물성치	108
표 2.5.3 단순보 모델의 고유진동수	109
표 2.5.4 1종 차량 60 km/h Peak Data	113
표 2.5.5 1종 차량 80 km/h Peak Data	113
표 2.5.6 2종 차량 60 km/h Peak Data	115
표 2.5.7 2종 차량 80 km/h Peak Data	115

표 2.5.8 3중 차량 60 km/h Peak Data	117
표 2.5.9 3중 차량 80 km/h Peak Data	117
표 2.5.10 3중 차량(과적 50%) 60 km/h Peak Data	119
표 2.5.11 3중 차량(과적 50%) 80 km/h Peak Data	119
표 2.5.12 교량 모델의 고유진동수 및 주기	121
표 2.5.13 4중 차량 9 km/h Peak Data	129
표 2.5.14 4중 차량 18 km/h Peak Data	129
표 2.5.15 4중 차량 54 km/h Peak Data	130

그림목차

그림 1.1 교량 받침에서 PZT를 이용한 발전 및 모니터링	1
그림 1.2 기후 온난화 예측 그래프	2
그림 1.3 정부의 신재생 에너지 보급 목표	3
그림 1.4 전체 교량 현황 [국토해양부, 2007]	4
그림 1.5 준공년도별 받침 설치현황 (1968-1995) [도로연, 1993]	5
그림 1.6 고속도로교량 준공년도별 받침 설치현황 (1969-2001) [도로공사자료]	5
그림 1.7 1종 교량년도별 받침 설치현황 (1931-2002) [시설공단 자료]	6
그림 1.8 고속도로에 적용된 받침 형식 [도로교통연구원]	6
그림 1.9 준공년도에 따른 교량 받침 형식 비율 [도로교통연구원]	7
그림 2.1.1 d_{33} 모드에 의한 에너지 하베스팅의 개념도	11
그림 2.1.2 면내 응력의 크기에 따른 압전 상수 및 유전 상수의 변화	12
그림 2.1.3 d_{33} 모드 발전 소자 상수의 개념도	12
그림 2.1.4 다양한 적층 형태의 압전-복합재료 발전 소자	14
그림 2.1.5 압전-복합재료 발전 소자의 제작 방법	15
그림 2.1.6 낙하 실험 시스템 간략도	18
그림 2.1.7 밀면 응력 분포도	18
그림 2.1.8 강철 블록, 고무 및 PCGE의 배치도	19
그림 2.1.9 충격력 실험 결과	20
그림 2.1.10 출력 전압	21
그림 2.1.11 다양한 낙하 높이와 출력 전압	22
그림 2.1.12 다양한 낙하 높이와 출력 전압	23
그림 2.1.13 출력 전압 및 평균 일률	24
그림 2.2.1 모터 구동 레버 시스템	25
그림 2.2.2 모터 구동 레버 시스템의 기구학적 분석	26
그림 2.2.3 ADAMS TM 을 사용한 모터 구동 레버 시스템모델링	27
그림 2.2.4 ADAMS TM 에서의 기계적인 구조	28
그림 2.2.5 차원 모델에서의 기구학적 스킴	28
그림 2.2.6 PCGE에 작용하는 충격력	29
그림 2.2.7 낙하 주파수 증가에 따른 질량의 변위 변화	30
그림 2.2.8 내구성 시험을 위한 실험 장치화	31
그림 2.2.9 포트 베어링을 이용한 하중 전달 메카니즘	32
그림 2.2.10 하중 전달 메카니즘을 위한 실험 장치	32
그림 2.2.11 하중 전달 메카니즘에 사용된 고무와 양면 테이프	32
그림 2.2.12 충격 응력이 0.76 MPa일 때 PCGE-F의 충격력-시간 이력	33
그림 2.2.13 충격 응력이 0.76 MPa일 때 PCGE-F의 출력 전압	34
그림 2.2.14 출력 일률 계측을 위한 전기 회로	34
그림 2.2.15 PCGE-F의 출력 일률	35
그림 2.2.16 전압-응력 사이의 관계	35
그림 2.2.17 가진 회수에 따른 PCGE의 성능 변화	36

그림 2.2.18 교량의 베어링 모델	36
그림 2.3.1 충격하중실험 시스템개념도	38
그림 2.3.2 충격하중실험 시스템	39
그림 2.3.3 충격시험용 PCGE-F 시편	39
그림 2.3.4 Sampling frequency 500 kHz	40
그림 2.3.5 Sampling frequency 50 kHz	41
그림 2.3.6 Sampling frequency 25 kHz	41
그림 2.3.7 Sampling frequency 10 kHz	42
그림 2.3.8 데이터수집장치 (NI 보드 및 모듈)	42
그림 2.3.9 로드 셀센서	44
그림 2.3.10 질량체 1개 (Mass 197 g)	45
그림 2.3.11 질량체 2개 (395 g)	46
그림 2.3.12 충격하중실험 전경	46
그림 2.3.13 로드 셀 지그 도면	47
그림 2.3.14 로드 셀과 지그 부착	47
그림 2.3.15 로드 셀 지그 위 PCGE와 고무판 부착	48
그림 2.3.16 Mass 1개 (197 g), 고무 경도 50, h 90 cm에서 전압 Time history	49
그림 2.3.17 Mass 1개 (197 g), 고무 경도 70, h 90 cm에서 전압 Time history	49
그림 2.3.18 Mass 2개 (395 g), 고무 경도 50, h 90 cm에서 전압 Time history	50
그림 2.3.19 Mass 2개 (395 g), 고무 경도 70, h 90 cm에서 전압 Time history	50
그림 2.3.20 Mass 1개 (197 g) 고무경도 하중-전압 관계	51
그림 2.3.21 Mass 2개 (395 g) 고무경도 50, 70에서 하중-전압 관계	51
그림 2.3.22 FB-50K, IMADA (푸쉬풀 게이지)	52
그림 2.3.23 포트받침 모사실험준비과정	53
그림 2.3.24 포트받침 모사실험	54
그림 2.3.25 R-2, T 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압	56
그림 2.3.26 R-2, T 2.5 N · m Mass 2개(390 g)의 발생전압	56
그림 2.3.27 R-u T 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압	57
그림 2.3.28 R-o Torque 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압	57
그림 2.3.29 R-2 Mass 1개(195 g) 낙하높이를 90 cm로 고정	58
그림 2.3.30 R-no Torque 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 전압	58
그림 2.3.31 교량 받침의 구성	60
그림 2.3.32 포트받침의 현장 설치 사진 (선진산업개발)	61
그림 2.3.33 포트받침 도면	62
그림 2.3.34 PSC 교량에 적용된 PZT교량 받침	63
그림 2.3.35 포트받침에 전선통과 홈	63
그림 2.3.36 PCGE-F 시편	63
그림 2.3.37 동적 UTM을 이용한 포트받침 압축실험 전경	64
그림 2.3.38 받침 내부 고무판 형상	65
그림 2.3.39 받침 내부의 고무판(좌)와 실험을 위해 제작한 고무판(우)	65
그림 2.3.40 포트받침 내부의 PCGE의 위치	66

그림 2.3.41 고무판 바닥에서 0.0 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압	67
그림 2.3.42 고무판 바닥에서 2.4 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압	67
그림 2.3.43 고무판 바닥에서 3.6 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압	68
그림 2.3.44 고무판 바닥에서 6.0 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압	68
그림 2.3.45 포트받침 내의 PCGE 위치에 따른 발생전압 최대값	69
그림 2.3.46 포트받침에 PCGE 삽입	70
그림 2.3.47 고정하중 0 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	72
그림 2.3.48 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	73
그림 2.3.49 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	74
그림 2.3.50 고정하중 50 kN 1Hz Load-Voltage 관계	75
그림 2.3.51 실물시험체(좌)와 축소모형(우)의 크기 비교	76
그림 2.3.52 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	78
그림 2.3.53 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	78
그림 2.3.54 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	79
그림 2.3.55 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	79
그림 2.3.56 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	80
그림 2.3.57 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	80
그림 2.3.58 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	81
그림 2.3.59 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	81
그림 2.3.60 R-2, T 2.5 N · m Mass 195 g & Mass 390 g의 발생전압	83
그림 2.3.61 R-u & R-o, T 2.5 N · m Mass 195 g의 발생전압	84
그림 2.3.62 고정응력 0 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	85
그림 2.3.63 고정응력 5.659 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	85
그림 2.3.64 고정응력 11.318 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	86
그림 2.3.65 고정응력 5.659 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	87
그림 2.3.66 고정응력 11.318 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	87
그림 2.3.67 고정응력 5.659 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	88
그림 2.3.68 고정응력 11.318 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계	88
그림 2.4.1 Piezoelectric 발전시스템	90
그림 2.4.2 PZT의 전기적인 모델	91
그림 2.4.3 가변 저항박스	92
그림 2.4.4 직렬 구조 회로	95
그림 2.4.5 병렬 구조 회로	95
그림 2.4.6 전기모델링	96
그림 2.4.7 PCGE-F-0.25, 축소모형, 부하 10 k Ω 시험 파형	96
그림 2.4.8 PCGE-F-1.00, 축소모형, 부하 10 k Ω 시험 파형	97
그림 2.4.9 전해콘덴서를 사용한 에너지 축적을 위한 정류 회로	97
그림 2.4.10 전기에너지 신호 아날로그 회로	99
그림 2.4.11 제어회로	100
그림 2.4.12 전기에너지 신호 디지털제어 구성도	100
그림 2.5.1 교량 받침의 신호를 이용한 차량 식별 시스템	102

그림 2.5.2 고정하중 200 kN 가력주기 0.5 Hz에서의 추세선	105
그림 2.5.3 고정하중 200 kN 가력주기 1.0 Hz에서의 추세선	105
그림 2.5.4 고정하중 200 kN 가력주기 3.0 Hz에서의 추세선	105
그림 2.5.5 합성형 거더 단면	108
그림 2.5.6 단순보에서 하중 재하 간략도 (단위 : mm)	108
그림 2.5.7 차량이동하중 시간함수	109
그림 2.5.8 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)	110
그림 2.5.9 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)	110
그림 2.5.10 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)	110
그림 2.5.11 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)	111
그림 2.5.12 1종 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력	112
그림 2.5.13 1종 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력	112
그림 2.5.14 2종 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력	114
그림 2.5.15 2종 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력	114
그림 2.5.16 3종 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력	116
그림 2.5.17 3종 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력	116
그림 2.5.18 3종 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력(과적 50%)	118
그림 2.5.19 3종 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력(과적 50%)	118
그림 2.5.20 유한요소 모델 (강합성 교량)	120
그림 2.5.21 강합성 교량 단면도	122
그림 2.5.22 강합성 교량 자유도	122
그림 2.5.23 차량이동하중의 위치	123
그림 2.5.24 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)	124
그림 2.5.25 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)	124
그림 2.5.26 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)	125
그림 2.5.27 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)	125
그림 2.5.28 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)	126
그림 2.5.29 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)	126
그림 2.5.30 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)	126
그림 2.5.31 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)	127
그림 2.5.32 4종 차량 9 km/h 일 때 받침에서 반력	128
그림 2.5.33 4종 차량 18 km/h 일 때 받침에서 반력	128
그림 2.5.34 4종 차량 54 km/h 일 때 받침에서 반력	129

제1장 연구개발과제의 개요

제1절 연구개발 개요

자연계에서 버려지는 에너지를 활용하는 것을 목표로 하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)은 지난 몇 년간 전 세계적으로 다양하게 연구되고 있는 주제이다. 태양광을 이용하는 태양 전지, 풍력, 바다의 파도 등을 이용하는 압전 발전, 폐열을 이용하는 발전 등 다양한 형태로 연구되고 있다[정대용 외, 2007]. 각각의 방법들은 에너지효율성, 경제성 등의 측면에서 장점과 단점을 동시에 가지고 있어 단점을 보완하고 장점을 살리는 방향으로 연구가 진행되고 있다.

압전소자는 내구성, 에너지 효율성에 약점을 가지고 있어 에너지 하베스팅에 널리 이용되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 복합소재를 이용하여 내구성을 높이고, 큰 하중 하에서 발전이 가능하도록 장치를 고안하였다.

압전소자의 내구성과 발전효율성을 향상시키고, 이를 적용한 교량 받침 개발을 통해 고기능성 받침을 만들 수 있으며, 특히 기존 받침의 설계 변경 없이 효율적으로 연구 성과를 적용할 수 있다.



그림 1.1 교량 받침에서 PZT를 이용한 발전 및 모니터링

개발된 교량 받침은 하중계측기능을 포함하여 과적차량의 실시간 단속에 사용가능하고, 차량 주행 시 발전기능을 이용한 신재생에너지 생산이 가능하다. 하중계측은 교량구조물의 유지관리 효율성을 향상시켜, 사회기반시설의 장수명화에도 기여할 수 있다. 또한 현재까지 사용되지 않았던 차량하중을 발전에 활용할 수 있게 되므로 정부의 녹색성장 신재생에너지 정책에 부합되는 기술이고, 교통량이 많은 우리나라 실정에 적절한 기술이라 사료된다.

제2절 연구개발의 중요성

1. 압전소자 연구개발의 중요성

기후 학자들은 기후 온난화로 말미암아 향후 30년이 지나면 북극해의 얼음이 사라질 것이라는 비관적인 전망을 하고 있다 (그림 1.2 참고). 이러한 기후 학자들의 전망이 맞지 않기를 바라고 있지만, 지금 이를 막기 위한 노력을 경주하지 않는다면 심각한 위기에 직면할 것이라는 데 이견이 없다. 환경오염을 최소화하면서 에너지를 효율적으로 사용하고자 하는 노력이 세계적으로 시작된 것도 이러한 위기감에서 비롯되었다고 할 수 있다.

정부는 2030년까지 전체 에너지 비중에서 지열, 해양, 태양광, 풍력 등의 신재생 에너지의 비중을 현재의 2.6 %에서 11 %로 높인다는 비전을 제시하고 있다 (그림 1.3 참고).

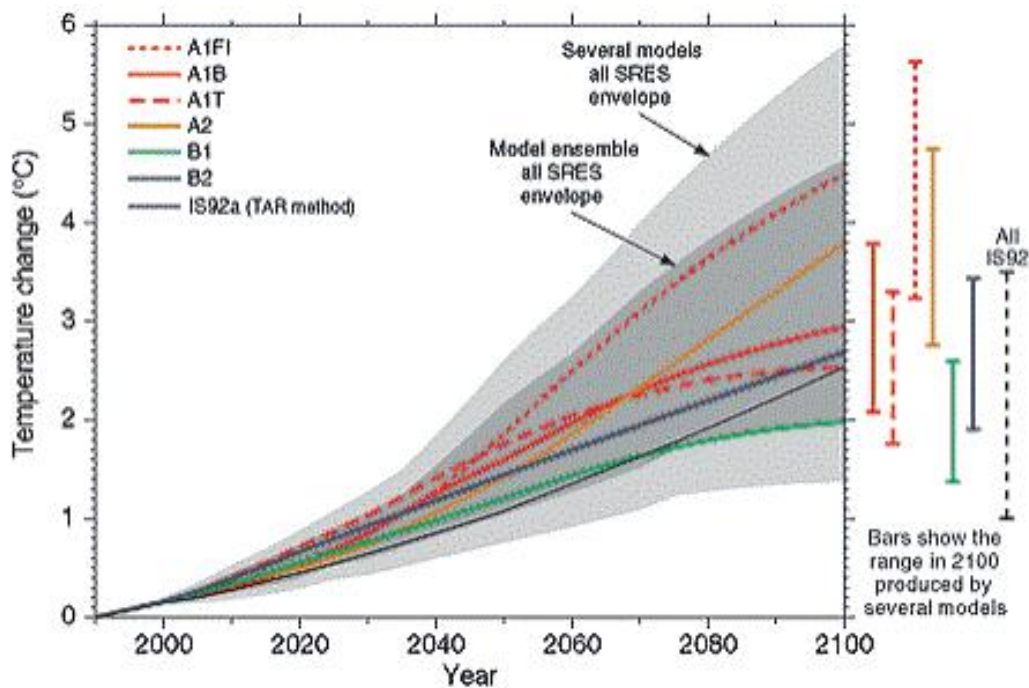


그림 1.2 기후 온난화 예측 그래프



그림 1.3 정부의 신재생 에너지 보급 목표

궁극적으로는 압전-복합재료 발전 소자가 주로 MEMS(Micro-Electro Mechanical System)나 신체 삽입 기구의 보조 전원이라는 통상적인 개념을 뛰어 넘어, 이스라엘의 발전도로가 소형 차량 8대를 충전하는 것과 같이 신재생 에너지의 한 축이 되는데 기여할 수 있을 것이다.

초기 투자 대비 자금회수기간이 긴 대부분의 신재생에너지에 비하여 경제성이 뛰어난 전기 에너지 생산 기술이 요구되는데, 본 기술은 비용대비 고효율의 에너지 생산이 가능하게 한다.

과적차량은 도로를 심하게 파손시키며 교량에 구조적으로 손상을 줄 가능성이 있다. 그렇기 때문에 과적차량의 단속이 이루어지고 있지만 사람이 직접 단속하기 때문에 문제를 해결하기에는 한계가 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 하중측정 시스템을 개발하여 과적차량을 실시간 모니터링 가능하게 하는 기술이 필요한 실정이다. 이러한 기술의 도입으로 사회기반 시설의 장수명화를 도모하여 사회적 비용절감을 실현할 수 있고, 세계적으로 사례가 없는 기술이라 조기 개발에 따른 기술선점이 요구된다.

2. 교량 받침 연구개발의 중요성

국토해양부에서 조사한 교량 현황을 보면 2007년 12월말 기준으로 총 교량 수가 24,923개소로 연간 교량 수는 꾸준히 증가 한 것을 알 수 있다. (표 1.1, 그림 1.4 참고)

표 1.1 연도별 교량 수 및 연장 증가 추이 [국토해양부, 2007]

기준년도	교량 개소		연 장(m)	비 고
'97년 12월말	14,939		932,479	
'06년 12월말	23,805		2,139,127	
'07년 12월말	24,923		2,289,088	
비율 ('07.12월말 기준)	'97년 대비	증가수	9,984개소	
		연간비율	6.68%(연평균)	
	'06년 대비	증가수	1,118개소	
		비 율	4.7%	

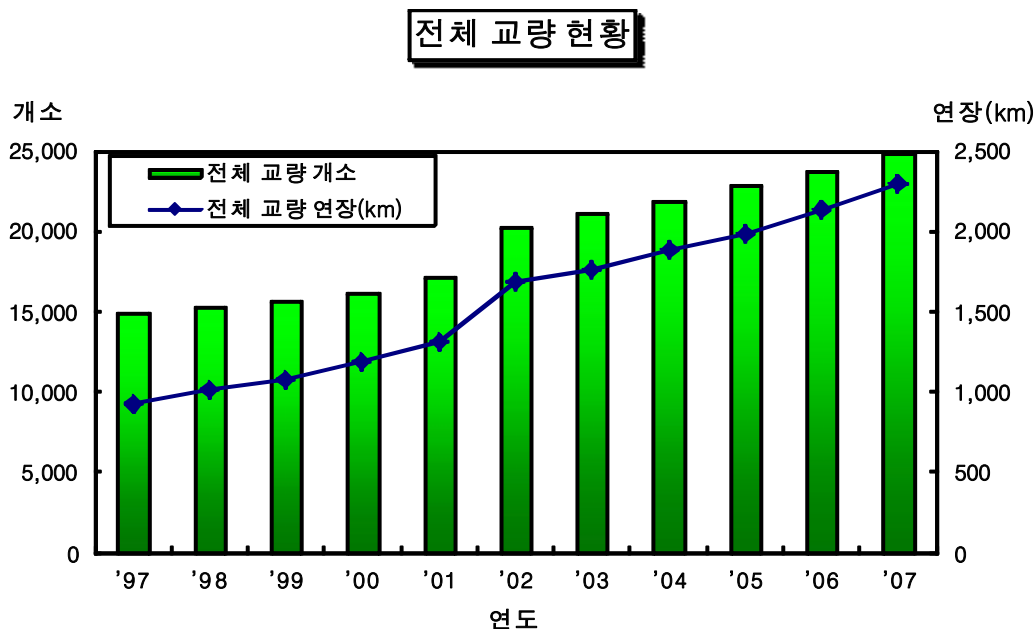


그림 1.4 전체 교량 현황 [국토해양부, 2007]

교량 받침은 교량건설에 필수적으로 들어가게 된다. 고속도로 교량에서는 건설시기에 따라서 다소 차이가 있지만, 60% 이상이 탄성받침, 약 30%가 포트받침이 사용되고 있다 [도로교통연구원, 2001]. 준공연도별 교량 받침의 설치 현황을 보아도 탄성받침과 포트받침이 가장 많이 사용되고 있다. (그림 1.5-1.7)

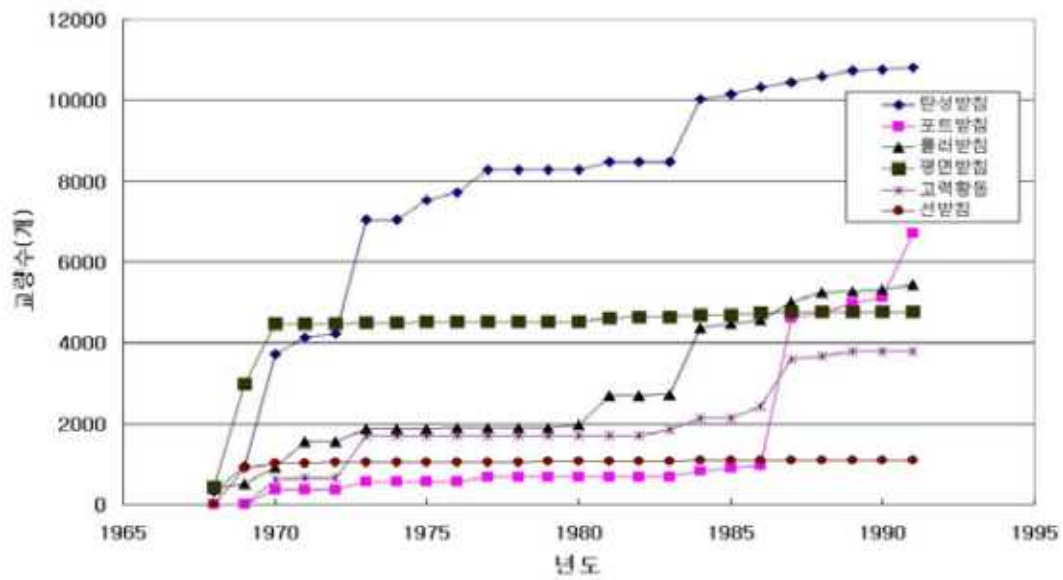


그림 1.5 준공년도별 받침 설치현황 (1968-1995) [도로연, 1993]

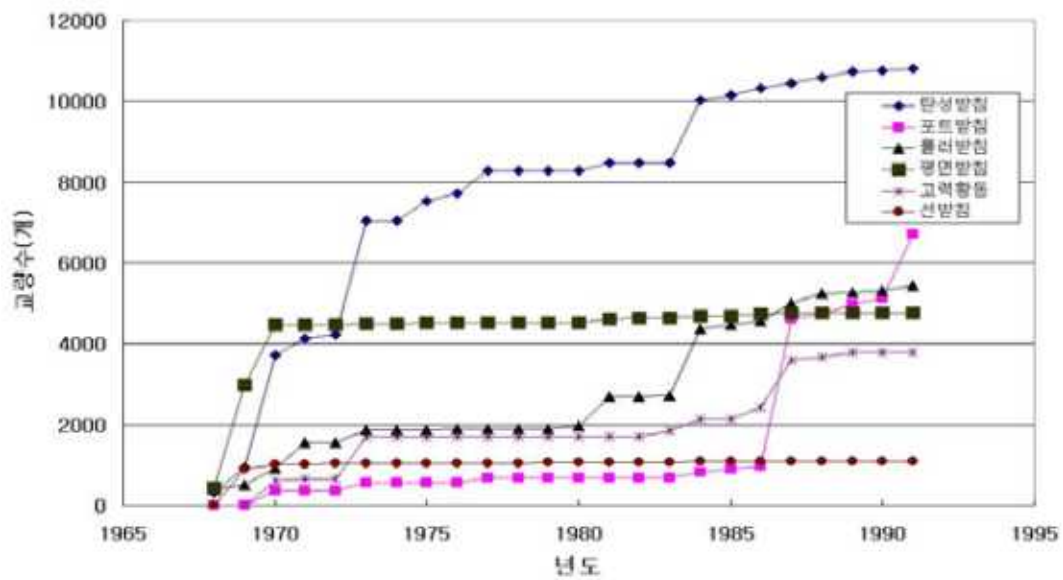


그림 1.6 고속도로교량 준공년도별 받침 설치현황 (1969-2001) [도로공사자료]

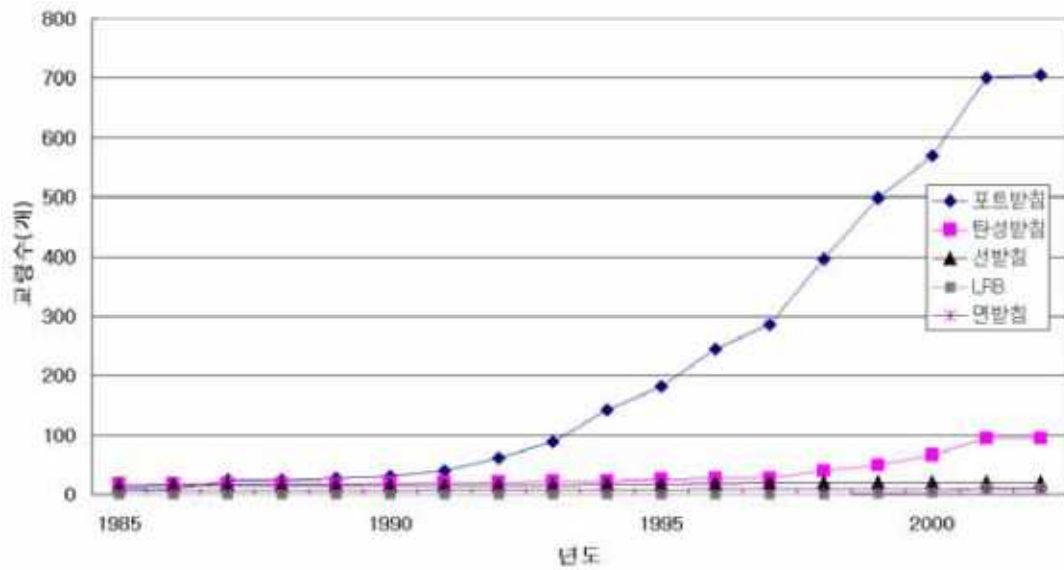


그림 1.7 1종 교량년도별 반침 설치현황 (1931-2002) [시설공단 자료]

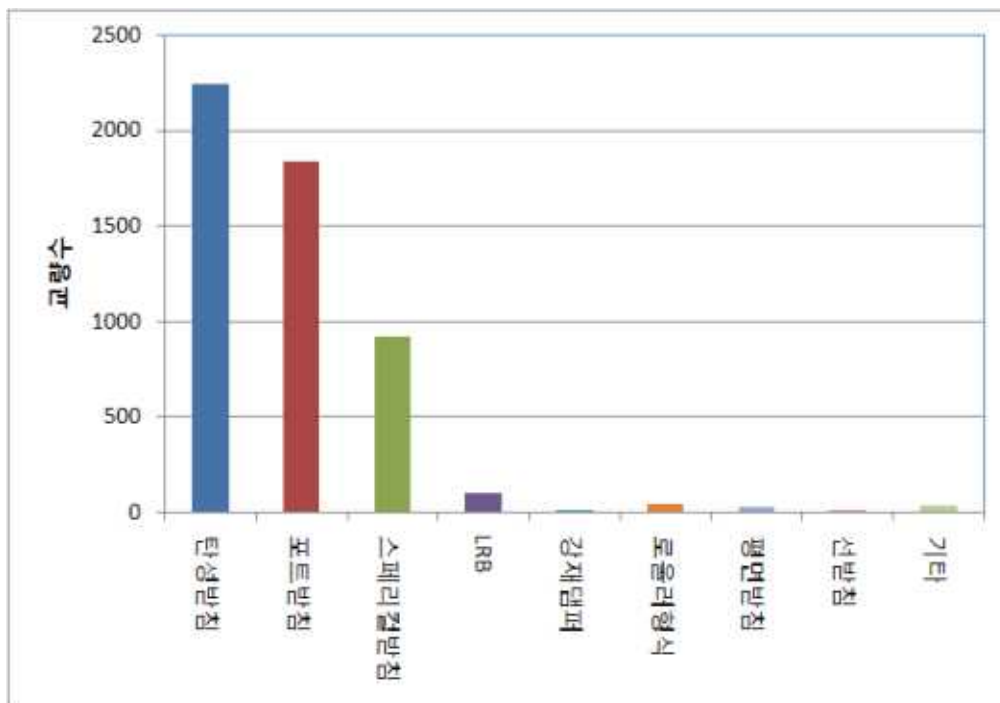


그림 1.8 고속도로에 적용된 반침 형식 [도로교통연구원]

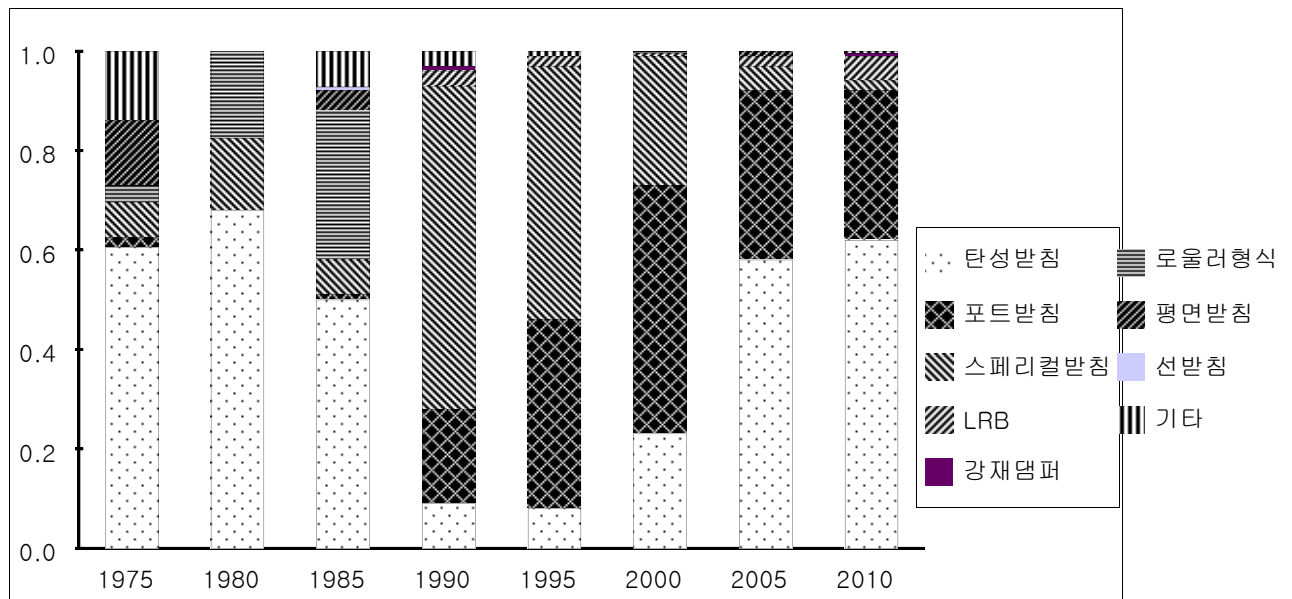


그림 1.9 준공년도에 따른 교량 받침 형식 비율 [도로교통연구원]

그림 1.4~1.9를 분석하면 교량건설은 2000년 이후로 계속 증가함을 알 수 있다. 교량에 필수 요소인 교량 받침 시장도 같이 증가할 것이라고 예상되는데, 그중 압전소자의 적용이 가능한 탄성받침과 포트받침이 대다수를 차지하고 있어서, 개발된 교량 받침은 향후 교량건설과 노후 교량의 교체 등에 적용이 가능하기 때문에 시장규모는 꾸준히 확대될 것으로 기대된다.

3. BWIM 연구개발 중요성

교량을 설계할 때 차량하중의 정보는 교량의 안전성을 확보하기 위한 가장 중요한 요소이며, 향후 유지관리 측면에서도 매우 중요하다. 고속도로를 통행하는 트럭은 교량에 피로 손상을 일으키는 반복응력의 주된 원인으로서 새로운 교량의 총 수명 또는 기존교량의 잔존 수명동안의 안전성을 평가하기 위해서는 교량상판에서 통행하는 차량의 중량을 효과적으로 계측하는 기술이 요구되며, 또한 이를 통해 과적차량을 효과적으로 단속할 수 있다.

지금까지는 도로상을 통행하는 차량의 중량을 추정하기 위해 연구된 방법으로는 일정한 장소의 도로포장층에 축중계를 매설한 후 이곳을 지나는 화물트럭에 대해 차량의 중량을 측정하도록 하는 WIM(Weigh-in-Motion)시스템과 교량 거더 하부에 설치한 변형률계를 통해 얻은 신호를 이용하여 교량에 주행 중인 차량의 중량을 계측하는 BWIM(Bridge Weigh-in-Motion) System이 있다.

본 연구에서는 압전소자가 내장된 교량 받침을 이용하여 교량 위를 주행 중인 차량의 중량을 측정할 수 있는 새로운 차량하중 계측 방법을 제안하고자 한다. 기존에 교량 받침을 이용하여 하중을 모니터링 하기 위한 센서 내장형 교량 받침에(Smart Bearing) 관한 연구는 Subramaniam (1995), Nims et al. (1996)에 의해 이루어 졌으며 탄성 받침을 가진 교량에서 차량하중에 의해 받침에 충분히 측정 가능한 변형을 유발하며, 교량 받침에 측정 장치를 부착할 경우에 차량 하중을 추정할 수 있음을 수치 해석적 연구로 증명하였다. 한편, Ghosh et al. (2003)은 스트레인 게이지를 부착한 Smart Bearing 을 개발하였으며 이 시스템을 이용하여 실시간으로 변형률을 측정하여 과적 차량을 식별하기 위한 알고리즘과, 유한요소해석 프로그램을 이용하여 다양한 차량에 대한 변형률 응답을 수치적으로 구하고, 측정 응답을 수치 응답과 패턴인식 기법을 이용하여 비교함으로써 과적 차량을 식별하고자 하였다.

본 연구에서 제안하게 되는 압전소자 내장 교량 받침을 이용한 하중계측은 교량 받침에서 측정되는 변형률이 아닌 압전센서를 통해 생성된 전기를 이용하여 하중을 계측한다. 이때 생성되는 전기는 자연에 존재하는 풍부한 하중, 진동에너지를 이용하기 때문에 재생에너지로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 이는 최근 화석연료의 고갈과 전기 수요량의 급증으로 대두되는 신재생에너지 발전 정책에 부합하며 시스템구축 및 개발에 성공할 경우 많은 장점을 가질 것으로 기대된다.

제2장 연구개발수행 내용 및 결과

이 과업의 최종목표인 압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 개발 중, 1차년도 과업목표인 고내구성 압전 발전 소자 개발, 압전소자가 내장된 교량 받침 설계 및 축소모형 시험검증을 위해 연구내용을 5절로 나누었다.

제1절에서는 압전소자의 내구성과 발전효율성을 향상시키기 위하여 다양한 복합소재와 압전소자의 조합을 통해 압전-복합재료 발전 소자의 설계 및 제작을 수행한 결과를 기술하였다.

제2절에서는 모터 구동 레버 시스템을 설계 및 제작하였고, 압전소자의 내구성 시험을 진행하였다.

제3절에서는 개발된 PCGE를 교량 받침에 적용한 경우의 하중과 발생전압과의 관계를 확인하기 위한 다양한 실험을 수행하고 축소 포트받침을 설계하여 PCGE가 내장된 경우의 사용성과 효율성을 연구하였고 그 결과를 바탕으로 최종적으로 PCGE가 내장된 포트받침을 설계하였다.

제4절에서는 압전소자에 의해서 발생하는 전기에너지를 효율적으로 축전하기 위한 에너지 저장회로를 검토하였고, 최종적으로 전기 신호회로를 구성하였다.

제5절에서는 본 연구에서 제안한 BWIM System 알고리즘을 이용하여 PCGE가 내장된 교량 받침으로 과적차량 단속의 가능성을 확인하였다.

제1절 압전-복합재료 발전 소자의 설계 및 제작

압전소자는 일반적으로 세라믹 형태의 취성특성을 가지고 있어 충격에 대단히 취약하다. 또한 발전효율도 높지 못하여 경제성과 내구성이 타 신재생에너지에 비해 다소 불리하다. 이러한 약점을 보완하기 위한 연구를 행하였고 제1절에서는 압전소자의 내구성과 발전효율성을 향상시키기 위하여 다양한 복합소재와 압전소자의 조합을 통해 압전-복합재료 발전 소자의 설계 및 제작을 수행한 결과를 기술하였다.

1. 기본 물성 방정식

- 새로운 압전 재료로 단결정 압전 세라믹인 PMN-PT, PZN-PT와 압전 폴리머, 탄소 나노 튜브 등이 연구되고 있으나 이는 압전 성능이 좋아지는 반면 가격이 비싸거나 깨지기 쉽다는 단점들이 있다. 따라서 상대적으로 값이 싸고 범용으로 사용할 수 있는 PZT의 성능을 개선하는 방법이 있다면, 새로운 압전 재료를 연구하는 것과 같은 효과를 낼 수 있다.
- 전기와 하중 사이의 에너지 전환이 일어나는 압전 재료의 구성 방정식은 IEEE 표준 176-1987에 따르면 다음과 같다.

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (2.1.1)$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (2.1.2)$$

여기에서 T_{ij} 는 응력, S_{kl} 은 변형률, c_{ijkl}^E 은 일정 전기장에서 구한 탄성 계수, $e_{kij} = c_{ijkl}^E d_{klm}$ 는 압전 응력상수(d_{lm} 은 압전 변형률 상수), D_i 는 전기적 변위, ϵ_{ik}^S 는 일정 변형률에서 구한 유전 상수, E_k 는 전기장을 나타낸다.

- 식 (2.1.2)는 전기장이 가해 졌을 때 작동응력을 나타내므로 작동기로서의 특성을 나타내고, 식 (2.1.2)는 변형이 가해 졌을 때 압전재료 내부에 발생하는 단위 면적당 전하를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 압전재료가 변형 되었을 때 발생하는 전하에 관심이 있기 때문에 식 (2.1.2)를 검토한다.
- 식 (2.1.2)를 변형하여 전압에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$E_i = -g_{ikl} T_{kl} + \beta_{ik}^T D_k \quad (2.1.3)$$

여기에서 g_{ikl} 은 단위 응력에 가해질 때 발생하는 전기장의 크기를 나타내는 압전 상수, β_{ik}^T 는 반유전율 상수 (Impermeability Constant)이다. 응력에 대한 축약구약, $\sigma_1 = T_{11}$, $\sigma_2 = T_{22}$, $\sigma_{33} = T_{33}$, $\sigma_4 = T_{23}$, $\sigma_5 = T_{31}$, $\sigma_6 = T_{12}$ 를 이용하고, 초기 전하가 없다고 가정하면, 식 (2.1.3)은 다음과 같이 된다.

$$E_i = -g_{ip} \sigma_p \quad (2.1.4)$$

$$d_{ip} = \epsilon_{ik}^T g_{kp} \quad (2.1.5)$$

여기에서 $i, j, k = 1, 2, 3, p, q = 1, 2 \cdot \cdot \cdot 6$ 이다.

- 표 2.1.1에는 본 연구에서 주로 고려하게 될 CTS 사의 3203HD (PZT 5H)의 물성치를 나타낸다. 압전 소자의 발전 성능의 척도가 되는 전기-기계 연성계수 연성 계수를 보면 k_{33} 가 k_{31} 보다 두 배 정도 크다는 사실을 알 수 있다.

표 2.1.1 미국 CTS 사의 3203HD의 물성치

Property		Symbol	Unit	Value
Dielectric Constant		ϵ_{33}^T	–	3800
Modulus	Short Circuit	Y_{11}^E	GPa	62
		Y_{33}^E	GPa	49
	Open Circuit	Y_{11}^D	GPa	70
		Y_{33}^D	GPa	100
Piezoelectric Charge Constant		d_{31}	$C/N \times 10^{-12}$	–320
		d_{33}	$C/N \times 10^{-12}$	650
Coupling Coefficient		k_{31}	–	0.43
		k_{33}	–	0.75

2. d_{33} 모드 발전 소자 상수의 유도

- 외부의 힘에 의해 압전 재료가 전기를 발생하는 것은 인장, 굽힘, 전단 등의 모드가 있지만 실제로 의미가 있는 것은 굽힘 변형은 사용하는 모드와 인장-압축을 사용하는 모드이다. 본 연구는 그림 2.1.1과 같이 인장-압축을 사용하는 d_{33} 모드를 사용한다. 즉, 직접적인 압축에 의하여 전기를 발생시키는 모드라 할 수 있다. 다른 정의도 있을 수 있지만 본 연구에서 d_{33} 모드는 압전-복합재료 발전 소자에 압축이 가해져서 발전하는 것을 의미한다.

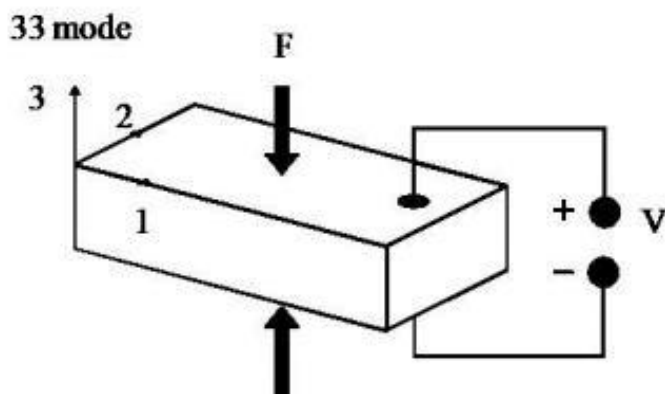


그림 2.1.1 d_{33} 모드에 의한 에너지 하베스팅의 개념도

- 폴링 방향으로 압축이 작용하면 폴링 방향으로 전하 생성

- 그림 2.1.2에는 면내 응력의 크기에 따른 압전 상수와 유전 상수의 변화를 나타내었다[Krueger, 1968].

이를 보면 면내 응력의 크기에 따라 압전 상수 d 값이 늘어나거나 줄어들며, 유전상수 ϵ 값은 대체적으로 줄어드는 경향이 있다. 따라서 본 연구팀이 가지고 있는 기술인 면내 응력을 PZT에 가하는 방법을 사용하면 발전 성능을 향상시킬 수 있을 것이다.

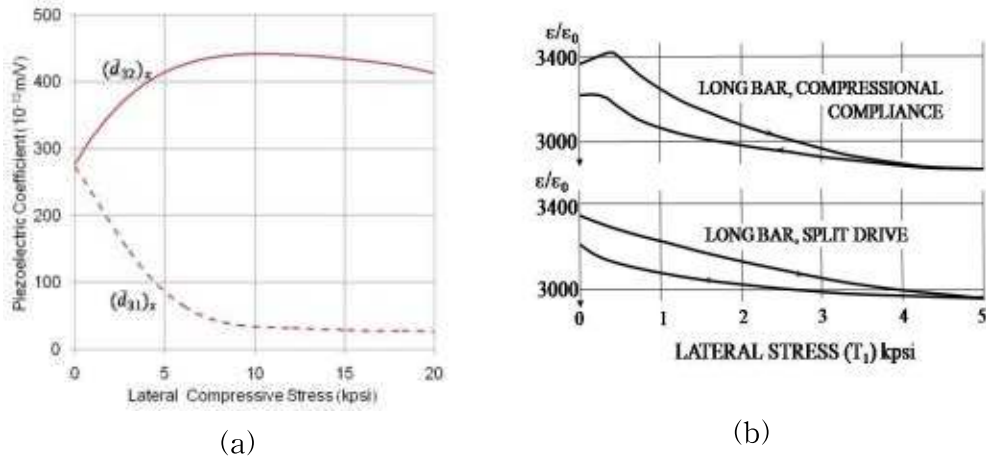


그림 2.1.2 면내 응력의 크기에 따른 압전 상수 및 유전 상수의 변화

- (a): 면내 응력이 작용하면 응력 작용 방향 압전 상수는 작아지고 응력 횡방향 압전 상수는 커짐
- (b): 면내 응력이 커짐에 따라 유전 상수는 작아짐

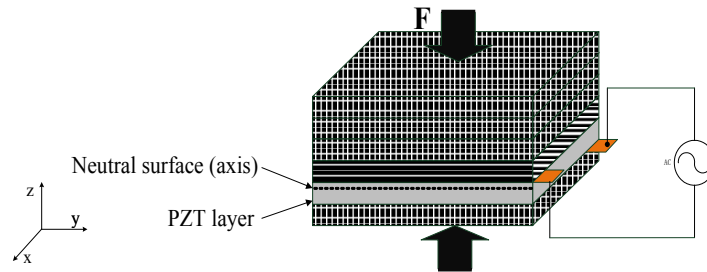


그림 2.1.3 d_{33} 모드 발전 소자 상수의 개념도

- 힘에 의하여 PZT에 작용하는 압력이 전기를 발생함

○ 1차년도에서 d_{33} 모드 발전 소자 개발에서 성능을 예측할 수 있는 유효 압전 상수(Effective Piezoelectric Coefficient)와 유효 전압 상수(Effective Voltage Coefficient)를 도입한다. 표 2.1.1의 CTS 사의 PZT 3203HD의 물성표에도 나타나 있듯이 일반적으로 전기-기계 연성 계수 k_{33} 가 k_{31} 보다 2배 이상 크기 때문에 d_{33} 모드를 사용하면 더 큰 발전 효과를 낼 수 있다. 식 (2.1.6)은 유효 압전 상수 d_{33}^{eff} 와 d_{33} , d_{3x} , d_{3y} 의 관계를 반경험 방정식(Semi-empirical Equation)으로 나타내고, 식 (2.1.7)는 발전 재료가 힘 P 에 의하여 발생하는 전압 V 을 나타내는 관계식이다. 그림 2.1.3를 통하여 식 (2.1.7)을 직관적으로 설명할 수 있다.

$$d_{33}^{eff} = d_{33} + \beta \left(\frac{d_{3x} + d_{3y}}{2} \right) \quad (2.1.6)$$

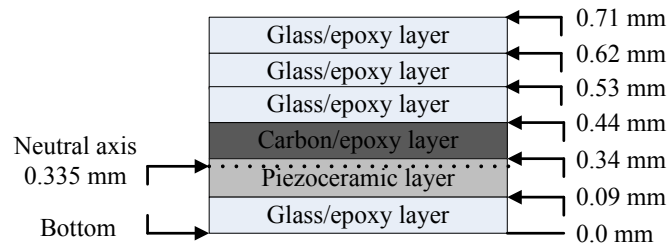
여기에서 d_{33}^{eff} 는 유효 압전 상수, d_{33} 는 3-방향(z-방향) 압전 상수, d_{3x} 와 d_{3y} 는 x-,y-방향을 나타내는 압전 상수, β 는 증폭 계수 이다. 압전-복합재료 발전 소자는 성형 과정 이후 발생하는 면내 잔류 응력 때문에 x-와 y-방향의 압전 상수 d_{3x} 와 d_{3y} 만 변화하게 되고, 결과적으로 d_{33} 의 변화가 식 (2.1.7)처럼 나타나게 된다.

$$V = g_{33}^{eff} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \frac{P}{A} \cdot t \quad (2.1.7)$$

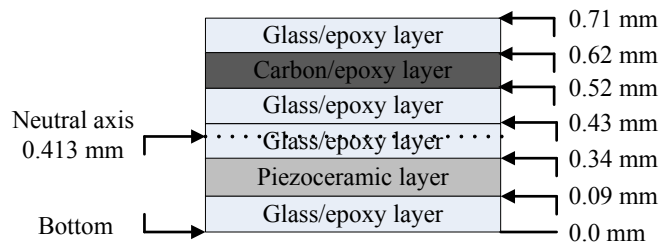
식 (2.1.7)에서 g_{33}^{eff} 는 유효 전압 상수, t 는 PZT 두께이다. d_{33} 모드에서 압전-복합재료 발진 소자에 가해지는 압력과 PZT의 두께가 같다면 전압은 오직 d_{33}^{eff} 와 ϵ_{33}^T 에만 비례 된다. d_{33} 모드 압전-복합재료 발진 소자에 관한 연구에서는 경화 공정 후에 생긴 열 잔류 응력이 발진 성능에 주는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 또한 이런 기초적인 개념을 확인하기 위하여 다양한 형태를 가진 압전-복합재료 발진 소자를 제작하여 실험을 수행하였다. 면내 잔류 응력의 크기에 따른 압전 상수와 유전 상수의 변화는 그림 3.1.2에 나타내었다.

3. d_{33} 모드 압전-복합재료 발진 소자의 설계 및 제작

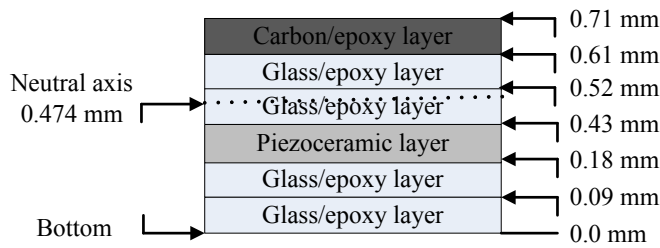
- 발진 소자 상수가 압전-복합재료 발진 소자의 발진 성능과 어떠한 관련이 있는가를 시험하기 위하여 복합재료의 설계 다양성을 활용하여 다양한 형태의 압전-복합재료 발진 소자를 제작하여 실험적으로 성능을 비교한다. 그림 2.1.4에는 몇 가지 압전-복합재료 발진 소자의 적층 형태를 나타내고 있다. 각 적층 형태에 대하여 발진소자 상수 $\frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T}$, 가 최대가 되는 적층 형태를 선정한다.



(PCGF-F1)



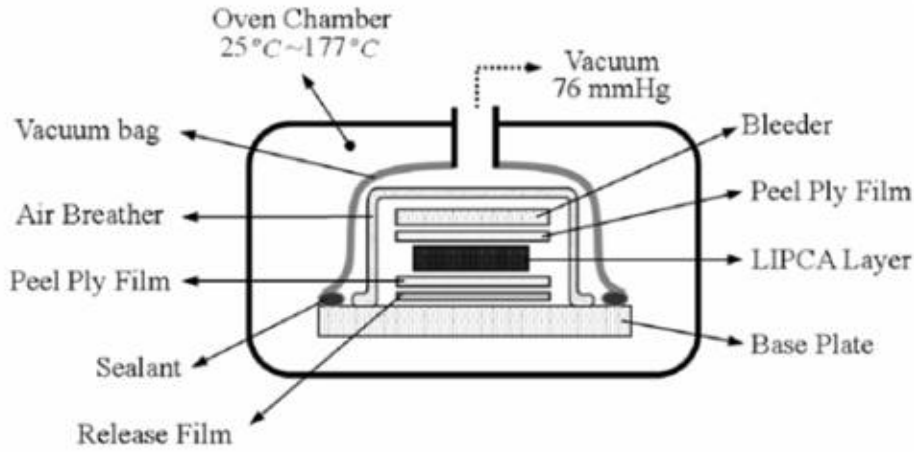
(PCGF-F)



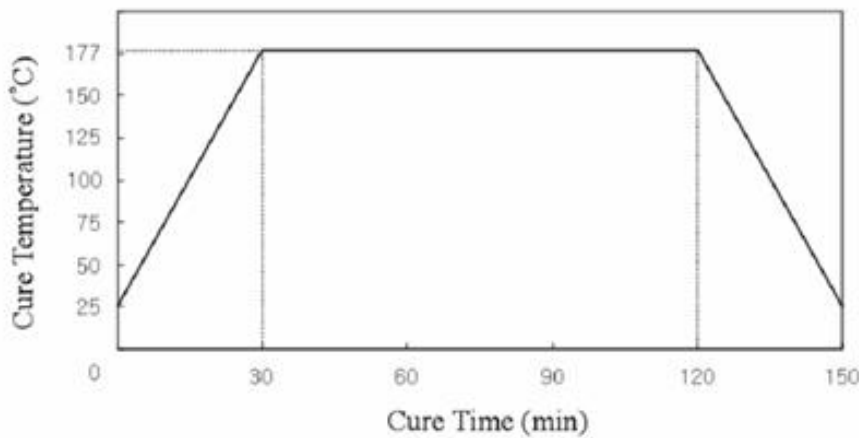
(PCGF-F)

그림 2.1.4 다양한 적층 형태의 압전-복합재료 발진 소자

- 압전-복합재료 발진 소자의 제작은 전통적인 복합재료 성형법을 사용한다. 그림 2.1.5에는 압전-복합재료 발진 소자의 성형 공정 및 성형 사이클을 나타낸다. 이 때 성형 온도를 압전 재료의 큐리 온도 이하가 되도록 하여야 재폴링(Repoling) 공정을 거치지 않을 수 있다.



(a) 전통적인 복합재료 성형 방법을 사용



(b) 성형 온도 그래프 (재폴링 공정이 필요하지 않도록 성형 온도를
큐리 온도 이하로 유지)

그림 2.15 압전-복합재료 발진 소자의 제작 방법

4. 압전-복합재료 발진 소자의 성형 잔류 응력 해석

- 압전-복합재료 발진 소자를 제작할 때 구성 재료들 사이의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 PZT에 압축 응력이 작용한다. 식 2.1.7을 보면 압전-복합재료 발진 소자에서 발생하는 전압은 d_{33}^{ff} 에 비례하고, ϵ_{33}^T 에 반비례하므로 되도록 큰 d_{33}^{ff} 과 되도록 작은 ϵ_{33}^T 을 가지는 압전-복합재료 발진 소자의 적층 형태를 찾는다. 이를 위하여 압전-복합재료 발진 소자의 유한요소 해석을 수행하여 잔류 응력을 계산한다.
- 유한요소 해석을 통하여 계산한 잔류 응력으로 d_{33}^{ff} 와 ϵ_{33}^T 의 값의 변화를 계산하여 최적의 적층 형태를 가지는 압전-복합재료 발진 소자를 찾는다. 또한 제작된 다양한 적층 형태를 가지는 압전-복합재료 발진 소자에 대한 성능 실험 결과와 비교한다.
- 압전-복합재료 발진 소자의 내부 잔류 응력을 계산하는 유한요소 해석은 상용 프로그램을 사용한다. 표 2.1.2에 있는 탄소/에폭시, 유리/에폭시 및 PZT의 물성과 성형온도를 이용하여 열응력 해석을 수행하면 성형 후 발생하는 변위와 내부 잔류 응력을 계산할 수 있다. 또한 성형된 압전-복합재료 발진 소자는 약간의 곡률을 가지게 되는데, 이를 평평하게 부착하여 사용할 때의 발진 성능도 계산 가능하다[Goo, 2009].

표 2.1.2 압전-복합재료 발진 소자를 구성하는 재료의 물성치

Property		PZT	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy
Modulus		70	66.42	21.7
		70	66.42	21.7
		23.7	4.35	3.99
		0.31	0.054	0.13
CTE		3.5	-1.58	14.2

- 압전-복합재료 발진 소자의 내부 잔류 응력을 계산하는 유한요소 해석은 상용 프로그램을 사용한다. 발진 소자에서 표면에 작용하는 압력 분포도 발진 성능에 영향을 준다. 즉 표면에 동일한 압력과 같은 적층 형태에서 압력이 균일하게 분포하면 발진 성능을 향상할 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 발진 소자 표면에 작용하는 압력이 균일하게 분포할 수 있도록 사각형과 경사형 형태의 하중전달 장치와 고무판을 사용하는 방법을 제안하였다.

5. 발진 소자 상수의 실험적 연구

- 도입한 성능 예측의 타당성을 검증하기 위하여 세 가지 형태의 압전-복합재료 발진 소자를 설계하였다. 복합재료의 설계다양성을 활용하여 세 가지 형태의 PCGE를 제작하여 실험적으로 성능을 비교한다. 위에서 제시했던 그림 2.1.4에서 탄소/에폭시 한층, 유리/에폭시 4층, PZT로 구성 가능한 세 종류의 PCGE의 적층 형태를 나타내고 있다. 표 2.1.3은 ANSYS로 계산된 결과를 보여준다. 그 중에서 PCGE-F는 가장 큰 내부 잔류응력을 가진 것을 알 수 있다.

표 2.1.3 PZT층의 평균 잔류 응력

PCGEs	x-direction (MPa)	y-direction (MPa)
PCGE-D	$\sigma_{xx}=3.71$	$\sigma_{yy}=-31.86$
PCGE-E	$\sigma_{xx}=-22.95$	$\sigma_{yy}=-33.10$
PCGE-F	$\sigma_{xx}=-35.02$	$\sigma_{yy}=-48.89$

- 본 연구에서 재료들 사이의 열팽창 계수의 차이로 말미암아 PZT에 생긴 잔류 응력으로 d_{33} 모드의 발진 성능을 향상하는 것을 검토한다. 표 2.1.4에는 유한요소 해석을 통하여 계산된 압전-복합재료 발진

소자의 잔류 압축응력과 [Krueger, 1968]의 실험 결과로부터 압전 상수와 유전 상수의 변화를 계산한 결과와 식 2.1.6, 2.1.7에 의해 계산된 유효 압전 상수와 유효 전압상수의 결과를 나타내었다. 여기에서 식 2.1.6의 증폭 계수 β 를 1로 가정 하였다. 세 가지 형태 발전 소자의 유효 전압 상수를 비교하면 PCGE-E는 D보다 23.6% 증가 하고, F는 D보다 34.9% 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 열 잔류 응력이 커지면 유효 전압 상수도 커진다는 것을 예측 되었으며, 발전 성능은 D, E, F순서로 증가하는 것을 예측 할 수 있다.

표 2.1.4 유효 압전 상수 와 유효 전압상수 계산 결과

PCGE	Piezoelectric coefficient (10 ⁻¹² m/V)		Dielectric coefficient (10 ⁻⁹ F/m)	Effective piezoelectric coefficient (10 ⁻¹² m/V)	Effective voltage coefficient (10 ⁻³ Vm/N)
	x-direction	y-direction	ϵ_{33}^T	d_{33}^{eff}	g_{33}^{eff}
D	$d_{3x}=-434$	$d_{3y}=-154$	33.7	356	10.6
E	$d_{3x}=-315$	$d_{3y}=-223$	29.1	381	13.1
F	$d_{3x}=-263$	$d_{3y}=-225$	28.3	406	14.3

6. d_{33} 모드 발전 성능 실험

- d_{33} 모드 압전 재료를 이용한 에너지 하베스팅은 일반적으로 PZT의 폴링 방향과 동일한 방향의 압축 에너지를 전기 에너지로 변환하는 것이 기본적인 개념이므로, 그림 2.1.6와 같이 단순한 낙하 실험 시스템(Dropping Test System)을 제안하고 전압 측정을 수행한다. Mass 파트가 Linear Motor Guide를 따라 자유 낙하하면 발전 소자에 충격력을 작용하게 되고, 발전 소자는 발전을 하게 된다.

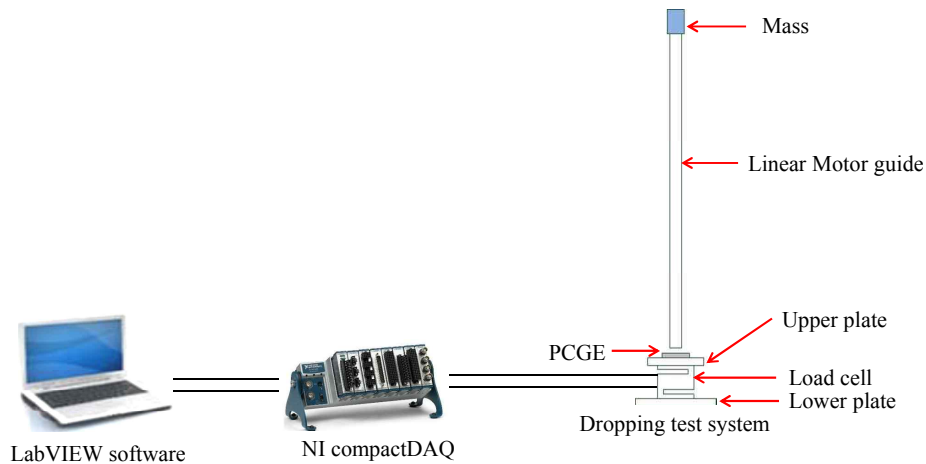
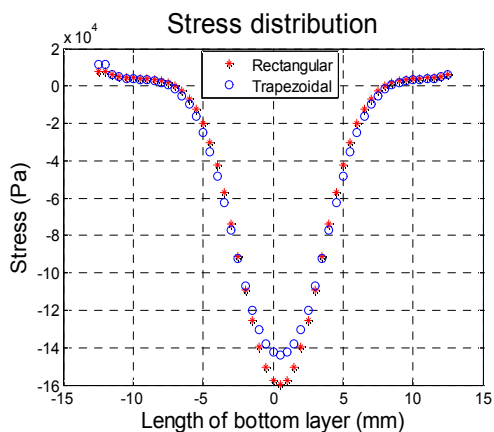
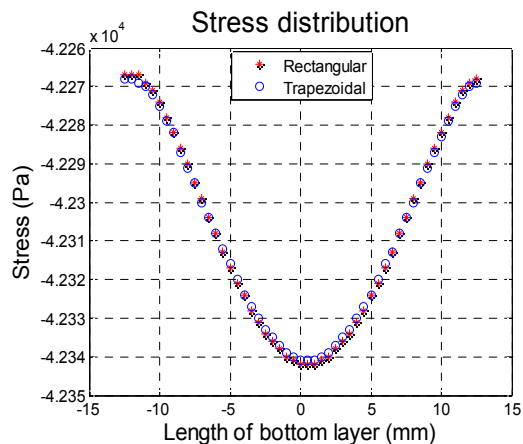


그림 2.1.6 낙하 실험 시스템간략도

- 낙하 실험 시스템 및 실제 사용(도로, 교량 등)에서 발전 소자를 보호하는 차원과 힘을 균일하게 분포하게 하기 위하여 사각형과 경사형으로 된 스틸 블록과 고무판을 사용하였다. ANSYS 소프트웨어를 사용하여 응력 분포를 계산하였다. 그림 2.1.7은 사각형 및 경사형 스틸 블록 밑면에 고무판이 있을 경우와 없을 경우의 밑면 응력 분포를 보여 주고 있다. 전체적인 결과를 보면 고무판을 사용 했을 때와 사용하지 않았을 때에 사각형 블록과 경사형 블록은 비슷한 결과를 나타내었다. 그렇지만 그림 2.1.7(왼쪽 그림)에서 볼 수 있듯이 고무판을 사용하지 않은 경우에서 밑면 중심에서 응력 집중 현상이 발생하는데 그림 2.1.7(오른쪽 그림)은 고무판 밑면의 응력이 균일하게 분포 되는 것을 알 수 있다. 그러므로 발전 소자의 발전 성능 실험은 사각형 스틸 블록을 사용하고(사각형 블록과 경사형 블록은 비슷한 응력 분포 결과를 보여 주기 때문에) 고무판이 있는 경우와 없는 경우에서 실행한다.



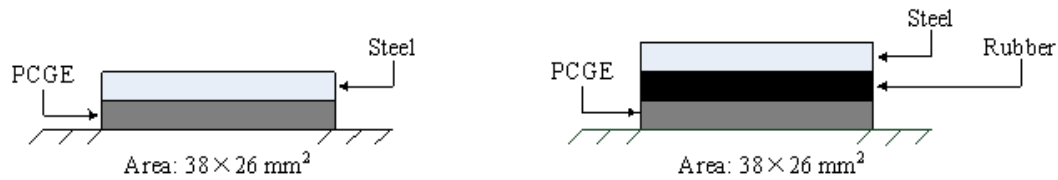
(a) 고무판을 사용하지 않았을 때



(b) 고무판을 사용했을 때

그림 2.1.7 밑면 응력 분포도

- 그림 2.1.8는 실험에서 스틸 블록, 고무판, 압전-복합재료 발전 소자의 배열을 나타내는 간략도이다. 발전 소자의 전압을 정확하게 측정하기 위하여 낙하 실험 시스템은 균일한 충격력을 제공해야 한다. 그러므로 발전 전압을 측정하기 전에 먼저 낙하 실험 시스템이 제공하는 충격력을 검토 하였다.



(a) 고무를 사용하지 않는 경우

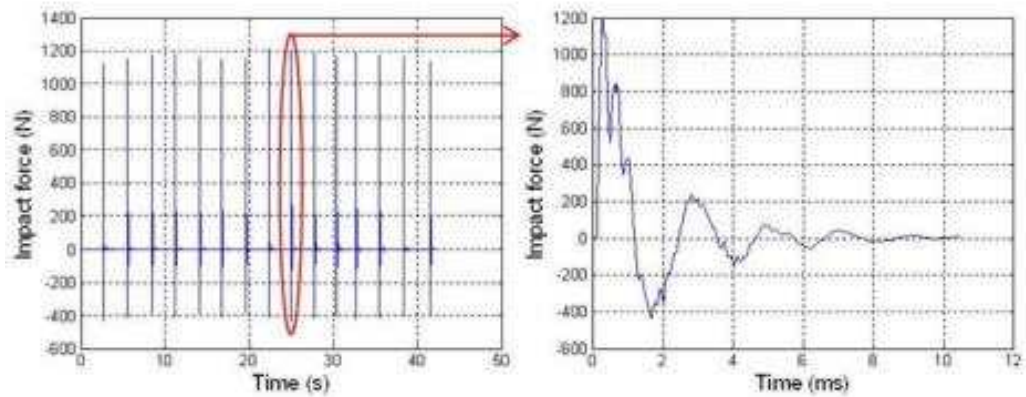
(b) 고무를 사용하는 경우

그림 2.1.8 강철 블록, 고무 및 PCGE의 배치도

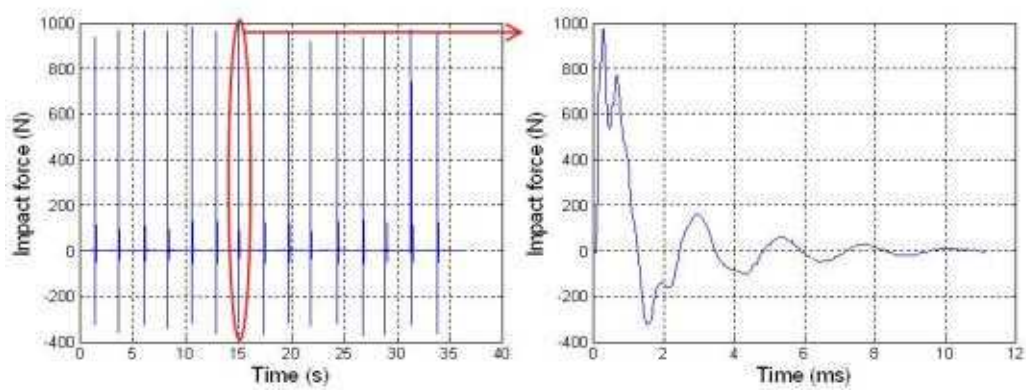
○ 표 2.1.5는 실험의 초기 조건을 나타냈고 그림 2.1.9은 충격력 측정 결과를 보여 준다. 이 실험에서는 빔 로드 셀을 사용하여 충격력을 측정하였으며, 다중 충격 현상으로 충격력이 양수 또는 음수의 값이 되었다. 양수의 힘은 로드 셀이 충격을 받으면서 압축하여 측정된 힘이고 음수의 힘은 로드 셀이 인장되면서 측정된 힘이다. 발진 소자는 주로 압축력을 받아 압축되면서 전압을 출력하게 되고 음수의 힘은 발진 소자의 발진 성능에 영향을 주지 않는다. 충격력은 15번씩 측정 했고 결과적으로 보면 균 일한 충격력을 제공할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 그림 2.1.9을 보면 고무판을 사용하는 경우에 최대 충격력은 고무판을 사용하지 않는 경우의 최대 충격력 보다 작지만 확대한 그림을 보면 더욱 매끄러운 결과를 보여 주고 있다. 더욱 정확한 결과를 얻기 위하여 MATLAB 소프트웨어를 사용하여 충격량을 계산하였다. 고무판을 사용하지 않은 경우에 최대 충격량은 0.68 N·s, 최소 충격량은 0.67 N·s, 표준 편차는 0.003 N·s 이고 고무판을 사용하는 경우에서 최대 충격량은 0.72 N·s, 최소 충격량은 0.69 N·s, 표준 편차는 0.001 N·s 이다. 고무판을 사용하는 경우에 충격량이 고무판을 사용하지 않는 경우 보다 약간 큰 값으로 나타나는데 그것은 충격력이 작용하는 시간이 증가하기 때문에 이런 현상을 발생하게 되는 것으로 추측된다.

표 2.1.5 실험 조건

Device name	Value
The Mass of Loading Part	M=0.14 kg
The Dropping Height	H=460 mm
Load Cell	Capacity: 200 kgf Resolution: 1/3000
Sampling Frequency	F=25 kHz



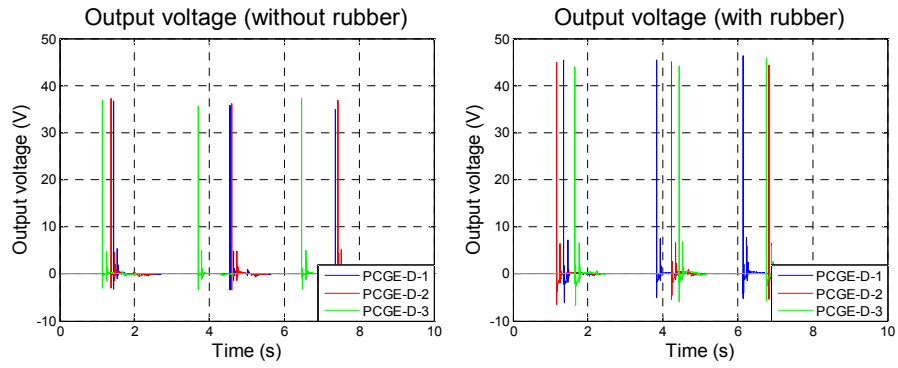
(a) 고무판을 사용하지 않는 경우



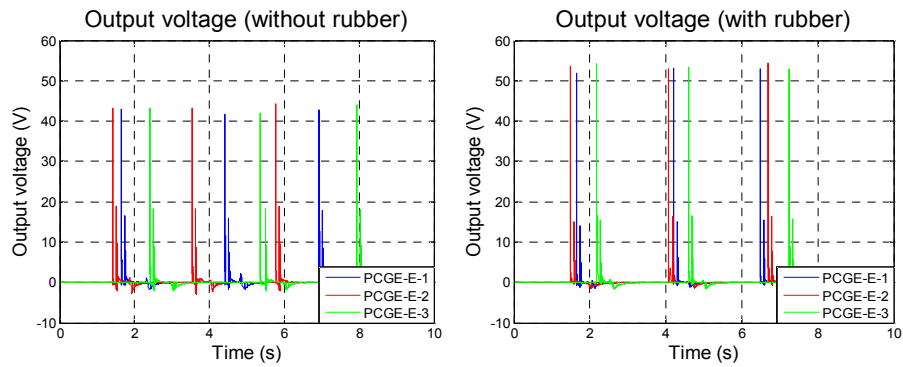
(b) 고무판을 사용하는 경우

그림 2.1.9 충격력 실험 결과

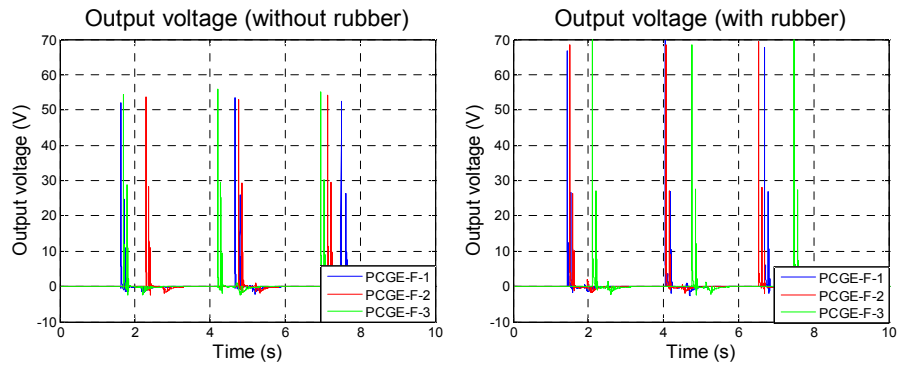
- 실험 결과의 정확성을 높이기 위하여 각 적층 형태의 압전-복합재료 발진 소자를 여러 개 만들어 동일한 실험 조건하에서 발진 소자의 출력 전압을 측정하고 결과를 비교했다. 그림 2.1.10은 발진 소자가 고무를 사용하지 않는 경우와 사용하는 경우에서 측정된 출력 전압 결과를 보여 주었다. 두 경우에 대한 결과를 보면 발진 소자가 출력하는 피크 전압의 크기는 PCGE D, E, F의 적층 형태로 증가하는 것을 알 수 있다. 이 결과는 이론적으로 계산하여 예상된 결과와 동일한 경향을 보여 줌으로써 식 2.1.6, 2.1.7의 실용성을 확보하였다.



(a) PCGE-D



(b) PCGE-E



(c) PCGE-F

그림 2.1.10 출력 전압

- 표 2.1.7에서 이론적으로 계산된 결과와 실험 결과를 나타내었다. 표에 나타난 퍼센트 수는 D형의 결과와 비교하는 것을 의미한다. 고무를 사용하는 경우는 사용하지 않는 경우와 비슷한 비율로 증가하는 것을 알 수 있다.

표 2.1.6 이론적 계산 결과와 실험 결과

PCGEs		Effective Piezoelectric Coefficient (10 ⁻¹² mV-1)	Dielectric Coefficient (10 ⁻⁹ Fm ⁻¹)	Effective Voltage Coefficient (10 ⁻³ VmN)	Average Output Voltage (V)		
		d_{33}^{eff}	ϵ_{33}^T	g_{33}^{eff}	without rubber	with rubber	
PCGE-D	1				35.7	45.7	
	2	356	33.7	10.6 (-)	36.7 (-)	44.7 (-)	45 (-)
	3				36.7	44.6	
PCGE-E	1				42.3	52.6	
	2	381	29.1	13.1 (23.6% ↑)	43.6 (18.1% ↑)	53.6 (18.2% ↑)	53.2 (18.2% ↑)
	3				43	53.5	
PCGE-F	1				52.7	67.9	
	2	406	28.3	14.3 (34.9% ↑)	53.8 (47.8% ↑)	68.8 (52.7% ↑)	68.7 (52.7% ↑)
	3				55.2	69.4	

- 또한 발전 소자 표면에 작용하는 힘과 출력 전압과의 관계를 확인하기 위하여 다양한 낙하 높이에서 실험을 수행하였다. 그림 2.1.11에서 출력 전압은 작용하는 힘에 의해 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

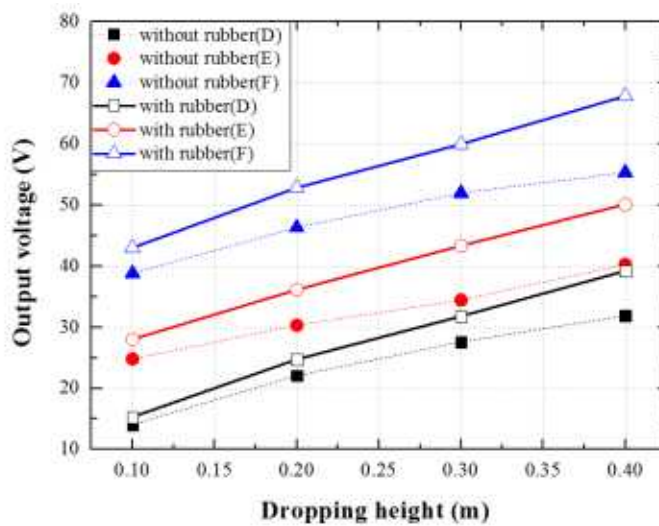


그림 2.1.11 다양한 낙하 높이와 출력 전압

- 지금까지의 출력 전압은 개방 회로에 대한 전압으로 실제 응용에서는 출력 단자에 부하 저항(Load Resistance)이 걸리게 된다. 따라서 출력 단자에 저항을 장착했을 때의 전압이 실제로 중요한 역할을 하게 된다. 이를 통하여 평균 일률 (Average Power)을 식과 같이 계산할 수 있다.

$$P = \frac{V^2}{2R} \quad (2.1.8)$$

○ 그림 2.1.12와 표 2.1.8은 실험결과를 나타내었다. 낙하 실험 시스템에서 부하 저항이 $1\text{ k}\Omega$ 에서 최대 출력 일률을 나타내었다. 또한 PCGE-F는 최대 출력 전압과 일률을 나타내었는데 이는 위에 이론적으로 예측한 결과와 같다.

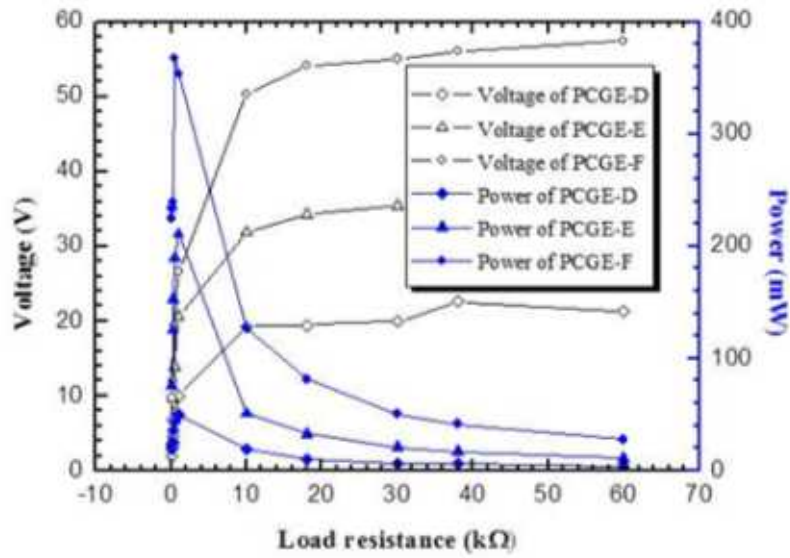


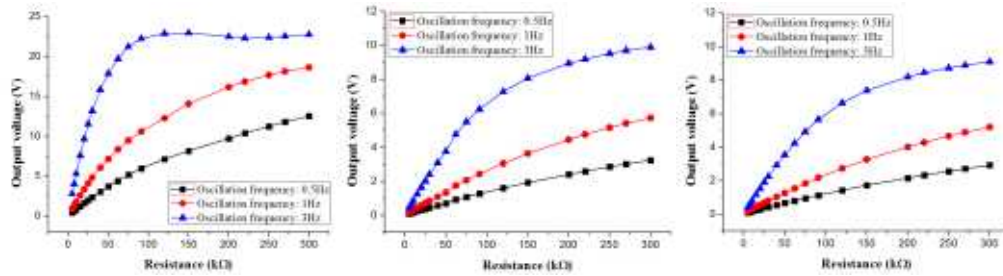
그림 2.1.12 다양한 낙하 높이와 출력 전압

표 2.1.7 출력전압과 평균 일률

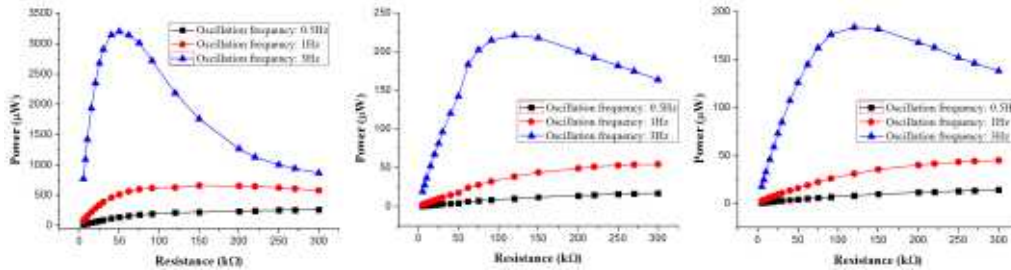
		PCGE-D	PCGE-E	PCGE-F
Peak power	P (mW)	100	211	367
Voltage	V (V)	10	20	26
Resistance	R ($\text{k}\Omega$)	1	1	1

7. 일률 계산

- 더욱 정확한 실험결과를 얻기 위해서 동적만능시험기를 사용하여 실험을 수행하였다. 그림 2.1.12에서 압전-복합재료 발전소자(PCGE-F)가 변동하중이 0 kN일 때의 출력 전압과 평균 일률 계산 결과를 나타내었다. 결과를 보면 진동수가 증가하면서 출력전압과 평균 일률은 증가되고 고정하중이 감소되면 출력전압과 평균 일률은 감소되는 것을 알 수 있다. 또한 고정하중이 일정한 정도까지 증가하면 출력 전압은 변하지 않은 것을 예측 할 수 있다(고정하중이 100 kN과 200 kN의 출력전압은 비슷함).



출력 전압



평균 일률

그림 2.1.12 출력 전압 및 평균 일률

- (왼쪽 그림): 고정하중=0 kN
- (중간 그림): 고정하중=100 kN
- (오른쪽 그림): 고정하중=200 kN

제2절 d₃₃ 모드 압전-복합재료 소자의 내구성 시험

1. 모터 구동 레버 시스템 설계

모터 구동 레버 시스템의 목적은 압전 재료에 충격력을 규칙적으로 가하여 PCGE에 균일한 출력 전압을 발생하는데 있다. 시스템에서 발생하는 충격력의 크기는 슬라이딩 바의 위치를 바꾸거나 스프링 강성 또는 질량을 증감시킴으로써 조절 가능하다. 충격력의 주파수는 최대 2백만회를 수행하여야 하는 실험의 총 시간을 줄이기 위하여 최대한 높게 하도록 설계하였다. 충격력의 주파수를 최대한 하기 위해서는 모터의 토크(Holding Torque)와 레버 끝에 있는 질량의 낙하 시간과의 관계를 잘 조절하여야 한다. 끝단 질량의 낙하 시간은 모터의 회전주기보다 작아야 한다. 다음 절에 질량의 낙하 시간과 모터 회전주기 사이의 관계를 이론적으로 설명한다. 결론적으로 시스템은 최대 4 Hz로 최대 2 MPa의 응력을 발생하도록 설계되었다.

모터 구동 레버 시스템의 CATIA 모델을 그림 2.2.1에 나타내었으며, 주요 구성품은 다음과 같다:

- **모터**: 모터, 구동 드라이버, 제어기가 시스템을 주기적으로 회전시킨다.
- **캠**: 슬라이딩 바를 위, 아래로 움직이도록 한다.
- **레버 바**: 스프링, 슬라이딩 바, 끝단질량으로 구성되어 있다. 충격력이 PCGE에 주기적으로 작용할 수 있도록 한다. 또한, 두 개의 수직 바를 사용하여 레버 바가 위, 아래로만 움직이도록 설계하였다.
- **스프링**: 충격 후의 진동을 줄여 주고 PCGE에 작용하는 접촉력을 증가시킨다. 레버 바와 시스템 베이스 사이에 스프링을 설치하였다.
- **질량**: 가해지는 응력을 조절하는데 사용된다.

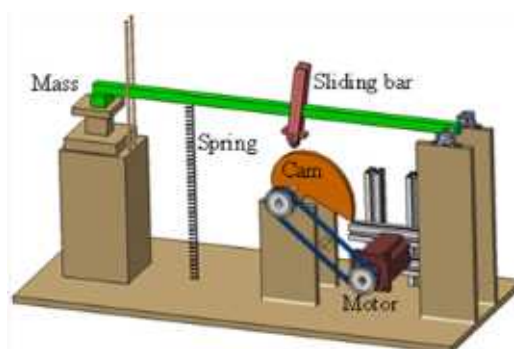


그림 2.2.1 모터 구동 레버 시스템

또한, 타이밍 벨트를 사용하여 회전 운동(Revolute Motion)을 모터에서 캠으로 전달되도록 하였다. 또한 휠을 통하여 구동력이 캠에서 레버로 전해진다.

가. 이론적인 계산

모터 구동 레버시스템의 목적은 충격력을 주기적으로 만들어 내는 것이다. 2백만 회라는 긴 실험 시간을 고려해 보면 주파수가 높을수록 우수한 설계라 할 수 있다. 높은 낙하 주파수를 얻기 위한 장애 요소는 모터 토크가 제한되어 있다는 것이다. 또한 낙하 주파수는 끝단질량의 낙하 시간에 제한된다. 그림 2.2.2에 나타난 시스템의 동적 모델을 가지고 시스템이 가질 수 있는 최대 주파수를 구하기 위하여 이론적인 계산을 수행하였다.

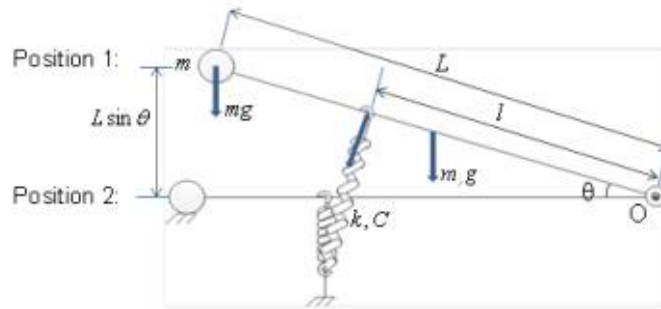


그림 2.2.2 모터 구동 레버 시스템의 기구학적 분석

점O에서 모멘텀 식:

$$\Sigma M_o = I_o \ddot{\theta} \quad (2.2.1)$$

막대의 단면은 직사각형이며 질량이 m_r 이라면 식 (2.2.1)은 다음과 같다.

$$-(C\dot{\theta}) - (kl\theta)l - (mg \cos \theta)L - (m_r g \cos \theta)\frac{L}{2} = (mL^2 + \frac{m_r L^2}{3})\ddot{\theta} \quad (2.2.2)$$

각 θ 가 작다고 가정하면 식 (3.2.2)는 다음과 같이 선형화 될 수 있다.

$$(m + \frac{m_r}{3})L^2\ddot{\theta} + C^2\dot{\theta} + kl^2\theta + (m + \frac{m_r}{2})gL = 0 \quad (2.2.3)$$

표 2.1에 있는 시스템 제원을 식 (2.2.3)에 대입하면 식 (2.2.4)를 얻는다.

$$0.217\ddot{\theta} + 0.128\dot{\theta} + 12.8\theta + 2.205 = 0 \quad (2.2.4)$$

식 (3.2.4)의 근은 식 (3.2.5)로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = e^{-0.5t} [0.013\sin(7.67t) + 0.347\cos(7.67t)] - 0.173 \quad (2.2.5)$$

따라서 질량이 $\theta = \theta_o$ 에서 $\theta = 0^\circ$ 로 떨어지는 시간은 다음을 풀면 된다.

$$e^{-0.5t} [0.013\sin(7.67t) + 0.347\cos(7.67t)] - 0.173 = 0 \quad (2.2.6)$$

식 (2.2.6)의 해는 $t = 0.1365$ s이다.

표 2.2.1 모터 구동 레버 시스템의 설계 변수들

m_r (kg)	m (kg)	k (N/m)	C (N.s/m)	L (m)	l (m)	g (m/s ²)	θ_0 (⁰)
0.05	0.2	20	0.2	1	0.8	9.8	10

캠이 슬라이딩 바에 접촉한 후 떨어 질 때까지의 사잇각은 120°, 즉 모터의 회전 주기의 3분의 1 정도이다. 캠이 슬라이딩 바에서 떨어지고 나면 질량이 아래로 떨어져 PCGE에 충격을 가하게 된다. 따라서 질량이 PCGE에 충격을 적절히 가하기 위해서는 질량의 낙하 시간이 모터 회전 시간의 3분의 2보다 커야 한다. 이러한 생각으로부터 다음과 같은 구속 조건을 얻게 된다:

$$\frac{2T_{motor}}{3} > T_{dropping} \quad (2.2.7)$$

모터의 회전 주파수가 4.8 Hz 보다 작으므로 ($f_{motor} < 4.8$ Hz), 시스템의 최대 주파는 대략 4 Hz 정도가 될 것이다. 이러한 이론적인 값을 검증하기 위하여 ADAMSTM를 이용하여 해석을 수행하였다.

나. 최대 회전 주파수 결정을 위한 ADAMSTM해석

여기에서는 ADAMSTM를 이용한 모터 구동 레버 시스템의 기구학적인 해석을 수행하였다.

먼저 CATIA를 이용하여 시스템을 모델링하고 이를 기구학적 해석을 위하여 한 ADAMSTM에 import하였다. 그림 2.2.3에 ADAMSTM/View에서 나타낸 모터 구동 레버 시스템을 나타내었다.

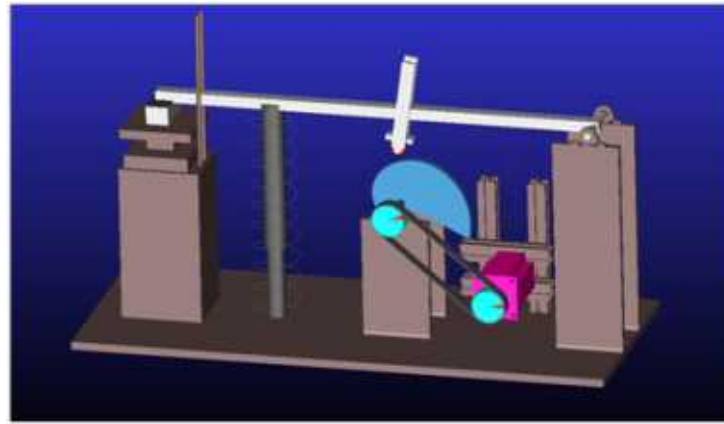


그림 2.2.3 ADAMSTM을 사용한 모터 구동 레버 시스템 모델링

이 해석에서는 충격력과 최대 낙하 주파수가 주요한 관심사이며, 해석을 통하여 결정된 값을 실험과 비교하였다. 모터 구동 레버 시스템의 연결관계를 표시하기 위하여 그림 2.2.4와 2.2.5에 기계적인 구조와 기구학적인 스킴을 2차원으로 나타내었다.

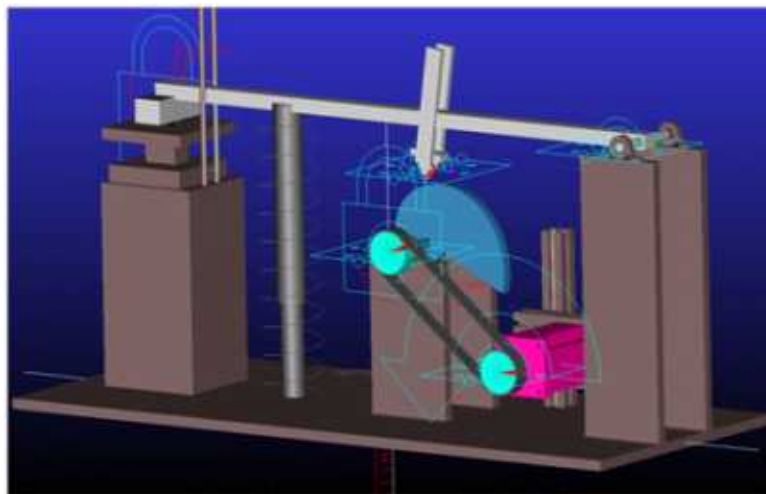


그림 2.2.4 ADAMSTM에서의 기계적인 구조

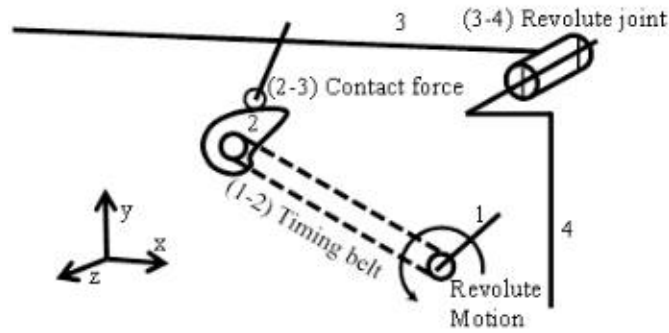


그림 2.2.5 차원 모델에서의 기구학적 스킴

기구학적인 스킴을 보면 동력 전달이 어떻게 일어나는지 알 수 있다. 회전운동 (Revolute Motion)은 모터의 회전을 나타내기 위하여 사용하였다. 타이밍 벨트 시스템은 모터에서 캠 사이의 동력전달 운동을 나타내기 위하여 사용하였다. 게다가 레버 바는 베이스 축을 자유롭게 회전 가능하다. 끝으로, 접촉력을 나타내기 위하여 두 개의 접촉 함수를 정의하였다. 첫 번째는 캠과 레버 바 사이에, 두 번째는 질량과 PCGE 사이에 정의하였다.

해석에 사용된 조건은 표 2.2.2에 나타내었고 접촉력과 질량의 변위를 주된 결과로 나타내었다.

표 2.2.2 ADAMS 해석 조건

Mass (kg)	0.25
Frequency of motor (Hz)	1
Stiffness of Spring (N/m)	20
Damping coefficient (N · s/m)	0.2
Gravity (m/s^2)	9.8

충격력 결과를 그림 2.2.6에 나타내었는데 충격력의 최대값은 1500N이었다. PCGE의 크기가 36 mm x 24 mm x 0.25 mm이기 때문에 가해진 응력은 1.7 MPa이다. 실험적으로 계측된 충격 응력은 1.01 MPa이었다.

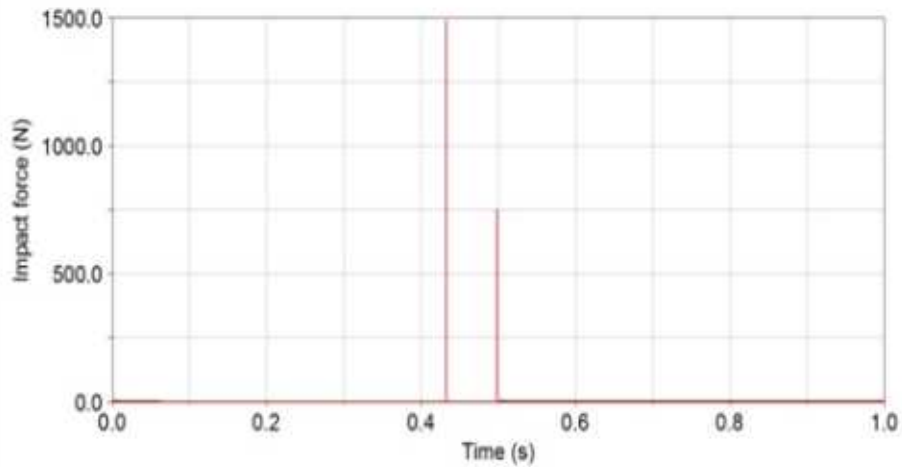


그림 2.2.6 PCGE에 작용하는 충격력

최대 구동 주파수를 결정하기 위하여 모터의 속도를 회전 운동 함수를 사용하여 회전 진동수를 증가시켜 가면서 캠이 다음 주기의 레버바에 접촉하기 전에 질량이 접촉해야 한다는 조건이 만족하는지 체크하였다. 해석 결과를 그림 2.2.7에 나타내었다.

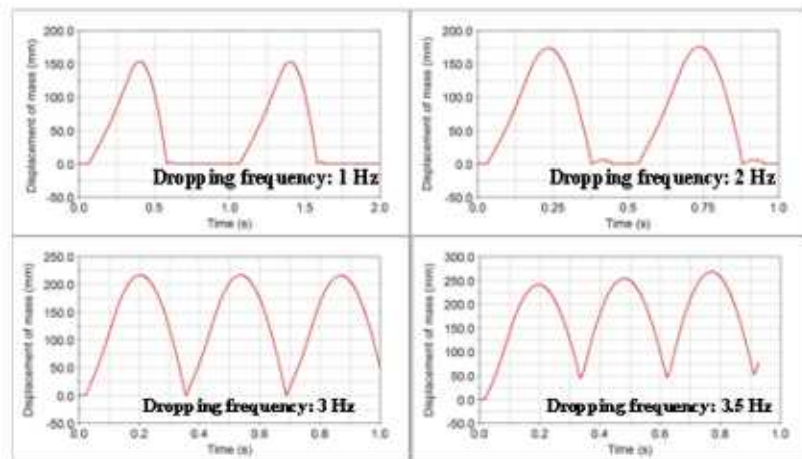


그림 2.2.7 낙하 주파수 증가에 따른 질량의 변위 변화

해석결과에 따르면 3 Hz까지는 시스템이 잘 구동되었다. 그러나 3.5 Hz 이상에서는 질량이 PCGE에 충격되기 전에 캠이 레버 바에 접촉하게 된다. 해석 결과에 따르면, 모터 구동 레버 시스템의 최대 구동 주파수는 3 Hz라고 할 수 있다. 앞 절의 이론적인 값은 4 Hz이다. 이는 이론적인 값을 계산할 때는 θ 각이 작다고 가정하였으나 실제로는 10° 정도로 작지 않기 때문이라 판단된다.

2. 실험 장치

실험 장치는 모터 구동 레버 시스템, 로드 셀, 출력 전압 기록 시스템으로 이루어져 있다. PCGE에 작용하는 충격력은 로드 셀을 이용하여 계측되고 NI compact DAQ (NI cDAQ-9178, NI)를 사용하여 기록된다. PCGE에서 생성되는 출력 전압은 Lab View 기반의 데이터 획득 시스템에 기록된다. 그림 2.2.8은 하중전달 메커니즘, 고무 패드, PCGE, 로드 셀 및 모터 구동 레버 시스템으로 이루어진 실험 장치를 나타낸다. 실험의 목적은 PCGE가 파손 또는 성능 저하 없이 얼마나 많이 전압을 생성할 수 있는지를 확인하는 것이다. 응력이 일정하게 유지되는 상태에서 출력 전압을 기록하여 성능 저하가 일어나는 시점을 결정한다. PCGE의 크기는 36 mm x 24 mm x 0.25 mm이다.

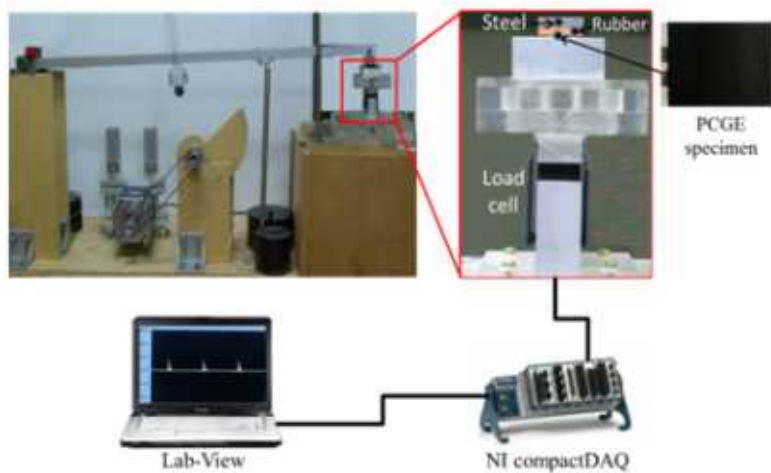


그림 2.2.8 내구성 시험을 위한 실험 장치화

PCGE의 내구성 시험을 위해, 모터 구동 레버 시스템 외에 하중 전달 메커니즘이 필요하다. 강철 블록과 고무 패드로 되어 있는 이 메커니즘의 목적은 PCGE 위에 하중을 균일하게 분포시키는 것이다. ANSYS를 사용하여 응력 해석을 수행함으로써 최적의 강철 블록과 고무 패드의 형태를 결정하고자 하였다. 직사각형 및 평행사변형 형태의 강철 블록을 고무 패드 위에 놓고 충격력에 따른 응력 분포를 관찰하였다. 그 결과 강철 블록의 형태에 따라서는 응력 분포가 큰 차이가 없으나, 고무의 사용 유무에 따라서는 차이가 남을 확인하였다. 이러한 해석 결과를 포트 베어링을 설계할 때 초과하중 또는 외부 환경 영향으로부터 PCGE를 보호하기 위해 그림 2.2.9에 나타낸 것과 같이 하중 전달 메커니즘을 사용하였다.

그림 2.2.10에는 내구성 실험에 사용한 하중 전달 메커니즘을 나타내었다. PCGE에 수평 방향으로 작용하는 변위 때문에 고정이 잘 되지 않는 문제가 발생하였으며, 이를 해결하기 위하여 그림 3.2.11에서와 같이 양면 테이프를 사용하여 경도가 50 HS (분홍색 고무) 및 70 HS (검정색 고무)인 고무를 고정하였다.



그림 2.2.9 포트 베어링을 이용한 하중 전달 메카니즘

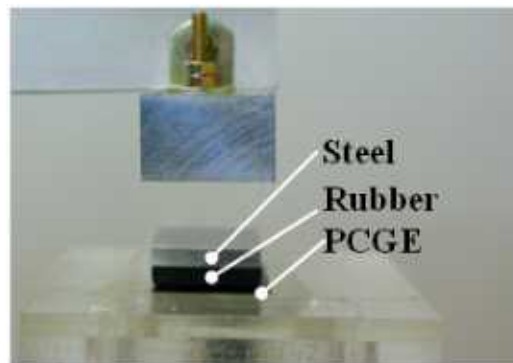


그림 2.2.10 하중 전달 메카니즘을 위한 실험 장치

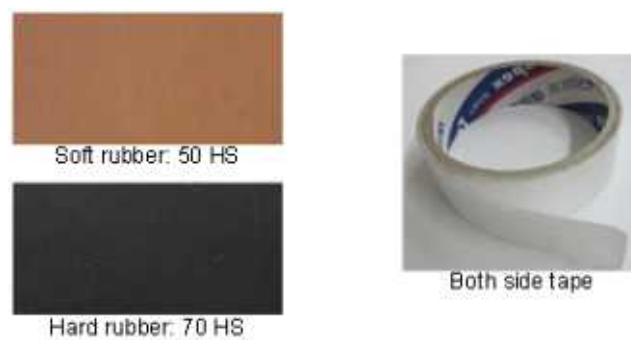


그림 2.2.11 하중 전달 메커니즘에 사용된 고무와 양면 테이프

3. 결과 및 토의

가. 모터 구동 레버 시스템의 충격력

압전-복합재료 발전 소자의 수명을 실험적으로 연구하면서 모터 구동 레버 시스템의 안정성이 가장 중요한 문제였다. 즉 모터 구동 레버 시스템의 신뢰성을 담보하여야 하므로 이 시스템의 응답을 고찰하였다. 표 2.2.3에는 실험에 사용된 모터 구동 레버 시스템의 사양을 나타내었다.

표 2.2.3 모터 구동 레버 시스템의 제원

Device	Name	Value
	Mass	0.25 kg
	Dropping frequency	1 Hz
	Stiffness of spring	20 N/m
	Load cell	Capacity: 200 kgf Resolution: 1/3000
	Sampling frequency of the NcDAQ-9187	25 kHz

그림 2.2.12와 그림 2.2.13은 PCGE에 가해지는 압력이 0.76 MPa일 때 충격력과 전압의 시간 이력을 나타내고 있다. 충격력의 평균은 680 N (표준편차 8.78 N), 출력전압은 52.83 V (표준편차 0.47 V)로 측정되었다. 그림 2.2.12의 결과를 보면 설계, 제작된 모터 구동 레버 시스템의 충격력이 매 번 일정하므로 신뢰할 수 있는 것으로 판단된다.

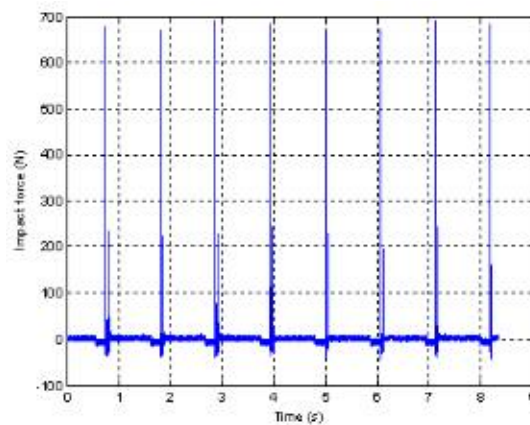


그림 2.2.12 충격 응력이 0.76 MPa일 때 PCGE-F의 충격력-시간 이력

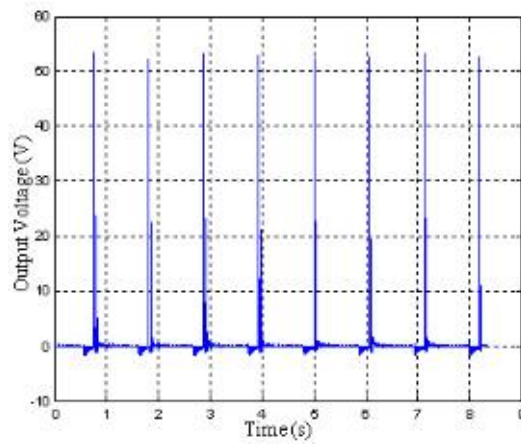


그림 2.2.13 충격 응력이 0.76 MPa일 때 PCGE-F의 출력 전압

PCGE의 출력 파워를 계산하기 위하여 그림 2.2.14와 같은 회로를 구성하였다. 압전 재료는 AC 발전기, 커패시터, 저항으로 이루어진 것으로 설명된다. 부하 저항은 출력 파워를 고찰하기 위하여 사용하였다.

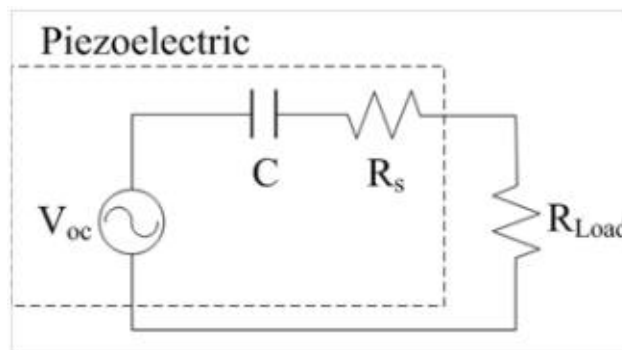


그림 2.2.14 출력 일률 계측을 위한 전기 회로

출력 파워는 다음의 식으로 표현된다.

$$P = \frac{V^2}{2R_{LOAD}} \quad (2.2.8)$$

여기에서 V 는 부하 전압, R_{Load} 는 부하 저항을 나타낸다. 그림 2.2.15는 여러 가지 부하 저항에 따른 출력 전압과 출력 파워의 변화를 나타내었다. PCGE-A, PCGE-B, PCGE-C, PCGE-D, PCGE-E와 비교해 보면 PCGE-F가 가장 큰 출력 파워를 발생시킨다.

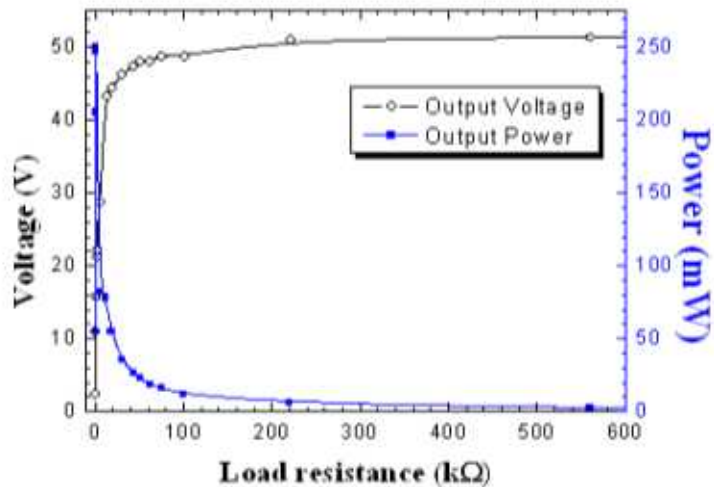


그림 2.2.15 PCGE-F의 출력 일률

나. 내구성 결과

여러 가지 응용 조건에 따라 PCGE는 열적, 전기적, 또는 기계적인 하중을 받게 된다. 본 연구에서는 기계적 하중이 PCGE의 내구성에 미치는 영향을 고찰하였다. PCGE의 내구성 감소를 현상을 규명하기 위하여 출력 전압이 낮아 질 때까지 계속 충격력을 가하였다. 그림 2.2.16은 부가되는 응력에 따른 최대 출력 전압을 보여 주고 있으며, 그림 2.2.17에는 2백만 회까지 충격력을 가하는 동안 전압의 변화를 나타내었다.

식 (1)에 따르면 PCGE로부터 발생하는 전압은 가해지는 하중에 비례하게 되는데 그림 2.2.16에서 하중과 전압 관계가 선형임을 확인할 수 있다. 그림 2.2.17을 보면 가해지는 충격력이 클 때 충격 횟수가 증가함에 따라 PCGE의 출력 전압이 감소하게 된다. 즉 가해지는 응력이 0.52 MPa이나 0.76 MPa일 때에는 PCGE가 2백만회까지 출력 전압을 생성하나, 응력이 큰 0.92 MPa이나 1.01 MPa일 때에는 출력전압이 지속적으로 감소하여 약 80만회 정도에서 더 이상 출력전압을 생성하지 못함을 확인할 수 있다.

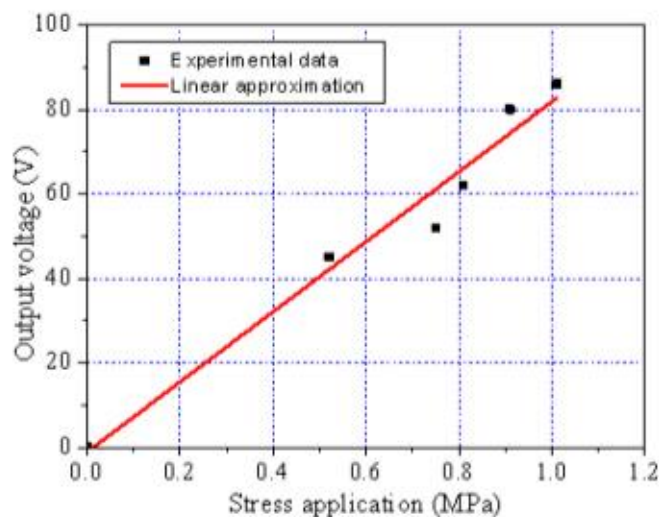


그림 2.2.16 전압-응력 사이의 관계

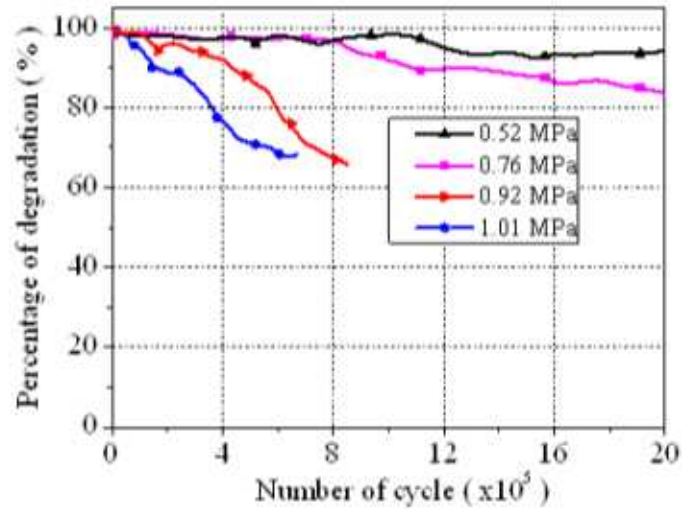


그림 2.2.17 가진 회수에 따른 PCGE의 성능 변화

PCGE는 그림 2.2.18에 나타난 바와 같이 교량의 베어링 시스템에 삽입되어 전력 발생 또는 과적하중 모니터링에 사용할 예정이다. 교량의 베어링 시스템의 최소 사용횟수는 2백만회에 이르고, 안에 삽입되는 PCGE도 최소 2백만회를 견디며, 전력을 생성하여야 한다. 따라서 PCGE에 가해지는 응력이 0.76 MPa 이하가 되어야 함을 확인할 수 있다.

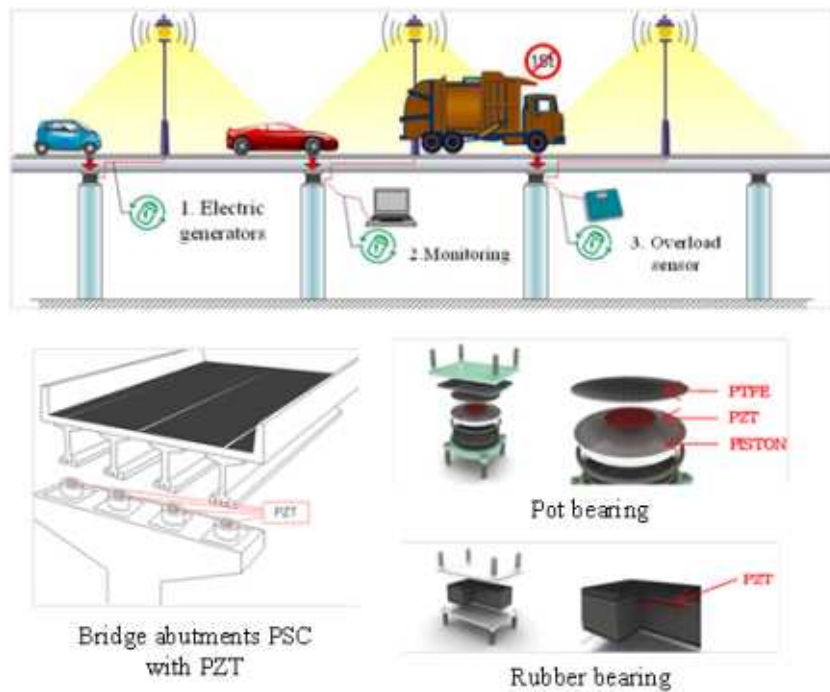


그림 2.2.18 교량의 베어링 모델

제3절 PCGE 하중재하별 발생전압 측정 실험

자연계에 존재하지만 사용되지 못하고 버려지는 에너지를 효과적으로 채집하여 배터리를 충전하거나 전기장치에 전기에너지를 공급하는 에너지 하베스팅(energy harvesting)이라 한다. 압전재료는 물체의 움직임이나 진동으로부터 에너지를 채집하는 주요한 재료로 널리 사용되고 있다. 그러나 기존 PZT 압전의 취성파괴와 낮은 에너지 효율성인 문제를 개량하고자 압전-복합재료 발전소자(Piezo-Composite Generating Element, 이하 PCGE)가 구남서 등에 의해 개발되었다[Goo, 2009].

이 과업에서 구남서 등이 개발한 PCGE-F를 제안된 교량 받침에 삽입하여 받침의 추가적인 기능이 발휘할 수 있는지 실험적으로 성능을 검증하고자 한다. 제2장 제1절에서 표 2.1.8에서 확인할 수 있는 바와 같이 PCGE-F가 가장 높은 peak power와 voltage를 나타내므로 1차적으로 실험결과를 통해 교량 받침에의 적용에 있어 충분한 성능을 발휘할 수 있는지 그 대상으로 실험을 수행하였다.

이 과업의 목적달성을 위해 가해지는 하중에 따른 PCGE의 발전량을 측정하는 것이 우선되어야 한다. 이를 위해 먼저 충격에 의한 PCGE-F 자체의 발전량을 확인하였다. 이를 위해 간단한 모형실험을 수행하여 낙하 질량체를 이용한 충격하중에 따른 발전량을 측정하였다.

그 다음 포트받침을 보다 더 앞서 언급한 모형실험 셋팅을 이용하여 PCGE가 포트받침 내에 내장된 상태를 모사하여 고정하중이 작용하고 있는 상태에서 충격하중과 발전량의 상관관계를 확인하는 실험을 실시하였다.

충격실험은 하중과 발전량의 상관관계를 확인하기 위한 사전실험으로서 그 둘 사이의 연관성을 명확히 확인할 수 있었다. 그러나 낙하물에 의한 하중은 지속시간이 짧고 충격량이 안정적이지 않아 상관관계를 정규화하는 데는 충분하지 못하였다. 이에 따라 PCGE가 내장된 축소 교량 받침을 제작하였고, PCGE의 최적 설치 위치를 알기 위해서 위치에 따른 발전량 실험을 진행하였다. 그리고 포트 받침에 가해지는 실제 차량하중을 보다 더 현실적으로 모사하여 동적 UTM(Dynamic Universal Testing Machine, 동적만능재료시험기)을 이용한 동적실험을 수행하였다.

상기의 실험들을 통하여 동하중과 발생전기에너지와의 상관관계를 확인하였으며, 또한 이 관계가 초기 면압에 따라 어떻게 달라지는지를 확인하였다. 그리고 그 결과를 바탕으로 최종적인 포트받침을 설계 및 제작하였고, 면압에 따른 발전량을 확인하였다.

1. 충격실험 (모형실험)

모형실험은 앞의 그림 2.1.6과 같이 충격에 의한 PCGE-F 자체의 발진량을 확인하였다. 이를 위해 간단한 모형실험을 수행하여 질량체를 낙하하여 낙하높이에 따른 발진량을 측정하였다.

그림 2.3.1과 그림 2.3.2은 사용된 충격하중실험 시스템 개념도와 모형을 보여준다. 여기서 주요한 실험변수는 질량체의 질량, 낙하높이, PCGE-F 시편 위에 삽입된 고무판의 경도가 된다.

그림 2.3.3에서 나타난 PCGE-F 시편의 크기는 26×26 mm이며 내부에 삽입된 압전체의 크기는 24×24 mm 이다.

Linear guide의 높이(900 mm)의 제한으로 가할 수 있는 하중의 크기가 한정되어 있으므로 질량체의 질량을 다양하게 적용하여 보다 더 넓은 범위의 충격하중을 가할 수 있도록 하였다.

하중에 따라 PCGE 에서 발생하는 전압을 확인하고자 낙하 높이와 질량체의 무게, 고무판의 경도에 따른 모형실험을 실시하였다.

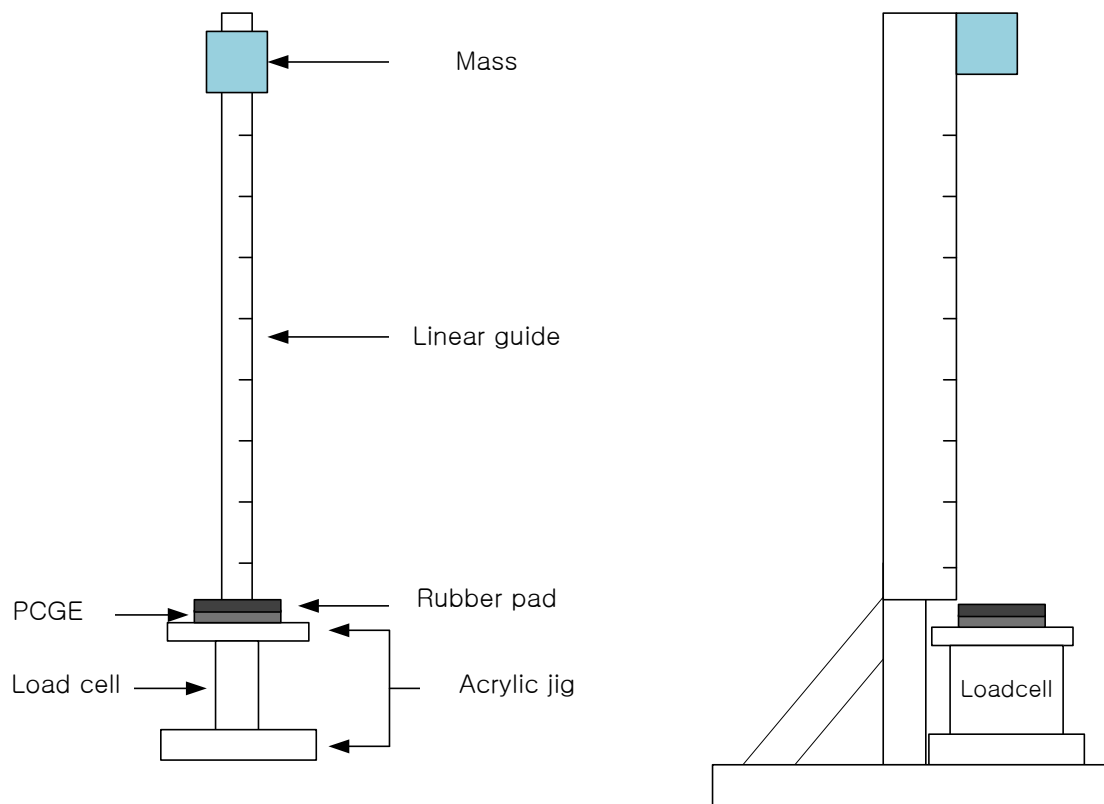


그림 2.3.1 충격하중실험 시스템 개념도

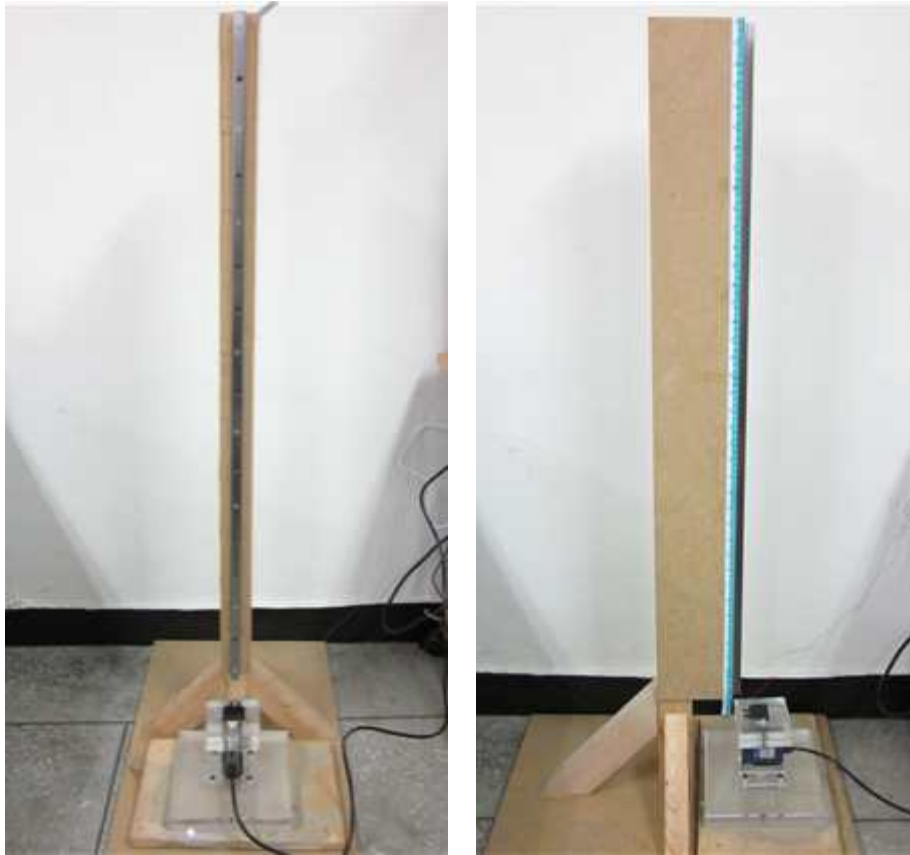


그림 2.3.2 충격하중실험 시스템

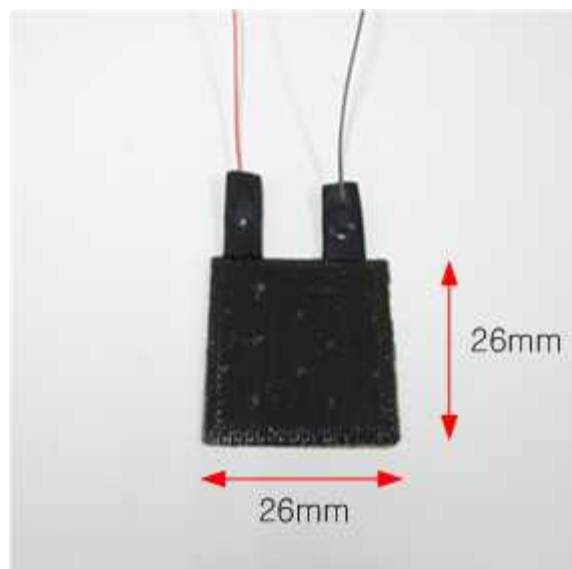


그림 2.3.3 충격시험용 PCGE-F 시편

가. 충격실험을 위한 계측장비선정

(1) Sampling frequency 결정

충격실험은 대단히 짧은 시간에 하중이 가해지고 Pulse형의 전압이 발생하므로 데이터의 손실이 없는 적절한 Sampling frequency를 결정할 필요가 있다. 그림 2.3.4 ~ 2.3.7는 디지털 오실로스코프를 이용하여 여러 Sampling frequency로 측정한 전압의 시간이력그래프이다. 500 kHz로 측정할 경우 상세한 시간이력그래프를 확인할 수 있지만, 과다한 양의 데이터를 저장하고 처리해야 하는 어려움이 있어 적절한 Sampling frequency를 결정하기 위해 다음과 같이 50 kHz, 25 kHz, 10 kHz로 Sampling frequency를 바꿔가며 측정한 결과를 비교하였다. 그 결과 Sampling frequency가 50 kHz 에서 500 kHz의 데이터 특성을 적절히 반영하는 것으로 나타났다. 따라서 Peak Voltage와 같은 실험데이터의 특성을 충분히 반영할 수 있는 Sampling frequency를 50 kHz로 결정하였다. 이에 따라 50 kHz의 Sampling frequency에 부합하는 사양을 가진 데이터수집장치 National Instruments사의 NI cDAQ-9178, NI-9225, NI-9237 장치를 선정하였다(그림 2.3.8).

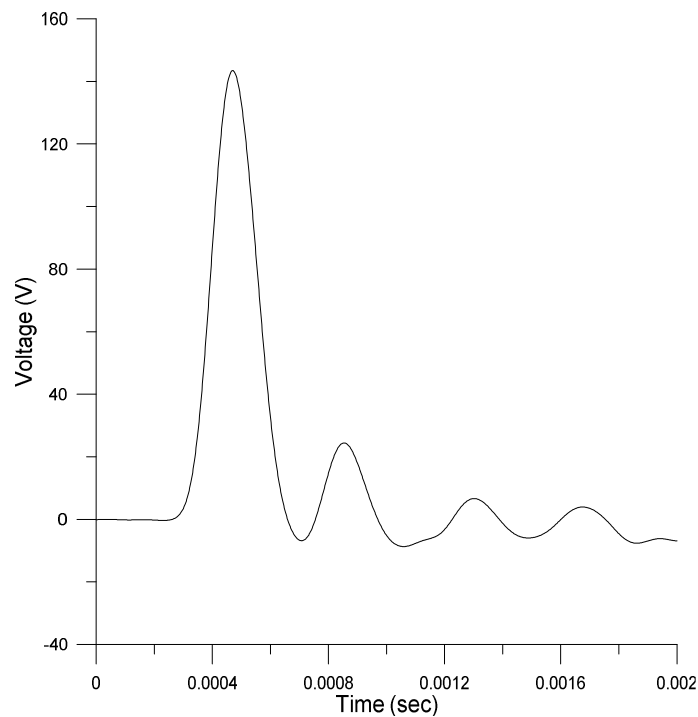


그림 2.3.4 Sampling frequency 500 kHz

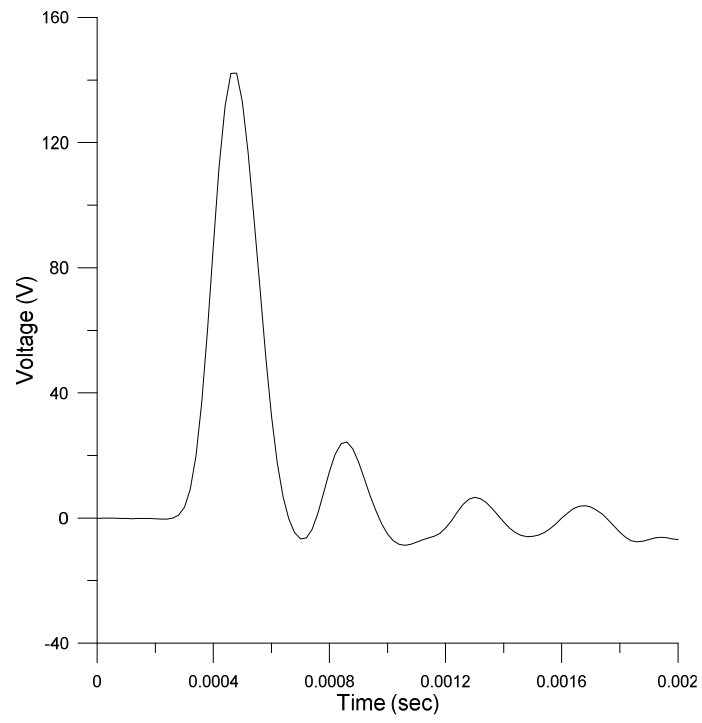


그림 2.3.5 Sampling frequency 50 kHz

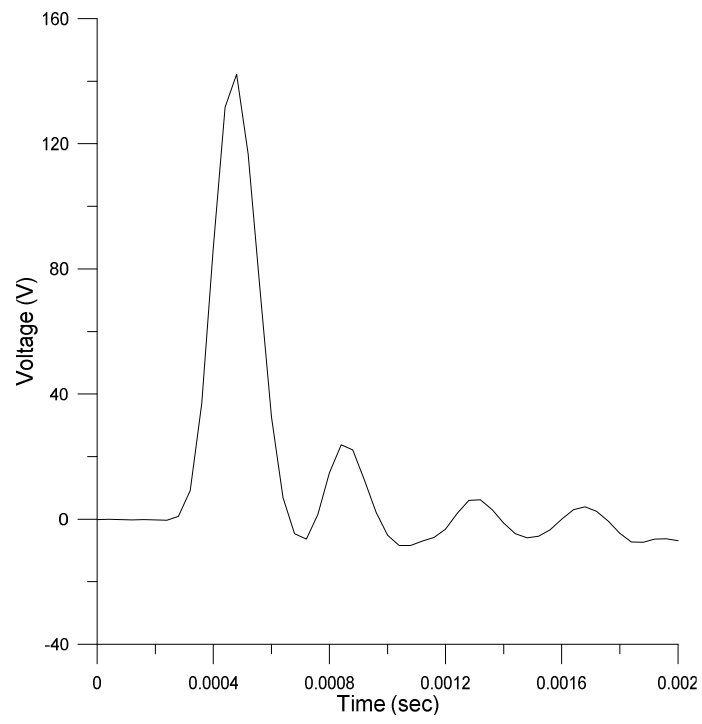


그림 2.3.6 Sampling frequency 25 kHz

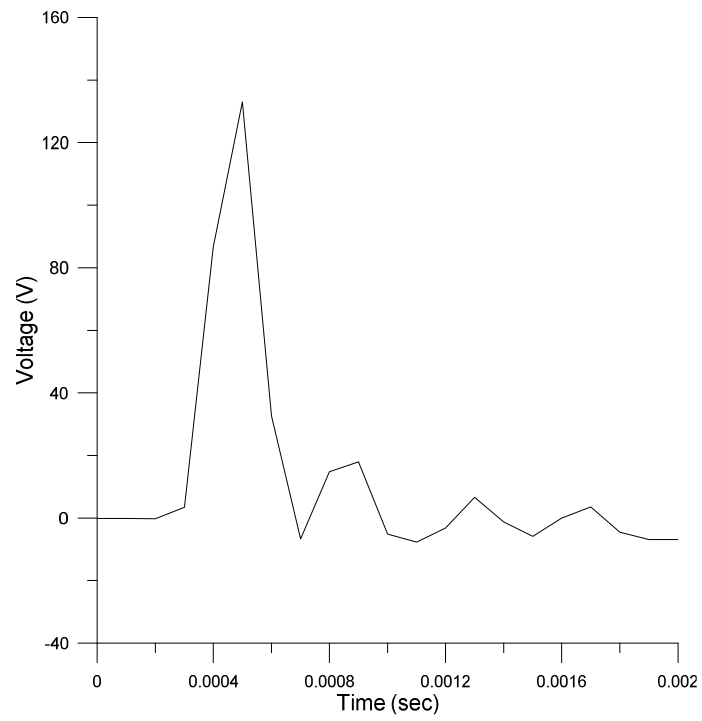


그림 2.3.7 Sampling frequency 10 kHz

(가) 데이터수집장치



NI cDAQ-9178



NI-9225



NI-9237

그림 2.3.8 데이터수집장치 (NI 보드 및 모듈)

표 2.3.1 데이터수집장치 사양 (NI cDAQ-9178)

제품	cDAQ-9178 (bord)
폼 팩터	CompactDAQ
슬롯 개수	8
총 사용 전력	15 W
입력 전압 범위	9 V, 30 V
해상도	32 비트
USB 스펙	USB 2.0 하이스피드(Hi-Speed)
데이터 유형 선택가능	디지털 출력, 카운터/타이머 입력, 아날로그 출력, 디지털 입력, 아날로그 입력

표 2.3.2 데이터수집장치 사양 (NI-9225)

제품	NI-9225 (전압 계측 모듈)
폼 팩터	CompactDAQ , CompactRIO
채널	3 , 0
해상도	24 비트
샘플 속도	50 kS/s
대역폭	24.56 kHz
최고 아날로그 입력 전압	300 V
최대 전압 범위	-300 V, 300 V
최고 전압 범위 정확도	0.034 V

표 2.3.3 데이터수집장치 사양 (NI-9237)

제품	NI 9237 (스트레인, 하중계측 모듈)
폼 팩터	CompactDAQ, CompactRIO
채널	4, 0
해상도	24 비트
샘플 속도	50 kS/s
최고 아날로그 입력 전압	25 mV/V
최대 전압 범위	-25 mV/V , 25 mV/V
최고 전압 범위 정확도	0.038 mV/V

(나) 로드 셀 센서



SB-500L, CAS



SMN-200, CAS

그림 2.3.9 로드 셀 센서

표 2.3.4 SB-500L (Load cell) 사양

Max. capacity	kgf	200 kgf
Rated output	mV/V	2.0 ± 0.005
Zero balance	mV/V	0 ± 0.02
Combined error	%	0.03
Repeatability	%	0.01
Creep for 30min.	%	0.03
Temperature effect on Zero Value	%/10℃	0.028
Output value	%/10℃	0.015
Excitation		
Recommended	V	10
Maximum	V	15
Resistance		
Input	Ω	430 ± 40
Output	Ω	350 ± 3.5
Insulation	M Ω	>2,000
Compensated temperature range	℃	-10 to +40
Operating temperature range	℃	-30 to +80

표 2.3.5 SMN-200 (Load cell) 사양

Max. capacity	200kgf
Rated output Zero balance	1.0 mV/V(1-5 kgf: 0.5 mV/V 0 ± 0.1 mV/V
Combined error Repeatability Temperature effect on Zero Value Output value	2.0%R.O. 1.0%R.O. 0.03%R.O./10℃ 0.05%R.O./10℃
Excitation Recommended Maximum Resistance Input Output Insulation	5 V 10 V 350 ± 3.5 Ω 350 ± 3.5 Ω >2,000 MΩ
Compensated temperature range Operating temperature range	-10 to +40℃ -40 to +70℃

(다) 질량체

앞서 언급한 바와 같이 충격하중실험의 주요한 실험변수는 질량체의 질량, 낙하높이, PCGE-F시편 위에 삽입된 고무판의 경도가 된다.

그러나 Linear guide의 높이(900 mm)의 제한으로 가할 수 있는 하중의 크기가 한정되어 있으므로 질량체의 질량을 다양하게 적용하여 보다 더 넓은 범위의 충격하중을 가할 수 있도록 하였다. 이에 따라 197 g(그림 2.2.10), 395 g(그림 2.2.11), 두 가지 종류의 질량체를 제작하여 높이를 변화시켜가며 폭넓은 크기의 충격하중을 가할 수 있었다.



그림 2.3.10 질량체 1개 (Mass 197 g)

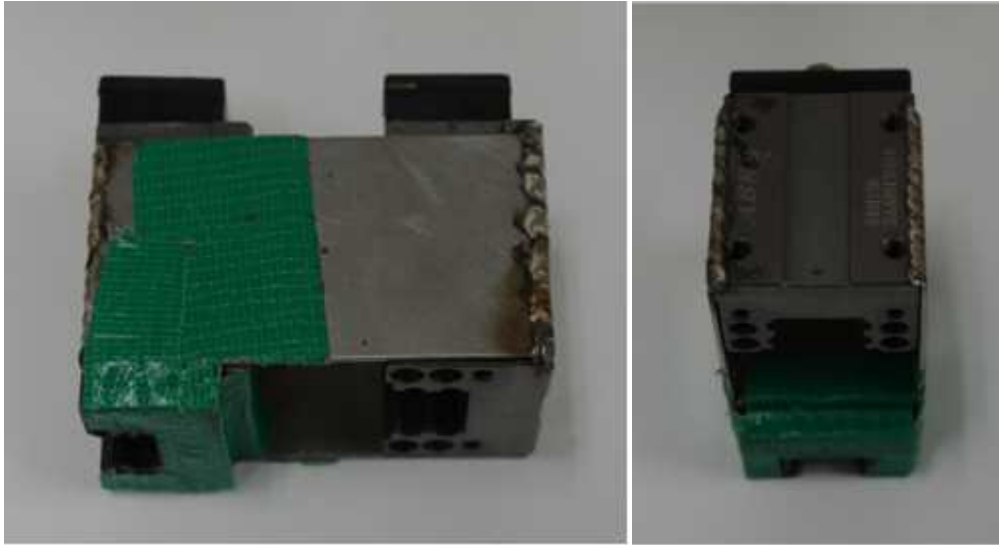


그림 2.3.11 질량체 2개 (395 g)



그림 2.3.12 충격하중실험 전경

선정된 데이터수집장치와 제공된 LabVIEW 2011을 사용하였다.

- 47 -

(2) 실험내용

표 2.3.6 충격하중실험조건 표

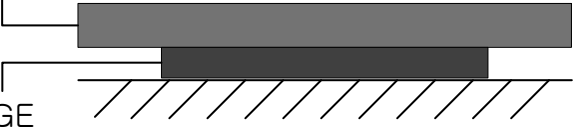
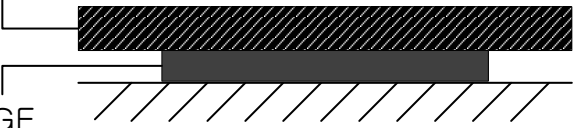
Hardness 50 Rubber PCGE 	PCGE 위 경도 50 고무를 부착 후 Mass 1개와 2개 일 때 각각 전압 측정
Hardness 70 Rubber PCGE 	PCGE 위 경도 70 고무를 부착 후 Mass 1개와 2개 일 때 각각 전압 측정

표 2.3.6의 조건으로 2012년 3월 29일 ~ 4월 1일, 3일 동안 질량체(Mass), 낙하 높이, 고무판의 경도를 달리하였고, 기계가 아닌 인력으로 하는 실험이므로 측정값에 오차가 발생할 수 있어서 조건별 10회씩 실험한 값의 평균으로 그 경향을 분석하였다.

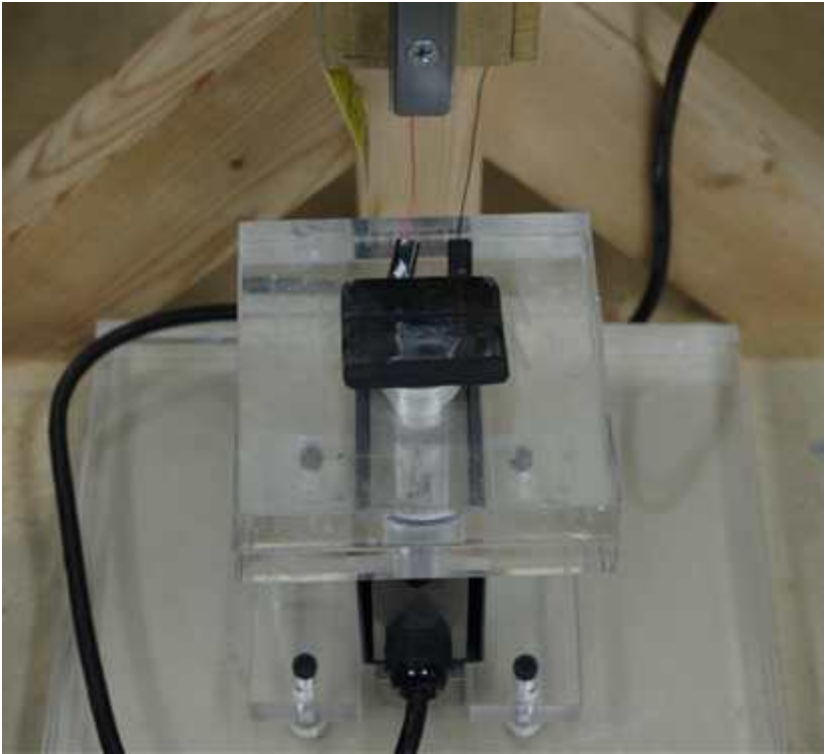


그림 2.3.15 로드 셀 지그 위 PCGE와 고무판 부착

(3) 실험결과 및 분석

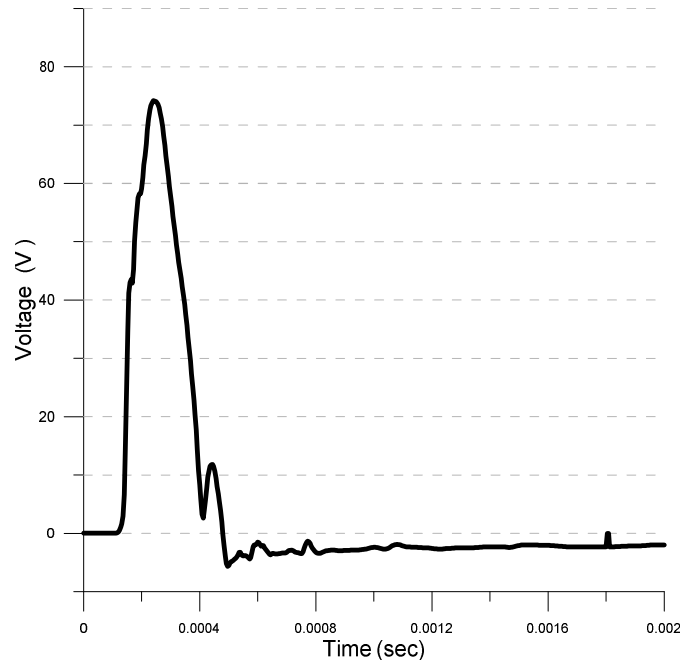


그림 2.3.16 Mass 1개 (197 g), 고무 경도 50, h 90 cm에서 전압 Time history

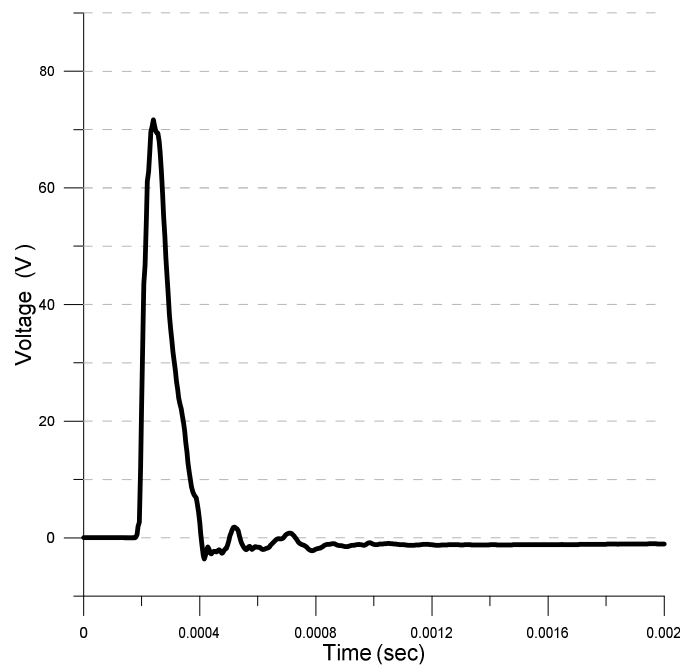


그림 2.3.17 Mass 1개 (197 g), 고무 경도 70, h 90 cm에서 전압 Time history

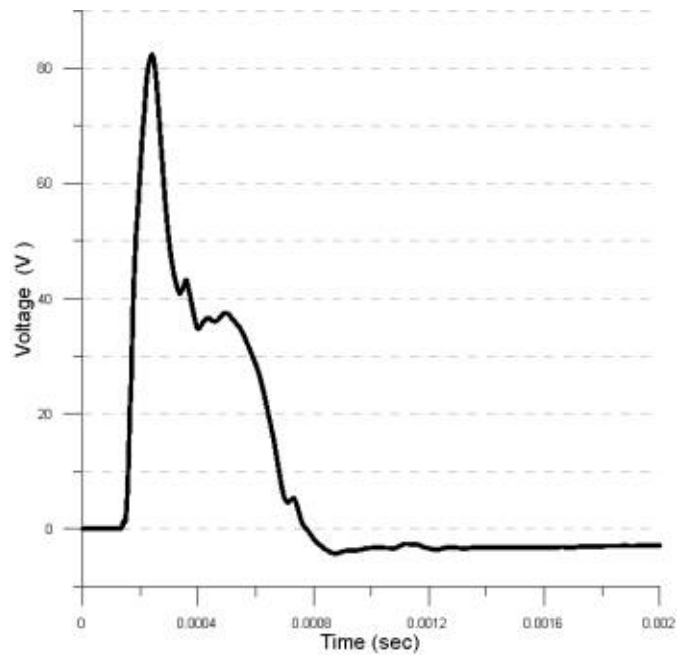


그림 2.3.18 Mass 2개 (395 g), 고무 경도 50, h 90 cm에서 전압 Time history

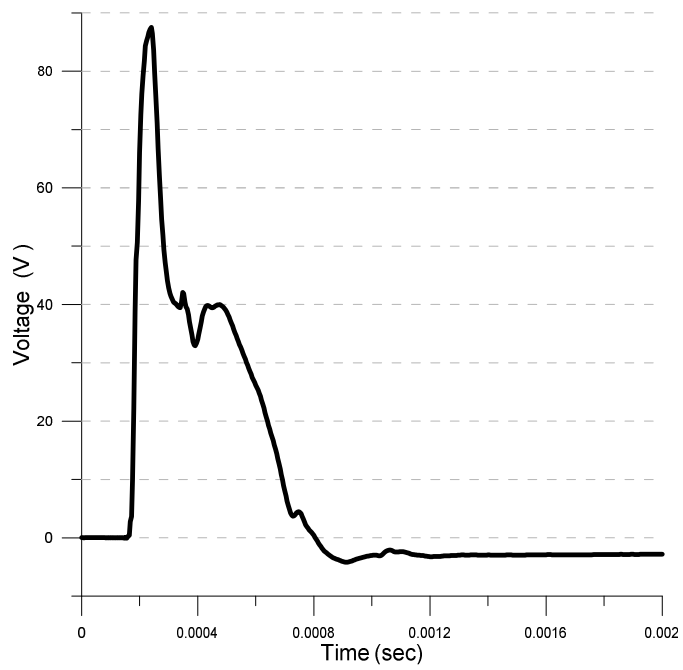


그림 2.3.19 Mass 2개 (395 g), 고무 경도 70, h 90 cm에서 전압 Time history

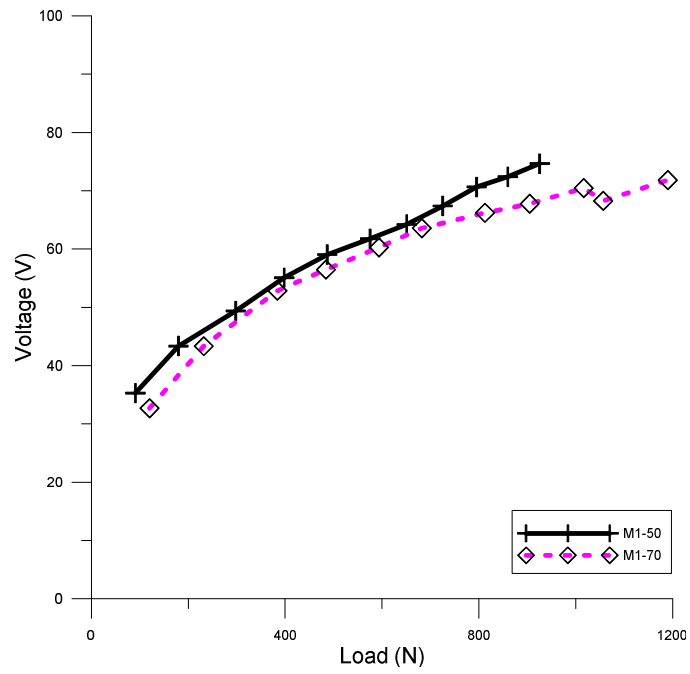


그림 2.3.20 Mass 1개(197 g) 고무경도 하중-전압 관계

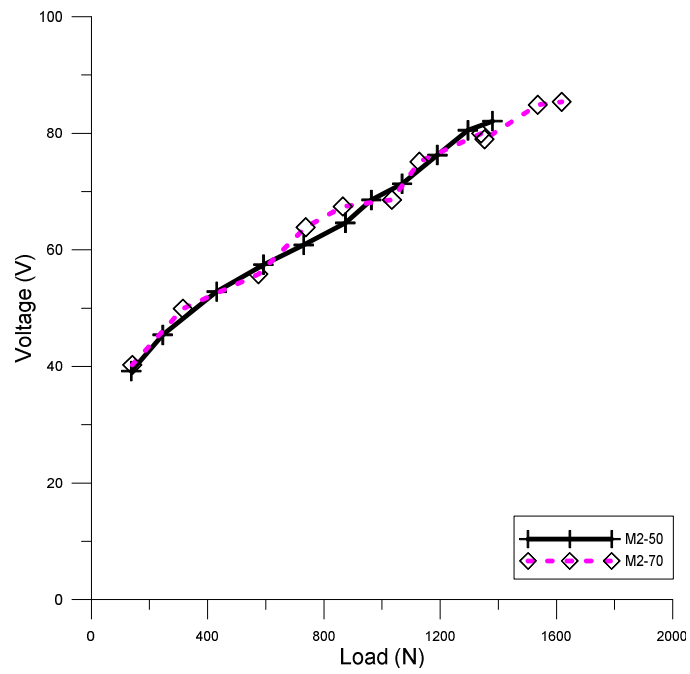


그림 2.3.21 Mass 2개(395 g) 고무경도 50, 70에서 하중-전압 관계

(4) 소결론

고무 경도를 바꾸어서 충격실험을 실시한 결과(그림 2.3.16 ~ 2.3.19)에 의하면 경도가 작은 고무가 PCGE 위에 있을 때 보다 큰 전압이 발생하는 경향(그림 2.3.20)이 있으나, 충격하중이 커질 때에는 이러한 경향이 줄어드는 것(그림 2.3.21)을 확인하였다.

나. 포트받침 모사 PCGE의 발생전압 측정

포트받침은 상시 고정하중을 지지하고 차량 등의 이동하중에 의한 활하중을 추가로 지지하여 하부구조로 전달한다. 이 연구에서 PCGE를 포트받침에 적용하기 위해서 스테인레스 플레이트에 클램프를 사용하여 PCGE에 초기 하중을 주어 실제 포트받침이 고정하중을 받고 있는 상태를 모사했다. 또한 질량체의 무게, 플레이트 내부 고무판 유무, 압전 부착위치를 달리하여 PCGE의 발생전압을 비교했다.

(1) 실험장비



그림 2.3.22 FB-50K, IMADA (푸쉬풀 게이지)

표 2.3.7 FB-50K (푸쉬풀 게이지) 사양

최대 하중치	10N(1 kgf) ~ 500N(50 kgf) 까지
스트로크	10mm
눈금	100등분(단, 30 N, 300 N, 3 K 30 K, 30 lb는 120등분)
정밀도	±0.3 % F.S이내
본체 중량	약 600 g
표준 부속품	어티치먼트 6점, 전용 수납 케이스

(2) 실험내용



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

그림 2.3.23 포트받침 모사실험준비과정

그림 2.3.23은 제3장 제2절 1에서 실험을 포트받침에 적용하기 위해서 스테인리스 플레이트 사이에 고무판을 넣고 PCGE를 그 안에 부착하였고, 실제 포트받침이 교량에 적용된 것처럼 클램프를 이용하여 고정하중을 가한 과정이다.

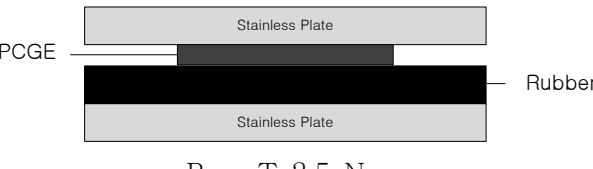
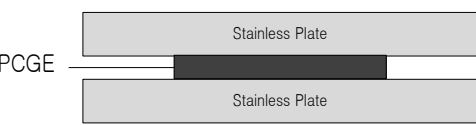


그림 2.3.24 포트받침 모사실험

그림 2.3.24는 포트받침 모사하여 수행한 것이다.

표 2.3.8의 조건으로 2012년 5월 중 질량체(Mass), 낙하 높이, 고무판의 유무, PCGE의 부착 위치를 달리하였고, 기계가 아닌 인력으로 하는 실험이므로 측정값에 오차가 발생할 수 있어서 조건별 5회씩 실험한 값을 평균 내어 그 경향을 분석하였다.

표 2.3.8 포트받침 모사실험 목록

 R-2, T 2.5 N · m	Stainless Plate 안 고무판과 고무판 사이 PCGE를 부착하여 Mass 195 g, 390g 으로 낙하높이로 충격하중을 달리한 실험 Torque 2.5 N · m
 R-u, T 2.5 N · m	Stainless Plate 안 고무판 아래 PCGE를 부착하여 Mass 195 g 으로 낙하높이로 충격하중을 달리한 실험 Torque 2.5 N · m
 R-o, T 2.5 N · m	Stainless Plate 안 고무판 위 PCGE를 부착하여 Mass 195 g 으로 낙하높이로 충격하중을 달리한 실험 Torque 2.5 N · m
 R-2	Stainless Plate 안 고무판과 고무판 사이 PCGE를 부착하여 Mass 195 g으로 낙하높이는 90 cm 충격하중을 고정하고 클램프의 Torque를 달리한 실험
 R-no, T 2.5 N · m	Stainless Plate 사이 고무판 없이 PCGE를 부착하여 Mass 195 g 으로 낙하높이로 충격하중을 달리한 실험 Torque 2.5 N · m

(3) 실험결과 및 분석

스테인리스 플레이트에 클램프 압축력을 일정한 조건으로 질량체를 PCGE의 위치에 따라 고무판을 1층만 사용할 경우에 PCGE를 고무판 위에 부착시와 아래에 부착하였을 경우, 고무판과 고무판 사이에 부착하였을 경우, 그리고 고무판을 넣지 않고 실험을 실시했다.

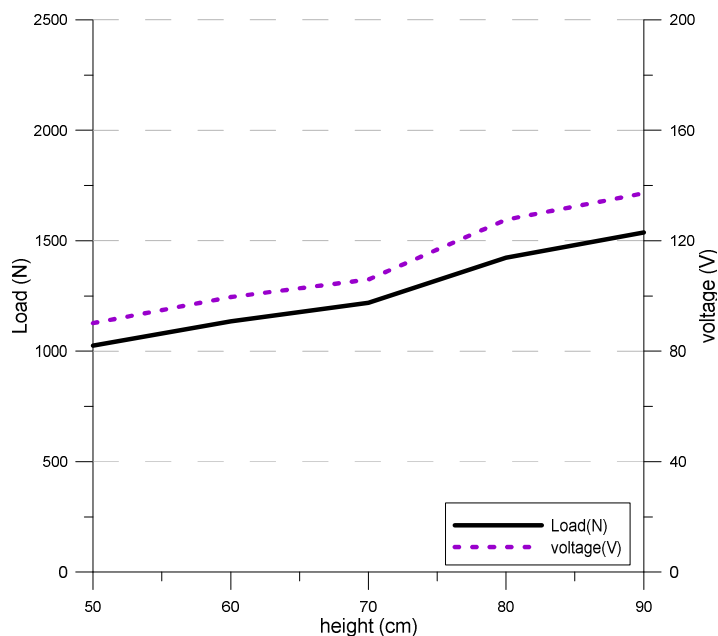


그림 2.3.25 R-2, T 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압

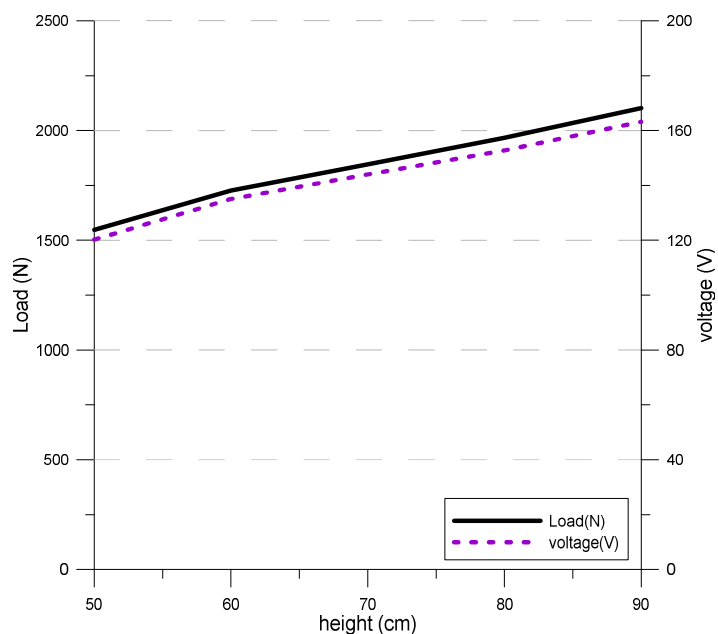


그림 2.3.26 R-2, T 2.5 N · m Mass 2개(390 g)의 발생전압

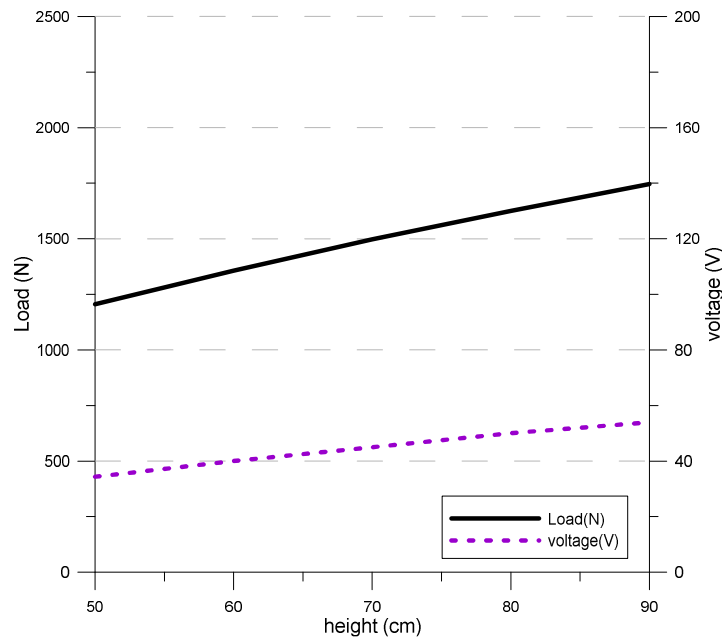


그림 2.3.27 R-u T 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압

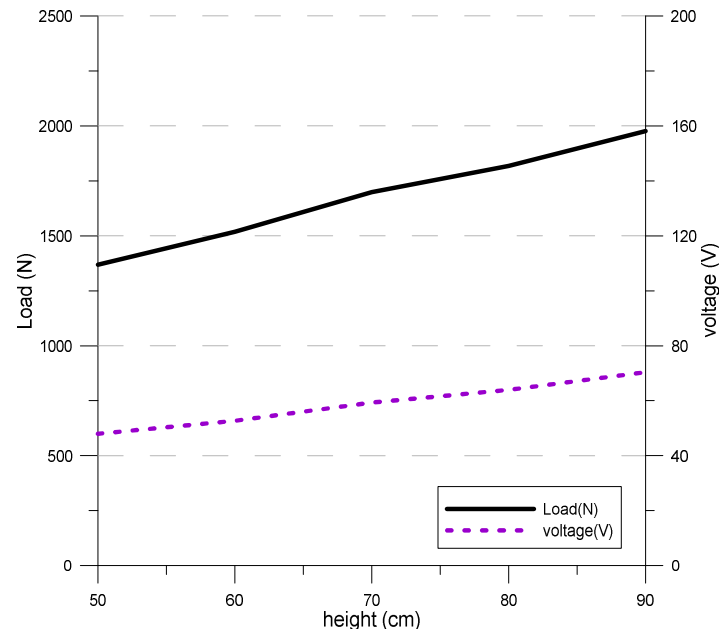


그림 2.3.28 R-o Torque 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 발생전압

질량체와 클램프의 토크 모든 조건을 같게 하고 PCGE를 고무판 아래, 위로 위치를 바꿔서 실험을 실시해 보았다. PCGE를 고무판 위에 설치하였을 때 아래에 설치하였을 때보다 30% 더 높은 전압이 측정되었다.

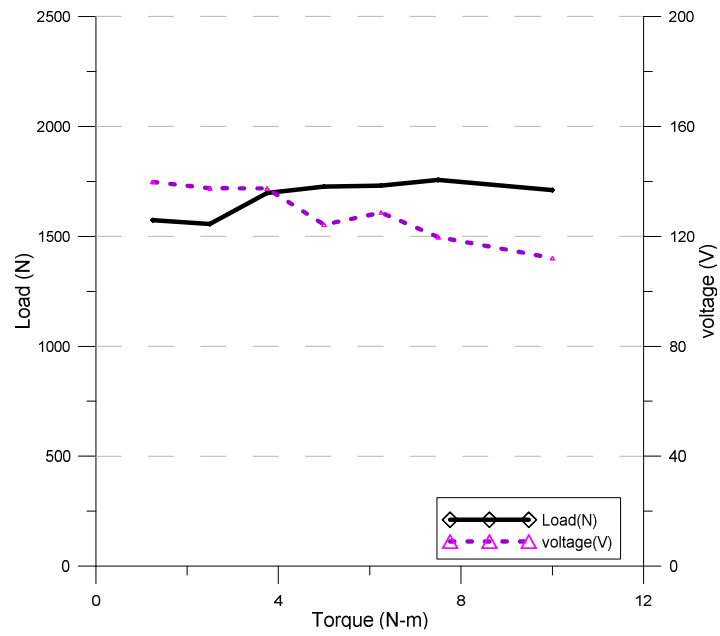


그림 2.3.29 R-2 Mass 1개(195 g) 낙하높이를 90 cm로 고정
클램프의 토크를 변환한 발생전압

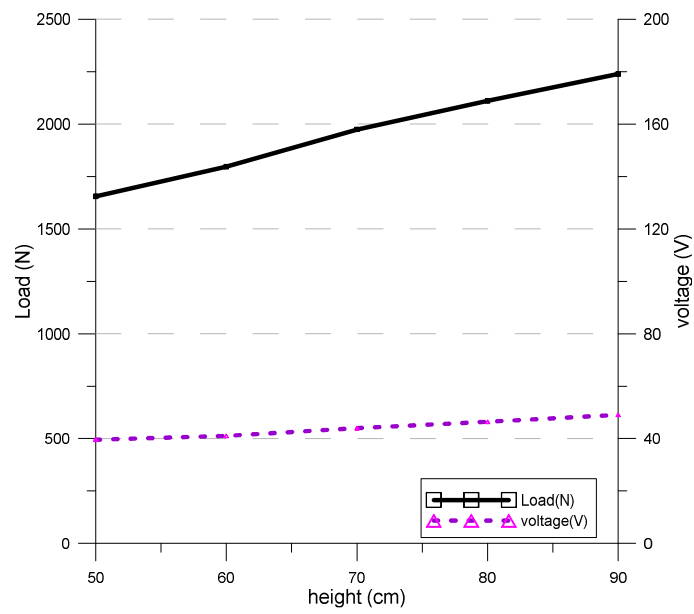


그림 2.3.30 R-no Torque 2.5 N · m Mass 1개(195 g)의 전압

(4) 소결론

포트받침 모사 PCGE의 발생전압 측정실험에서 하중과 전압이 실험의 오차 때문에 정확하진 않지만 비례하게 증가하는 경향을 보였고, 고무가 PCGE가 고무판 아래보다 위에 부착했을 때가 전압이 30 % 더 크게 발생하였다. 클램프의 토크를 변형한 실험에서는 토크를 증가할수록 전압은 감소하였다. 이는 PCGE가 고정하중을 받아 변형이 줄어 전압이 감소한 것으로 사료된다.

2. 축소받침의 동적실험 (UTM실험)

축소 포트받침에 압전체를 넣고 교량 받침에 가해지는 고정하중과 활하중을 재현해 실험을 하였다. 첫 번째로 건국대학교에서 축소 포트 받침 내부에 PCGE의 최적위치를 찾기 위한 실험을 진행하였고, 두 번째로 정확한 실험을 위해서 계명대학교 첨단건설재료실험센터에서 동적 UTM을 이용하여 실험을 수행하였다.



a. 받침 하부판



b. 고무패드



c. 봉합장치 (합금동)



d. 불소지수판 (PTFE)



e. 받침 상부판



f. 교량 받침

그림 2.3.31 교량 받침의 구성

포트받침(한국시설안전기술공단, 2003)은 원형의 밀폐용기에 고무를 넣고 그 위에 받침판을 얹어 고무의 탄성변형에 의해 회전을 얻고 윗판은 불소수지(PTFE)판을 붙이고 윤활유를 주입하여 마찰계수를 감소시켜 이동을 가능하게 한 것이다.

스페리컬받침과 유사한 기능을 갖는 포트받침은 용기속의 고무가 유체처럼 작용하여 수직반력을 끌고루 분포시키고, 큰 회전각을 얻을 수 있으며 받침의 높이 또한 낮아 회전에 대한 안전성이 크며 회전에 따른 하중의 편심이 작아서 유리하다. 사용한 고무는 허용지압응력은 300 kg/cm^2 정도이며 외부에 노출되지 않도록 용기에 담겨있어서 고무의 내구성이 크게 증가되는 이점도 있다.

지지하중은 5000 ton까지, 이동량은 $\pm 250 \text{ mm}$ 까지의 받침이 제작되고 있는데, 이 받침은 하중이 커질수록 다른 받침의 종류보다 경제성이 증가되기 때문에 장대교의 건설이 늘어나는 추세에 잘 맞는 형식중의 하나이다. 한편, 기후의 영향이나 먼지 등에 의한 장애를 방지하기 위해 받침에 차양을 달아주면 효과적이다.

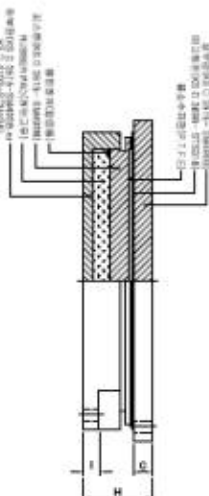
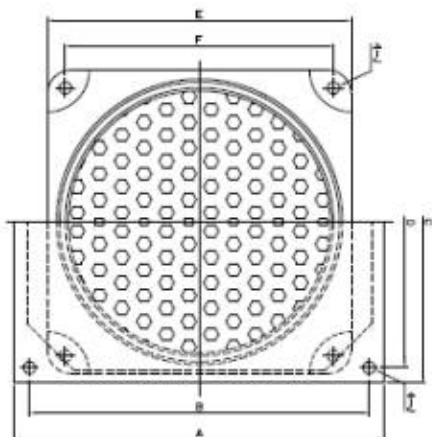
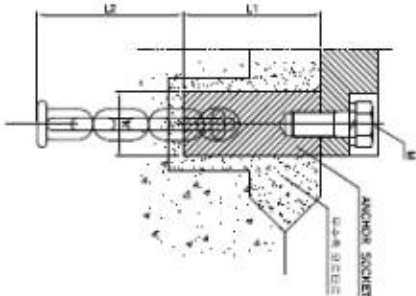


그림 2.3.32 포트받침의 현장 설치 사진 (선진산업개발)

POT BEARING 양방향

2000-2001

姓名	性别	年龄	职业	住址	联系电话	电子邮箱

[illegible]

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000
1P 0000 0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						

그림 2.3.33 포트받침 도면

가. 교량 받침 및 실험장비

- 교량 받침을 개발하는 과제의 목표에 준하여 실험을 수행하고자 실제 사용되고 있는 교량 받침의 축소 모형을 제작하여 실험하였다.

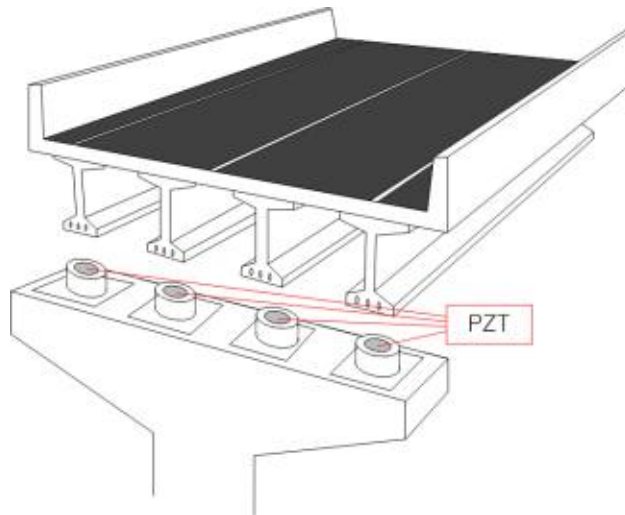


그림 2.2.34 PSC 교량에 적용된 PZT교량 받침

PCGE를 교량 받침에 넣고 선을 빼기 위해서 그림 2.3.35에서 포트받침에 홈을 마련하였다.

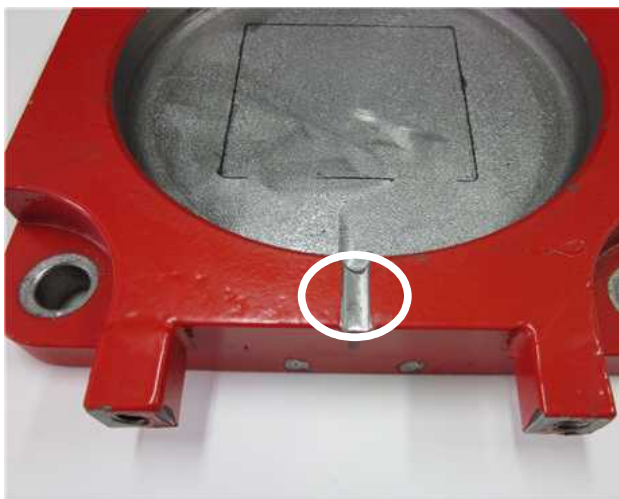


그림 2.3.35 포트받침에 전선통과 홈

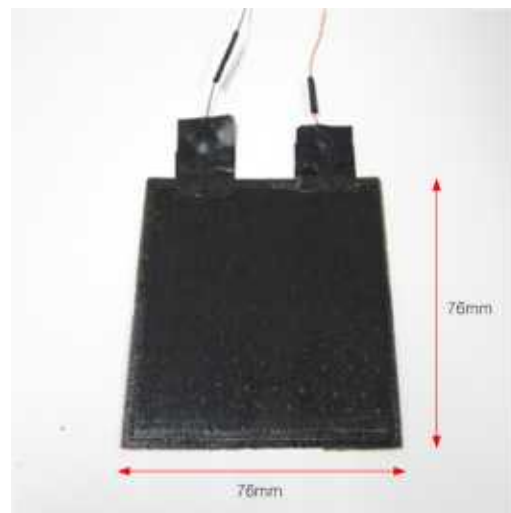


그림 2.3.36 PCGE-F 시편



(a) 계명대 동적 UTM



(b) 건국대 동적 UTM

그림 2.3.37 동적 UTM을 이용한 포트반침 압축실험 전경

표 2.3.9 동적 UTM 사양 비교

	계명대 동적 UTM	건국대 동적 UTM
최대 하중	500 kN (50 ton)	300 kN (30 ton)
제어 방법	하중제어, 변위제어 가능	하중제어만 가능
가용 Hz	3 Hz	1 Hz
특징	- 강제피로시험기로 사용이 가능할 정도로 장시간 실험이 가능	- 별도의 냉각 시설이 없어 장기간 실험 불가

나. PCGE 최적위치 결정

PCGE의 최적위치를 결정하기 위해서 일정한 하중에 대해서 축소모형 받침의 내부의 PCGE의 위치를 변경하여 발생하는 전압을 비교하였다.

(1) 실험내용



그림 2.3.38 받침 내부 고무판 형상

PCGE를 바닥면으로부터 0.0, 2.4, 3.6, 6.0 mm의 높이에 대해서, 고정하중 100 kN 활하중 150 kN를 가하여 실험을 진행하였다.

내부의 고무판과 같은 경도의 얇은 고무판으로 고무판과 같은 형상의 고무판을 그림 2.3.39와 같이 만들어서, 그 고무판의 사이에 PCGE를 설치하여 실험을 진행하였다.

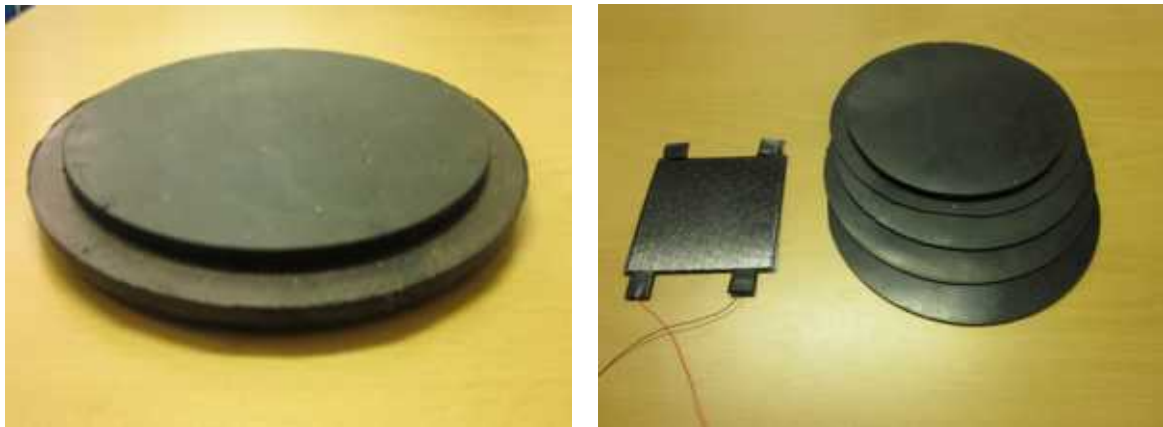


그림 2.3.39 받침 내부의 고무판(좌)와 실험을 위해 제작한 고무판(우)

표 2.3.10 최적위치 결정 실험 계획

	내용	
PCGE 위치	바닥에서 0.0, 2.4 3.6, 6.0 mm	
가력하중	고정하중 100 kN	활하중 150 kN

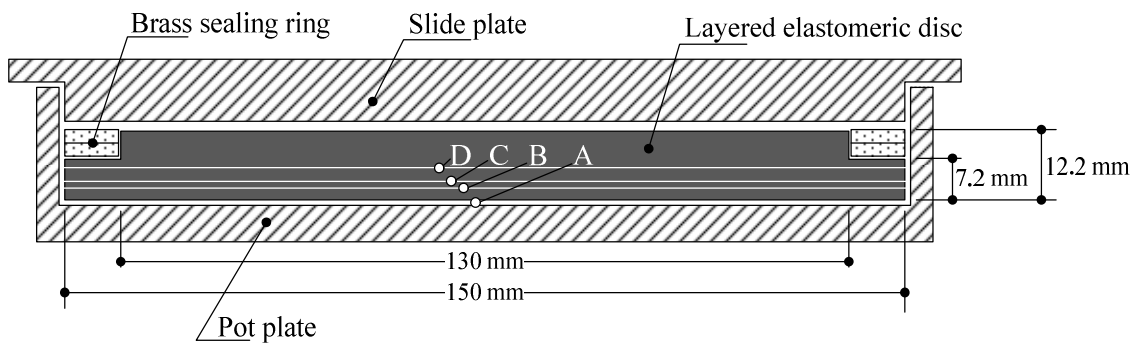


그림 2.3.40 포트받침 내부의 PCGE의 위치

(2) 실험결과 및 분석

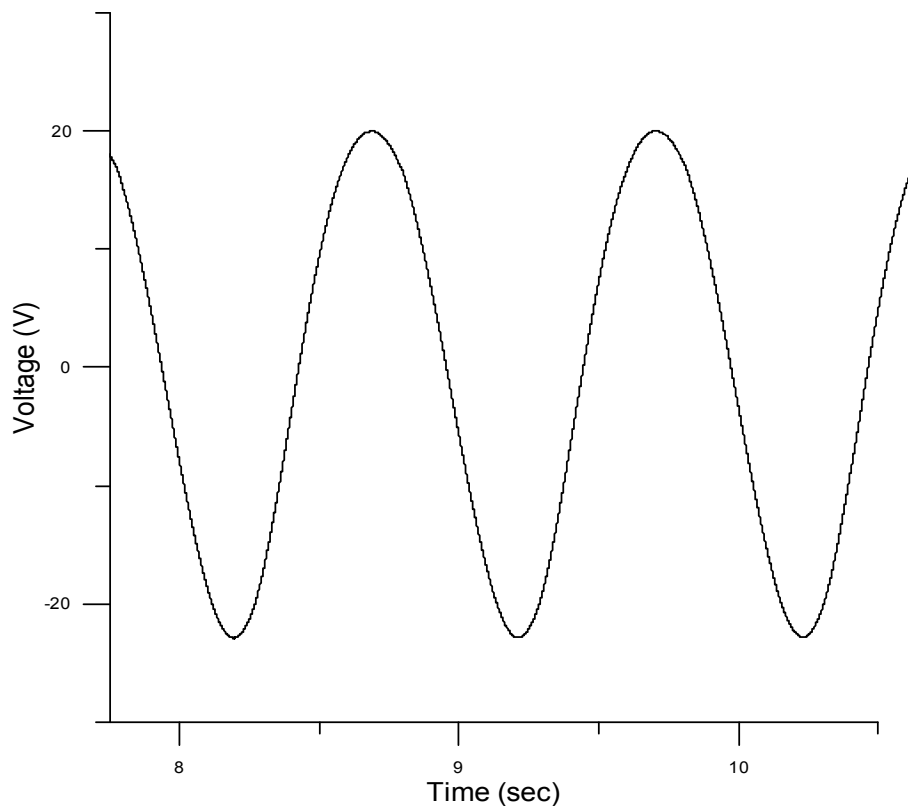


그림 2.3.41 고무판 바닥에서 0.0 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압

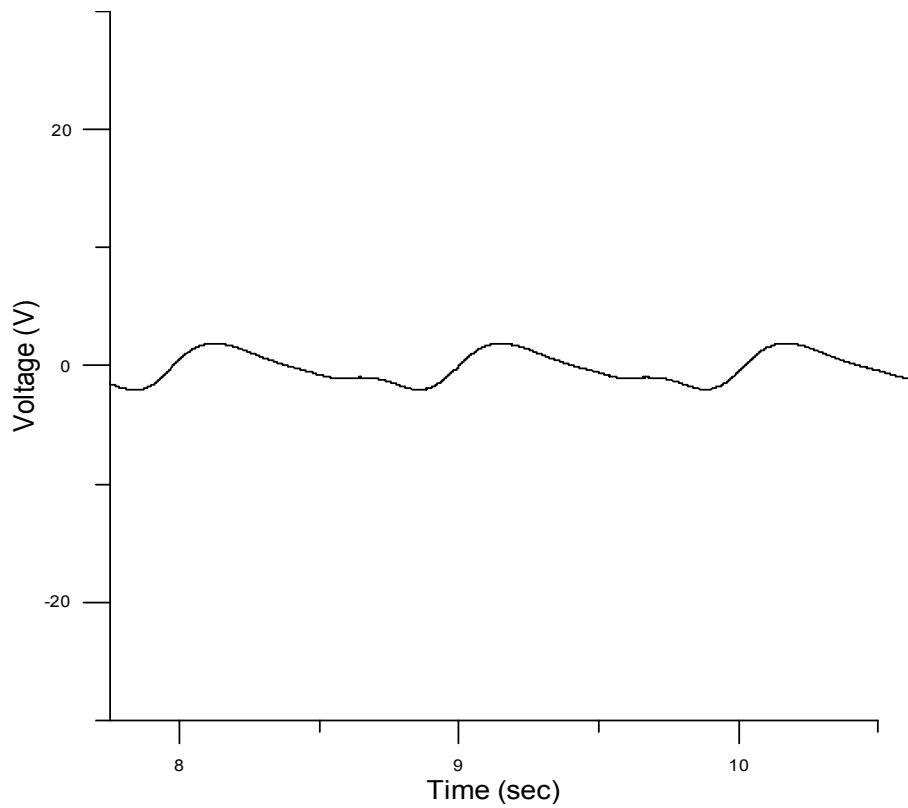


그림 2.3.42 고무판 바닥에서 2.4 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압

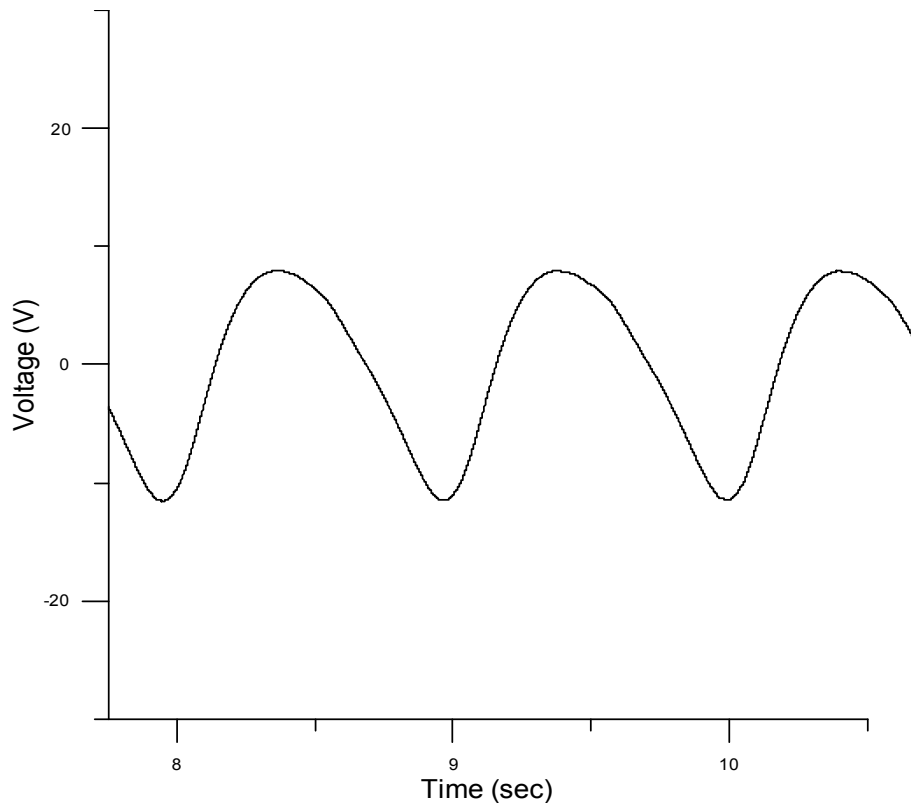


그림 2.3.43 고무판 바닥에서 3.6 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압

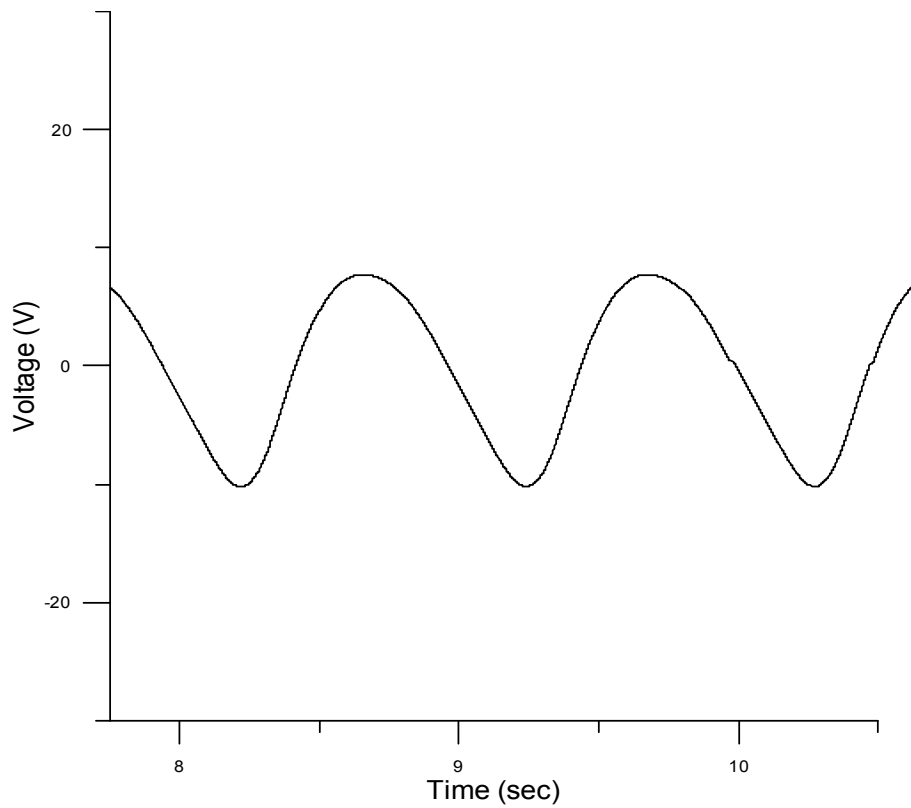


그림 2.3.44 고무판 바닥에서 6.0 mm 높이에 위치한 PCGE 발생전압

측정된 전압값을 비교하면 바닥에 PCGE를 설치하고 그 위에 고무판을 올린 경우가 발진

량이 가장 큰 것을 확인 할 수 있다. 정확한 측정된 전압을 비교하기 위해서 최대전압만을 사용하여 그래프를 그리면 그림 2.3.45와 같다.

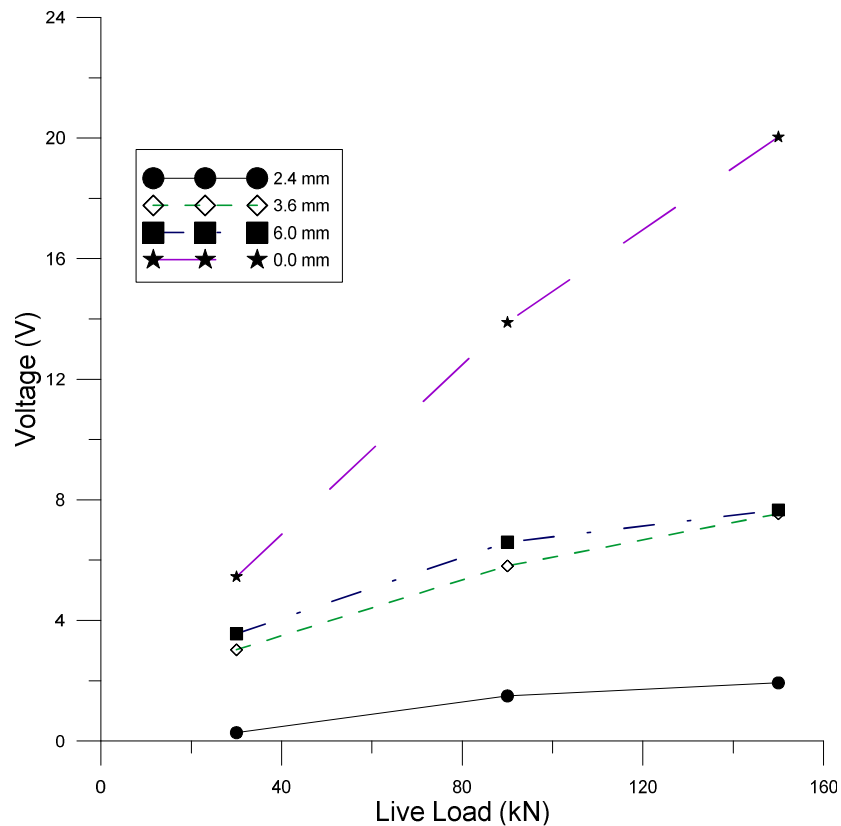


그림 2.3.45 포트받침 내의 PCGE 위치에 따른 발생전압 최대값

발생한 전압의 최대값을 비교해보면 PCGE가 바닥면에 위치할 때 가장 큰 전압이 발생하는 것을 확인 할 수 있고, 6.0 mm, 3.6 mm, 2.4 mm 순으로 작아지는 것을 알 수 있다.

(3) 소결론

받침내부에 PCGE를 설치 시 발전효율을 최대화하기 위해서 포트받침 내부의 PCGE를 설치하는 실험을 하여, 비교 분석하였다.

실험결과 바닥면에 PCGE가 설치되고 그 위에 고무판이 설치되는 경우가 고무내부에 PCGE를 설치되는 경우보다 큰 발전량을 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 그 이유는 포트받침 내부가 하중이 가해지면 정수압 상태로 되기 때문에 내부의 변형이 크지 않기 때문으로 생각되고, 고무판 아래 위치할 경우 하중이 가해지면 고무판과 철판과의 상대변위가 크기 때문에 발생전압이 더 크다고 생각된다.

다. 하중재하 동적실험

- 실험조건은 PCGE를 포트받침 내부의 고무 아래 위치에 전압을 확인하려 하였고, 고정하중을 0 kN, 100 kN, 200 kN을 가한 상태에서 활하중 30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN을 다양하게 해 보았고, 차량의 이동속도에 따라 가력진동수를 0.5 Hz, 1 Hz, 3 Hz 로 구분하여 실험을 실시했다.

(1) 고무판 아래 PCGE 부착실험

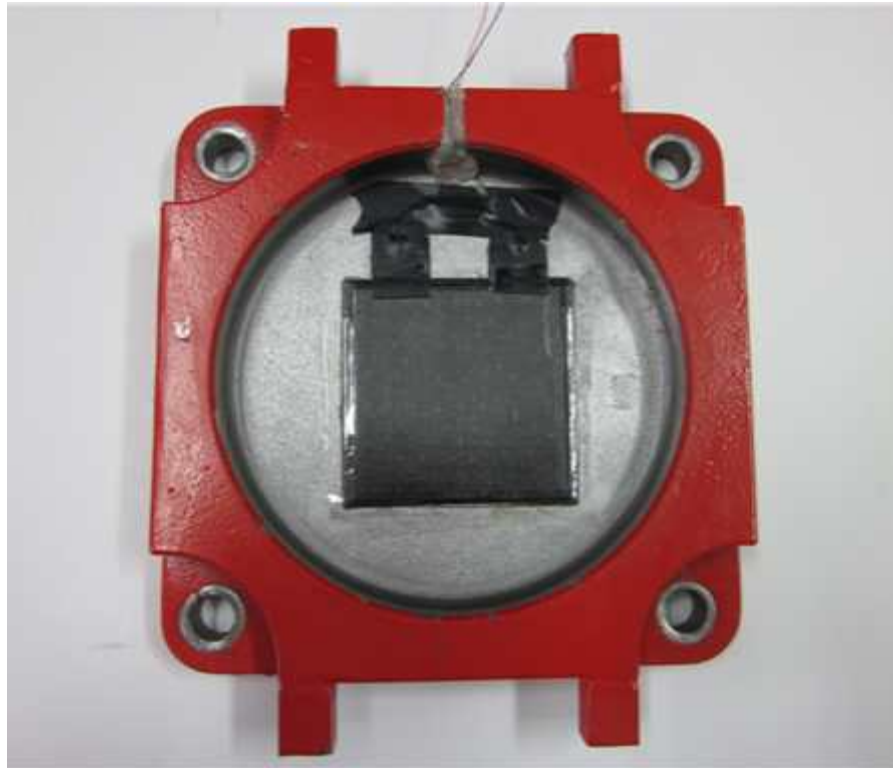


그림 2.3.46 포트받침에 PCGE 삽입

(2) 실험순서

표 2.3.11 동적 UTM을 이용한 압축실험 계획

		활하중 (Live Load)
고정하중 (Dead Load)	0 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN
	100 kN	
	200 kN	
활하중 가력진동수		0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz

고정하중 (Dead Load)	50 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, . . . , 300 kN
---------------------	-------	---

표 2.3.9의 조건으로 2012년 7월 11일 ~ 13일까지 3일동안 각 조건별 2회씩 실험을 실시하였다.

다. 실험결과 및 분석

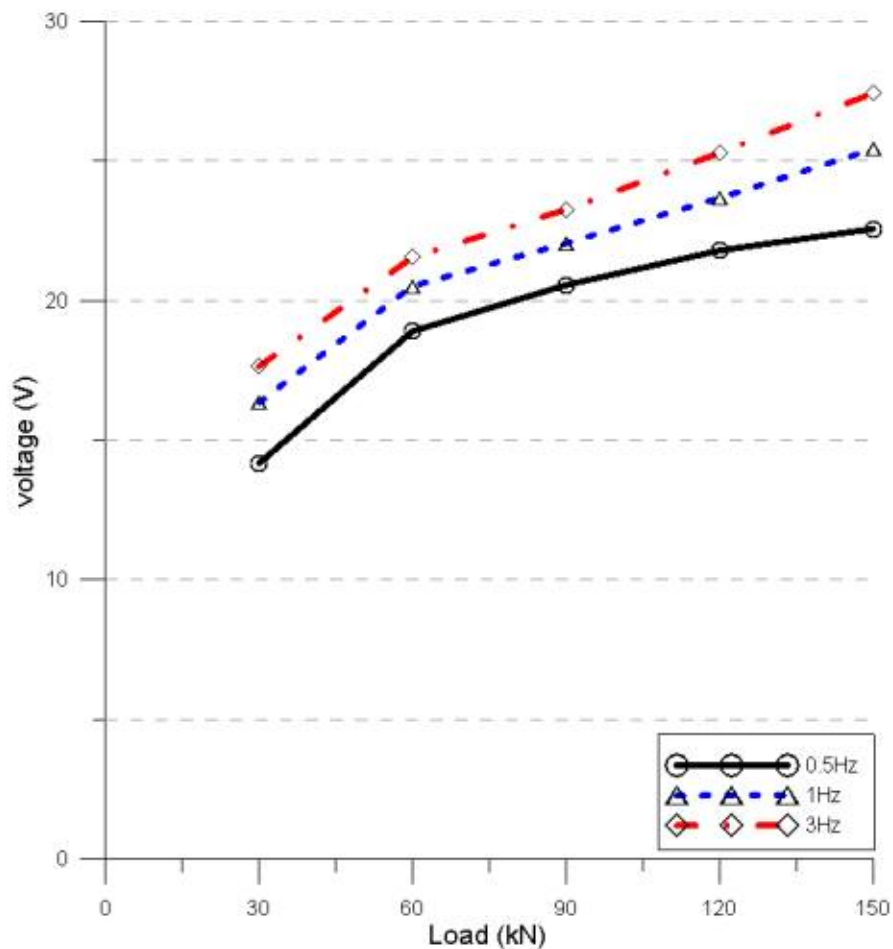


그림 2.3.47 고정하중 0 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계

그림 2.3.47은 고정하중은 0 kN에서 동적하중을 30 ~ 150 kN으로 가하고, 가력진동수를 0.5, 1.0, 3.0 Hz로 변화시켜 각각 최대전압을 비교한 실험이다. 그래프의 변곡점 부분은 고정하중이 0 kN 이므로 포트반침의 잔류변형으로 인해 생긴 것으로 판단된다.

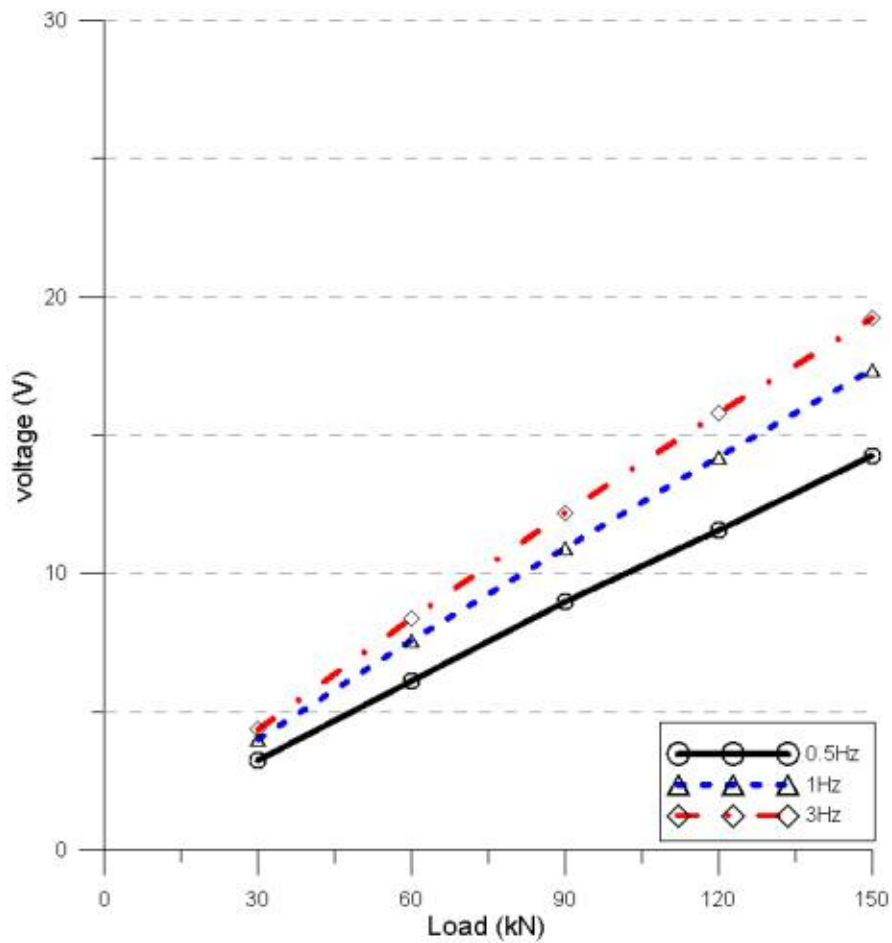


그림 2.3.48 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계

그림 2.3.48은 고정하중은 100 kN에서 동적하중을 30 ~ 150 kN으로 가하고, 가력진동수를 0.5, 1.0, 3.0 Hz로 변화시켜 각각 최대전압을 비교한 실험이다. 고정하중을 주고 실험한 결과 하중이 증가될수록 발생전압도 선형으로 증가되었다.

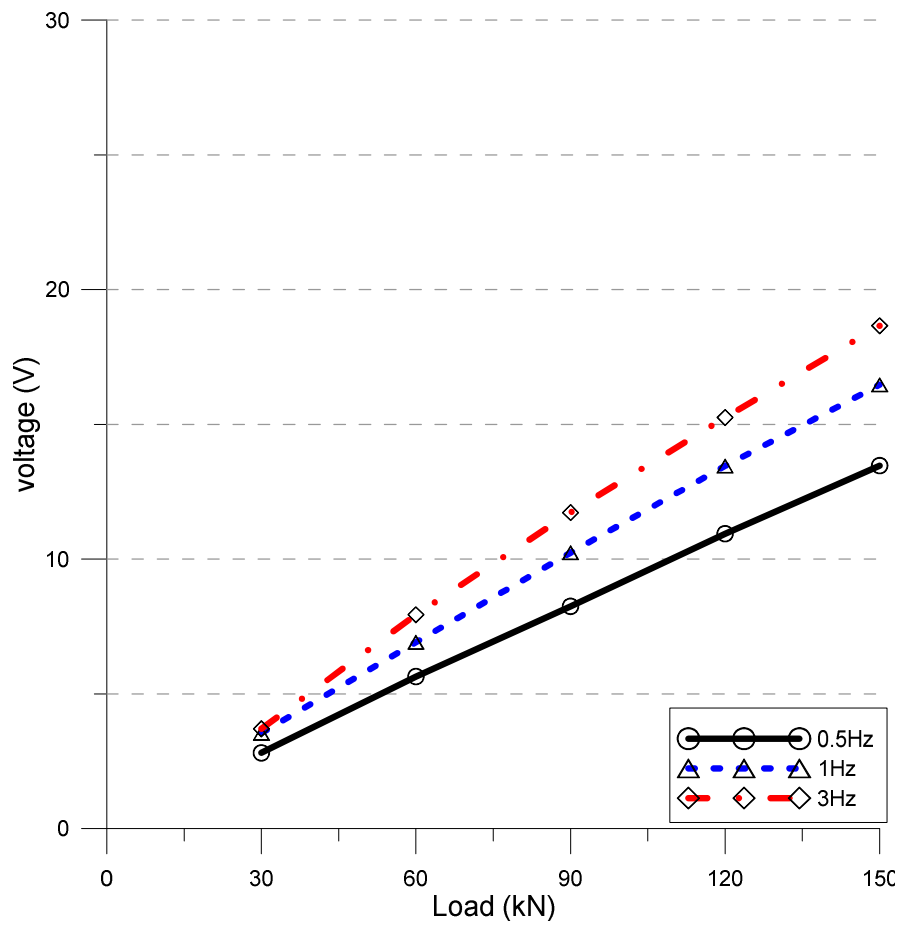


그림 2.3.49 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계

그림 2.3.49은 고정하중은 200 kN에서 동적하중을 30 ~ 150 kN으로 가하고, 가력진동수를 0.5, 1.0, 3.0 Hz로 변화시켜 각각 최대전압을 비교한 실험이다. 앞의 그림 2.3.48의 그래프와 유사하게 선형으로 증가하였다.

(2) 고정하중 50 kN, 활하중 30 kN~300 kN 까지

기존의 실험 외에 하중과 전압과의 관계를 자세히 확인하기 위해 다른 실험조건을 추가했다.
고정하중을 50 kN 활하중을 30 kN에서 300 kN 까지 가하여 실험을 실시했다.

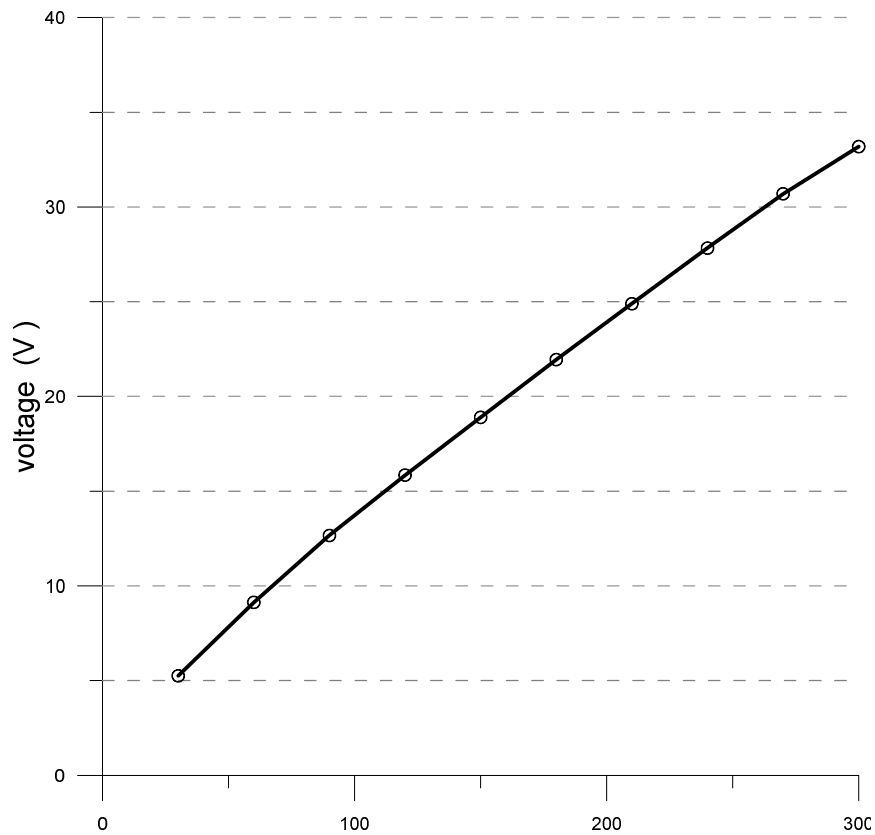


그림 2.3.50 고정하중 50 kN 1Hz Load-Voltage 관계

3. 실물시험체의 동적실험

축소모형 실험을 통해 교량 받침 내부에 설치된 PCGE의 발전효율을 측정하였고, 그 결과를 바탕으로 실제 교량에 설치할 실물시험체를 제작하였다.

실물시험체는 축소모형과 같은 형태의 포트받침으로 허용압축력이 50ton인 축소받침과 달리 100 ton의 허용 압축력을 가지고 있고, 같은 비율로 더 크게 제작되었다.

이번 실험에는 기존의 PCGE (PCGE-F-0.25)와 2차년도 연구를 통해 성능을 향상시킨 PCGE (PCGE-F-1.00)을 각각 설치하여 실험을 진행하여 발전효율을 비교하였다.



그림 2.3.51 실물시험체(좌)와 축소모형(우)의 크기 비교

(2) 실험내용

기존의 PCGE-F(이하 PCGE-F-0.25)와 성능을 향상시킨 PCGE(PCGE-F-1.00)인 PCGE의 발전효율 비교를 위해 받침에 각각 설치하여 실험을 진행하였다.

1차년도에 진행했던 실험과 비교하기 위해서 같은 하중조건으로 실험을 진행하였고, 성능을 향상시킨 PCGE는 하중에 따른 전압변화를 상세하기 측정하기 위해서 25 kN, 50 kN의 고정하중에 대해 추가 실험을 진행하였다.

표 2.3.12 동적 UTM을 이용한 압축실험 계획 (2차년도)

받침종류		50ton pot bearing	100ton pot bearing
		활하중 (Live Load)	
고정하중 (Dead Load)	100 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN	
	200 kN		
활하중 가력진동수		0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz	

표 2.3.11의 조건으로 2013년 11월 21일 ~ 22일까지 2일동안 각 조건별 2회씩 실험을 실시하였다.

(3) 축소모형에서의 실험결과
(가) PCGE-F-0.25 실험결과

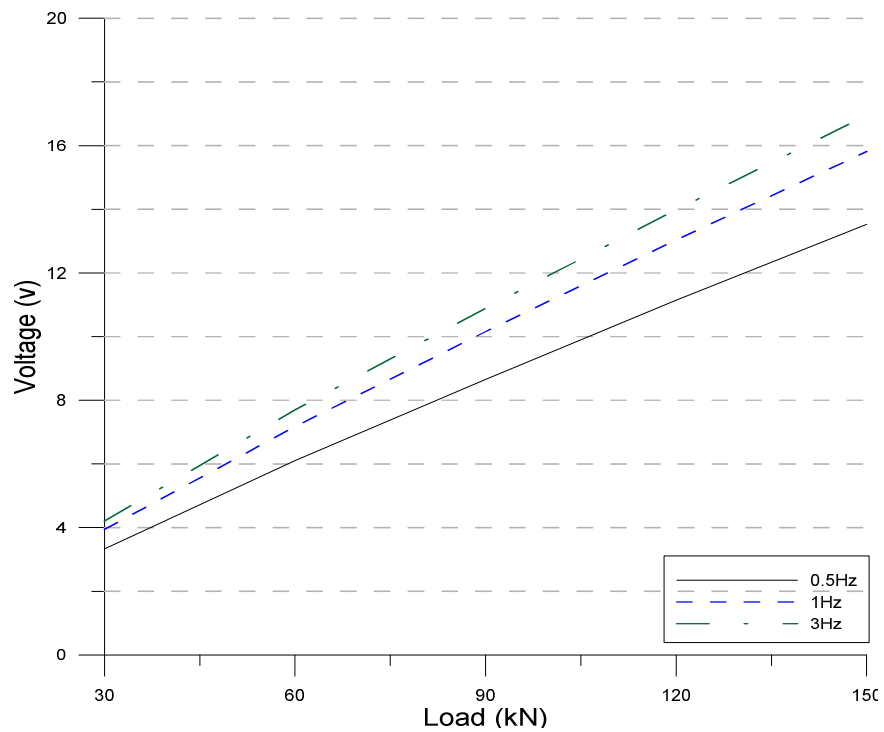


그림 2.3.52 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-0.25)

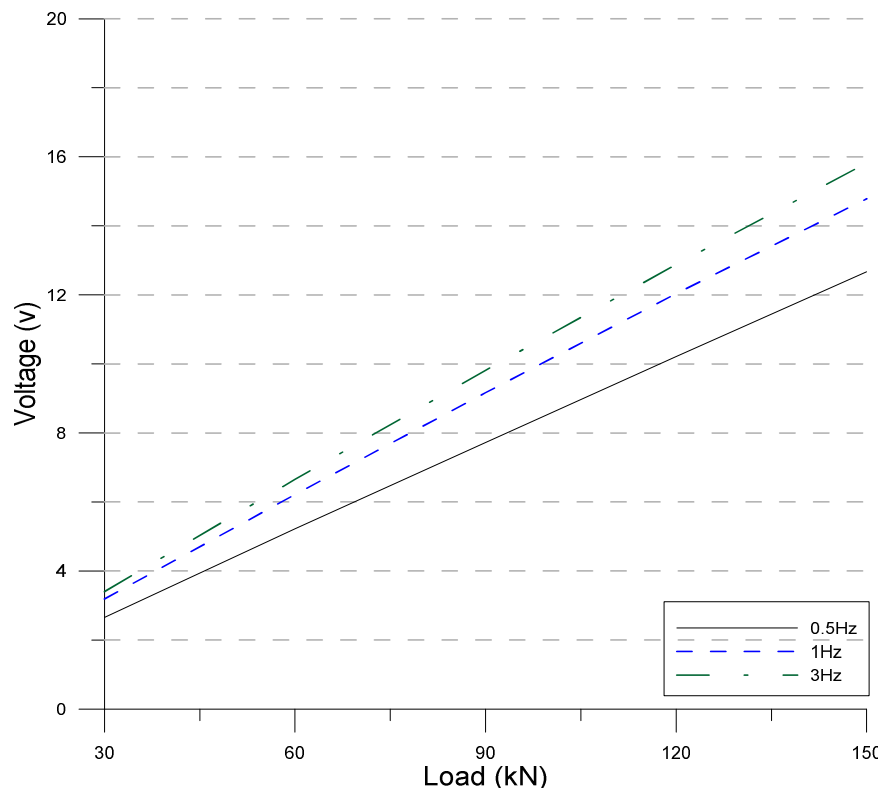


그림 2.3.53 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-0.25)

(나) PCGE-F-1.00 실험결과

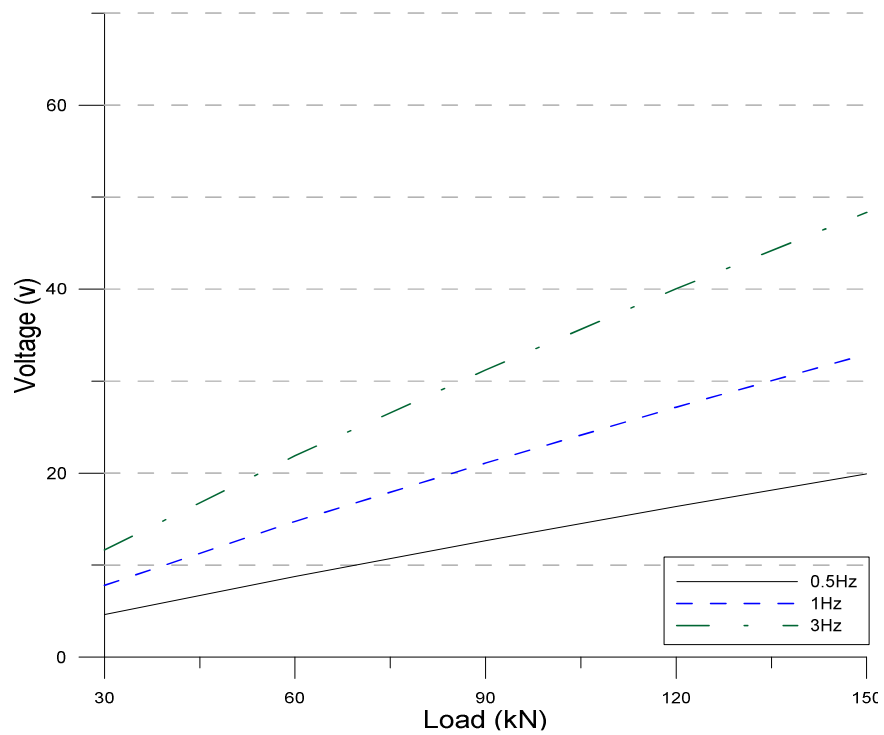


그림 2.3.54 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-1.00)

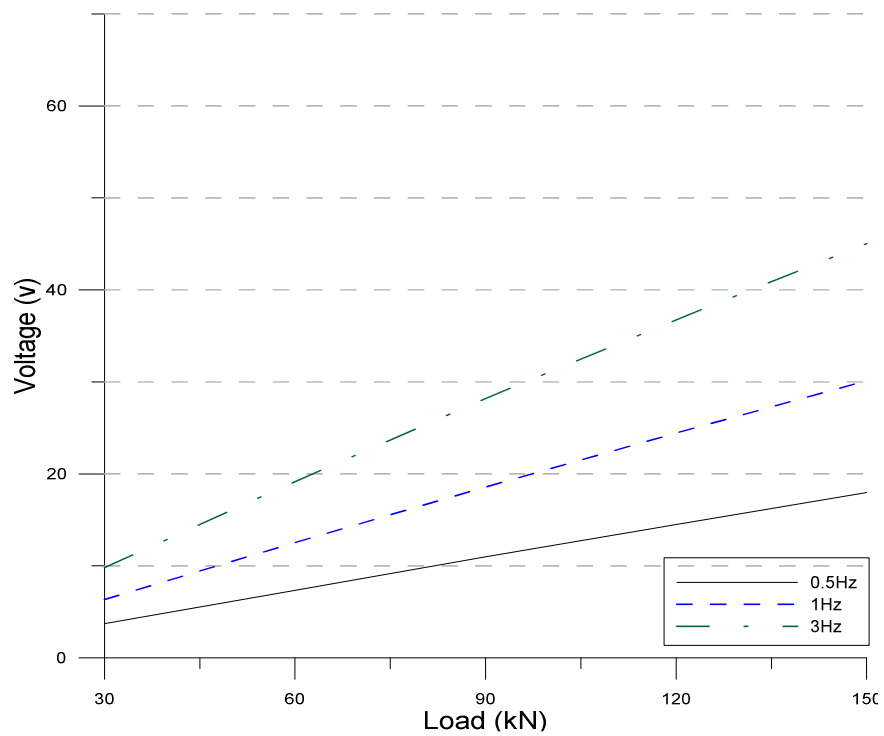


그림 2.3.55 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-1.00)

(4) 실물시험체에서의 실험결과

(가) PCGE-F-0.25 실험결과

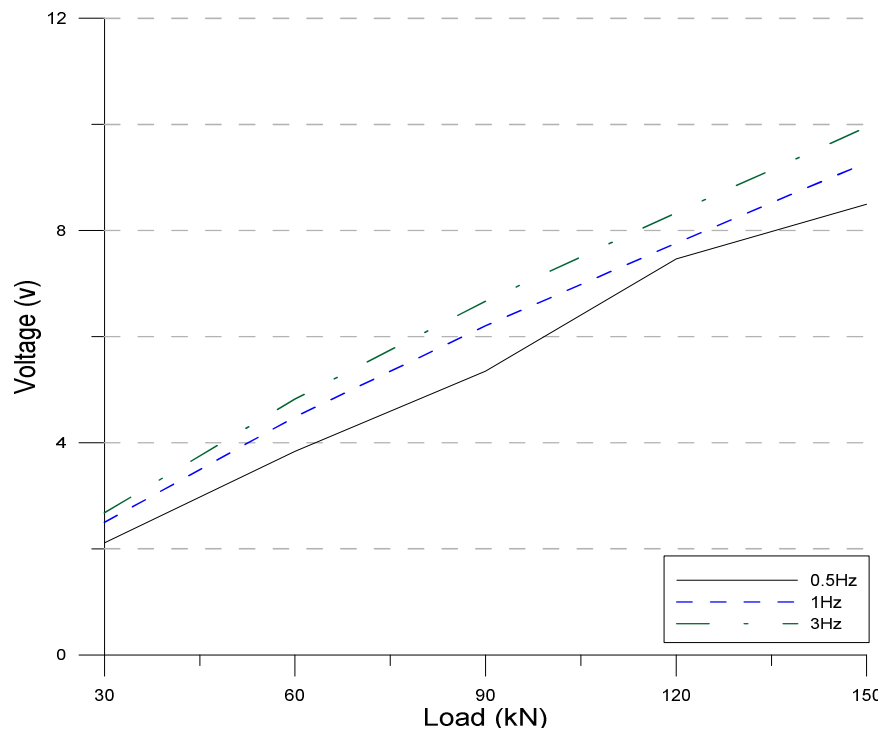


그림 2.3.56 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-0.25)

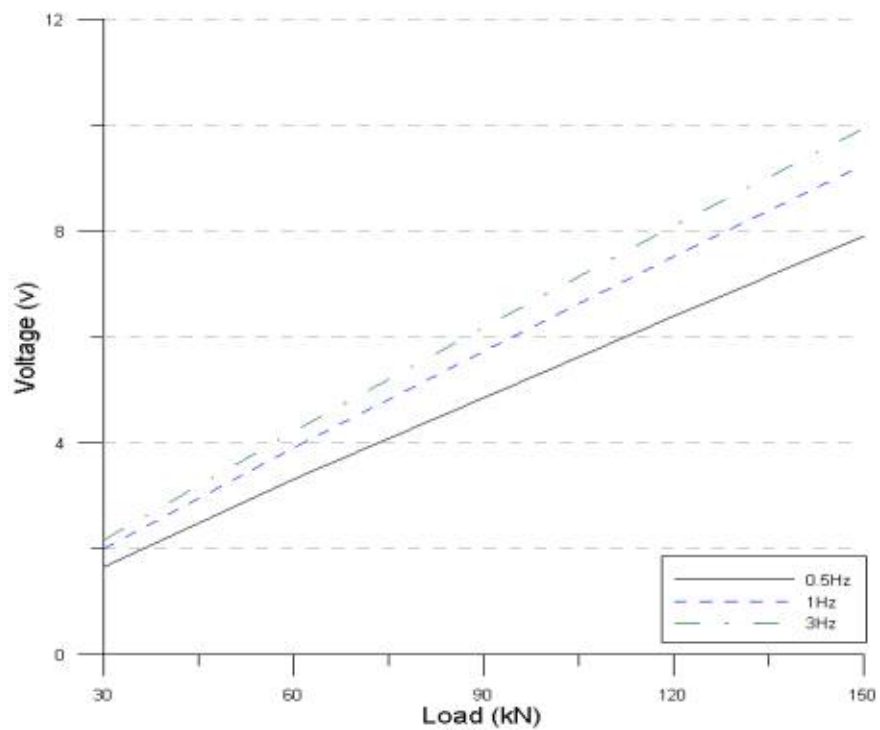


그림 2.3.57 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-0.25)

(나) PCGE-F-1.00 실험결과

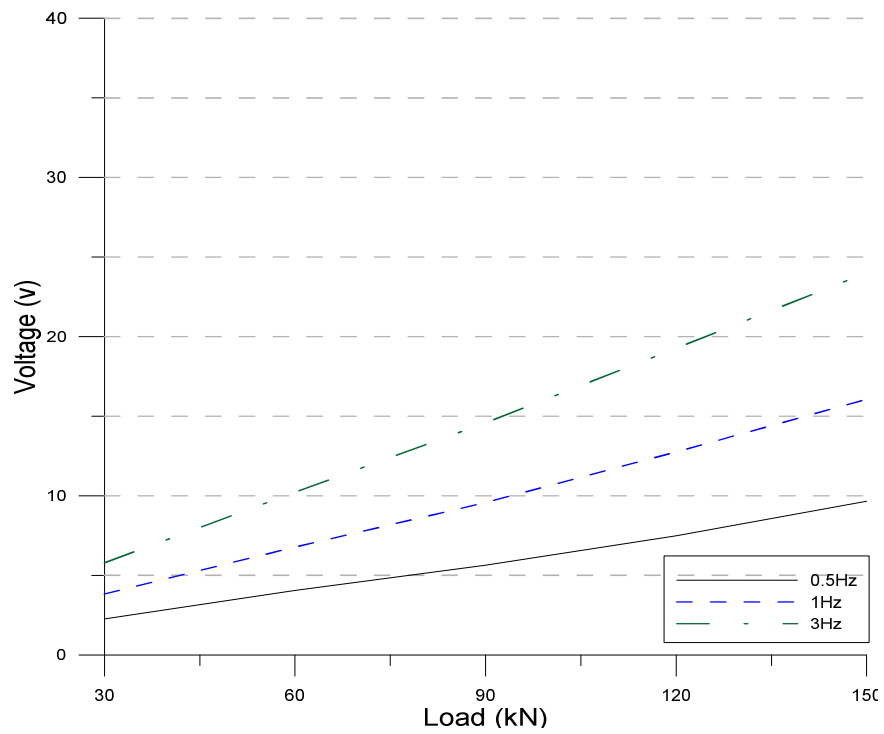


그림 2.3.58 고정하중 100 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-1.00)

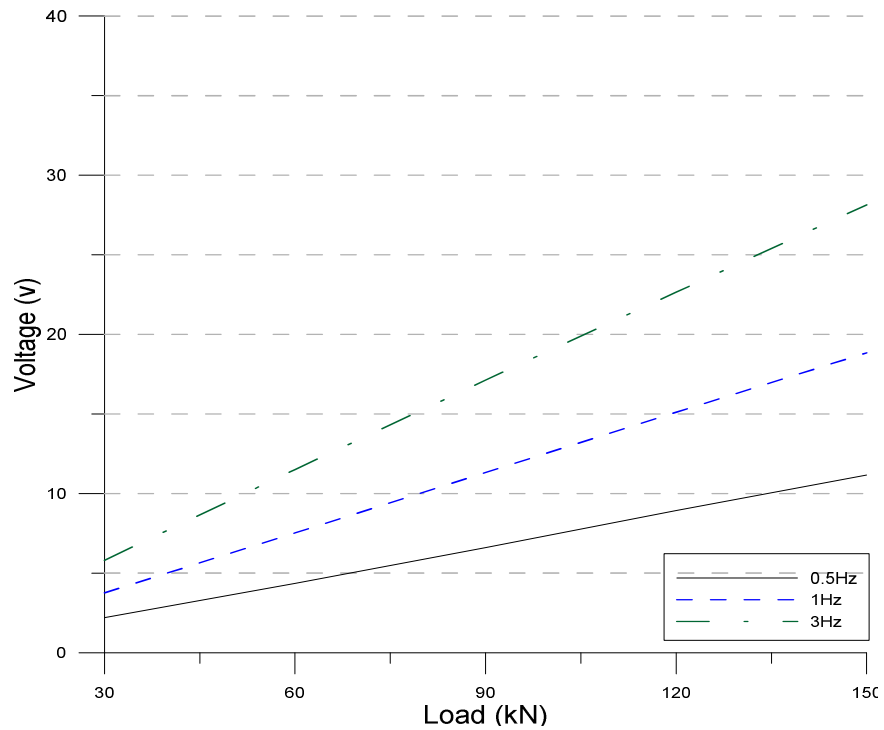


그림 2.3.59 고정하중 200 kN에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-1.00)

(5) 소결론

표 2.3.13 축소모형에서의 기존 PCGE와 개선 PCGE의 최대발생 전압 비교

	0.5Hz	1Hz	3Hz
고정하중 100 kN	1.47배	2.08배	2.87배
고정하중 200 kN	1.42배	2.04배	2.88배

표 2.3.14 실물시험체에서의 기존 PCGE와 개선 PCGE의 최대발생 전압 비교

	0.5Hz	1Hz	3Hz
고정하중 100 kN	1.14배	1.73배	2.41배
고정하중 200 kN	1.41배	2.04배	2.83배

축소모형의 내부에 기존의 PCGE와 성능을 향상시킨 PCGE의 발전량을 비교해 보았다. 성능을 향상시킨 PCGE는 기존 PCGE와 비교하여 진동수가 높아질수록 발전량에서 큰 차이가 커지는 경향을 보이며, 3Hz에서는 최대 2.8배 이상의 전압이 발생하는 것을 확인하였다.

실물시험체의 내부에 PCGE를 설치한 실험도 축소모형 실험과 비슷한 결과가 나타났으나, 받침의 크기가 변해서 단위면적당 받는 하중이 감소한 관계로 전체적인 발전량은 감소한 것을 확인하였다.

4. 결론

동하중과 발생전압과의 관계를 확인하기 위한 일련의 실험을 실시하였다.

간단한 모형을 통해 낙하질량체에 의한 충격하중과 발전량을 측정하였으며, 축소 포트받침을 이용하여 PCGE가 포트받침 내에 내장된 상태를 모사하여 고정하중이 작용하고 있는 상태에서 활하중과 발전량의 상관관계를 확인하는 실험을 실시하였다.

충격실험은 하중과 발전량의 상관관계를 확인하기 위한 사전실험으로서 그 둘 사이의 연관성을 명확히 확인할 수 있었다. 그러나 낙하물에 의한 하중은 지속시간이 짧고 충격량이 안정적이지 않아 상관관계를 정규화하는 데는 충분하지 못하였다. 이에 따라 PCGE가 내장된 축소 교량 받침을 제작하여 실제 차량하중을 보다 더 현실적으로 모사하여 동적 UTM(Dynamic Universal Testing Machine, 동적만능재료시험기)을 이용한 동적실험을 수행하였다.

상기의 세가지 실험을 통하여 동하중과 발생전기에너지와의 상관관계를 확인하였으며, 또한 이 관계가 초기 면압에 따라 어떻게 달라지는지를 확인하기 위해서 초기 면압 조건을 바꾸어가며 실험을 실시하고 그 결과를 정리하였다.

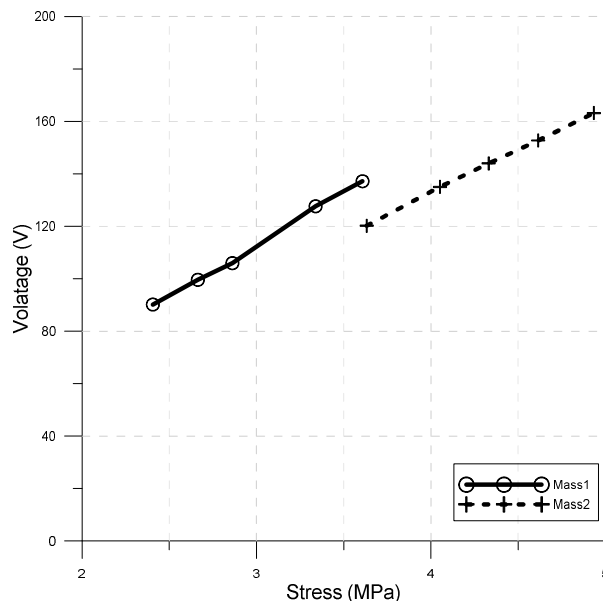


그림 2.3.60 R-2, T 2.5 N · m Mass 195 g & Mass 390 g의 발생전압

그림 2.3.60은 PCGE-F-0.25의 상하에 고무가 배치된 낙하실험에서 얻어진 충격하중-발생전압의 관계를 면압-발생전압 관계로 다시 나타낸 것이다. 질량체가 1개인 경우, 2개인 경우 모두 면압과 발생전압이 선형관계를 보이는 사실을 확인할 수 있다.

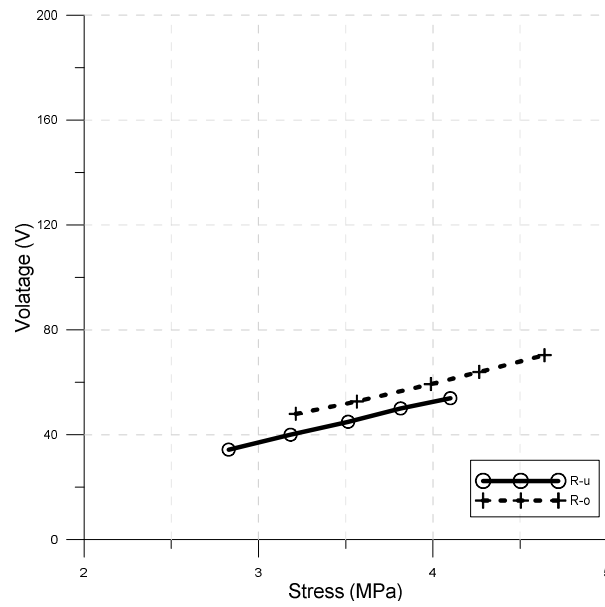


그림 2.3.61 R-u & R-o, T 2.5 N · m Mass 195 g의 발생전압

그림 2.3.61은 고무가 PCGE-F-0.25의 위 혹은 아래에만 배치된 낙하실험에서 얻어진 면압-발생전압 관계를 나타낸 그래프이다. 고무가 PCGE-F-0.25의 위에 있는 경우에 보다 높은 전압이 발생되었다. 이러한 경향은 모든 실험에서 지속적으로 확인된 것으로 고무에 의해 충격시간이 길어지는 경우에 발생전압이 높아지는 것으로 판단된다. 즉 충격에너지의 전기에너지로의 변환 효율이 높아지는 것이다.

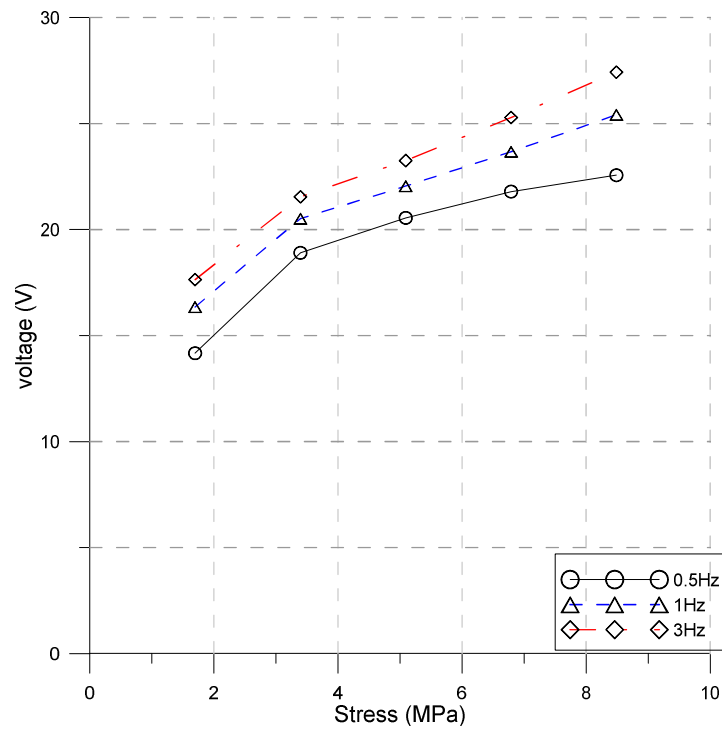


그림 2.3.62 고정응력 0 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-0.25)

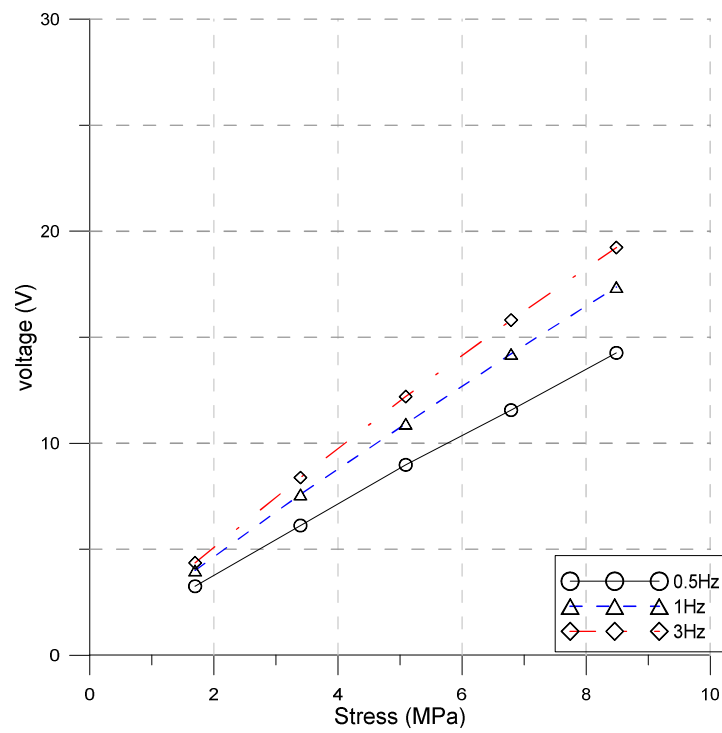


그림 2.3.63 고정응력 5.659 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-0.25)

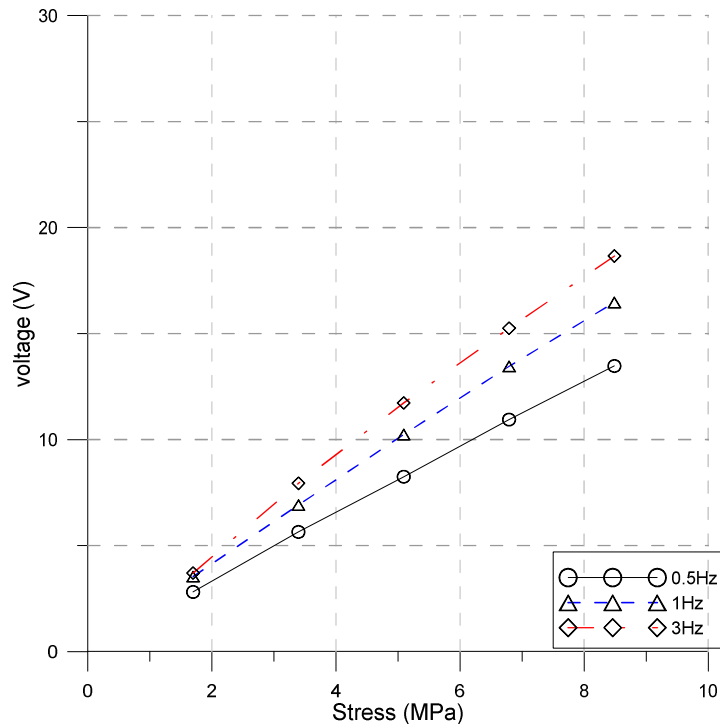


그림 2.3.64 고정응력 11.318 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-0.25)

그림 2.3.62 ~ 2.3.64에서는 축소포트받침실험을 통해 얻어진 결과를 정리하였다. 하중을 면압으로 환산하여 향후 다양한 크기의 PCGE-F-0.25를 적용한 실험결과와의 비교가 가능하도록 하였다.

고정하중이 없는 경우의 면압-발생전압의 그래프(그림 2.3.62)는 그림 2.3.63 ~ 2.3.64와 비교할 때 상대적으로 높은 전압을 보여준다. 이를 통해 고정하중이 없는 상태에서 활하중만이 작용할 때 발전효율이 더 높다고 할 수 있다. 또한 그림 2.3.62는 변곡점이 존재한다. 이는 고정하중이 없을 경우 하중이 전혀 작용하지 않는 짧은 시간이 존재하여 발생전압이 안정적이지 못하기 때문으로 판단된다.

그림 2.3.63와 2.3.64의 고정하중이 유지되는 경우에는, 면압-발생전압의 관계가 선형적이고 고정하중의 크기가 그 둘의 관계에 별다른 영향을 끼치지 않는 사실을 확인할 수 있다. 그림 2.3.29에서는 고정하중이 클수록 발생전압이 낮아지는 경향을 보였으나 여기서는 고정하중이 약 2배로 증가하여도 발전효율의 손실이 거의 일어나지 않은 것으로 나타났다. 또한 활하중의 가력주기가 짧을수록(가력진동수가 높아질수록) 발생전압이 높아지는 것을 확인하였고, 이는 차량통행이 증가할수록 발전효율이 증가하는 것으로 간주될 수 있다.

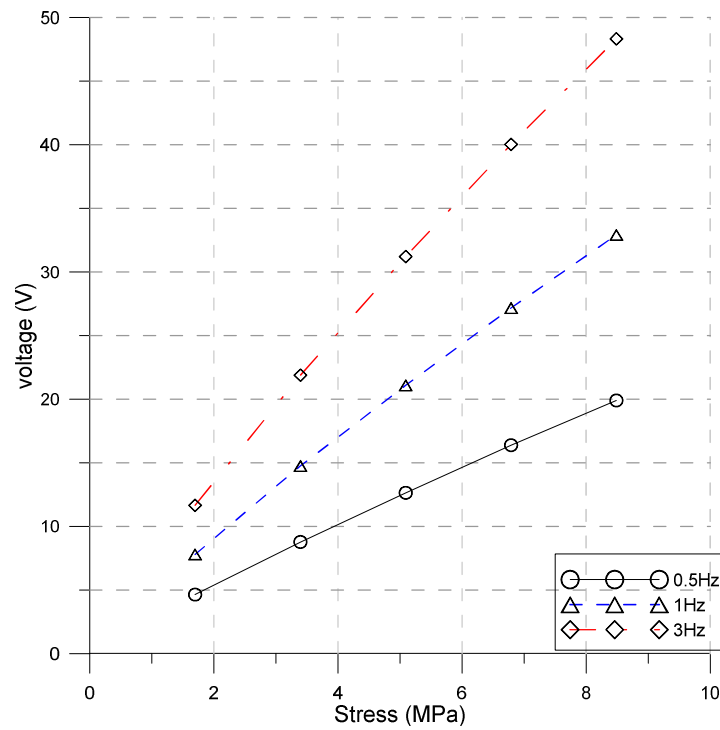


그림 2.3.65 고정응력 5.659 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-1.00)

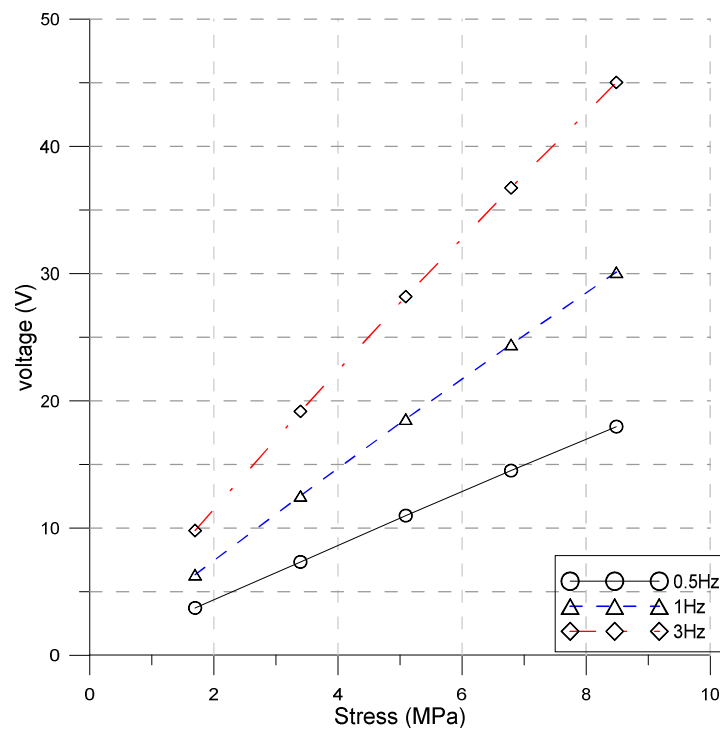


그림 2.3.66 고정응력 11.318 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(축소모형, PCGE-F-1.00)

PCGE-F-1.00의 면압-발생전압 관계를 살펴보면 PCGE-F-0.25보다 같은 면압에서 더 큰 전압이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

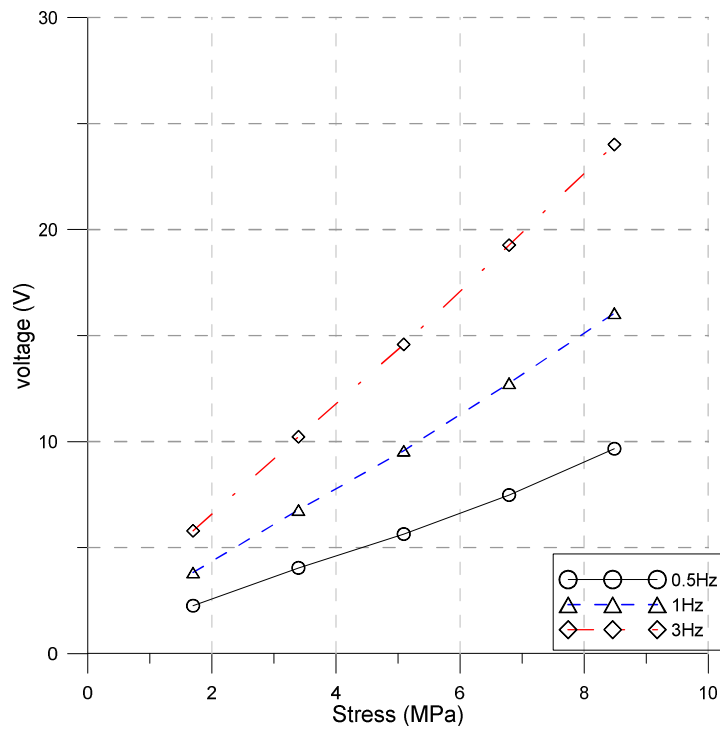


그림 2.3.67 고정응력 2.889 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-1.00)

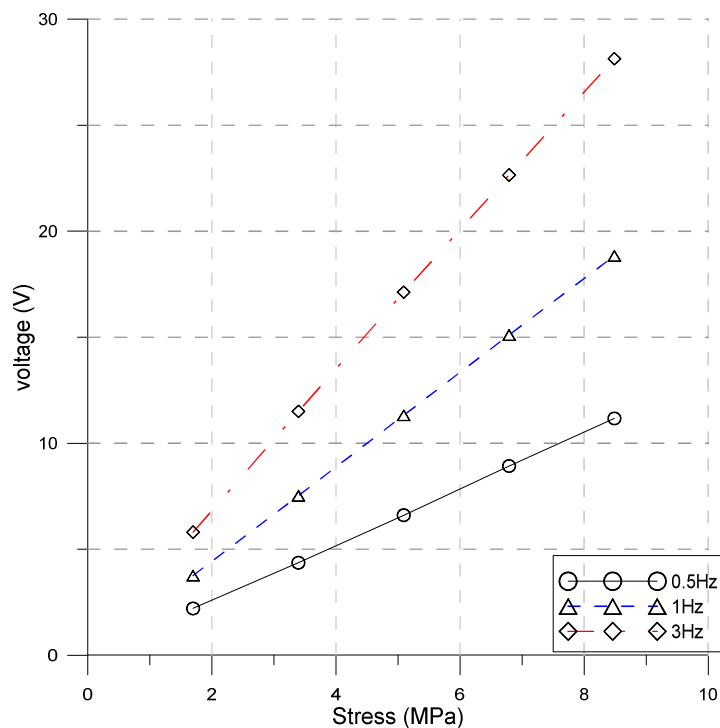


그림 2.3.68 고정응력 5.777 MPa에서 가력 진동수에 따른 Load-Voltage 관계
(실물시험체, PCGE-F-1.00)

실물시험체에 PCGE-F-1.00을 설치 후, 진행한 동적시험의 결과를 살펴보면 받침의 면적이 커져서, 같은 하중을 가했을 때 면압이 감소하여 전체적으로 전압이 감소한 것을 확인 할 수 있다. 고정응력 2.889 MPa에서 면압-발생전압관계가 선형이 아닌 것을 확인 할 수 있는데, 받침의 면적이 커짐에 따라 안정적인 선형거동을 위한 고정하중이 더 커졌기 때문으로 생각된

다.

상기 일련의 실험결과를 통해 고정하중의 크기와 무관하게 PCGE를 이용한 포트받침은 안정적인 면압-발생전압의 관계를 나타내고 있어 활하중 계측기(BWIM)로써의 가능성을 확인할 수 있었으며, 가력주기와 발생전압과의 관계로부터 현재까지 전혀 사용되지 않았던 차량하중을 신재생 에너지로 활용 가능함을 확인하였다.

제4절 에너지 신호회로

PCGE에 의한 발생하는 전기에너지는 기계적인 힘을 가하는 형태와 동일한 형태로 전기의 전압 형태로 출력이 된다. 또한 출력되는 전기에너지량이 매우 작아 일반적인 에너지 저장회로는 그 전기에너지를 축전하여 활용할 수 없다. 따라서 PCGE의 내구성이나 전기에너지 출력량을 고려했을 때, 전기에너지를 직접적으로 충전해서 사용하기 보다는 신호용으로 대체하여 에너지를 절감하는 방향으로 진행을 하였다. 제4절에서는 이에 대한 에너지 신호회로의 설계와 시뮬레이션을 기술한다.

1. Piezoelectric Circuit 모델링

Piezoelectric 발전시스템은 외부에서 입력되는 기계적인 에너지에 의해 Piezoelectric 변환기의 변위 변동에 따라 전기적 에너지로 변환 한 후 전기 부하를 연결하여 사용한다. 기계적인 입력이 연속되지 않고, 간헐적으로 이루어지는 경우에는 전기에너지를 연속적으로 사용할 수 없다. 그래서 커패시터나 배터리 등에 에너지를 저장하는 장치가 필요하게 되는데, 이것도 Piezoelectric 발전시스템의 전기에너지 출력량이 적어서 사용이 힘든 점이 많다. 결론적으로 에너지를 저장해서 사용하는 것 보다 전기신호로 사용하게 되면 더 효율적으로 사용할 수 있는 결론이 나왔다.

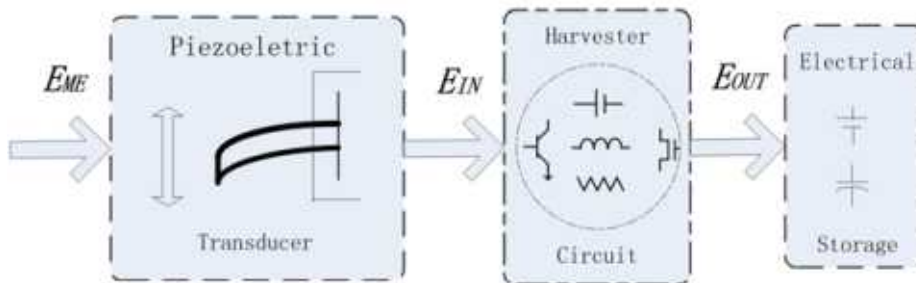


그림 2.4.1 Piezoelectric 발전시스템

이 절에서는 Piezoelectric 발전시스템의 전기적인 해석을 위해서는 Piezoelectric 변환기의 전기적 모델링을 수행한다. 그림 2.4.2(a)에 나타낸 것과 같이 PZT의 기계적인 변위에 따라 전하들이 그림 2.4.2(b)에서 처럼 배열하게 되어 전위차가 발생하고, 부하가 연결되어 있는 경우 전위차에 의한 전류가 흐른다. 즉, PZT의 출력은 전기적으로 기계적인 입력에 대응하는 전원의 동작을 수행하고, 그림 2.4.2(c),(d)에 나타낸 것과 같이 각각 전류원, 전압원으로 등가화 할 수 있다.

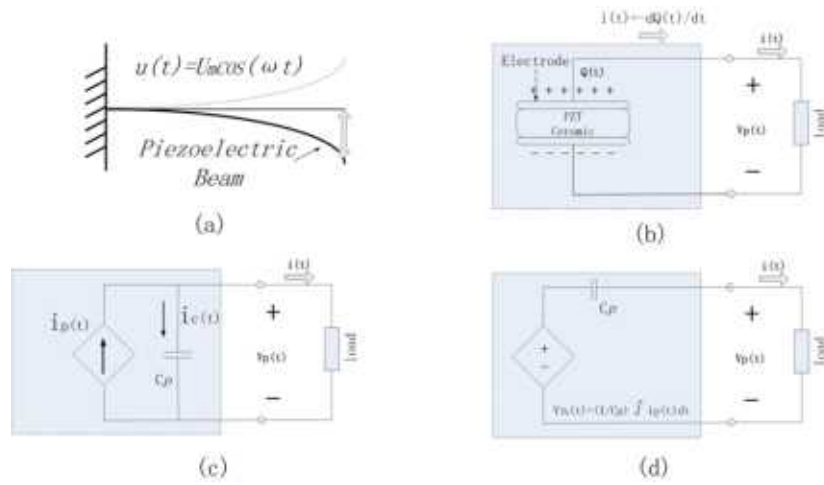


그림 2.4.2 PZT의 전기적인 모델

PZT의 출력 특성상 내부에 캐패시턴스 성분이 포함되어 있으며, 전류원으로 모델링할 경우에는 병렬, 전압원으로 모델링할 경우에는 직렬연결의 특성을 갖는다. 이때, 전압, 전류 및 캐패시턴스의 용량은 PZT의 크기, 재질, 기계적인 입력의 크기, 주파수 등에 따라 다르다. 따라서 해석적인 방법에 의한 모델링은 현실적인 어려움이 있기 때문에 설계, 제작한 PZT 시스템을 대상으로 각종 기계적인 입력 조건 및 부하조건에 따른 실험을 실시하여 이를 기초로 한 모델링 방법을 채택하고, PZT의 출력 전류의 측정 보다는 출력전압의 측정이 용이하기 때문에 전압원으로 모델링을 수행한다.

2. PCGE의 출력 특성 시험

시험에 사용된 PCGE-F-0.25와 PCGE-F-1.00를 실물시험체와 축소모형을 이용하여 출력 특성 시험을 진행하였다. 또한 PCGE를 직,병렬로 연결하여 나오는 출력특성에 대해서도 시험을 진행하였다. 이 시험은 전기 신호용으로 사용되는 것이 아닌 전기에너지 저장용으로의 사용도 가능한지 보기 위해 진행을 하였다. 이에 사용된 시험 장치는 그림과 같으며, 부하의 크기를 다르게 하면서 출력량을 측정하였다. 시험 결과는 표 2.4.1~4에 나타나 있다. 부하장치는 저항 박스를 사용하였다.

저항박스는 가변저항으로 구성된 장치로 저항을 크게는 99 k Ω 까지 사용이 가능하다.

이때 출력전압의 값은 기계적인 힘을 가하는 형태와 동일하게 나오므로, 실험은 Sine Wave의 형태로 기계적인 힘을 가하여 실험을 진행하였다.



그림 2.4.3 가변 저항박스

표 2.4.1 PCGE-F-0.25, 실물시험체

저항(Ω)	전압(V)-rms	전류(μ A)	전력(μ W)
open	6.63	0	0
50k	949.0m	18.98	18.01
40k	765.7m	19.13	14.63
30k	583.0m	19.43	11.33
20k	394.4m	19.70	7.76
10k	199.00m	19.90	3.96
5k	100.73m	20.00	2.00
1k	20.10m	20.00	0.40
500	10.12m	20.00	0.20
100	2.02m	20.00	0.04

표 2.4.2 PCGE-F-0.25, 축소모형

저항(Ω)	전압(V)-rms	전류(μ A)	전력(μ W)
open	16.98	0	0
50k	1.54	30.80	47.43
40k	1.24	31.00	38.44
30k	950.0m	31.67	30.08
20k	633.0m	31.65	20.03
10k	319.9m	31.90	10.18
5k	161.19m	32.20	5.18
1k	32.27m	32.00	1.02
500	16.17m	32.00	0.51
100	2.99m	29.90	0.09

표 2.4.3 PCGE-F-1.00, 실물시험체

저항(Ω)	전압(V)-rms	전류(μ A)	전력(μ W)
open	12.31	0	0
50k	1.49	29.80	44.40
40k	790m	19.75	15.60
30k	417.5m	13.90	5.80
20k	322.9m	16.10	5.18
10k	163.5m	16.30	2.66
5k	82.2m	16.40	1.34
1k	16.46m	16.00	0.26
500	8.30m	16.00	0.13
100	677u	6.70	0.00

표 2.4.4 PCGE-F-1.00, 축소모형

저항(Ω)	전압(V)-rms	전류(μ A)	전력(μ W)
open	10.85	0	0
50k	1.59	31.80	50.56
40k	1.29	32.25	41.60
30k	993.5m	33.10	32.87
20k	665.5m	33.25	22.11
10k	337.5m	33.70	11.36
5k	170.43m	34.00	5.78
1k	34.16m	34.00	1.16
500	17.06m	34.00	0.58
100	3.43m	34.30	0.12

가. 개방시험 (Open Test)

개방 시험을 통해서 알아내는 것은 시뮬레이션에 사용될 전압원의 전압의 크기이다. 그래서 이후에 진행되는 부하 시험을 통하여 PCGE의 캐패시턴스 크기를 정하게 되고 PCGE의 모델링이 완료되는 순으로 진행을 하게 된다.

표 2.4.1~4에서 open 부분의 전압 값을 보면 기존 재료에 얇은 소재를 사용한 것이 가장 출력 전압이 컸다. 하지만 이 출력 전압 값은 신뢰하기 힘든 값으로 부하 시험을 통하여 더 정확하게 시뮬레이션 모델링을 만들어야한다.

나. 부하시험 (Load Test)

부하 시험은 센서에 기계적인 충격을 줬을 때 전기에너지가 발생하는데, 그때 전류가 흐를수 있는 통로를 만들어 주게 된다. 즉, 개방시험에서는 전류가 발생하지 않으므로, 출력 전력량을 계산할 수 없지만, 부하시험에서는 전류가 흐르게 되어 전력량을 계산할 수 있게 된다. 이 결과 값은 표 2.4.1~4에 나타나 있다. 결과적으로는 PCGE-F-1.00에다가 축소모형으로 시험을 진행하였을 경우의 출력 값이 가장 크게 나타났다. 하지만 전기를 충전해서 사용하기에는 무리가 있는 크기이다. 작은 LED를 켜기 위해서는 최소 18 mW의 전기가 필요한데, 위 실험에서 발생한 전기량 중에 가장 큰 값이 0.05 mW였다. 이것은 단순 계산을 통해서 적어도 360개 이상의 센서가 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

다. 직렬시험

직렬시험은 그림 과 같은 형태로 위 시험에서 사용한 PCGE-F-0.25의 크기보다 1/3 작은 크기의 센서를 가지고 시험을 진행하였다. 결과적으로 직렬 시험의 경우 출력전압이 너무 작아서 측정에 어려움이 있었다. 이유는 일반적인 크기보다 전압의 크기가 1/3 만큼 작아지기 때문에 시험을 진행하는데 어려움이 있었으며, 더 높은 전압을 얻기 위해서는 직렬로의 연결은 전압을 높이는데 도움이 안되는 것을 알게 되었다.

표 2.4.5 PCGE-F-0.25 (72 × 24), 직렬 3개

저항(Ω)	전압(V)-peak	전류(mA)	전력(mW)
50k	0.38	0.007	0.0028
10k	측정 불가	측정 불가	측정 불가
5k	측정 불가	측정 불가	측정 불가

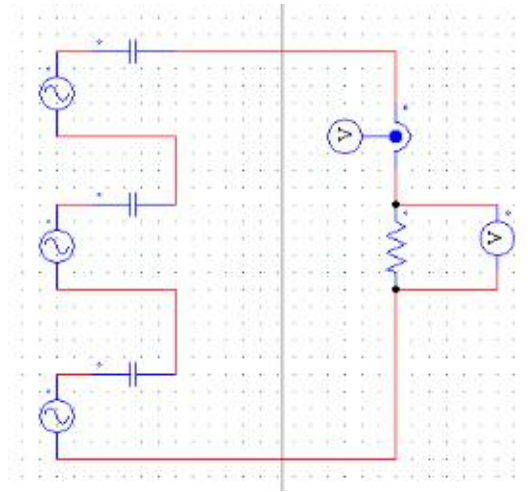


그림 2.4.4 직렬 구조 회로

라. 병렬시험

병렬시험의 경우 위 직렬시험과 동일한 크기의 센서를 병렬로 연결한 상태에서 진행하였으며, 회로도도 그림과 같다. 병렬 시험의 경우 기존의 센서를 하나 쓸 때 보다 전압이 3배 가량 증가하였으며, 위 직렬시험의 값과 약 6배 정도 차이가 발생하였고, 이를 통하여 이후에 사용할 에너지 저장장치로는 센서를 병렬로 사용해야 한다는 것을 확인하였다.

표 2.4.6 PCGE-F-0.25 (72 × 24) 병렬 3개

저항(Ω)	전압(V)-peak	전류(mA)	전력(mW)
50k	2.87	0.0574	0.164
10k	0.78	0.078	0.060
5k	0.42	0.084	0.035

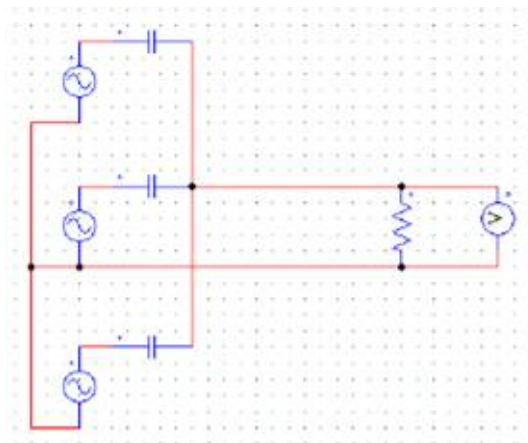


그림 2.4.5 병렬 구조 회로

3. 실험에 기초한 PZT의 전기적 모델링

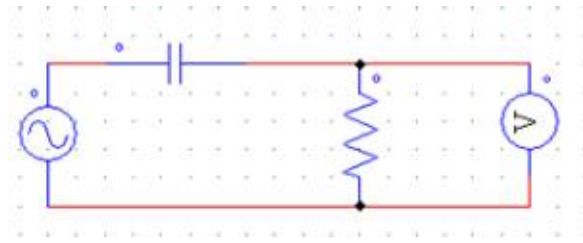


그림 2.4.6 전기모델링

시험을 바탕으로 그림 2.4.6과 같이 전기모델링을 할 수 있다.

여기서 사용되는 저항의 값은 시험에 사용하게된 부하 값이며, 입력으로 사용된 교류의 전압원은 개방시험을 통하여 얻은 전압의 값을 넣는다. 마지막으로 커패시턴스의 값은 부하시험에 사용한 부하 값을 변경하면서 여러번 시뮬레이션을 진행하여 찾는다. PCGE-F-1.00의 커패시터 크기는 330 nF 이고, PCGE-F-0.25의 커패시터 크기는 200 nF이 나왔다. 시험파형은 그림 2.4.8~9에서 볼 수 있다.

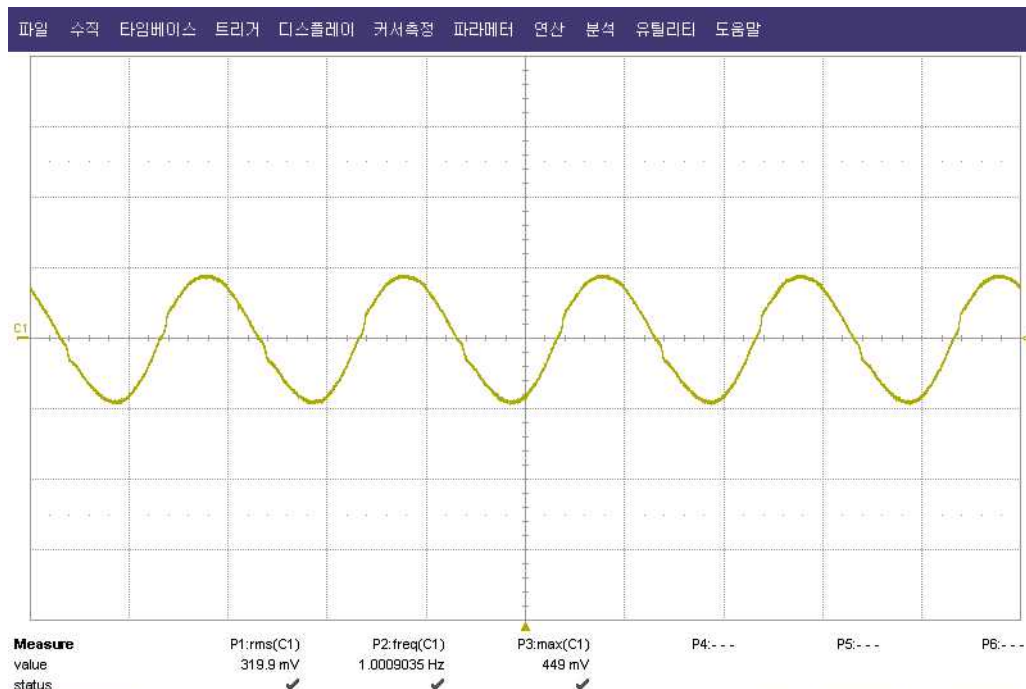


그림 2.4.7 PCGE-F-0.25, 축소모형, 부하 10kΩ 시험 파형

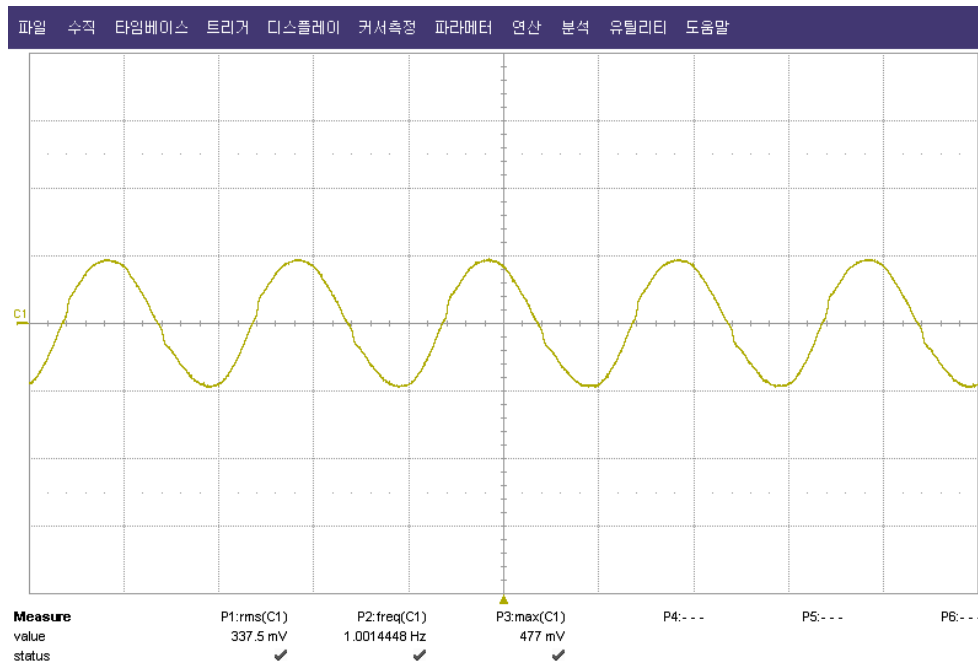


그림 2.4.8 PCGE-F-1.00, 축소모형, 부하 10kΩ 시험 파형

4. 기존에 사용한 에너지 저장 회로

기존 회로에서는 전기에너지를 저장하기 위하여 순간적인 펄스형 전기적 에너지를 충전하는데 적합한 전해콘덴서(Electrolytic Capacitor)를 사용하였다. 전해콘덴서를 사용한 에너지 축적을 위한 정류 회로는 그림 2.4.9에 나타내었다.

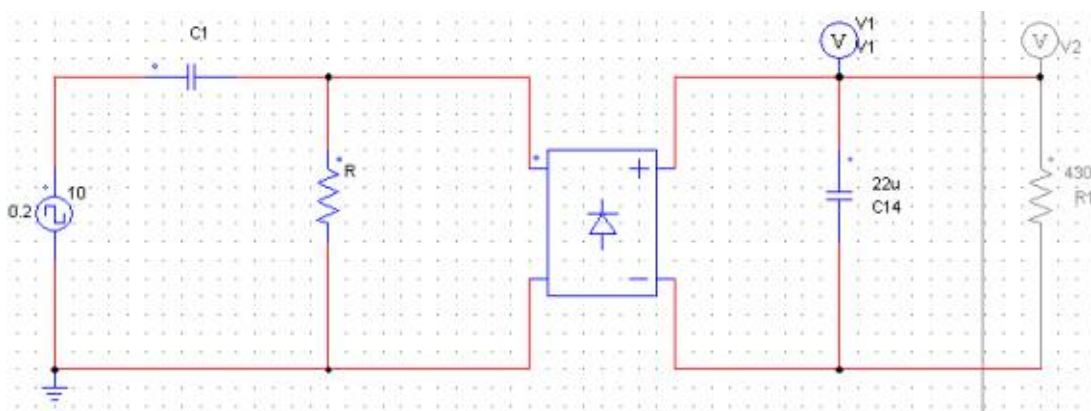


그림 2.4.9 전해콘덴서를 사용한 에너지 축적을 위한 정류 회로

위와 같은 회로를 사용하여, 시험을 진행하였는데, 시험은 5초 간격으로 진행을 하며, 충전되는 전압의 양을 측정하였다. 결과 값은 표 2.4.7과 같다.

표 2.4.7 전해콘덴서의 용량과 시간에 따른
출력전압(실험결과)

용량 시간	1100 μ F (mV)	733 μ F (mV)	235 μ F (mV)	110 μ F (mV)	22 μ F (mV)
5s	20.3	34.2	93.8	194.6	1032.6
10s	38.5	60.1	202.1	370.8	1914.5
15s	58.7	91.3	300.3	544.3	2674.9
20s	78.2	118.7	410.8	734.1	3512.6
25s	101.3	152.6	497.5	893.8	4063.7
30s	120.9	186.3	580.2	1041.3	4725.8
35s	148.2	220.1	661.7	1192.3	5254.1
40s	165.5	251.7	744.6	1354.6	5746.3
45s	190.9	273.6	834.7	1501.4	6384.2
50s	210.1	296.7	924.6	1654.0	6812.7
55s	234.5	323.2	1023.1	1791.7	7251.4
60s	256.2	350.9	1170.5	1923.6	7513.2

표 2.4.7과 같은 결과를 가지고 22 μ F을 사용할 경우의 충전량이 가장 크므로, 이를 선정하여, 회로 구성을 진행하였다. 하지만 이렇게 사용하게 될 경우 1.8 V, 10 mA의 용량을 갖는 LED를 구동하기 위해서는 최소 약 30초인 즉, 6번의 충격실험을 하여야 순간적으로 LED를 구동할 수 있는 실험 내용이다. 또한 결론적으로 LED를 직접 구동하기 위해서는 최상의 조건에서 PCGE를 병렬로 560개 연결해야한다. 병렬에 대한 시험내용은 위에 작성되어있다. 이것은 PCGE의 내구성을 고려해보면 에너지를 저장해서 사용하는 것 보다 PCGE의 전기 에너지를 신호용으로 사용하는 것이 더 효율적이라는 것을 알 수 있다.

5. 전기에너지 신호회로

가. 전기에너지 신호회로 초기 모델

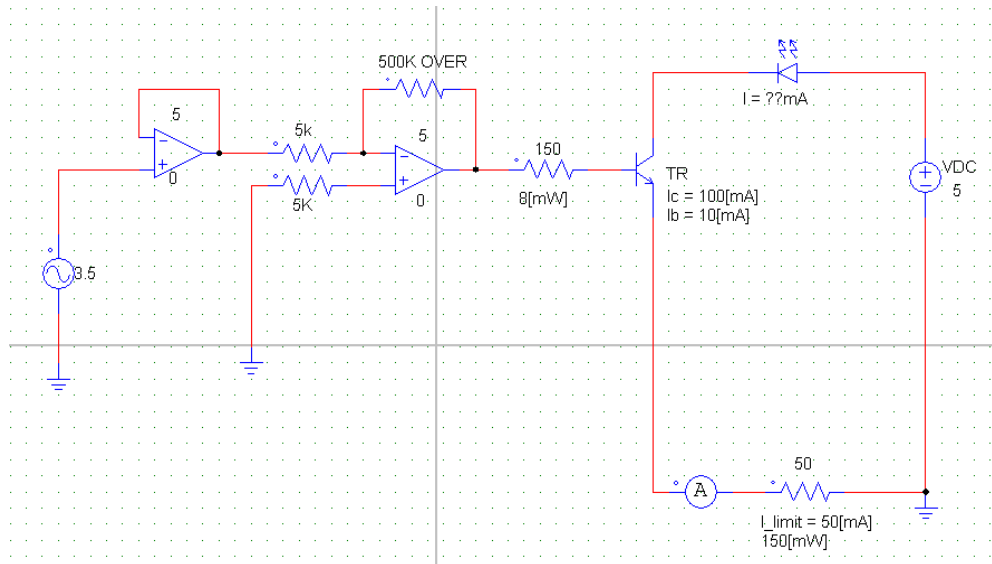


그림 2.4.10 전기에너지 신호 아날로그 회로

초기 모델은 그림 2.4.10과 같다. 이는 외부에서 LED를 구동하기 위한 5 V의 외부전원이 있으며, PCGE 센서의 전기에너지는 이를 켜는데 사용되는 트랜지스터의 스위치 기능을 하게 된다. 그래서 PCGE센서의 출력전압 값이 회로에서 정해주는 값보다 커지게 되면 스위치가 켜지고, 작아지게 되면 꺼지는 식으로 구동회로가 구성되어있다. 현재 전압은 3 V로 설정되어있어 PCGE센서의 전압이 3 V 이상 되면 트랜지스터가 켜지게 돼서 LED에 불이 들어오게 된다. 하지만 이 모델의 단점으로 트랜지스터에 On 전압이 도달하는데 걸리는 시간이 300 μ s 정도 걸리므로 신호용인 PCGE에서 300 μ s 정도 3 V 이상을 유지해야한다. 하지만 시험결과 시험장치에서는 무리없이 동작하였다. 이것은 현재 1 Hz로 실험하고 있기 때문이며, 손이나 다른 도구를 이용하여 충격을 가했을 경우에는 전압을 유지하지 못하여 켜지는 경우와 켜지지 않는 경우가 발생한다. 그래서 회로를 변경하여 구성하였다.

나. 전기에너지 신호회로 최종모델

위와 같이 아날로그 회로로 구성을 하게 되면 신호에 대한 지연에 대해 정확하게 구동하기가 힘든 상황이 발생한다. 그래서 이를 방지하기 위하여 디지털 제어를 사용하여 신호회로를 구성하였다. 이에 사용된 제어보드는 DSP Core로 TMS320F28335이다. 제어보드의 형태는 그림 2.4.11과 같다. 이 제어보드는 따로 회로를 구성할 필요가 없다. 제어보드 안에 신호를 입력받는 포트에서 Trigger 신호로 입력이 주어지면 그 신호에 맞춰서 LED 출력 단에 출력을 하게 된다. 최종 구성도는 그림 2.4.12과 같다. 여기서 사용된 LED의 외부전원은 SMPS를 사용하여 5 V가 외부에서 공급되도록 사용하였다.

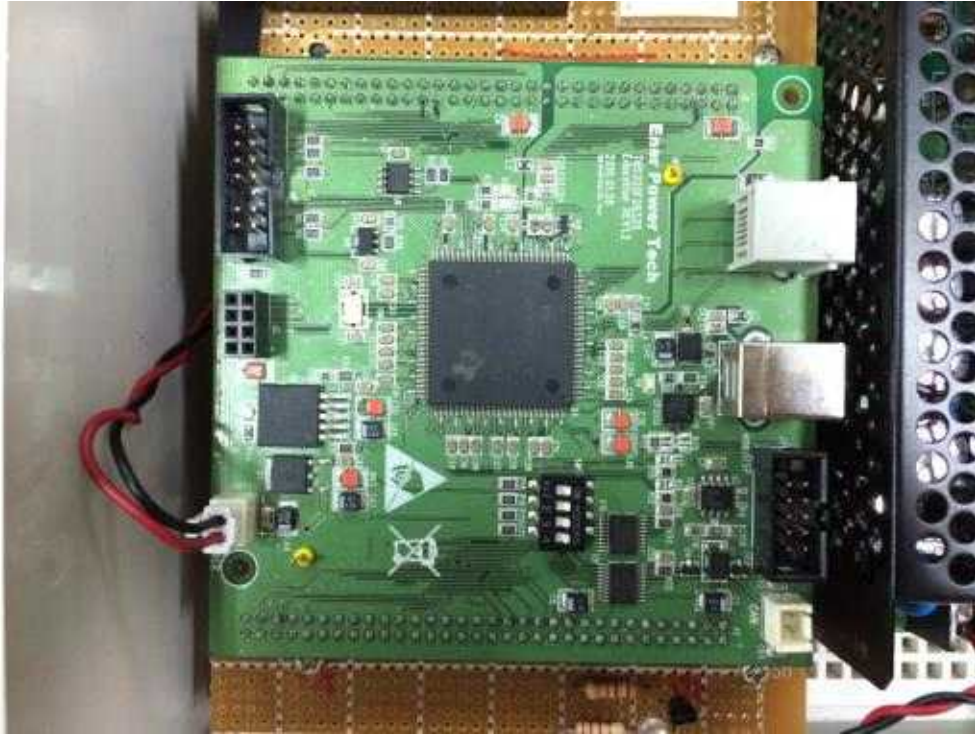


그림 2.4.11 제어회로



그림 2.4.12 전기에너지 신호 디지털제어 구성도

6. 결론

이 절에서는 PCGE의 전기적인 동작을 확인하였다. PCGE의 특성은 PCGE-F-0.25 보다 PCGE-F-1.00의 출력이 더 큰 것을 확인하였다. 또한 기계적인 신호에 의해 전기적인 출력 전압의 형태가 달라지는 것을 알았으며, 위 실험은 모두 Sine Wave의 형태로 진행하였다. 기계적인 부하는 고정하중으로 17.5 kN를 가한 상태에서 변동하중으로 ± 7.5 kN을 1 Hz로 인가하였다. 이 상황에서의 출력전력은 μW 단위로 나왔으며, 이것은 LED를 하나 구동하는데 필요한 18 mW 보다 턱없이 부족한 양의 출력 값이었다. 그래서 시험 방식중에 직,병렬 시험을 통하여 병렬을 사용하여 전압의 양을 늘리는 실험도 진행하였으며, 전압의 값이 커지는 것을 확인하였다. 또한 PCGE을 개선하여 최대 47 μW 의 출력 값이 나오는 시험조건에서 50 μW 의 출력이 나오게 개선하였다. 이를 짐작해 봤을 경우 아직 발전량이 부족하여 PCGE의 전기를 직접 충전하여 사용하기에는 무리가 있으나, 개선이 되면 병렬로 사용하여 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 그래서 시험 방식을 에너지 저장 시스템에서 전기에너지 신호회로로 구성을 변경하였다.

에너지 저장 시스템을 사용할 경우 PCGE 센서를 360~560개 이상을 병렬로 연결하게되면 LED를 연속적으로 구동이 가능하며, 또한 역전압이 발생함으로 정류 회로가 필요하게 된다. 이를 정류하기 위하여 다이오드를 사용하게 되며, 이때 손실이 발생하게 된다. 그리고 연속적으로 일정한 전압을 유지하기 위해서는 Boost Converter를 사용해야 되는 단점이 있다.

그래서 이 시스템을 전기 신호회로로 구성을 변경하였다. 초기 모델에는 디지털 제어기를 사용한 아날로그 제어기를 구성하였다. 아날로그 제어기의 경우 5 V의 외부 전원이 필요하고, 고가의 디지털 제어기가 필요없는 장점이 있어서 사용을 하게 되었다. 하지만 트랜지스터까지 신호가 도달하는데 시간에 지연이 있으며, 그 지연시간 동안 전압이 유지가 안되면 불이 들어오지 않는 단점이 있다. 그래서 결론적으로 디지털제어기를 사용하게 되었다.

디지털제어기의 구성은 PCGE의 신호를 바로 DSP인 제어보드에 입력을 한다. 그래서 외부전원이 연결되어있는 LED에 스위치 ON인 출력신호를 보내준다.

결과적으로 디지털제어기로 구성하면서 LED의 불을 몇 초 동안 점등할 것인지, 몇 번 신호 후에 점등 할 것인지 등의 원하는 대로 제어가 편리해 졌으며, PCGE의 입력 신호에 노이즈로 인해 발생할 수 있는 신호처리 부분은 RC 필터를 사용하여 보완할 수 있다.

제5절 BWIM 알고리즘 및 System 검증

1. BWIM 알고리즘

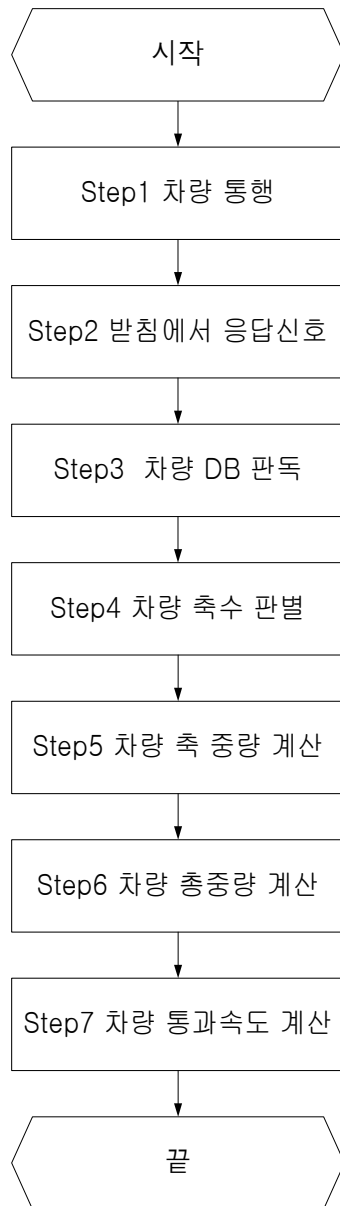
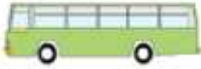
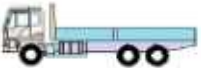
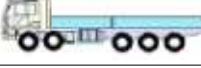
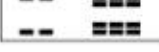


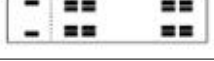
그림 2.5.1은 본 논문에서 제안한 BWIM 신호처리 과정흐름도이다. 교량위에 차량이 진입할 때 받침센서에서 나오는 충격 횟수를 통해 차량의 축수를 계측할 수 있다. 또한 축간 시간차로부터 축거를 계측할 수 있다. 지점부의 반력응답에 의해 차량 축 중량을 알 수 있고, 차량의 총중량을 계측할 수 있다. 차량이 교량의 지점부와 지점부 사이에 진입시간 차이로부터 차량의 속도를 계산할 수 있다.

그림 2.5.1 교량 받침의 신호를 이용한 차량 식별 절차

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 차량이 교량을 통행시 받침에서의 전압 히스토그램의 Peak 개수로 차량 축개수와 축간격을 확인할 수 있고 전압 히스토그램을 가지고 차량 형태 데이터베이스와 비교하여 차종을 확인할 수 있다. 이때 전압 히스토그램과 데이터베이스가 일치하는 차종이 없으면 과적차량으로 인식하여 과적차량의 과적량을 산출하는 controller box를 이용하여 사진촬영이나 정보통신을 통해 단속이 가능한 시스템을 구성할 수 있다.

표 2.5.1 차량 분류(교통량 정보제공 시스템)

종별		분류 기준	대표적 차체	차종의 정의
		축수	차축 배열	
1종	승용차 미니 트럭	2		16인승 미만의 여객 수송 용 차량, 미니 트럭 등 2 축 1단위 차량
				
2종	버스	2		16인승 이상의 여객 수송 용 버스 형식으로 2축 1단 위 차량
				
3종	소형 화물차 A	2		화물 수송용 트럭으로 2축 의 최대 적재량 1~2.5톤 미만의 1단위 차량
				
4종	소형 화물차 B	2		화물 수송용 트럭으로 2축 의 최대적재량 2.5톤이상 의 1단위 차량
				
5종	중형 화물차 A	3		화물 수송용 트럭으로 3축 1단위 차량
				
6종	중형 화물차 B	4		화물 수송용 트럭 형식으 로 4축 1단위 차량
				
7종	중형 화물차 C	5		화물 수송용 트럭 형식으 로 5축 1단위 차량
				
8종	대형 화물차 A	4		화물 수송용 세미 트레일 러 형식으로 4축 2단위(견 인차, 피견인차) 차량
				

9종	대형 화물차 B	4		화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 4축 2단위(건인 차, 피견인차) 차량
				
10 종	대형 화물차 C	5		화물 수송용 세미 트레일 러 형식으로 5축 2단위(건 인차, 피견인차) 차량
				
11 종	대형 화물차 D	5		화물 수송용 풀 트레일러 형식으로 5축 2단위(건인 차, 피견인차) 차량
				
12 종	대형 화물차 E	6		화물 수송용 세미 트레일 러 형식으로 6축이상 2단 위(건인차, 피견인차) 차량
				

계명대학교 첨단건설재료실험센터에서 실험한 데이터(고정하중 200 kN의 데이터를 이용)에 부족한 활하중(30 ~ 150 kN)에 대한 그래프를 3차 방정식을 통한 추세선을 이용해 부족한 데이터를 연장하여 차량하중 240 kN 까지 데이터를 유추하였다.

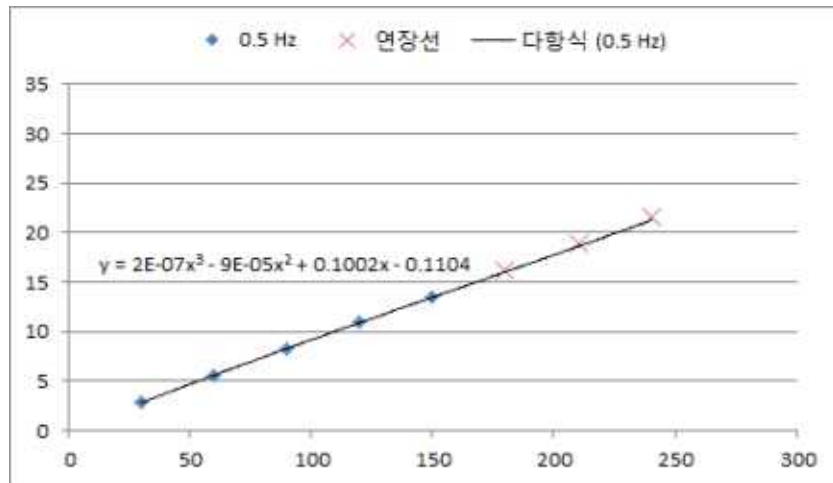


그림 2.5.2 고정하중 200 kN 가력주기 0.5 Hz에서의 추세선

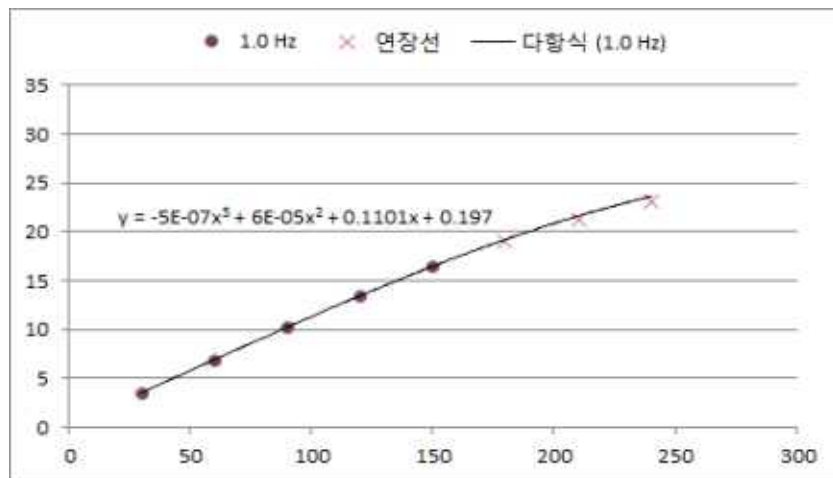


그림 2.5.3 고정하중 200 kN 가력주기 1.0 Hz에서의 추세선

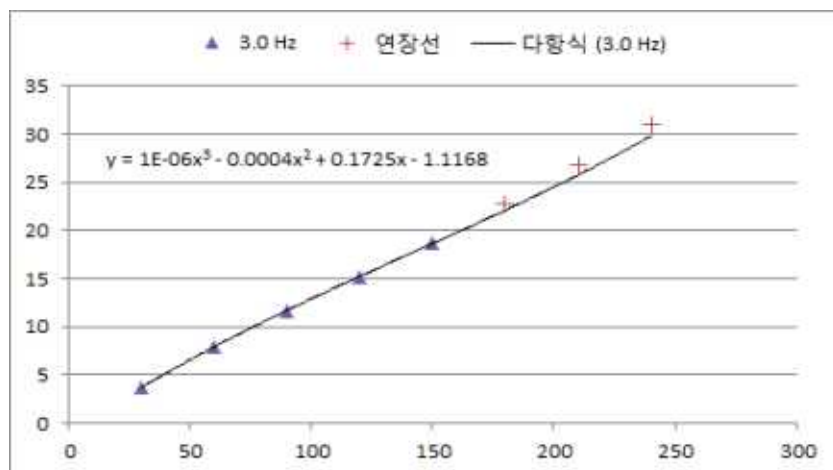


그림 2.5.4 고정하중 200 kN 가력주기 3.0 Hz에서의 추세선

실험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 장비의 제한으로 인해 더 큰 하중에서의 얻지 못한 데이터를 추세를 이용하여 유추해보았다.

실험에 사용했던 가력주기를 속도로 환산해보면 차간거리 10 m일 때 0.5 Hz는 18 km/h, 1.0 Hz는 36 km/h, 3.0 Hz는 108 km/h로 나타낼 수 있다. 따라서 예를 들면 단경간 교량의 경우 양단에 압전-복합재료 발전소자를 내장한 받침을 설치할 경우 차량의 속도를 충분히 파악할 수 있게 된다. 또한 측수도 알아볼 수 있으므로 DB와의 비교를 통해 차종파악도 가능할 것으로 판단된다.

향후 단일 받침만을 이용하여 속도를 파악할 수 있도록 실험 데이터로부터 다양한 진동수에서의 데이터를 유추할 수 있는 방법을 고안해야 한다.

2. 단순보 해석

BWIM 알고리즘을 검증하기 위해 MIDAS 프로그램을 이용하여 강합성 단순보의 동적응답을 구하였다. 차량의 속도의 변화가 차량하중 추정에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.

수치해석을 수행하는 단순보 모델은 길이 30 m인 합성형 거더이다. 수치해석 모델의 거더는 Beam요소를 사용하였다. 차량의 하중은 180 kN 집중하중으로 재하 하였다. 차량이동하중 속도에 따라서 교량 받침에서 동적영향이 다를 수 있으므로 속도를 20 km/h, 40 km/h, 60 km/h, 80 km/h로 달리하여 해석을 수행하였다.

유한요소 해석시 모델링 요소의 개수와 참여모드의 개수가 정확도에 영향을 미친다. 단순보 해석시 요소를 100 mm 단위로 하였고 참여모드의 개수는 100개 모드로 하였다.

그림 2.5.5는 단순보 교량의 거더 단면이고, 그림 2.5.6은 교량 모델링의 단순 이해도이다. 표 2.5.2은 단순보 교량의 물성치를 나타냈고, 유한요소에서 해석한 단순보 교량의 고유진동수를 표 2.5.2에 나타나있다. 본 해석에서 2등급 교량을 가정하여 DB-18 차량하중을 1축으로 180 kN을 재하하였다. 그림 2.5.7은 단위요소 100 mm를 20 km/h 속도로 지나갔을 때의 차량하중의 시간함수를 나타낸다.

가. 단순보 모델과 이동하중 입력조건

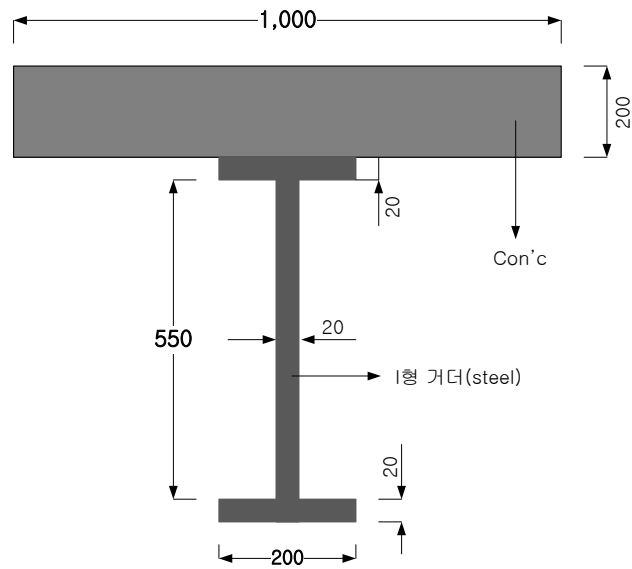


그림 2.5.5 합성형 거더 단면

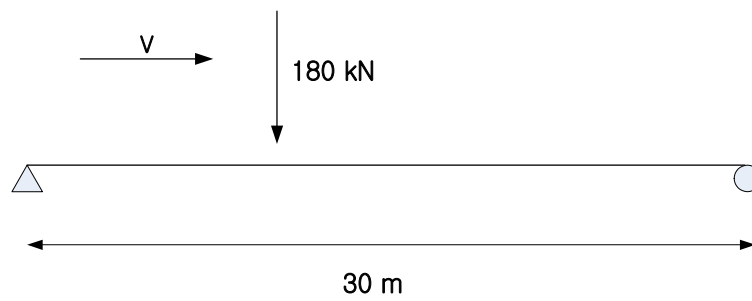


그림 2.5.6 단순보에서 하중 재하 간략도 (단위 : mm)

표 2.5.2 합성형 단순보의 물성치

구 분	탄성계수 (N/m ²)	관성모멘트 (합성후) (m ⁴)
콘크리트슬래브	2.11×10^{10}	2.73×10^{-3}
강재	2.06×10^{11}	

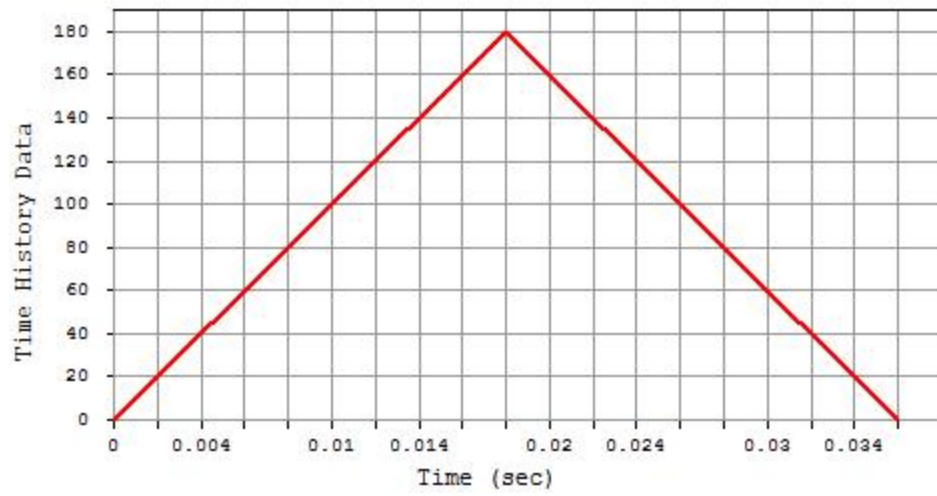


그림 2.5.7 차량이동하중 시간함수

표 2.5.3 단순보 모델의 고유진동수

Mode No	Frequency	
	rad/sec	cycle/sec
1	10.1558	1.6163
2	40.3626	6.4239
3	89.8614	14.3019
4	157.4599	25.0605

나. 받침에서의 반력

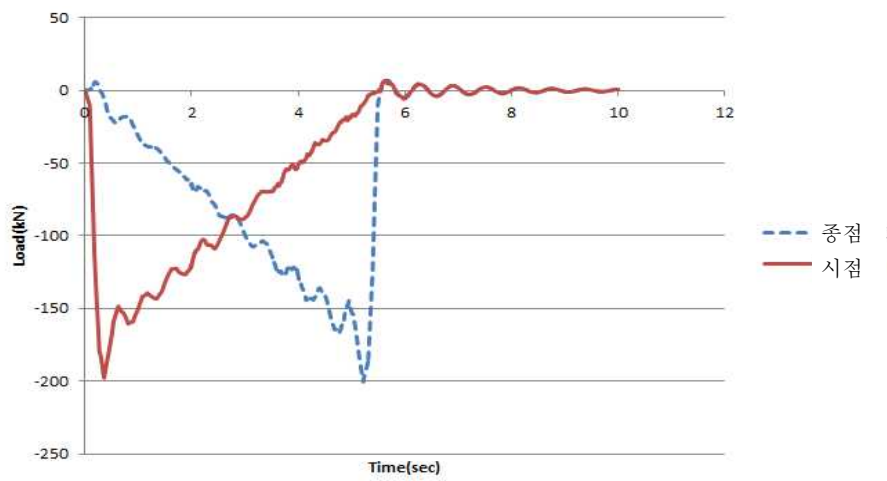


그림 2.5.8 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)

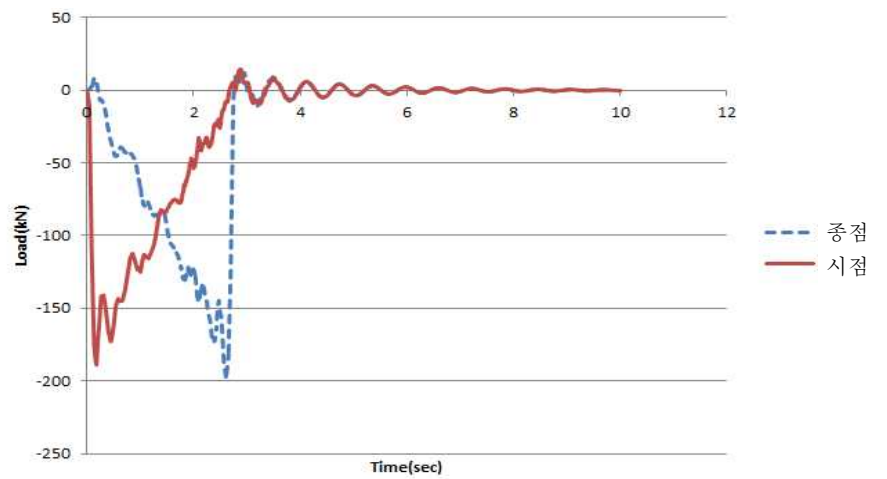


그림 2.5.9 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)

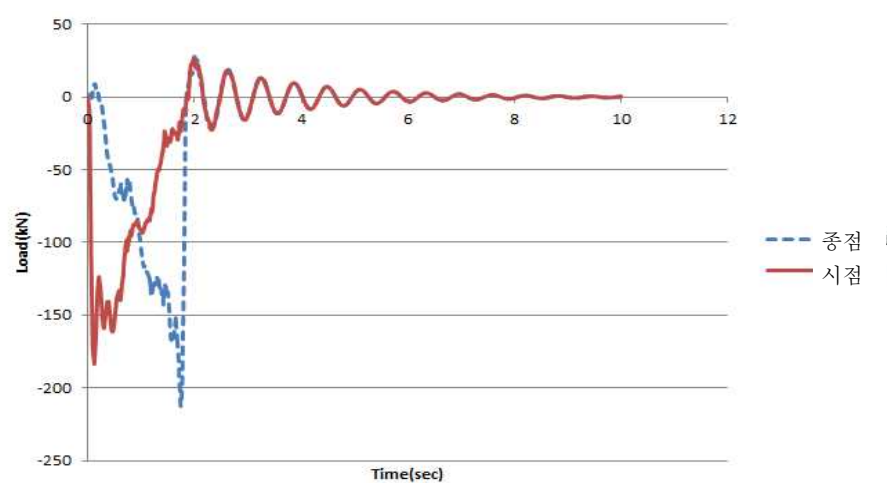


그림 2.5.10 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)

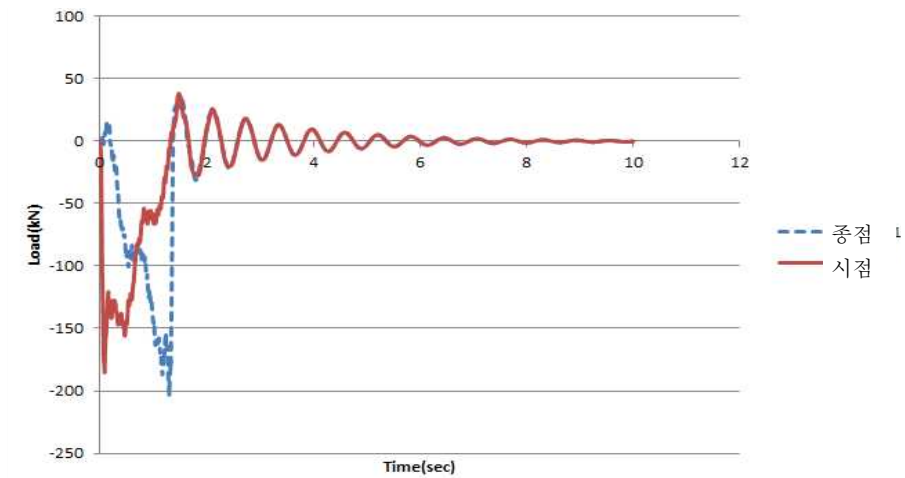


그림 2.5.11 단순보 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)

그림 2.5.8 ~11은 단순보 모델에 차량이동하중 180 kN, 속도별 20 ~ 80 km/h 일 때를 보여준다. 전체적으로 차량하중이 단순보를 지날 때 반력의 영향선을 확인할 수 있었다. 해석한 그래프 중 20 km/h일 때 제외한 그림에서 각 시점과 종점 받침의 반력 값을 비교해 보면 시점에 비해 종점의 값이 더 크게 나타났다. 이는 프로그램 해석상 차량 하중 진입 전의 데이터를 입력할 수 없어서 생기는 오차로 판단된다.

다. 단순보를 이용한 알고리즘 검증

표 2.5.1의 1종 차량의 차량 무게 1.4 t 축간거리 2.8 m의 일반적인 승용차의 데이터를 단순보 교량 위에 입력하여 해석하였다.

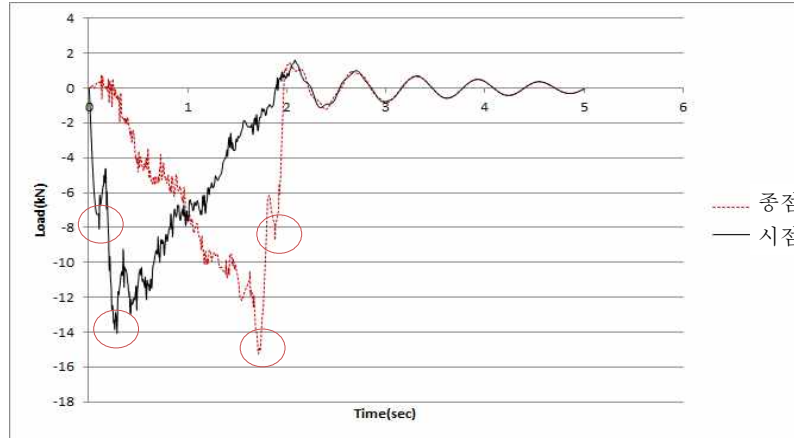


그림 2.5.12 1종 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력

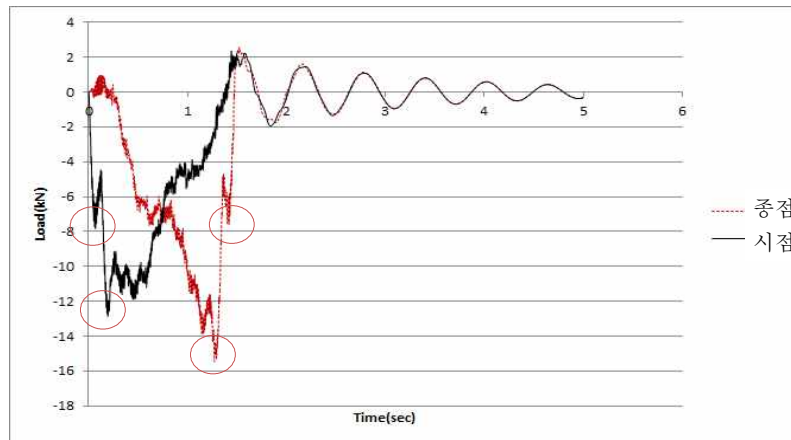


그림 2.5.13 1종 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력

그림 2.5.12 ~ 13은 반력 그래프 선이 2번 튀는 Peak(○ 표시한 부분)을 통해 2축 차량하중임을 확인할 수 있고 시점과 중점의 Peak의 시간차를 통해 속도와 차간거리를 알아낼 수 있을 것으로 판단된다.

표 2.5.4 1종 차량 60 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.106	-8.09725	1.714	-15.2465
두 번째 Peak	0.286	-14.0813	1.882	-8.72196

표 2.5.5 1종 차량 80 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.070	-7.84073	1.272	-15.4597
두 번째 Peak	0.194	-12.8558	1.420	-7.5918

그림 2.5.12 ~ 13의 ○부분의 Peak 데이터를 이용해 첫 번째 Peak의 시간차와 두 번째 Peak의 시간차를 가지고 속도를 구할 수 있다. 1종 차량 60 km/h에서 첫 번째 Peak의 시간차는 1.608초 두 번째 Peak의 시간차는 1.596초이다. 단순보 길이가 30 m 이므로 속도를 구해보면 각 67.2 km/h, 67.7 km/h가 나온다. 이는 입력한 속도 60 km/h와 약 12 % 오차를 보였다. 1종 차량 80 km/h일 때의 각 첫 번째 Peak과 두 번째 Peak의 시간차는 각 1.202초, 1.226초이다. 30 m 길이로 속도를 구하면 각 89.9 km/h, 88.1 km/h가 나오고 각각 약 12 %와 10 % 오차를 보였다.

표 2.5.1의 2중 차량의 차량 무게 2.2 t 축간거리 3.2 m의 승합차 데이터를 단순보 교량 위에 입력하여 해석하였다.

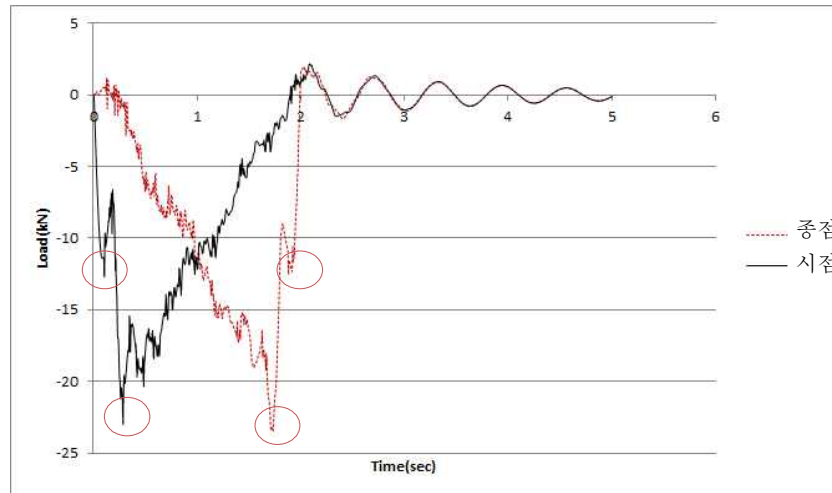


그림 2.5.14 2중 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력

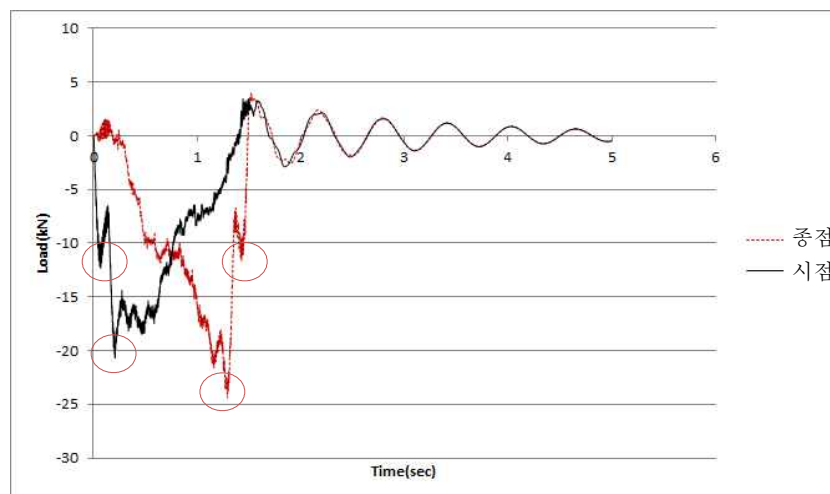


그림 2.5.15 2중 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력

표 2.5.6 2중 차량 60 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.106	-12.7243	1.731	-23.4583
두 번째 Peak	0.286	-23.019	1.883	-12.5344

표 2.5.7 2중 차량 80 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.070	-12.3212	1.292	-24.3724
두 번째 Peak	0.209	-20.7102	1.429	-11.6547

그림 2.5.14 ~ 15의 첫 번째 Peak의 시간차와 두 번째 Peak의 시간차를 가지고 속도를 구할 수 있다. 2중 차량 60 km/h에서 첫 번째 Peak의 시간차는 1.625초 두 번째 Peak의 시간차는 1.597초이다. 단순보 길이가 30 m 이므로 속도를 구해보면 각 66.5 km/h, 67.6 km/h가 나온다. 이는 입력한 속도 60 km/h와 각각 약 11 %와 13 % 오차를 보였다.

1중 차량 80 km/h일 때의 각 첫 번째 Peak과 두 번째 Peak의 시간차는 각 1.222초, 1.211초이다. 30 m 길이로 속도를 구하면 각 88.4 km/h, 89.2 km/h가 나오고 각각 약 10 %와 11 % 오차를 보였다.

표 2.5.1의 3중 차량의 2.5 t 트럭이 최대 적재하중을 실은 차량 총무게 5.9 t(1번 축 2.1 t, 2번 축 3.6 t), 축간거리 3.2 m의 트럭을 단순보 교량 위에 입력하여 해석하였다.

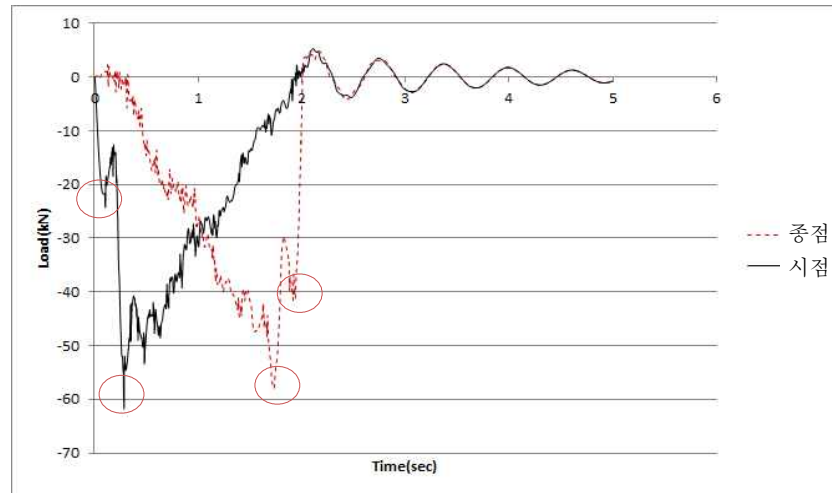


그림 2.5.16 3중 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력

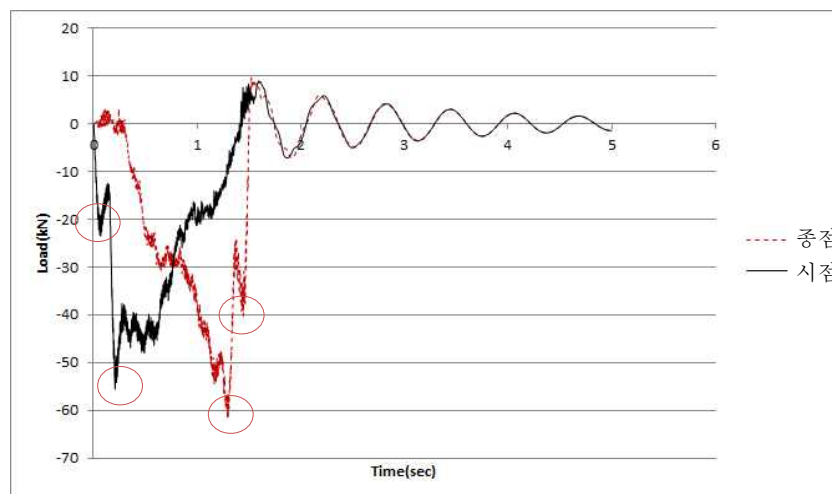


그림 2.5.17 3중 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력

표 2.5.8 3중 차량 60 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.106	-24.2918	1.732	-57.5494
두 번째 Peak	0.286	-61.7648	1.918	-41.5552

표 2.5.9 3중 차량 80 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.070	-23.5222	1.292	-61.7829
두 번째 Peak	0.209	-55.5854	1.430	-39.2985

그림 2.5.16 ~ 17의 첫 번째 Peak의 시간차와 두 번째 Peak의 시간차를 가지고 속도를 구할 수 있다. 3중 차량 60 km/h에서 첫 번째 Peak의 시간차는 1.626초 두 번째 Peak의 시간차는 1.632초이다. 단순보 길이가 30 m 이므로 속도를 구해보면 각 66.4 km/h, 66.2 km/h가 나온다. 이는 입력한 속도 60 km/h와 약 10 % 오차를 보였다.

1중 차량 80 km/h일 때의 각 첫 번째 Peak과 두 번째 Peak의 시간차는 각 1.222초, 1.221초이다. 30 m 길이로 속도를 구하면 각 88.4 km/h, 88.5 km/h가 나오고 약 11 % 오차가 보였다.

과적차량 단속이 가능한지 파악하기 위해 그림 2.5.16 ~ 17의 3중 차량하중의 50 %를 추가해서 입력하여 해석하였다.

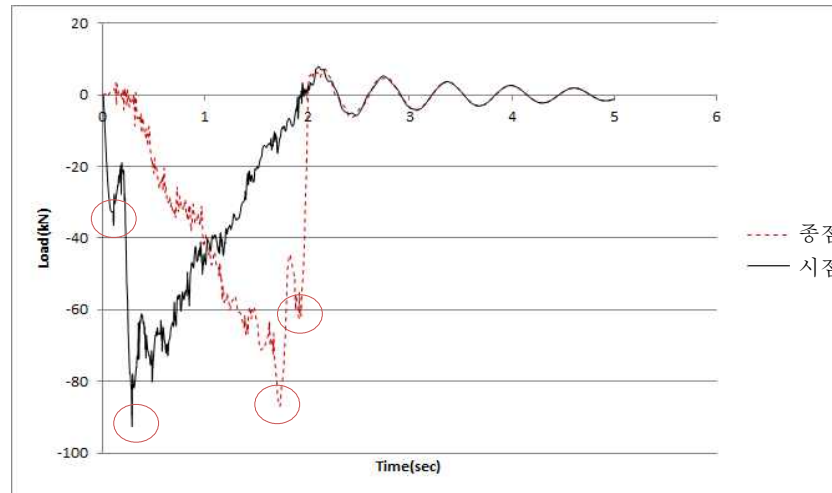


그림 2.5.18 3중 차량 60 km/h일 때 받침에서 반력(과적 50%)

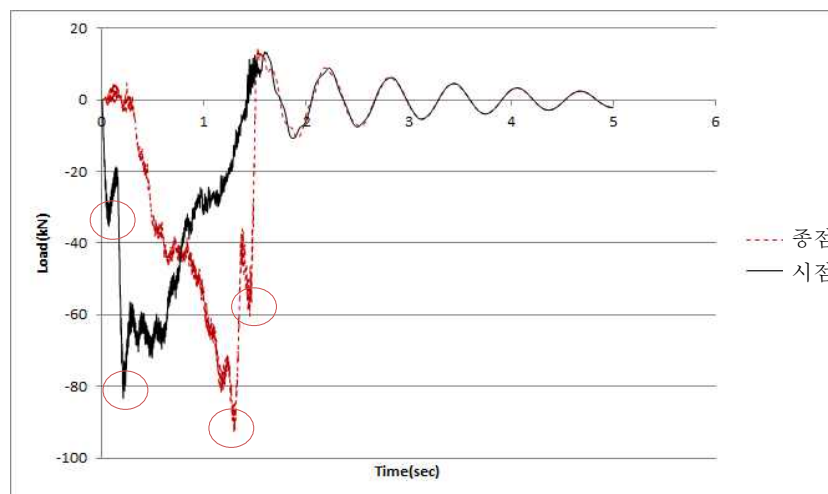


그림 2.5.19 3중 차량 80 km/h일 때 받침에서 반력(과적 50%)

표 2.5.10 3중 차량(과적 50%) 60 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.106	-36.4376	1.732	-86.9181
두 번째 Peak	0.286	-92.6472	1.918	-62.3328

표 2.5.11 3중 차량(과적 50%) 80 km/h Peak Data

구분	시점		종점	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.070	-35.2833	1.292	-92.6743
두 번째 Peak	0.209	-83.3781	1.446	-60.3995

그림 2.5.18 ~ 19의 첫 번째 Peak의 시간차와 두 번째 Peak의 시간차를 가지고 속도를 구할 수 있다. 2중 차량 60 km/h에서 첫 번째 Peak의 시간차는 1.626초 두 번째 Peak의 시간차는 1.632초이다. 단순보 길이가 30 m 이므로 속도를 구해보면 각 66.4 km/h, 66.2 km/h가 나온다. 이는 입력한 속도 60 km/h와 약 10 % 오차를 보였다.

1중 차량 80 km/h일 때의 각 첫 번째 Peak과 두 번째 Peak의 시간차는 각 1.222초, 1.237초이다. 30 m 길이로 속도를 구하면 각 88.4 km/h, 87.3 km/h가 나오고 각각 약 10 %와 9 % 오차를 보였다.

그림 2.5.16 ~ 17과 output data를 비교하면 입력한 50 %만큼의 비율로 반력 값이 나왔다. 이처럼 받침에서 응답신호를 차량 DB와 비교해 차량의 축수와 축간거리를 통해 차종을 확인하여 일치하지 않을 때 반력의 값을 비교해 과적 차량을 단속할 수 있다.

그림 2.5.12 ~ 19에서 단순보를 이용한 알고리즘 검증 및 분석을 위해 단순보에 1종, 2종, 3종의 차량하중을 입력하여 입력한 값을 역으로 차량의 하중과 축거, 속도를 확인하여 차종을 파악할 수 있는지 수행하였다. 입력한 속도와 수치해석 결과상 속도가 약 10 % 오차를 보였다.

이 오차를 보정한 후 축간 거리를 파악하고, 얻은 반력 값을 이용해 차종을 유추해 낼 수 있다.

3. 강합성 교량 해석

가. 강합성 교량 제원 및 하중 입력 조건

교량 모델 구조해석은 3경간 연속보 강합성 교량을 이용하였다. 경간의 전체 길이는 100 m 이고, 폭은 12.5 m이다. 그림 2.5.20은 수치해석을 수행한 모델이고, 교량 모델의 고유진동수와 주기는 표 2.5.12와 같다.

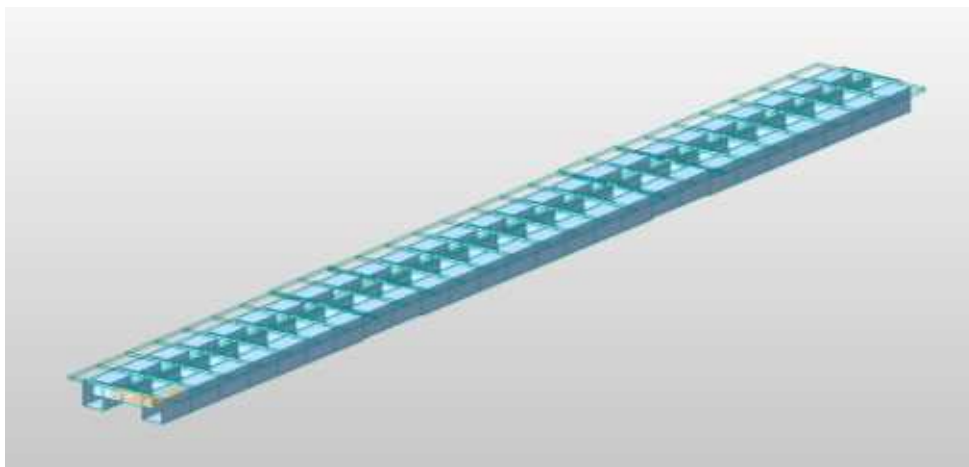
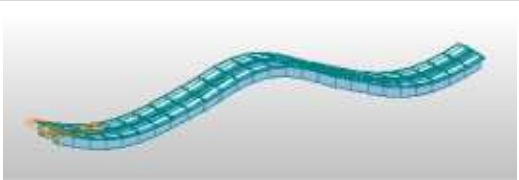
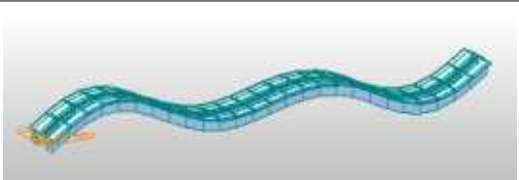
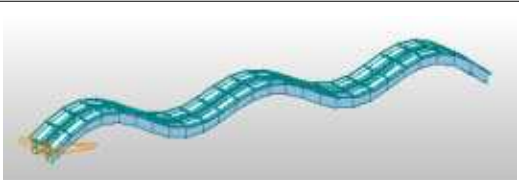
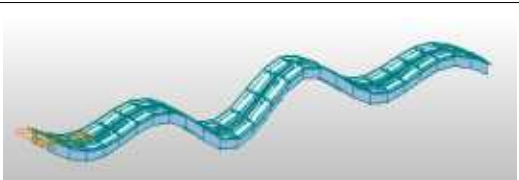
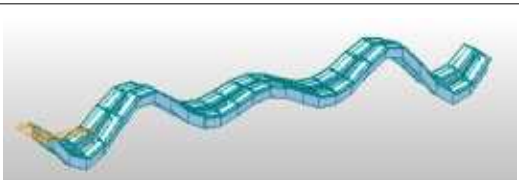
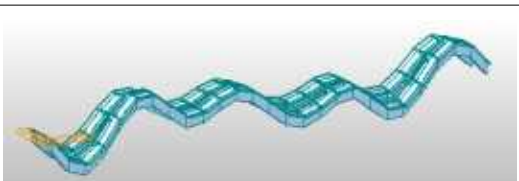
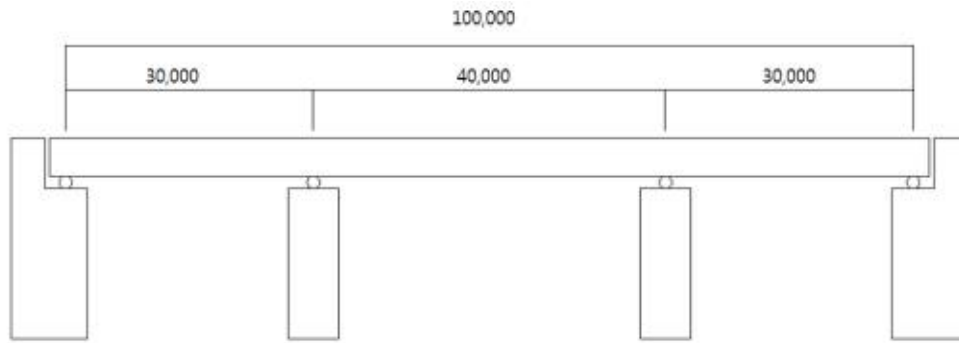


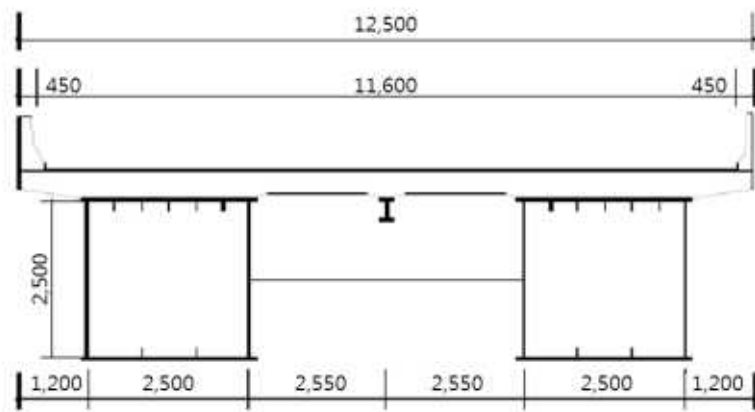
그림 2.5.20 유한요소 모델 (강합성 교량)

표 2.5.12 교량 모델의 고유진동수 및 주기

Mode No.	Frequency (cycle/sec)	Period (sec)	Mode Shape
1	3.294637	0.303524	
2	3.8263	0.261349	
3	4.890951	0.204459	
4	9.366595	0.106762	
5	13.43285	0.074444	
6	14.19409	0.070452	



(a) 종단면도 (단위 : mm)



(b) 횡단면도 (단위 : mm)

그림 2.5.21 강합성 교량 단면도

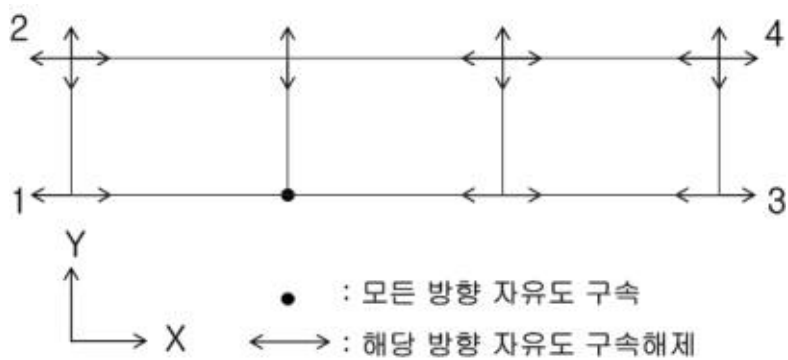
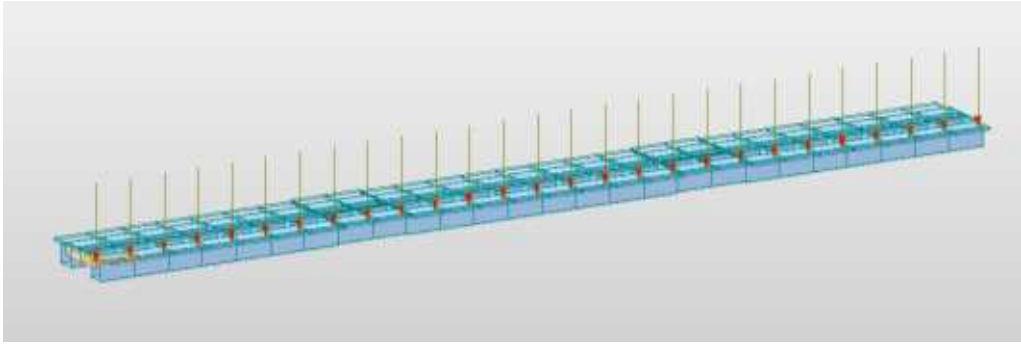
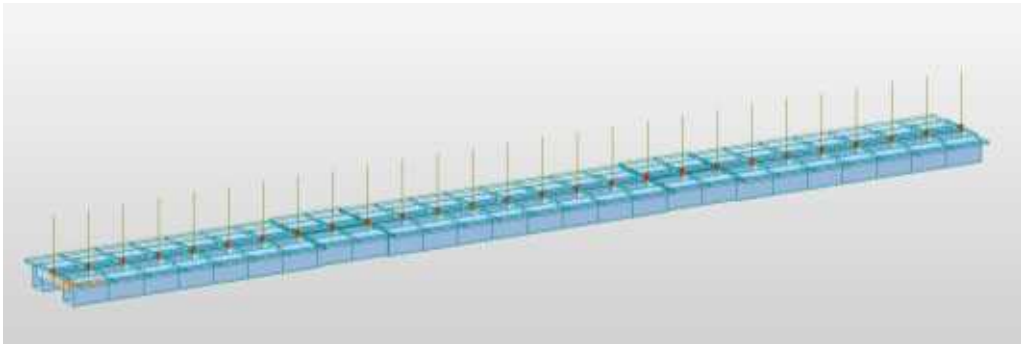


그림 2.5.22 강합성 교량 자유도

그림 2.5.17은 모델링한 강합성 교량 모델의 횡단면도와, 종단면도이다. 교대와 교각에서의 지점부 경계조건은 그림 2.5.18과 같고 숫자 1 ~ 4는 교량 받침의 위치를 표시한 것이다.



(a) 이동하중 case1



(b) 이동하중 case2

그림 2.5.23 차량이동하중의 위치

그림 2.5.23은 교량 모델 위에 차선이 다른 2개 케이스의 차량이동하중 해석을 수행하였다. 3차선인 교량 모델의 그림 2.5.19 (a) 오른쪽 차선과 그림 2.5.19 (b) 중앙차선에 차량이 지나가도록 해석을 수행하여 받침의 반력으로 차량의 차선 위치를 확인할 수 있는지 검토하였다.

나. 이동하중 case1

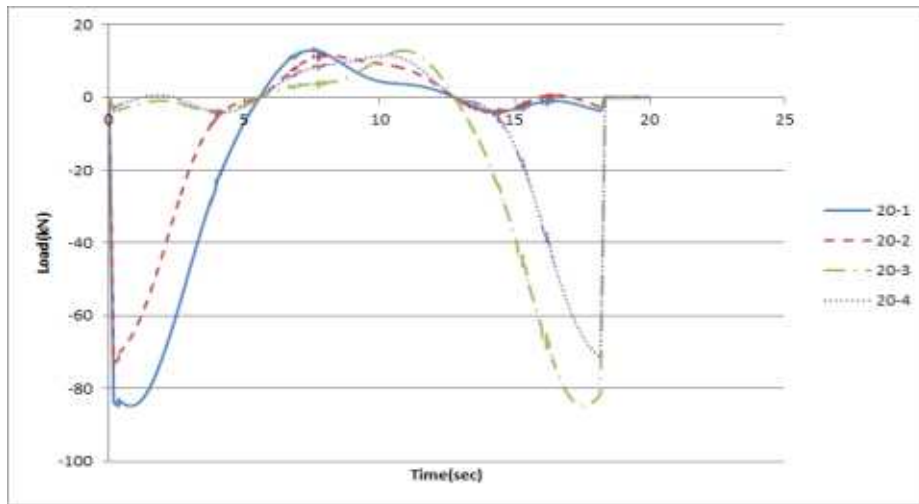


그림 2.5.24 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)

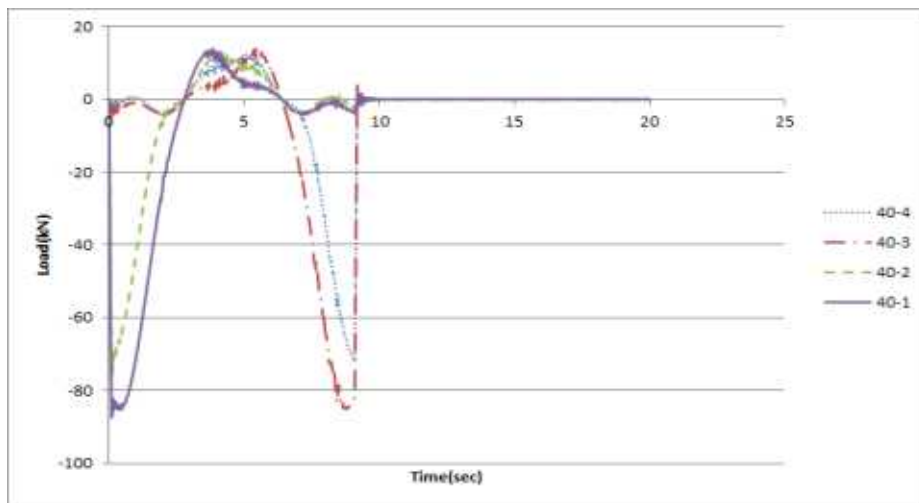


그림 2.5.25 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)

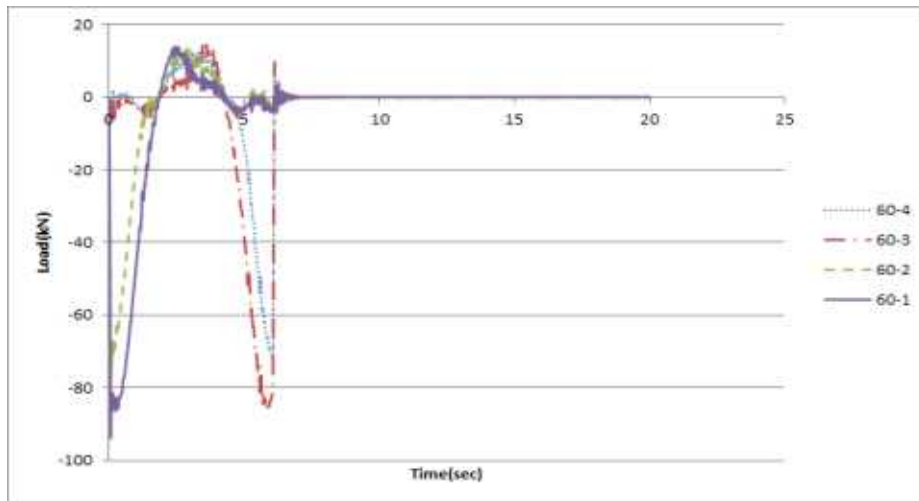


그림 2.5.26 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)

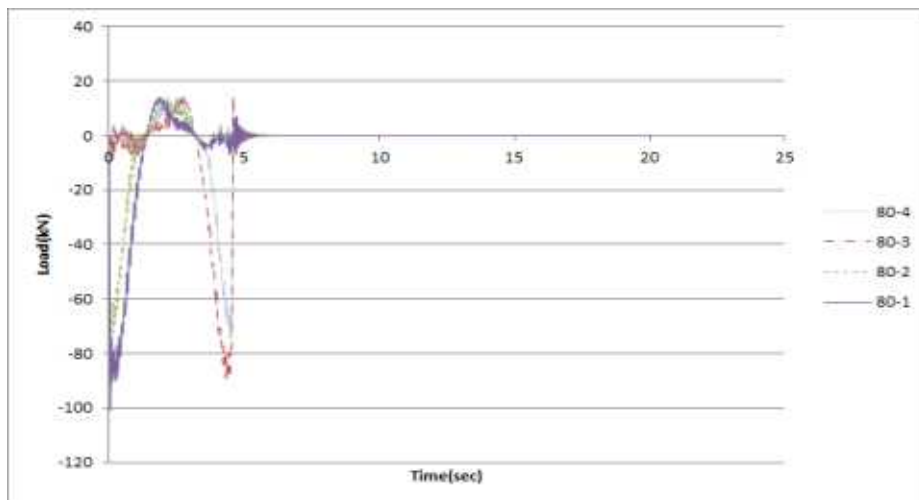


그림 2.5.27 case1 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)

그림 2.5.24 ~ 27은 교량 모델 오른쪽 차선에 차량 하중을 속도별로 20 km/h ~ 80 km/h로 입력하여 각 받침에서 얻은 반력 그래프이다. 교량 모델의 오른쪽 차선에 입력한 180 kN 차량 하중 값은 오른쪽 차선 방향인 1번과 3번 받침이 차선 왼쪽 방향인 2번 4번 받침의 반력보다 더 크게 입력되었다. 이는 받침에서 얻은 반력신호를 통해 차량의 통행 위치를 확인할 수 있는 것을 판단할 수 있다. 두 반력의 값의 합은 실제 입력한 차량하중 값과 차이가 나는 것을 확인하였다.

다. 이동하중 case2

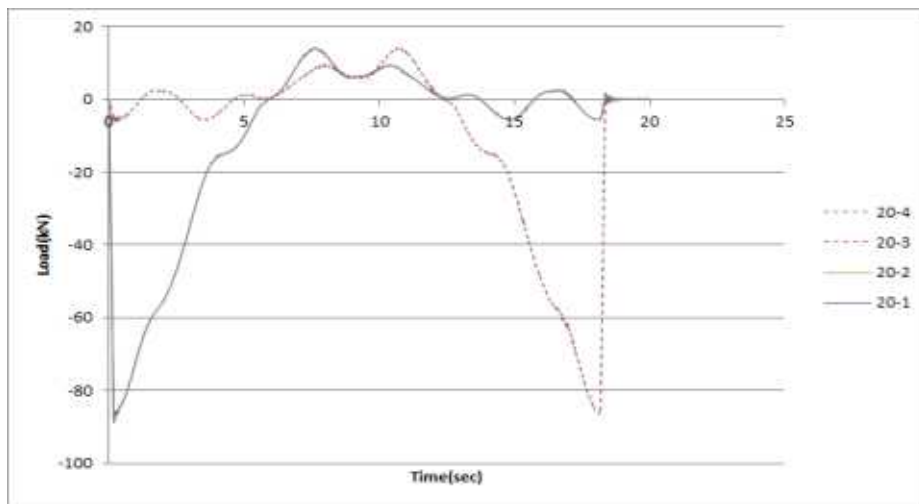


그림 2.5.28 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(20 km/h)

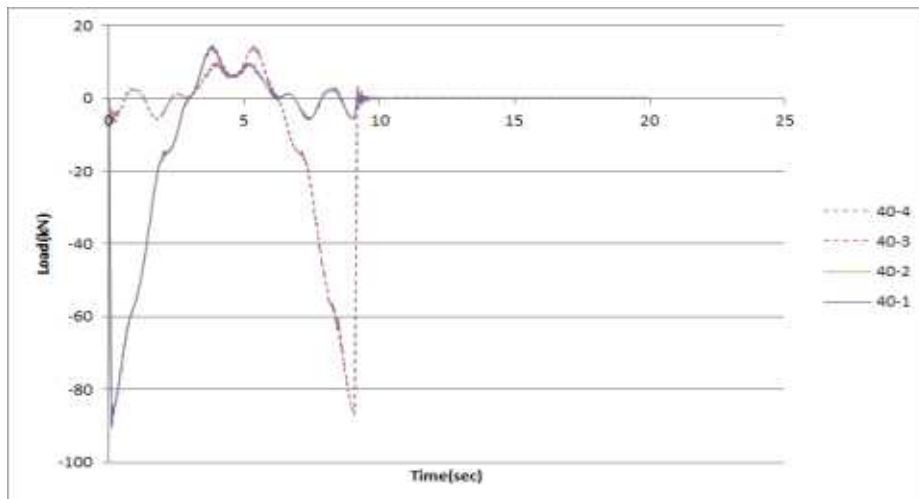


그림 2.5.29 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(40 km/h)

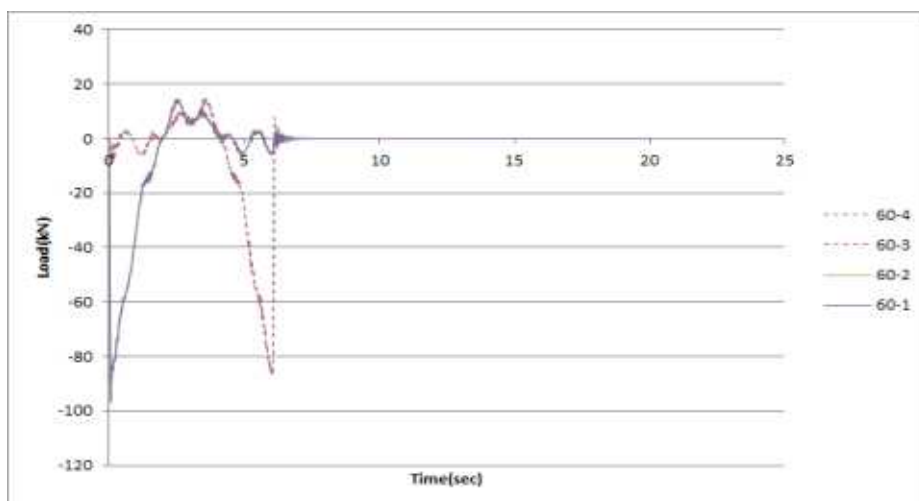


그림 2.5.30 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(60 km/h)

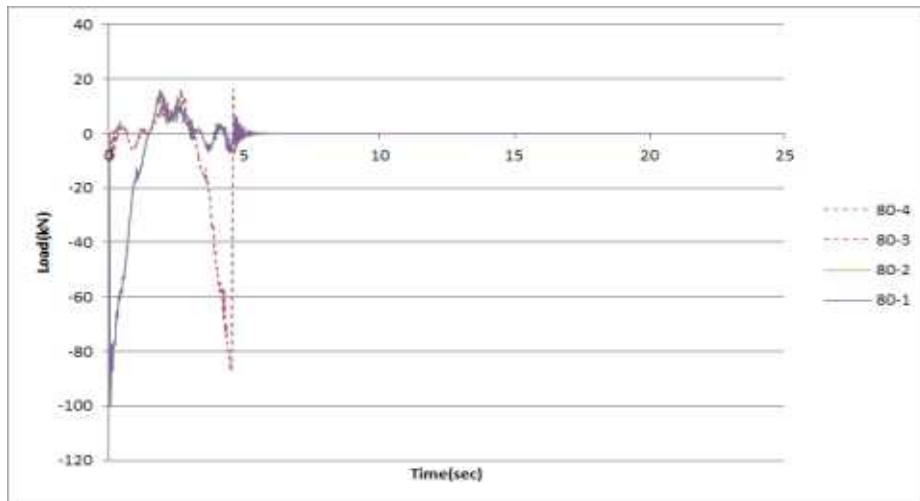


그림 2.5.31 case2 각 받침에서 받는 하중 해석결과(80 km/h)

그림 2.5.28 ~ 31은 교량 모델 중앙 차선에 차량 하중을 속도별로 20 km/h ~ 80 km/h 를 입력하여 각 받침에서 얻은 반력 그래프이다. 교량 모델의 중앙차선에 입력한 180 kN 차량 하중 값은 1번과 2번, 3번과 4번 받침에서 좌우 대칭으로 일치하는 데이터를 얻었다. 1번과 2번, 3번과 4번 받침에서 반력 데이터 값의 합이 입력한 180 kN의 차량하중 값과 5 % 내의 오차로 입력한 차량 하중 값과 거의 일치하였다. 이러한 오차가 발생하는 이유는 교량의 고유진동수와 차량의 속도 등이 여러 변수로 작용하여 발생하는 문제로 판단된다.

라. 연속보 교량을 이용한 알고리즘 검증

4중 차량의 차량 무게 24 t 덤프트럭 축간거리 5 m로 하여, 가력주기 0.5 Hz는 9 km/h, 1 Hz는 18 km/h, 3 Hz는 54 km/h를 적용하였다.

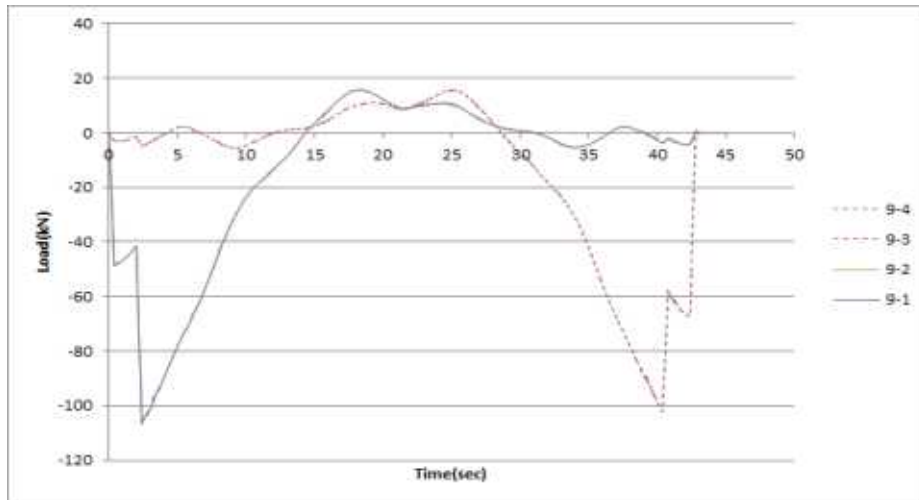


그림 2.5.32 4중 차량 9 km/h 일 때 반침에서 반력

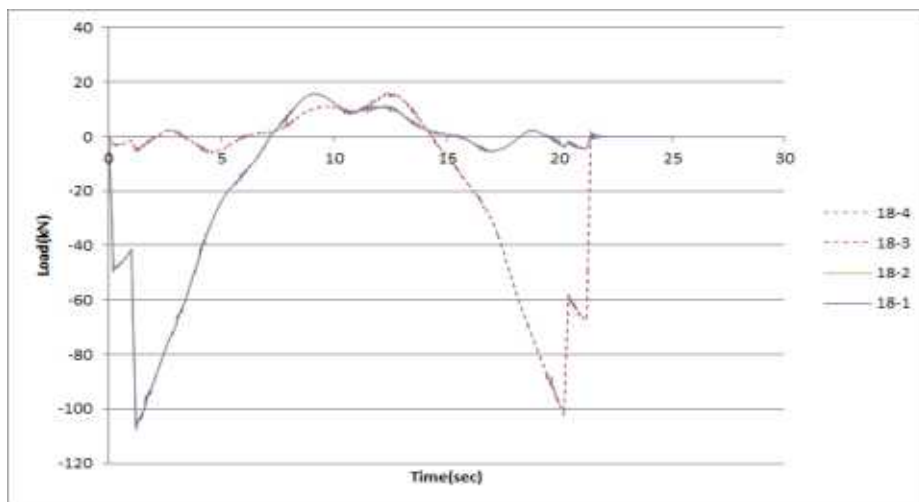


그림 2.5.33 4중 차량 18 km/h 일 때 반침에서 반력

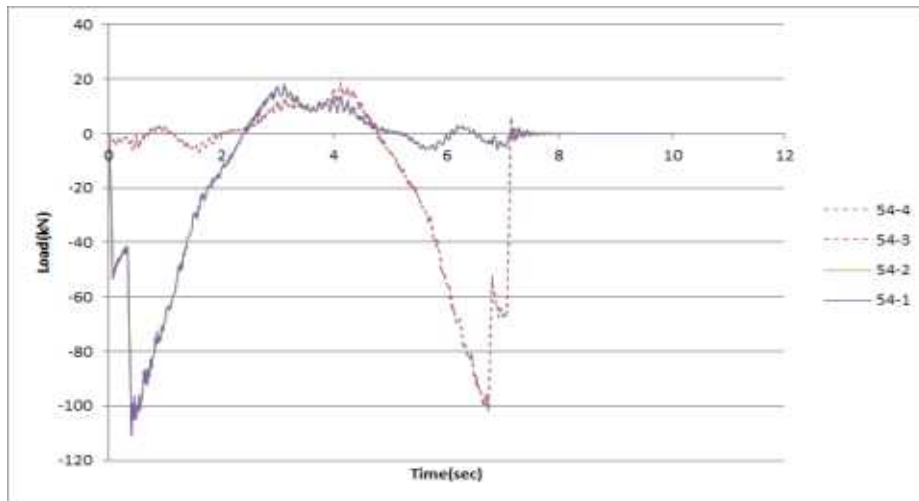


그림 2.5.34 4종 차량 54 km/h 일 때 받침에서 반력

표 2.5.13 4종 차량 9 km/h Peak Data

구분	1,2번 받침		3,4번 받침	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.41	-48.832	40.4	-102.407
두 번째 Peak	2.406	-106.835	42.398	-67.353

표 2.5.14 4종 차량 18 km/h Peak Data

구분	1,2번 받침		3,4번 받침	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.21	-49.617	20.2	-102.489
두 번째 Peak	1.206	-107.640	21.198	-67.390

표 2.5.15 4종 차량 54 km/h Peak Data

구분	1,2번 받침		3,4번 받침	
	시간(sec)	반력(kN)	시간(sec)	반력(kN)
첫 번째 Peak	0.076	-53.415	6.736	-101.947
두 번째 Peak	0.404	-110.941	6.918	-67.403

그림 2.5.32 ~ 34의 첫 번째 Peak의 시간차와 두 번째 Peak의 시간차를 가지고 속도를 구할 수 있다. 4종 차량 9 km/h에서 1,2번 그래프의 Peak 시간차는 3.99초 3,4번 그래프의 Peak 시간차는 3.99초로 일치했다. 연속보 길이가 100 m 이므로 속도를 구해보면 각 9.0 km/h로 단 순보에서의 결과 다르게 오차가 없었다.

18 km/h일 때의 각 1,2번 그래프의 Peak와 3,4번 그래프의 Peak의 시간차는 19.99초로 일치했다. 100 m 길이로부터 속도를 구하면 입력하였던 18.0 km/h와 일치하였다.

54 km/h일 때의 각 1,2번 그래프의 Peak와 3,4번 그래프의 Peak의 시간차는 6.66초, 6.514초가 나왔다. 100 m 길이로부터 속도를 구하면 각각 54 km/h, 55.3 km/h가 나왔다. 속도가 증가됨에 따라 3,4번 받침의 그래프에서 2 %의 오차를 보였다.

연속보 교량을 이용한 알고리즘을 통해 제5절 1에서 유추한 추세선의 데이터와 대조하여 비교해 볼 수 있다. 이를 통해 압전-복합재료 발전소자를 내장한 교량 받침을 이용해 차량의 축수와 축중량을 가지고 차종을 판별하여 과적차량 단속의 가능성을 기대할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 Pot Bearing 교량 받침에 PCGE를 삽입하여 하중을 가했을 때 발생하는 전압으로 차량하중을 계측하는 방법을 연구하였다. 기존의 BWIM System 알고리즘인 교량 거더의 변형률 신호를 이용하는 것이 아니라 교량 받침의 반력응답을 가지고 차량의 하중을 추정함으로써 반력응답을 계측할 수 있는 PCGE가 내장된 교량 받침을 제안하였다.

이를 위하여 보예제와 강합성 교량에 차량 하중을 속도변화에 따른 동적응답을 분석하였다. 제안한 BWIM 알고리즘과 압전-복합재료 발전소자를 내장한 교량 받침을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

가. 기존의 BWIM System과 달리 제안된 시스템은 상부구조형식이나, 경간구성 교량형상과 무관하게 적용할 수 있고 교량 받침 안에 센서가 내장되어 시공하므로 별도의 설치가 필요 없어 설치비용이 다른 계측방법보다 저렴하고 효율적인 모니터링 시스템을 구축할 수 있다.

나. 압전-복합재료 발전소자를 내장한 교량 받침에 센서의 최적 위치를 실험을 통해 받침의 고무판 바닥면에 부착했을 시 가장 높은 전압을 확인할 수 있었고 하중재하별 동적실험을 통해 고정하중의 크기 증가와 무관하게 PCGE를 이용한 교량 받침은 안정적인 전압을 발생할 수 있어 BWIM System의 가능성을 확인할 수 있었다.

다. 단순보와 연속보, 교량예제를 가지고 이동하중의 속도 변화에 따른 받침에서의 동적응답을 분석하여 차량의 축수와 축중량을 가지고 차종을 판별하여 과적차량 단속과 지점부 사이에 진입시간 차이로부터 과속 단속의 가능성을 확인할 수 있었다.

라. 본 연구에서 제안한 BWIM System 알고리즘은 받침에서 얻은 데이터를 통해 차량하중을 추정하는 연구이므로 여러 변수에 따라 차량하중을 추정할 수 있는 알고리즘의 개발도 이루어져야 할 것으로 판단되며, 이를 위한 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

제6절 결론

이 연구에서는 압전소자를 이용한 발전기능과 하중계측기능을 가진 교량 받침의 개발 중, 최종 목표인 고내구성 압전발전소자 개발, 압전소자가 내장된 교량 받침 설계 및 실험시뮬레이션, 에너지 신호회로 설계 및 시뮬레이션, 계측용 교량 받침에 의한 BWIM System 검토를 수행하였다.

제1절에서는 압전소자의 내구성과 발전효율성을 향상시키기 위하여 다양한 복합소재와 압전소자의 조합을 통해 압전-복합재료 발전 소자의 설계 및 제작을 수행한 결과를 기술하였다. 제2절에서는 PCGE의 내구성 실험에 대한 내용을 기술하였다. 제3절에서는 개발된 PCGE를 교량 받침에 적용한 경우의 하중과 발생전압과의 관계를 확인하기 위한 다양한 실험을 수행하고 포트받침의 실험시뮬레이션을 설계하여 PCGE가 내장된 경우의 사용성과 효율성을 연구한 성과를 기술하였다. 제4절에서는 압전소자에 의해서 발생하는 전기에너지를 효율적으로 축전하기 위한 에너지 저장회로를 연구와 그 대안으로 제시된 에너지 신호 회로를 설계 및 제작한 내용을 기술하였다. 제5절에서는 개발된 성과품이 실제 교량에 적용된 경우에 교량상을 통과하는 중차량의 하중계측(BWIM)에 이용가능한지를 검토하였다.

압전소자를 압전-복합재료 발전소자(PCGE-F)로 개발하여 내구성과 발전효율성을 향상시켰다. 일련의 실험결과를 통해 고정하중의 크기와 무관하게 PCGE를 이용한 포트받침은 안정적인 면압-발생전압의 관계를 나타내고 있어 활하중 계측기로서의 가능성을 확인할 수 있었다. 교량 받침의 반력을 이용하여 차량하중을 계측하는 방법을 연구하기 위하여 단순보에서 이동하중의 속도변화에 따른 동적응답을 분석하였으며, 받침반력을 통한 이동하중의 크기를 특정할 수 있음을 확인하였다. 또한 PCGE의 발전특성에 맞는 DC-DC Converter와 전해커패시터로 구성된 에너지저장회로를 설계하고 LED를 작동시키는 시뮬레이션을 수행했다. 에너지 저장회로에 대한 대안으로 에너지 신호 회로를 제시하고 제작하였다.

본 연구를 통해 고내구성 압전발전소자를 개발하였고, 이를 통한 실제 교량에서 사용가능한 받침을 제작하였다. 실험을 통해 교량 받침은 하중계측기능과 발전기능을 확보하였음을 확인하였고, 발생된 전기에너지는 현재까지 전혀 사용되지 않았던 차량하중을 신재생 에너지로 활용가능하리라 판단된다.

제3장 최종 연구 성과 및 적용실적

학술지 논문

	SCI(E)/일반학술지 구분	논문제목	게제일
건국대	SCOPUS (국제전자전기기술 자협회, AISS)	Feasibility of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material	2012
	SCIE (Advanced Science Letters)	Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material	2013
	SCOPUS (Advanced Materials Research)	Experimental Study on the Optimal Layering Position of the Piezocomposite Electricity Generating Element Built-in an Innovative Traffic Load-Measuring Bridge Bearing	2013
	SCOPUS (Applied Mechanics and Materials)	Dynamic Characteristics of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element	2013
	SCI(Journal of Nanoscience and Nanotechnology)	Effects of cyclic impacts on the performance of a piezo-composite electricity generating element in a d33 mode energy harvesting	2014

학술회의 발표

	학술발표회 명	논문 제목	발표일
건국대	SPIE	Development of d ₃₃ -mode Piezocomposite generating Element	2012. 03
	한국지진공학회	압전소자가 내장된 교량 받침을 이용한 차량하중측정	2012. 03
	AMSE 2012	Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material	2012. 09
	한국지진공학회	압전소자가 내장된 하중계측용 받침의 동적실험	2013. 03
	ISMAM 2013	Cyclic Load Test of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element	2013. 05
	ICMPNIT 2013	An Experimental Study on the Optimal Position of the Embedded Piezocomposite Electricity Generating Element in an Innovative Traffic Load-Measuring Bridge Bearing	2013. 08

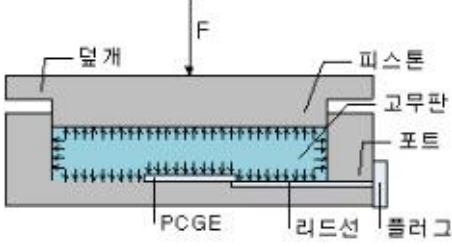
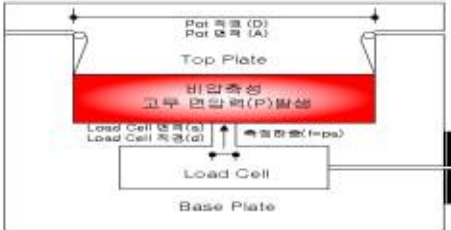
특허

	구분	등록번호	특허명	등록일
건국대	등록	제13/496,970호	RESILIENT BRIDGE SUPPORT HAVING A PIEZOELECTRIC DEVICE	2014.02
	등록	제2012-530758호	壓電素子を備える弾性橋梁支承	2013.10

인력양성 배출 실적

	과정명	졸업자성명	일시
건국대	석사	김대현	2012.02
	석사	조 군	2012.08
	석사	관반라이	2013.08
	석사	장원서	2014.02
	석사	양두영	2014.02

기존 제품과의 경제성 평가

구분	계측용 교량 받침(PZT 적용)	계측용 교량 받침 (Load Cell 적용)
형태		
구조		
장점	- 받침 높이 변화가 없다. - 모든 받침에 적용가능하다. - 기존 받침 교체에 영향이 없다. - 수명이 반영구적이다.	- 전용 데이터 로거가 필요없다.
단점	- 전용 데이터 로거가 필요하다	- 받침의 높이가 증가된다. - 로드 셀 고정홀을 가공하여야 한다. - 로드 셀의 수명이 짧다.
경제성	3000 kN 기준 : 2,500,000원/EA	3000 kN 기준 : 3,000,000원/EA
검토의견	기존의 계측용 받침은 하부에 로드 셀을 삽입하여 하중을 측정하는 방식으로 로드 셀을 안착하기 위하여 하부판의 두께가 증가하여 받침의 중량과 단가가 증가하지만, 압전소자를 이용한 교량 받침은 압전소자의 두께가 미소하여 받침의 높이 변화 없어 기존 받침에 비하여 경제적이다.	

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	▪압전소자가 내장된 교량 받침 설계 및 축소모형 시험검증	▪ 계획수립 및 자료수집 ▪ PZT센서 기반으로 하는 교량 받침 설계 ▪ PZT를 이용한 받침회로 설계 ▪ 축소시험체 제작 ▪ 축소시험체를 이용한 성능시험 ▪ 시험분석 및 개선사항 검토 ▪ 에너지 저장회로를 포함한 발전회로 구성 ▪ 실험에 의한 발전효과 검토 ▪ 하중계측시스템 구성 ▪ 계측용 교량 받침에 의한 BWIM System 검토 ▪ 계측용 교량 받침에 의한 유지관리 효용성 검토
	▪고내구성 압전 발전 소자 개발	▪ d_{33}형 압전-복합재료 발전소자 설계 ▪ 발전소자의 발전 성능 시험
2차년도	▪압전소자가 내장된 교량 받침 제작 및 성능시험	▪ 시스템 구성 도면 작성 ▪ PZT를 이용한 발전회로 제작 ▪ PZT를 이용한 계측용 받침 제작 ▪ 실물시험체 제작 ▪ 발전에너지 축전시스템 개발 ▷ 전기에너지 신호 회로 개발 ▪ 실물시험체의 발전효용성 검증실험 ▪ 에너지발전 효용성의 정량화 ▪ 성능시험 ▪ 시험 분석 및 개선 사항 검토 ▪ 제작도 및 제작/성능시험 시방서 작성 ▪ 계측용 교량 받침에 의한 BWIM System의 해석적 연구 ▪ 교량유지관리 효용성의 정량화
	▪고내구성 압전 발전 소자 개발	▪ d_{33}형 압전-복합재료 발전소자의 내구성 시험 ▪ d_{33}형 압전-복합재료 발전소자의 내구성 향상 방법 연구 ▪ d_{33}형 압전-복합재료 발전소자의 최적발전조건 확인시험

제2절 연구개발 목표의 달성도

1. 1차년도 연구개발 목표의 달성도

연차별 성과목표	성 과 지 표	측정방법	목표치	가중치	실적치
논문	학술지논문 건수(SCI)	논문발표수	1	0.1	1
	학술회의 발표 논문건수(국제)	논문발표수	1	0.1	1
	학술회의 발표 논문건수(국내)	논문발표수	1	0.1	1
지식재산권	특허출원건수(국외)	출원건수	2	0.2	2
에너지 및 환경	환경개선효과 (CO2절감)	환경개선에 기여한 정도	100%	0.1	1
기술선진화	기술자립도(기술축적)	자국 기술 인용 비율	80%	0.1	1
비용절감 효과	유지보수비용 절감효과	유지보수비용 절감비율	50%	0.1	1
산학연협력	산학연 협력 네트워크 구축	산학과의 협력체계 구축건수	1	0.1	1
인력양성	분야별 인력양성 배출실적	해당사업을 통해 양성된 인력의 전공분야별 배출실적	1	0.1	2

2. 2차년도 연구개발 목표의 달성도

연차별 성과목표	성 과 지 표	측정방법	목표치	가중치	실적치
논문	학술지논문 건수(SCI)	논문발표수	1	0.1	1
	학술회의 발표 논문건수(국제)	논문발표수	1	0.1	3
	학술회의 발표 논문건수(국내)	논문발표수	1	0.1	1
지식재산권	특허등록건수(국제)	출원건수	1	0.2	2
기술선진화	기술자립도 (기술축적)	자국 기술 인용 비율	80%	0.1	1
비용절감 효과	유지보수비용 절감효과	유지보수비용 절가비율	50%	0.1	1
에너지 및 환경	환경개선효과 (CO ₂ 절감)	환경개선에 기여한 정도	100%	0.1	1
사업화	기술실시계약	기술실시계약 건수	1	0.1	1
인력양성	분야별 인력양성 배출실적	해당사업을 통해 양성된 인력의 전공분야별 배출실적	1	0.1	2

제5장 연구 성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구결과의 활용방안

1. 활용방안(사업화 방안)

- 범정부적인 녹색산업 지원책에 부응한 기술개발
- 참여기업의 현장을 이용한 조속한 시험시공가능
- 참여기업의 해외파트너를 활용한 해외진출도모
- 개발기술의 확대적용으로 도로시설을 이용한 에너지생산가능
- 압전소자를 트리거링 시스템에 적용하여 소모되는 전기 저감 가능
- PCGE-F 교량 받침 상용화

2. 신뢰성 (Reliability) 인증 확보 계획

- 교량 받침의 성능시험을 통한 PCGE-F의 내구성 검증
- KS F 4424, KS F 4420 의 성능기준을 만족하는 성능시험 실시

3. 양산 및 판로 확보 계획

가. 제품 양산계획

- PCGE-F 내장을 위한 생산 설비 구축
- 기존 교량 받침 생산라인에 PCGE-F 내장을 위한 금형 및 생산라인 추가

나. 판로확보 및 마케팅 계획

- 교량모니터링 시스템 연계 계측용 교량 받침 설계 반영
- 기존 교량 받침 시장의 시험 시공을 통한 제품 성능 인증
- 학회발표를 통한 제품 홍보
- 참여기업의 해외파트너를 통한 해외 시장 판로 확보

4. 기술이전계획

- 주관기관과 참여기업관 지속적인 인적 교류를 통한 기술이전
- 정기적인 교육을 통한 설계 기술 이전
- 참여기업 연구원 주관기관 위탁교육 실시
- 주관기관 연구원 졸업 후 참여기업의 신규채용으로 지속적 개발 추진

제2절 추가연구 필요성

- 세계최고수준의 압전소자를 개발한 연구진과 지속적인 연구에 대한 논의가 필요
- PCGE 전용 데이터로거 연구가 필요
- 실교량에 PCGE가 내장된 받침을 설치한 실험베드 필요
- 제품생산 및 실적용을 위한 추가적인 연구가 필요
- BWIM System의 실용화를 위한 다양한 교량의 해석적 연구가 필요
- BWIM을 실용화를 위해 횡하중 분배를 고려한 추가적인 해석연구가 필요
- 효과적인 BWIM System 구축을 위해 차종 DB 확립 필요
- 실교량 적용을 위한 추가적인 BWIM System 연구가 필요
- PCGE가 내장된 받침을 이용한 BWIM System의 실적용을 위한 알고리즘 개발이 필요
- 다양한 연구기관·참여기업과의 협동 연구로 발전효율성 향상과 대량발전을 위한 시스템 구축이 필요

참고 문헌

- Anton S R, Sodano H A, "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)", Smart Mater. Struct, 16, 2007.
- Chan, T. H. T., Law, S. S., Yung, T. H., Yuan, X. R., "An interpretive method for moving force identification, journal of sound and vibration, 219, 503-524, 1999.
- Choo, J. F., Ha, D. H., Lee C. H., Jang, W. S., "Experimental Study on the Optimal Layering Position of the Piezocomposite Electricity Generating Element Built-in an Innovative Traffic Load-Measuring Bridge Bearing" Advanced Materials Research Vol. 811, pp.365-369, 2013.
- Clough, R. W., Penzien, J., "Dynamics of structures", McGrawhill, 1993.
- Cook-Chennault, K.A., Thambi, A. and Sastry, A.M., "Powering MEMS Portable Devices-a Review of Non-generative Power Supply Systems with Special Emphasis on Piezoelectric Energy Harvesting Systems," Smart Materials and Structures, Vol. 17, 043001 (33p), 2009.
- ETRI, "EAP(전기활성고분자)를 이용한 청정 에너지 수확 기술 개발", 전자통신동향분석 제23권 제6호 2008.12.
- European Commission 4th Framework Programme Transport, "Weighing-in-motion of Axles and Vehicles for Europe(WAVE)", Report of Work Package, Bridge WIM Systems(B-WIM), University College Dublin, 2001.
- Geffrey K. Ottman, Heath F. Hofmann, George A. Lesieutre, "Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 18, NO. 2, pp 696-703, 2003.
- Goo, N.S., Van Phuoc Phan, and Hoon Cheol Park, "Actuation Displacement Performance Change of Prestressed Piezoelectric Actuators Attached to a Flat Surface," Smart Materials and Structure, Vol. 19, 037003 (5pp), 2009.
- Ha, D. H., Kim, D. H., Choo, J. F., Goo, N. S., "Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material", INC2011 7th international conference, 2011.
- Ha, D. H., Choo, J. F., Lee C. H., Jang, W. S., Goo, N. S., "Dynamic Characteristics of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element", Applied Mechanics and Materials Vol.432. pp.275-280, 2013.
- Krueger H.H.A., "Stress Sensitivity of Piezoelectric Ceramics: Part 3.Sensitivity to Compressive Stress Perpendicular to the Polar Axis", The Journal of the

- Acoustical Society of America, Vol. 43, pp. 583-591, 1968.
- Law, S. S., Chan, T. H. T, Zeng, Q. H., "Moving force identification time domain method, journal of sound and vibration, 201, 1-22, 1997.
- Moses, F, "Weigh-In-Motion System Using Instrumented Bridge", Transportation engineering journal, ASCE, Vol.105, TE3, 1979.
- Nims, D.K., Subramaniam, K., Parvin, A. and Aktan, A.E., "The Potential for the Use of Elastomeric Bearings in an Intelligent Bridge System," Transportation Research Board 75th Annual Meeting, Washinton D.C., USA, 1996.
- Subramaniam, K.V., "Feasibility of Using Instrumented Elastomeric Bearings for Bridge Monitoring and Condition Assessment," M.S. Thesis, University of Toledo, 1995.
- Tabesh Ahmadsreza, Fréchet Luc G., "A Low-Power Stand-Alone Adaptive Circuit for Harvesting Energy From a Piezoelectric Micropower Generator", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 57, NO. 3, pp 840-849, 2010.
- Tri Tien Cam Minh and Goo Nam Seo, "Use of a Piezocomposite Generating Element in Energy Harvesting," Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol. 21, No. 14, pp. 1427-1436, 2010.9.
- Yang, Y. B., Yau, J. D., Wu, Y.S., "Vehicle-Bridge Interaction Dynamics", World Scientific Publishing, 2004.
- Zhu, X. Q., Law, S. S., "Orthogonal function in moving loads identification on a multi-span bridge, journal of sound and vibration, 245(2), 329-345, 2001.
- 국토해양부, "도로교량 및 터널 현황", 2008.
- 곽문규, 김기영, 강호용, 김내수, "압전소자를 이용한 진동에너지 수집 장치 개발," 한국정밀공학회지, 제25권 제4호, pp.32-38, 2008.
- 권순민, 서영찬, "고속축하중측정시스템 개발과 과적단속시스템 적용방안 연구", 한국도로학회 논문집, 제11권 제4호, 2009
- 김대현, "압전소자가 내장된 교량 받침을 이용한 차량하중 계측방법 연구", 학위논문, 건국대학교 대학원, 2012.
- 김상호, 정치영, 정하민, 안진희, "강합성 교량에 설치된 압전소자의 전력발생효과 분석", 한국강구조학회 논문집, 제22권 5호, 2010.
- 김형석, 오주삼, 임성한, 김연복, "WIM시스템을 이용한 화물차 중량특성 분석", 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2004
- 김형찬, 정우석, 강종윤, 윤석진, 주병권, 정대용, "소형 압전 에너지 하베스터 구현을 위한 세라믹 크기 변화," 센서학회지. 제17권 제4호, pp.267-272, 2008.
- 남윤수, 박종수, 박해균, 이재강, "SSHI 기법을 이용한 압전소자로부터의 에너지

- 회수에 대한 연구,” 한국정밀공학회지, 제25권 제6호, pp.92-98. 2008.
- 띠앵민드리, 김종화, 구남서, “압전-복합재료발전소자의설계및특성,” 대한기계학회논문집A, 제 34권 7호, pp. 867-872, 2010.7.
- 오주삼, “WIM 자료를 활용한 화물차량의 축중량 추정 모형 개발에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제31권 제4D호, 2011.
- 에너지관리공단 신재생에너지센터, “신재생에너지 정책”
- 에너지경제연구원, “주요국 신재생에너지 정책 동향 및 그린에너지산업, 기술개발 전략 분석의 시사점”, 연구자료 10-01, 2010.6
- 장원서, “압전-복합재료 발전소자가 내장된 교량 받침의 BWIM System 적용에 관한 기초 연구”, 학위논문, 건국대학교 대학원, 2014.
- 정대용, 송현철, 윤석진, “Piezoelectric energy harvesting,” 전기전자재료, 제20권 제12호, pp.45-54, 2007.
- 정하민, “교량 시스템에서 압전소자를 이용한 Energy Harvesting 전력용량 평가”, 학위논문, 연세대학교 대학원, 2010.
- 조군, 구남서, “미활용 에너지 이용을 위한 d33모드 압전-복합재료 발전소자 개발”, 한국항공우주공학회 학술발표회 논문집, Vol.2012 No.11, 2012.
- 조영민 외, “해외의 신재생 에너지 이용 철도역사 구축사례,”철도연 철도환경연구실 지식경제부, “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법”, 2012.
- 최범규, 이우훈, “압전 필름의 압전정 효과를 이용한 에너지 저장 시스템에 관한 연구,” 한국정밀공학회지. 제25권 제9호, pp.78-85. 2008.
- 하동호, 추프랑좌, 구남서, 김대현, “압전소자가 내장된 교량 받침을 이용한 차량하중측정” 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol.16, 2012.
- 하동호, 장원서, 추프랑좌, 이창형, “압전소자가 내장된 하중계측용 받침의 동적실험” 한국지진공학회 학술발표회 논문집, Vol.17, 2013.
- 한국건설교통기술평가원, “IT기반 스마트 교량내진장치 개발 보고서”, 2011.
- 한국도로공사 도로연구소, “고속도로 교량 활하중 정형화에 관한 연구”, 2001.
- 한국도로공사 도로교통연구원, “교량 받침부 설계 개선 방안 연구”, 2010.
- 한국도로공사, “교좌장치에 관한 연구”, 1993.
- 한국시설안전기술공단, “교량 받침의 평가기준에 관한 연구(II)”, 2003.12.
- 한 대석, 김성현, 도명식, 황상우, “WIM시스템의 소개와 국내적용기준의 개선방향”, 대한토목학회 논문집, 제56권 제1호, 2008.
- [web-1] GreenHouse Gas Online, <http://www.ghgonline.org/predictions.htm>
- [web-2] INNOWATTECH Energy harversting System, <http://www.innowattech.co.il/>
- [web-3] 철도기술연구원,
http://www.krri.re.kr/webzine/y2008/11_12/preface/20090115/1_17064.html
- [web-4] 선진산업개발, <http://blog.naver.com/sjson2010/>
- [web-5] 유디코, <http://www.judico.co.kr/>
- [web-6] National Instruments 대한민국, <http://korea.ni.com/>

부록

성과물 [논문, 특허]

Feasibility of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material

¹Dong-Ho Ha, ²Jinkyoo F. Choo, ³Daehyun Kim, ⁴Nam Seo Goo

^{1, First Author} Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Korea, hadongho@konkuk.ac.kr

^{*2, Corresponding Author} Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Korea, jfchoo@konkuk.ac.kr

³Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Korea, kdh14741@naver.com

⁴Dept. of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Korea, nsgoo@konkuk.ac.kr

Abstract

This paper presents a multi-functional bridge bearing conceived by introducing a piezoelectric (PZT) element within conventional pot bearing or rubber elastomeric bearing. Bridge bearings are devices that transfer loads and movements from the deck to the substructure and foundations of a bridge. Bearings are thus continuously subjected to the loads of vehicles crossing the superstructure, and they are also subjected to the weight of the superstructure. The proposed bearing has been developed to respond to the increasing demand for self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by using the vibration-based mechanical energy produced by the traffic load. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the embedded sensing and lighting systems but can also be used to perform real-time monitoring of the traffic by adopting built-in load measuring functions such as those in bridge-weigh-in-motion (BWIM) systems. The feasibility of the proposed system is discussed through its application to an example bridge.

Keywords: Bridge Bearing, Piezoelectric Material, Energy Harvesting, Traffic Monitoring

1. Introduction

Ambient vibration is naturally present in multiple environments, and it generates energy that is commonly unused and goes to waste. Several methods using electromagnetic induction, electrostatic generation, dielectric elastomers, or piezoelectric materials were developed to extract the electrical energy produced by this source. Among these methods, research on energy harvesting using piezoelectric (PZT) material has recently seen rapid development. Through the piezoelectric effect, the PZT material converts mechanical strain into electrical voltage. The PZT effect can be implemented to harvest mechanical energy from the vibration or compression of a PZT block.

Recently, research has been conducted in the area of energy harvesting to supply energy to portable and wireless devices. The energy supply of former devices essentially relied on batteries, but these batteries required regular replacement and the devices were generally installed in zones with poor accessibility. In view of such inconveniences, self-powered devices using ambient vibration energy are rising as promising solutions and are today the center of numerous research projects [1, 2]. Howells summarized the latest development achieved in the field of piezoelectric energy harvesting [3]. Vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in the surroundings. Harvesting this type of energy has potential for remote and wireless sensing, charging batteries, and the powering of electronic devices [4].

The field of civil engineering has also seen growing interest in such devices, which could supply continuous electrical power to wireless sensors installed to monitor the displacement and acceleration of bridge structures. Conventional wired monitoring systems required excessive investments not only for the installation of wires but for the periodical replacement of batteries. Therefore, the adoption of such self-powered devices represents an attractive alternative in terms of costs and maintenance efforts. Moreover, civil structures, such as bridges or roads that are incessantly crossed by vehicles, are subject to ambient vibrations of which use appears to be a natural and cost-efficient solution.

This paper presents a multi-functional bridge bearing in which PZT material, lead zirconate titanate, is built-in. The bearing has been conceived by introducing a PZT element within conventional steel pot bearings or rubber elastomeric bearings. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the embedded sensors but can also be used to perform real-time control of

the passage of overloaded trucks by adopting a built-in load measuring function. Innowattech, an Israeli company, has already proposed and successfully applied a PZT device, embedded in asphalt road pavement, to harvest the vibration energy produced by traffic [5]. However, as this device is installed in the pavement, its durability may be degraded due to direct exposure to traffic load, and it may need to be reinstalled in cases of repair or replacement of paving material. Additionally, the proposed multi-functional bridge bearing is a natural component of the bridge and is indirectly subjected to traffic load. In addition, as well as its energy harvesting function, the proposed bearing offers a traffic load function that will help the maintenance of the bridge. The feasibility of the proposed system is discussed through its application on an example bridge.

2. Energy harvesting using PZT

2.1. Energy harvesting

Energy harvesting is the process by which energy is derived from external sources such as solar power, thermal energy, wind energy, and kinetic energy; the energy is captured and stored for small, wireless devices. The goal of an energy harvesting device is to capture the would-be wasted energy surrounding a system and to convert it into usable energy for the electrical device to consume. The advantage is that, instead of using cost-demanding input fuel, the energy source for energy harvesters is free and is present as ambient background. By utilizing these unused energy sources, electronics that do not depend on power supplies, such as batteries, can be developed. The ambient vibrations generated around machines and civil structures are typically lost energy. This source of energy is ideal for the use of PZT materials, which have the ability to convert mechanical strain energy into electrical energy [6].

2.2. Piezoelectricity

Piezoelectricity refers to the charge which accumulates in certain solid materials, such as crystals, and certain ceramics in response to applied mechanical stress [7]. Piezoelectricity was discovered in the 19th century to be an unusual characteristic of certain crystals, which became electrically polarized when subjected to a mechanical force. Tension and compression generated voltages of opposite polarity proportionally to the applied force. This behavior was labeled the piezoelectric effect and is described in Figure 1. The piezoelectric effect is used in sensing applications, such as in force or displacement sensors.

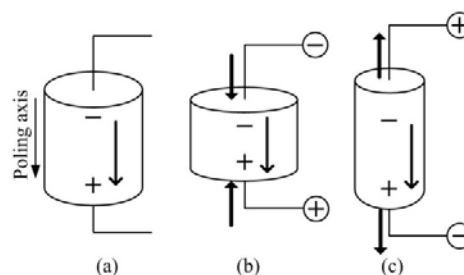


Figure 1. Piezoelectric effect

Accordingly, a piezoelectric substance produces an electric charge when mechanical stress is applied. Concretely, mechanical compression or tension on a poled piezoelectric ceramic element changes the dipole moment, creating a voltage. Figure 1a shows the piezoelectric material without stress or charge. Compression along the direction of polarization, or tension perpendicular to the direction of polarization, generates a voltage of the same polarity as the poling voltage between the electrodes (Figure 1a). Tension along the direction of polarization, or compression perpendicular to the direction of polarization, generates a voltage with polarity opposite that of the poling voltage (Figure 1b). These are generator actions in which the ceramic element converts the mechanical energy of compression or tension into electrical energy.

Piezoelectric materials can be used to transform ambient vibrations into electrical energy that can be stored and used to power other devices. With the recent surge of micro scale devices, piezoelectric power generation can provide a convenient alternative to traditional power sources used to operate certain types of sensors and actuators [6].

Among methods that increase the amount of energy harvested from a PZT, the improvement of the coupling mode is the most commonly applied. Two practical coupling modes are introduced: the 31-mode and the 33-mode. In the 31-mode, a force is applied in a direction perpendicular to the poling direction; an example of this is a bending beam with poles at the top and bottom surfaces (Figure 2a). In the 33-mode, a force is applied in the direction of the poling direction, such as the compression of a PZT block that is poled on its top and bottom surfaces (Figure 2b). Former results showed that with a small force, low vibration level environment, the 31-configuration cantilever proved most efficient, but, in a high force environment, a stack configuration would be more durable and would generate useful energy [8].

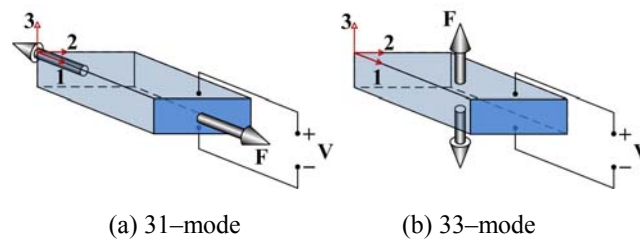


Figure 2. Coupling mode operations for PZT materials

3. Proposed multi-functional bridge bearing with built-in PZT material

3.1. Underlying concept

A bridge structure can be divided into two main parts: superstructure and substructure. The superstructure supports its own weight, and the traffic load, whereas the substructure bears the load from the superstructure. The transmission media is the bearing, a device transferring loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bridge bearings movements are accommodated by the basic mechanisms of internal deformation, sliding, or rolling. A large variety of bearings have evolved using various combinations of these mechanisms. Bearings are arranged to allow the deck to expand and contract while maintaining the deck in its correct position on the substructure. These bearings are thus continuously sustaining the loads of the vehicles crossing the superstructure as well as the weight of the superstructure.

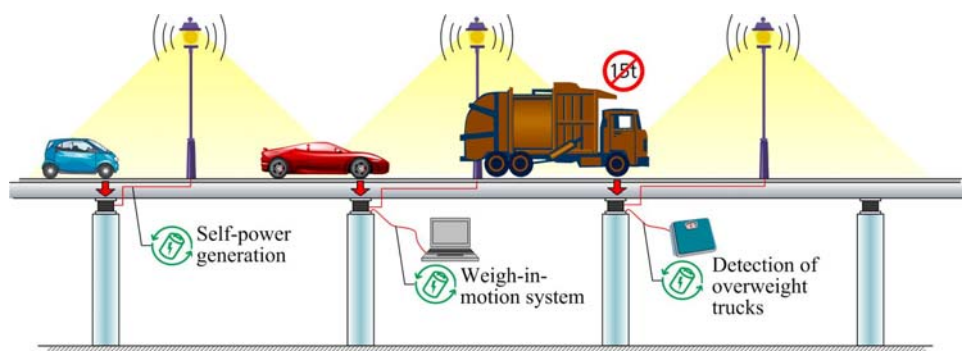


Figure 3. Functions of the proposed bridge bearing

The concept underlying the proposed multi-functional bearing is to exploit the unused traffic load for generating power through the use of PZT (Fig. 3). Such environment-friendly energy will be useful in supplying power to the monitoring system of the bridge and road lighting. This monitoring system

involves the measurement of the vehicular load applied to the bridge by means of electrical energy generated by the PZT, the measurement of eventual unbalanced forces between the bearings during the construction of the bridge, and the detection of overloaded trucks exceeding the design load, which may affect the structural health of the bridge. The last function will also help reduce costs caused by temporary closure of traffic during load control, as well as costs required for personnel needed for the control task, and will contribute to the extended lifetime of the structure [9].

Additional costs required to manufacture and install the proposed system can be recovered by reselling remaining energy to the Electric Power Corporation. The current governmental policy promoting the development and exploitation of renewable energies supports a budget to refund energy produced in surplus with a lower price than that specified by the Ministry of Knowledge Economy. Table 1 shows the arrangement of levels of refunding for different types of renewable energies, since 2004 [10].

Table 1. Evolution of refund level per type of renewable energy in Korea (unit: KRW/kWh)

Type of renewable energy	2004	2006	2010
Solar energy (ordinary site, 15 yrs)	716.40	677.38	646.96
Wind energy	107.66	107.29	107.29
Water-power (> 1 MW)	73.69	86.04	86.04
Tidal power (higher than 8.5 m)	62.81	62.81	62.81

As shown in Table 1, PZT-based energy harvesting is not included in the list. However, as PZT-based energy is harmless and uses wasted sources, one can predict that the funds supported by this new type of energy will exceed those of solar energy. Accordingly, the level of refund established for solar energy is applied for PZT in this study.

3.2. Description of the proposed bridge bearing with built-in PZT material

Figure 4 depicts the composition of the proposed multi-functional bridge bearing using PZT. Pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, which presses the top of the PTFE. The PTFE functions like a viscous fluid inside a hydraulic jack, and the top steel plate behaves like a piston. Inside the pot, the deformation of the PTFE is restricted. Pot bearings are designed to carry combinations of vertical loads, horizontal loads, longitudinal and transversal movements, and rotations. This type of bearing can carry very heavy loads of over 50,000 kN. The PZT is inserted between the piston and PTFE plate to harvest energy and measure the applied loading. With the exception of the PZT module, the generation of energy using PZT requires a series of equipment including electrical insulation, electrodes, an inverter, and a joint box. The joint box is connected to the inverter in order to transform the current from DC to AC. In addition, the monitoring system continuously monitors the presence of eventual anomalies, performs diagnoses, and reports possible defects.

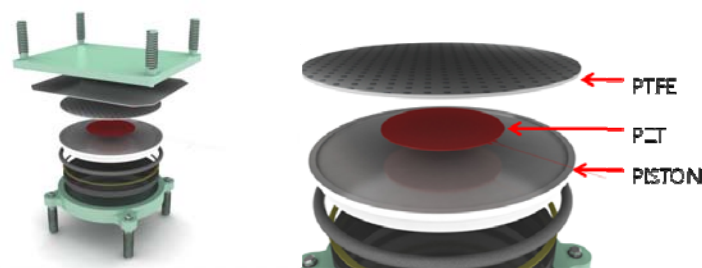


Figure 4. Pot bearing using PZT [9]

4. Feasibility of the proposed bridge bearing

The feasibility of the proposed multi-functional bridge bearing system, in terms of efficiency of traffic monitoring and cost-effectiveness, is discussed through application to an example bridge.

4.1. Traffic monitoring using the proposed bridge bearing

As the passage of overweight trucks, whether legal or illegal, causes premature fatigue of the bridge pavement and structure, it is necessary to estimate the weight of the trucks crossing the bridge in order to evaluate the safety of the bridge, calculate its residual service life, and draw corresponding maintenance strategies [11]. Bridge-weigh-in-motion (BWIM) is widely applied today to measure the weight of vehicles. This system uses a bridge as a weigh-platform, and the parameters of heavy traffic are measured in order to obtain informative data. The conventional WIM comprises a number of basic components of which the mass sensor is the most important. The mass sensor embedded in the surface of the pavement produces a signal whose value depends on the instantaneous dynamic wheel mass of a moving vehicle. Detailed information on BWIM can be found in [12] and [13].

Compared to conventional vehicle weight estimating systems, the advantage of the proposed bridge bearing is its installation without the necessity of additional works and without damage to the pavement; this occurs because it is a natural component of the bridge. The proposed bearing makes it possible to realize accurate measurement of the vehicle's weight through the reaction at the bearing [9].

Figure 5 depicts the BWIM system concept using the proposed bearing. In Figure 5, w_n is the weight of the n^{th} wheel of the truck, x denotes the position of the wheel load on the bridge deck with respect to the bearing, $r_{Ai}(x)$ is the influence line of the reaction force according to the position, x , of the wheel load, and $R_{Ai}(x)$ is the reaction force at bearing A_i . The relationships between these variables are given in Equations 1 and 2.

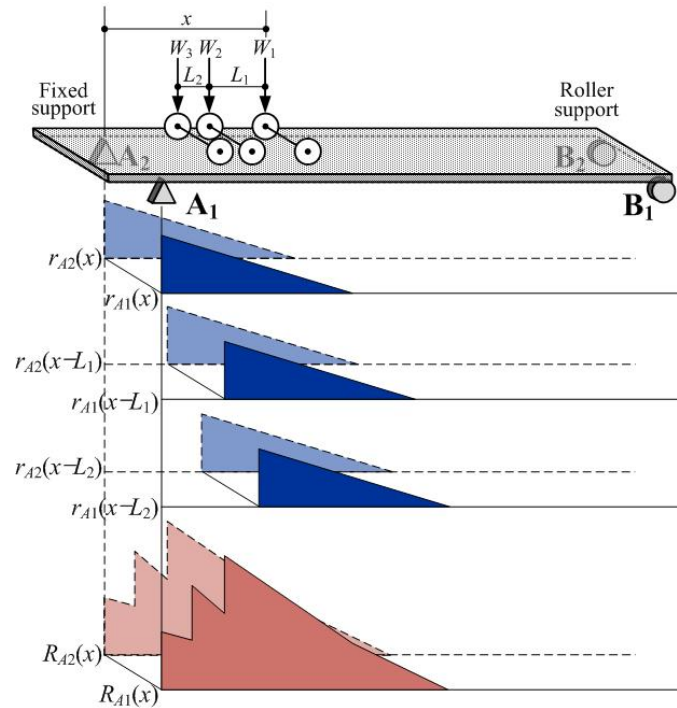


Figure 5. BWIM concept using the reaction force of the proposed bearing

The reaction force developed in each bearing can be computed using the wheel loads and corresponding influence lines for the reaction force, as expressed in Equation (1). The resulting

reaction force at each support is then computed by summing the reaction forces of each bearing arranged in the support, as expressed in Equation (2).

$$\begin{aligned} R_{A_1}(x) &= W_1 r_{A_1}(x - s_1) + W_2 r_{A_1}(x - s_2) + W_3 r_{A_1}(x - s_3) \\ R_{A_2}(x) &= W_1 r_{A_2}(x - s_1) + W_2 r_{A_2}(x - s_2) + W_3 r_{A_2}(x - s_3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$R_A(x) = R_{A_1}(x) + R_{A_2}(x) \quad (2)$$

Using such relations, the load applied on the supports can be easily computed by converting the electric signal of the built-in PZT. In the near future, prototypes of the proposed bearing will be fabricated, and tests will be conducted to verify the feasibility of the conversion of the signals produced by the bearings into loads.

4.2. Cost-effectiveness of the proposed bridge bearing

In this paper, a 4-lane PSC bridge composed of 8 PSC girders is assumed for the evaluation of the efficiency of the proposed bearing system. A total of 16 PZT bearings shown in Figure 4 are installed in the bridge. Figure 6 illustrates the bridge installed with the bearings [14].

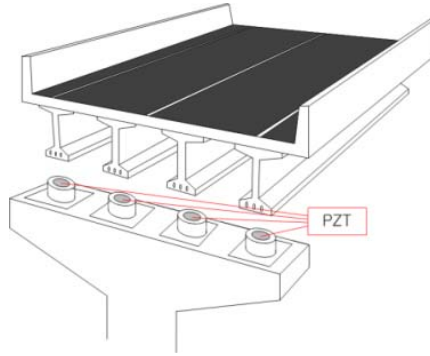


Figure 6. PZT-bearings installed in the selected PSC bridge

For the evaluation, the bridge is assumed to be located in a site with regular traffic, such as an urban area, highway or harbor. Here, the harbor is selected because of the traffic of heavy trucks that will increase the efficiency of the proposed system. In addition, as the traffic in harbor can be precisely calculated, this location appears to be adequate for reasonable computation of the amount of energy harvested by the multi-functional bridge bearing. Shinhang Wharf, in the Busan Port, is being featured by the largest traffic and is selected for the calculation [15].

Table 2 relates the specifications of the piezoelectric system adopted in this study, and Table 3 lists the detailed installation costs per item with regard to the energy-harvesting equipment mentioned earlier. The costs in Table 3 correspond to those computed for Shinhang Wharf.

Table 2. Specifications of the PZT system

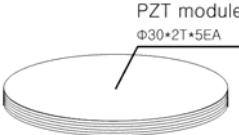
	Characteristics	Value
	Voltage out	40 V
	Current out	3 mA
	Radius	150 mm
	Thickness	2 mm × 5
	Operating temperature	-20 to 150°C

Table 3. Installation costs of the energy harvesting system

Equipment	Unit price (KRW)	Quantity	Cost (KRW)
PZT module (2 mm)	10,000	80	800,000
Joint box	3,000,000	1	3,000,000
Inverter	25,000,000	1	25,000,000
Monitoring system	5,000,000	1	5,000,000
Total	—	—	33,800,000

Table 4 presents the calculation of the amount of energy harvested by the proposed multi-functional bridge bearing system installed in the selected PSC bridge and crossed by the volume of traffic of Shinhang Wharf, in Busan Port. The volume of traffic refers to the data of the year 2010, as reported by the Busan Port Authority [15].

Table 4. Calculation of power generated by the proposed system installed in the example bridge

Energy generated by PZT per loading cycle	0.12 W
Energy generated by 80 PZTs and crossing of 5,480,000 vehicles	$0.12 \text{ W} \times 80 \times 5,480,000$ = 52,608 kWh/year
Conversion into selling revenue	$52,608 \text{ kWh} \times 646.96$ = 34,035,271 KRW/year

Table 4 calculates the yearly power generated by the multi-functional bridge bearing installed in the selected PSC bridge located near Shinhang Wharf and converts this into selling revenue. As can be observed, the calculation shows that the initial cost required by the equipment for energy harvesting can be recovered within a year. In terms of electrical power, the generated amount of electricity is sufficient to supply power to 48 street lamps in the case of 250 W sodium bulbs during one year, or 100 LED lamps (120 W) during the same period. Moreover, in addition to supply power for lighting, the proposed system also has sufficient autonomy to supply power to the diverse sensors involved in monitoring.

Had the calculation been performed for a wharf with frequent crossing by heavy trucks (containers), the proposed system could have also been applied to sites with a smaller volume of traffic. In such cases, recovery of installation costs should be considered. Assuming the service life of the PZT is 5 years, and installation cost is comparable to the example, a minimum of 1,090,000 vehicles per year seems to be the threshold determining the cost-effectiveness of the proposed system, as shown in Figure 7.

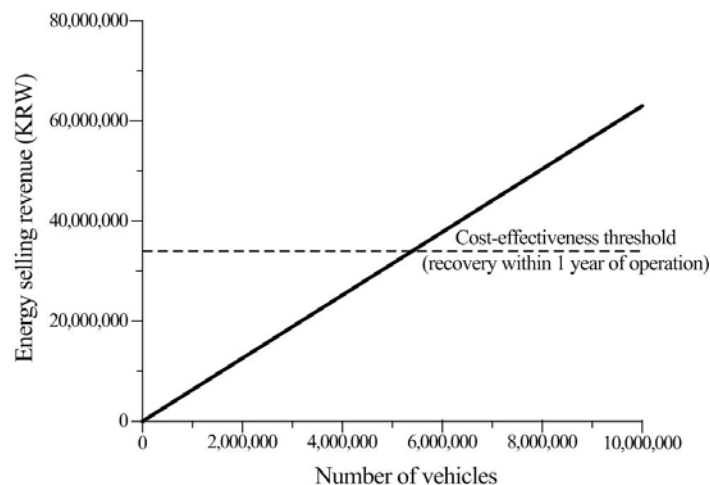


Figure 7. Income by selling of generated power according to number of loading cycles [14]

Another point to be stressed is that, since PZT is built in the bridge bearing, the proposed multi-functional bearing will fulfill its primary purpose during its design lifetime of 50 years, regardless of the lifetime of PZT. Accordingly, the proposed bridge bearing with built-in PZT may be implemented as a supplemental source of electrical power of which the cost of the bearing, and the additional cost due to energy harvesting system, can be recovered with large margins within a period of 5 years.

5. Conclusions

As ambient vibration energy is naturally present in many environments, but commonly goes unused, vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in our surroundings. Accordingly, with the intent to respond to the increasing demand of self-powered sensing devices, this paper presents a multi-functional bridge bearing with built-in PZT material, using traffic load-induced vibrations. The bearing has been conceived by introducing a PZT element within conventional steel pot bearings or rubber elastomeric bearings. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the embedded sensors but can also be used to perform real-time control of the passage of overloaded trucks by adopting a built-in load measuring function. Compared to conventional vehicle weight estimating systems, the advantage of the proposed bridge bearing is its installation without the need for additional works or risking damage to the pavement; this is possible because the proposed bearing would be a natural component of the bridge. Theoretical computation showed that the proposed bearing can realize accurate estimation of the vehicle's weight through the measurement of the reactions at the bearings. The cost-effectiveness of the proposed system was evaluated through a simple PSC bridge located in a zone with dense traffic of heavy trucks. The results showed that the proposed multi-functional bridge bearing with built-in PZT material can sufficiently supply electrical power not only for the facilities attending the bridge-like road lighting and signaling but also for the recovery of initial additional costs required by the system. This paper, as a preliminary study on the feasibility of the multi-functional bridge bearing, proved the promising potential of the proposed system. Prototypes of the proposed bearing will be fabricated in the near future, and tests will be conducted to verify, through experiments, the exact computation of the amount of generated energy as well as the accuracy of the electric signals produced by the PZT.

6. Acknowledgements

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

7. References

- [1] Tan L., Zhang S., Qi J., Xia J., "On-line multi-energy optimization with hybrid MAC mechanism in clustered wireless sensor networks", *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol. 5, no. 8, pp. 136-147, 2011.
- [2] Huang L., Ashouei M., Yazicioglu F., Penders J., Vullers R., Dolmans G., Merken P., Huisken J., de Groot H., Van Hoof C., Gyselinckx B., "Ultra-low power sensor design for wireless body area networks: Challenges, potential solutions, and applications", *International Journal of Digital Content Technology and its Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 136-148, 2009.
- [3] Howells C.A., "Piezoelectric energy harvesting", *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1847-1850, 2009.
- [4] Sun C., Shi J., Wang X., "Fundamental study of mechanical energy harvesting using piezoelectric nanostructures", *Journal of Applied Physics*, vol. 108, 034309, doi:10.1063/1.3462468, 2010.
- [5] Website of Innowattech: <http://www.innowattech.co.il>.
- [6] Sodano H.A., Inman D.J., Park G., "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10, pp. 799-807, 2005.
- [7] Website of Wikipedia, The Free Encyclopedia: <http://en.wikipedia.org/wiki>.
- [8] Anton S.R., Sodano H.A., "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)", *Smart Materials and Structures*, vol. 16, no. 3, doi:10.1088/0964-1726/16/3/R01, 2007.

- [9] Kim D., Vehicle weight estimation using a bridge bearing with embedded piezoelectric material, Master Thesis, Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Konkuk University (in Korean), 2012.
- [10] Ministry of Knowledge Economy of Korea, New Energy and Renewable Energy Development, Use, and Spread Promotion Law, 2010.
- [11] Straus S.H., Semmens J., Estimating the cost of overweight vehicle travel on Arizona highways, Final Report 528, Arizona Department of Transportation, USA, 2006.
- [12] Quilligan M., Bridge weigh-in-motion: Development of a 2-D multi-vehicle algorithm, Licentiate Thesis, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridge Division, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, TRITA-BKN, Bulletin 69, 2003.
- [13] Deesomsuk T., Pinkaew T., "Effectiveness of vehicle weight estimation from bridge weigh-in-motion", *Advances in Civil Engineering*, vol. 2009, doi:10.1155/2009/312034, Hindawi Publishing Corp., 2009.
- [14] Ha D.H., Kim D., Choo J.F., Goo N.S., "Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material", In *Proceedings of the AICIT Conference on Networked Computing (INC 2011)*, pp.13-22, 2011.
- [15] Official website of Busan Port Authority, <http://www.busanpa.com>.



Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-In Piezoelectric Material

Jinkyo F. Choo¹, Dong-Ho Ha^{1,*}, Nam Seo Goo², and Won Seo Jang¹

¹Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

Bridge bearings are indispensable devices transferring loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bearings are thus continuously subjected to loads of the vehicles crossing the superstructure and the weight of the superstructure. An innovative and multi-functional bearing is being developed to respond to the increasing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the vibration-based mechanical energy produced by the traffic load. This paper presents the results of preliminary tests on a piezocomposite generating element (PCGE) material element that will be built-in a conventional bridge pot bearing. This PCGE not only supplies the electrical power required for the operation of the embedded sensing and lighting systems but can also be used to perform real-time monitoring of the traffic by adopting built-in load measuring function like in bridge-weigh-in-motion systems. The results of the preliminary tests focus on the feasibility of the adopted PCGE in measuring accurately the traffic loads applied on the bridge and in harvesting the energy produced by the applied wheel loads.

Keywords: Bridge Bearing, Piezocomposite Generating Element, Energy Harvesting, Traffic Monitoring.

1. INTRODUCTION

Vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in the surroundings.¹ Energy harvesting technology, which converts commonly unused ambient energy into useable electrical energy, may be exploited to power devices that in many cases rely heavily on batteries. Energy harvesting is becoming an attractive source of power for a variety of devices, especially where the environmental and economic costs of maintaining batteries are unaffordable. The methods used for the transduction of these energy sources into useable electrical energy include photovoltaic, thermoelectric, electromagnetic and piezoelectric materials. Among them, research on energy harvesting using piezoelectric (PZT) material has recently recognized rapid evolution. Through the piezoelectric effect, the PZT material converts mechanical strain into electrical voltage. The PZT effect can be implemented to harvest mechanical energy from vibration or compression of a PZT block.^{2,3}

The civil engineering community recognized also the potential benefit of such devices to supply continuously electrical power to wireless sensors installed to monitor the displacement and acceleration of bridge structures. Conventional wired monitoring systems require excessive investments not only for the installation of wires but also for the periodical replacement of batteries.

Therefore, the adoption of such self-powered devices represents an attractive alternative in terms of costs and maintenance efforts. Moreover, civil structures like bridges or roads being incessantly crossed by vehicles are by means subjected to ambient vibrations of which use appears to be a natural and cost-efficient solution.²

This paper presents preliminary tests performed to achieve a multi-functional bridge bearing in which a PZT material, lead zirconate titanate, is built-in. The bearing is conceived by introducing adequately a PZT element within a conventional steel pot bearing. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the sensors but can also be used to perform real-time control of the passage of overloaded trucks by adopting built-in load measuring function. Innawattech,⁴ an Israeli company, already proposed and applied successfully a PZT device embedded in asphalt road pavement to harvest the vibration energy produced by traffic. However, since this device is installed in the pavement, its durability may be degraded due to direct exposition to traffic load and it needs to be reinstalled in case of the repair or replacement of the paving material. Besides, the proposed multi-functional bridge bearing is by means a natural component of the bridge that is indirectly subjected to traffic load and thus less vulnerable to environmental degradation. In addition, apart from its energy harvesting function, the proposed bearing also offers traffic load function that will help the maintenance of the bridge.

* Author to whom correspondence should be addressed.

The authors already demonstrated the feasibility of the proposed bridge bearing in terms of its cost-effectiveness through an application to an example bridge.² In this paper, preliminary test results are presented and focus on the potential of the proposed bridge bearing in measuring accurately the traffic loads applied on the bridge and in harvesting the energy produced by the applied wheel loads.

2. ENERGY HARVESTING AND PIEZOELECTRICITY

Abundant literature^{1,3,5-8} has been dedicated on the topics of piezoelectricity and energy harvesting. Brief definitions and descriptions are given here.

Energy harvesting is the process by which energy is derived from external sources like solar power, thermal energy, wind energy, and kinetic energy, captured, and stored for small, wireless devices. The goal of an energy harvesting device is to capture the usually wasted energy surrounding a system and convert it into usable energy for the electrical device to consume. By utilizing these unused energy sources, electronics that do not depend on power supplies, such as battery, can be developed. Typically lost energy is the ambient vibrations generated around machines and civil structures. This source of energy is ideal for the use of PZT materials, which have the ability to convert mechanical strain energy into electrical energy.⁵

Piezoelectricity is the charge which accumulates in certain solid materials like crystals and certain ceramics in response to applied mechanical stress. Piezoelectricity has been discovered in the 19th century as an unusual characteristic of certain crystals, which became electrically polarized when subjected to a mechanical force. Tension and compression generated voltages of opposite polarity proportionally to the applied force. This behavior was labeled the piezoelectric effect. The piezoelectric effect is used in sensing applications, such as in force or displacement sensors. Accordingly, a piezoelectric substance is one that produces an electric charge when a mechanical stress is applied. Concretely, mechanical compression or tension on a poled piezoelectric ceramic element changes the dipole moment, creating a voltage. Piezoelectric materials can be used to transform ambient vibrations into electrical energy that can be stored and used to power other devices. With the recent surge of micro scale devices, piezoelectric power generation can provide a convenient alternative to traditional power sources used to operate certain types of sensors and actuators.⁶

3. CONCEPT AND DESCRIPTION OF THE PROPOSED BRIDGE BEARING WITH BUILT-IN PZT MATERIAL

A bridge structure can be divided into two main parts: the superstructure, which supports its own weight and the traffic load, and the substructure, which sustains the load from the superstructure. The transmission media is the bearing, which transfers loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bridge bearings movements are accommodated by the basic mechanisms of internal deformation, sliding, or rolling. Bearings are arranged to allow the deck to expand and contract, but retain the deck in its correct position on the substructure. These bearings are thus continuously sustaining the loads of the

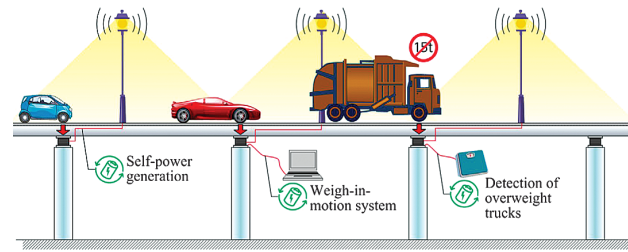


Fig. 1. Functions of the proposed bridge bearing.^{2,10}

vehicles crossing the superstructure as well as the weight of the superstructure.

The concept underlying the proposed multi-functional bearing is to exploit the unused traffic load for generating power through the use of PZT (Fig. 1). Such environment-friendly energy will be useful to supply power to the monitoring system of the bridge and road lighting. This monitoring system involves the measurement of the traffic load applied to the bridge by means of the electrical energy generated by the PZT, the measurement of eventual unbalanced forces between the bearings during the construction of the bridge, and the detection of overloaded trucks exceeding the design load, which may affect the structural health of the bridge. The last function will also help to reduce the costs caused by the temporary closure of traffic during load control, the costs required for the personnel needed for the control task, and contribute to the extension of the lifetime of the structure.^{2,9,10}

Figure 2 illustrates the composition of the proposed multi-functional bridge bearing using PZT. Pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, which presses the top of the PTFE. The PTFE functions like a viscous fluid inside a hydraulic jack and the top steel plate behaves like the piston. Inside the pot, the deformation of the PTFE is completely restricted. Pot bearings are designed to carry combinations of vertical loads, horizontal loads, longitudinal and transversal movements, and rotations. This type of bearing can carry very high loads of over 50,000 kN. The PZT is inserted between the piston and PTFE plate to harvest energy and measure the applied loading. Apart from the PZT module, the generation of energy using PZT requires a series of equipment including electrical insulation, electrodes, inverter, and joint box. The joint box is itself connected to the inverter to transform the current from DC to AC. The inverter is currently under development by our research team. In addition, the monitoring system monitors continuously the presence of eventual anomalies, performs diagnosis and reports any possible defect.^{2,10}

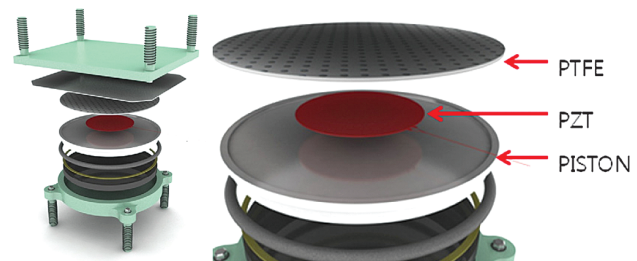


Fig. 2. Proposed pot bearing using PZT.^{2,10}

4. PRELIMINARY TESTS ON THE PIEZOCOMPOSITE GENERATING ELEMENT

A high performance piezocomposite generating element (PCGE) is selected as material to be introduced in the bridge bearing. Since lead zirconate titanate (PZT) is known to be a brittle and fragile material under the application of mechanical strain,⁶ multilayered PCGE composed of layers of carbon/epoxy, piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) ceramic, and glass/epoxy cured at high temperature (Fig. 3) has been developed to overcome the brittleness of the material and provide larger output voltage and power.¹¹

A previous study¹¹ revealed that the proposed PCGE exhibits potential to be used as generator for harvesting energy from the ambient energy environment. Moreover, the structure chosen for the PCGE enables to overcome the brittle properties of the piezoceramic owing to its proper layup combination. Figure 4 illustrates a PCGE manufactured for the test. Figure 5 shows a small-scale pot bearing in which the PCGE will be introduced.

The test intends to verify if the PCGE inserted inside the pot bearing will be able to provide accurate information of the load applied to the bearing through its output voltage. Figure 6 presents the corresponding test setup. A vertical jig is installed so as to let a steel mass slide along the rail attached to the jig. The mass is dropped from various heights to simulate diverse loads that will hit the PCGE tightly fastened between two rubber

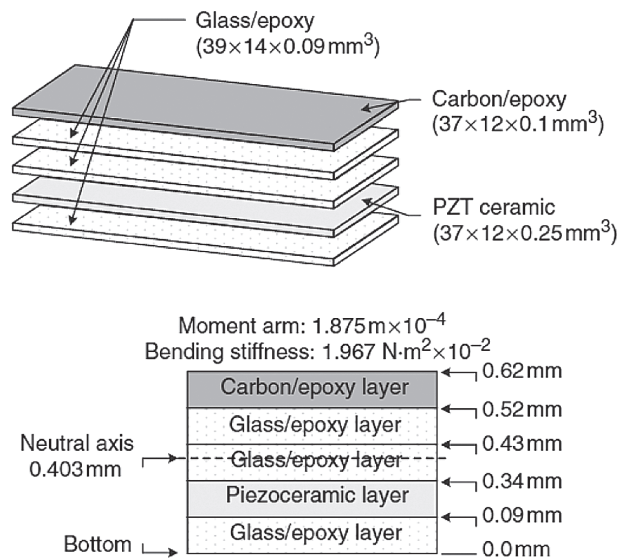


Fig. 3. Example of PCGE.¹¹

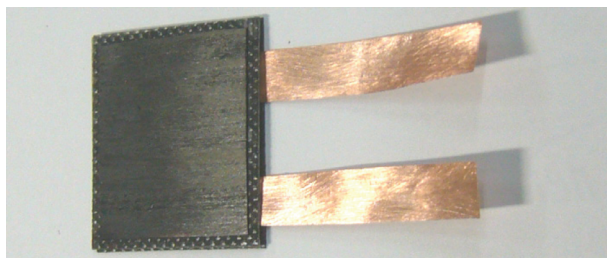


Fig. 4. Manufactured PCGE.

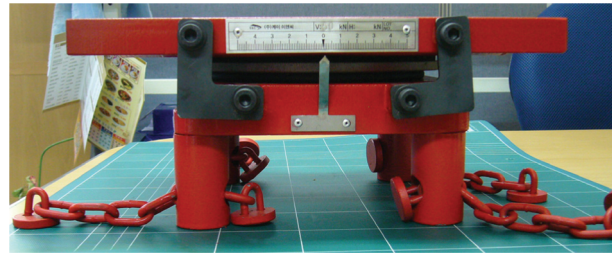


Fig. 5. Reduced-scale pot bearing prototype.

layers as in the pot bearing. Considering that the pot bearing will sustain continuously the weight of the superstructure and will be excited mainly by the wheels of the vehicles running on the superstructure, this setup appears to sufficiently reproduce the conditions in which the PCGE will be exposed.

The PCGE is connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure the output voltage and applied loads when the mass hit the PCGE.

Furthermore, the manufactured PCGE samples have limited areas (24 × 24 mm). However, PCGE will cover the whole effective area of the pot bearing ($\phi 10$ cm) in the future bridge bearing prototype. Accordingly, the test will also consider parallel connection of several PCGE since larger area of the piezoceramic will provide larger electricity generating performance. Therefore, tests were conducted first on a single PCGE and, then, on two PCGEs connected in parallel. The corresponding results are plotted in Figures 7 and 8.

The test results plotted in Figures 7 and 8 show that a clear relation between the applied load and output voltage of the PCGE can be derived. It can also be observed that the parallel connection of two PCGEs will enable to generate larger output voltage. Considering that wheel loads reach approximately 50 kN, the output voltage will exhibit larger values than those obtained for the small masses (179 g and 390 g) adopted in the tests. These results indicate the potential feasibility of the PCGE in measuring the traffic loads for monitoring purpose and in generating electricity for energy harvesting.

Besides, as the passage of overweight trucks, whether legal or illegal, causes premature fatigue of the bridge pavement and structure, it is necessary to estimate the weight of the trucks crossing the bridge in order to evaluate the safety of the bridge,

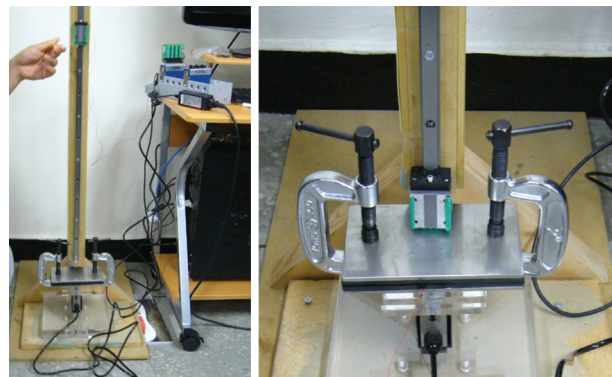


Fig. 6. Test setup for verification of the load measurement capacity of the proposed built-in system.

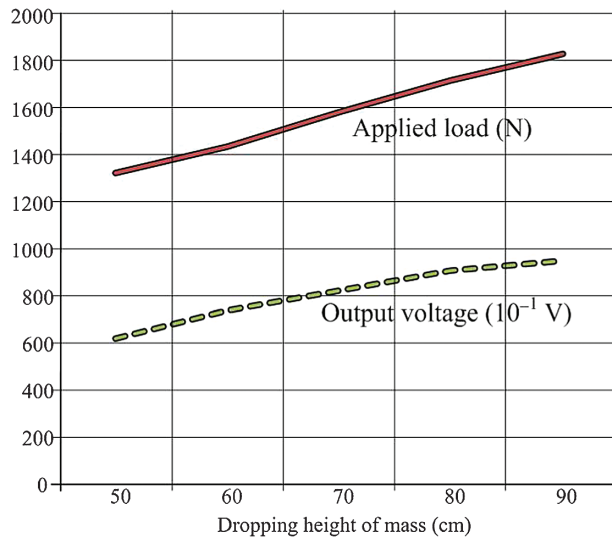


Fig. 7. Relation between applied load and output voltage of single PCGE according to release height of mass (176 g).

calculate its residual service life, and draw corresponding maintenance strategies.¹² Bridge-weigh-in-motion (BWIM) is widely applied today to measure the weight of vehicles. This system uses a bridge as a weigh-platform, and the parameters of heavy traffic are measured in order to obtain informative data. The conventional WIM comprises a number of basic components of which the mass sensor is the most important. The mass sensor embedded in the surface of the pavement produces a signal whose value depends on the instantaneous dynamic wheel mass of a moving vehicle. Detailed information on BWIM can be found in the works of Quilligan et al.¹³ and Deesomsuk et al.¹⁴

Compared to conventional vehicle weight estimating systems, the advantage of the proposed bridge bearing is its installation without the necessity of additional works and without damage to the pavement; this occurs because it is a natural component of the bridge. The proposed bearing makes it possible to realize

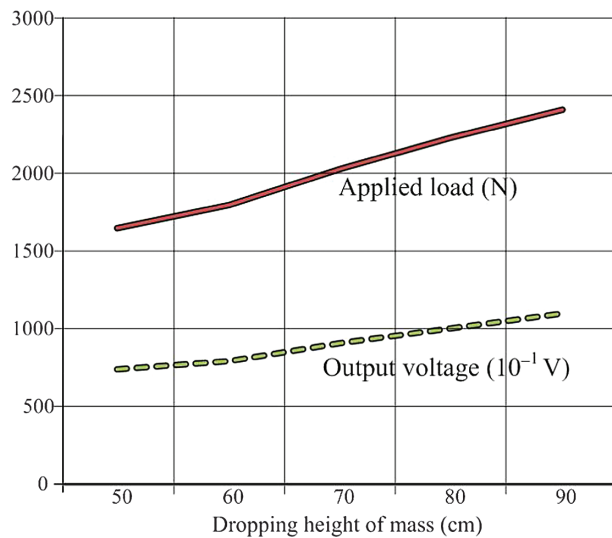


Fig. 8. Relation between applied load and output voltage of two PCGEs in parallel according to release height of mass (390 g).

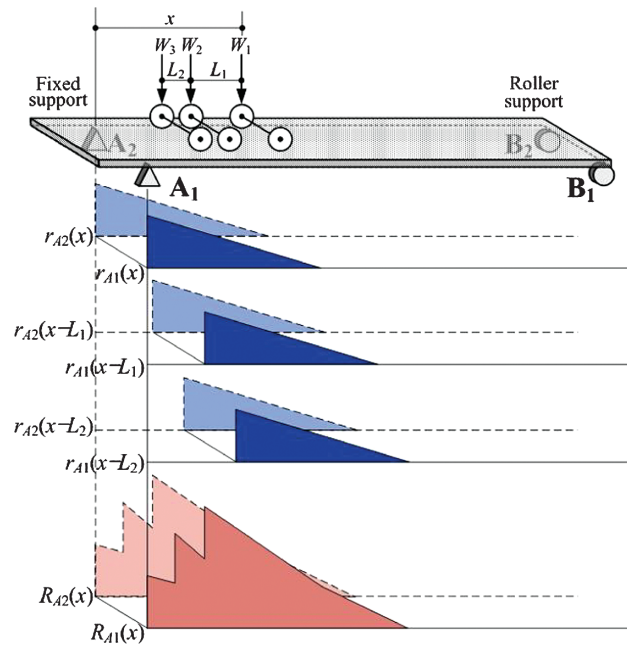


Fig. 9. BWIM concept using the reaction force of the proposed bearing.²

accurate measurement of the vehicle's weight through the reaction at the bearing.⁹

Figure 9 depicts the BWIM system concept using the proposed bearing. In Figure 5, w_n is the weight of the n th wheel of the truck, x denotes the position of the wheel load on the bridge deck with respect to the bearing, $r_{A_i}(x)$ is the influence line of the reaction force according to the position, x , of the wheel load, and $R_{A_i}(x)$ is the reaction force at bearing A_i . The relationships between these variables are given in Eqs. (1) and (2).

The reaction force developed in each bearing can be computed using the wheel loads and corresponding influence lines for the reaction force, as expressed in Eq. (1). The resulting reaction force at each support is then computed by summing the reaction forces of each bearing arranged in the support, as expressed in Eq. (2).²

$$R_{A_1}(x) = W_1 r_{A_1}(x - s_1) + W_2 r_{A_1}(x - s_2) + W_3 r_{A_1}(x - s_3) \quad (1)$$

$$R_{A_2}(x) = W_1 r_{A_2}(x - s_1) + W_2 r_{A_2}(x - s_2) + W_3 r_{A_2}(x - s_3)$$

$$R_A(x) = R_{A_1}(x) + R_{A_2}(x) \quad (2)$$

Using such relations, the load applied on the supports can be easily computed by converting the electric signal of the built-in PZT. In the near future, prototypes of the proposed bearing will be fabricated, and tests will be conducted to verify the feasibility of the conversion of the signals produced by the bearings into loads.

5. CONCLUSIONS

Bridge bearings are indispensable devices transferring loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bearings are thus continuously subjected to loads of the vehicles crossing the superstructure and the weight of the superstructure. Besides ambient vibration energy is naturally present in many environments, but commonly goes unused,

vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in our surroundings. Therefore, an innovative and multi-functional bearing is being developed to respond to the increasing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the vibration-based mechanical energy produced by the traffic load.

A high performance piezocomposite generating element (PCGE) is selected as material to be introduced in the bridge bearing. Previous studies reveal that the adopted PCGE exhibits potential to be used as generator for harvesting energy from the ambient energy environment. Moreover, the structure chosen for the PCGE enables to overcome the brittle properties of the piezoceramic owing to its proper layout combination.

Test intending to verify if the PCGE inserted inside the pot bearing will be able to provide accurate information of the load applied to the bearing through its output voltage were conducted. The corresponding results indicate that a clear relation between the applied load and output voltage of the PCGE can be derived and the potential feasibility of the PCGE in measuring the traffic loads for monitoring purpose and in generating electricity for energy harvesting. Further tests will be carried out on a prototype pot bearing with built-in PCGE together with the development of adequate inverter in order to verify the applicability of the proposed multi-functional bridge bearing.

Acknowledgments: This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP)

funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

References and Notes

1. C. Sun, J. Shi, and X. Wang, *J. Appl. Phys.* 108, 034309 (2010).
2. D. H. Ha, J. F. Choo, D. Kim, and N. S. Goo, *Advances in Information Sciences and Service Sciences* ISSN: 1976-3700, Accepted (2012).
3. C. A. Howells, *Piezoelectric Energy Harvesting, Energy Conversion and Management* 50, 1847 (2009).
4. Website of Innowattech: <http://www.innowattech.co.il>.
5. S. R. Anton and H. A. Sodano, A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003–2006); *Smart Mater. Struct.* 16 (2007).
6. H. A. Sodano, D. J. Inman, and G. Park, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16, 799 (2005).
7. H. S. Kim, J. H. Kim, and J. Kim, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12, 1129 (2011).
8. S. Saadon and O. Sidek, *Energy Convers. Manage.* 52, 500 (2011).
9. D. Kim, Vehicle weight estimation using a bridge bearing with embedded piezoelectric material, Master Thesis, Department of Civil Engineering, Graduate School of Konkuk University, in Korean (2012).
10. D. H. Ha, D. Kim, J. F. Choo, and N. S. Goo, Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material, *Proceedings of AICIT Conference on Networked Computing (INC 2011)* (2011), pp. 13–22.
11. C. M. T. Tien and N. S. Goo, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 21, 1427 (2010).
12. S. H. Straus and J. Semmens, Estimating the cost of overweight vehicle travel on arizona highways, Final Report 528, Arizona Department of Transportation, USA (2006).
13. M. Quilligan, Bridge weigh-in-motion: Development of a 2-D multi-vehicle algorithm, Licentiate Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridge Division, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, TRITA-BKN, Bulletin (2003), p. 69.
14. T. Deesomsuk and T. Pinkaew, *Advances in Civil Engineering* 2009 (2009).

Received: 4 May 2012. Accepted: 28 May 2012.

Delivered by Publishing Technology to: WONSEO JANG
IP: 203.252.137.116 On: Thu, 18 Jul 2013 11:23:45
Copyright: American Scientific Publishers

Electronic Acknowledgement Receipt

EFS ID:	17799773
Application Number:	13496970
International Application Number:	
Confirmation Number:	6221
Title of Invention:	ELASTOMERIC BRIDGE BEARINGS HAVING A PIEZOELECTRIC DEVICE
First Named Inventor/Applicant Name:	Dong Ho Ha
Customer Number:	23995
Filer:	ROBERT BERDO/Kimberly Jang
Filer Authorized By:	ROBERT BERDO
Attorney Docket Number:	OTE-162
Receipt Date:	02-JAN-2014
Filing Date:	19-MAR-2012
Time Stamp:	13:56:01
Application Type:	U.S. National Stage under 35 USC 371

Payment information:

Submitted with Payment	yes
Payment Type	Credit Card
Payment was successfully received in RAM	\$ 480
RAM confirmation Number	277
Deposit Account	
Authorized User	

File Listing:

Document Number	Document Description	File Name	File Size(Bytes)/ Message Digest	Multi Part /.zip	Pages (if appl.)
-----------------	----------------------	-----------	-------------------------------------	---------------------	---------------------

1	Issue Fee Payment (PTO-85B)	OTE-162-PTOL-FORM85.pdf	1211575	no	2
			6f89b96efa468fe438bf2e79a0234e0545d06eab		

Warnings:

Information:

2	Fee Worksheet (SB06)	fee-info.pdf	30597	no	2
			f6ff5b8e8b5e28d1398cd10a2e674ad5a4d56585		

Warnings:

Information:

Total Files Size (in bytes):			1242172
------------------------------	--	--	---------

This Acknowledgement Receipt evidences receipt on the noted date by the USPTO of the indicated documents, characterized by the applicant, and including page counts, where applicable. It serves as evidence of receipt similar to a Post Card, as described in MPEP 503.

New Applications Under 35 U.S.C. 111

If a new application is being filed and the application includes the necessary components for a filing date (see 37 CFR 1.53(b)-(d) and MPEP 506), a Filing Receipt (37 CFR 1.54) will be issued in due course and the date shown on this Acknowledgement Receipt will establish the filing date of the application.

National Stage of an International Application under 35 U.S.C. 371

If a timely submission to enter the national stage of an international application is compliant with the conditions of 35 U.S.C. 371 and other applicable requirements a Form PCT/DO/EO/903 indicating acceptance of the application as a national stage submission under 35 U.S.C. 371 will be issued in addition to the Filing Receipt, in due course.

New International Application Filed with the USPTO as a Receiving Office

If a new international application is being filed and the international application includes the necessary components for an international filing date (see PCT Article 11 and MPEP 1810), a Notification of the International Application Number and of the International Filing Date (Form PCT/RO/105) will be issued in due course, subject to prescriptions concerning national security, and the date shown on this Acknowledgement Receipt will establish the international filing date of the application.

Electronic Patent Application Fee Transmittal

Application Number:	13496970			
Filing Date:	19-Mar-2012			
Title of Invention:	ELASTOMERIC BRIDGE BEARINGS HAVING A PIEZOELECTRIC DEVICE			
First Named Inventor/Applicant Name:	Dong Ho Ha			
Filer:	ROBERT BERDO/Kimberly Jang			
Attorney Docket Number:	OTE-162			
Filed as Small Entity				
U.S. National Stage under 35 USC 371 Filing Fees				
Description	Fee Code	Quantity	Amount	Sub-Total in USD(\$)
Basic Filing:				
Pages:				
Claims:				
Miscellaneous-Filing:				
Petition:				
Patent-Appeals-and-Interference:				
Post-Allowance-and-Post-Issuance:				
Utility Appl Issue Fee	2501	1	480	480
Extension-of-Time:				

Description	Fee Code	Quantity	Amount	Sub-Total in USD(\$)
Miscellaneous:				
Total in USD (\$)				480

PART B - FEE(S) TRANSMITTAL

Complete and send this form, together with applicable fee(s), to: **Mail** Mail Stop ISSUE FEE
Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, Virginia 22313-1450
or Fax (571)-273-2885

INSTRUCTIONS: This form should be used for transmitting the ISSUE FEE and PUBLICATION FEE (if required). Blocks 1 through 5 should be completed where appropriate. All further correspondence including the Patent, advance orders and notification of maintenance fees will be mailed to the current correspondence address as indicated unless corrected below or directed otherwise in Block 1, by (a) specifying a new correspondence address; and/or (b) indicating a separate "FEE ADDRESS" for maintenance fee notifications.

CURRENT CORRESPONDENCE ADDRESS (Note: Use Block 1 for any change of address)

23995 7590 10/03/2013
RABIN & Berdo, PC
1101 14TH STREET, NW
SUITE 500
WASHINGTON, DC 20005

Note: A certificate of mailing can only be used for domestic mailings of the Fee(s) Transmittal. This certificate cannot be used for any other accompanying papers. Each additional paper, such as an assignment or formal drawing, must have its own certificate of mailing or transmission.

Certificate of Mailing or Transmission

I hereby certify that this Fee(s) Transmittal is being deposited with the United States Postal Service with sufficient postage for first class mail in an envelope addressed to the Mail Stop ISSUE FEE address above, or being facsimile transmitted to the USPTO (571) 273-2885, on the date indicated below.

(Depositor's name)
(Signature)
(Date)

APPLICATION NO.	FILING DATE	FIRST NAMED INVENTOR	ATTORNEY DOCKET NO.	CONFIRMATION NO.
13/496,970	03/19/2012	Dong Ho Ha	OTE-162	6221

TITLE OF INVENTION: RESILIENT BRIDGE SUPPORT HAVING A PIEZOELECTRIC DEVICE

APPLN. TYPE	ENTITY STATUS	ISSUE FEE DUE	PUBLICATION FEE DUE	PREV. PAID ISSUE FEE	TOTAL FEE(S) DUE	DATE DUE
nonprovisional	SMALL	~~\$890~~ \$480	~~\$300~~ \$0	\$0	~~\$1190~~ \$480	01/03/2014

EXAMINER	ART UNIT	CLASS-SUBCLASS
ADDISON, KAREN B	2837	310-339000

1. Change of correspondence address or indication of "Fee Address" (37 CFR 1.363).
☐ Change of correspondence address (or Change of Correspondence Address form PTO/SB/122) attached.
☐ "Fee Address" indication (or "Fee Address" Indication form PTO/SB/47; Rev 03-02 or more recent) attached. Use of a Customer Number is required.

2. For printing on the patent front page, list
 (1) the names of up to 3 registered patent attorneys or agents OR, alternatively,
 (2) the name of a single firm (having as a member a registered attorney or agent) and the names of up to 2 registered patent attorneys or agents. If no name is listed, no name will be printed.

1 Rabin & Berdo, P.C.
 2 _____
 3 _____

3. ASSIGNEE NAME AND RESIDENCE DATA TO BE PRINTED ON THE PATENT (print or type)

PLEASE NOTE: Unless an assignee is identified below, no assignee data will appear on the patent. If an assignee is identified below, the document has been filed for recordation as set forth in 37 CFR 3.11. Completion of this form is NOT a substitute for filing an assignment.

(A) NAME OF ASSIGNEE

(B) RESIDENCE: (CITY and STATE OR COUNTRY)

Konkuk University Industrial Cooperation Corp.

Seoul, Republic of Korea

Please check the appropriate assignee category or categories (will not be printed on the patent): ☐ Individual ☒ Corporation or other private group entity ☐ Government

4a. The following fee(s) are submitted:

- ☒ Issue Fee
☐ Publication Fee (No small entity discount permitted)
☐ Advance Order - # of Copies _____

4b. Payment of Fee(s): (Please first reapply any previously paid issue fee shown above)

- ☐ A check is enclosed.
☒ Payment by credit card. Form PTO-2038 is attached.
☒ The Director is hereby authorized to charge the required fee(s), any deficiency, or credit any overpayment, to Deposit Account Number **18-0002** (enclose an extra copy of this form).

5. Change in Entity Status (from status indicated above)

- ☐ Applicant certifying micro entity status. See 37 CFR 1.29
- ☐ Applicant asserting small entity status. See 37 CFR 1.27
- ☐ Applicant changing to regular undiscounted fee status.

NOTE: Absent a valid certification of Micro Entity Status (see form PTO/SB/15A and 15B), issue fee payment in the micro entity amount will not be accepted at the risk of application abandonment.

NOTE: If the application was previously under micro entity status, checking this box will be taken to be a notification of loss of entitlement to micro entity status.

NOTE: Checking this box will be taken to be a notification of loss of entitlement to small or micro entity status, as applicable.

NOTE: The Issue Fee and Publication Fee (if required) will not be accepted from anyone other than the applicant; a registered attorney or agent; or the assignee or other party in interest as shown by the records of the United States Patent and Trademark Office.

Authorized Signature /Steven M. Rabin/

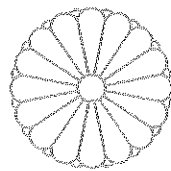
Date January 2, 2014

Typed or printed name Steven M. Rabin

Registration No. 29,102

This collection of information is required by 37 CFR 1.311. The information is required to obtain or retain a benefit by the public which is to file (and by the USPTO to process) an application. Confidentiality is governed by 35 U.S.C. 122 and 37 CFR 1.14. This collection is estimated to take 12 minutes to complete, including gathering, preparing, and submitting the completed application form to the USPTO. Time will vary depending upon the individual case. Any comments on the amount of time you require to complete this form and/or suggestions for reducing this burden, should be sent to the Chief Information Officer, U.S. Patent and Trademark Office, U.S. Department of Commerce, P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450. DO NOT SEND FEES OR COMPLETED FORMS TO THIS ADDRESS. SEND TO: Commissioner for Patents, P.O. Box 1450, Alexandria, Virginia 22313-1450.

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.



特 許 証

(CERTIFICATE OF PATENT)

特許第5396542号
(PATENT NUMBER)

発明の名称
(TITLE OF THE INVENTION)

圧電素子を備える弾性橋梁支承

特許権者
(PATENTEE)

大韓民国 143-071 ソウル グァンジン
ング ファヤンードン 1
国籍 大韓民国
コングック ユニヴァーシティ イン
ダストリアル コーペレーション コ
ーポレーション

発明者
(INVENTOR)

ハ, ドン－ホ
グ, ナム－ソ
ユ, ムン－シク

出願番号
(APPLICATION NUMBER)

特願2012-530758

出願日
(FILING DATE)

平成21年11月30日(November 30, 2009)

登録日
(REGISTRATION DATE)

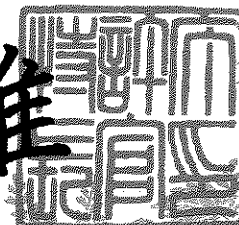
平成25年10月25日(October 25, 2013)

この発明は、特許するものと確定し、特許原簿に登録されたことを証する。
(THIS IS TO CERTIFY THAT THE PATENT IS REGISTERED ON THE REGISTER OF THE JAPAN PATENT OFFICE.)

平成25年10月25日(October 25, 2013)

特許庁長官
(COMMISSIONER, JAPAN PATENT OFFICE)

羽藤秀雄



特許証送付先

住 所

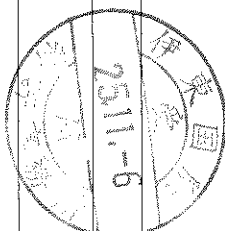
〒100-0005

東京都千代田区丸の内二丁目1番1号 丸の内 MY PLAZA (明治安田生命ビル)

16階 伊東国際特許事務所

氏 名

伊東 忠重



様

特許権設定登録通知書

特許番号 第5396542号

登録日 平成25年10月25日

出願番号 特願2012-530758

出願日 平成21年11月30日

請求項の数 5

納付年分 第3年分まで

受領金額 9,900円

受領日 平成25年10月21日

特許料の納付について

特許料納付期限日

- ・特許権を維持するには、存続期間の満了(特許出願の日から20年)までの各年について所定の特許料の納付が必要です。

- ・第4年以降の各年分の特許料は、登録日(出願公告を経て特許になった場合は、公告日)の翌日を起算日として、納付済年分の満了日(以下「納付期限日」という)までに、次の年分の納付が必要です。

- ・納付期限日までに納付できなかったときは、その期間の経過後6ヶ月以内であれば特許料を追納することができます。

- ・追納する場合は、納付すべき特許料のほか、その特許料と同額の割増特許料が必要です。

- ・追納できる期間内に納付しないときは、その特許権は、納付期限日にさかのぼって消滅したものとみなされます。

- ・特許料納付書の様式及び特許料の額については、以下を参照してください。

特許庁ホームページ

<http://www.jpo.go.jp/index.j.htm>

納付年分	納付期限日
第4年分	平成28年10月25日
第5年分	平成29年10月25日
第6年分	平成30年10月25日
第7年分	平成31年10月25日
第8年分	平成32年10月25日
第9年分	平成33年10月25日
第10年分	平成34年10月25日
第11年分	平成35年10月25日
第12年分	平成36年10月25日
第13年分	平成37年10月25日
第14年分	平成38年10月25日
第15年分	平成39年10月25日
第16年分	平成40年10月25日
第17年分	平成41年10月25日

(注) 納付期限日が行政機関の休日にあたるときは、その日の翌日が期間の末日となります。

問い合わせ先 出願支援課登録室
電話 03(3581)1101 (代表)
特許担当 内線 2708



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2011년09월30일
(11) 등록번호 10-1069155
(24) 등록일자 2011년09월26일

(51) Int. Cl.

E01D 19/04 (2006.01) *F03G 7/08* (2006.01)

(21) 출원번호 10-2009-0092129

(22) 출원일자 2009년09월29일

심사청구일자 2009년09월29일

(65) 공개번호 10-2011-0034731

(43) 공개일자 2011년04월06일

(56) 선행기술조사문헌

KR100769645 B1

JP2005090152 A

KR200388055 Y1

(73) 특허권자

건국대학교 산학협력단

서울 광진구 화양동 1 건국대학교내

(72) 발명자

하동호

서울특별시 강남구 대치2동 은마아파트 19동 1409호

구남서

서울특별시 영등포구 영등포동8가 삼환아파트 102동 1201호

유문식

경기도 용인시 기흥구 신갈동 165 도현마을 현대아파트 207동 305호

(74) 대리인

장혜룡, 임영섭

전체 청구항 수 : 총 6 항

심사관 : 최병석

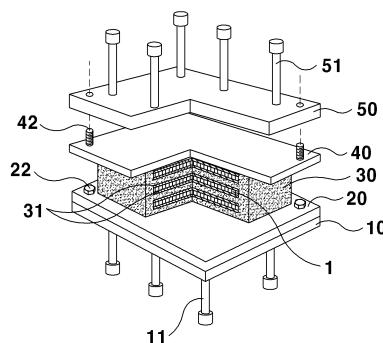
(54) 압전소자가 구비된 탄성교량받침

(57) 요약

본 발명은 압전소자가 구비된 탄성교량받침에 관한 것으로서, 교량의 상판과 교각 사이에 설치하여 상기 교량의 상판 하중과 변형에 의해 발생하는 충격력을 감소 시키는 교량용 탄성 받침에 다수의 압전소자를 장착하여 교량의 상판에 작용하는 차량의 하중을 계측함과 함께 교량에 자동차의 주행으로 발생하는 진동 에너지를 이용하여 전기 에너지를 생산하기 위한 것이다.

이를 실현하기 위한 본 발명은, 교량상판의 저면에 고정 설치되는 어퍼플레이트(50)와, 교각 상면에 고정 설치되는 베이스플레이트(10)와, 상기 어퍼플레이트(50)와 베이스플레이트(10)에 각각 체결볼트(22,42)에 의해 체결 고정되는 상부고정관(40) 및 하부고정관(20)과, 상기 상,하부 고정관(20,40)에 상하 양면이 각각 열융착 고정되어 집과 함께 내부에는 다수의 강철관(31)이 다층형태로 매립 구성되어진 고무패드(30)로 구성되는 교량용 탄성받침에 있어서, 상기 탄성받침에는 교량 상판에서 전달되는 진동을 전기에너지로 변환시키기 위한 다수의 압전소자(1)가 구성되어지되, 상기 압전소자(1)는 고무패드(30) 내에서 각각의 강철관(31) 사이에 적층 구성시킨 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

교량상판의 저면에 고정 설치되는 어퍼플레이트(50)와, 교각 상면에 고정 설치되는 베이스플레이트(10)와, 상기 어퍼플레이트(50)와 베이스플레이트(10)에 각각 체결볼트(22,42)에 의해 체결 고정되는 상부고정판(40) 및 하부 고정판(20)과, 상기 상,하부 고정판(20,40)에 상하 양면이 각각 열융착 고정되어짐과 함께 내부에는 다수의 강철판(31)이 다층형태로 매립 구성되어진 고무패드(30)로 구성되는 교량용 탄성받침에 있어서,

상기 탄성받침에는 교량 상판에서 전달되는 진동을 전기에너지로 변환시키기 위한 다수의 압전소자(1)가 높이를 달리하며 일정 간격으로 구성되어지되, 상기 각각의 압전소자(1)는 2개의 강철판(31)과 한 조를 이루어 고무패드(30) 내에서 강철판(31) 사이에 적층형태로 구성되어진 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 압전소자(1)는 박판형태를 이루어 강철판(31)과 직접 면접촉이 이루어 가압력의 직접 전달되도록 구성되되, 상기 강철판(31)의 압전소자(1) 대향면에는 다수의 돌기부(32)가 형성된 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 각각의 압전소자(1)는 상호 전기적으로 직렬 연결 구비되되, 고무패드(30)의 전단 변형에 대응될 수 있는 코일형전선(3)으로 상호 연결되며, 강철판(31)에는 상기 코일형전선(3)이 안내되어질 수 있도록 전선안내공(31a)이 형성된 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

청구항 4

청구항 1 내지 청구항 3중 어느 한 항에 있어서,

상기 강철판(31)의 압전소자(1) 대향면에는 절연을 위한 파라핀층(33)이 코팅 형성된 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 파라핀층(33)에는 두께의 균일화를 일정하게 유지시키기 위하여 아크릴계 재분산 분말수지, 소석회, MEHEC(Metyl Ethyl Hydroxypropyl Eethyl Cellulose)가 포함된 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 파라핀층(33)에는 BAM(Buthyl Acrylate Monomer)이 추가로 더 혼합되어진 것을 특징으로 하는 압전소자가 구비된 탄성교량받침.

명 세 서

발명의 상세한 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 교량받침에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 교량의 상판 지지를 위해 설치되는 교좌장치의 일종인 탄성받침에 압전소자를 구비함으로써 교량의 상판에 작용하는 차량의 하중을 계측하고, 차량 통행시 발생하는 진동을 전기에너지로 활용토록 하기 위한 것이다.

배경 기술

- [0002] 일반적으로 현대사회에서 전기는 생활의 일부가 된 필수적 에너지 형태이며, 이러한 전기에너지는 이미 화력, 수력, 원자력 등 여러 가지 방식을 사용하여 얻어지고 있으며, 그 특성 또한 우수하다. 그러나 계속적인 에너지 생산에 따른 자원의 고갈과 이로 인한 에너지 생산의 한계성, 고 비용 그리고 발전시스템에 의해 발생하는 환경의 오염 등 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 최근 이러한 문제를 인식한 각국은 대체에너지 개발에 대한 투자를 꾸준히 증가시켜가고 있는 실정이다. 예컨대, 대표적으로 중점 개발되고 있는 대체 에너지로 태양광을 이용한 전압발생장치가 개발되었으며, 이는 태양광을 직접 수광하는 태양전지를 구성하고, 그 태양전지로부터 발생하는 전압을 균일하게 유지해주는 정전압 회로를 매개로하여 축전지에 상기 태양전지로부터의 전압을 충전시켜 필요 시 보조전원으로 사용할 수 있게 한다.
- [0003] 하지만, 상기 태양전지를 이용한 전력 생산은 낮은 효율과 광량에 따라 발전량이 큰 차이가 생기고 밤에는 생산하지 못하는 단점이 있어 한 국가의 주 에너지원으로서 역할은 할 수 없고 다만 보조적이거나 시험적인 에너지원이 될 수밖에 없다.
- [0004] 또한, 조력과 풍력, 수력발전으로 인한 에너지 생성장치는 자연조건이 적합한 지역에서만 보조전원으로 사용하는 것이 가능한 에너지이며, 그로 인한 발전전압 또한 기대치에 미치지 못하거나 주변환경에 따른 제약을 많이 받고, 초기시설투자 비용이 막대하여 일반적이라고 할 수 없다.
- [0005] 이에 따라 대체 에너지원으로 에너지의 재활용에 대한 관심이 증가하고 있으며, 본 발명은 에너지의 재활용으로 교량에서 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하여 상기 교량에 필요한 전원을 공급할 수 있도록 하는 것이다.
- [0006] 최근 전국의 교량은 약 23,000여 개로 앞으로 상기 교량의 수는 더욱 증가할 것이며, 점차적으로 그 규모 및 길이 역시 커지고 있는 실정이다. 상기와 같은 교량은 교각 위에 상판을 올려주는 구조를 가지며, 교량 위에는 차량 등이 고속으로 통행하므로 교량에는 시시각각 변화되는 동하중이 작용하며, 큰 교량에서는 그 상판의 길이가 길어지므로 계절의 변화에 따른 온도변화에 의한 열변형으로 상판의 신축량이 커져 상판과 교각의 접촉부위에서 상대운동을 허용하도록 설계하여야 한다. 또한, 지진 등에 의해 교량에 수평방향으로 미치는 큰 충격력에 대비하여 수평방향의 충격력을 완화하여 줄 수 있는 지지구조를 가져야 하며, 상기 교량에는 교량 상판과 교각 사이에 탄성 받침을 설치하여 상판의 변위에 대응하면서 상판을 지지하여 상판에 미치는 충격력을 감소시키도록 한다.
- [0007] 상기와 같은 교량의 탄성 받침은 교량에서 발생하는 충격력을 감소시키기 위한 것으로 상기 탄성 받침에는 교량에서 발생하는 충격력이 그대로 전달되어 상기 충격력으로 진동 에너지가 발생한다.
- [0008] 그러나 종래에는 교량의 상판의 하중과 자동차의 주행 시 발생하는 진동 에너지를 전달받는 탄성 받침이 상기 진동 에너지의 충격력을 감소시키지만 할 뿐 상기 교량의 상판의 하중과 자동차의 주행 시 발생하는 진동 에너지를 재활용하지 못하고 낭비하고 있는 실정이었다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

- [0009] 본 발명은 교량에서 발생하는 진동에너지를 재활용 할 수 있도록 하기 위한 것으로서, 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환시킬 수 있는 압전소자를 교량 탄성받침에 적용함으로써 교량의 유지 관리에 필요한 에너지를 친환경적으로 얻을 수 있도록 하는데 목적이 있다.

과제 해결수단

- [0010] 상기 목적을 이루기 위한 본 발명은, 교량상판의 저면에 고정 설치되는 어퍼플레이트와, 교각 상면에 고정 설치되는 베이스플레이트와, 상기 어퍼플레이트와 베이스플레이트에 각각 체결볼트에 의해 체결 고정되는 상부고정판 및 하부고정판과, 상기 상,하부 고정판에 상하 양면이 각각 열융착 고정되어짐과 함께 내부에는 다수의 강철판이 다층형태로 매립 구성되어진 고무패드로 구성되는 교량용 탄성받침에 있어서, 상기 탄성받침에는 교량 상판에서 전달되는 진동을 전기에너지로 변환시키기 위한 박판형태의 압전소자가 구성되어지되, 상기 압전소자는 고무패드 내에서 강철판간 사이에 구성시킨 것을 특징으로 한다.

효 과

[0011] 이러한 본 발명은, 교량의 상판과 교각 사이에 설치하여 상기 교량의 상판 하중과 변형에 의해 발생하는 충격력을 감소 시키는 교량용 탄성 받침에 다수의 압전소자를 장착하여 교량의 상판의 하중과 상기 교량에 자동차의 주행으로 발생하는 진동 에너지를 압전효과에 의한 전기 에너지로 변환하여 에너지 변환부를 통해 축전지에 충전할 수 있는 전류로 변환하여 축전지에 충전함으로써 상기 교량 유지 관리를 위한 센서, 가로등 등의 교량에 필요한 전원을 공급할 수 있는 효과가 있으며, 이로 인해 교량에서 낭비 되기만 했던 교량의 진동 에너지를 탄성 받침부에 형성된 압전 필름부를 통해 전기 에너지로 재활용할 수 있어 대체 에너지로서 활용할 수 있는 효과가 있다.

[0012] 특히, 이러한 압전소자는 강철판 사이에 적층 구비됨으로서 교량받침의 수평변형 발생시 강철판에 의해 보호되어 기기손상발생이 방지되어질 수 있게 된다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

[0013] 이하, 본 발명의 구체적인 실시 예를 첨부 도면을 참조하여 상세히 살펴보기로 한다.

[0014] 먼저, 본 실시 예에 따른 압전소자가 구비된 탄성교량받침의 전체적인 구조를 살펴보면, 교량의 상부구조물(상판) 저면에 고정 설치되는 어퍼플레이트(50)와, 교량의 하부구조물(교각) 상면에 고정 설치되는 베이스플레이트(10)와, 어퍼플레이트(50)와 베이스플레이트(10)의 서로 마주보는 면에 각각 고정되는 상부고정판(40) 및 하부고정판(20)과, 상,하부고정판(20,40) 사이에 결합되어진 고무패드(30)로 구성된다. 상,하부 고정판(20,40)은 체결볼트(22,42)에 의해 베이스플레이트(10)와 어퍼플레이트(50)에 각각 체결 고정되어진다.

[0015] 그리고, 고무패드(30)의 내부에는 고무패드(30)의 팽창을 방해하여 수직하중에 대해 내하력을 증대시킴으로써 수직하중을 수용하도록 하기 위한 다수의 강철판(31)이 소정의 간격으로 배치된다.

[0016] 이와 같은 고무패드(30)의 상면과 하면은 각각 상,하부 고정판(20,40)에 밀착된 상태로 각각 열융착되어지게 된다.

[0017] 특히, 본 발명에서의 고무패드(30) 내부에는 교량의 상판 하중과 자동차의 주행으로 발생하는 진동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 압전소자(1)가 장착되어지게 되는데, 상기 압전소자(1)는 박판형태를 이루어 2개의 강철판(31) 사이에 결합되는 적층형 구조를 이룸으로서, 강철판(31)에 의해 상하부가 보호되어질 수 있도록 배치하였다.

[0018] 즉, 도 3에서와 같이 다수의 압전소자(1)가 강철판(31) 사이에 면접촉 되는 형태로 적층 구성되고, 각 압전소자(1)에서 발생된 전류가 충전될 수 있도록 축전지(2)와 연결되어지게 된다.

[0019] 또한, 각각의 압전소자(1)는 상호 전기적으로 직렬 연결 구비되되, 고무패드(30)의 전단 변형이 발생하더라도 전기적인 끊어짐 현상이 방지되어질 수 있도록 압전소자(1) 상호간에는 나선형상의 코일형전선(3)으로 상호 연결하였으며, 강철판(31)에는 상기한 코일형전선(3)이 관통되어질 수 있도록 전선안내공(31a)을 도 4에서와 같이 형성하였다.

[0020] 도면 중 미설명 부호 11, 51은 각각 교각 및 상판 콘크리트에 매립고정되어질 앵커소켓을 나타낸다.

[0021] 이와 같은 구성을 이루는 본 발명 탄성교량받침의 시공 설치에 따른 작용효과를 살펴보기로 한다.

[0022] 먼저, 교각과 교량 상판 사이에 본 발명의 탄성받침이 시공된 상태에서, 교량의 상판 하중과 자동차의 주행으로 발생하는 진동력이 고무패드(30)로 전달되어짐에 따라 내부에 장착되어져 있는 압전소자(1)의 압전효과에 의해 전기에너지가 발생되어지게 된다.

[0023] 즉, 각각의 압전소자(1)는 고무패드(30)의 유동성에 의하여 강철판(31)에 의한 가압력이 전달되어지게 되고, 이에 따라 상호 직렬 형태로 연결되어져 있는 각각의 압전소자(1)에 압력이 가해짐으로서 전력생산이 이루어지게 되는데, 압전소자(1)를 통해 전송받은 AC 전류 전압은 트랜스포머(미도시)에서 정류된 후 정류 회로부에서 DC 전압으로 변환되어지고, 변환된 전압은 축전지(2)에 충전되어지게 된다.

[0024] 따라서, 축전지(2)에 충전된 전류를 이용하여 유무선으로 과적차량의 모니터링 장치로 활용하거나, 교량의 가로등 과 같은 시설물의 전력자원으로 활용되어질 수 있게 된다.

[0025] 특히, 교량받침에 이러한 수직하중과 함께 수평변형이 발생하더라도, 본 발명의 압전소자(1)는 강철판(31)에 의

해 보호되어질 수 있게 됨으로, 손상 발생이 방지되어질 수 있게 된다.

[0026] 또한, 압전소자(1)에서 발생하는 전류의 세기에 따라 교량 상판의 상재하중 변화를 확인함으로써 차량의 중량을 간접적으로 계측하는데 활용되어짐이 바람직하다.

[0027] 또한, 압전소자(1)에서 발생하는 전류의 변동 신호를 이용하여 교량 구조물의 건전성 평가에 필요한 정보를 제공할 수 있게 된다.

[0028] 한편, 도 6은 본 발명의 다른 실시예로서 압전소자(1)와 강철판(31) 상호간의 면접촉에 따른 산화 발생 등의 악 영향을 방지하기 위해 강철판(31)의 표면에 돌기부(32)를 형성시킨 것을 나타낸다.

[0029] 즉, 도시된 바와 같이 강철판(31)의 압전소자(1) 대향측 표면에 다수의 돌기부(32)를 형성시키게 되면 상호간에 점접촉이 이루어진 상태를 이루게 됨으로 접촉면적을 최소화 할 수 있게 되어 강철판(31)의 산화발생에 따른 악영향을 최소화 할 수 있게 되며, 이와 함께 점형태로 가압력이 작용하게 됨으로 보다 안정적인 전력생산이 이루어질 수 있게되는 것이다.

[0030] 또한, 도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 강철판(31) 코팅구조를 나타낸 것으로서, 압전소자(1) 대향면에는 절연을 위한 파라핀층(33)을 코팅 형성시킨 것이다.

[0031] 즉, 코팅층을 형성시키기 위한 주 재료로 유동과라핀 50~85중량%에 두께의 균일화를 일정하게 유지시키기 위하여 아크릴계 재분산 분말수지 3~10중량%, 소석회 1~6중량%, MEHEC(Methyl Ethyl Hydroxypropyl Eethyl Cellulose) 1~6중량%를 혼합한 조성물로 과라핀층(33)을 형성시킴이 바람직하다.

[0032] 이때, 성분간 혼합 안정성을 위해 BAM(Buthyl Acrylate Monomer)이 0.5~2중량%로 추가 혼합되어질 수도 있게 된다.

[0033] 이와 같이 강철판(31)의 표면에 파라핀층(33)을 형성시키게 되면 압전소자(1)와 상호간에 절연상태가 이루어지게 됨으로 압전소자(1) 내에서 발생된 전기에너지의 누설발생이 방지되어어 축전지(2) 측으로 보다 안정적인 전기에너지 공급이 이루어질 수 있게 되는 것이다.

[0034] 그리고, 상기에서 본 발명의 특정한 실시 예가 설명 및 도시되었지만 본 발명의 압전소자가 구비된 탄성교량받침 구조가 당업자에 의해 다양하게 변형되어 실시될 수 있음은 자명한 일이다.

[0035] 그러나, 이와 같은 변형된 실시예들은 본 발명의 기술적 사상이나 범위로부터 개별적으로 이해되어져서는 안되며, 이와 같은 변형된 실시예들은 본 발명의 첨부된 특허청구범위 내에 포함된다 해야 할 것이다.

도면의 간단한 설명

[0036] 도 1은 본 발명 탄성교량받침의 분해도.

[0037] 도 2는 본 발명 탄성교량받침의 설치상태 단면도.

[0038] 도 3은 본 발명의 압전소자가 구비된 고무패드 상세 단면도.

[0039] 도 4는 도 3의 A부 확대도.

[0040] 도 5는 본 발명에서의 고무패드 수평변형 발생시 상태도.

[0041] 도 6은 본 발명의 다른 실시예에 따른 고무패드 상세 단면도.

[0042] 도 7은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 고무패드 상세 단면도.

[0043] <도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명>

[0044] 1 : 압전소자 2 : 축전지

[0045] 3 : 코일형전선 10 : 베이스플레이트

[0046] 11 : 앵커소켓 20 : 하부고정판

[0047] 22.42 : 체결볼트 30 : 고무패드

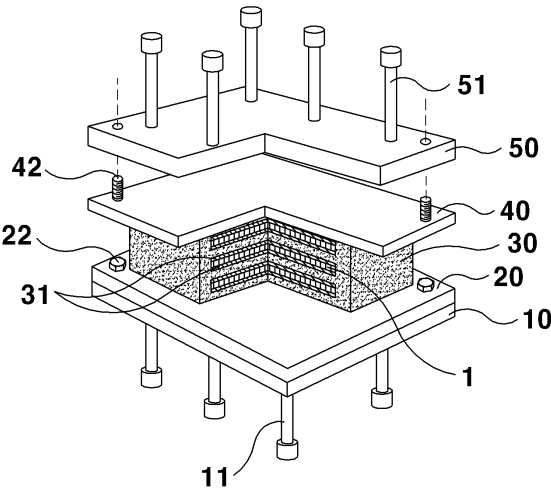
[0048] 31 : 강철판 31a: 전선 안내공

- [0049] 32 : 돌기부
- [0050] 34 : 절개부
- [0051] 50 : 어퍼플레이트

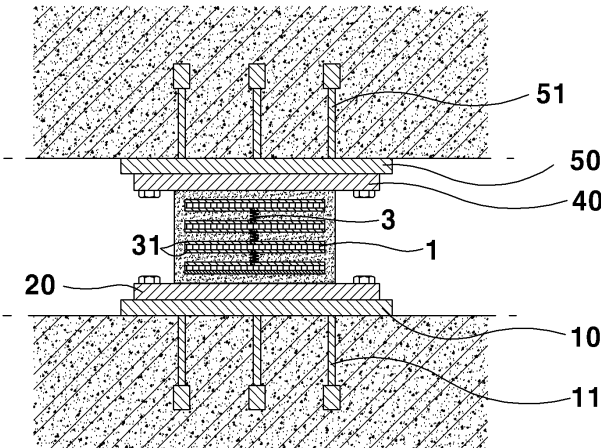
- 33 : 파라핀층
- 40 : 상부고정판
- 51 : 앵커소켓

도면

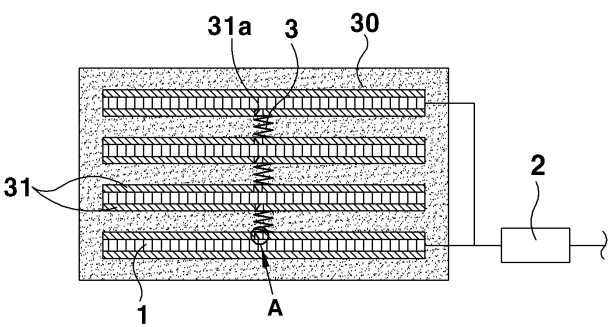
도면1



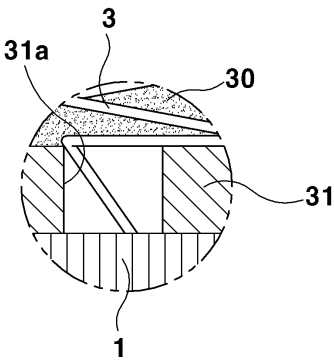
도면2



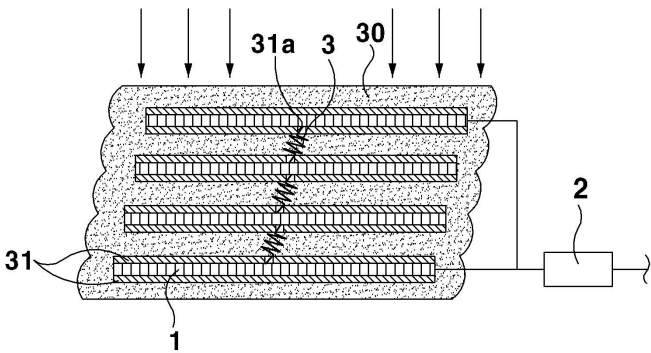
도면3



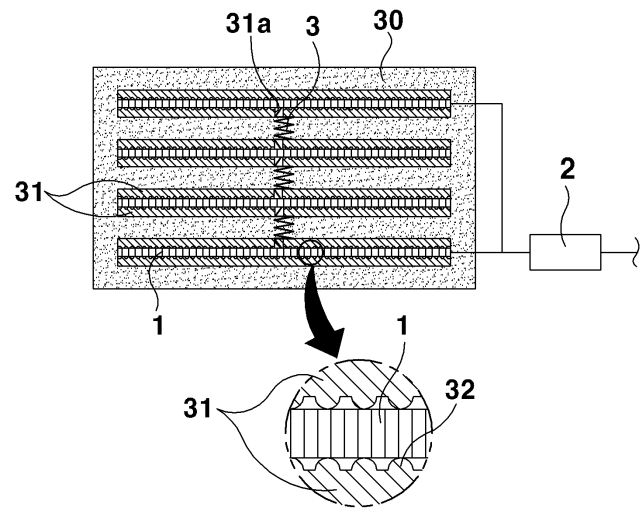
도면4



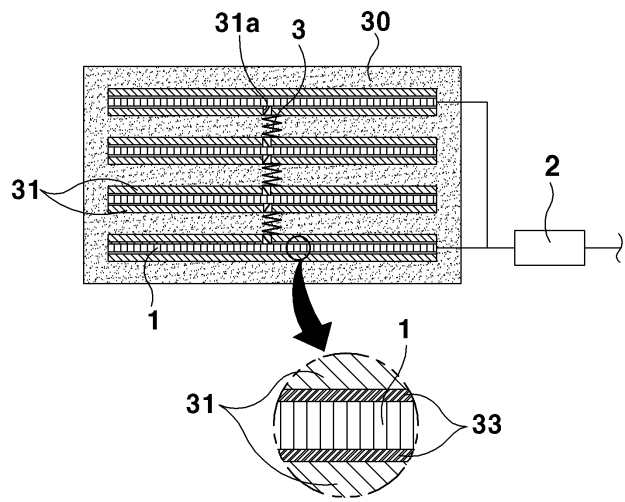
도면5



도면6



도면7



An Experimental Study on the Optimal Position of the Embedded Piezocomposite Electricity Generating Element in an Innovative Traffic Load-Measuring Bridge Bearing

Jinkyoo F. Choo^{1, a}, Dong-Ho Ha^{1, b}, Chang Hyung Lee^{1, c}, Won Seo Jang^{1, d}

¹Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

^ajfchoo@konkuk.ac.kr, ^bhadongho@konkuk.ac.kr, ^cchang773@hotmail.com, ^dariell7@naver.com

Keywords: Bridge bearing, Piezocomposite electricity generating element (PCGE), Dynamic loading test, Load measurement, Efficiency of electricity generation

Abstract. The bearings of a bridge are indispensable structural members, which support the superstructure, transfer the loads of the superstructure to the substructure and, accommodate the horizontal and vertical motions of the superstructure caused by all types of loads like traffic. Such traffic loads induce the bridge to vibrate but this energy is wasted. Therefore, a piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been introduced in the bearing to exploit effectively this vibrational energy. The bridge bearing with built-in PCGE was seen to be effective for measuring the traffic loads and, detecting eventual overloaded or overspeeding vehicles. In a will to optimize the amount of energy generated by this bearing, this study compares experimentally the amount of electricity produced by the PCGE with respect to its position in the bridge bearing through a series of dynamic loading tests to find out the position of the PCGE providing the most efficient electricity generation.

Introduction

Bridges vibrate under the crossing of traffic but the corresponding vibrational energy is generally wasted. Therefore, the application of the piezoelectric effect provided by certain non-conducting materials has been adopted to exploit the energy generated by the motion or vibrations of the superstructure. The piezoelectric effect stands for the property of certain crystals to produce electricity or electric polarity by applying a mechanical stress. Besides, the bearings of a bridge are natural and indispensable structural members, which support the superstructure, transfer the loads of the superstructure to the substructure and, accommodate the horizontal and vertical motions of the superstructure caused by all types of loads. Accordingly, the idea is to embed a piezoelectric material in the bridge bearing to exploit the unused vibrational energy of the bridge so as to measure the traffic loads, detect eventual overloaded or overspeeding vehicles. This solution enables to minimize the costs of installation and protect the highly brittle piezoelectric material from direct application of the loads. Moreover, in order to strengthen the resistance of the piezoelectric material to stresses and increase the efficiency of electricity production, the piezocomposite electricity generating element (PCGE) developed by our research team is introduced in the bearing [1].

Among the various types of bridge bearing, the widely applied pot bearing was selected and subjected to a series of dynamic tests conducted using a universal testing machine (UTM). The tests were performed by applying a permanent load with harmonic cyclic loads at different frequencies to simulate the loading conditions of a real bridge bearing. The results showed a linear relationship between the loading and the voltage output by the PCGE. The tests also revealed that the output voltage tended to reduce with larger permanent load but this loss remained practically insignificant even when the permanent load was doubled [2,3,4]. The linearity of the relationship between the loading and output voltage made it possible to confirm that the so-developed bridge bearing with built-in PCGE will be effective in measuring accurately the loads of the vehicle crossing the bridge.

In parallel with these tests, another series of tests was also implemented to increase the efficiency of the electricity generated by the bridge bearing with built-in PCGE. To that goal, the output voltage generated by the PCGE was compared for diverse positions of the PCGE inside the pot bearing to find

the optimal position of the PCGE among the available positions. These tests and the corresponding results are presented in this paper.

Bridge Bearing with Built-in PCGE

The pot bearing shown in Fig. 1 was selected as a representative bridge bearing. Pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, which presses the top of the PTFE. The PTFE functions like a viscous fluid inside a hydraulic jack, and the top steel plate behaves like a piston. Inside the pot, the deformation of the PTFE is restricted. Pot bearings are designed to carry combinations of vertical loads, horizontal loads, longitudinal and transversal movements, and rotations (Fig. 1). Considering the small space available within the pot bearing, a thin piezocomposite electricity generating element with dimensions of 76×76 mm (PCGE, Fig. 1) is inserted in the system. The multilayered piezoelectric PCGE structure with six layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy has been designed to enhance the durability of the PZT and increase its resistance to compressive mechanical strains. The PCGE generator has been designed to enable the generating layer to be kept apart from the flexural neutral surface of the generator so as to yield larger output voltage and power.



Fig. 1 Pot bearing and its components (pot plate, elastomeric disc, brass sealing ring, piston with PTFE, slide plate) and PCGE used in the tests

Test Setup

For the purpose of the tests, several layers of elastomer were adopted instead of the circular and monolithic PTFE disc so as to be able to dispose the PCGE at diverse heights inside the bearing. The position of the PCGE is varied from 0 mm (A), 2.4 mm (B), 3.6 mm (C) to 6.0 mm (D) from the steel plate at the bottom as shown in Fig. 2. The heights of 7.2 mm and 12.5 mm could not be achieved due to the presence of the brass sealing rings, which cut the connecting wires.

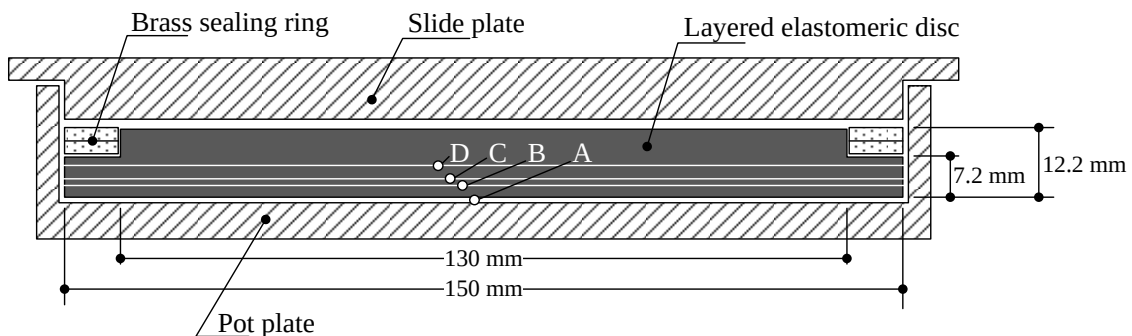


Fig. 2 Shape of elastomeric disc inside the pot bearing and considered heights of PCGE

In order to simulate real conditions, live load of 150 kN in the form of a harmonic loading at frequency of 1 Hz under a permanent load of 100 kN was applied using a UTM for the 4 considered heights and the corresponding output voltages were compared. For the measurement, the PCGE was connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure respectively the output voltage and applied loads during the tests (Fig. 3).

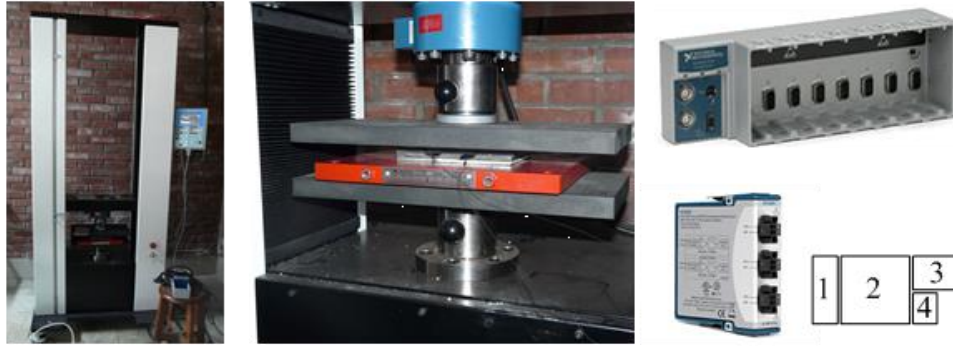
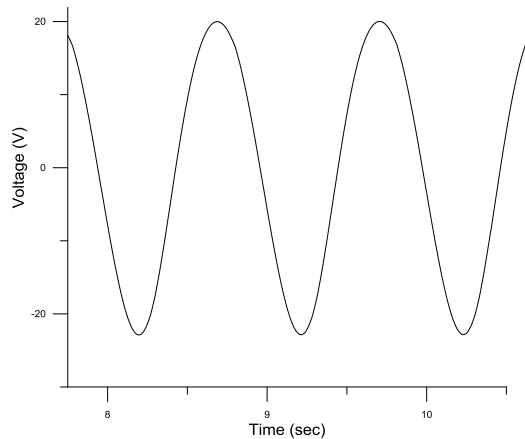


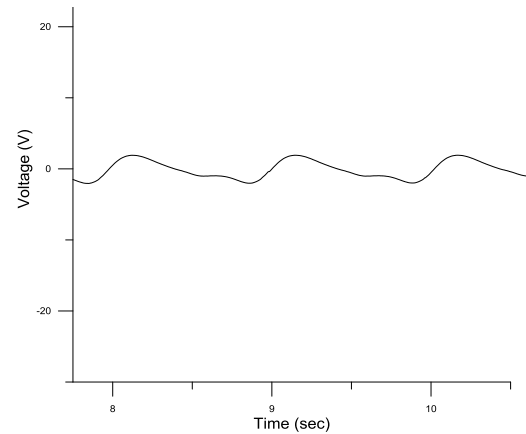
Fig.3 Testing equipment: (1) UTM, (2) Installed pot bearing, (3) NI cDAQ-9178, (4) NI-9225 [5]

Test Results and Discussion

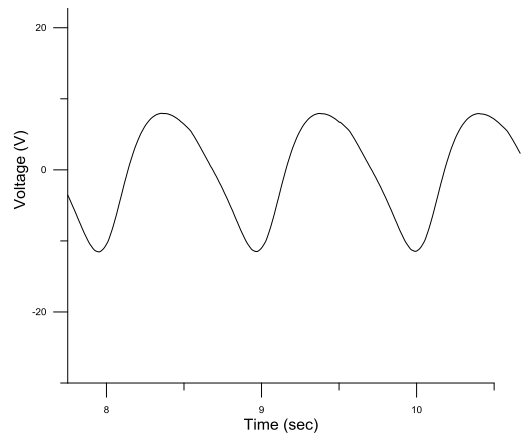
Fig. 4 plots the time histories of the output voltage measured for the considered heights of the PCGE inside the pot bearing under permanent load of 100 kN and harmonic live load of 150 kN.



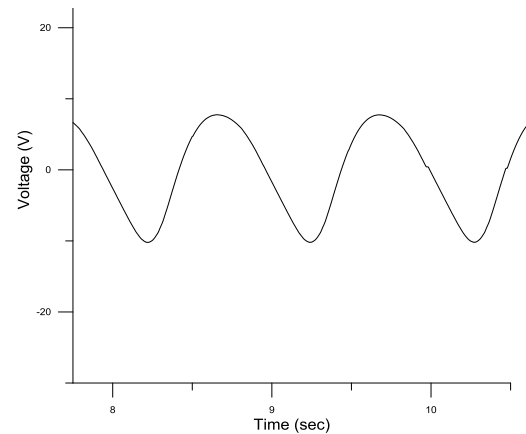
Height of PCGE = 0.0 mm (position A)



Height of PCGE = 2.4 mm (position B)



Height of PCGE = 3.6 mm (position C)



Height of PCGE = 6.0 mm (position D)

Fig. 4 Output voltage of PCGE measured according to height of PCGE inside the pot bearing

The simple comparison of the graphs in Fig. 4 shows clearly that installing the PCGE at the bottom of the pot steel plate with the elastomer disc disposed above (position A) generates the largest output voltage. This result can be explained by the fact that, in such position, the PCGE experiences the largest stress caused by the harmonic load representing the traffic load crossing the bridge since the PCGE is at its bottom supported by a steel plate that does not experience strain and at its top in contact with the elastomeric material which experiences comparatively large strain. This difference in the strains above and below the PCGE explains that the position A is the one enabling the PCGE to generate the largest output voltage. Besides, the other positions put the PCGE inside the elastomeric layer making the PCGE subjected to comparable strains at its upper and lower faces and thus, less stress and less electricity generation.

Fig. 5 plots the maximum output voltage in each position with respect to the applied load. It can be observed that the heights of the PCGE generating the largest output voltage are in descending sequence: 0.0 mm (A) > 6.0 mm (D) > 3.6 mm (C) > 2.4 mm (B). The linearity of the relationship is slightly degraded due to the fact that the layers of elastomer presented some defects compared to the original monolithic elastomer pad. This series of tests demonstrated that the optimal position of the PCGE in the pot bearing is when the PCGE is installed directly on the bottom of the base plate of the bearing.

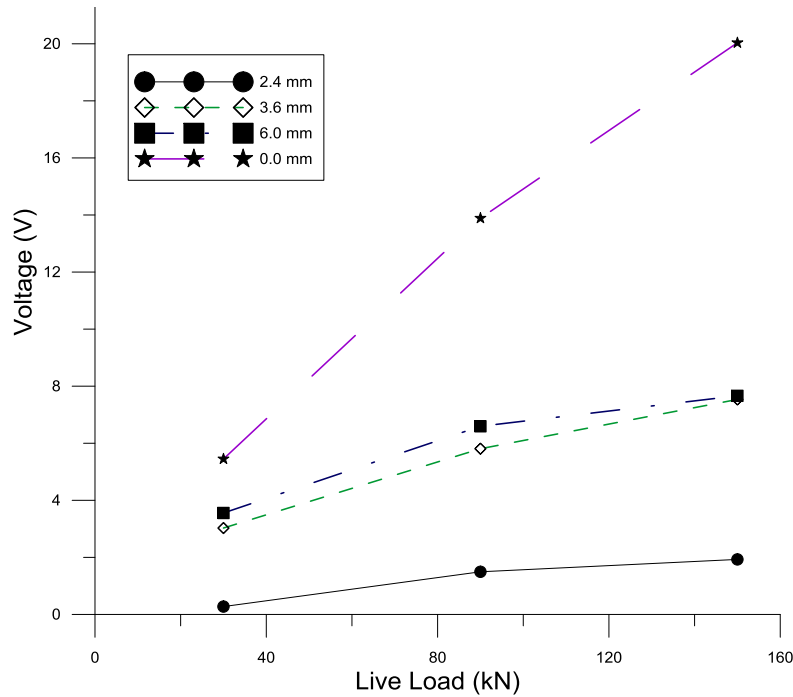


Fig. 5 Maximum output voltage according to load per height of PCGE inside the pot bearing

Conclusions

An innovative bridge bearing with built-in PCGE has been developed to monitor the traffic load crossing the bridge and exploit the vibrational energy of the bridge. Previous tests conducted by our research team confirmed the feasibility of the so-developed device in measuring the traffic loads and, eventually detecting overloaded or overspeeding vehicles. This paper presented the results of another series of tests dedicated to achieve the best electricity generating efficiency by finding out the optimal position of the PCGE in the bearing. To that goal, a reduced-scale pot bearing was fabricated and subjected to dynamic tests using a UTM so as to simulate realistic traffic conditions. The efficiency of electricity generation was then measured for diverse positions of the PCGE inside the pot bearing. The traditional monolithic elastomeric disc of the pot bearing was replaced by layers of elastomeric pads so as to be able to vary the position of the PCGE from the bottom of the base plate to the highest possible

position in the bearing. The measurements of the corresponding output voltages were compared and showed that the best position of the PCGE was at the bottom of the base plate. Such results will help to realize optimal efficiency of the PCGE when applied to the developed bridge bearing with built-in PCGE. Further study will be devoted to develop a protocol allowing to identify correctly the vehicles using the output voltage produced at the bearing of the bridge.

Acknowledgments

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

References

- [1] J. Zhao, N.S. Goo, J.F. Choo, D.H. Ha: Design and performance evaluation of a d33-mode piezocomposite electricity generating element. submitted to J. Mechanical Science and Technology (2012)
- [2] D.H. Ha, W.S. Jang, J.F. Choo, C.H. Lee: Dynamic test of a bearing with built-in piezo-composite generating element. Proceedings of EESK Conference 2013 Vol.17 (2013), p.101-104
- [3] D.H. Ha, J.F. Choo, C.H. Lee, W.S. Jang, N.S. Goo: Dynamic Characteristics of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element. 2013 International Symposium on Mechatronics and Applied Mechanics, May 15-16, 2013, Nanjing, China (2013)
- [4] J.F. Choo, D.H. Ha, N.S. Goo, W.S. Jang : Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-In Piezoelectric Material. Advanced Science Letters, Adv. Sci. Lett. 19, 37-41 (2013)
- [5] Information on <http://www.ni.com/korea> last visited 2013.06.15.

Cyclic Loading Test of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element

Jinkyoo F. Choo^{1, a}, Dong-Ho Ha^{1, b}, Chang-Hyung Lee^{1, c},
Won-Seo Jang¹, Nam-seo Goo²

¹Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

^a jfchoo@konkuk.ac.kr, ^b hadongho@konkuk.ac.kr, ^c chang773@hotmail.com

Keywords: Bridge bearing; Piezocomposite electricity generating element (PCGE); Dynamic loading test; Traffic loading; Load measurement

Abstract. A multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) is being developed by our research team to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibrations. For the intended application, a multilayered piezoelectric PCGE structure composed of layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy, has been developed to improve the durability, output voltage and power of the piezoceramic. The output voltage of this PCGE can be used for real-time traffic monitoring like in bridge-weigh-in-motion systems and can eventually be exploited to generate the electricity needed for the lighting and functioning of other embedded sensors. This paper presents the results of the dynamic loading tests conducted on a prototype of the proposed multi-functional bridge bearing to enhance its design details and verify the accuracy of the measurement. The results show that the bearing provides reliable measurement for traffic monitoring and enable to conceive details for the improvement of the output voltage of the PCGE. Since bridge bearings, as indispensable devices transferring the loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge, are continuously subjected to traffic loads, the proposed bridge bearing appears to be a natural and economic solution that can be applied to existing or newly built bridges without modification of the conventional design while providing additional and valuable functions for the maintenance of the structure.

1. Introduction

The aging of the bridge stock in many countries together with the recent occurrence of dramatic bridge failures have raised issues related to the lifetime and durability aspects of bridge structures. Design of bridge is now targeting a lifetime of at least 100 years. Accordingly, active development and applications of structural health monitoring (SHM) systems for major bridge structures are continuously implemented as a tool to sustain such lifetime perspective in terms of safety, durability and performance not only for aging but also for newly-built structures [1]. SHM aims to determine the health of a structure by acquiring signals measured by a network of sensors that are embedded into the structure and monitored over time.

Besides, energy harvesting or energy scavenging is a process that captures small amounts of energy that would otherwise be lost such as heat, light, sound, vibration or movement to recharge a battery or power a device. The harvesting of ambient energy has become an important alternative for the paradigm of primary electricity generation strategies. Among these ambient energies, vibration, movement and sound can be captured and transformed into electrical power using piezoelectric materials. For several reasons, piezoelectric energy harvesting devices are the simplest means of scavenging ambient energy directly from structural vibrations [2,3]. Piezoelectric material can produce a voltage when a mechanical force is applied; and, conversely, mechanical deformation occurs when a voltage is applied. The former capability helps the

material to function as an energy harvesting device; the latter property helps it to function as an actuator [4,5].

The civil engineering community also recognized the potential benefit of such piezoelectric material to power wireless sensors for SHM purpose since conventional wired monitoring systems require excessive investments for the installation of wires. Therefore, the adoption of self-powered sensors represents an attractive alternative in terms of costs and maintenance efforts. Moreover, civil structures like bridges or roads being incessantly crossed by vehicles are by means subjected to ambient vibrations of which use appears to be a natural and cost-efficient solution [6]. Accordingly, a multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been conceived by our research team to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibrations. The electrical response provided by the PCGE is used for real-time traffic monitoring like in bridge-weigh-in-motion systems and can eventually be used to generate the electricity needed for the lighting and functioning of other embedded sensors.

This paper presents the design of the PCGE together with the results of the dynamic loading tests using a universal testing machine (UTM) conducted on a prototype of the proposed multi-functional bridge bearing to enhance its design details. The results show that the bearing provides reliable measurement that can be used for traffic monitoring and enable to conceive details for the improvement of the output voltage of the PCGE.

2. The proposed bridge bearing with built-in PCGE

The idea behind this study is to use such indispensable bearing in the monitoring strategy of the bridge by endowing the bearing with additional functions, with minimal additional cost, without affecting its original load bearing function and without modifying significantly the design and composition of the bearing.

On the other hand, the piezoelectric effect is used in sensing applications, such as in force or displacement sensors since a piezoelectric substance is one that produces an electric charge when a mechanical stress is applied. Piezoelectric materials can be used to transform ambient vibrations into electrical energy that can be stored and used to power other devices. With the recent surge of micro scale devices, piezoelectric power generation can provide a convenient alternative to traditional power sources used to operate certain types of sensors and actuators.

Accordingly, the concept underlying the proposed multi-functional pot bearing is to exploit the unused traffic load for generating power through the use of a piezoceramic material. Such environment-friendly energy will be useful to supply power to the monitoring system of the bridge and eventually for road lighting. The last function will also help to reduce the costs caused by the temporary closure of traffic during load control, the costs required for the personnel needed for the control task, and contribute to the extension of the lifetime of the structure.

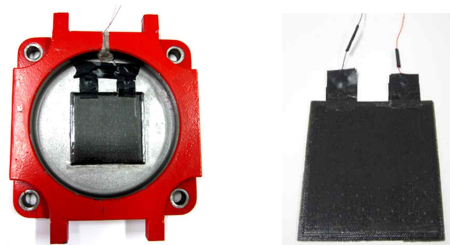


Fig. 1 PCGE inserted inside the prototype multi-functional pot bearing and fabricated PCGE

Considering the small space available within the pot bearing, a thin piezocomposite electricity generating element (PCGE) is introduced in the system (Fig. 1). This solution enables to insert

the PCGE without modifying the composition of the bearing and without need to change its design. By adopting such layout, the PCGE will preserve its properties without breakage since external loads will not apply directly on the material.

3. Design of PCGE

The piezoelectric effect was discovered by J. and P. Curie in 1880. They found that if certain crystals were subjected to mechanical strain, they became electrically polarized and the degree of polarization was proportional to the applied strain. Conversely, these materials deform when exposed to an electric field. Piezoceramic known as lead zirconate titanate (PZT) is widely used as a power harvesting material or in actuators owing to its remarkable electromechanical properties. However, PZT is brittle and susceptible to fracture when a mechanical strain is applied [3,7].

For our purpose, the elimination of such brittleness of PZT and the improvement of its piezoceramic efficiency are crucial. Therefore, a multilayered piezoelectric PCGE structure with six layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy has been designed to enhance the durability of the PZT and increase its resistance to compressive mechanical strains (Fig. 2). The PCGE generator has been designed to enable the generating layer to be kept apart from the flexural neutral surface of the generator so as to yield larger output voltage and power [5].

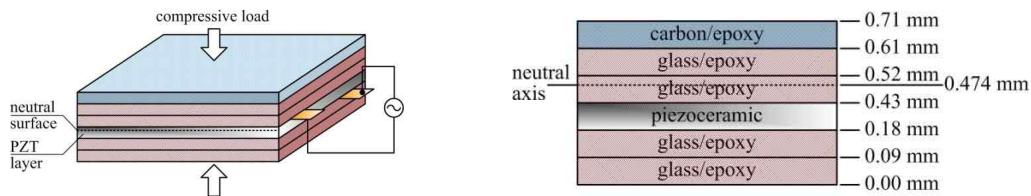


Fig. 2 d_{33} -mode PGCE and layup configuration of PCGE-F [16]

Zhao et al. (2012) conducted impact tests on this PCGE to evaluate its electricity generation performance from compressive forces [5]. From the test results, the authors found that the outer epoxy-based composite protected the inner brittle PZT and ensured that the PCGE generated voltage without breakage. The selected layup configuration was seen to produce the highest residual stress and output voltage. Owing to its performances, this layup configuration was chosen for the multi-functional bridge bearing.

4. Dynamic tests

Preliminary impact tests were already performed on the PCGE to verify the possibility in exploiting the output voltage for measuring the applied load [8]. The impact tests were conducted by dropping a mass from different heights so as to let it slide along a linear guide and hit the PCGE. However, the results showed lack of consistency to verify effectively the applicability of the PCGE for the measurement of traffic load. In addition, the results also revealed that a certain loss of the output voltage occurred when the PCGE was subjected to a confining compressive prestress as would be in the bearing and that this loss increased with larger prestress. Therefore, a small-scaled prototype of the proposed multi-functional bridge bearing (Fig. 1) was fabricated together with a PCGE with appropriate size to conduct dynamic tests simulating real conditions of the bearing subjected to harmonic loading from traffic and verify thoroughly the feasibility of the proposed system.

4.1 Test setup

A small-scaled pot bearing was fabricated for the test. This bearing presents the specifications corresponding to the smallest commercially available pot bearing. The pot bearing has a load bearing capacity of 500 kN with height of 70 mm and inner diameter of the piston of 120 mm. In

order to fit with the bearing a PGCE with dimensions of 76×76 mm was fabricated (Fig. 1) and inserted and fixed inside the bearing between the elastomeric pad and the top of the bottom plate of the bearing.

For the measurement, the PCGE was connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure respectively the output voltage and applied loads during the tests. Load was applied using a universal testing machine (UTM) with capacity of 500 kN as shown in Fig. 3.



Fig. 3 Dynamic test of the bearing using a UTM

To simulate the real conditions in which the bearing would be exposed, permanent loads of 0 kN, 200 kN were applied to consider different weights of the. Table 1 arranges the different cases considered in the tests. The permanent load of 0 kN was selected to observe the performance of the PCGE itself. Note that the traffic load is generally modeled in terms of the wheel loads represented as a series of concentrated load with definite spacing. Thus, the frequencies of the harmonic load correspond approximately to vehicle speeds of 18 km/h for 0.5 Hz, 36 km/h for 1.0 Hz, and 108 km/h for 3.0 Hz considering a spacing of about 10 m between the vehicles.

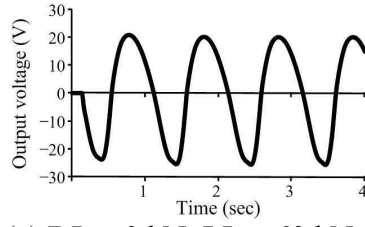
Table 1. Load cases adopted for the dynamic loading tests

Permanent load (DL)	Live load (LL)	Loading frequency
0 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN	0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz
200 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN	0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz

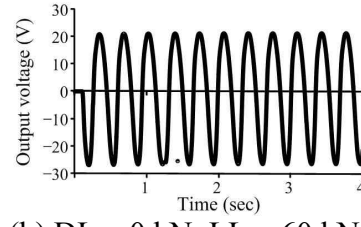
4.2 Test results and discussion

Fig. 4 plots the time histories of the output voltage under the application of several load cases of Table 1. Figs. 4(a) and 4(b) show the time histories of the output voltage for the case without permanent load and with a live load of 60 kN applied at frequency of 1.0 Hz and 3.0 Hz, respectively. The graphs exhibit a shape corresponding to the harmonic loading with maximum output voltage of approximately 28 V. However, as mentioned above, the case without permanent load does not represent the actual conditions in which the pot bearing will be exposed even if the values obtained for the maximum output voltage are promising.

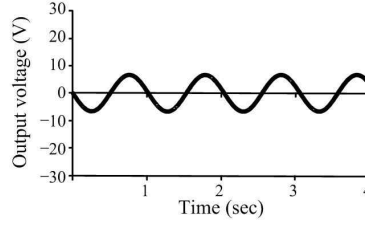
Figs. 4(e) and 4(f) plot the time histories of the output voltage for the case with a permanent load of 200 kN and with the live load of 60 kN applied at frequency of 1.0 Hz and 3.0 Hz, respectively. It can be seen that both cases give identical results regardless of the size of the permanent load. However, the application of the permanent load is seen to decrease sensitively the output voltage generated by the embedded PCGE to a value slightly smaller than 10 V. This can be explained by the constraint applied by the permanent load which prevents the PCGE to vibrate freely and, by the way, to generate its maximum power. These results show exact and clear correspondence between the output voltage and dynamic loading regardless of the vibrational frequency. The developed bearing can thus be applied to measure dynamic loads of bridges as well as to measure vibrational excitations in various industrial purposes.



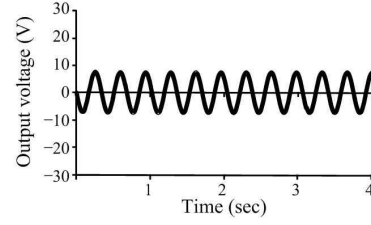
(a) DL = 0 kN, LL = 60 kN, 1.0 Hz



(b) DL = 0 kN, LL = 60 kN, 3.0 Hz



(c) DL = 200 kN, LL = 60 kN, 1.0 Hz

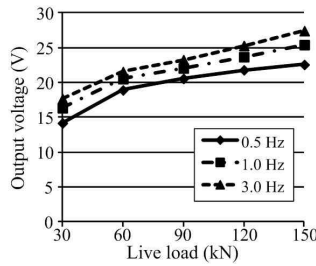


(d) DL = 200 kN, LL = 60 kN, 3.0 Hz

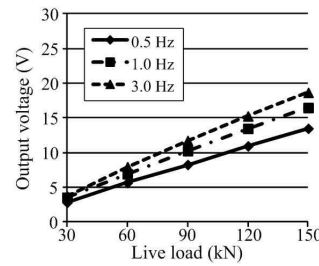
Fig. 4 Time histories of output voltage generated by PCGE under harmonic loading

Fig. 5 plots the results of the dynamic tests applying the different load combination cases listed in Table 1. Fig. 5(a) compares the maximum output voltage measured for the cases without permanent load and live loads of 30 to 150 kN applied at frequencies of 0.5 Hz, 1.0 Hz and 3.0 Hz. The broken lines obtained for each loading frequency can be attributed to the residual deformation of the pot bearing caused by the absence of permanent load. In fact, this case is not representative of the actual condition of the bearing since, as mentioned above, the bearing is always compressed by the load of the superstructure. Nevertheless, even under such condition, the output voltage generated by the PCGE inserted in the bearing is seen to increase with larger applied loading. It can be also observed that the output voltage increases slightly with higher loading frequency.

Figs. 5(b) plots the maximum output voltage measured for the cases with live loads of 30 to 150 kN applied at frequencies of 0.5 Hz, 1.0 Hz and 3.0 Hz and permanent loads of 200 kN.



(a) Permanent load of 0 kN



(b) Permanent load of 200 kN

Fig. 5 Load-voltage relation according to the loading frequency and permanent load

This last observation can be explained as follows. Conventional vibration-based energy harvesters are developed as a linear resonant system subjected to harmonic vibrations. The harmonic loading applied on the PCGE without permanent load approached the resonant frequency of the PCGE, which was at first conceived without knowledge of the permanent load. On the other hand, the application of the permanent load on the bearing shifted the resonant frequency of the PCGE leading to the loss of power generation. Accordingly, further study will be implemented to consider the operating bandwidth of the PCGE subjected to permanent compressive load so as to improve its electricity generating efficiency.

5. Conclusions

Since bridge bearings, as indispensable devices transferring the loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge, are continuously subjected to traffic loads,

a multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been proposed to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibration. For the intended application, a multilayered piezoelectric PCGE structure composed of layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy, has been developed to improve the durability, output voltage and power of the piezoceramic. A prototype of the proposed bearing was fabricated and subjected to a series of dynamic loading test. The dynamic loading test was scheduled to simulate as possible the conditions in which the bearing would be exposed when installed in real bridge. The test results showed that the PCGE inserted in the bearing generated voltage linearly proportional to the applied load and could thus provide reliable measurement for traffic monitoring. These results show that developed bearing can be applied precise measurement of dynamic loads in various industrial purposes. In addition, the test results enabled to derive new solutions to improve the electricity generating performance of the proposed multi-functional bridge bearing. The proposed bridge bearing appears to be a natural and economic solution that can be applied to existing or newly built bridges without modification of the conventional design while providing additional and valuable functions for the maintenance of the structure.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

REFERENCES

- [1] Koh, H.M., Lee, H.S., Kim, S. and Choo, J.F., “Monitoring of bridges in Korea”, Encyclopedia of Structural Health Monitoring, doi: 10.1002/9780470061626.shm163, Wiley, 2009.
- [2] Cook-Chennault, K.A., Thambi, N. and Sastry, A.M., “Topical review: Powering MEMS portable devices – a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems”, Smart Mater. Struct. 17:043001, 2008
- [3] Sodano, S.A., Inman, D.J. and Park, G., “Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries”, J. Intelligent Material Systems and Structures 16(1):799–807, 2005.
- [4] Tri Tien, C.M. and Goo, N.S., “Use of a piezocomposite generating element in energy harvesting”, J. Intelligent Material Systems and Structures 21:1427–1436, 2010.
- [5] Zhao, J., Goo, N.S., Choo, J.F. and Ha, D.H., “Design and performance evaluation of a d33-mode piezocomposite electricity generating element”, submitted to J. Mechanical Science and Technology, 2012
- [6] Ha, D.H., Choo, J.F., Kim, D. and Goo, N.S., “Feasibility of a multi-functional bridge bearing with built-in piezoelectric material”, Advances in Information Sciences and Service Sciences, 4(11.17):142–150, doi: 10.4156/AISS.vol4.issue11.17, 2012.
- [7] Jiang, L.Z. and Sun, C.T., “Analysis of indentation cracking in piezoceramics”, International Journal of Solids and Structures, 38:1903–1918, 2001.
- [8] Choo, J.F., Ha, D.H., Goo, N.S. and Jang, W.S., “Preliminary test for a multi-functional bridge bearing with built-in piezoelectric material”, Advanced Science Letters, 19(1):37-41, 2013.



Copyright © 2011 American Scientific Publishers
All rights reserved
Printed in the United States of America

Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezoelectric Material

Jinkyoo F. Choo¹, Dong-Ho Ha¹, Nam Seo Goo², Won Seo Jang¹

¹Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

Bridge bearings are indispensable devices transferring loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bearings are thus continuously subjected to loads of the vehicles crossing the superstructure and the weight of the superstructure. An innovative and multi-functional bearing is being developed to respond to the increasing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the vibration-based mechanical energy produced by the traffic load. This paper presents the results of preliminary tests on a piezoelectric (PZT) material element that will be built-in a conventional bridge pot bearing. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the embedded sensing and lighting systems but can also be used to perform real-time monitoring of the traffic by adopting built-in load measuring function like in bridge-weigh-in-motion systems. The results of the preliminary tests focus on the feasibility of the adopted PZT material in measuring accurately the traffic loads applied on the bridge and in harvesting the energy produced by the applied wheel loads.

Keywords: Bridge Bearing, Piezoelectric Material, Energy Harvesting, Traffic Monitoring.

1. INTRODUCTION

Vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in the surroundings¹. Energy harvesting technology, which converts commonly unused ambient energy into useable electrical energy, may be exploited to power devices that in many cases rely heavily on batteries. Energy harvesting is becoming an attractive source of power for a variety of devices, especially where the environmental and economic costs of maintaining batteries are unaffordable. The methods used for the transduction of these energy sources into useable electrical energy include photovoltaic, thermoelectric, electromagnetic and piezoelectric materials. Among them, research on energy harvesting using piezoelectric (PZT) material has recently recognized rapid evolution. Through the piezoelectric effect, the PZT material converts mechanical strain into electrical voltage.

The PZT effect can be implemented to harvest mechanical energy from vibration or compression of a PZT block^{2,3}.

The civil engineering community recognized also the potential benefit of such devices to supply continuously electrical power to wireless sensors installed to monitor the displacement and acceleration of bridge structures. Conventional wired monitoring systems require excessive investments not only for the installation of wires but also for the periodical replacement of batteries. Therefore, the adoption of such self-powered devices represents an attractive alternative in terms of costs and maintenance efforts. Moreover, civil structures like bridges or roads being incessantly crossed by vehicles are by means subjected to ambient vibrations of which use appears to be a natural and cost-efficient solution².

This paper presents preliminary tests performed to achieve a multi-functional bridge bearing in which a PZT material, lead zirconate titanate, is built-in. The bearing is

*Email Address: jfchoo@konkuk.ac.kr

conceived by introducing adequately a PZT element within a conventional steel pot bearing. This PZT element not only supplies the electrical power required for the operation of the sensors but can also be used to perform real-time control of the passage of overloaded trucks by adopting built-in load measuring function. Innovattech⁴, an Israeli company, already proposed and applied successfully a PZT device embedded in asphalt road pavement to harvest the vibration energy produced by traffic. However, since this device is installed in the pavement, its durability may be degraded due to direct exposition to traffic load and it needs to be reinstalled in case of the repair or replacement of the paving material. Besides, the proposed multi-functional bridge bearing is by means a natural component of the bridge that is indirectly subjected to traffic load and thus less vulnerable to environmental degradation. In addition, apart from its energy harvesting function, the proposed bearing also offers traffic load function that will help the maintenance of the bridge.

The authors already demonstrated the feasibility of the proposed bridge bearing in terms of its cost-effectiveness through an application to an example bridge². In this paper, preliminary test results are presented and focus on the potential of the proposed bridge bearing in measuring accurately the traffic loads applied on the bridge and in harvesting the energy produced by the applied wheel loads.

2. ENERGY HARVESTING AND PIEZOELECTRICITY

Abundant literature^{1,3,5-8} has been dedicated on the topics of piezoelectricity and energy harvesting. Brief definitions and descriptions are given here.

Energy harvesting is the process by which energy is derived from external sources like solar power, thermal energy, wind energy, and kinetic energy, captured, and stored for small, wireless devices. The goal of an energy harvesting device is to capture the usually wasted energy surrounding a system and convert it into usable energy for the electrical device to consume. By utilizing these unused energy sources, electronics that do not depend on power supplies, such as battery, can be developed. Typically lost energy is the ambient vibrations generated around machines and civil structures. This source of energy is ideal for the use of PZT materials, which have the ability to convert mechanical strain energy into electrical energy⁵.

Piezoelectricity is the charge which accumulates in certain solid materials like crystals and certain ceramics in response to applied mechanical stress. Piezoelectricity has been discovered in the 19th century as an unusual characteristic of certain crystals, which became electrically polarized when subjected to a mechanical force. Tension and compression generated voltages of opposite polarity proportionally to the applied force. This behavior was labeled the piezoelectric effect. The piezoelectric effect is used in sensing applications, such as in force or displacement sensors. Accordingly, a piezoelectric substance is one that produces an electric charge when a

mechanical stress is applied. Concretely, mechanical compression or tension on a poled piezoelectric ceramic element changes the dipole moment, creating a voltage. Piezoelectric materials can be used to transform ambient vibrations into electrical energy that can be stored and used to power other devices. With the recent surge of micro scale devices, piezoelectric power generation can provide a convenient alternative to traditional power sources used to operate certain types of sensors and actuators⁶.

3. CONCEPT AND DESCRIPTION OF THE PROPOSED BRIDGE BEARING WITH BUILT-IN PZT MATERIAL

A bridge structure can be divided into two main parts: the superstructure, which supports its own weight and the traffic load, and the substructure, which sustains the load from the superstructure. The transmission media is the bearing, which transfers loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bridge bearings movements are accommodated by the basic mechanisms of internal deformation, sliding, or rolling. Bearings are arranged to allow the deck to expand and contract, but retain the deck in its correct position on the substructure. These bearings are thus continuously sustaining the loads of the vehicles crossing the superstructure as well as the weight of the superstructure.

The concept underlying the proposed multi-functional bearing is to exploit the unused traffic load for generating power through the use of PZT (Figure 1). Such environment-friendly energy will be useful to supply power to the monitoring system of the bridge and road lighting. This monitoring system involves the measurement of the traffic load applied to the bridge by means of the electrical energy generated by the PZT, the measurement of eventual unbalanced forces between the bearings during the construction of the bridge, and the detection of overloaded trucks exceeding the design load, which may affect the structural health of the bridge. The last function will also help to reduce the costs caused by the temporary closure of traffic during load control, the costs required for the personnel needed for the control task, and contribute to the extension of the lifetime of the structure^{2,9,10}.

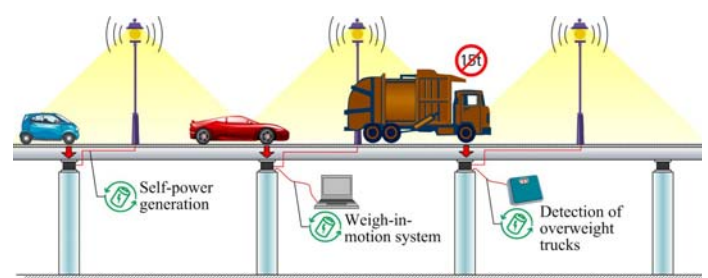


Fig. 1. Functions of the proposed bridge bearing^{2,10}

Figure 2 illustrates the composition of the proposed multi-functional bridge bearing using PZT. Pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, which presses the top of the

PTFE. The PTFE functions like a viscous fluid inside a hydraulic jack and the top steel plate behaves like the piston. Inside the pot, the deformation of the PTFE is completely restricted. Pot bearings are designed to carry combinations of vertical loads, horizontal loads, longitudinal and transversal movements, and rotations. This type of bearing can carry very high loads of over 50,000 kN. The PZT is inserted between the piston and PTFE plate to harvest energy and measure the applied loading. Apart from the PZT module, the generation of energy using PZT requires a series of equipment including electrical insulation, electrodes, inverter, and joint box. The joint box is itself connected to the inverter to transform the current from DC to AC. The inverter is currently under development by our research team. In addition, the monitoring system monitors continuously the presence of eventual anomalies, performs diagnosis and reports any possible defect^{2,10}.

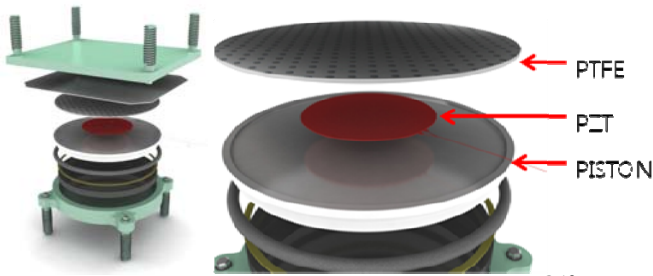


Fig. 2. Proposed pot bearing using PZT^{2,10}

3. PRELIMINARY TESTS ON THE PIEZOELECTRIC MATERIAL

A high performance piezocomposite generating element (PCGE) is selected as material to be introduced in the bridge bearing. Since lead zirconate titanate (PZT) is known to be a brittle and fragile material under the application of mechanical strain⁶, multilayered PCGE composed of layers of carbon/epoxy, piezoelectric lead zirconate titanate (PZT) ceramic, and glass/epoxy cured at high temperature (Figure 3) has been developed to overcome the brittleness of the material and provide larger output voltage and power¹¹.

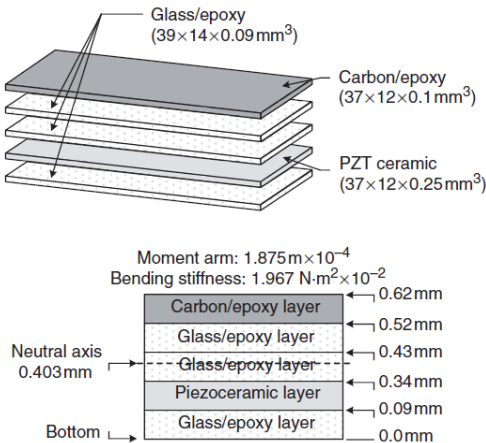


Fig. 3. Example of PCGE¹¹

A previous study¹¹ revealed that the proposed PCGE exhibits potential to be used as generator for harvesting energy from the ambient energy environment. Moreover, the structure chosen for the PCGE enables to overcome the brittle properties of the piezoceramic owing to its proper layup combination.

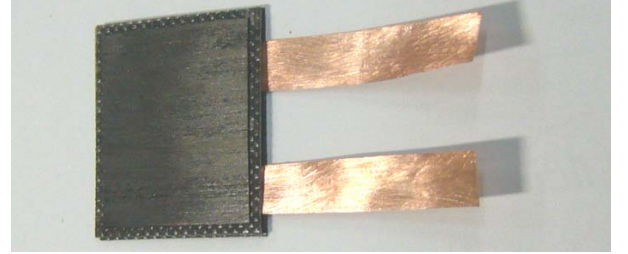


Fig. 4. Manufactured PCGE

Figure 4 illustrates a PCGE manufactured for the test. Figure 5 shows a small-scale pot bearing in which the PCGE will be introduced.



Fig. 5. Reduced-scale pot bearing prototype

The test intends to verify if the PCGE inserted inside the pot bearing will be able to provide accurate information of the load applied to the bearing through its output voltage. Figure 6 presents the corresponding test setup. A vertical jig is installed so as to let a steel mass slide along the rail attached to the jig. The mass is dropped from various heights to simulate diverse loads that will hit the PCGE tightly fastened between two rubber layers as in the pot bearing. Considering that the pot bearing will sustain continuously the weight of the superstructure and will be excited mainly by the wheels of the vehicles running on the superstructure, this setup appears to sufficiently reproduce the conditions in which the PCGE will be exposed.



Fig. 6. Test setup for verification of the load measurement capacity of the proposed built-in system

The PCGE is connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure the output voltage and applied loads when the mass hit the PCGE.

Furthermore, the manufactured PCGE samples have limited areas (24×24 mm). However, PCGE will cover the whole effective area of the pot bearing (ϕ 10 cm) in the future bridge bearing prototype. Accordingly, the test will also consider parallel connection of several PCGE since larger area of the piezoceramic will provide larger electricity generating performance. Therefore, tests were conducted first on a single PCGE and, then, on two PCGEs connected in parallel. The corresponding results are plotted in Figures 7 and 8.

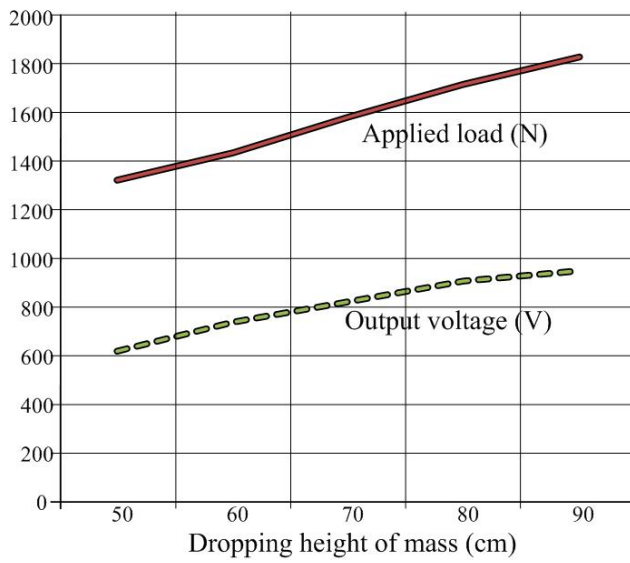


Fig. 7. Relation between applied load and output voltage of single PCGE according to release height of mass (176 g)

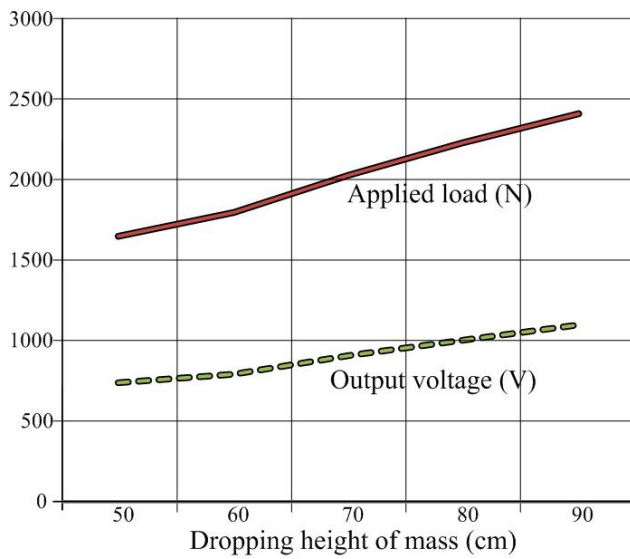


Fig. 8. Relation between applied load and output voltage of two PCGEs in parallel according to release height of mass (390 g)

The test results plotted in Figures 7 and 8 show that a clear relation between the applied load and output voltage of the PCGE can be derived. It can also be observed that the parallel connection of two PCGEs will enable to generate larger output voltage. Considering that wheel loads reach approximately 50 kN, the output voltage will exhibit larger values than those obtained for the small masses (179 g and 390 g) adopted in the tests. These results indicate the potential feasibility of the PCGE in measuring the traffic loads for monitoring purpose and in generating electricity for energy harvesting.

Besides, as the passage of overweight trucks, whether legal or illegal, causes premature fatigue of the bridge pavement and structure, it is necessary to estimate the weight of the trucks crossing the bridge in order to evaluate the safety of the bridge, calculate its residual service life, and draw corresponding maintenance strategies¹². Bridge-weigh-in-motion (BWIM) is widely applied today to measure the weight of vehicles. This system uses a bridge as a weigh-platform, and the parameters of heavy traffic are measured in order to obtain informative data. The conventional WIM comprises a number of basic components of which the mass sensor is the most important. The mass sensor embedded in the surface of the pavement produces a signal whose value depends on the instantaneous dynamic wheel mass of a moving vehicle. Detailed information on BWIM can be found in the works of Quilligan et al.¹³ and Deesomsuk et al.¹⁴.

Compared to conventional vehicle weight estimating systems, the advantage of the proposed bridge bearing is its installation without the necessity of additional works and without damage to the pavement; this occurs because it is a natural component of the bridge. The proposed bearing makes it possible to realize accurate measurement of the vehicle's weight through the reaction at the bearing⁹.

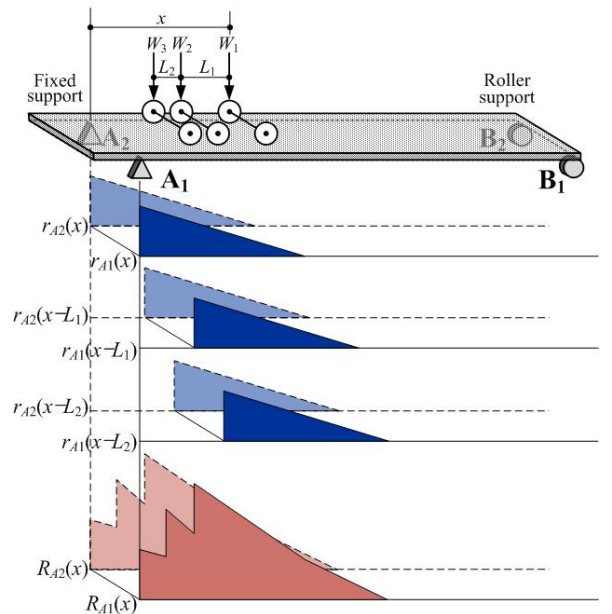


Fig. 9. BWIM concept using the reaction force of the proposed bearing²

Figure 9 depicts the BWIM system concept using the proposed bearing. In Figure 5, w_n is the weight of the n^{th} wheel of the truck, x denotes the position of the wheel load on the bridge deck with respect to the bearing, $r_{Ai}(x)$ is the influence line of the reaction force according to the position, x , of the wheel load, and $R_{Ai}(x)$ is the reaction force at bearing A_i . The relationships between these variables are given in Equations 1 and 2.

The reaction force developed in each bearing can be computed using the wheel loads and corresponding influence lines for the reaction force, as expressed in Equation (1). The resulting reaction force at each support is then computed by summing the reaction forces of each bearing arranged in the support, as expressed in Equation (2).

$$\begin{aligned} R_{A_1}(x) &= W_1 r_{A_1}(x - s_1) + W_2 r_{A_1}(x - s_2) + W_3 r_{A_1}(x - s_3) \\ R_{A_2}(x) &= W_1 r_{A_2}(x - s_1) + W_2 r_{A_2}(x - s_2) + W_3 r_{A_2}(x - s_3) \end{aligned} \quad (1)$$

$$R_A(x) = R_{A_1}(x) + R_{A_2}(x) \quad (2)$$

Using such relations, the load applied on the supports can be easily computed by converting the electric signal of the built-in PZT. In the near future, prototypes of the proposed bearing will be fabricated, and tests will be conducted to verify the feasibility of the conversion of the signals produced by the bearings into loads.

5. CONCLUSIONS

Bridge bearings are indispensable devices transferring loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge. Bearings are thus continuously subjected to loads of the vehicles crossing the superstructure and the weight of the superstructure. Besides ambient vibration energy is naturally present in many environments, but commonly goes unused, vibration-based mechanical energy is the most ubiquitous and accessible energy source in our surroundings. Therefore, an innovative and multi-functional bearing is being developed to respond to the increasing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the vibration-based mechanical energy produced by the traffic load.

A high performance piezocomposite generating element (PCGE) is selected as material to be introduced in the bridge bearing. Previous studies reveal that the adopted PCGE exhibits potential to be used as generator for harvesting energy from the ambient energy environment. Moreover, the structure chosen for the PCGE enables to overcome the brittle properties of the piezoceramic owing to its proper layout combination.

Test intending to verify if the PCGE inserted inside the pot bearing will be able to provide accurate information of the load applied to the bearing through its output voltage were conducted. The corresponding results indicate that a clear relation between the applied load and output voltage of the PCGE can be derived and the potential feasibility of the PCGE in measuring the traffic

loads for monitoring purpose and in generating electricity for energy harvesting. Further tests will be carried out on a prototype pot bearing with built-in PCGE together with the development of adequate inverter in order to verify the applicability of the proposed multi-functional bridge bearing.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

REFERENCES

- [1] C Sun, J Shi, X Wang. Fundamental study of mechanical energy harvesting using piezoelectric nanostructures. *Journal of Applied Physics*, 108, 034309, DOI:10.1063/1.3462468 (2010)
- [2] DH Ha, JF Choo, D Kim, NS Goo. Feasibility of a multi-functional bridge bearing with built-in piezoelectric material. *Advances in Information Sciences and Service Sciences* (ISSN: 1976-3700). Accepted (2012)
- [3] CA Howells. Piezoelectric energy harvesting. *Energy Conversion and Management*, 50 (2009) 1847-1850
- [4] Website of Innowattech: <http://www.innowattech.co.il>
- [5] SR Anton, HA Sodano. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). *Smart Materials and Structures*, 16(3) DOI:10.1088/0964-1726/16/3/R01 (2007)
- [6] HA Sodano, DJ Inman, G. Park. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10) (2005) 799-807
- [7] HS Kim, JH Kim, J Kim. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), DOI: 10.1007/s12541-011-0151-3 (2011) 1129-1141
- [8] S Saadon, O Sidek. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters. *Energy Conversion and Management*, 52 (2011) 500-504
- [9] D Kim. Vehicle weight estimation using a bridge bearing with embedded piezoelectric material. Master Thesis, Dept. of Civil Engineering, Graduate School of Konkuk University (in Korean), (2012)
- [10] DH Ha, D Kim, JF Choo, NS Goo. Energy harvesting and monitoring using bridge bearing with built-in piezoelectric material. *Proceedings of AICIT Conference on Networked Computing (INC 2011)* (2011) 13-22
- [11] CM Tri Tien, NS Goo. Use of a piezocomposite generating element in energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21 (2010) 1427-1436
- [12] SH Straus, J Semmens. Estimating the cost of overweight vehicle travel on Arizona highways, Final Report 528, Arizona Department of Transportation, USA (2006)
- [13] M. Quilligan. Bridge weigh-in-motion: Development of a 2-D multi-vehicle algorithm, Licentiate Thesis, Dept. of Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridge Division, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, TRITA-BKN, Bulletin 69 (2003)
- [14] T Deesomsuk, T Pinkaew. Effectiveness of vehicle weight estimation from bridge weigh-in-motion. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2009, DOI:10.1155/2009/312034 (2009)

Development of d_{33} -mode piezocomposite generating element

Jun Zhao, Zhefeng Xuan, and Nam Seo Goo

Smart Microsystem Research Laboratory, Department of Advanced Technology Fusion,
Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu 143-701, Seoul, Korea

ABSTRACT

Recently, piezocomposite generating elements (PCGEs) have been proposed for improving the electricity generation performance of piezoceramic wafers. The residual stress in the PZT layer after curing is one of the main reasons for PCGE's enhanced performance, and the outer epoxy-based composites protect the brittle PZT layer. In this work, we propose a d_{33} -mode PCGE that can be used for energy harvesting. The piezoelectric coefficient d_{33} of the generating element was used as a measure of the electricity generating performance. We fabricated several PCGEs and conducted energy harvesting experiments to verify the concept of the d_{33} -mode coefficient of generating element.

Keywords: PCGE; PZT; d_{33} -mode; ceramic; coefficient of generating element

1. INTRODUCTION

Energy harvesting has become an urgent need owing to the exhaustion of natural resources, which will be a serious problem in the future. Many researchers are working on the development of new energy sources with improved energy efficiency. Wind energy, solar energy, and hydro energy have been used instead of fossil fuels to generate electric energy. Further, efforts have been devoted to the development of small-scale energy harvesters using piezoelectric materials. Piezoelectric materials generate electrical energy from mechanical energy.

Piezoelectric materials have been widely used as energy harvesters for many years. Piezoceramic materials convert mechanical energy into electrical energy when subjected to a mechanical force. Many researchers are focusing on how to improve the electricity generating performance of devices using piezoelectric materials. Several systems have been fabricated using piezoceramic materials, such as the piezoelectric micro-electro mechanical system [1], Cymbal transducer [2], and piezocomposite generating element (PCGE) [3].

In this work, we propose a d_{33} -mode PCGE that can be used for energy harvesting. Residual stresses remain in the PZT layer of PCGEs after the curing process. The concept of effective piezoelectric coefficient d_{33}^{eff} proposed by Ochoa et al. [4] was adopted to analyze the improvement in the electricity generation performance due to residual stresses in the PCGE. We designed various PCGEs and used ANSYSTM to analyze the stress distribution in the PCGE after the curing process. A dropping test system was used to measure the output voltage of the fabricated PCGEs.

2. DESIGN OF DROPPING TEST SYSTEM

2.1 Piezoelectric generating element

Piezoceramic lead zirconate titanate (PZT) is widely used as an energy harvesting material. However, PZT has a well-known shortcoming that it is extremely brittle [5]. In order to overcome this shortcoming and improve the piezoceramic efficiency, a multilayered piezoelectric PCGE was recently proposed [3], wherein a d_{31} -mode PCGE with improved piezoceramic efficiency was manufactured. The PCGE consisted of four layers of a piezoceramic material, glass/epoxy composite, and carbon/epoxy composite. Usually, voltage is produced from a d_{33} -mode PZT generator by introducing a deformation in the generator. Figure 1 shows the electricity generating mechanism of PCGE with a multilayered plate structure.

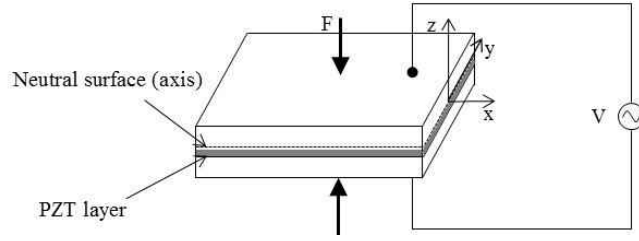


Figure 1. Laminated plate with PZT layer

Ochoa et al. [4] calculated the effective piezoelectric coefficient d_{33}^{eff} of a Cymbal transducer, which is affected by the radius and thickness of the top/bottom endcap, height of the cavity, and thickness of the ceramic disk. In other words, the effective piezoelectric coefficient depends on the in-plane stress. Equation (1) describes the relationship between the effective piezoelectric coefficient d_{33}^{eff} and d_{33} , d_{31} :

$$d_{33}^{eff} = d_{33} + B \cdot |d_{31}|, \quad (1)$$

where d_{33}^{eff} is the effective piezoelectric coefficient; B is the amplification factor, which depends on the in-plane stress; d_{33} is the piezoelectric coefficient in the z-direction; and d_{31} is the piezoelectric coefficient in the x-direction. Equation (2) describes the relationship between the output voltage, vertical force, and the piezoelectric and dielectric coefficients:

$$V = g_{33} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \frac{P}{A} \cdot t, \quad (2)$$

where V is the output voltage, g_{33} is the voltage coefficient, σ is stress in the z-direction, ϵ_{33}^T is the dielectric coefficient, P is the vertical force, A is the plate area, and t is the thickness of the PZT layer. If the vertical force, plate area, and thickness of the PZT layer are constant, the output voltage will depend on the effective piezoelectric coefficient and the dielectric coefficient. Furthermore, the effective piezoelectric coefficient depends on the in-plane stress. Therefore, we manufactured three types of PCGEs and observed the relationship between their residual stress and output voltage. Table 1 shows the basic properties of each layer. The dimensions of the PCGEs are $36 \times 24 \text{ mm}^2$, and the thicknesses of the glass/epoxy, carbon/epoxy, and PZT ceramic layers are 0.09 mm, 0.1 mm, and 0.25 mm, respectively. Figure 2 shows the lay-up configurations of three PCGEs.

Table 1. Basic properties of constituent materials

Properties		PZT ^a 3203 HD CTS Corp.	Carbon/Epoxy ^b USN 123 SK Co.	Glass/Epoxy ^b GEP 108 SK Co.
Modulus	E_1 (GPa)	70	231.2	21.7
	E_2 (GPa)	70	7.2	21.7
	G_{12} (GPa)	27.46	4.3	3.99
Poisson's ratio	ν_{12}	0.31	0.29	0.13
Strain coefficient	d_{31} ($10^{-12} \text{ m V}^{-1}$)	-320	—	—
	d_{33} ($10^{-12} \text{ m V}^{-1}$)	650	—	—
Dielectric coefficient	ϵ_{33}^T (10^{-9} F m^{-1})	33.6	—	—
Voltage coefficient	g_{31} ($10^{-3} \text{ V m N}^{-1}$)	-9.5	—	—
CTE	α_1 (10^{-6} K^{-1})	3.5	-1.58	14.2
	α_2 (10^{-6} K^{-1})	3.5	32.2	14.2
Density	ρ (kg m^{-3})	7800	1510	1910
Thickness	t (mm)	0.25	0.10	0.09
	E_1 (GPa)	70	231.2	21.7

^a Material properties from data sheet of CTS piezoelectric products [6, 7].

^b Material properties from [8].

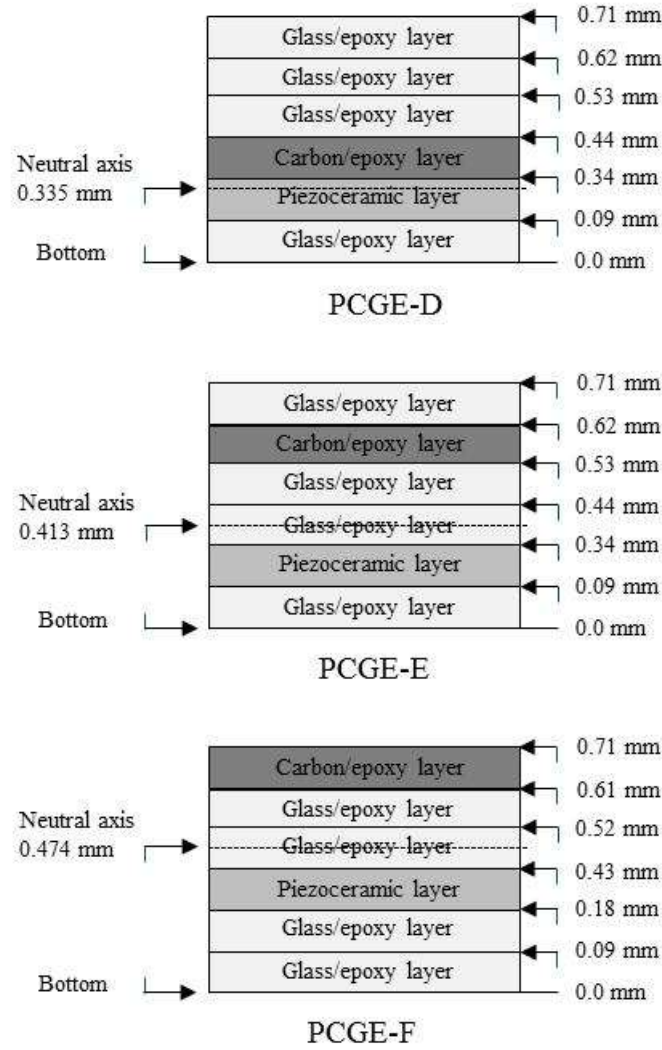


Figure 2. Lay-up configurations of three PCGEs

2.2 Fabrication of PCGEs

We considered three types of lay-up structures, as shown in figure 2, to determine the most appropriate design. The fabrication of the PCGEs was followed by the lay-up designs. A glass/epoxy fabric was placed as the bottom layer on a flat base plate, and the other materials were stacked according to the lay-up designs. Two copper electrodes were attached to the ceramic wafer surface: one on top and the other at the bottom. The stacked layers were then vacuum-bagged and cured at an elevated temperature of 177°C in an autoclave.

2.3 Thermal residual stress

In the curing process, first the temperature was increased from room temperature (25°C) to 177°C over 1 h and kept at 177°C for 2 h. Then, it was decreased to room temperature. Thermal residual stress was generated internally through the thickness of the PCGE owing to the difference in the coefficients of thermal expansion of the respective layers. In order to obtain different residual stresses, we designed three types of PCGEs.

The commercial finite element software ANSYS™ was used to analyze the stress distribution in the PCGE. SOLID45 elements were used in a 3D finite element model. We also used 2400 (40 × 60) finite elements in the plane direction; four elements for the PZT layer and two elements each for the carbon/epoxy layer and the glass/epoxy layer were used in the thickness direction. The total number of finite elements was 33,600. Figure 3 shows the residual stress distribution in

the PCGE in the x- and y-directions. We can see that for all the three structures, the PZT ceramic is in compression through the entire thickness after the curing process.

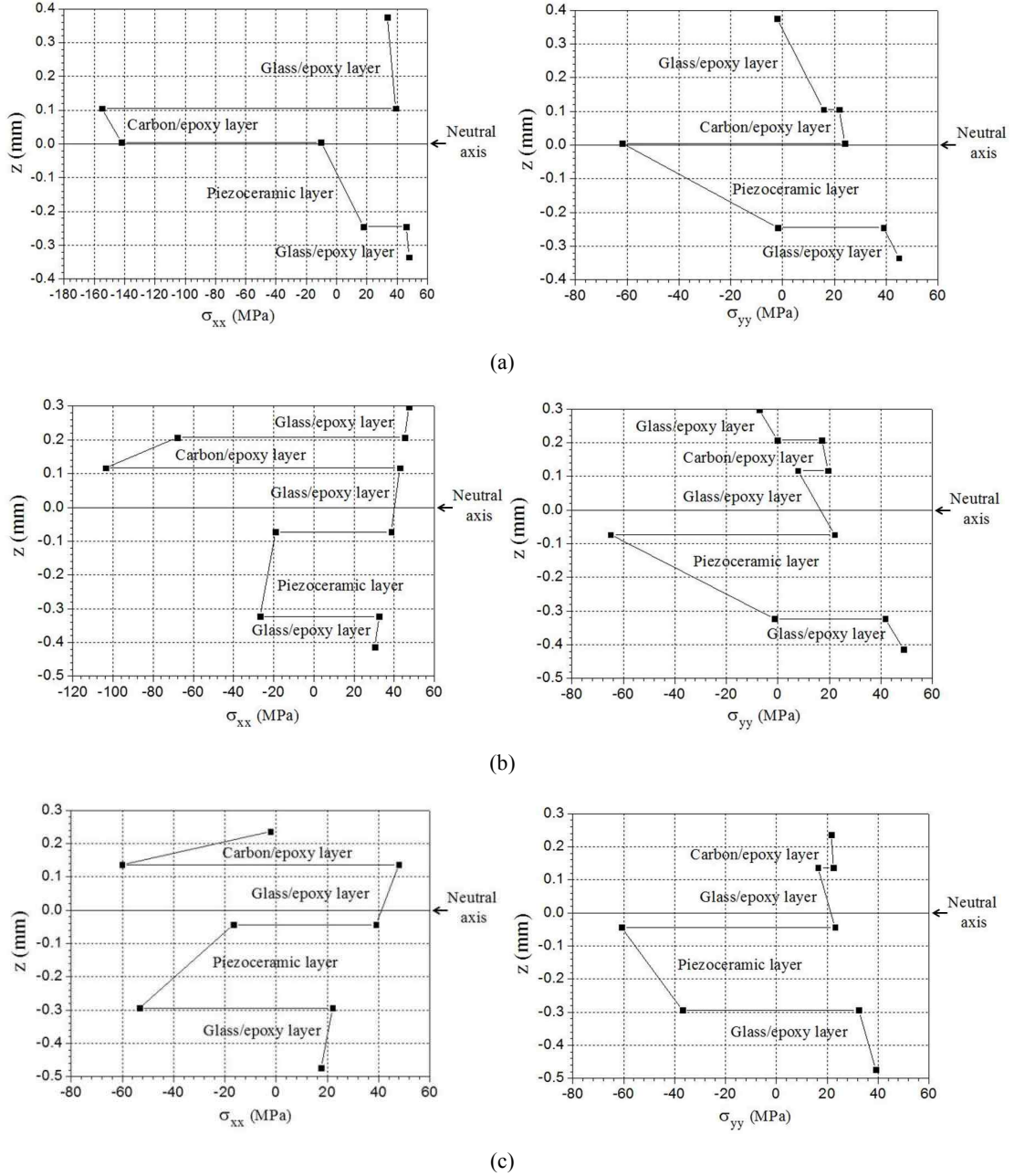


Figure 3. Stress distribution in (a) PCGE-D, (b) PCGE-E, (c) PCGE-F

2.4 Effect of residual stress on piezoelectric and dielectric coefficients

The piezoelectric and dielectric coefficients depend on the in-plane stress [9, 10]. Krueger [10] described the relationship between d_{31} , d_{32} , and compressive stress as follows: if the compressive stress in the x-direction increases, the piezoelectric coefficient d_{31} decreases. However, if the compressive stress in the y-direction increases, the piezoelectric coefficient d_{32} increases. After the curing process, d_{31} and d_{32} changed because of the residual stress. Owing to the residual stress generated after the curing process, d_{31} and d_{32} changed to d'_{31} and d'_{32} , respectively.

In this work, we used PZT 3230HD manufactured by CTS Electronic Components Inc. [6], the same as those used by Tien et al. [3]. Hence, we calculated the piezoelectric and dielectric coefficients using the same method as Tien et al. [3]. The piezoelectric coefficient d'_{31} in the x-direction decreased by $34 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (10.6% decrease with respect to the nominal value), $139 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (43.3% decrease with respect to the nominal value), and $194 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (60.6% decrease with respect to the nominal value) for PCGE-D, PCGE-E, and PCGE-F, respectively. The piezoelectric coefficient d'_{32} in the y-direction increased by $130 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (40.6% increase with respect to the nominal value), $134 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (41.8% increase with respect to the nominal value), and $146 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ (45.6% increase with respect to the nominal value) for PCGE-D, PCGE-E, and PCGE-F, respectively. The dielectric coefficient under a constant stress in 1-directions (ϵ'_{33}) of the PZT layer in PCGE-D increased by 0.3%, but that of PCGE-E decreased by 13.4% and that of PCGE-F decreased by 15.8%.

3. EXPERIMENTAL SETUP

In this research, we used the dropping test system to measure the output voltage of the PCGEs. The dropping test system includes several components as shown in Figure 4. The mass was dropped using a linear motor guide, and a vertical impact force was applied on the PCGE. The PCGE produces direct current (DC) voltage because of the vertical impact force. Before carrying out the experiments, a load cell (SB-200L, CAS) and a data acquisition system NI compactDAQ (NI cDAQ-9178, NI) were used to measure the impact force of the dropping test system. The output DC voltages from the PCGEs were measured using a multimeter (digital multimeter 34410A, Agilent).

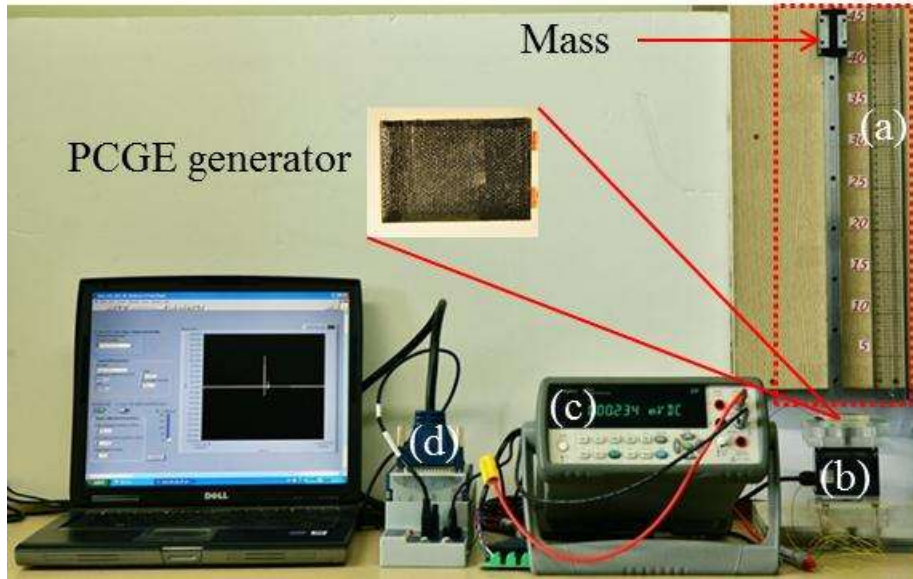


Figure 4. Photograph of experimental setup: (a) Dropping test system, (b) Load cell, (c) Multimeter, (d) NI cDAQ

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Impulse of dropping test system

In order to obtain an accurate output voltage, the dropping test system should produce a stable impulse. The technical computing software MATLAB was used to measure the impulse. Table 2 lists the conditions of the experiment. Figure 5 illustrates the results of the impact force. In this measurement, a beam type load cell was used to measure the impact force. Therefore, the results show a positive impact force when the load cell is compressed, and vice versa. The PCGE generator generated voltage from the positive impact force, and the negative impact force did not affect the output

voltage of the PCGE generator. The force was measured thirty times. The maximum impulse was 0.6791 N·s, the minimum impulse was 0.6672 N·s, and the standard deviation was 0.003 N·s.

Table 2. Experimental conditions

Device Name	Value
The mass of loading part	$M=0.14\text{ kg}$
The height of LM guide	$H=460\text{ mm}$
Load cell	Capacity: 200 kgf Resolution: 1/3000
Sampling time of the Muti-meter	$\Delta t=0.7\text{ ms}$
Sampling frequency of the NI cDAQ-9187	$F=25\text{ kHz}$

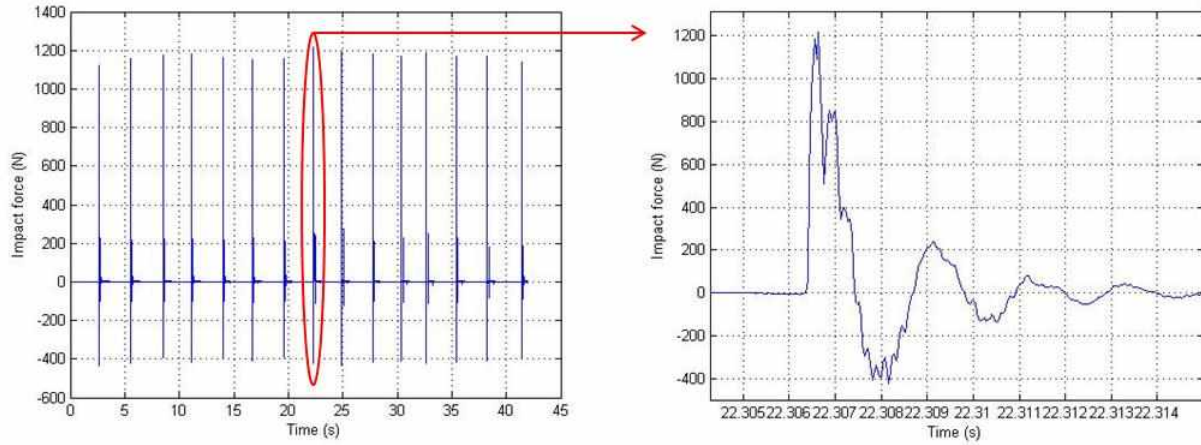
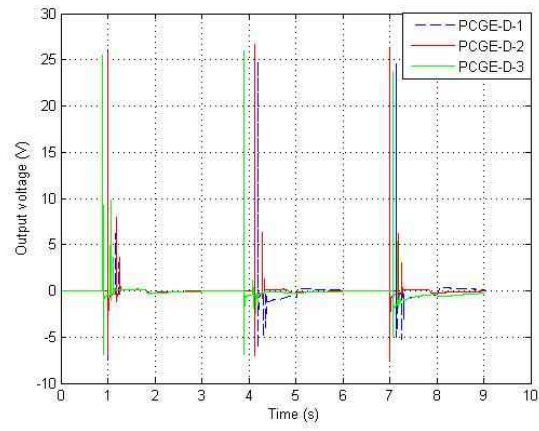


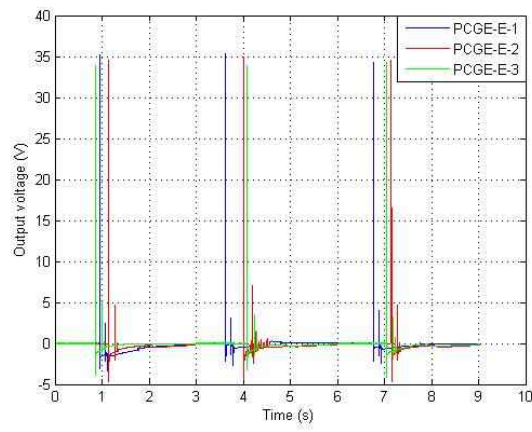
Figure 5. Measurement results of impact force

4.2 Output voltage of PCGE

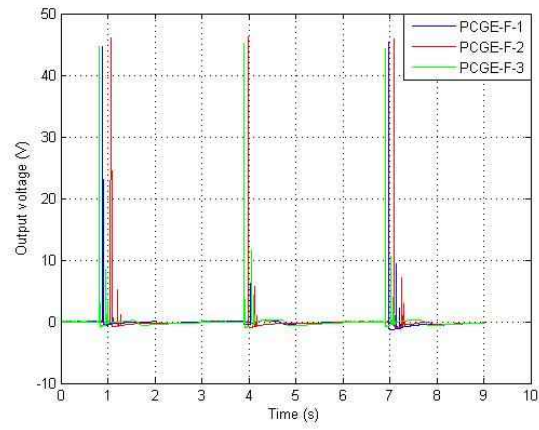
In order to observe the relationship between the output voltages and residual stress, we designed three types of PCGEs. The output voltages were measured and compared under the same conditions. We manufactured three PCGEs for each lay-up structure. Figure 6 shows the results for the output voltage. The output voltage of PCGE-F was the highest. Table 3 lists the results of the output voltage for each lay-up structure. From Table 3, we can clearly see that the output voltage increased and the piezoelectric coefficient d'_{31} decreased when the residual compressive stress in the x-direction (σ_{xx}) increased. From equations (1) and (2), we can deduce that the effective piezoelectric coefficient should be as large as possible, whereas the dielectric coefficient should be as small as possible so as to enhance the output voltage. Therefore, the effective piezoelectric coefficient should be the largest, which depends on d_{33} , d_{31} , and the amplification factor B . However, in the PCGEs, d_{33} did not change and d_{31} decreased. Therefore, the amplification factor B should increase. This implies that the output voltage increases when the residual stress increases.



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Output voltages of (a) PCGE-D, (b) PCGE-E, (c) PCGE-F

Table 3. Calculation of piezoelectric and dielectric coefficients

PCGE generator	Average residual stress in the PZT layer (MPa)		Piezoelectric strain Coefficient (10^{-12} m V $^{-1}$)		Dielectric coefficient	Average output voltage (V)
	x-direction	y-direction	d'_{31}	d'_{32}	ϵ_{33}^T (10^{-9} F m $^{-1}$)	
PCGE-D	1					25.0
	2	$\sigma_{xx}=3.71$	$\sigma_{yy}=-31.86$	-286	-450	33.7
	3			(10.6% ↓)	(40.6% ↑)	(0.3% ↑)
PCGE-E	1					25.1
	2	$\sigma_{xx}=-22.95$	$\sigma_{yy}=-33.10$	-181	-454	29.1
	3			(43.3% ↓)	(41.8% ↑)	(13.4% ↓)
PCGE-F	1					34.9
	2	$\sigma_{xx}=-35.02$	$\sigma_{yy}=-48.89$	-126	-466	28.3
	3			(60.6% ↓)	(45.6% ↑)	(15.8% ↓)

5. SUMMARY

In this work, a d_{33} -mode PCGE has been proposed for electricity generation from compressive force. From experiments conducting using a dropping test system, we found that the PCGE produced voltage when an impact force was applied in the vertical direction. The outer epoxy-based composite protected the inner brittle PZT and ensured that the PCGE could generate voltage. A comparison of the experimental performance of PCGE-D, PCGE-E, and PCGE-F indicated that the residual stress in the x-direction considerably affected the output voltage. PCGE-F had the highest residual stress and output voltage. In conclusion, the residual stress affects the output voltage of the d_{33} -mode PCGE that may be used for energy harvesting.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a grant from the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2009-0083068) and was also supported by a grant (2011-A001-0027) by the Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of the Korean Government. The authors are grateful for the financial support.

REFERENCES

- [1] Park, J. C., Park, J. Y. and Lee, Y. P., "Modeling and characterization of piezoelectric d33-mode MEMS energy harvester," *J. Microelectromech. Syst.*, 19(5), 12515-1222 (2010).
- [2] Kim, H. W., Priya, S., Uchino, K., Newnham, R. E., "Piezoelectric energy harvesting under high pre-stressed cyclic vibrations," *J. Electroceram.* 15, 27-34 (2005).
- [3] Tien, C. M. T., Goo, N. S., "Use of a piezocomposite generating element in energy harvesting," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 21(14), 1427-14365 (2010).
- [4] Ochoa, P., Villegas, M., Feranandez, J. F., [Ferroelectrics], Reprints available directly from the publisher, Taylor & Francis, 315-320 (2002).
- [5] Sodano H. R., Park G. and Inman D. J., "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 16(10), 799-807 (2005).
- [6] www.ctscorp.com/components/pzt/downloads/PZT_5Aand5H.pdf
- [7] www.ctscorp.com/components/pzt/about.asp
- [8] Yoon K. J., Park K. H., Lee S. K., Goo N. S. and Park H. C., "Analytical design model for piezo-composite unimorph actuator and its verification using lightweight piezo-composite curved actuators," *Smart Mater. Struct.* 13(3), 459-467 (2004).
- [9] Krueger H. H. A., "Stress sensitivity of piezoelectric ceramics: part 1. Sensitivity to compressive stress parallel to the polar axis," *J. Acoust. Soc. Am.* 42(3), 636-645 (1967).
- [10] Krueger H. H. A., "Stress sensitivity of piezoelectric ceramics: part 3. Sensitivity to compressive stress perpendicular to the polar axis," *J. Acoust. Soc. Am.* 43(3), 583-591 (1968).

Effects of cyclic impacts on the performance of a piezo-composite electricity generating element in a d_{33} mode energy harvesting

Van-Lai Pham¹, Nam Seo Goo^{1,*}, and Jinkyoo F. Choo²

¹Department of Advanced Technology Fusion, ²Department of Civil Engineering, Konkuk University, 120 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul, 143-701, Republic of Korea

The increasing use of piezoelectric generators to harvest energy from various ambient sources requires the establishment of durability data for piezoelectric materials. In this paper, a d_{33} mode piezocomposite electricity generating element (PCGE) was tested for its durability under cyclic impact loading. For this purpose, a motor driven lever system was designed to apply constant impact force on PCGEs. To investigate the durability of PCGEs, the output voltage of the PCGEs was observed upon repeated application of an impact force until eventual loss of the generated voltage. The experimental results enabled to determine the number of cycles until which PCGEs can be used without loss of their electricity generation performance with respect to the stress level applied on the PCGEs. At low stress level (around 0.76 MPa or lower), the PCGE showed almost insignificant degradation even after 2 million cycles whereas degradation occurred sooner (after 8×10^5 cycles) at higher stress levels (around 0.92 MPa or higher). The effects of impact loading on the durability of the PCGEs were also examined by X-ray photographs of the specimens.

Keywords: Durability, Cyclic impact loading, Energy harvesting, d_{33} mode, PCGE, PZT ceramics.

1. INTRODUCTION

Piezoelectric materials have received much interest recently, being investigated in a number of applications due to their simple piezo-electric transduction and easy implementation in piezoelectric systems as compared to electrostatic or electromagnetic materials.¹ The PZT material converts available ambient energy into usable electrical energy through the piezoelectric effect. Harvesting energy by this method holds much promise for the growth of self-powered electronic devices and low-power electronic devices, used as microelectronics and wireless sensor nodes.²⁻⁵ To maintain the efficiency of these devices, several issues about piezoelectric materials must be understood. One of the main reasons that limits the actual application of piezoelectric materials as actuators, sensors and functional devices is the mechanical fatigue, which reduces the effective performance with time (or stress) of these materials due to dielectric loss and depolarization. Therefore, examining the durability of a piezoelectric ceramic with regard to fatigue under long-term and cyclic loading is interesting and meaningful.⁶⁻⁹

piezocomposite electricity generating element (PCGE), which are high performance electric generators, have much potential in energy harvesting applications. Luong and Goo¹⁰ investigated the application of PCGE in the windmill for the d_{31} mode energy harvesting, and obtained positive results. As a follow-up study to Luong and Goo's research, we continued to use PCGEs to harvest energy in the d_{33} mode. Applications using the d_{33} mode piezoelectric material have been

reported¹¹⁻¹⁶ and revealed great promise in further applications involving piezoelectric specimens. In d_{33} mode energy harvesting, the effective piezoelectric coefficient d_{33}^{eff} is the main factor contributing to the performance of PCGEs. This coefficient is not calculated in detail in this work but can be inferred based on the experimental data of PZT-5H¹⁷, which has basically the same properties as those of PZT 3203HD, used in PCGEs.

Hence, the reliability and durability of PCGEs are the topics of this work. In a practical application, the bridge bearing with built-in piezoelectric material functions as electric generator from vibration movement; the mechanical loading on PCGEs is applied through the surface of contact of the vehicles' tires with the bridge pavement, which is mostly related to impulse excitation force. Therefore, this work aims to investigate the effect of impulse loading on the performance of a piezo-composite electricity generating element in a d_{33} mode. For this purpose, a mechanical testing system was specifically designed to test the durability of a PCGE material. In the test method discussed in this paper, PCGEs are subjected mechanically to cyclic compressive impacts until occurrence of the degradation of the output voltage level. The test system, measurement method and corresponding experimental results are described in the following sections.

*Authors to whom correspondence should be addressed.
(nsgoo@konkuk.ac.kr)

2. DURABILITY TEST METHOD

2.1. Design of a motor driven lever system for durability test

The motor driven lever system is designed to produce cyclic impact forces so that the PCGE specimens can harvest output voltages uniformly. The magnitude of the impact force can be adjusted by moving the sliding bar up and down, and also by increasing the spring stiffness and weight of the mass. The frequency of the impact force is designed as high as possible to shorten the duration of the experiment, which is expected to last for two million cycles. And, to carry out more cycles, it is necessary to overcome the limited holding torque of the motor and the dropping time of the mass at the tip of the lever. The dropping time of the mass must be shorter than the period of the motor. With all components used in this design, the system can operate up to the highest frequency of 4 Hz, and stress of up to 1.5 MPa. The main parts of the motor driven lever system are presented in figure 1.

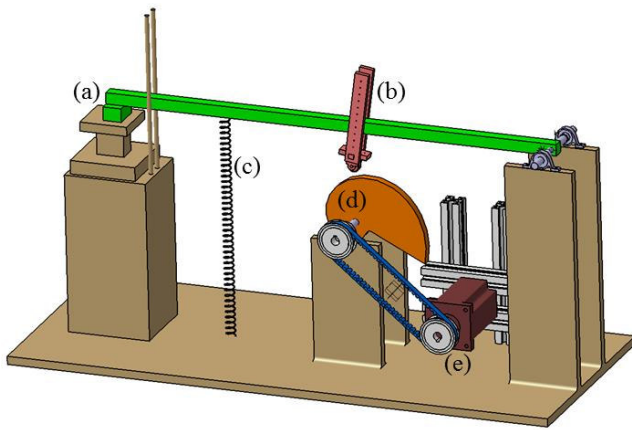


Fig. 1. The motor driven lever system in CATIA.
(a) Mass; (b) Sliding bar; (c) Spring; (d) Cam mechanism; (e) Motor

The driver and controller, together with the motor, help the system to create rotational cycles. The rotational motion of the cam mechanism moves the sliding bar up and down. The lever bar consists of a spring, a sliding bar and a mass at the tip; this bar creates the cyclic impact forces that are applied on the PCGE. In addition, two vertical bars were used to ensure the vertical up-and-down movement of the lever bar. The spring is used to mitigate the vibration and rebound of the mass generated after impact and to enhance the contact force applied on the PCGE. The spring and the mass can be adjusted to control the applied stress level. In addition, the timing belt is used to synchronize the motions of the motor and cam. By theoretical calculation, the maximum frequency of the motor driven lever system is estimated at 4 Hz. Refer to Appendix for more details about the theoretical approach.

2.2. Estimation of maximum frequency of the motor driven lever system by ADAMS™ simulation

A mechanical modeling of the basic mechanism of the motor driven lever system is proposed using the dynamic software ADAMS™. The first model design was constructed in the CATIA software, and then this model was imported into ADAMS™ for simulation purposes. Figure 2 shows the motor driven lever system in ADAMS™/View.

The mechanical architecture and the kinematic scheme of the system in ADAMS™ are discussed to understand the operation and transmission mechanism of this system. The simulation focuses on the analysis of the impact force and maximum dropping frequency of the mass. The simulation and experimental data of these parameters are compared. Figures 2 and 3, shown below, describe the mechanical architecture of the system in ADAMS™ and the two-dimensional kinematic scheme, which provides information on the links among the parts in this design.

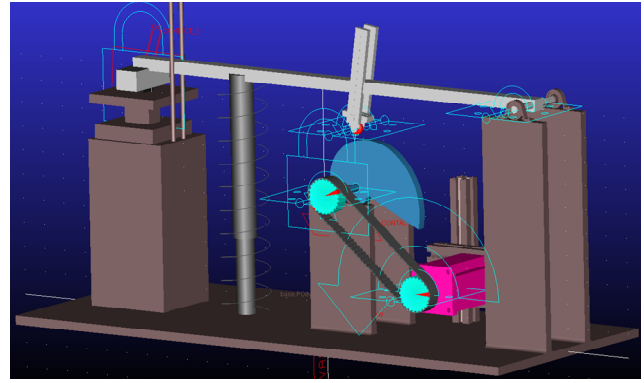


Fig. 2. Mechanical architecture of the system in ADAMS™

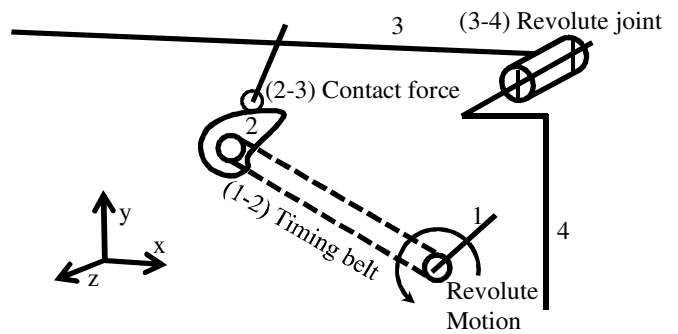


Fig. 3. Kinematic scheme in “2D” model

In the scheme above, the transmission mechanism is presented. The revolute motion is used to represent the motor rotation; its frequency can be adjusted. The timing belt system is used to transmit motion from the motor to the cam. Moreover, the lever bar can rotate freely about the axis of the

base. Finally, two contact functions are defined to model two contact forces: the first one defines the contact between the cam and the lever bar; the second one models the interaction between the mass and the PCGE. The simulation conditions are given in table I. The results show the contact force and the mass displacement.

Table I Conditions for ADAMS™ simulation

Mass (kg)	Frequency of motor (Hz)	Stiffness of spring (N/m)	Damping coefficient (N·s/m)	Gravity (m/s ²)
0.25	1	20	0.2	9.8

The simulation results are shown in figures below, where the peak value of the impact force is shown in figure 4 and the displacement of the mass is shown in figure 5. The maximum frequency of the motor can be obtained from the displacement of the mass with increasing motor speed.

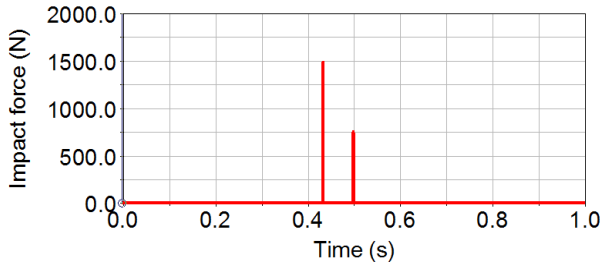


Fig. 4. Impact force on PCGE

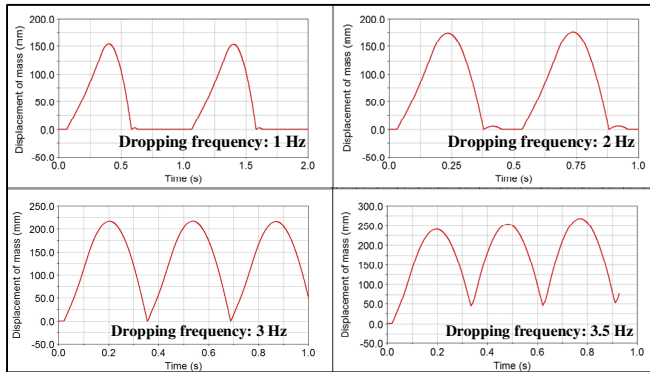


Fig. 5. Displacement of the mass with increasing dropping frequency

According to simulation results, the impact force was 1500 N and the system can operate at 3 Hz without any problems. At 3.5 Hz or above, there is not enough time for the mass to impact PCGE before the cam makes contact with the lever bar. So, the motor driven lever system can be operated at the maximum frequency of 3 Hz, which is lower than the theoretical value of 4 Hz in Appendix. This difference can be explained by the assumption of a small angle θ in the

approximate calculation, which appeared to run around 10° in the simulation.

3. MATERIAL

3.1 Piezocomposite electricity generating element material (PCGE)

Piezo-ceramics (PZTs) are widely used as energy harvesting materials but are extremely brittle. In order to overcome this brittleness and improve the efficiency of the piezo-ceramic, the multilayered piezoelectric PCGE has been proposed recently. It consists of four layers of a piezo-ceramic, glass/epoxy and carbon/epoxy. The basic properties of the PCGE constituent laminates are presented in table II.

Table II Basic properties of PCGE constituent laminates

Properties	Coefficients	PZT 3203 HD ^a	Carbon/Epoxy ^b	Glass/Epoxy ^b
Modulus	E_1 (GPa)	70	231.2	21.7
	E_2 (GPa)	70	7.2	21.7
	G_{12} (GPa)	25.57	4.3	3.99
Poisson's ratio	ν_{12}	0.31	0.29	0.13
Strain coefficient	d_{31} (10^{-12} m/V)	-320	—	—
	d_{33} (10^{-12} m/V)	650	—	—
Dielectric coefficient	ϵ_{33}^T (10^{-9} F/m)	33.6	—	—
Voltage coefficient	g_{31} (10^{-3} V·m/N)	-9.5	—	—
Coefficient of thermal expansion	α_1 (10^{-6} /°K)	3.5	-1.58	14.2
	α_2 (10^{-6} /°K)	3.5	32.2	14.2
Density	ρ (kg/m ³)	7800	1510	1910
Thickness	t (mm)	0.25	0.10	0.09

^aMaterial properties from the data sheet of CTS piezoelectric products.¹⁷

^bMaterial properties from Goo et al.¹⁸

PZT 3203HD from CTS Electronic Components, Inc., which is basically equivalent to PZT-5H, was used to fabricate PCGEs. The dimensions of the PCGE are 36 mm × 24 mm and the thickness of the glass/epoxy, carbon/epoxy, and PZT ceramic are 0.09 mm, 0.1 mm, and 0.25 mm, respectively. In the curing process, the PCGEs were heated from room temperature (25°C) to 177°C during 1 hour and kept at 177 °C during more than two hours. The difference in the

thermal expansion coefficient among the constituent layers led to changes in the residual stress in the PZT layer. This change was analyzed by using the commercial finite element software ANSYSTM.^{19, 20} With the analyzed residual stress, the piezoelectric coefficients of the PCGEs were predicted based on Krueger's experiment data.

The electrical performance of a PCGE can be improved by setting up a lay-up configuration. PCGE-A, PCGE-B, and PCGE-C were fabricated by Tien et al.¹⁹ Shortly after, Jun et al.²⁰ reported that new PCGEs, designated as PCGE-D, PCGE-E, and PCGE-F, had better performance. The optimum PCGE was PCGE-F, whose configuration is presented in figure 6.

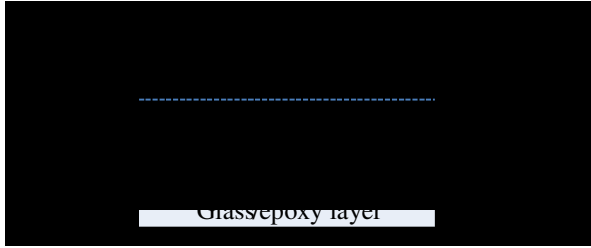


Fig. 6. PCGE-F layup configuration

A piezoelectric material harvests energy in two modes: d_{31} -mode and d_{33} -mode. The d_{31} -mode of a PCGE was studied and applied to a windmill by Luong and Goo.¹ We focus on the application of a PCGE using d_{33} mode in this study.

3.2. d_{33} mode PCGE

The output voltage of a d_{33} -mode PZT generator is produced by the deformation of the PZT generator. Figure 7 shows the output voltage generating mechanism of a multilayered plate structure.

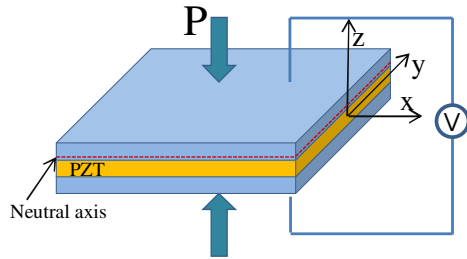


Fig. 7. Laminated plate of a generating layer

The d_{33} -mode PCGE generates voltage from the compressive stress in the thickness direction. Tien et al.²⁰ expressed the dependence of the output voltage of a PCGE on the vertical force, piezoelectric coefficient and dielectric coefficient as follows:

$$V = g_{33}^{eff} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \sigma \cdot t = \frac{d_{33}^{eff}}{\epsilon_{33}^T} \cdot \frac{P}{A} \cdot t \quad (1)$$

where V is the output voltage, g_{33}^{eff} is the voltage coefficient, σ is the stress in the z -direction, ϵ_{33}^T is the dielectric coefficient, d_{33}^{eff} is the effective piezoelectric coefficient, P is the vertical force, A is the plate area, and t is the thickness of the PZT layer. From the equation (1), it is clear that the performance of a PCGE depends on the voltage coefficient. Therefore, d_{33}^{eff} needs to be calculated. The details of the calculation method of d_{33}^{eff} for PCGE are not presented in this paper, but can be inferred from Krueger's study,^{21, 22} in which the experimental data revealed that the relationship between the initial piezoelectric coefficient in the direction of stress application (d_{31}) and in direction of polarization (d_{33}) is described by $d_{31} = -0.45 \times d_{33}$. Therefore, the d_{33}^{eff} coefficient of a PCGE can be inferred from d_{3x} and d_{3y} , in which, d_{3x} is calculated from combination of $(\overline{d_{31}})_x$ and $(\overline{d_{32}})_x$. Goo et al.¹⁸ defined that $(\overline{d_{31}})_x$ is the x -direction piezoelectric coefficient in the direction of the applied stress (1-direction, where the 1-direction is aligned with the x -direction); $(\overline{d_{32}})_x$ is the x -direction piezoelectric coefficient in the direction perpendicular to the applied stress (2-direction) and polarization (3-direction). Similarly, d_{3y} is calculated from the combination of $(\overline{d_{31}})_y$ and $(\overline{d_{32}})_y$. With the experimental data, Krueger concluded that the piezoelectric coefficient d_{31} (in the direction of stress application) decreases significantly with stress, while d_{32} (in the direction perpendicular to the stress and the polarization) generally increases. The calculation results of the piezoelectric coefficient and the dielectric coefficient for PCGE-F are shown in table III. From these coefficients, we propose a simple equation to estimate the effective piezoelectric coefficient.

$$\frac{(d_{3x} + d_{3y})}{2} = -0.45 \times d_{33}^{eff} \quad (2)$$

Table III Calculation of the piezoelectric coefficient and dielectric coefficient of PCGE-F

Piezoelectric coefficient ($10^{-12} \text{ m} \cdot \text{V}^{-1}$)		Piezoelectric effective coefficient ($10^{-12} \text{ m} \cdot \text{V}^{-1}$)	Piezoelectric dielectric coefficient ($10^{-9} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$)	Voltage coefficient ($\text{m} \cdot \text{V} \cdot \text{N}^{-1}$)
d_{3x}	d_{3y}	d_{33}^{eff}	ϵ_{33}^T	g_{33}^{eff}
-297.4	-235.8	592.5	28.17	21
7%↓	26.2%↓		15.8%↓	8.7%↑

As mentioned above, the PCGE-F gave the highest performance. The voltage coefficient was 8.7% higher than that of bare PZT. Therefore, all the results related to the durability of a PCGE in this paper were obtained from the analysis and experiments of PCGE-F specimens.

4. EXPERIMENTAL SETUP AND RESULTS

4.1 Experimental setup and results

The experimental setup consisted of the motor driven lever system, a load cell and an output voltage recording system. A load cell (resolution: 1/3000) with a data acquisition system NI compact DAQ (NI cDAQ-9178, NI) was used to measure the impact force applied on the PCGE. The output voltage generated from the PCGE was recorded using Lab View-controlled and automated data acquisition system. Figure 8 shows the experimental setup with the transfer mechanism, rubber pad, PCGE, load cell and motor driven lever system. A vertical impact force is applied on the PCGE by the dropped mass. The objective of the experiment is to determine how many times the PCGE can generate an output voltage without failure or loss of performance. The applied stress is kept constant and the output voltage is observed until degradation begins to occur. The size of the PCGE specimens was 36 mm × 24 mm × 0.71 mm.

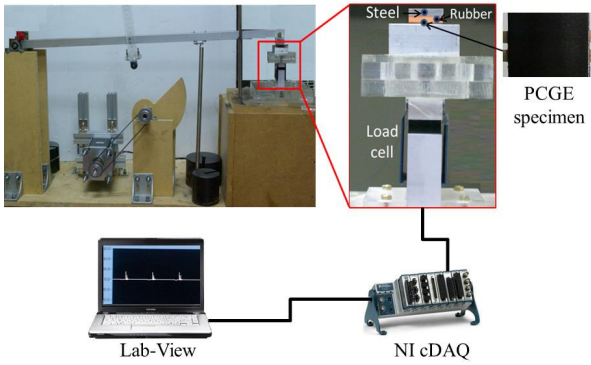


Fig. 8. Experimental setup for durability test

Besides the motor driven lever system, a load transfer mechanism was designed for the durability experiment of the PCGEs. This mechanism consisting of a steel block and a rubber pad distributes the applied stress evenly all over the surface of the PCGEs. The functions of the steel block and the rubber pad were investigated using ANSYSTM by analyzing the stress developed in the PCGE²⁰. In Jun and Goo's research²⁰, a rectangular steel block and a trapezoidal steel block were placed above a rubber pad and the corresponding stress distributions on the PCGE under application of an impact force were observed. The results revealed that the stress distribution in the case of the rectangular steel block with a rubber pad was similar to that in the case of the trapezoidal steel block with a rubber pad; however the stress distributions of these cases were different when the rubber pad was not used. Therefore, we set up a similar load transfer mechanism for the durability test, which was carried out to simulate the application of the PCGE in a bridge pot bearing in which the PCGE is inserted between the steel base plate and the elastomer disk.²³

4.2. Impulse response of the motor driven lever system and output power

The stability of the motor driven lever system is a major concern for the feasibility of the durability test of the PCGE. One of the basic questions is to what extent should the reliability of the motor driven lever system be considered before undertaking the durability test of a PCGE. Therefore, it is necessary to examine the response of this system. The performance of the PCGEs was observed in several cycles. The condition of the experiment is presented in table IV.

Table IV Experimental conditions

Mass (kg)	Dropping frequency (Hz)	Stiffness of spring (N/m)	Sampling frequency of NI cDAQ (kHz)	Load cell
0.25	1	20	25	200 kgf

Figures 9 and 10 plot the peak values of the impact force and output voltage generated by the PCGE specimens subjected to cyclic impact. It can be seen that practically uniform values are obtained. In this experiment, the stress applied on the PCGEs was 0.76 MPa and output voltage was 52.83 V. The standard deviations of the impact force and output voltage were 8.78 N and 0.47 V, respectively.

The results shown in figure 9 reveal that the motor driven lever system can be used as a reliable mechanism to apply cyclic impact forces. Therefore, in the next section, the durability of the PCGEs is discussed. The lifetime of a specimen was considered with increasing stress.

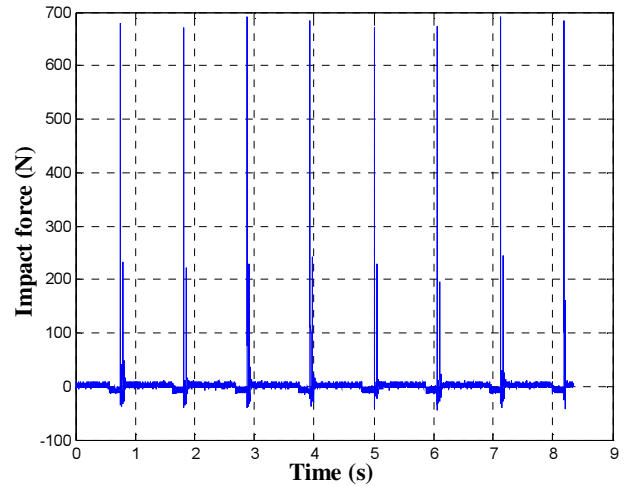


Fig. 9. Impact force applied by motor driven lever system

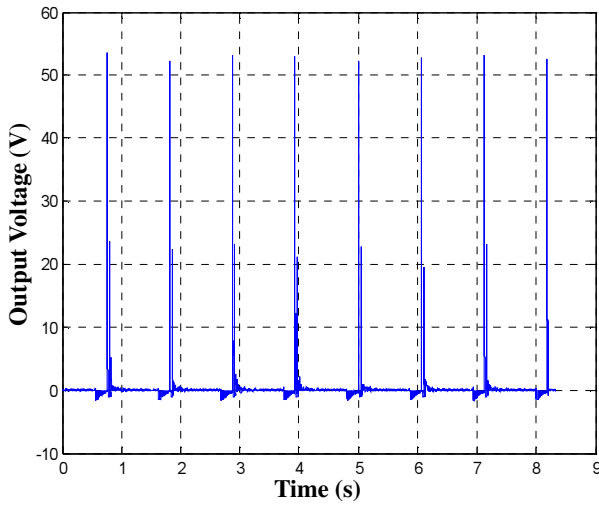


Fig. 10. Output voltage generated by PCGE material

Besides the determination of durability of the PCGEs due to an impulse excitation force, which is mostly concerned in this work, the effect of the harmonic excitation force on the performance of this material is also investigated as a part of this study. The experimental setup considered in this investigation was a pot bearing inserted with the piezo-composite material and loaded by a MTS 647 hydraulic wedge grip machine as in figure 11 to give the harmonic application on PCGEs.

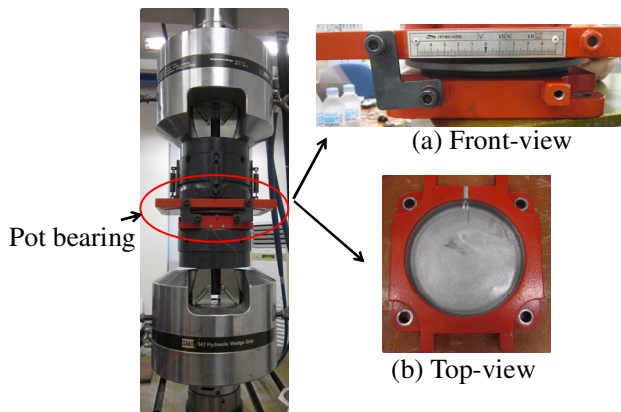


Fig. 11. MTS 647 hydraulic wedge grip machine and a pot-bearing

Since the pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, the mechanical load exerted on PCGEs is smaller than that applied by the loading system. Figure 12 shows the output voltage generated from PCGEs under the influence of a harmonic excitation force. Values of voltage derived from this experimental data are subjected to a harmonic excitation force with no preload, 3 ton of the mechanical loading, and

0.5 Hz of the hydraulic machine frequency. The peak-to-peak amplitude of the output voltage in this case is about 14.03 V.

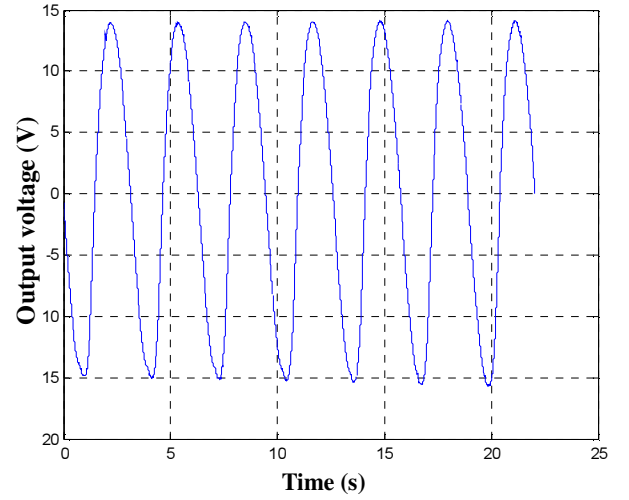


Fig. 12. Output voltage under harmonic excitation force

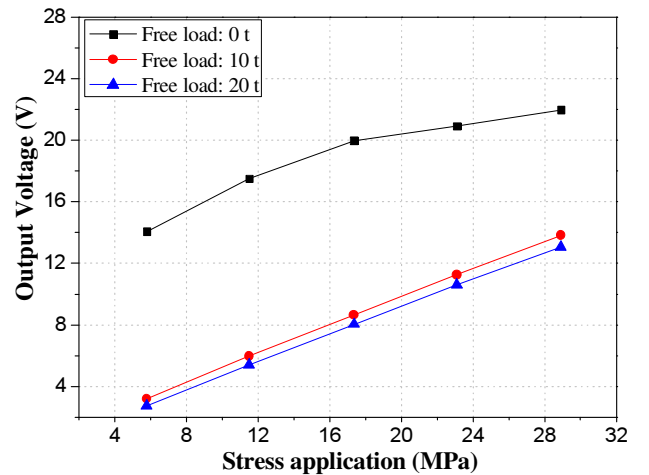


Fig. 13 Output voltage vs. stress application (t: ton)

In figure 13, the output voltage of PCGEs is observed with respect to increasing of the mechanical loading. In these experiments, three cases of preload were performed: 0 ton, 10 ton, and 20 ton with the range of harmonic mechanical stress application. All these results were carried out with only 0.5 Hz of hydraulic machine frequency. Clearly, in view of the value of peak voltage shown in figure 13 and figure 10, PCGEs exhibit better performance under an impulse excitation force compared with that under a harmonic excitation.

In next study, an equivalent circuit is proposed to calculate the output power of PCGEs with an impulse excitation force. The piezoelectric material is represented by means of an AC source, a capacity and a resistance. A load resistance is placed in the circuit to investigate the output power, as shown in

figure 14, where V denotes the load voltage and R_{Load} denotes the load resistance.

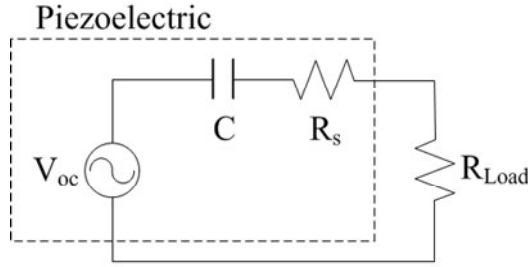


Fig. 14. Equivalent circuit

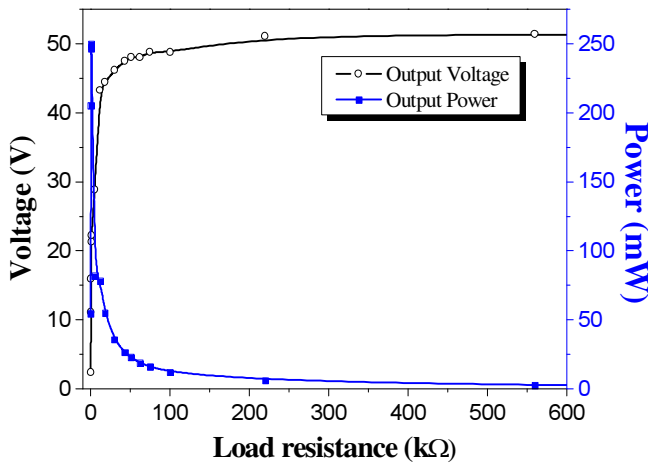


Fig. 15. Output voltage and power vs. load resistance

Figure 15 shows the output voltage and output power with respect to a range of load resistances of the PCGE. In an open circuit, the output voltage generated by a PCGE was about 51 V. The performance of a PCGE in a closed circuit was investigated in this experiment. The load resistance ranged from 0.05 Ω to 10 M Ω and the results are shown in figure 15. The load resistance at 220 k Ω or higher does not result in any change in the output voltage and power, so the results at resistances higher than 600 k Ω can be ignored in the graph. The maximum output power was 250 mW at resistances of 0.91-1 k Ω .

4.3. Durability

The effect of loading on the durability of PCGEs was investigated experimentally in this study. To investigate the degradation of the PCGE material, an impact force was applied on the PCGEs repeatedly until degradation of output voltage began to occur. The lifetime of a PCGE was also considered with increasing stress application. Figure 16 shows the peak output voltage vs. stress application. Figure 17 shows the degradation of a PCGE over 2 million cycles.

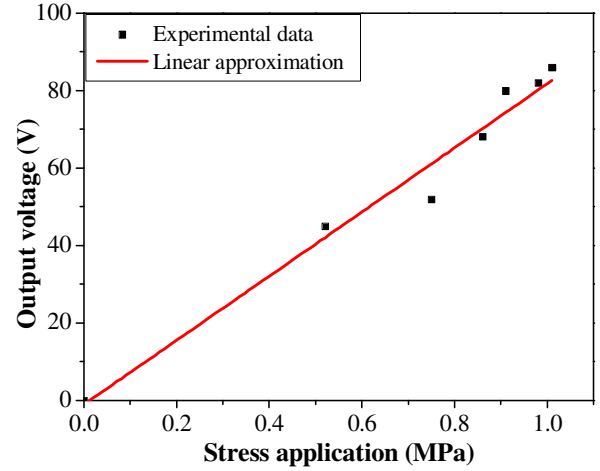


Fig. 16. Output voltage vs. stress application

Considering equation 1, the output voltage generated by a PCGE is a linear function of stress application. The experimental results shown in figure 16 confirm the accuracy of this linear relation. The output voltage increases with larger stress. The voltage is about 85 V at stress of 1.04 MPa. Higher loadings provide higher peak output voltages, but the material will fail as a result. Figure 17 shows the degradation of a PCGE with respect to the number of impact cycles at different stress levels ranging from 0.52 MPa to 1.04 MPa. It appears that clear gain in the magnitude of the output voltage can be achieved but this gain is accompanied with loss of the durability of the PCGE.

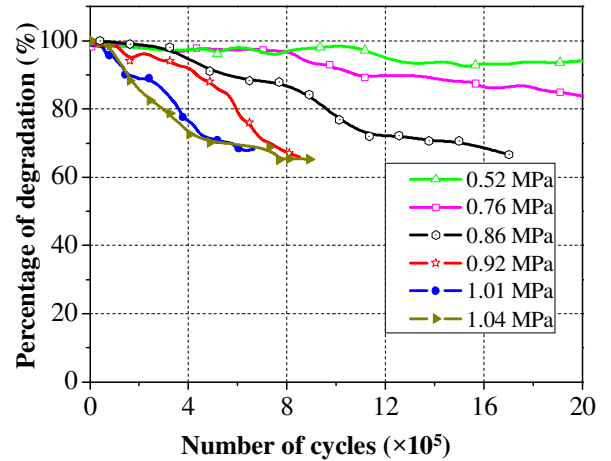


Fig. 17. Performance of PCGE vs. number of cycle loading

In bridge bearing application, the PCGEs will be put inside pot bearings of which life time are predicted at 2 M cycles. PCGEs of which the percentage of degradation is less than 10 percent after 2 M cycles are still considered good performance. Based on experimental results, the degradation

of PCGEs is practically insignificant at stress level of 0.52 MPa or lower. Loss of generating performance occurs sooner when higher stresses are applied. Clearly, increasing the applied stress level results in higher output voltages but at the cost of the lifetime of the PCGE. The durable lifetime of the PCGE can last for more than 2 million cycles at lower stress levels. If we increase the impact force, i.e., increase the stress level, the lifetime of the PCGE reduces to reach about 8×10^5 cycles at about 1.04 MPa. A d_{33} mode PCGE was used in a research for the development of a multi-functional bridge bearing intending to demonstrate that the remnant vibrations of passing vehicles can restore and charge electric generators for further monitoring of traffic and overloaded trucks.²³ In this application, PCGEs were inserted into pot bearings to harvest energy from movement vibrations. The insertion of the PCGE in the pot bearing enables to protect the PCGE from the direct application of the traffic loads while allowing it to develop its performance. Therefore, the durability of the PCGEs needs to be considered along with the lifetime of the pot bearing. Since the bridge design code specifies that the pot bearing should resist to at least 2 million loading cycles, the PCGE also needs to last at least 2 million cycles. According to results shown in figure 17, almost no degradation was observed under 0.76 MPa (or lower) during the durability test, but significant degradation was observed at the high stress application of 1.04 MPa. Therefore, the pot bearing should be designed so that the stress level remains below 0.76 MPa to guarantee the lifetime of the PCGE.

In addition, X-ray spectrums of some broken samples after experiments were taken to investigate what happened inside the specimens. Figure 18 shows the X-ray photos of PCGEs. Specimen (a) is virgin PCGE, specimen (b) was subjected to stress of 1.04 MPa, and specimen (c) to stress of 0.52 MPa. Specimen (b) exhibited large damaged area because of high stress application, while specimen (c) has only some cracks due to smaller stress application. This indicates that the loss of output voltage of the PCGEs was caused by the damages suffered by the PCGEs due to the mechanical loading applied all along the lifetime of the PCGEs.

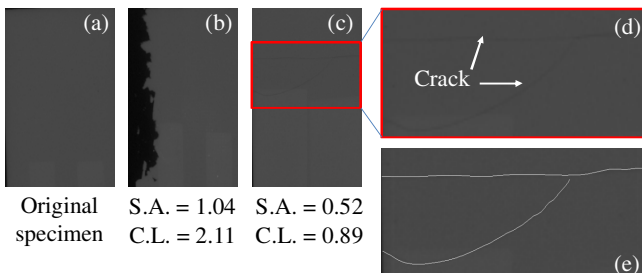


Fig. 18. PZT layers of specimens in durability experiments. (a) Original specimen; (b), (c): After durability test; (d) Zoom-in from figure c; (e) Schematic of crack from figure d. S.A.: Stress application (MPa), C.L.: Number of loading cycles (M)

5. CONCLUSION

This paper investigated experimentally a d_{33} mode PCGE and its durability. Considering that the effective piezoelectric coefficient d_{33} is one of the most important parameters in the performance estimation of a PCGE material, a simple formula to calculate this value was proposed based on the experimental data of Krueger as a relationship between d_{31} and d_{33} . This enabled to define a similar approximation for the effective piezoelectric coefficient of a PCGE.

To investigate the durability of a PCGE specimen to impact loading, a motor driven lever system was designed and fabricated to generate cyclic impact loads, and the corresponding output voltage produced by the PCGE was observed at every cycle. The experimental data showed that PCGEs can be used without any significant loss of piezoelectricity performance up to 2 million cycles at a proper stress level (below 0.76 MPa). Higher stress levels were seen to improve significantly the performance of the PCGEs but at the cost of the lifetime of the material. This work as a preliminary study on the feasibility of a multi-functional bridge bearing with built-in PCGE intending to monitor traffic loads proved the promising potential of the proposed system.

APPENDIX

The design of motor driven lever system relies on two main parameters: first, the impact force produced by this system and second, the maximum frequency at which the motor can operate without destroying the mechanism. The higher the cycling frequency is, the better the design is. One of the challenges is to achieve the highest dropping frequency under the motor torque limit. In addition, the dropping frequency is also constrained by the dropping time of the mass at the tip of the lever. All these parameters need to be considered as the motor frequency increased. Theoretical calculations are discussed to determine the maximum frequency at which the system can operate without any problems. Figure A.1 shows the dynamic scheme of this system.

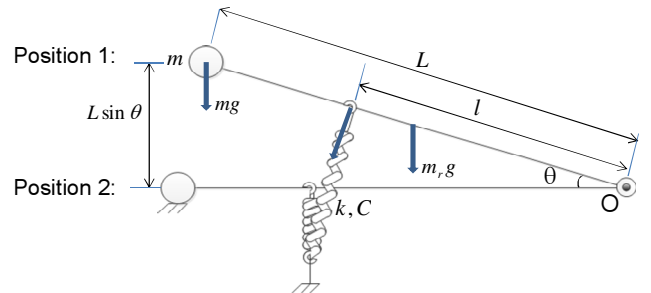


Fig. A.1. Dynamic scheme of the motor driven lever system

The parameters of this design are presented in table A.1, where m_r is the mass of the lever bar; m is the mass of the mass; k is the stiffness of the spring; C is the damping

coefficient of the spring; L is the length of the lever bar; l is the length of the lever from its hinged end to its connection with the spring; g is acceleration of gravity; and, θ_0 is the initial drop angle (in degree).

Table A.1 System parameters

m_r (kg)	m (kg)	k (N/m)	C (Ns/m)	L (m)	l (m)	g (m/s ²)	θ_0 (°)
0.05	0.2	20	0.2	1	0.8	9.8	10

From the moment equation about O, the hinged end of the lever:

$$\sum M_0 = I_0 \ddot{\theta} \quad (A.1)$$

$$-(Cl\dot{\theta})l - (kl\theta)l - (mg\cos\theta)L - (m_r g \cos\theta)\frac{L}{2} = (m\bar{L}^2 + \frac{m_r L^2}{3})\ddot{\theta} \quad (A.2)$$

Since the design targets a small angle θ , equation (A.2) can be simplified as:

$$(m + \frac{m_r}{3})L^2\ddot{\theta} + Cl^2\dot{\theta} + kl^2\theta + (m + \frac{m_r}{2})gL = 0 \quad (A.3)$$

Substituting the component data in table A.1 into the equation gives:

$$0.217\ddot{\theta} + 0.128\dot{\theta} + 12.8\theta + 2.205 = 0 \quad (A.4)$$

The solution of equation (A.4) is:

$$\theta(t) = e^{-0.5t} [0.013 \sin(7.67t) + 0.347 \cos(7.67t)] - 0.173 \quad (A.5)$$

The time for the mass to fall from $\theta = \theta_0$ to $\theta = 0^\circ$ can be computed from:

$$e^{-0.5t} [0.013 \sin(7.67t) + 0.347 \cos(7.67t)] - 0.173 = 0 \quad (A.6)$$

The following values are obtained from Equation (A.6). The time, t , from when the mass drops from the initial drop position until its impact on the base is 0.1365 s, and the angle between the point where the cam enters in contact with lever bar and the point where the cam separates from the bar is approximately 120° , which is nearly one-third of the motor period. The mass starts to fall once the cam separates from the lever bar. Hence, for the mass to impact the PCGE specimen, two-thirds of the motor period needs to be larger than the dropping time of the mass. Therefore, the following constraint must be satisfied:

$$\frac{2T_{\text{motor}}}{3} > T_{\text{dropping}} \quad (A.7)$$

This constraint indicates that the motor frequency is lower than 4.8 Hz ($f_{\text{motor}} < 4.8$ Hz). Therefore, the maximum

frequency that can be achieved by the system is about 4 Hz. To verify this theoretical value, we compare it to the simulation data based on ADAMSTM, which is presented in section 2.2

Acknowledgment: This work was supported by a grant from the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2009-0083068) and by a grant from the Construction Technology Innovation Program (CTIP) of the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of the Government of Korea (2011-A001-0027). The authors are grateful for the financial support.

References and Notes

1. K. A. Cook-Chennault, K. Thambi, and A. M. Sastry, *Smart Mater. Struct.* 17, 043001 (2008)
2. S. R. Anton, and H. A. Sodano, *Smart Mater. Struct.* 16, R1-R21 (2007)
3. S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, *Meas. Sci. Technol.* 17, R175-R195 (2006)
4. H. R. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.* 16, 799-807 (2005)
5. G. J. Wang, W. C. Yu, Y. S. Lin, and H. Yang, *J. Chinese Inst. Engrs.* 29(4), 697-706 (2006)
6. N. S. Goo, I. H. Paik, K. J. Yoon, *Smart Mater. Struct.* 16, N23-N26 (2007)
7. M. C. Pavel, M. Milan, P. C. Gregory, and K. S. Friedrich, *J. Appl. Phys.* 100, 124111 (2006)
8. M. G. Cain, M. Stewart, and M. G. Gee, NPL Report CMMT(A) 148, Center for Materials Measurement and Technology, UK (1999)
9. M. G. Cain, M. Stewart, and M. G. Gee, NPL Report CMMT(A) 116, Center for Materials Measurement and Technology, UK (1998)
10. H. T. Luong, N. S. Goo, *Smart Mater. Struct.* 21, 025017 (2012)
11. J. Paradiso, J. Kyminis, C. Kendall, and N. Gershenfeld, In IEEE Intl. Symp. On Wearable computers, vol. 24, pp. 132-139 (1998)
12. J. Paradiso, and N. Shenck, IEEE Micro, vol. 21, n.º 3, pp. 30-42 (2001)
13. X. Haocheng, W. Linbing, W. Dong, and D. Cristian, *Int. J. Pavement. Res. Technol.* 5(5), 333-337 (2012)
14. Energy Harvesting Journal, "Piezoelectric Roads for California", February (2011)
15. Energy Harvesting Journal, "Energy Harvesting Roads in Israel", August (2009)
16. N. Action, C. Albert, and L. Pearson, *J. Nano Mat.* 2012, 853481 (2012)
17. www.ctscorp.com/components/pzt/downloads/PZT_5Aand PZT_5H.pdf.
18. N. S. Goo, V. P. Phan, and H. C. Park, *Smart Mater. Struct.* 18, 037003 (2009)
19. C. M. T. Tien, N. S. Goo, *J. of Intell. Mater. Syst. and Struct.* 21, 14, 1427-1436 (2010)
20. Z. Jun, and N. S. Goo, In proceeding of SPIE, San Diego,

Vol. 8341 (**2012**)

21. H. H. A. Krueger, J. Acoust. Soc. Am. 42 636-45 (**1967**).
22. H. H. A. Krueger, J. Acoust. Soc. Am. 45 583-91 (**1967**)
23. D. H. Ha, D. H. Kim, J. F. Choo, and N. S. Goo, Networked Computing (INC), 2011 The 7th International (**2011**)

Received: XX August 2013. Accepted: 4 December 2012.

Dynamic Characteristics of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element

Dong-Ho Ha^{1, a}, Jinkyoo F. Choo^{1, b}, Chang Hyung Lee^{1, c},
Won Seo Jang¹, Nam-seo Goo²

¹Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

²Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

^ahadongho@konkuk.ac.kr, ^bjfchoo@konkuk.ac.kr, ^cchang773@hotmail.com

Keywords: Bridge bearing, Piezocomposite electricity generating element (PCGE), Dynamic loading test, Traffic loading, Load measurement

Abstract. A multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) is being developed by our research team to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibrations. For the intended application, a multilayered piezoelectric PCGE structure composed of layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy, has been developed to improve the durability, output voltage and power of the piezoceramic. The output voltage of this PCGE can be used for real-time traffic monitoring like in bridge-weigh-in-motion systems and can eventually be exploited to generate the electricity needed for the lighting and functioning of other embedded sensors. This paper presents the results of the dynamic loading tests conducted on a prototype of the proposed multi-functional bridge bearing to enhance its design details and verify the accuracy of the measurement. The results show that the bearing provides reliable measurement for traffic monitoring and enable to conceive details for the improvement of the output voltage of the PCGE. Since bridge bearings, as indispensable devices transferring the loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge, are continuously subjected to traffic loads, the proposed bridge bearing appears to be a natural and economic solution that can be applied to existing or newly built bridges without modification of the conventional design while providing additional and valuable functions for the maintenance of the structure.

Introduction

The aging of the bridge stock in many countries together with the recent occurrence of dramatic bridge failures have raised issues related to the lifetime and durability aspects of bridge structures. Design of bridge is now targeting a lifetime of at least 100 years. Accordingly, active development and applications of structural health monitoring (SHM) systems for major bridge structures are continuously implemented as a tool to sustain such lifetime perspective in terms of safety, durability and performance not only for aging but also for newly-built structures [1]. SHM aims to determine the health of a structure by acquiring signals measured by a network of sensors that are embedded into the structure and monitored over time.

Besides, energy harvesting or energy scavenging is a process that captures small amounts of energy that would otherwise be lost such as heat, light, sound, vibration or movement to recharge a battery or power a device. The harvesting of ambient energy has become an important alternative for the paradigm of primary electricity generation strategies. Among these ambient energies, vibration, movement and sound can be captured and transformed into electrical power using piezoelectric materials. For several reasons, piezoelectric energy harvesting devices are the simplest means of scavenging ambient energy directly from structural vibrations [2,3]. Piezoelectric material can produce a voltage when a mechanical force is applied; and, conversely, mechanical deformation occurs when a voltage is applied. The former capability helps the material to function as an energy harvesting device; the latter property helps it to function as an actuator [4,5].

The civil engineering community also recognized the potential benefit of such piezoelectric material to power wireless sensors for SHM purpose since conventional wired monitoring systems require excessive investments for the installation of wires. Therefore, the adoption of self-powered sensors represents an attractive alternative in terms of costs and maintenance efforts. Moreover, civil structures like bridges or roads being incessantly crossed by vehicles are by means subjected to ambient vibrations of which use appears to be a natural and cost-efficient solution [6]. Accordingly, a multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been conceived by our research team to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibrations. The electrical response provided by the PCGE is used for real-time traffic monitoring like in bridge-weigh-in-motion systems and can eventually be used to generate the electricity needed for the lighting and functioning of other embedded sensors.

This paper presents the design of the PCGE together with the results of the dynamic loading tests using a universal testing machine (UTM) conducted on a prototype of the proposed multi-functional bridge bearing to enhance its design details. The results show that the bearing provides reliable measurement that can be used for traffic monitoring and enable to conceive details for the improvement of the output voltage of the PCGE.

The proposed bridge bearing with built-in PCGE

The idea behind this study is to use such indispensable bearing in the monitoring strategy of the bridge by endowing the bearing with additional functions, with minimal additional cost, without affecting its original load bearing function and without modifying significantly the design and composition of the bearing.

On the other hand, the piezoelectric effect is used in sensing applications, such as in force or displacement sensors since a piezoelectric substance is one that produces an electric charge when a mechanical stress is applied. Piezoelectric materials can be used to transform ambient vibrations into electrical energy that can be stored and used to power other devices. With the recent surge of micro scale devices, piezoelectric power generation can provide a convenient alternative to traditional power sources used to operate certain types of sensors and actuators.

Accordingly, the concept underlying the proposed multi-functional pot bearing is to exploit the unused traffic load for generating power through the use of a piezoceramic material. Such environment-friendly energy will be useful to supply power to the monitoring system of the bridge and eventually for road lighting. The last function will also help to reduce the costs caused by the temporary closure of traffic during load control, the costs required for the personnel needed for the control task, and contribute to the extension of the lifetime of the structure.

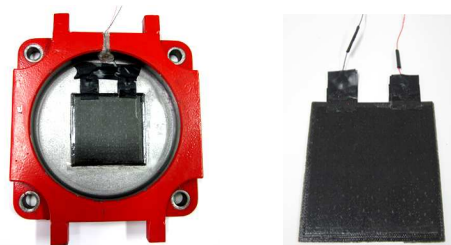


Fig. 1 PCGE inserted inside the prototype multi-functional pot bearing and fabricated PCGE

Considering the small space available within the pot bearing, a thin piezocomposite electricity generating element (PCGE) is introduced in the system (Fig. 1). This solution enables to insert the PCGE without modifying the composition of the bearing and without need to change its design. By adopting such layout, the PCGE will preserve its properties without breakage since external loads will not apply directly on the material.

Design of PCGE

The piezoelectric effect was discovered by J. and P. Curie in 1880. They found that if certain crystals were subjected to mechanical strain, they became electrically polarized and the degree of polarization was proportional to the applied strain. Conversely, these materials deform when exposed to an electric field. Piezoceramic known as lead zirconate titanate (PZT) is widely used as a power harvesting material or in actuators owing to its remarkable electromechanical properties. However, PZT is brittle and susceptible to fracture when a mechanical strain is applied [3,7].

For our purpose, the elimination of such brittleness of PZT and the improvement of its piezoceramic efficiency are crucial. Therefore, a multilayered piezoelectric PCGE structure with six layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy has been designed to enhance the durability of the PZT and increase its resistance to compressive mechanical strains (Fig. 2). The PCGE generator has been designed to enable the generating layer to be kept apart from the flexural neutral surface of the generator so as to yield larger output voltage and power [5].

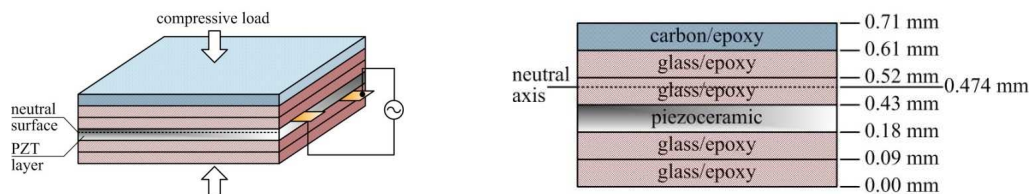


Fig. 2 d_{33} -mode PGCE and layup configuration of PCGE-F [16]

Zhao et al. (2012) conducted impact tests on this PCGE to evaluate its electricity generation performance from compressive forces [5]. From the test results, the authors found that the outer epoxy-based composite protected the inner brittle PZT and ensured that the PCGE generated voltage without breakage. The selected layup configuration was seen to produce the highest residual stress and output voltage. Owing to its performances, this layup configuration was chosen for the multi-functional bridge bearing.

Dynamic tests

Preliminary impact tests were already performed on the PCGE to verify the possibility in exploiting the output voltage for measuring the applied load [8]. The impact tests were conducted by dropping a mass from different heights so as to let it slide along a linear guide and hit the PCGE. However, the results showed lack of consistency to verify effectively the applicability of the PCGE for the measurement of traffic load. In addition, the results also revealed that a certain loss of the output voltage occurred when the PCGE was subjected to a confining compressive prestress as would be in the bearing and that this loss increased with larger prestress. Therefore, a small-scaled prototype of the proposed multi-functional bridge bearing (Fig. 1) was fabricated together with a PCGE with appropriate size to conduct dynamic tests simulating real conditions of the bearing subjected to harmonic loading from traffic and verify thoroughly the feasibility of the proposed system.

Test setup

A small-scaled pot bearing was fabricated for the test. This bearing presents the specifications corresponding to the smallest commercially available pot bearing. The pot bearing has a load bearing capacity of 500 kN with height of 70 mm and inner diameter of the piston of 120 mm. In order to fit with the bearing a PGCE with dimensions of 76×76 mm was fabricated (Fig. 1) and inserted and fixed inside the bearing between the elastomeric pad and the top of the bottom plate of the bearing.

For the measurement, the PCGE was connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure respectively the output voltage and applied loads during the tests. Load was applied using a universal testing machine (UTM) with capacity of 500 kN as shown in Fig. 3.



Fig. 3 Dynamic test of the bearing using a UTM

To simulate the real conditions in which the bearing would be exposed, permanent loads of 0 kN, 200 kN were applied to consider different weights of the. Table 1 arranges the different cases considered in the tests. The permanent load of 0 kN was selected to observe the performance of the PCGE itself. Note that the traffic load is generally modeled in terms of the wheel loads represented as a series of concentrated load with definite spacing. Thus, the frequencies of the harmonic load correspond approximately to vehicle speeds of 18 km/h for 0.5 Hz, 36 km/h for 1.0 Hz, and 108 km/h for 3.0 Hz considering a spacing of about 10 m between the vehicles.

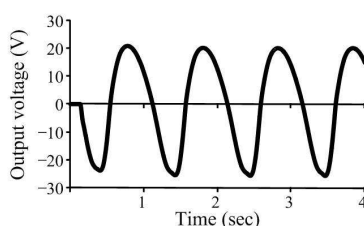
Table 1. Load cases adopted for the dynamic loading tests

Permanent load (DL)	Live load (LL)	Loading frequency
0 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN	0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz
200 kN	30 kN, 60 kN, 90 kN, 120 kN, 150 kN	0.5 Hz, 1.0 Hz, 3.0 Hz

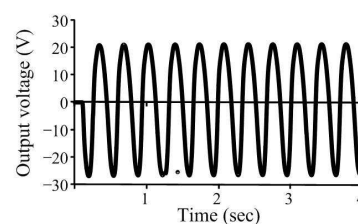
Test results and discussion

Fig. 4 plots the time histories of the output voltage under the application of several load cases of Table 1. Figs. 4(a) and 4(b) show the time histories of the output voltage for the case without permanent load and with a live load of 60 kN applied at frequency of 1.0 Hz and 3.0 Hz, respectively. The graphs exhibit a shape corresponding to the harmonic loading with maximum output voltage of approximately 28 V. However, as mentioned above, the case without permanent load does not represent the actual conditions in which the pot bearing will be exposed even if the values obtained for the maximum output voltage are promising.

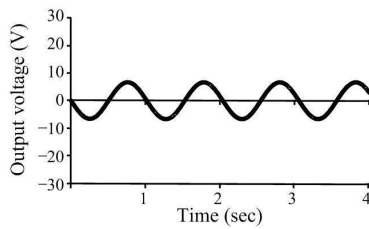
Figs. 4(e) and 4(f) plot the time histories of the output voltage for the case with a permanent load of 200 kN and with the live load of 60 kN applied at frequency of 1.0 Hz and 3.0 Hz, respectively. It can be seen that both cases give identical results regardless of the size of the permanent load. However, the application of the permanent load is seen to decrease sensitively the output voltage generated by the embedded PCGE to a value slightly smaller than 10 V. This can be explained by the constraint applied by the permanent load which prevents the PCGE to vibrate freely and, by the way, to generate its maximum power. These results show exact and clear correspondence between the output voltage and dynamic loading regardless of the vibrational frequency. The developed bearing can thus be applied to measure dynamic loads of bridges as well as to measure vibrational excitations in various industrial purposes.



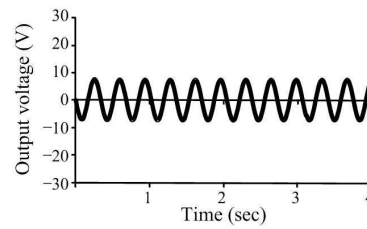
(a) DL = 0 kN, LL = 60 kN, 1.0 Hz



(b) DL = 0 kN, LL = 60 kN, 3.0 Hz



(c) DL = 200 kN, LL = 60 kN, 1.0 Hz

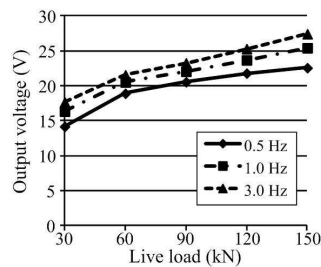


(d) DL = 200 kN, LL = 60 kN, 3.0 Hz

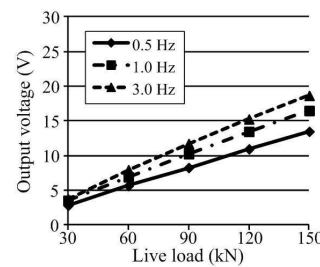
Fig. 4 Time histories of output voltage generated by PCGE under harmonic loading

Fig. 5 plots the results of the dynamic tests applying the different load combination cases listed in Table 1. Fig. 5(a) compares the maximum output voltage measured for the cases without permanent load and live loads of 30 to 150 kN applied at frequencies of 0.5 Hz, 1.0 Hz and 3.0 Hz. The broken lines obtained for each loading frequency can be attributed to the residual deformation of the pot bearing caused by the absence of permanent load. In fact, this case is not representative of the actual condition of the bearing since, as mentioned above, the bearing is always compressed by the load of the superstructure. Nevertheless, even under such condition, the output voltage generated by the PCGE inserted in the bearing is seen to increase with larger applied loading. It can be also observed that the output voltage increases slightly with higher loading frequency.

Figs. 5(b) plots the maximum output voltage measured for the cases with live loads of 30 to 150 kN applied at frequencies of 0.5 Hz, 1.0 Hz and 3.0 Hz and permanent loads of 200 kN.



(a) Permanent load of 0 kN



(b) Permanent load of 200 kN

Fig. 5 Load-voltage relation according to the loading frequency and permanent load

This last observation can be explained as follows. Conventional vibration-based energy harvesters are developed as a linear resonant system subjected to harmonic vibrations. The harmonic loading applied on the PCGE without permanent load approached the resonant frequency of the PCGE, which was at first conceived without knowledge of the permanent load. On the other hand, the application of the permanent load on the bearing shifted the resonant frequency of the PCGE leading to the loss of power generation. Accordingly, further study will be implemented to consider the operating bandwidth of the PCGE subjected to permanent compressive load so as to improve its electricity generating efficiency.

Conclusions

Since bridge bearings, as indispensable devices transferring the loads and movements from the deck to the substructure and foundations of the bridge, are continuously subjected to traffic loads, a multi-functional bridge bearing with built-in piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been proposed to respond to the growing demand of self-powered sensing devices for the monitoring of bridges by harvesting the energy produced by the traffic-induced vibration. For the intended application, a multilayered piezoelectric PCGE structure composed of layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy, has been developed to improve the durability, output voltage and power of the piezoceramic. A prototype of the proposed bearing was fabricated and subjected to a series of dynamic loading test. The dynamic loading test was scheduled to simulate as possible the conditions in which the bearing would be exposed when installed in real bridge. The

test results showed that the PCGE inserted in the bearing generated voltage linearly proportional to the applied load and could thus provide reliable measurement for traffic monitoring. These results show that developed bearing can be applied precise measurement of dynamic loads in various industrial purposes. In addition, the test results enabled to derive new solutions to improve the electricity generating performance of the proposed multi-functional bridge bearing. The proposed bridge bearing appears to be a natural and economic solution that can be applied to existing or newly built bridges without modification of the conventional design while providing additional and valuable functions for the maintenance of the structure.

Acknowledgments

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

References

- [1] Koh, H.M., Lee, H.S., Kim, S. and Choo, J.F., “Monitoring of bridges in Korea”, *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, doi: 10.1002/9780470061626.shm163, Wiley, 2009.
- [2] Cook-Chennault, K.A., Thambi, N. and Sastry, A.M., “Topical review: Powering MEMS portable devices – a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems”, *Smart Mater. Struct.* 17:043001, 2008
- [3] Sodano, S.A., Inman, D.J. and Park, G., “Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries”, *J. Intelligent Material Systems and Structures* 16(1):799–807, 2005.
- [4] Tri Tien, C.M. and Goo, N.S., “Use of a piezocomposite generating element in energy harvesting”, *J. Intelligent Material Systems and Structures* 21:1427–1436, 2010.
- [5] Zhao, J., Goo, N.S., Choo, J.F. and Ha, D.H., “Design and performance evaluation of a d33-mode piezocomposite electricity generating element”, submitted to *J. Mechanical Science and Technology*, 2012
- [6] Ha, D.H., Choo, J.F., Kim, D. and Goo, N.S., “Feasibility of a multi-functional bridge bearing with built-in piezoelectric material”, *Advances in Information Sciences and Service Sciences*, 4(11.17):142–150, doi: 10.4156/AISS.vol4.issue11.17, 2012.
- [7] Jiang, L.Z. and Sun, C.T., “Analysis of indentation cracking in piezoceramics”, *International Journal of Solids and Structures*, 38:1903–1918, 2001.
- [8] Choo, J.F., Ha, D.H., Goo, N.S. and Jang, W.S., “Preliminary test for a multi-functional bridge bearing with built-in piezoelectric material”, *Advanced Science Letters*, 19(1):37-41, 2013.

Experimental Study on the Optimal Layering Position of the Piezocomposite Electricity Generating Element Built-in an Innovative Traffic Load-Measuring Bridge Bearing

Jinkyoo F. Choo^a, Dong-Ho Ha^b, Chang Hyung Lee^c, Won Seo Jang^d

Department of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

^ajfchoo@konkuk.ac.kr, ^bhadongho@konkuk.ac.kr, ^cchang773@hotmail.com, ^dariell7@naver.com

Keywords: Bridge bearing, Piezocomposite electricity generating element (PCGE), Dynamic loading test, Load measurement, Efficiency of electricity generation

Abstract. The bearings of a bridge are indispensable structural members, which support the superstructure, transfer the loads of the superstructure to the substructure and, accommodate the horizontal and vertical motions of the superstructure caused by all types of loads like traffic. Such traffic loads induce the bridge to vibrate but this energy is wasted. Therefore, a piezocomposite electricity generating element (PCGE) has been introduced in the bearing to exploit effectively this vibrational energy. The bridge bearing with built-in PCGE was seen to be effective for measuring the traffic loads and, detecting eventual overloaded or overspeeding vehicles. In a will to optimize the amount of energy generated by this bearing, this study compares experimentally the amount of electricity produced by the PCGE with respect to its position in the bridge bearing through a series of dynamic loading tests to find out the position of the PCGE providing the most efficient electricity generation.

Introduction

Bridges vibrate under the crossing of traffic but the corresponding vibrational energy is generally wasted. Therefore, the application of the piezoelectric effect provided by certain non-conducting materials has been adopted to exploit the energy generated by the motion or vibrations of the superstructure. The piezoelectric effect stands for the property of certain crystals to produce electricity or electric polarity by applying a mechanical stress. Besides, the bearings of a bridge are natural and indispensable structural members, which support the superstructure, transfer the loads of the superstructure to the substructure and, accommodate the horizontal and vertical motions of the superstructure caused by all types of loads. Accordingly, the idea is to embed a piezoelectric material in the bridge bearing to exploit the unused vibrational energy of the bridge so as to measure the traffic loads, detect eventual overloaded or overspeeding vehicles. This solution enables to minimize the costs of installation and protect the highly brittle piezoelectric material from direct application of the loads. Moreover, in order to strengthen the resistance of the piezoelectric material to stresses and increase the efficiency of electricity production, the piezocomposite electricity generating element (PCGE) developed by our research team is introduced in the bearing [1].

Among the various types of bridge bearing, the widely applied pot bearing was selected and subjected to a series of dynamic tests conducted using a universal testing machine (UTM). The tests were performed by applying a permanent load with harmonic cyclic loads at different frequencies to simulate the loading conditions of a real bridge bearing. The results showed a linear relationship between the loading and the voltage output by the PCGE. The tests also revealed that the output voltage tended to reduce with larger permanent load but this loss remained practically insignificant even when the permanent load was doubled [2,3,4]. The linearity of the relationship between the loading and output voltage made it possible to confirm that the so-developed bridge bearing with built-in PCGE will be effective in measuring accurately the loads of the vehicle crossing the bridge.

In parallel with these tests, another series of tests was also implemented to increase the efficiency of the electricity generated by the bridge bearing with built-in PCGE. To that goal, the output voltage

generated by the PCGE was compared for diverse positions of the PCGE inside the pot bearing to find the optimal position of the PCGE among the available positions. These tests and the corresponding results are presented in this paper.

Bridge Bearing with Built-in PCGE

The pot bearing shown in Fig. 1 was selected as a representative bridge bearing. Pot bearing is composed by a polytetrafluoroethylene (PTFE) plate disposed inside a steel pot, which presses the top of the PTFE. The PTFE functions like a viscous fluid inside a hydraulic jack, and the top steel plate behaves like a piston. Inside the pot, the deformation of the PTFE is restricted. Pot bearings are designed to carry combinations of vertical loads, horizontal loads, longitudinal and transversal movements, and rotations (Fig. 1). Considering the small space available within the pot bearing, a thin piezocomposite electricity generating element with dimensions of 76×76 mm (PCGE, Fig. 1) is inserted in the system. The multilayered piezoelectric PCGE structure with six layers of piezoceramic, glass/epoxy, and carbon/epoxy has been designed to enhance the durability of the PZT and increase its resistance to compressive mechanical strains. The PCGE generator has been designed to enable the generating layer to be kept apart from the flexural neutral surface of the generator so as to yield larger output voltage and power.

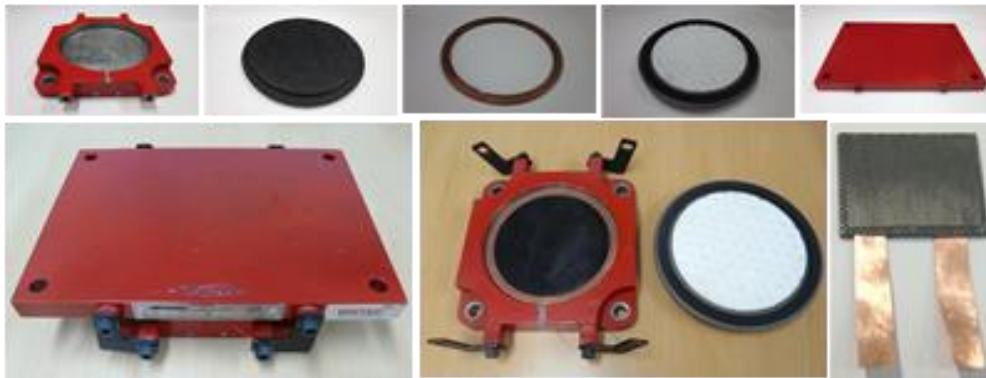


Fig. 1 Pot bearing and its components (pot plate, elastomeric disc, brass sealing ring, piston with PTFE, slide plate) and PCGE used in the tests

Test Setup

For the purpose of the tests, several layers of elastomer were adopted instead of the circular and monolithic PTFE disc so as to be able to dispose the PCGE at diverse heights inside the bearing. The position of the PCGE is varied from 0 mm (A), 2.4 mm (B), 3.6 mm (C) to 6.0 mm (D) from the steel plate at the bottom as shown in Fig. 2. The heights of 7.2 mm and 12.5 mm could not be achieved due to the presence of the brass sealing rings, which cut the connecting wires.

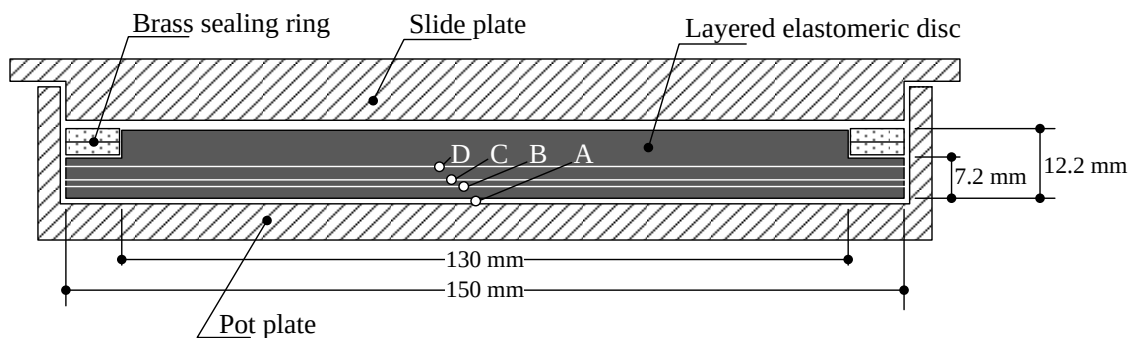


Fig. 2 Shape of elastomeric disc inside the pot bearing and considered heights of PCGE

In order to simulate real conditions, live load of 150 kN in the form of a harmonic loading at frequency of 1 Hz under a permanent load of 100 kN was applied using a UTM for the 4 considered heights and the corresponding output voltages were compared. For the measurement, the PCGE was connected to a data acquisition system (NI cDAQ-9178) equipped with a voltmeter (NI-9225) and load cell (SM-500L CAS, NI-9237) to measure respectively the output voltage and applied loads during the tests (Fig. 3).

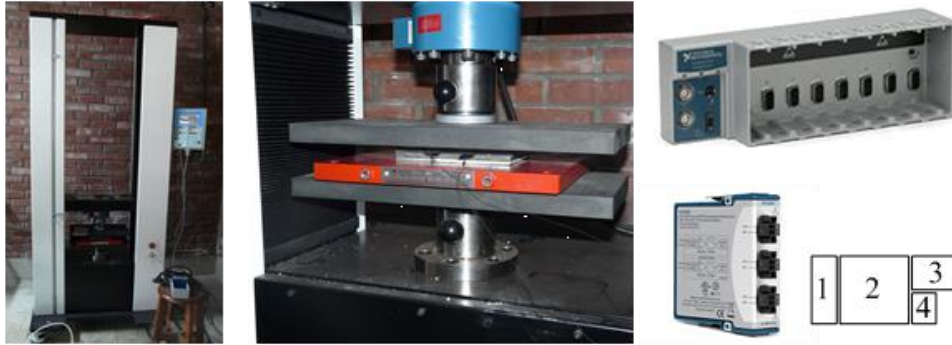


Fig.3 Testing equipment: (1) UTM, (2) Installed pot bearing, (3) NI cDAQ-9178, (4) NI-9225 [5]

Test Results and Discussion

Fig. 4 plots the time histories of the output voltage measured for the considered heights of the PCGE inside the pot bearing under permanent load of 100 kN and harmonic live load of 150 kN.

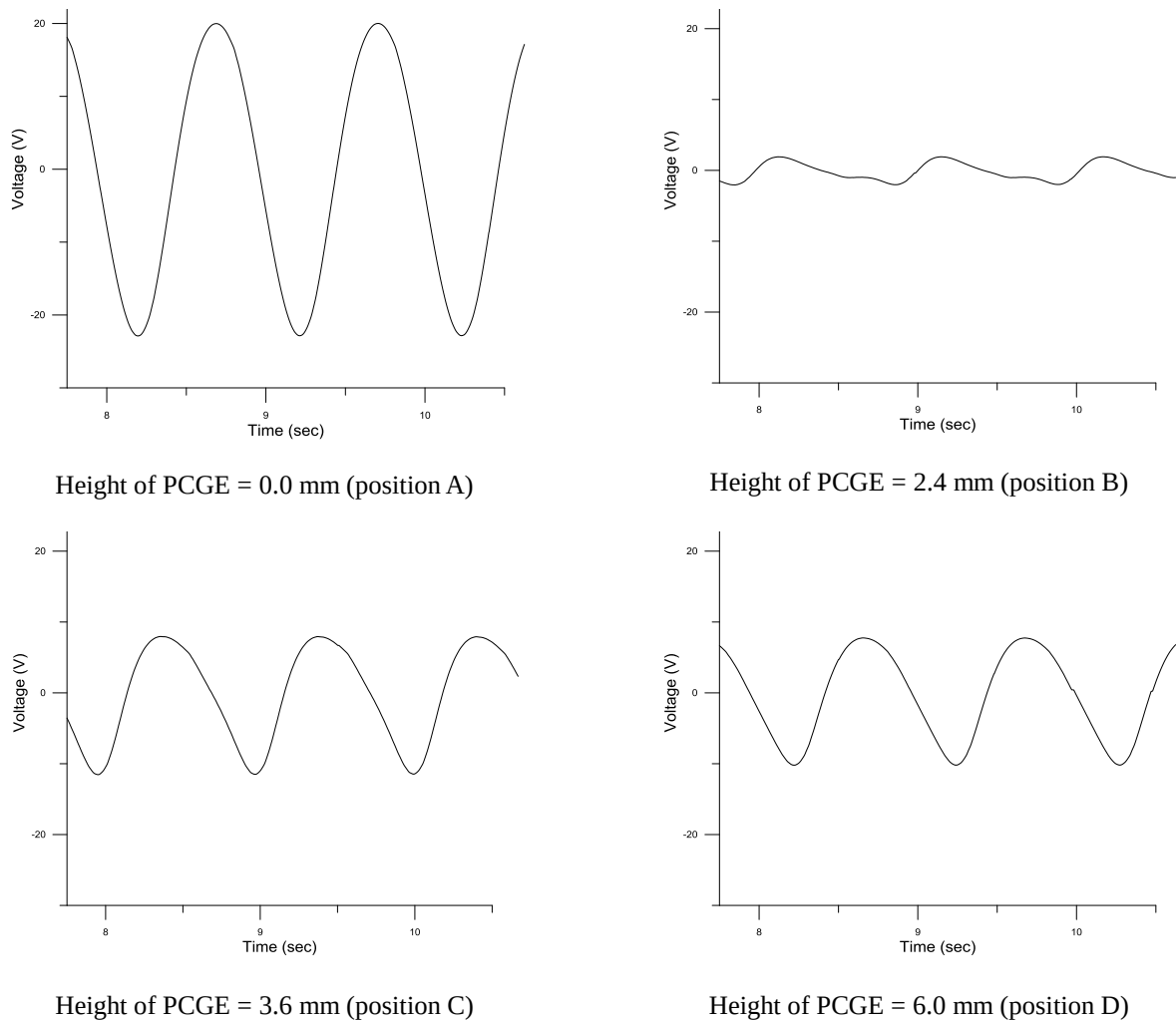


Fig. 4 Output voltage of PCGE measured according to height of PCGE inside the pot bearing

The simple comparison of the graphs in Fig. 4 shows clearly that installing the PCGE at the bottom of the pot steel plate with the elastomer disc disposed above (position A) generates the largest output voltage. This result can be explained by the fact that, in such position, the PCGE experiences the largest stress caused by the harmonic load representing the traffic load crossing the bridge since the PCGE is at its bottom supported by a steel plate that does not experience strain and at its top in contact with the elastomeric material which experiences comparatively large strain. This difference in the strains above and below the PCGE explains that the position A is the one enabling the PCGE to generate the largest output voltage. Besides, the other positions put the PCGE inside the elastomeric layer making the PCGE subjected to comparable strains at its upper and lower faces and thus, less stress and less electricity generation.

Fig. 5 plots the maximum output voltage in each position with respect to the applied load. It can be observed that the heights of the PCGE generating the largest output voltage are in descending sequence: 0.0 mm (A) > 6.0 mm (D) > 3.6 mm (C) > 2.4 mm (B). The linearity of the relationship is slightly degraded due to the fact that the layers of elastomer presented some defects compared to the original monolithic elastomer pad. This series of tests demonstrated that the optimal position of the PCGE in the pot bearing is when the PCGE is installed directly on the bottom of the base plate of the bearing.

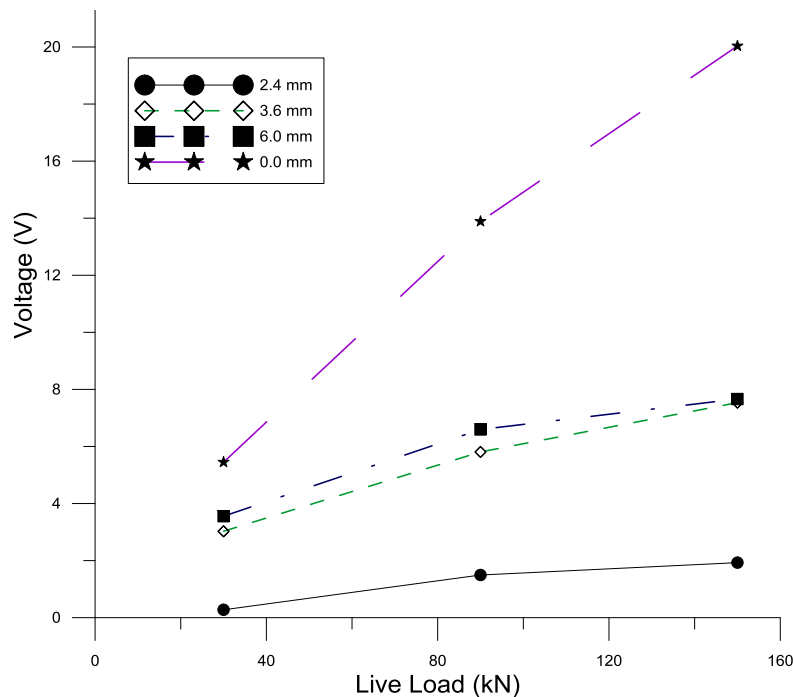


Fig. 5 Maximum output voltage according to load per height of PCGE inside the pot bearing

Conclusions

An innovative bridge bearing with built-in PCGE has been developed to monitor the traffic load crossing the bridge and exploit the vibrational energy of the bridge. Previous tests conducted by our research team confirmed the feasibility of the so-developed device in measuring the traffic loads and, eventually detecting overloaded or overspeeding vehicles. This paper presented the results of another series of tests dedicated to achieve the best electricity generating efficiency by finding out the optimal position of the PCGE in the bearing. To that goal, a reduced-scale pot bearing was fabricated and subjected to dynamic tests using a UTM so as to simulate realistic traffic conditions. The efficiency of electricity generation was then measured for diverse positions of the PCGE inside the pot bearing. The traditional monolithic elastomeric disc of the pot bearing was replaced by layers of elastomeric pads so as to be able to vary the position of the PCGE from the bottom of the base plate to the highest possible

position in the bearing. The measurements of the corresponding output voltages were compared and showed that the best position of the PCGE was at the bottom of the base plate. Such results will help to realize optimal efficiency of the PCGE when applied to the developed bridge bearing with built-in PCGE. Further study will be devoted to develop a protocol allowing to identify correctly the vehicles using the output voltage produced at the bearing of the bridge.

Acknowledgments

This research was supported by a grant from Construction Technology Innovation Program (CTIP) funded by the Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs (MLTM) of Korean government.

References

- [1] J. Zhao, N.S. Goo, J.F. Choo, D.H. Ha: Design and performance evaluation of a d33-mode piezocomposite electricity generating element. submitted to J. Mechanical Science and Technology (2012)
- [2] D.H. Ha, W.S. Jang, J.F. Choo, C.H. Lee: Dynamic test of a bearing with built-in piezo-composite generating element. Proceedings of EESK Conference 2013 Vol.17 (2013), p.101-104
- [3] D.H. Ha, J.F. Choo, C.H. Lee, W.S. Jang, N.S. Goo: Dynamic Characteristics of a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-in Piezocomposite Element. 2013 International Symposium on Mechatronics and Applied Mechanics, May 15-16, 2013, Nanjing, China (2013)
- [4] J.F. Choo, D.H. Ha, N.S. Goo, W.S. Jang : Preliminary Tests for a Multi-Functional Bridge Bearing with Built-In Piezoelectric Material. Advanced Science Letters, Adv. Sci. Lett. 19, 37-41 (2013)
- [5] Information on <http://www.ni.com/korea> last visited 2013.06.15.