발 간 등 록 번 호
11-7002282-000014-01

13PRTD-C059916-03

국토교통기술촉진연구사업

철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발

최 종 보 고 서

2014. 8. 28

주관연구기관 / 한양대학교 산학협력단
위탁연구기관 / 고려대학교 산학협력단

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발"에 관한 연구과제의 최종보고서로 제출합니다.

2014 . 08 . 28

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단
주관연구책임자 : 성 태 현
협동연구기관명 : 고려대학교 산학협력단
협동연구책임자 : 남 산

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>13PRTD-
C059916-03</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2011.09.30.~
2014.07.30.</td><td>단 계 구 분</td><td>1/1</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">미래철도기술개발사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발</td></tr>
<tr><td>단위과제명</td><td colspan="4">①철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발
②고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>성 태 현</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 34 명
내부 : 32 명
외부 : 2 명</td><td>총연구비</td><td>정부 : 900,000 천원
기업 : 0천원
계 : 900,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">한양대학교 산학협력단</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">고려대학교 산학협력단</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)</td><td>보고서면수</td><td>161</td></tr>
<tr><td colspan="6">○ 본 연구의 최종 성과는 열차별로 진동을 분석하고 결과 값 분석을 통하여 제작된 0.15 mW/cm^3 의 발전량을 낼 수 있는 압전 하베스팅 시스템으로써 세계 최초로 열차의 진동을 효과적으로 수확할 수 있도록 설계 및 제작되었음.

○ 총 8 종류의 상용화된 열차와 1 종류의 실험 열차에서 열차의 진동 측정 및 분석이 이루어졌으며 ITX-청춘 열차를 실험에 적합하다고 판단함. 측정 결과를 통하여 총 14 종류의 압전 발전 시스템이 개발되었고 이중 Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 시스템이 채택되어 최대 발전량 0.71 mW/cm^{3}까지 달성함. 이는 최종 목표인 0.15 mW/cm^{3}에 비해 약 4.7배 높은 값임.

○ 본 연구는 철도 차량에서의 압전 에너지 하베스팅을 위해 에너지 하베스팅 특성과 전기·기계 변환 특성, 그리고 기계적 특성이 모두 우수한 조성을 개발함. 실제 에너지 하베스팅 적용 시 값싼 상용 전극과 동시 소성이 가능하도록 900℃ 이하에서의 저온 소결을 달성함. 최종적으로 $d_{33}\times g_{33}$ = 20,161, k_p = 0.6, Q_m = 1020, 소결온도 900℃, Fatigue cycle 100,000 이상의 우수한 특성을 가지는 조성을 개발함.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">압전 하베스팅, 압전 소자, 철도 차량, 철도 진동,
미활용 에너지</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Piezoelectric harvesting, Piezoelectric device, Train car,
Train vibration, Unutilized energy</td></tr>
</table>

요 약 문

요 약 서			
사 업 명	미래철도기술개발사업	과제번호	13PRTD-C059916-03
과 제 명	철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발		
연구기관	한양대학교 산학협력단	연구책임자	성 태 현

요약서 (연구개발목표 및 내용)	
연구개발 개요	○ 철도차량 진동측정 및 분석을 통하여 선별되어진 열차 조건에 적합한 압전 발전 시스템 연구개발을 위해 압전 시스템 설계제작 및 적용
최종목표	○ 철도차량 진동 측정 및 분석을 통하여 선별되어진 열차 조건에서, 발전량 0.15 mW/cm^3 의 압전 하베스팅 시스템[1)] ※ 환산하여 계산하면, KTX 열차 1량 (40 m^2) 당 40 W 전력량 발전 가능 ○ 고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발 - d_{33} x g_{33} ≧ 15K, k_p ≧ 0.6, Qm ≧ 800, 소결온도 ≦ 1000℃의 압전 세라믹 조성 개발 ○ 고성능 압전 에너지 하베스팅용 소자 개발 - Energy density ≧ 10 mW (인가응력 = 0.3G), 압전 세라믹 사이즈 = 5 cm x 3 cm
연구내용 및 범위	○ 철도차량 진동 측정 및 분석을 통하여 선별되어진 열차 조건에서 0.15 mW/cm^3 발전 시스템 설계 - 철도 차량 진동 측정 및 분석 - 압전 발전 시스템 디자인 설계 - 압전 에너지 하베스팅용 압전 소자 제작 (5 x 3 cm^2) - 캔틸레버 등 휨 구조 특성 분석 - 충격 (impact), 진동 (vibration) 분석 후 압전 발전 시스템 방식 선정 - 임피던스 매칭 및 공진주파수 도출을 통해 발전량 극대화 연구 - 시스템 제작 및 구현을 통해 발전 시스템 실험 및 평가 ○ 고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발 - d_{33} x g_{33} ≧ 15K, kp ≧ 0.6, Qm ≧ 800, 소결온도 ≦ 1000°C의 압전 세라믹 조성 개발 - 세라믹 혼합 비율의 조절을 통한 특성 연구 - SEM 과 XRD를 통한 상합성 및 구조분석 - 조성 첨가량의 조건을 도출하여 소결온도 분석 및 효과 분석 ○ 시스템 성능 및 신뢰성 검증을 위한 철도차량에 시범설치/적용하여 평가 - 틸팅열차에 현장 적용하여 제작된 시스템 평가

1) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

요약서 (연도별 주요 내용)		
구분	연구개발목표	연구개발내용 및 방법
1차년도	철도차량 진동측정 및 분석을 통한 시스템 설계 및 제작 착수	▪ 철도차량 진동 측정 및 분석 ▪ 한국철도 기술연구원과 업무 협조 체제 구축 ▪ 압전 발전 시스템 방식 결정 ▪ 압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작 착수
	d_{33} X g_{33}>13k, k_p>0.5, Q_m>500, 소결온도<1000℃의 압전 세라믹 조성	▪ PZT 세라믹스에 PZNN을 포함한 relaxor를 고용하여 압전 특성의 향상을 유도 ▪ relaxor의 고용량과 Zr/Ti 비율에 따른 MPB변화를 이해하고 그 근방에서 d_{33} X g_{33}가 우수한 조성을 선택
2차년도	압전 시스템 제작 및 열차 적용 운전	▪ 압전 발전을 위한 철도 차량 선별 ▪ 압전 발전 시스템 제작 - 압전소자 제작 및 정류 DC/DC 회로 선정 ▪ 열차에 현장 적용하여 성능 시험
	d_{33} X g_{33}>14k, k_p>0.55, Q_m>800, 소결온도<900℃의 압전 세라믹 조성	▪ 높은 압전 특성을 가지는 세라믹 조성에 MnO_2를 첨가하여 Q_m의 증가를 유도 ▪ CuO등의 첨가제를 이용하여 900℃ 이하의 저온 소결을 유도
	d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성	▪ 개발 조성의 MLCC 및 소자적용 가능성 판단을 위한 전극 반응성 연구
3차년도	열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm^3)[2]	▪ 현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토 및 분석 ▪ 시스템 보완 및 개선 ▪ 결과 평가 및 분석
	d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100000, Young`s Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성	▪ ZnO등의 첨가제를 통하여 Fatigue Cycle의 향상을 유도 ▪ 낮은 Young`s Modulus를 가지는 최적의 소결 조건 확립
	개발 조성의 상용화를 위한 신뢰도 평가 (신뢰도>95%)	▪ 개발 조성의 상용화를 위해 다양한 조건에서 신뢰성 평가 시행 ▪ 미세 구조가 신뢰도에 미치는 영향 파악

2) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

<table>
<tr><th colspan="3">요약서 (연구성과 활용방안)</th></tr>
<tr><td rowspan="2">연구성과</td><td>기술적
기대성과</td><td>○ 열차 한 량 당 하루 평균 1.125 kWh, 연평균 410.625 kWh의 친환경 전력 발전.
- 산출근거
· 모듈 1개 당 발전량 = 10 mW/100 cm^2
· 열차 1량 당 발전량 = 10 mW/100 cm^2 × 40 m^2
(KTX 열차 1량 면적의 근사치)
= 40 W/량 (LED 램프 2,000개 점등 가능)

○ 발전 시스템 구축 및 평가기술 확립의 구체화 및 상용화 가속화 할 수 있음</td></tr>
<tr><td>사회·경제적
파급효과</td><td>○ 진동에너지를 이용한 압전 하베스팅 기술개발은 각종 휴대기기에서 소비된 폐건전지의 배출을 줄일 수 있음
- 이에 따른 반영구적 에너지 절감 및 수은, 납, 망간 등에 의한 중금속 오염의 가능성을 배제함 할 수 있음
- 새로운 개념의 에너지 발전장치의 핵심 요소기술을 확보함으로써 국가 에너지 산업 경쟁력을 증진시킬 수 있음

○ 친환경적 측면에서 국가적으로 좋은 이미지를 가질 수 있으며, 범국민적으로 신재생에너지를 사용하게 하는 환경운동적인 효과를 거둘 수 있음</td></tr>
<tr><td colspan="2">활용방안</td><td>○ 개발하고자 하는 ‘철도차량의 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발’은 연구 개발 진행 중 모의 테스트를 위해 철도 차량에서 간단한 구조 변경만으로 시범 운전을 진행 할 수 있음

○ 본 연구개발 과제 종료 즉시, 자기부상 열차, 고속 열차, 틸팅 열차, 지하철 등에 적용할 수 있으며 더 나아가 전기버스, 전기자동차까지 활용가능성을 가지고 있음</td></tr>
</table>

SUMMARY

Piezoelectricity is a good candidate for the tool of energy harvesting system to scavenge ambient energy from vibrational sources such as wind, traffic, human movement and railroad vehicles. In this R&D project, in order to apply piezoelectric energy harvesting system to the commercialized railroad vehicles in South Korea, vibratoin was measured for each types of train and vibration characteristics were analyzed to select the applicable type of vehicle.

After the measurement and analysis of the vehicle vibration, the vehicle was selected and piezoelectric energy harvesting system was optimized for the selected vehicle. Different prototypes were designed and produced for piezoelectric energy harvesting system through structural analysis of the system. The R&D project was conducted with having a consultation of the vehicle manufacturer's operating authority(Hyundai Rotem Inc.). Discussions were held for practical ways of Railway Authority(Korea Rail Network Authority).

As results, power generation of 0.15 mW/cm^3, which is the final goal, was achieved by using piezoelectric energy harvesting system for the selected train condition based on vibration measurement and analysis.

Also, piezoelectric material composition was developed to enhance piezoelectric performance. High piezoelectric property and energy harvesting properties as well as good mechanical properties are required for materials to be applied in piezoelectric energy harvesting in train systems. However, it is difficult to both achieve good harvesting and mechanical properties since they normally inverse proportion to each other. Nevertheless, We have achieved good piezoelectricity and energy harvesting factors and added MnO_2 as a hardener to decrease dielectric constant and increase Q_m in PZT-PZNN system. We also added CuO for low temperature sintering and achieved $d_{33} \times g_{33}$=20,161, k_p=0.6, Q_m=1020, more than 100,000 cycles till fatigue at 90 0℃. Reliability assessment for the commercialization of developed material composition was held.

All in all, in order to apply the piezoelectricity to the commercialized railroad vehicle in South Korea, vibration characteristics were measured and analyzed. Also, the applicable piezoelectric energy harvesting system was designed and produced form the material composition development, structural analysis, and electrical circuit matching of the system to obtain the output power of 0.15 mW/cm^3.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction of the R&D project ····· 13

Part 1. Purpose and needs of the R&D ····· 13

1. Purpose of the R&D ····· 13

2. Needs of the R&D ····· 13

Part 2. Definition, scope, characteristics of the R&D ····· 14

1. Definition of the R&D ····· 14

2. Scope of the R&D ····· 26

3. Characteristics of the R&D ····· 27

Part 3. Domestic and international technical developments in related fields ···· 27

1. Domestic technical developments in related fields ····· 27

2. International technical developments in related fields ····· 28

3. Patent trends ····· 30

A. Domestic patent trends ····· 30

B. International patent trends ····· 32

Part 4. Relevant position among developed research results etc. ····· 35

Chapter 2 Procedure and results of R&D ····· 37

Part 1. Strategies of R&D ····· 37

1. Strategies for conducting research ····· 37

2. Annual detailed plans and methods for conducting research ····· 38

Part 2. Research performance process and content ····· 39

1. Research procedure of 1st year ····· 39

A. Design and production of the system based on measurement and analysis of train vibration ····· 39

B. Developing piezoelectric ceramic composition of $d_{33} \times g_{33}$ = 13K, K_p>0.5, Q_m>500, Sintering temperature<1000℃ ····· 42

2. Research procedure of 2nd year ····· 45

A. Application of piezoelectric system for train ····· 45

B. Developing piezoelectric ceramic composition of $d_{33} X g_{33}$>14K, k_p>0.55, Q_m>800, Sintering temperature<900℃ ····· 48

C. Developing piezoelectric ceramic composition of $d_{33} X g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, Sintering temperature<900℃ ····· 53

3. Research procedure of 3rd year ····· 54

A. Assesment and complementary repair of the train application (0.15 mW/cm^3) 54

B. Developing piezoelectric ceramic composition of d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, Sintering temperature <900℃, Fatigue Cycle>100,000, Young's Modulus<80GPa 69
C. Reliability assessment for the commercialization of developed material composition (reliability>95%) ····· 70
Part 3. Results of the R&D and verification method of the results ····· 74
1. Results of the R&D ····· 74
2. Verification method of the results ····· 88
A. Assesment and complementary repair of the train (0.15 mW/cm^3) ····· 88
B. Piezoelectric ceramic composition of d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, Sintering Temperature <900℃, Fatigue Cycle>100,000, Young's Modulus<80GPa ···· 89

Chapter 3 Final research results and application results ····· 93
Part 1. Power generation of 0.15 mW/cm^3 by using piezoelectric energy harvesting system for the selected train condition based on vibration measurement and analysis. ····· 93
Part 2 . Development of material composition for energy harvesting system with high efficiency (Developing piezoelectric ceramic composition of d_{33} x g_{33} ≧ 15K, k_p ≧ 0.6, Q_m ≧ 800, Sintering temperature ≦ 1000℃) ···· 94
Part 3 . Development of piezoelectric energy harvesting module with high efficiency (Energy density ≧ 10 mW (applied force = 0.3G), piezoelectric ceramic dimension = 5 cm x 3 cm) ····· 95
Part 4 . Developing piezoelectric ceramic composition of d_{33}×g_{33} > 15K, k_P > 0.6, Q_m > 1000, Fatigue Cycle > 100000, Sintering temperature < 900℃, Young's Modulus < 80 GPa ····· 95
Part 5 . Production of piezoelectric energy harvesting system ····· 96
Part 6. Main research results (academic results and technical results) ····· 99
1. Academic results ····· 99
2. Technical results ····· 106
Part 7. Technology implementation and application examples ····· 107
Part 8. Domestic and international market prospects of developed technique 113

Chapter 4 Achievement of research objectives and effects ···· 115
Part 1. Goal achievement of the R&D ····· 115
1. Progress rate of performance during current year ····· 115
2. Review of R&D achievement table ····· 116
A. Achievement and check list of 1st year ····· 116

B. Achievement and check list of 2nd year ····· 117
C. Achievement and check list of 3rd year ····· 118
Part 2 . Analysis of technical effect of the R&D ····· 119
1. Technical importance and impact ····· 119
Part 3 . Economic analysis of the R&D results(Market creation, employment etc.) 120
1. Economic importance and impact ····· 120
2. Economic impact of employment ····· 122
Part 4 . Analysis of policy effect of the R&D results ····· 123

Chapter 5 Utilization of the R&D results and further research needs ····· 124
Part 1 . Future utilization of the research results ····· 124
Part 2 . Further research needs etc. ····· 127

References ····· 128

[Appendixes] ····· 129
1. Complementary table based on reviewers of 2nd year ····· 129
A. Consultation with the vehicle manufacturer's operating authority ····· 130
B. Discuss and explore practical ways of Railway Authority ····· 131
2. Evidence of quantitative and qualitative performance ····· 132
A. Achievement and check list of final year ····· 132
B. Evidence of final year - 0.15 mW/cm^3 output ····· 133
C. Evidence of final year - Development of piezoelectric ceramic composition 137
D. Evidence of final year - Patent application / registration (Goal 4, Achieved 5) 140
E. Evidence of final year - SCI paper (Goal 2, Achieved 12) ····· 145
F. Evidence of final year - Prototype production (Goal 1, Achieved 4) ····· 157

목 차

제1장 연구개발과제 개요 ····· 13
제1절. 연구개발의 목적 및 필요성 ····· 13
1. 연구개발의 목적 ····· 13
2. 연구개발의 필요성 ····· 13
제2절. 연구개발의 정의, 범위, 특징 ····· 14
1. 연구개발의 정의 ····· 14
2. 연구개발의 범위 ····· 26
3. 연구개발의 특징 ····· 27
제3절. 관련분야의 국내외 기술개발 현황 ····· 27
1. 관련분야의 국내 기술개발 현황 ····· 27
2. 관련분야의 국외 기술개발 현황 ····· 28
3. 특허 동향 ····· 30
가. 국내 특허 동향 ····· 30
나. 국외 특허 동향 ····· 32
제4절. 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치 등 ····· 35

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과 ····· 37
제1절. 연구수행 전략 ····· 37
1. 연구수행 추진전략 ····· 37
2. 연구수행 추진체계 연차별 세부 추진계획 및 방법 ····· 38
제2절. 연구수행과정 및 내용 ····· 39
1. 1차년도 연구수행 ····· 39
가. 철도차량 진동 측정 및 분석을 통한 시스템 설계 및 제작 착수 ····· 39
나. $d_{33}\times g_{33}$ = 13K, K_p>0.5, Q_m>500, 소결온도<1000℃의 압전 세라믹 조성 ····· 42
2. 2차년도 연구수행 ····· 45
가. 압전 시스템의 열차 적용 운전 ····· 45
나. d_{33} X g_{33}>14K, k_p>0.55, Q_m>800, 소결온도<900℃의 압전 세라믹 조성 ····· 48
다. d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃의 압전 세라믹 조성 ····· 53
3. 3차년도 연구수행 ····· 54
가. 열차적용운전 평가 및 수정 보완 (0.15 mW/cm^3) ····· 54
나. d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100,000,
Young's Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성 ····· 69
다. 개발 조성의 상용화를 위한 신뢰도 평가 (신뢰도>95%) ····· 70
제3절. 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등 ····· 74
1. 연구수행결과 ····· 74
2. 연구수행결과의 검증 방법 ····· 88

가. 열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm^3) ····· 88
나. d_{33} X g_{33}>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100,000, Young's Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성 ····· 89

제3장 최종 연구성과 및 적용실적 ····· 93

제1절. 열차별 진동 특성 측정 및 분석단계를 걸쳐 선별되어진 열차 조건에서, 압전 하베스팅 시스템을 이용하여 0.15 mW/cm^{3}를 발전 ····· 93
제2절. 고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발 (d_{33} x g_{33} ≧ 15K, k_p ≧ 0.6, Q_m ≧ 800, 소결온도 ≦ 1000℃의 압전 세라믹 조성 개발) ····· 94
제3절. 고성능 압전 에너지 하베스팅용 소자 개발 (Energy density ≧ 10 mW (인가응력 = 0.3G), 압전 세라믹 사이즈 = 5 cm x 3 cm) ····· 95
제4절. d_{33}×g_{33} > 15K, k_P > 0.6, Q_m > 1000, Fatigue Cycle > 100000, 소결온도 < 900℃, Young's Modulus < 80 GPa의 압전 세라믹 조성 ···· 95
제5절. 압전 발전 시스템 제작 ····· 96
제6절. 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과) ····· 99
1. 학술적 성과 ····· 99
2. 기술적 성과 ····· 106
제7절. 기술 실시 및 적용사례 ····· 107
제8절. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 113

제4장 연구목표 달성 및 효과 ····· 115

제1절. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 115
1. 당해연도 수행 진도율 ····· 115
2. 연구개발 성과점검 달성도 ····· 116
가. 1차년도 성과점검기준표 ····· 116
나. 2차년도 성과점검기준표 ····· 117
다. 3차년도 성과점검기준표 ····· 118
제2절. 연구개발 성과의 기술적 효과분석 ····· 119
1. 기술적 중요성 및 파급효과 ····· 119
제3절. 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등) ····· 120
1. 경제적 중요성 및 파급효과 ····· 120
2. 경제적 고용창출 효과 ····· 122
제4절. 연구개발 성과의 정책적 효과분석 ····· 123

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성 ····· 124
제1절. 연구성과 향후 활용방안 ····· 124
제2절. 추가연구 필요성 등 ····· 124

참고문헌 ····· 128

[부 록] ····· 129
1. 2차년도 평가의견에 따른 보완대비표 ····· 129
가. 운영기관 차량제작업체와의 협의 ····· 130
나. 철도시설공단과의 협의 및 실용화 방안 모색 ····· 131
2. 정량적 및 정성적 성과 증빙자료 ····· 132
가. 최종년도 성과 점검 기준표 ····· 132
나. 최종년도 증빙자료 - 0.15 mW/cm^3 발전량 ····· 133
다. 최종년도 증빙자료 - 압전 세라믹 조성 개발 ····· 137
라. 최종년도 증빙자료 - 특허출원/등록 (목표 4건, 달성 5건) ····· 140
마. 최종년도 증빙자료 - SCI논문 (목표 2건, 달성 12건) ····· 145
바. 최종년도 증빙자료 - 시작품제작 (목표 1건, 달성 4건) ····· 157

제1장 연구개발과제 개요

제1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

○ 압전 하베스팅 시스템을 통해 현재 국내에서 상용화되어 운행하는 열차의 진동과 같은 미활용 에너지를 수확함.

○ 압전 하베스팅 시스템의 발전량 향상을 위하여 필수적인 고효율 및 고성능 압전 조성 개발함.

2. 연구개발의 필요성

○ 압전 에너지 하베스팅은 미활용되고 있는 압력, 충격, 진동과 같은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 친환경/청정/재활용 자가 발전임.

○ 철도차량에 압전 하베스팅 기술을 접목시키는 본 기술 개발은 아직 전 세계적으로 개발된 적이 없는 신기술로서 이 분야에서 선도적인 역할을 담당하게 됨.

○ 철도차량의 진동에너지를 이용한 압전 하베스팅 module 개발과 기술의 확보는 향후 신규산업 창출과 신규시장 선점을 위해 개발이 필요함.

○ 우리나라 같이 에너지의 자립도가 5% 미만인 에너지 자원 빈국의 경우 에너지 절약의 효과와 함께 환경을 훼손하지 않으면서 발전이 가능한 대체에너지 자원 확보의 가능성을 열어줌.

○ 압전 소자는 세라믹 또는 복합 소재 기반의 압전 소자를 사용하므로, 전자 노이즈가 발생되지 않으며, 반영구적으로 사용할 수가 있어서 기존의 2차 전지, 연료전지를 대체 또는 보완이 가능한 소규모 발전용으로 사용이 가능함.

○ USN (Ubiquitous Sensor Network) 환경에 대한 전 세계적인 관심이 커지는 상황 속에 환경적 측면의 Energy Harvesting & Maintenance Free Power concept의 구현에 관심이 집중되고 있음.

○ KERI (한국전기연구원)에서 발표한 ‘미래를 바꿀 10대 유망 전기기술’ 중에서 마이크로 발전과 분산전원 부분에 압전 하베스팅 기술이 해당됨.

○ 이러한 세계의 흐름에 한발 앞서고 기술경쟁력을 확보하기 위하여 유해한 배터리 기반의 독립전원 관리의 한계를 극복하고 친환경형 자가발전 개념의 기술을 개발하는 것이 필요함.

○ 압전체 자체는 산업 전반에 핵심 부품으로 사용되고 있으므로 이러한 압전 조성의 개발은 거대한 압전 시장에서 필요한 핵심 기술이 될 수 있으며 그 외에도 회로 등의 모듈 개발을 통하여 에너지 하베스팅 전반에 필요한 전력 저장 회로 기술을 확보 할 수 있고 이는 다른 신재생 에너지 개발에 필요한 저장 회로 기술로 이어짐.

○ MIT 에서 선정한 '10대 유망기술' 중에서 융합기술 부문에 나노 압전 장치 기술이 선정되었으며, 현재 압전 관련 기술은 상당한 사회적 파급효과를 주는 기술로 자리매김 하고 있음.

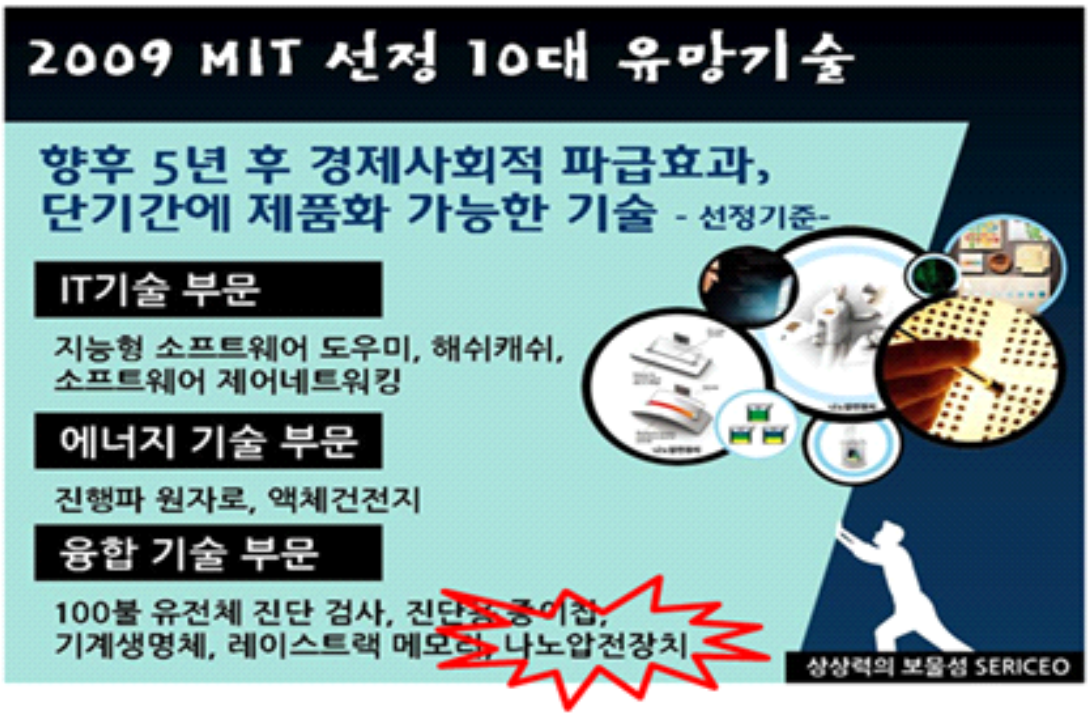


그림 1. 2009 MIT 선정 10대 유망기술

제2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

1. 연구개발의 정의

○ 압전 하베스팅이란 압전 소자에 변형 (stress)이 생기면 소자 내에서 분극현상이 발생하여 전기 에너지로 변환됨.

○ 압전 세라믹 소재란 전기적 에너지를 기계적 에너지로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환 할 수 있는 물질임.

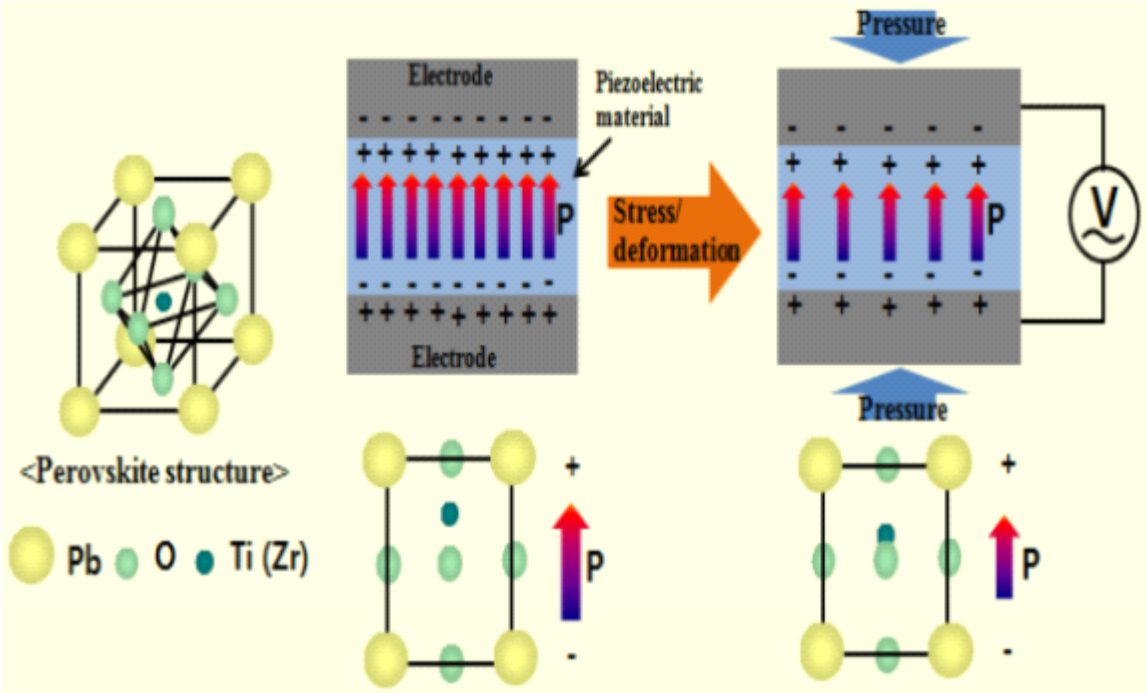


그림 2. 압전 현상에 대한 모식도

○ 압전 세라믹 소자는 일반 물질과는 달리 서로 다른 에너지 특성 (기계적 에너지 ↔ 전기적 에너지)간의 변환이 가능하기 때문에 스마트 물질로 불리며, 1차 변환 및 2차 변환까지 모두 가능함.

- 1차 변환 (압전효과 : 기계적 에너지 → 전기적 에너지)
- 2차 변환 (역압전효과 : 전기적 에너지 → 기계적 에너지)

	기능들	적용분야
전기적 ↓ 기계적	• 초음파 생성 • 소리 발생 • 액츄에이터	• 초음파 발생기 • 가습기 • 스피커, 부저 • 초음파 모터, 포지셔너(positioner)
기계적 ↓ 전기적	• 고전압 생성 • 음파 및 초음파 수신 • 센서	• 이그나이터 (ignitor) • 하이드로 폰 (hydrophone), 마이크로 폰 (microphone) • 가속도계, 자이로스코프 • 초음파 센서 • 압전 에너지 하베스팅
전기적 ↓ 기계적 ↓ 전기적	• 전기 신호 프로세싱 • 거리 측정 • 전압 변환	• 필터(filter), 레조네이터(resonator) • 소나 (SONAR), 초음파 탐침 (ultrasonic probe) • 변압기

그림 3. 압전 현상의 특성을 이용한 기능들과 적용분야

○ 전기적 에너지 → 기계적 에너지

- 일반적으로 전기에너지를 받아서 기계적 에너지로 변환되어 구동되기 때문에 Act에서 말을 따서 Actuator로 쓰이며, 초음파 모터, 스테이지의 미세 조정장치, 압력밸브, 초음파 세척기, 자동차 연료 분사 장치, 잉크젯 프린터 잉크 분사 장치, 핸드폰 진동 패널, 스피커 및 부저 등 진동이나 물리적 변형을 이용한 소자가 주를 이룸.

○기계적 에너지 → 전기적 에너지

- 기계에너지를 우리가 측정하기 쉬운 전기적 신호로 바로 바꾸어 줄 수 있음.
- 따라서 유량 센서, 압력 센서, 가속소 센서, 음향 센서, 초음파 센서 자동차 노킹센서, 자동차 후방감지 센서 등 기계적 진동을 감지하는데 주로 쓰임.
- 이외에도 전기적 에너지가 많이 나오도록 유도하여 방전을 일으키거나, 전기 에너지 자체를 저장하는 분야에도 쓰이며 대표적으로는 압전 발화장치(라이터 및 가스레인지), 자동차 연료 점화 플러그, 에너지 하베스팅 장치가 있음.

○ 전기적 에너지 → 기계적 에너지 → 전기적 에너지

- 전기 신호를 압전 소재의 진동을 이용하여 걸러 내거나 증폭 하는 것으로써 압전 레조네이터나 압전 트랜스포머 등에 주로 쓰임.

○ 이러한 압전 특성은 주로 ABO_3의 결정 구조를 가지는 세라믹에서 나타나며 A 자리에는 이온 반지름이 120 pm 정도로 큰 물질이, B 자리에는 70 pm 정도로 작은 물질이 사용되며 대표적으로 $Pb(Zr,Ti)O_3$ [PZT]나 $(Na,K)NbO_3$ [NKN]이 있음.

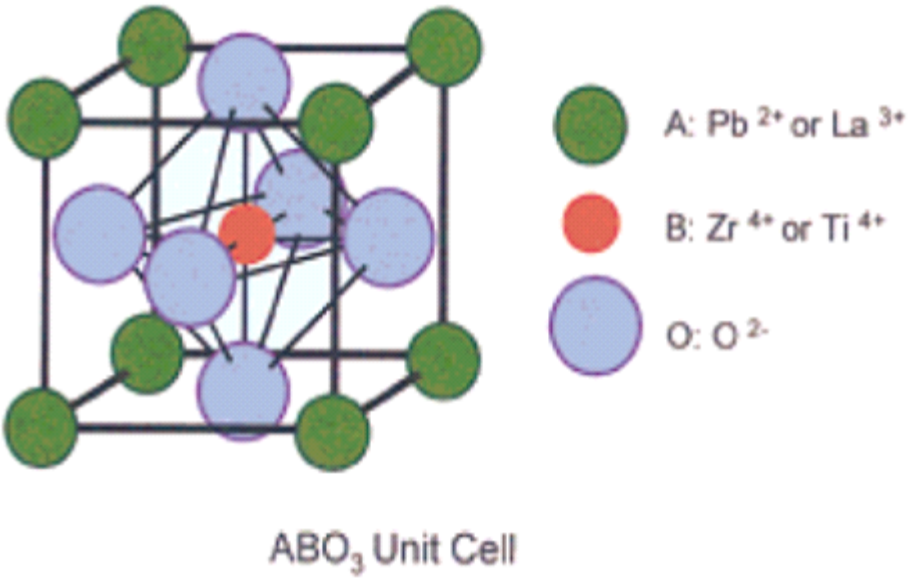


그림 4. ABO_3 구조

○ 기본적으로 압전 세라믹 소재는 상호간의 변환이 매우 정밀하게 선형적으로 가능하고 작은 크기의 모듈에서 변환 시 에너지 효율이 매우 높기 때문에 기존의 전자기기를 대체할 차세대 소재로 각광을 받고 있음.

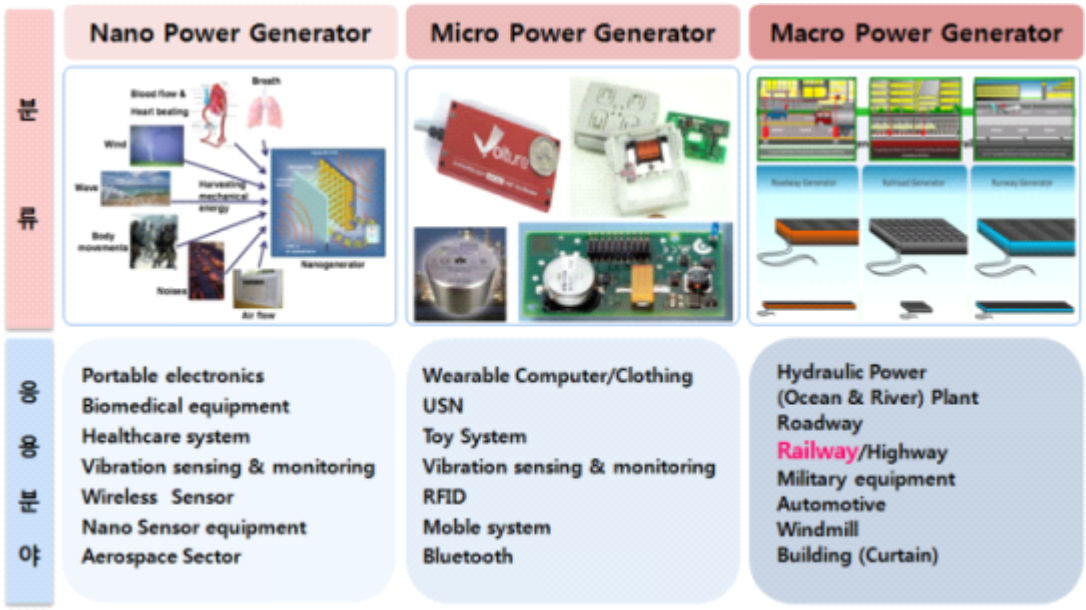


그림 5. 압전 응용 분야

○ 이러한 특성을 이용하여 압전 세라믹은 액츄에이터, 필터, 레조네이터, 센서 등을 포함한 다양한 소자에 응용되고 있어 산업 전반에 걸쳐 그 활용 가치가 매우 큼.

표 1. 산업 분야별 압전 소자의 응용

구 분	응용 소자 및 제품
통신기기	레조네이터, 필터, 디스크 리미네이터, 압전스피커, delay line, 광가변 필터용 미세변위기 등
의료기기	초음파진단용 탐촉자, 초음파 혈류계, 초음파 세척기 등
센서기기	가속도센서, 충격센서, 압력센서, knock 센서, 자동차용 거리센서 등
전자기기	오디오용 필터, 초음파 가습기, 안정기(ballast), buzzer 등
정밀계측기기	압전 마이크로미터, strain gage, positioner 등
디스플레이	LCD backlight용 트랜스포머, 비디오 자동초점용 압전모터, 비디오-카메라용 떨림 방지용 actuator (vibration suppressor) 등
군수용	Military vehicle, space structure 등
actuator	광간섭 AC dilatometer, 가변형 mirror, 가변광회절격자, 현미경용 stage, 절삭오차보정용 device, 유공압제어용 serve valve, VTR head, printer head, ultrasonic knife, 압전 pump 등

○ 압전 세라믹은 전통적으로 Pb를 기반으로 한 $Pb(Zr,Ti)O_3$[PZT] 세라믹스에 그 근간을 두고 있으며, 특히 1950년에 PZT세라믹스가 처음 발견된 이후로 PZT 세라믹스의 상 공존 영역[MPB]에 관한 연구가 활발히 진행되었음.

○ PZT 세라믹스는 기본적으로 단사정 구조를 가지는 PZ상과 정방정 구조를 가지는 PT상의 고용체로써 둘의 고용비가 약 47:53일 때 두 상의 공존을 이루게 되며 또한 이러한 상 공존을 이룰 경우 그 압전 특성이 비약적으로 향상되는 특징을 가짐.

- 아래 그림은 이러한 MPB 영역에서의 압전 특성 향상을 나타내는 그림임.

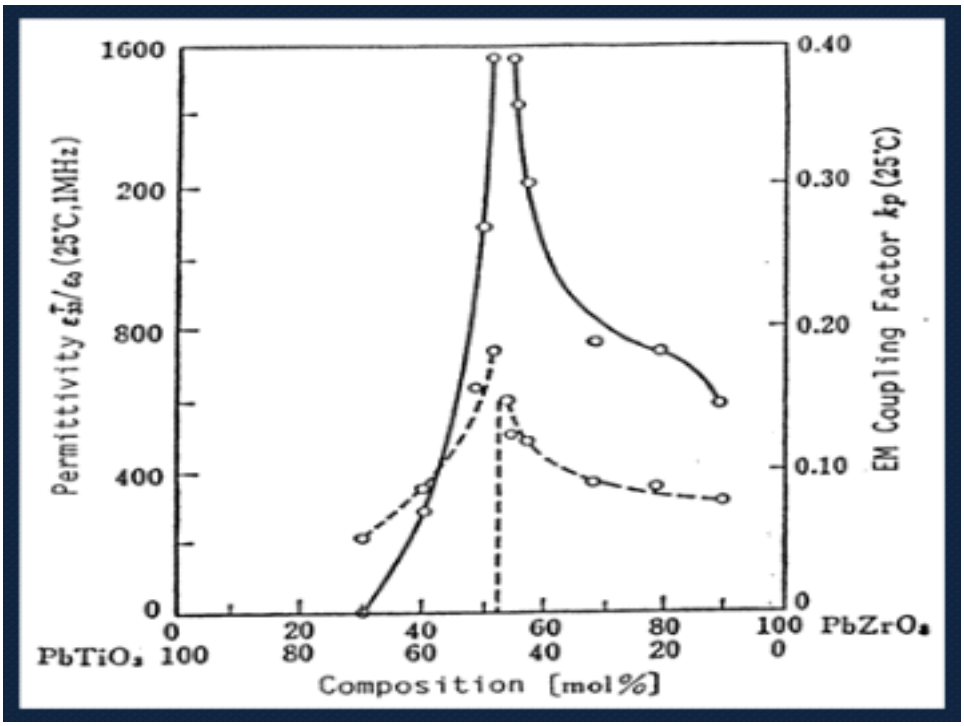


그림 6. PZ-PT 세라믹스의 고용 비율에 따른 압전 특성의 변화

○ 압전 세라믹의 주요 상수 : 압전 상수 d_{ij}

- 압전 소재의 특성을 가장 직접적으로 보여주는 것으로써 전기적 신호와 기계적 신호 간의 상호 변환 시 적용되는 상수임.

  예) 전기적 신호(분극)=압전 상수 × 기계적 신호(압력)
  예) 기계적 신호(변형)=압전 상수 × 전기적 신호(전기장)

- 일반적으로 d_{ij} 로 쓰며 i, j는 1~6 사이의 자연수임.
- i 는 신호가 들어간 방향, j 는 압전체에 의해 변환된 신호가 나오는 방향임.
- 일반적으로 x축, y축, z축을 각각 1, 2, 3축으로 명명 하며 나머지 4, 5, 6축은 두 개의 축 이상이 결합된 방향을 나타냄.

  예) 전기적 신호(1축 방향) = d_{31} × 기계적 신호(3축 방향)
  예) 기계적 신호(3축 방향) = d_{33} × 기계적 신호(3축 방향)

- 따라서 d 상수의 단위는 C/N과 m/V의 두 가지가 있음.
- 두 단위 모두 1:1로 대응되며 일반적으로는 상수 값이 매우 작기 때문에 10^{-12}(pico)를 붙여 pC/N 혹은 pm/V를 많이 사용함.

- PZT 계열 세라믹스의 경우는 약 300~600, NKN 계열 세라믹스의 경우는 100~300 정도의 값을 가짐.

○ 압전 세라믹의 주요 상수 : 전기기계 결합 계수 k_{ij}

- 압전 소재가 서로 다른 에너지를 상호 변환할 때의 변환 효율을 나타내는 것으로써 0에서 1사이의 값을 가지며 k 또한 d 상수와 마찬가지로 k_{ij}로 나타냄.
- 특수한 경우에 k_p로 쓰는 경우도 있는데 이때 p는 planner 모드의 약자로써 31과 32가 섞여있는 것으로 생각하면 되며 실제 압전 소재의 에너지 변환 효율은 k를 제곱한 값이지만 일반적으로 k값을 그대로 사용함.

예) k_p^1 = 변환된 기계적 에너지/공급한 전기적 에너지
예) k_p^2 = 변환된 전기적 에너지/공급한 기계적 에너지

○ 압전 세라믹의 주요 상수 : 기계적 품질계수 Q_m

- 기존 유전재료에서 사용하는 Q와 같은 의미임.
- Q는 유전손실의 역수를 말하며 Q 값이 클수록 손실이 매우 작다는 것을 나타냄.
- Q_m 또한 마찬가지로 손실의 역수이나 압전체가 기계적 진동을 하므로, 전기적 손실과 기계적 손실을 모두 포함하여 나타냄.
- 일반적으로 Q_m이 클수록 열 발생이 적으며 공진 주파수에서 임피던스가 샤프해 지므로 주파수 특성이 좋아지는 장점이 있고 Q_m 값의 범위는 50~2000으로 재료에 따라 매우 다양함.

○ 높은 Q_m 값을 지니는 압전소자의 필요성

- 기존 이스라엘 이노와텍에서 철도용으로 개발 중인 압전 소자는 레일에 적용을 위한 것이므로 순간 발전을 위한 것이지만, 본 연구목표는 철도차량의 적용을 위한 것이므로, 지속적인 발전이 필요하여 열 손실을 최소화하기 위해 높은 Q_m 값을 지니는 압전소자 특성 개발이 필요함.

○ 압전 세라믹의 주요 상수 : 상전이 온도, Curie Temperature (T_c)

- 압전체의 결정 구조가 Cubic으로 바뀌는 온도를 의미함.
- 이 온도 이상이 되면 압전 특성을 잃어버리며 일반적으로 압전체는 진동을 하면서 열을 발생시키기 때문에 이 값이 클수록 좋음.
- PZT 계열 세라믹스의 경우는 약 180~350℃ 정도의 값을 가지며 NKN 계열 세라믹스의 경우는 약 250~500℃ 정도의 값을 가짐.

○ 압전 세라믹의 주요 상수 : P_r 및 E_c

- Polarization-Electric Feild 곡선(P-E곡선)에서 각각 y 절편과 x 절편을 나타내는 값으로써 P_r의 크기는 분극의 양, E_c의 크기는 분극의 쉬운 정도를 나타냄.
- 즉, P_r이 클수록 분극이 많이 된 것, E_c가 작을수록 분극을 하기 쉬운 것임.
- 또한 이러한 P-E 곡선의 면적은 손실을 나타내므로 면적이 작을수록 좋음.

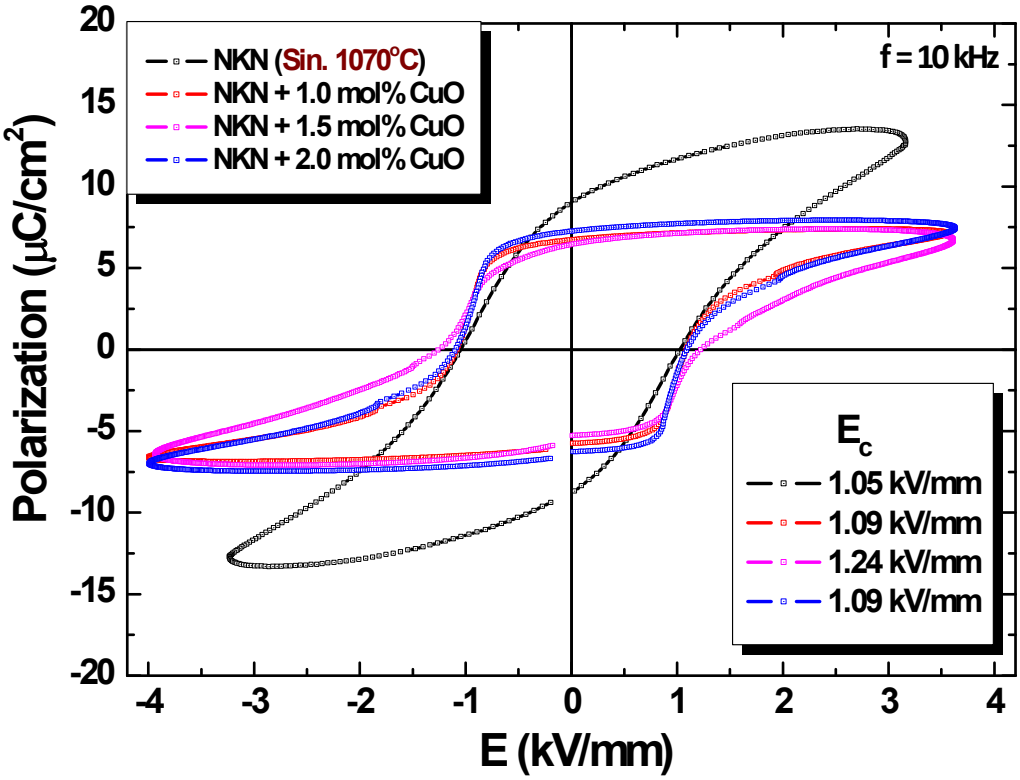


그림 7. P-E 곡선

○ 압전 특성을 결정하는 주요 변수 : 상대 밀도

- 압전 소결체의 측정 밀도를 이론 밀도로 나누어 백분율화한 것임.
- 따라서 상대 밀도가 클수록 빈 공간이나 결함 없이 소결이 잘되었다는 것을 나타냄.
- 빈 공간은 압전 특성에 아무런 기여를 하지 않으므로 당연히 상대 밀도가 증가할수록 압전 특성은 상승하게 됨.
- 여러 압전 상수 중에 특히 k_p가 가장 큰 영향을 받으며, 일반적으로 소결이 잘되었을 경우 상대 밀도는 약 95~99% 정도임.

○ 압전 특성을 결정하는 주요 변수 : 결정 구조

- 압전 세라믹은 일반적으로 단일 결정 구조를 사용하지 않음.
- 일반적으로 2개 이상의 결정구조가 섞여 있는 경우를 많이 사용 하는데 이렇게 섞여 있는 경우 압전 특성이 비약적으로 상승하기 때문임.
- 이와 같이 두 개 이상의 결정 구조가 섞여 있는 것을 상 공존 영역 혹은 Morphotropic Phase Boundary [MPB]라고 부름.
- 이러한 MPB는 조성에 따른 결정 구조 변화에 심하게 영향을 받으므로 조성을 미세하게 조정 하는 것이 중요하며 모든 압전 상수가 큰 영향을 받음.

○ 압전 특성을 결정하는 주요 변수 : 입도 크기

- 소결 후 미세구조에서 보이는 입도의 크기를 말함.
- 일반적으로 입도 크기가 커질수록 압전 특성이 향상됨.
- 입도 사이즈가 일정 크기 이하가 될 경우 아예 압전 특성을 잃어버리는 경우도 있으며 여러 압전 상수 중에서 d_{33}가 가장 큰 영향을 받음.

○ 압전 특성을 결정하는 주요 변수 : 도핑 상태

- 인위적으로 압전 세라믹에 원자가가 다른 물질을 도핑이나 치환 한 경우 압전 특성의 변화를 유도할 수 있음.
- Donor 도핑
  - 원자가가 더 높은 물질을 도핑 함.
  - 아래와 같은 특성 변화가 있음 (실제 변화와 변화의 요인은 훨씬 복잡함).
  - 일반적으로 재료가 부드러워 지기 때문에 소프트닝 효과라 부름.
  - d_{33} 증가, k_p 소량 증가, Q_m 감소, P_r 증가, E_c 감소, T_c 변화 (상승과 하락 모두 가능)
  - PZT 계열에서는 Bi^{3+}, La^{3+}, Nb^{5+}, Ta^{5+}, Sb^{5+}, W^{6+} 등이 주로 쓰이며 NKN 계열에서는 Ba^{2+}, Ca^{2+}, Sr^{2+} 등이 주로 쓰임.
- Acceptor 도핑
  - 원자가가 더 낮은 물질을 도핑함.
  - 아래와 같은 특성 변화가 있음 (실제 변화와 변화의 요인은 훨씬 복잡함).
  - 일반적으로 재료가 딱딱해 지기 때문에 하드닝 효과라 부름.
  - d_{33} 감소, k_p 소량 감소, Q_m 증가, P_r 감소, E_c 증가, T_c 변화 (상승과 하락 모두 가능)

○ PZT 세라믹스의 개요 : PZT 세라믹스의 기초

- PZT 세라믹스는 $PbZrO_3$ [PZ]와 $PbTiO_3$ [PT]가 섞여있는 형태로써 둘의 비가 약 47/53인 $PZ_{0.47}T_{0.53}$에서 MPB를 형성함.
- PZ는 압전 특성이 없는 Rhombohedral 구조이고 PT는 압전 특성이 있는 Tetragonal 구조임.
- 소결온도는 약 1200도, d_{33}는 200 pC/N, k_p는 0.6, Q_m은 70, T_c는 350도 정도의 값을 가짐.

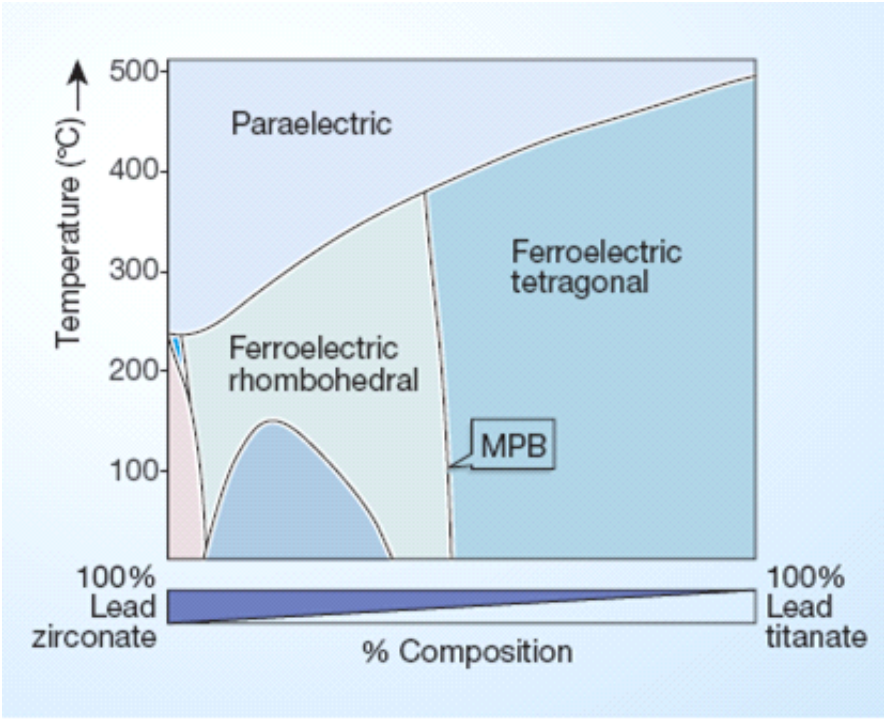


그림 8. PZT 세라믹스의 상태도

○ PZT 세라믹스의 연구방향 : Relaxor 고용

- PZT 세라믹스에 PMN, PZN, PNN같은 Cubic 구조의 Relaxor를 고용하여 새로운 MPB를 형성하고 압전 특성을 향상시킴.

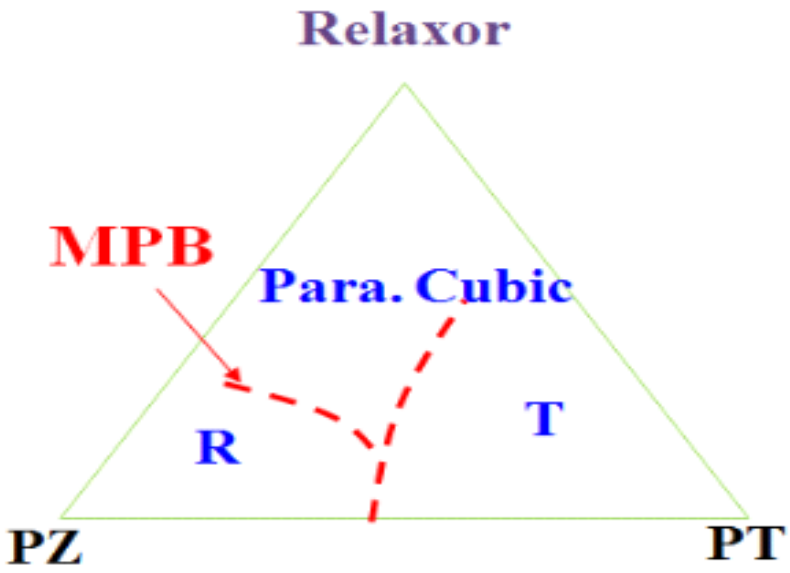


그림 9. PZT-Relaxor 시스템의 상태도

- 예) 0.65PZT-0.35PNN : 소결온도는 1200도, d_{33}는 600 pC/N, k_p는 0.65, Q_m은 50, T_c는 200도 정도의 값을 가짐.

- 일반적으로 relaxor가 고용됨에 따라 d_{33}가 상승하고 T_c가 낮아지는 경향이 있음.

○ PZT 세라믹스의 연구방향 : 저온 소결

- CuO 등의 첨가제를 첨가하여 소결 온도를 1200도에서 900도 이하로 낮춤.
- 이 경우 비용 절감과 Pb휘발 방지, Ag를 이용한 MLCC 공정 적용 가능 등의 장점이 있음.
- 예) 0.65PZT-0.35PNN + 1.5mol% CuO : 소결온도는 900도, d_{33}는 605 pC/N, k_p는 0.6, Q_m은 50, T_c는 200도 정도의 값을 가짐.
- 첨가제가 많이 들어가면 압전 특성이 감소하는 경향이 있음.

○ NKN 세라믹스의 개요 : NKN 세라믹스의 기초

- PZT 세라믹스의 가장 큰 문제인 Pb에 의한 환경 문제를 해결하기 위하여 연구 됨.
- PZT시스템과 마찬가지로 압전 특성이 없는 orthorhombic 구조의 $NaNbO_3$ [NN]과 압전 특성이 있는 orthorhombic 구조의 $KNbO_3$ [KN]이 섞여있는 형태임.
- 둘의 비가 50/50인 $N_{0.5}K_{0.5}N$에서 MPB를 형성하며 소결온도는 약 1100도, d_{33}는 120 pC/N, k_p는 0.4, Q_m은 70, T_c는 410도 정도의 값을 가짐.

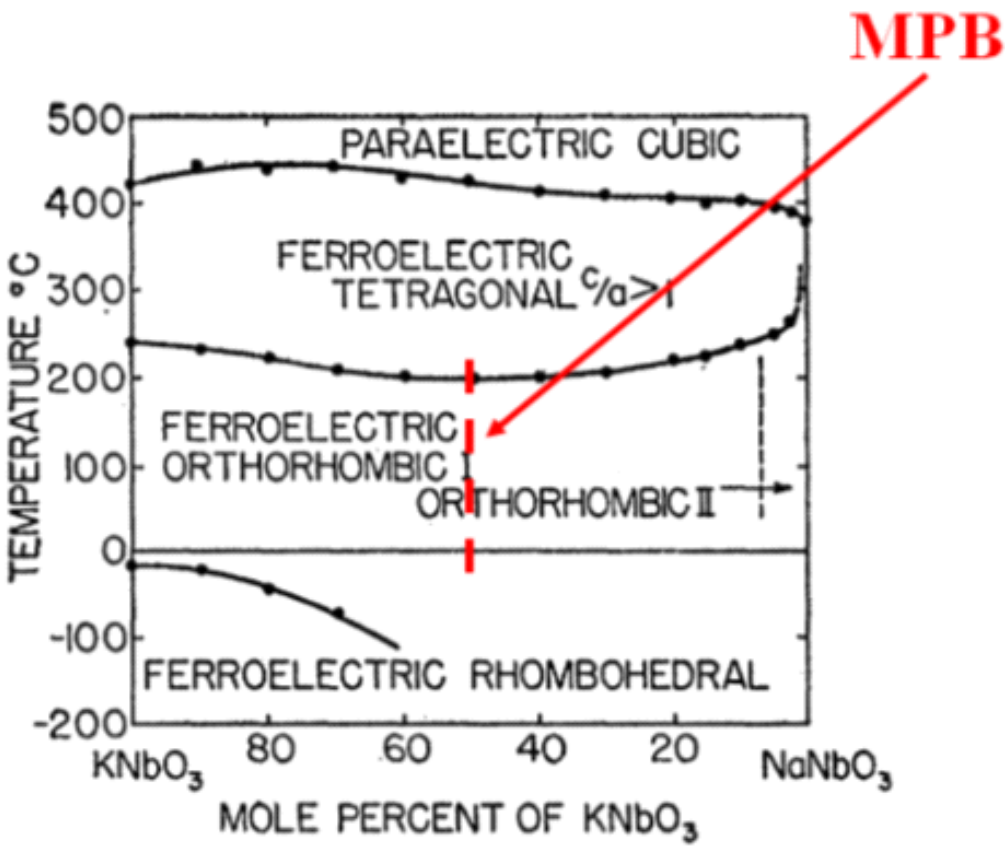


그림 10. NKN 세라믹스의 상태도

- PZT와 달리 T_c 이전에 orthorhombic구조 에서 tetragonal 구조로 변하는 온도인 T_{o-t} 가 있으며 그 온도는 약 200도 정도임.

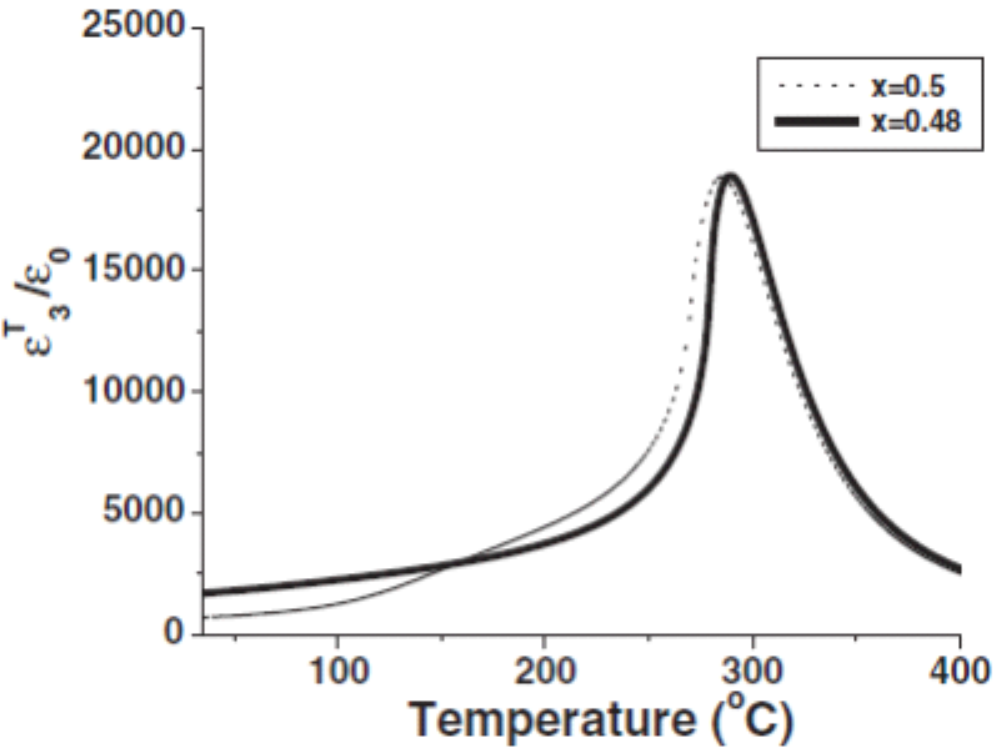


그림 11. PZT 계열 세라믹스의 T_c

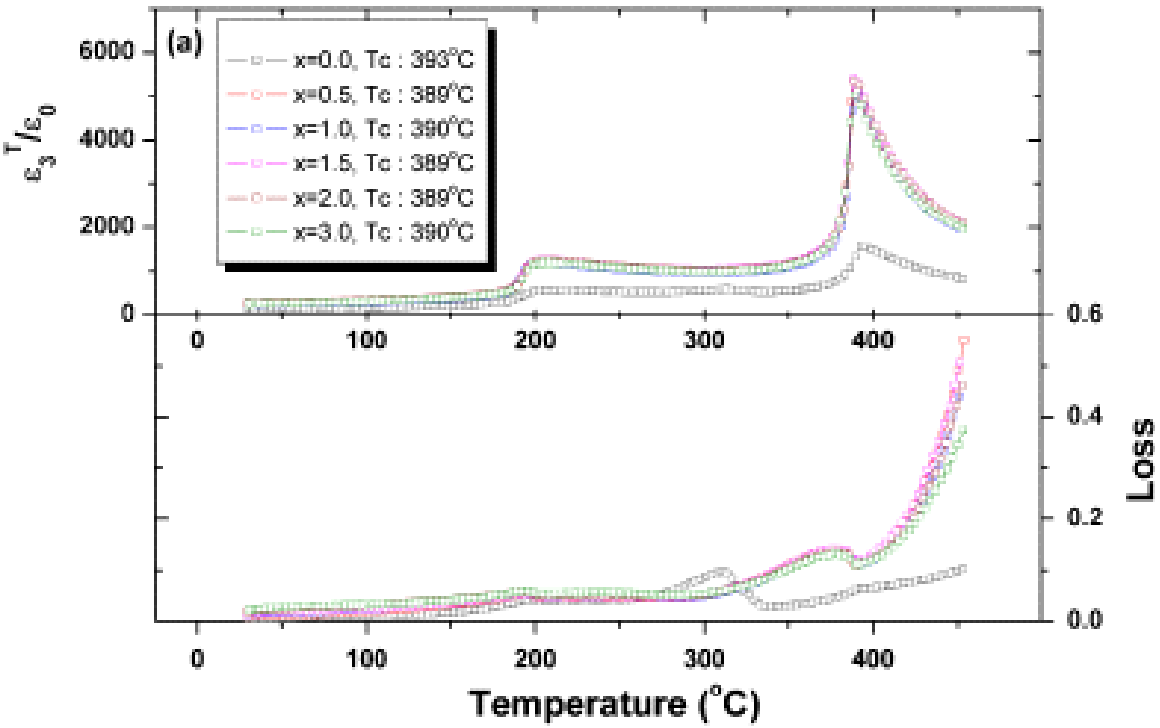


그림 12. NKN 계열 세라믹스의 T_c 및 T_{o-t}

○ NKN 세라믹스의 연구 방향

- 다른 ABO_3 물질과 고용을 통한 Polymorphic Phase Transition(PPT)의 이용함.
- 압전체에 $LiNbO_3$, $LiSbO_3$, $LiTaO_3$, $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaTiO_3$등을 고용하면 200도 근방에 있는 T_{o-t}가 상온으로 떨어짐.
- 따라서 상온에서 orthorhombic과 tetragonal 로 구성된 새로운 MPB를 사용할 수 있고 그에 따라 압전 특성이 향상됨.

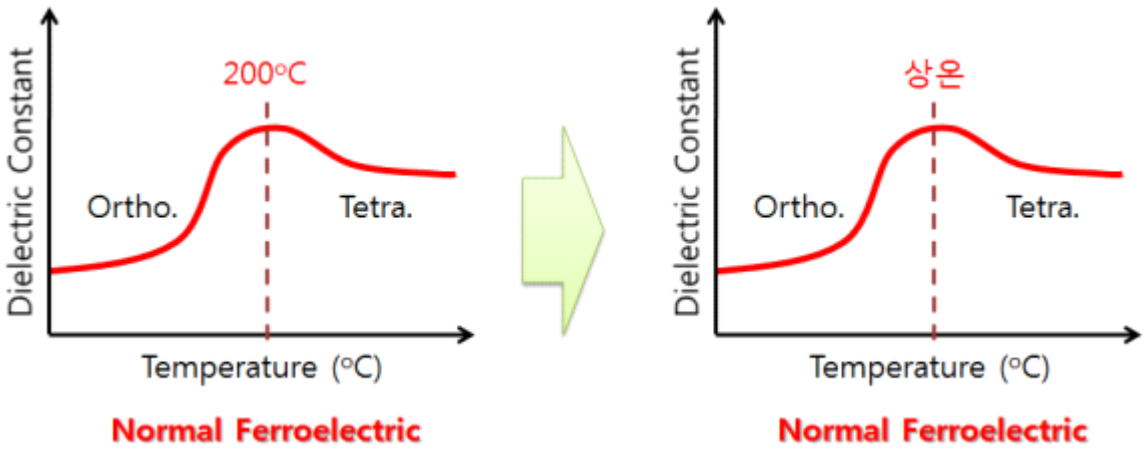


그림 13. NKN 세라믹스의 PPT 변화

- 예) $0.95NKN-0.05LiSbO_3$: 소결온도는 1050도, d_{33}는 280 pC/N, k_p는 0.45, Q_m은 70, T_c는 400도 정도의 값을 가짐.
- 예) $0.95NKN-0.05CaTiO_3$: 소결온도는 1060도, d_{33}는 250 pC/N, k_p는 0.4, Q_m은 70, T_c는 330도 정도의 값을 가짐.

- 이렇게 압전 특성을 올리는 것의 가장 큰 문제는 온도 안정성임.
- 즉, 온도가 상온에서 조금만 벗어나도 형성된 MPB가 사라지게 되기 때문에 온도에 따른 특성 변화가 매우 큼.

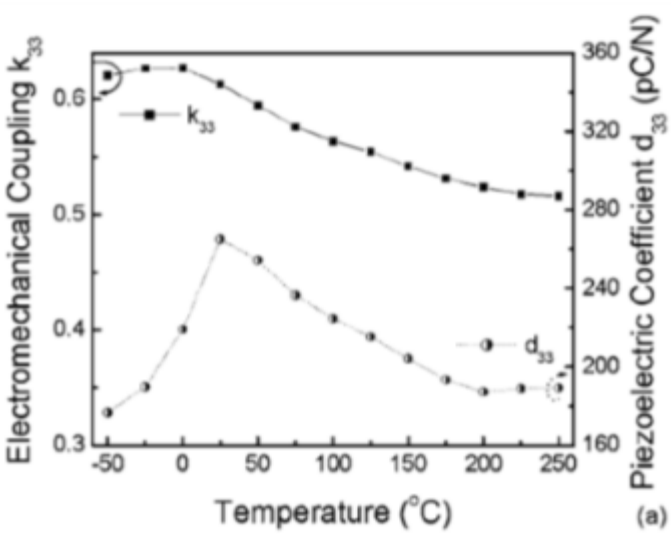


그림 14. NKN 계열 세라믹스의 온도에 따른 특성 변화

○ 저온 소결

- PZT세라믹스와 마찬가지로 원가 절감과 Na 휘발 방지, Ag전극을 이용한 MLCC공정 적용을 위하여 CuO 등의 첨가를 통해 950℃ 이하의 저온 소결을 함.
- 예) NKN + 1.5mol% CuO : 소결온도는 960도, d_{33}는 100 pC/N, k_p는 0.38, Q_m은 800, T_c는 400℃ 정도의 값을 가짐.
- 예) NKN + 1.5mol% CuO + 0.5mol% ZnO : 소결온도는 900도, d_{33}는 100 pC/N, k_p는 0.38, Q_m은 800, T_c는 400℃ 정도의 값을 가짐.
- 일반적으로 NKN에 CuO가 첨가될 경우 하드닝 효과가 강해져 d_{33}의 감소와 Q_m의 급격한 증가를 가져옴.
- 이외에도 V^{5+} 등을 치환하여 특성의 변화 없이 저온 소결을 하기도 함.
- 예) NKN0.95V0.05 : 소결온도는 960℃, d_{33}는 120 pC/N, k_p는 0.35, Q_m은 70, T_c는 400℃ 정도의 값을 가짐.

○ PZT 세라믹스의 한계와 문제점

- PZT 세라믹스의 가장 큰 문제는 Pb에 의한 환경 문제라는 점임.
- RoHs에 따르면 P_b, 수은, Cr^{6+}, Cd 등을 포함한 6가지 물질에 대해 전자 부품에 쓰지 못하도록 환경 규제를 하고 있음.
- 그러나 압전체의 경우만 대체 물질이 개발될 때 까지 계속 쓰기로 결정했음.
- 이외에도 낮은 T_c 또한 들 수 있음.

○ NKN 세라믹스의 한계와 문제점

- NKN 세라믹스의 가정 큰 문제는 PZT에 비해 낮은 압전 특성을 들 수 있음.
- 이외에도 수분에 취약하며 공정 시 변수가 매우 많다는 것 또한 들 수 있음.

○ 압전 하베스팅 시스템은 미활용 되고 있는 열차 차량의 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 신개념 전력에너지 생산 기술로 설치비 및 유지비가 저렴하고, 독립전원으로 응용 분야가 광범위함.

※ 철도의 진동 에너지는 운행 중 항상 발생되는 자연적인 에너지로 친환경적이며 지속적인 전기에너지 발전이 가능함.

2. 연구개발의 범위

○ 열차 진동 특성 측정 및 분석단계를 걸쳐 선별되어진 열차의 운행 진동 조건을 묘사하여 진동이 가해졌을 때, 압전 시스템을 이용하여 0.15 mW/cm^3 발전량[3]을 목표로 함.

※ 철도 차량 중에서 비교적 진동이 제일 작은 초전도 자기부상 열차 500 km/h에서 나타나는 진동수인 11 Hz와 28 Hz에서 최대 0.01 mW/cm^3 값을 얻었으며, 이 값의 10배에 해당하는 0.1 mW/cm^{3}로 목표를 정했음. (2차년도 평가이후 0.15 mW/cm^{3}으로 목표값 향상)

- 전자석 자기부상열차의 진동 대역폭은 약 0 ~ 300 Hz, 초전도 자기부상 열차의 동대역폭은 약 0 ~ 56.5 Hz로 압전 발전에 충분함.[4]
- 대차 시스템 (Bogie system)의 전자기력과 열차 고유진동의 상호작용으로 열차 내 진동이 발생하며, 약 400 km/h 에서는 8.8 Hz, 약 500 km 에서는 11.1 Hz와 28 Hz의 진동수를 보임.[5]
- 도시형 자기부상열차의 차량 부상제어를 위해 제작된 가이드웨이의 1차 휨 고유진동수가 4 ~ 8 Hz 의 대역폭을 가짐.[6]

○ 고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발

- 상기 과제 목표는 새로운 압전 세라믹스 조성 개발 및 특성 구현을 위한 공정 개발의 성격을 가지며, 특히 소결온도 1000° C 이하의 공정을 개발 할 경우 추후 MLCC 공정에도 적용이 가능하다는 장점이 있음. 에너지 하베스팅에 적합한 재료적 특성은 다음과 같음.

  - $d_{33} \times g_{33} > 13K$, $k_p > 0.5$, $Q_m > 500$, 소결온도 < 1000℃의 압전 세라믹 조성
  - $d_{33} \times g_{33} > 14K$, $k_p > 0.55$, $Q_m > 800$, 소결온도 < 900℃의 압전 세라믹 조성
  - $d_{33} \times g_{33} > 15K$, $k_p > 0.6$, $Q_m > 1000$, 소결온도 < 900℃의 압전 세라믹 조성
  - $d_{33} \times g_{33} > 15K$, $k_p > 0.6$, $Q_m > 1000$, 소결온도 < 900℃, Fatigue Cycle>100000, Young's Modulus < 80GPa의 압전 세라믹 조성

○ 고성능 압전 에너지 하베스팅 소자 개발

- 압전 에너지 하베스터는 재료 내에서 뿐만 아니라 구동부에서도 많은 손실이 발생하는데, 구동부의 구조에 의해서도 압전 세라믹의 변형 정도와 변형 모드 등이 달라지고 이는 발전량과 직결되므로 이를 위한 연구가 반드시 필요함.

---

3) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.
4) IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002
5) The 4th Internatinal symposium on Linear Drives for Industry Applications 2003
6) 콘크리트학회지 제20권 3호 2008.5

3. 연구개발의 특징

○ 본 연구는 세계 어디에서도 수행한 적이 없는 연구 개발로 1차년도에 철도차량 진동 측정 및 분석을 통하여 차량을 선별하고, 2차년도에 압전 시스템 제작 및 철도 차량 적용 시범 운전을 하며, 최종년도인 3차년도에 열차적용운전 평가 및 시스템 수정보완을 하는 과제임.

○ 본 연구개발을 통해 철도 차량에 압전 하베스터를 적용함으로써 최종 목표값 0.15 mW/cm^3 의 목표 대비 4.7배 향상된 0.71 mW/cm^{3}의 결과를 달성함.(단결정은 1.15 mW/cm^{3}로 약 7.6배 향상) 이 결과를 효과적으로 철도차량에 적용한다면 센서와 같은 저전력 디바이스의 독립전원으로 이용 가능할 것으로 판단됨.

○ 본 과제의 소자개발을 통해 목표값인 10 mW / 5 × 3 cm^{2}의 제작하였음. 이러한 소자 10,000개를 설치할 때 약 100 W의 전력을 생산할 수 있음.

○ 현재 시판되는 하베스터용 압전 조성의 일반적인 $d_{33}\times g_{33}$는 약 10~11k 정도임에 비해 약 2 배 성능을 향상시킨 $d_{33}\times g_{33}$ = 20k의 값을 달성함. (목표값은 15K) 이 개발로 압전 하베스팅 시스템 상용화를 한층 앞당겼다고 할 수 있음.

○ 현 수준에서 산업적으로 사용할 수 있는 $d_{33}\times g_{33}$ 을 상회하는 값으로 목표를 선정하였고, 연구개발을 통해 $d_{33}\times g_{33}$ = 20k으로 상당히 발전된 압전 특성을 갖는 소자를 개발하였음. 특히 Q_m의 경우는 위의 $d_{33}\times g_{33}$ 를 유지하면서 가장 높은 1020 값을 달성함.

제3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

1. 관련분야의 국내 기술개발 현황

○ 국내 ㈜센불에서는 한국세라믹기술원과 협력하여 세라믹 압전체를 이용한 ‘압전 에너지 블록’을 개발하여, 부산 서면역 승강장에 체험공간을 설치하여 운영하고 있음.



그림 15. 지하철 통로를 지나갈 때 생기는 진동을 이용한
압전 에너지 하베스팅 (부산 서면역)

○ 또한, 압전 블록 개발을 통해 다양한 장소에 적용 가능한 압전 소자를 이용하여 도로용, 철도용, 해양용에 응용하는 연구를 하고 있음.

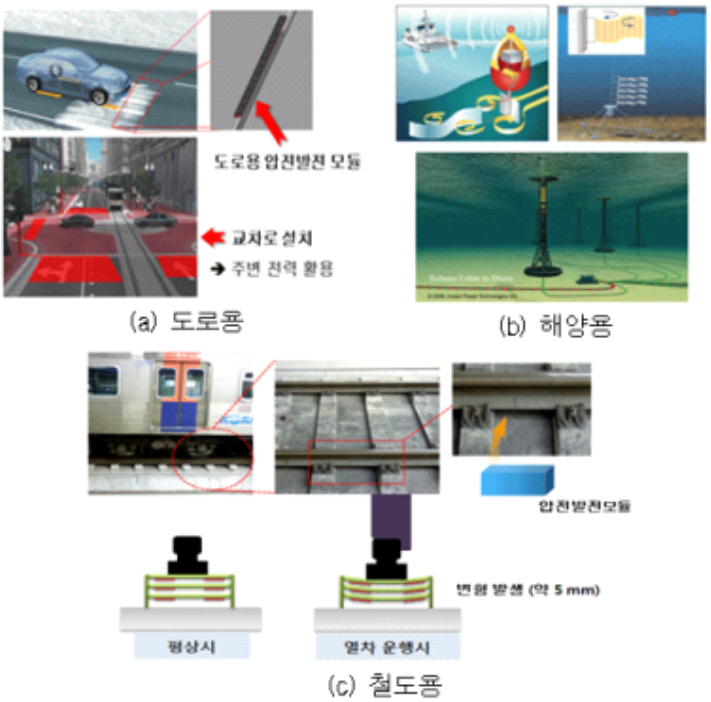


그림 16. 압전 하베스팅 응용분야 (출처: (주)센불)

2. 관련분야의 국외 기술개발 현황

○ 일본 JR철도회사에서 2008년 지하철 승객들이 걸어 다니는 개찰구에 설치하여 6,000 Ws/day 전력 생산함. (2006년에는 100 W 전력을 생산하여 전구를 수분 정도 점등)

○ '음력발전(사운드파워)주식회사' 를 설립하여 도쿄 수도고속과 자동차 진동을 이용한 다리 조명 실험 중임.



그림 17. 진동력 발전을 응용한 도쿄의 고시키 사쿠라 대교

○ 일본 동경 지하철역 내 계단에 압전 발전장치를 설치하여 수확된 전력은 역내 전등을 켤 때 사용하고 있으나, 압전 발전장치를 열차에 직접 적용한 사례는 없음.

○ 일본 NEC에서 건전지 없는 리모콘 기술개발 착수함.

○ 이스라엘 이노와택社에서 도로에 압전 블록을 설치하여 500 kWh 발전 연구 개발 중
- 1 km 설치시 차량 600여대가 압전 블록 위를 지나가면 250가구에 전기 공급 가능하다고 보고함.



그림 18. 이스라엘 이노와텍의 도로용 압전 모듈 실험

○ 이스라엘의 압전 하베스팅 개발 업체인 이노와텍 (Innowattech) 社는 압전 발전장치를 통해 도로 위를 지나가는 차량으로부터 기계적인 에너지를 수확, 저장하여 교통 신호등, 거리의 가로등, 스마트 그리드 전력원으로 사용할 수 있는 시스템이 가능하다고 보고함.

○ 이 외에도 다양한 국가 및 연구소에서 압전 응용기술을 이용하여 활발하게 연구하고 있음.

표 2. 국외 압전 하베스팅 기술 경쟁 기관

국가명	기술명	개발 단계	개발 내용	개발주체
미국	Micro Power Generation (MPG)	개발 중	MEMS 기반의 다양한 에너지원을 소형화 개발 추진 중	MIT
미국	바람을 이용한 압전 banner	개발 중	바람을 이용한 압전 banner를 개발하였으며, power lighting, various sensors, and other devices., architectural, building elements clothing 등에 이용	조지아 공대
일본	진동에너지 LSI 구동 전력	개발 중	건물의 미세한 진동을 이용해서 구동전력으로 사용	히타치 제작소
일본	WINDMILL 시스템	Pilot	도로 램프구동을 위해서 압전 소자를 이용한 WINDMILL 시스템을 개발	NEC-TOKIN
이스라엘	도로용 압전 발전 기술	상용화	도로용 압전 블록을 제작하여 자동차 도로에 실제 적용	Innowatech
독일	Transmitter Module에 압전 방식의 Power Generator	상용화	배터리가 필요 없이 스위치를 눌렀을 때 발생하는 에너지를 센서구동, RF 무선신호 송수신 및 각종 변환기를 작동시키는데 활용	EnOcean사

○ 또한, 압전체를 이용한 에너지 수확 시스템에 대한 연구개발이 주로 세라믹 재질을 이용하여 활발하게 진행되고 있음.

- 압전 세라믹의 에너지 하베스팅 특성이 부각됨에 따라 에너지 하베스팅에 적합한 압전 세라믹 소재의 연구가 활발히 진행되고 있음.

- 압전 에너지 하베스팅 소재로서의 능력을 평가하기 위해서는 $d_{33} \times g_{33}$ 값을 사용하며 현재 보고된 논문에 의하면 에너지 하베스팅용 PZT계열 세라믹스의 $d_{33} \times g_{33}$ 값은 약 14 ~ 18K 정도임.

- 아래의 표는 최근 보고된 여러 압전 조성들의 압전 특성 값들을 보여줌.

표 3. 보고된 PZT계열 조성의 압전 하베스팅 특성

Composition	d_{33} (pC/N)	$\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$	k_p	$d_{33}*g_{33}$ ($10^{-15}m^2/N$)	Ref.	Sintering Temperature (°C)
$Pb_{0.96}Sr_{0.04}$ $[(Zr_{0.49}Ti_{0.51})_{0.74}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.20}(Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.06}]O_3$	600	2500	0.6	16263	[1]	1250
$Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$Pb(Ni_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O_3$	373	1347	0.583	11665	[2]	930
$Pb[(Sc_{1/2}Nb_{1/2})_{0.575}Ti_{0.425}]O_3$	504	2540	0.69	11295	[3]	1275
Morgan Electroceramics(PZT 507)	700	3900	-	14000	[4]	-
La-doped 2.3PZN–7.6PZT	845	4088	0.70	19727	[5]	1200
0.3PNN-0.7PZT	620	2742	0.60	15833	[6]	1240
0.7PZT–0.1PZN-0.2PNN	641	3379	0.66	13734	[7]	1180
$0.51Pb(Hf_{0.3}Ti_{0.70}O_3$–0.49PNN	970	6000	0.65	17711	[8]	1280

3. 특허 동향

가. 국내 특허 동향

○ 한양대학교에서는 압전 하베스팅을 이용하여 다양한 응용처에 관한 특허 보유 중임.

표 4. 압전 소자를 이용한 발전시스템에 관한 국내 지식 재산권

No.	출원번호	요약	출원인
1	KR/2010-0099476	압전 셀 소형 발전기	**한양대학교 산학협력단**
2	KR/2011-0060755	압전 하베스팅 시스템을 이용한 배	**한양대학교 산학협력단**
3	KR/2011-0069458	수류를 이용한 압전 하베스팅 시스템	**한양대학교 산학협력단**
4	KR/2011-0069460	유체의 흐름을 이용한 압전 하베스팅 시스템	**한양대학교 산학협력단**

5	KR/2011-0119428	압전 하베스팅 시스템 및 그를 구비한 이동수단	㈜ 에이엠씨에너지
6	KR/2012-0014338	압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
7	KR/2012-0022441	이동체 적용 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
8	KR/2012-0064948	동물을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
9	KR/2012-0083990	압전체의 브릿지형을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
10	KR/2012-0084012	압축력을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
11	KR/2012-0084018	타격막대에 용수철을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
12	KR/2012-0083972	반발력을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
13	KR/2012-0084030	리프 스프링을 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
14	KR/2012-0084039	이동수단의 손잡이에 응용되는 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
15	KR/2012-0084059	수류에서 프로펠러를 이용한 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
16	KR/2013-0155860	풍력 발전 시스템에 적용되는 압전 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
17	KR/2013-0167709	톱니 벨트를 이용한 압전 발전 장치	㈜ 에이엠씨에너지
18	KR/2013-0167710	보도블럭에 적용되는 압전 발전 장치	㈜ 에이엠씨에너지
19	KR/2013-0167708	압전체 변형 제한 장치 및 압전체 반발력 야기장치	㈜ 에이엠씨에너지
20	KR/2013-0001233	도로용 압전 발전 장치	㈜ 에이엠씨에너지
21	KR/2013-0013581	차량간의 무선통신을 위한 하이브리드 에너지 하베스팅 시스템	㈜ 에이엠씨에너지
22	KR/2008-0040806	곡면 탄성판을 이용한 발전모듈 및 압전 에너지 수집장치	한국전자통신연구원
23	KR/2006-0107440	이동형 기기의 전력 발생장치 및 이를 구비한 자가 발전시스템	한국전자통신연구원
24	KR/2008-0008327	압전소자, 압전소자를 이용한 발전장치 및 그 구동방법	한국과학기술원
25	KR/2005-0098624	회전하는 타이어의 기계적 에너지로부터 전력 발생하기위한 시스템 및 방법	소시에떼 드 테크놀로지 미쉐린

26	KR/2005-0096683	피에죠를 이용한 모멘트 저항골조의 발전장치	주식회사 포스코
27	KR/2005-0126793	건물 지하수압용 발전장치	재단법인 포항산업과학연구원
28	KR/2008-0000036	휴대용 전자기기의 자가발전장치	한국산업기술평가원
29	KR/2008-0033319	자가발전장치를 포함하는 자동차 원격 조종장치	한국세라믹기술원 (구,요업기술원)
30	KR/2008-0122752	이동하중을 이용한 압전 발전기 및 이를 포함하는 발전기	한국세라믹기술원 (구,요업기술원)
31	KR/2009-0072135 (PCT 동시출원)	발판형 압전 발전기용 유니트 및 이를 포함하는 압전발전기 시스템	한국세라믹기술원
32	PTC/KR2009/ 000401	압전 발전기용 유니트 및 이를 포함하는 압전 발전기 시스템	한국세라믹기술원
33	KR/2008-0097375	나선형 구조를 가지는 고효율 압전 에너지 하베스터	한국과학기술연구원
34	KR/2009-7022022	파라메트릭 굽힘 모드 에너지 수확동작이 통합된 압전기 진동 에너지 수확 시스템	The University of Vermont and State Agricultural College
35	KR/2004-0011219	압전검지기 및 이를 이용한 교통정보 수집 시스템	요업기술원 ¦ 주식회사 제온시스템
36	KR/2008-0040806	곡면 탄성판을 이용한 발전모듈 및 압전에너지 수집 장치	한국전자통신연구원 ¦ 동국대학교 산학협력단
37	KR/2009-0024033	압전막을 이용한 공진형 에너지 하비스터	한양대학교 산학협력단 ¦ 주식회사 승화이엔씨
38	KR/2009-0024036	진동형 압전막을 이용한 도로 매설식 에너지 하비스터	한양대학교 산학협력단 ¦ 주식회사 승화이엔씨
39	KR/2009-0038624	센서 노드용 독립 전원을 위한 압전 하비스팅 장치	(주)우광테크

나. 국외 특허 동향

○ 풍력, 수력과 같은 전형적인 재생에너지와 관련된 특허발표는 큰 변화가 없었지만 진동을 이용한 신재생 에너지 개발에 관한 특허의 수는 최근에 크게 증가함.

○ 해양에너지를 이용한 압전 발전시스템에 관한 특허는 수편에 불과하며, 그나마도 주로 미국의 Ocean Power Technologies사에 의해서 등록되었으며, 일부 대학에서 관련된 특허에 대한 출원이 진행 중임.

○ 압전 에너지 하베스팅 관련 특허는 80년대 중반 원리적인 내용이 소개되면서 2000년 이후 본격적으로 출원이 이루어지고 있으나 특허의 대부분이 압전 세라믹 또는 폴리머 재료를 이용한 하베스팅에 대한 내용으로, 주로 자동차의 타이어, 시계의 자체전원 (시계가 1 mm의 진폭으로 30분 간격으로 움직일 때, 0.66 J이 발생하여, 전자시계의 전원으로 공급 가능함, SEIKO) 등의 권리를 주장하고 있음. 특허의 대부분이 하베스팅 구조나 재료에 대한 언급이 아니라, 회로 또는 시스템적으로 효율성을 높이는 방향으로 특허가 출원, 등록되어 있음.

○ 회로 부분에서도 90년대에는 압전 관련 단일 소자에 대한 고효율 회로 구성 특허가 출원되었으나 최근에는 다양한 에너지원 [진동(압전), 열 (열전), 광 (광전)], 마이크로파로부터 동시에 전기에너지를 획득할 수 있는 회로에 대한 특허가 나타나고 있음.

○ 위의 여러 기술적 개발 방향은 획득할 수 있는 에너지원의 효율 향상 및 용량 증가를 목표로 하고 있으며, 또한 기술적으로 소형화 및 단순 구조화를 추구하고 있음.

표 5. 압전 소자를 이용한 발전시스템에 관한 국외 특허

No.	출원국/출원번호	요약	출원인
1	US/1987-4685296	Ocean wave energy conversion using piezoelectric material members	Joseph R. Burns
2	US/1996-5578889	Piezoelectric generation of electrical power from surface waves on bodies of water using suspended weighted members	Ocean Power Tech.
3	US/2003-6528928	Switched resonant power conversion electronics	Ocean Power Tech.
4	US/2002-6424079	Energy Harvesting Eel	Ocean Power Tech.
5	US/2005-6894460	High Efficiency Passive Piezo Energy Harvesting Apparatus	The Boeing Company
6	US/2002-6433465	Energy Harvesting Device using Electrostrictive Polymers	USA Navy
7	US/2007-7239066	Piezoelectric Generators and Methods of Operating Same	par Technologies, LLC
8	EU/2003-0139155	Self-power Generation Type Transmitter	USC Co.,Ltd
9	US/2004-7005780	Power Source Appratus	WENDEROTH, LIND
10	US/2002-6716942	Piezoelectric Device with Feedback Sensor	Arvind Raman
11	US/2003-6559550	Nano-scale Piezoelectric generation System using carbon nanotube	HERMAN, Frederick, J.
12	US/2009-572185	High Efficiency Piezoelectric Energy Harvester Having Spiral Structure	한국과학기술연구원
13	EP/08732677	PIEZOELECTRIC VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING SYSTEMS INCORPORATING PARAMETRIC BENDING MODE ENERGY HARVESTING	The University of Vermont and State Agricultural College
14	JP/2009-554775	파라메트릭 굽힘 모드 에너지 수확을 하는 압전형 진동에너지 수확 시스템	The University of Vermont and State Agricultural College

15	JP/2009-554775	파라메트릭 굽힘 모드 에너지 수확을 하는 압전형 진동에너지 수확 시스템	The University of Vermont and State Agricultural College
16	US/2008-532322	Piezoelectric Vibrational Energy Harvesting Systems Incorporating Parametric Bending Mode Energy Harvesting	The University of Vermont and State Agricultural College
17	US/2010-7692366	MINIATURIZED PIEZOELECTRIC BASED VIBRATIONAL ENERGY HARVESTER	MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A.
18	EP/05775599	A MINIATURIZED PIEZOELECTRIC BASED VIBRATIONAL ENERGY HARVESTER	MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A.
19	JP/2007-537875	소형화 압전식 진동에너지 회수 장치	MICHELIN RECHERCHE ET TECHNIQUE S.A.
20	US/2005-628519	Miniaturized Piezoelectric Based Vibrational Energy Harvester	MICHELINRECHERCHEET TECHNIQUES.A.
21	EP/01971287	PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER AND METHOD	Innovative Technology Licensing, LLC
22	JP/2008-276007	공진주파수 조정 가능한 압전 진동에너지 수집 장치	MITSUBISHI HEAVY IND LTD
23	US/2000-676137	Piezoelectric energy harvester and method	Rockwell Technologies Inc
24	US/2002-274577	Multi-frequency piezoelectric energy harvester	THE BOEING COMPANY
25	US/2005-031993	Piezoelectric vibration energy harvesting device	Deng, Ken Kan
26	US/2006-402017	Micromachined, piezoelectric vibration-induced energy harvesting device and its fabrication	Honeywell International Inc.
27	US/2006-486200	HYBRID PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING TRANSDUCER SYSTEM	National Institute of Aerospace Associates
28	US/2006-527044	Piezoelectric energy harvester	BOARDOFREGENTS,THE UNIVERSITYOFTEXASSYSTEM
29	US/2007-733322	ENERGY HARVESTING FROM MULTIPLE PIEZOELECTRIC SOURCES	Advanced Cerametrics, Inc.
30	US/2008-035860	PIEZOELECTRIC MODULE FOR ENERGY HARVESTING, SUCH AS IN A TIRE PRESSURE MONITORING SYSTEM	Hong Kong Applied Science and Technology Research Institute Company Limited (ASTRI)
31	US/2008-057107	Piezoelectric Energy Harvester	BOARD OF REGENTS, THE UNIVERSITY OF TEXAS SYSTEM
32	US/2008-107422	SYSTEM AND METHOD FOR PROVIDING A PIEZOELECTRIC ELECTROMAGNETIC HYBRID VIBRATING ENERGY HARVESTER	Honeywell International Inc.
33	US/2008-194711	Piezoelectric Kinetic Energy Harvester	NOKIA CORPORATION
34	US/2009-394326	HARVESTING ENERGY FROM VEHICULAR VIBRATIONS USING PIEZOELECTRIC DEVICES	GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC.

35	US/2009-394438	HARVESTING ENERGY FROM VEHICULAR VIBRATIONS USING PIEZOELECTRIC DEVICES	GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC.
36	US/2009-402457	CIRCUITS FOR HARVESTING ENERGY FROM PIEZOELECTRIC DEVICES	ADAPTIVE ENERGY, LLC
37	US/2009-501158	PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING SYSTEM	SEAGATE TECHNOLOGY LLC
38	US/2009-558820	CIRCUIT AND METHOD TO IMPROVE ENERGY HARVESTING EFFICIENCY IN PIEZOELECTRIC HARVESTERS	MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY
39	US/2009-0195122	Power harvesting apparatus, system and method	Innowattech Ltd.
40	US/2010-0237748	SPRING DISC ENERGY HARVESTER APPARATUS AND METHOD	Malkin, Matthew C
41	US/2010-0236036	INJECTION MOLDED ENERGY HARVESTING DEVICE	Stark, Brian
42	US/2010-0194240	PIEZOELECTRIC COMPOSITE WITH TAPERED BEAM	Churchill, David L
43	US/2011-0109201	Manual control device with power generation function and remote control device with power generation function	RENESAS ELECTRONICS CORPORATION, SOUNDPOWER CORPORATION

○ 미국에 의해 기술이 주도되고 있는 것으로 파악되며 일본이 그 뒤를 따르고 있었으며, 한국은 권리보호를 받기 위한 노력이 매우 미진하여 향후 특허권에 대한 대응 전략과 개량기술의 확보가 필요할 것으로 사료됨.

○ 전체 대상 건 중 45% 이상이 미국에 출원된 특허들로 분포되어 있었고, 일본 29%, 유럽 17%, 한국은 9% 정도를 차지하고 있음.

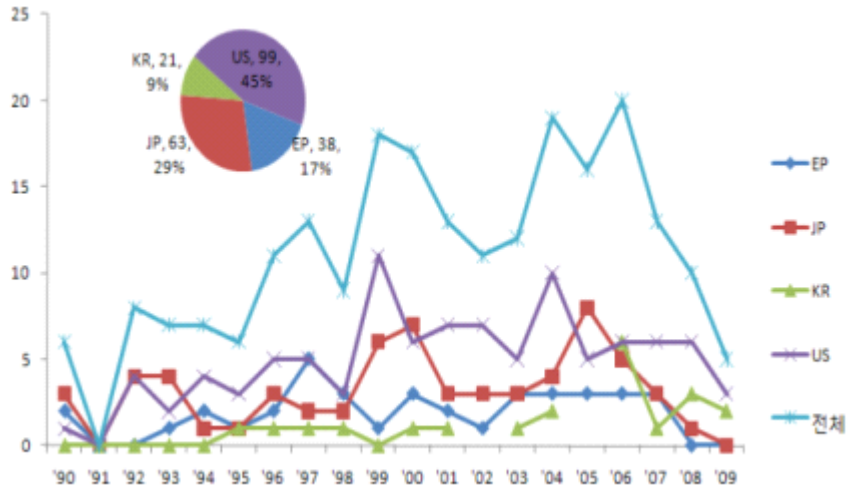


그림 19. 연도별 출원 건수

제4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

○ 철도차량의 진동을 수확하는 압전 에너지 하베스팅 기술은 본 연구를 통해 세계 최초로 개발되었으며, 본 연구개발결과는 이 분야에서 선도적인 역할도 할 수 있을 뿐만 아니라 이 관련분야에 선도적인 자리매김을 하였음.

○ 교통수단에 압전 에너지 하베스팅 기술을 접목시킨 연구 또한 세계 최초이므로 본 연구개발결과를 벤치마킹하여 추후 타 분야의 연구를 수행하기 위한 초석이 될 수 있음.

○ 항해를 시작하면 별도의 에너지 공급이 어렵거나 곤란한 선박의 경우 해양에너지 중 파랑에너지에 의한 진동에너지를 압전 하베스팅에 적용 가능성이 매우 높으므로, 조선업과의 협력 할 수 있음.

○ 압전 조성의 목표값을 산업용으로 사용할 수 있는 d_{33} x g_{33} 값인 13K 를 크게 뛰어넘는 20K(목표: 15K)을 달성함과 동시에 Q_m 값이 1,000 이상이 되는 목표를 달성함. 그 결과로 인해 압전 특성이 좋은 하베스팅용 압전 소자를 구현할 수 있음.

- 현재 상용화 되고 있는 PZT계열의 압전 재료에서 가장 높은 Q_m은 약 2,500 정도이나 이는 $d_{33} \times g_{33}$가 매우 낮음.

- 일반적으로 세라믹의 경우 100 GPa 이상의 Young’s Modulus값을 가지며 매우 탄성적인 세라믹의 경우라도 80 GPa 정도의 값을 가짐.

- 따라서 80 GPa 이하의 Young’s modulus를 가질 때 하베스팅 시 일반 세라믹에 비해 잘 깨지지 않고 탄성적으로 외부 진동에 대해 반응할 수 있을 것이라 판단됨.

- 개발된 조성을 캔틸레버에 부착하여 최대의 진폭과 그에 따른 최대의 압전 발전량을 보이는 60 Hz에서 실험을 진행함.

- 실제 기기 적용 시 공진 주파수에서보다 작은 진폭의 진동이 소자에 가해질 것임. 또한 60 Hz보다 매우 작은 진동수의 진동이 가해질 것으로 예상됨.

- 이 외에 fatigue cycle 및 young‘s modulous등의 기계적 특성과 신뢰성은 철도차량에 적용하여도 재료의 파괴가 일어나지 않는 범위라 판단하였음.

- 또한 Ag의 녹는점이 낮기 때문에 세라믹의 소결 온도 900도 이하가 되어야 추후 Ag를 이용한 multi layer 공정에 적용이 가능하여 tape casting 을 이용한 multi layer제작 공정은 압전 에너지 하베스터의 대면적화 및 대량 생산을 위하여 필수임.

○ 본 연구에서는 $d_{33} \times g_{33}$와 Q_m, 그리고 k_p가 모두 높을 뿐 아니라 소결 온도가 900℃로 매우 낮아 값싼 상용 전극과 함께 동시소성이 가능함.

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

제1절 연구수행 전략

1. 연구수행 추진체계

구 분	주관(위탁)연구기관	협동(위탁)연구기관
1차년도 (2011)	- 철도차량 진동 측정 및 분석을 통한 시스템 설계 및 제작 착수 · 압전 발전 시스템 방식 결정 · 압전 시스템 설계 종료 및 제작 착수 · 한국 철도기술연구원과 업무 협조 체제 구축	- $d_{33} X g_{33}$>13K, k_p>0.5, Q_m>500, 소결온도<1000°C의 압전 세라믹 조성 · PZT 세라믹스에 PZNN을 포함한 relaxor를 고용하여 압전 특성의 향상을 유도 · relaxor의 고용량과 Zr/Ti 비율에 따른 MPB변화를 이해하고 그 근방에서 $d_{33} X g_{33}$가 우수한 조성을 선택
2차년도 (2012)	- 압전 시스템의 열차 적용운전 · 압전 발전을 위한 철도 차량 선별 · 압전 발전 시스템 제작 · 압전소자 제작 및 정류 DC/DC 회로 선정 · 열차에 현장적용하여 성능시험	- $d_{33} X g_{33}$>14K, k_p>0.55, Q_m>800, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성 · CuO등의 첨가제를 이용하여 900도 이하의 저온 소결을 유도 - $d_{33} X g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성 · 개발 조성의 MLCC 및 소자적용 가능성 판단을 위한 전극 반응성 연구
3차년도 (2013)	- 열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm^3)[7] · 현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토 · 시스템 보완 및 개선 · 결과 평가 및 분석	- $d_{33} X g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900°C, Fatigue Cycle>100000, Young's Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성 - 개발 조성의 상용화를 위한 신뢰도 평가 (신뢰도>95%)

7) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

2. 연구수행 추진체계 연차별 세부 추진계획 및 방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법
1차년도	철도차량 진동측정 및 분석을 통한 시스템 설계 및 제작 착수	- 철도차량 진동 측정 및 분석 - 한국철도 기술연구원과 업무 협조 체제 구축 - 압전 발전 시스템 방식 결정 - 압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작 착수
	$d_{33} \times g_{33}$>13K, k_p>0.5, Q_m>500, 소결온도<1000°C의 압전 세라믹 조성	- PZT 세라믹스에 PZNN을 포함한 relaxor를 고용하여 압전 특성의 향상을 유도 - relaxor의 고용량과 Zr/Ti 비율에 따른 MPB변화를 이해하고 그 근방에서 $d_{33} \times g_{33}$가 우수한 조성을 선택
2차년도	압전 시스템 제작 및 열차 적용 운전	- 압전 발전을 위한 철도 차량 선별 - 압전 발전 시스템 제작 · 압전소자 제작 및 정류 DC/DC 회로 선정 - 열차에 현장 적용하여 성능 시험
	$d_{33} \times g_{33}$>14K, k_p>0.55, Q_m>800, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성	- 높은 압전 특성을 가지는 세라믹 조성에 MnO_2를 첨가하여 Q_m의 증가를 유도 - CuO등의 첨가제를 이용하여 900℃ 이하의 저온 소결을 유도
3차년도	$d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성	- 개발 조성의 MLCC 및 소자적용 가능성 판단을 위한 전극 반응성 연구
	열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm^3)[8]	- 현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토 및 분석 - 시스템 보완 및 개선 - 결과 평가 및 분석
	$d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100000, Young's Modulus<80 GPa의 압전 세라믹 조성	- ZnO등의 첨가제를 통하여 Fatigue Cycle의 향상을 유도 - 낮은 Young's Modulus를 가지는 최적의 소결 조건 확립

8) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

제2절 연구수행과정 및 내용

1. 1차년도 연구수행

가. 철도차량 진동 측정 및 분석을 통한 시스템 설계 및 제작 착수

○ 철도차량별 진동 측정 및 분석

- 현재 운행 중인 대표적인 열차 4종 (KTX, KTX-산천, 새마을호, 무궁화호)의 진동을 측정 및 분석하고 가장 큰 진동 가속도를 나타낸 **무궁화호의 바닥**을 압전 에너지 하베스팅 시스템 설치를 위한 우선 연구 대상으로 선별함.

(2차년도 연구내용 - 압전 발전을 위한 철도차량 선별 조기수행)

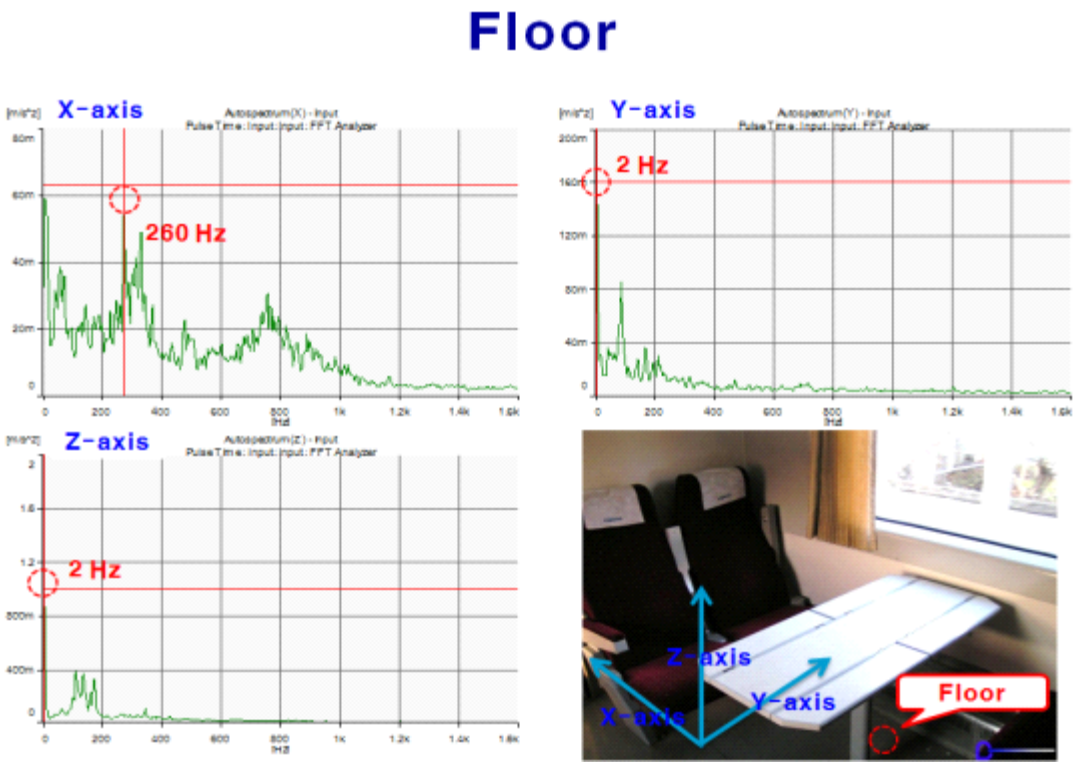
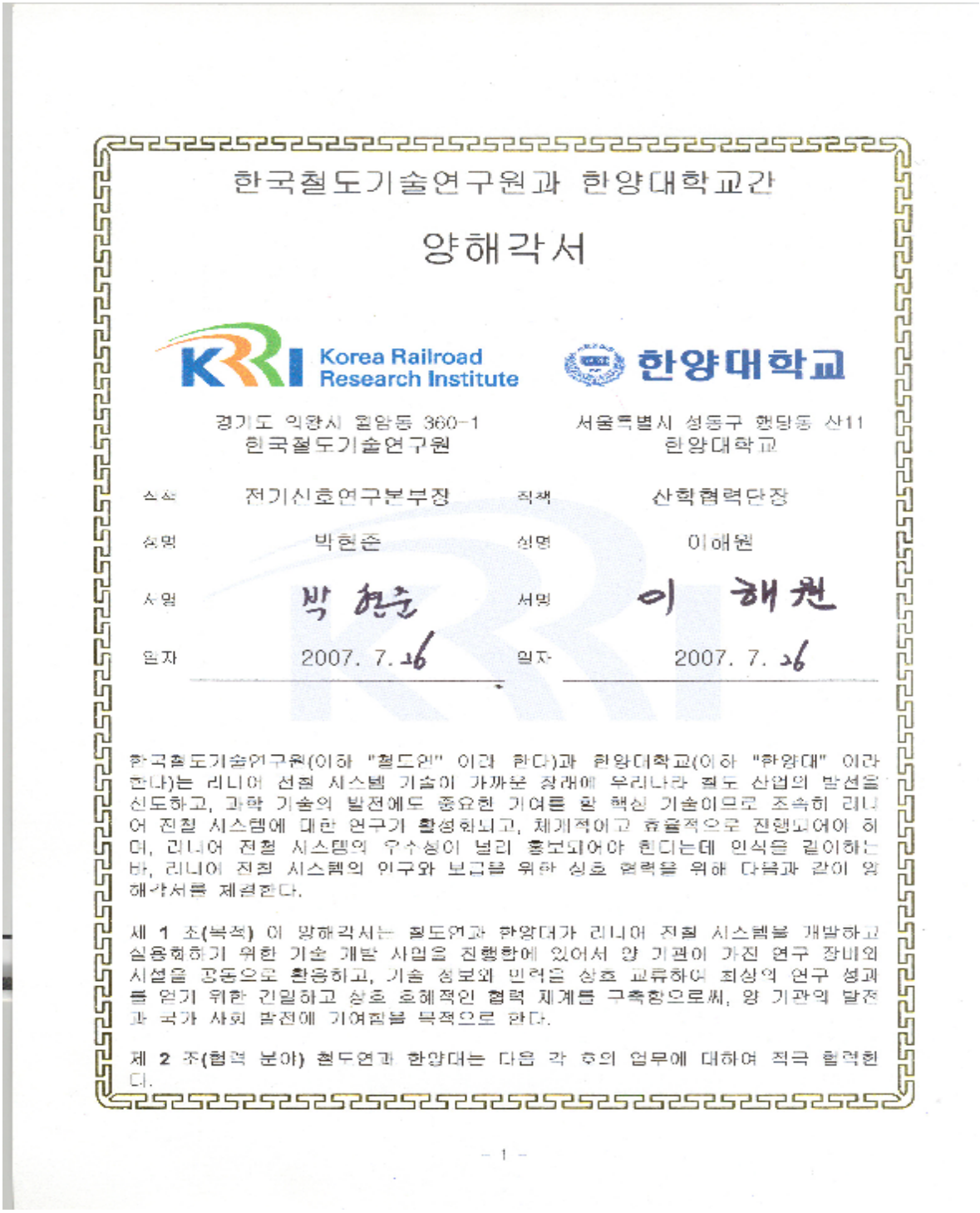


그림 20. 무궁화호의 바닥 진동특성 그래프

○ 한국철도기술연구원과 업무 협조 체제 구축

- 한국철도기술연구원과 업무 협조 체제를 구축하려했으나 기존에 체결한 양해각서가 확인되어 본 사업에 알맞은 협조 사항 교환을 통해 원활한 연구 진행을 위한 업무 협조 체제를 확인함.



한국철도기술연구원과 한양대학교간

양해각서

Korea Railroad Research Institute

한양대학교

	경기도 의왕시 월암동 360-1 한국철도기술연구원		서울특별시 성동구 행당동 산11 한양대학교
소속	전기신호연구본부장	직책	산학협력단장
성명	박현준	성명	이해원
서명	박 현준	서명	이 해원
일자	2007. 7. 26	일자	2007. 7. 26

한국철도기술연구원(이하 "철도연" 이라 한다)과 한양대학교(이하 "한양대" 이라 한다)는 리니어 선형 시스템 기술이 가까운 장래에 우리나라 철도 산업의 발전을 선도하고, 과학 기술의 발전에도 중요한 기여를 할 핵심 기술이므로 조속히 리니어 전철 시스템에 대한 연구가 활성화되고, 체계적이고 효율적으로 진행되어야 하며, 리니어 전철 시스템의 우수성이 널리 홍보되어야 한다는데 인식을 같이하는 바, 리니어 전철 시스템의 연구와 보급을 위한 상호 협력을 위해 다음과 같이 양해각서를 체결한다.

제 1 조(목적) 이 양해각서는 철도연과 한양대가 리니어 전철 시스템을 개발하고 실용화하기 위한 기술 개발 사업을 진행함에 있어서 양 기관이 가진 연구 장비와 시설을 공동으로 활용하고, 기술 정보와 인력을 상호 교류하여 최상의 연구 성과를 얻기 위한 긴밀하고 상호 호혜적인 협력 체계를 구축함으로써, 양 기관의 발전과 국가 사회 발전에 기여함을 목적으로 한다.

제 2 조(협력 분야) 철도연과 한양대는 다음 각 호의 업무에 대하여 적극 협력한다.

- 1 -

그림 21. 한국철도기술연구원과 한양대학교간 양해각서

○ 압전 발전 시스템 방식 결정

- 압전 발전 시스템 방식 결정에 앞서 크게 5개의 서로 다른 모듈을 구상함. ①Steel ball을 이용한 발전, ②Spring을 이용한 발전, **③Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전**, ④프로펠러를 이용한 발전, ⑤철도 차량의 브레이크형 발전의 각각의 실현가능성, 안전성, 안정성 등을 분석 후 ③번을 택함.

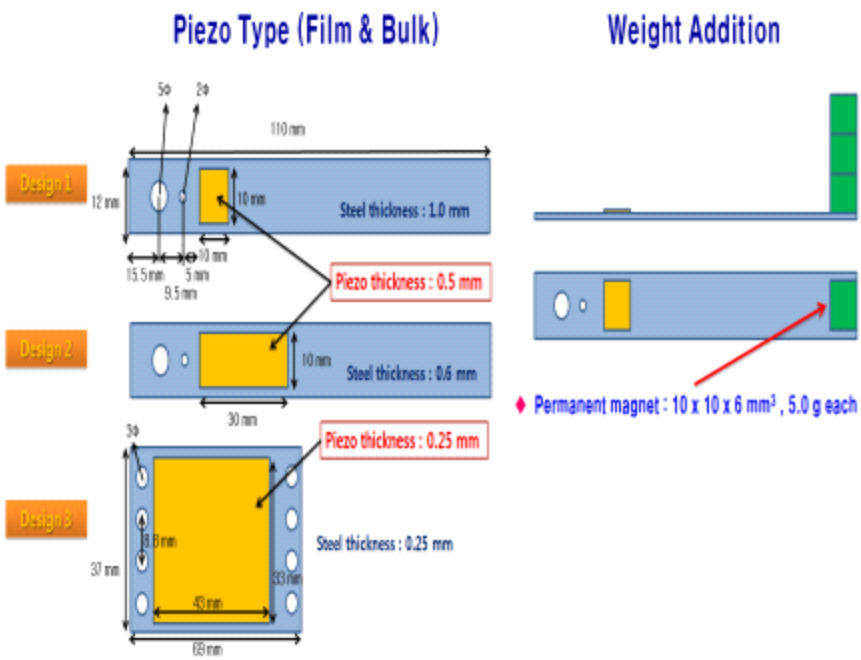


그림 22. 실험한 Substrate, Piezoelectric ceramic의 두께 및 Tip mass의 변화

○ 압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작 착수

- 앞서 결정된 **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템의 3가지의 초기 모델을 제작함.
- 가진기를 이용하여 실험한 결과 더 높은 발전량을 얻기 위한 방안으로 cantilever 4개를 부착할 수 있는 발전 시스템을 제작함.

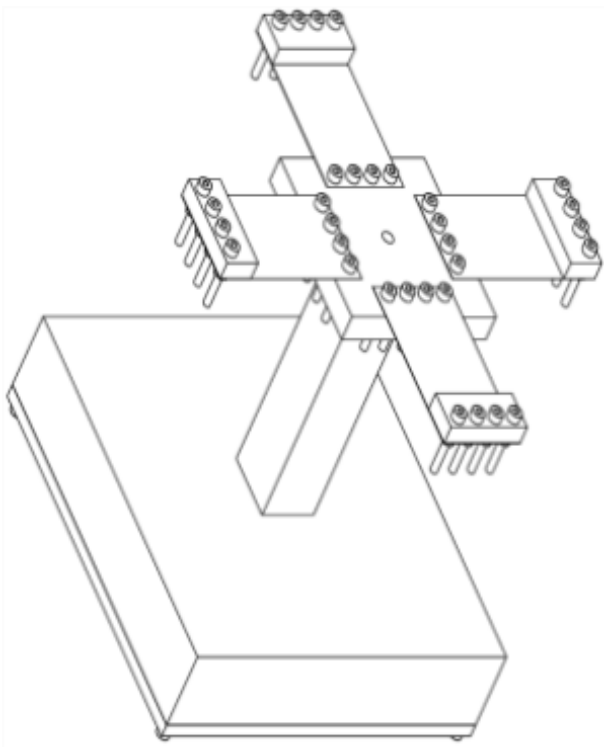


그림 23. 압전 발전 시스템 제작 설계도

나. $d_{33} \times g_{33}$ = 13K, K_p>0.5, Q_m>500, 소결온도<1000℃의 압전 세라믹 조성

○ PZT 세라믹스에 PZNN을 포함한 Relaxor를 고용하여 압전 특성의 향상을 유도

- PZNN Relaxor 물질에서 Zn와 Ni의 비율을 조절하여 압전 특성을 측정함.
- Zn:Ni = 6:4에서 MPB 조성을 가지며 Zn의 비율이 MPB보다 증가했을 때, d_{33}는 감소하고 유전율은 큰 변화가 없으나, Zn의 비율이 감소하면 d_{33} 값에 비해 유전율이 큰 폭으로 감소하여 x Zn이 0.4일 때, 압전 특성 값인 $d_{33} \times g_{33}$는 최대값을 가짐.

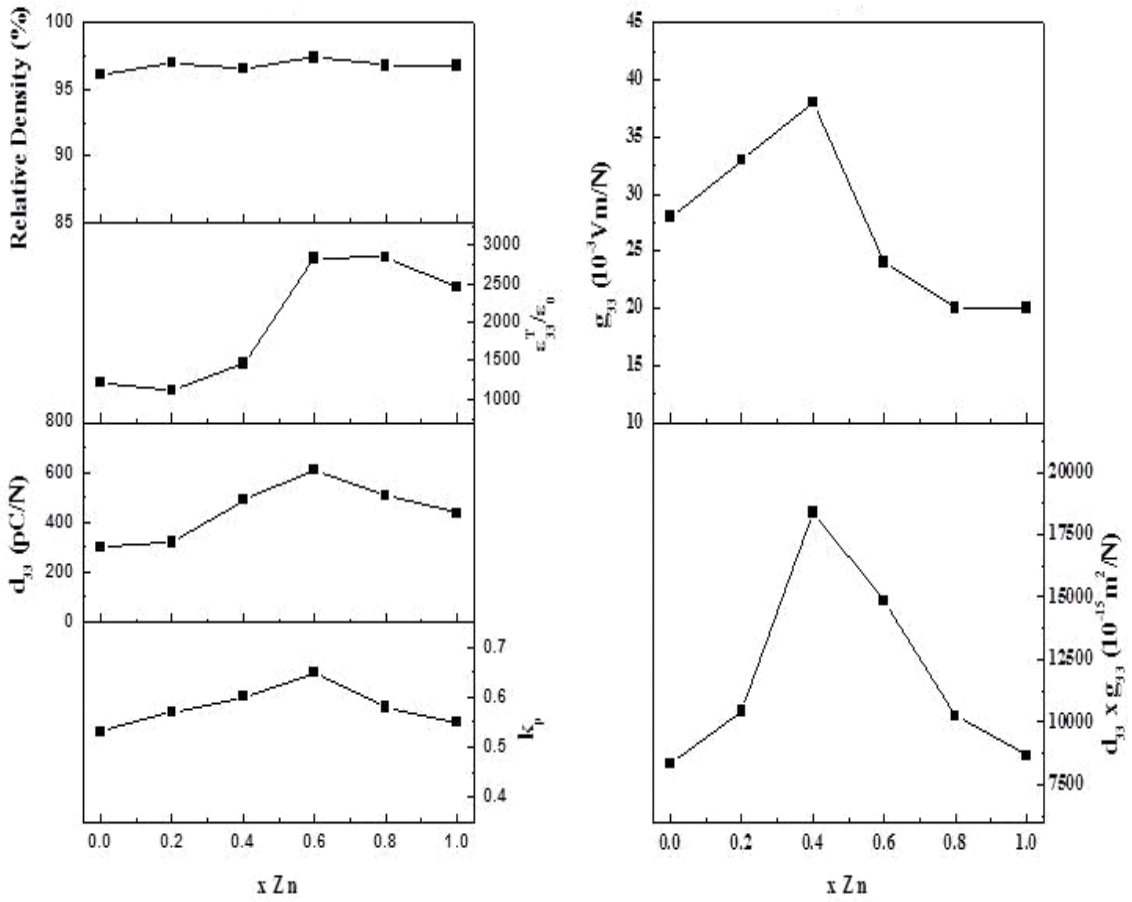


그림 24. PZT-PZNN에서 Zn와 Ni의 비율에 따른 압전 특성

- PZNN에서 Zn:Ni의 비율을 4:6으로 고정하고 PZNN의 비율을 조절하면서 압전 특성을 측정함.

○ Relaxor의 고용량과 Zr/Ti 비율에 따른 MPB변화를 이해하고 그 근방에서 $d_{33} \times g_{33}$가 우수한 조성을 선택함.

- PZNN의 조성이 0.28일 때 MPB조성을 가지며 MPB조성보다 PZNN의 양이 많을 경우 유전율이 d_{33}에 비해 큰 폭으로 감소하게 되며 x=0.31에서 $d_{33} \times g_{33}$는 21.5k 값을 가짐.

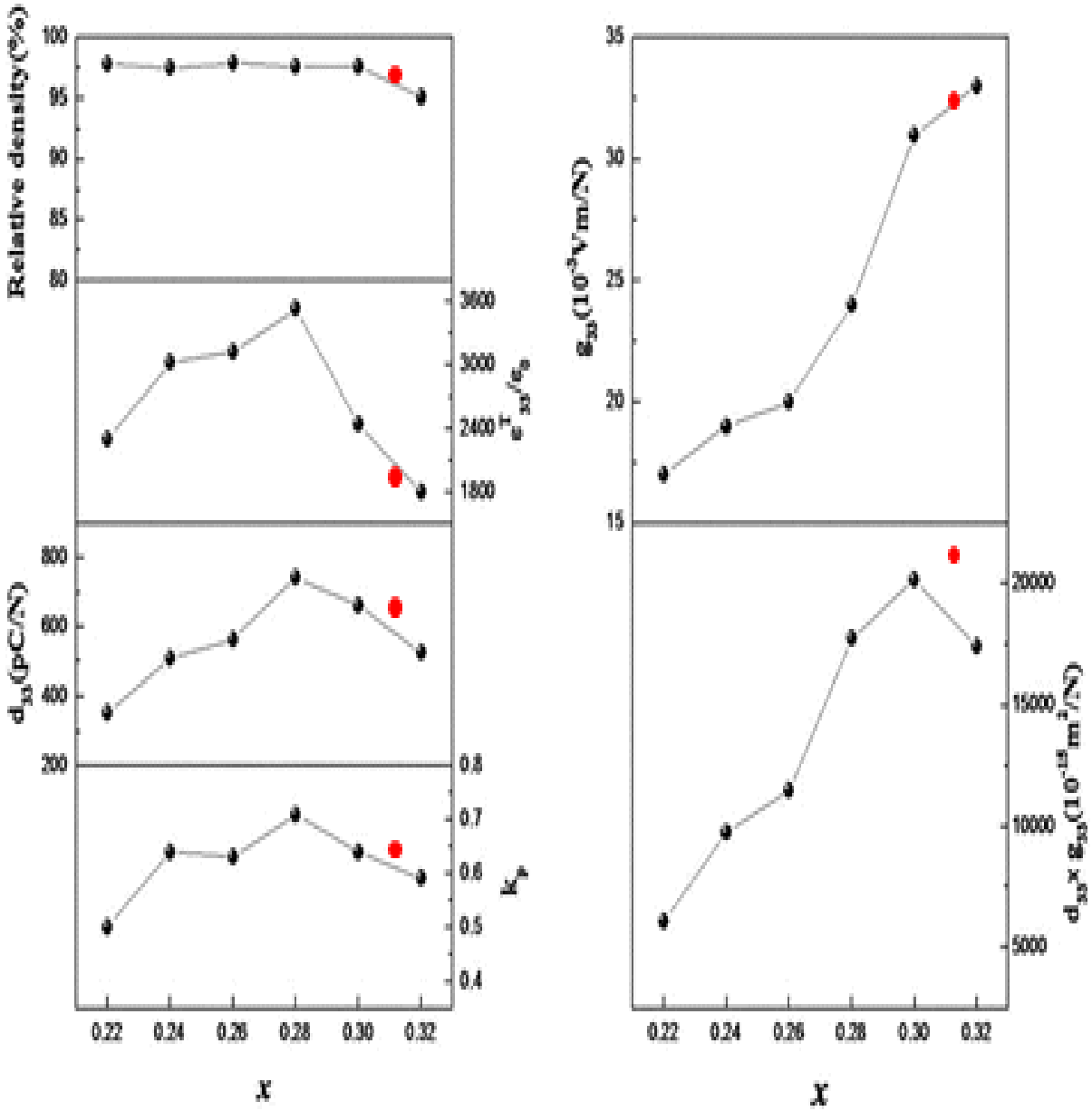


그림 25. PZNN의 고용량에 따른 압전 특성

- PZT-PZNN의 소결시간을 조절하여 결정립 크기를 변화하여 압전 특성을 측정함.

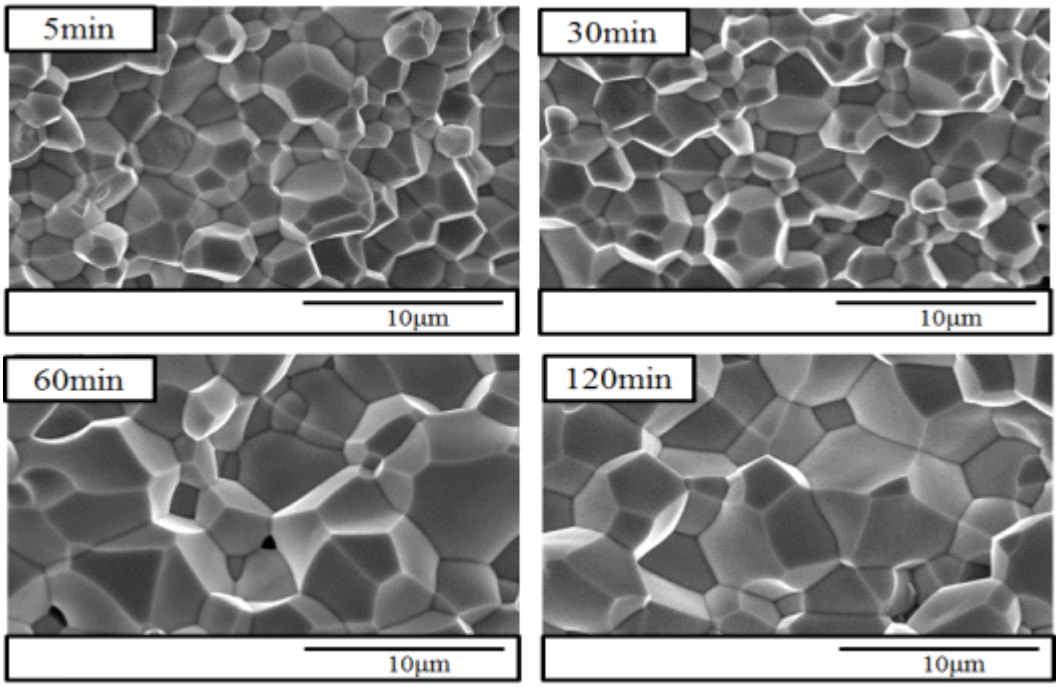


그림 26. 0.69PZT-0.31PZNN 세라믹스의 1100℃에서 소결시간에 따른 SEM 사진

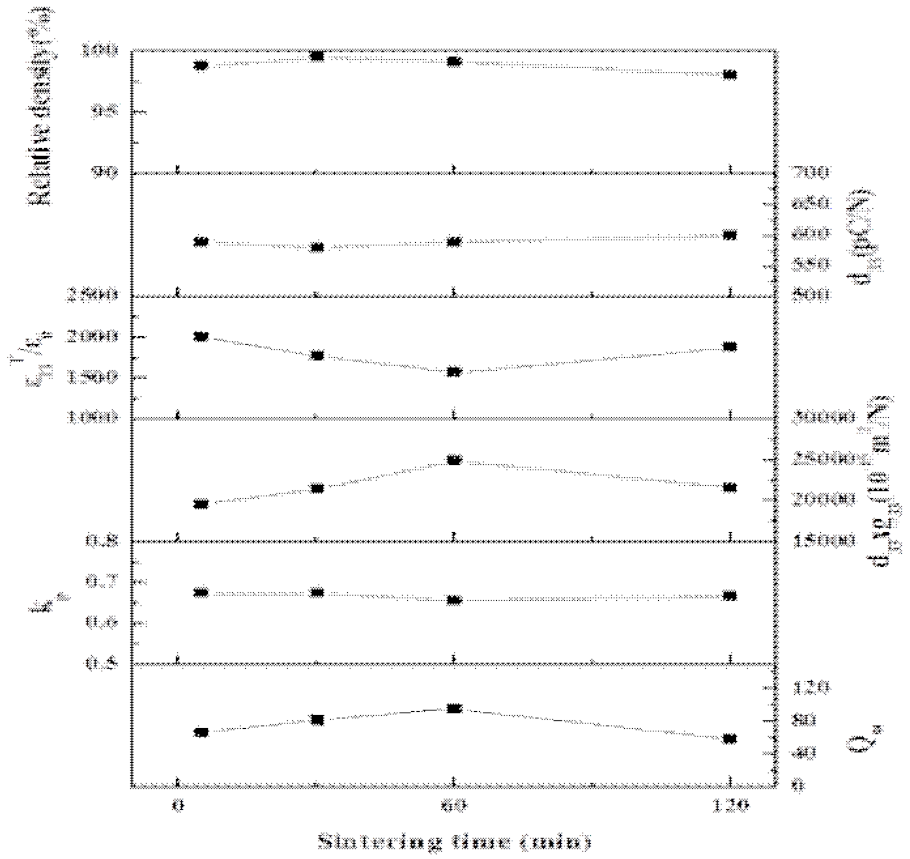


그림 27. PZT-PZNN 세라믹스의 1100℃에서 소결시간에 따른 압전 특성

- 결정립 크기가 2㎛ 일 때, 유전율은 최소값을 가지며 이 경우 최대 $d_{33} \times g_{33}$ 값 (24.9k)를 가짐.

2. 2차년도 연구수행

가. 압전 시스템의 열차 적용 운전

○ 압전 발전을 위한 철도 차량 선별

- 1차년도에 압전 발전을 위한 철도 차량으로 선별했던 무궁화호의 운행이 점차 감소되고 있다는 평가위원의 의견에 따라 **추가적으로 다섯 종류의 열차**(ITX-청춘, 누리로, 차세대 전동차, 지하철 분당선, 지하철 신분당선)의 진동을 측정 및 분석하여 재 선별함.

- 평가위원이 목포 일로역에 위치한 실험 열차에서 시스템 적용을 요구하여 아직 상용화 되지 않은 **차세대 전동차**(Korean Advanced Urban Train, KAUT)에서 압전 발전 시스템을 적용한 실험을 진행함.

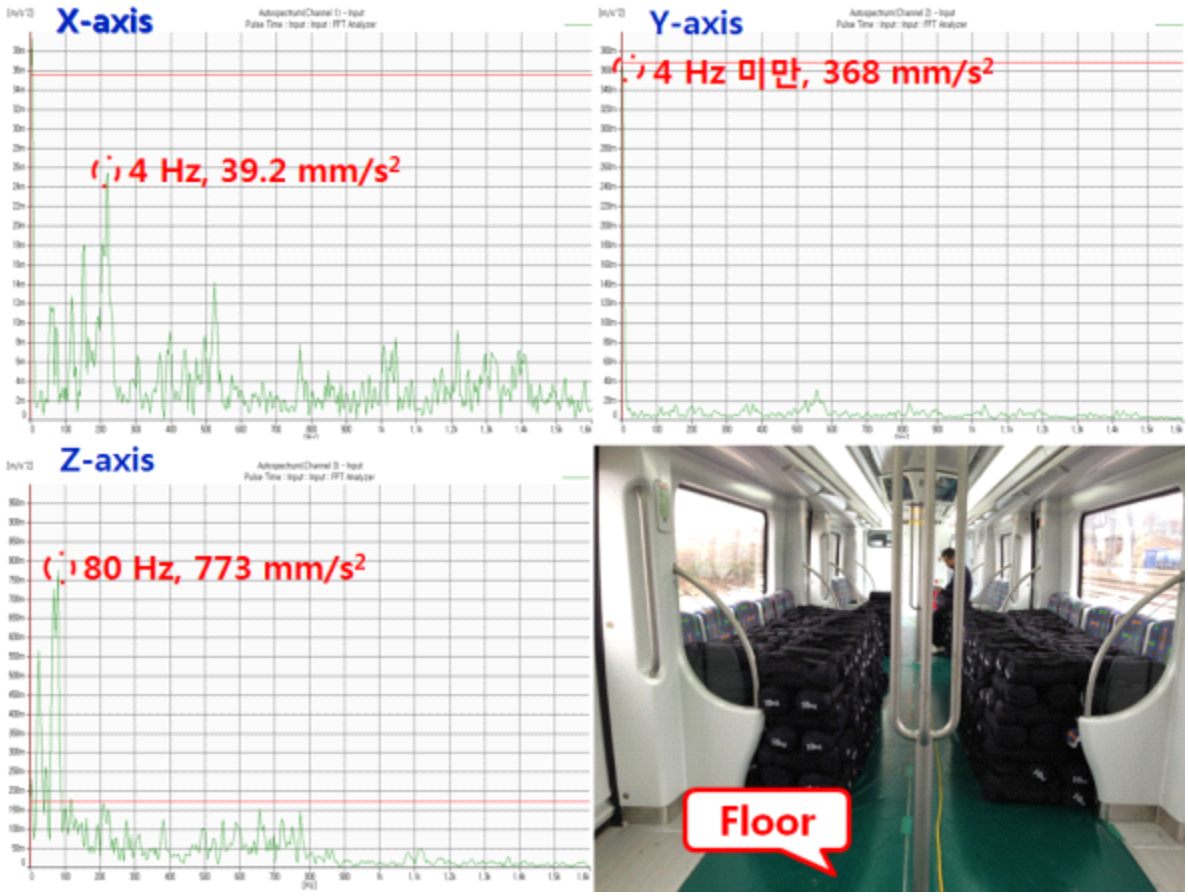


그림 28. 차세대 전동차의 진동 그래프 및 실험사진

○ 압전 발전 시스템 제작

- Cantilever Ⅰ형 시스템, Cantilever Ⅱ형 시스템 및 개선형 시스템을 제작하였으며 2차년도의 최종 모델인 Cantilever Ⅱ형 개선형 시스템은 아세탈로 제작되어 시스템의 경량화 및 누설전류로 인한 노이즈 현상을 개선할 수 있었음.

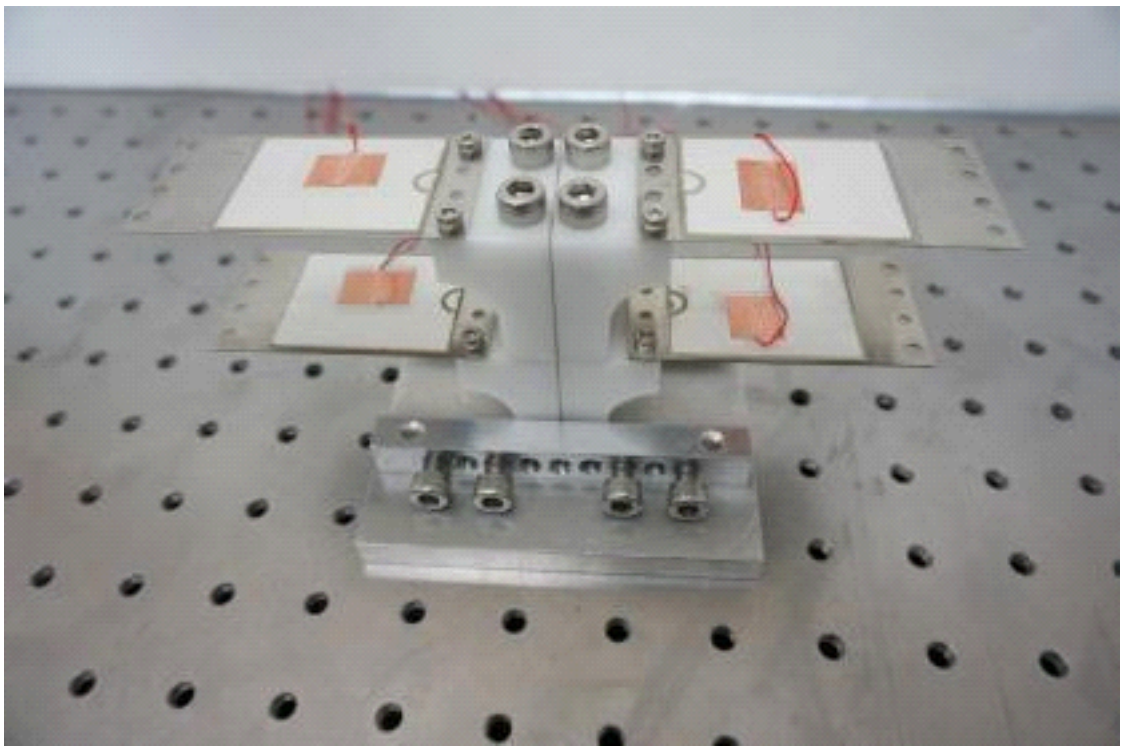


그림 29. Cantilever II 개선형 시작품 - 측면도 모습

- 추가적으로 압전 발판형 시스템을 제작하여 철도차량의 계단 및 내부바닥에 설치하여 사람이 밟고 지나가는 힘을 이용할 수 있게 함. 압전 발판형 시스템을 65 kg의 사람이 밟고 올라갈 때의 최대 단위 체적당 발전량은 약 3.66 mW/cm^3 를 얻었으며, 10회의 평균을 측정한 결과 단위체적당 최대 발전량은 약 1.65 mW/cm^3 를 얻었음.

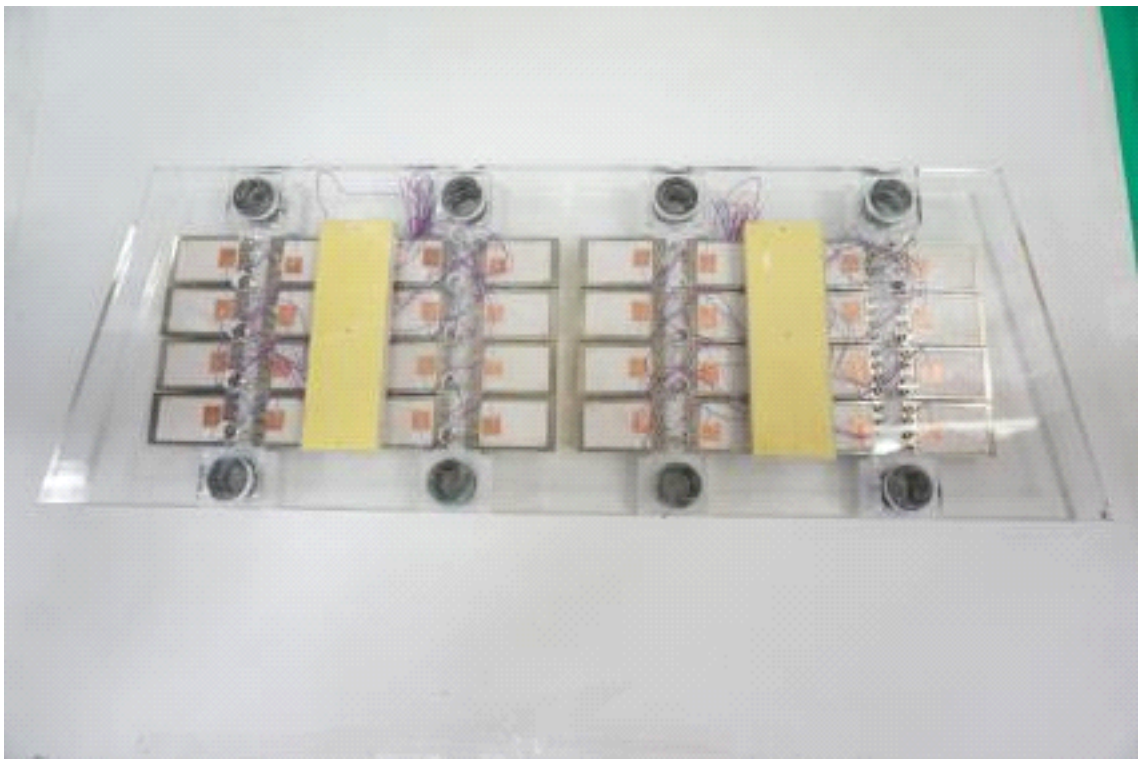


그림 30. 압전 발판형 시스템의 시작품 - 평면도 모습

○ 압전소자 제작 및 정류 DC/DC 회로 선정

- 제작한 압전 소자의 성능을 분석하기 위해 2차 충격대를 포함한 타격 실험에서 한 번의 타격을 한 결과, 60 kΩ에서 임피던스 매칭되어 최대 34.1 V의 전압이 출력되었고, 이를 발전량으로 계산하면 16.4 mW로 과제 목표인 15 mW를 충분히 달성함.

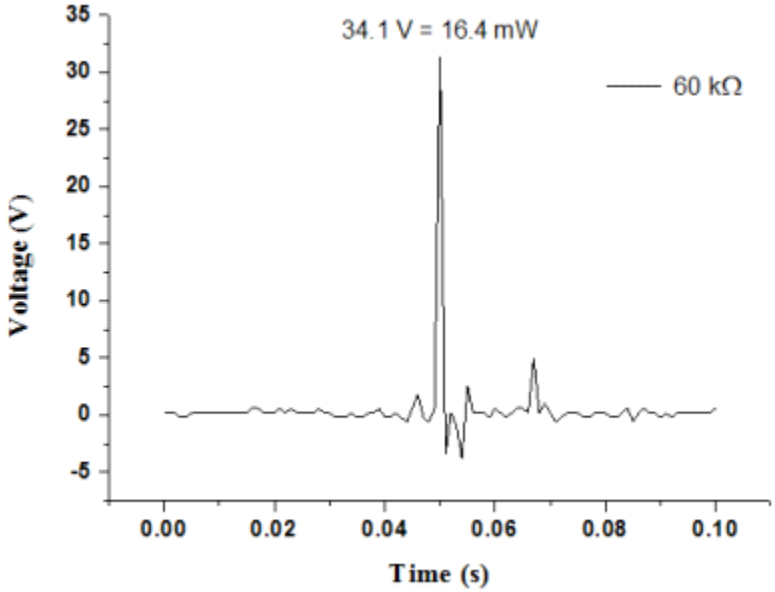


그림 31. 2차 충격된 타격 실험을 통한 압전 성능 분석

- 압전 소자에서 발생된 전력을 저장하기 위해 납축전지, Ni-Cd 전지, 슈퍼커패시터 등 에너지 저장장치에 관한 적합성을 검토한 결과, 슈퍼커패시터 (5.5 V, 0.45 F)가 가장 적합하다고 판단되었으며 LM7805 regulator를 선정하여 출력이 5 V 가 되도록 정전압 회로를 구성함.

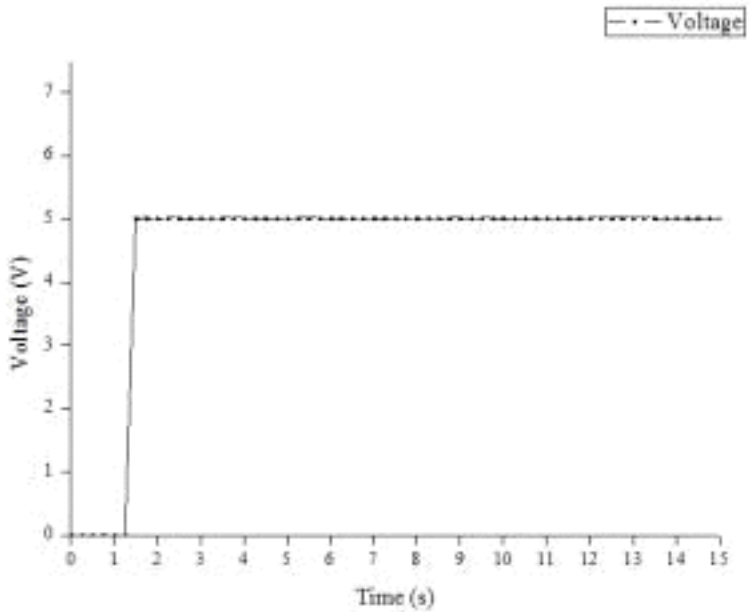


그림 32. 압전 소자에 LM7805 regulator를 적용한 실제 전압그래프

○ 열차에 현장 적용하여 성능시험

- 에너지 효율이 가장 높은 66 Hz에서 압전 cantilever의 shape 조건과 부착된 tip mass의 무게를 변수로 하여 실험한 결과 단위 체적당 발전량 약 95 μW/cm^3 를 얻었음.

(※단위 체적당 발전량 약 95 μW/cm^3 은 변경 전 최종목표의 95 %에 해당하는 결과임.)

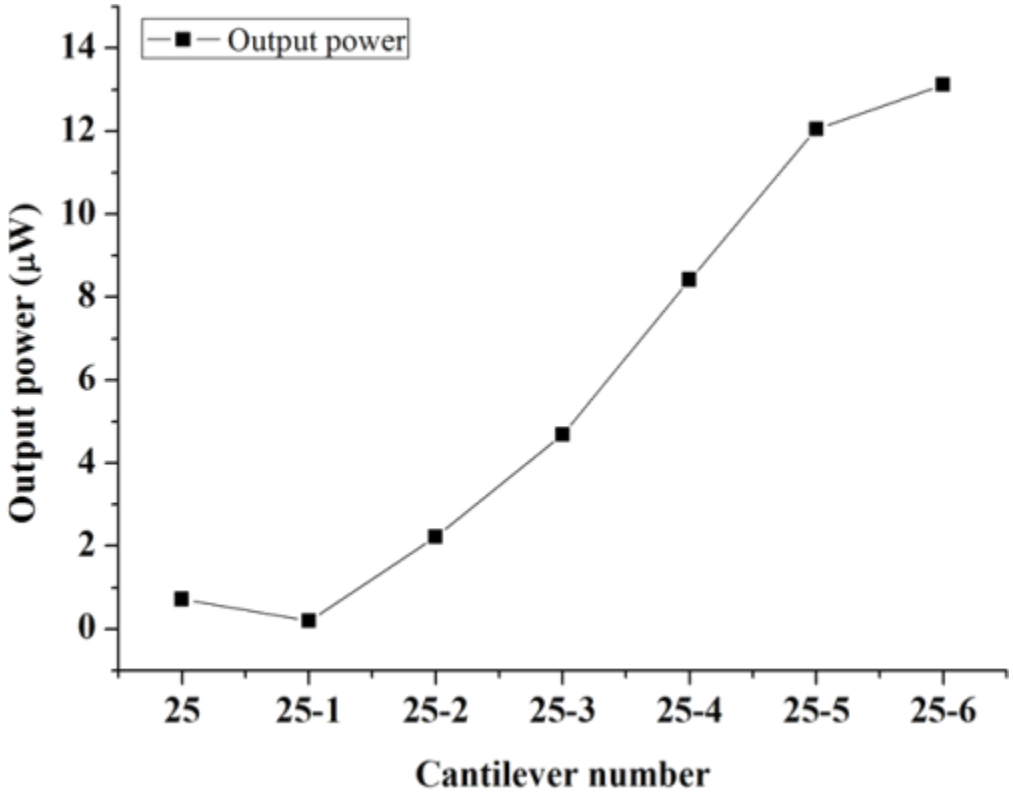


그림 33. 에너지 변환 효율이 가장 높은 주파수를 공진주파수로 하는 8 종류의 압전 cantilever를 차세대 전동차에 적용하여 얻은 발전량

나. $d_{33} \times g_{33}$>14K, k_p>0.55, Q_m>800, 소결온도<900℃의 압전 세라믹 조성

○ 높은 압전 특성을 가지는 세라믹 조성에 MnO_2를 첨가하여 Q_m의 증가를 유도함.

- 1차년도에 기 수행한 PZT-PZNN 기반의 세라믹스에 MnO_2를 첨가하여 압전 특성을 평가함.
- 1차년도에 기 수행 하였던 MnO_2 첨가에 의한 효과를 명확히 하기 위하여 MnO_2 첨가량에 따른 압전 특성을 재평가함.
- 기존에 사용한 Rhombohedral 구조를 가지는 조성 대신 압전 특성이 가장 높은 Morphotropic Phase Boundary(MPB) 구조를 가지는 조성을 사용함.
- 사용 조성은 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN 이고, 이에 MnO_2를 첨가하여 소결 후 압전 특성을 평가함.

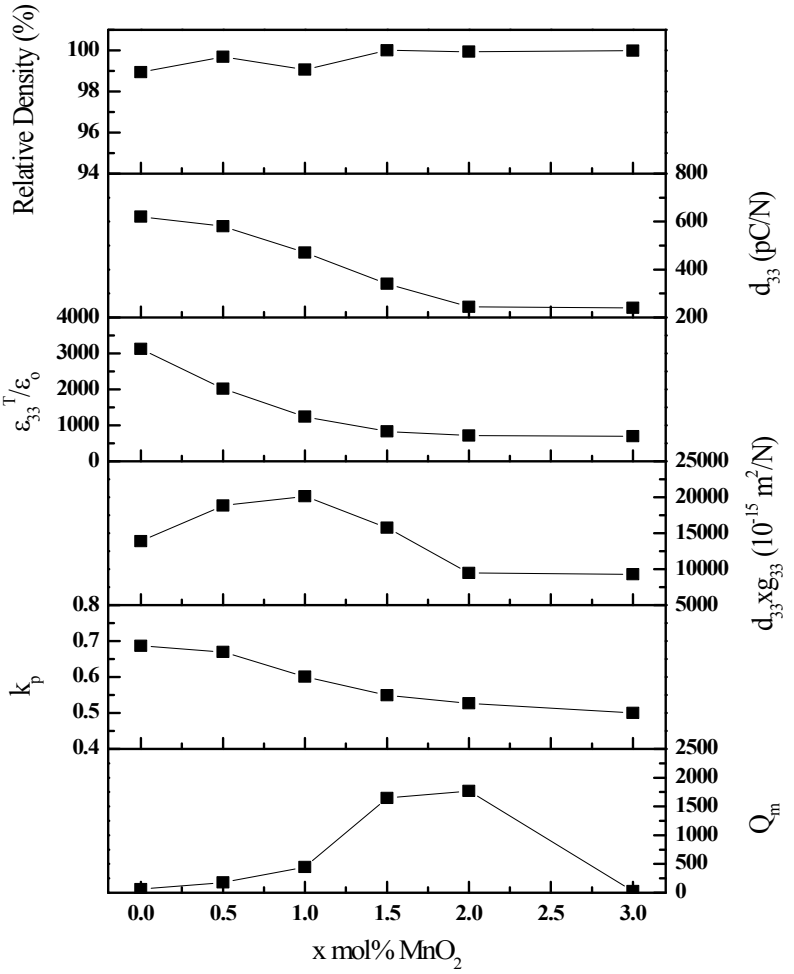


그림 34. 1150℃에서 4시간 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + x mol% MnO_2 세라믹스의 MnO_2 첨가량에 따른 압전 및 유전 특성

- 1150°C에서 모든 시편은 고르게 잘 소결 되었으며 상대 밀도가 모두 98% 이상임.
- MnO_2가 첨가되지 않았을 때에는 MPB에서 전형적으로 나타나는 높은 d_{33} 및 k_p, 유전율을 얻을 수 있었으나 MnO_2 첨가량이 증가함에 따라 이러한 특성이 감소하게 됨.
- Q_m은 상대 밀도와는 무관하게 MnO_2의 첨가량이 증가함에 따라 증가하여, 약 2.0 mol%의 MnO_2가 첨가되었을 때 1766의 높은 Q_m을 나타냄을 확인할 수 있음.
- 이는 상대 밀도나 입도 사이즈 등의 감소에 의한 것이 아닌 MnO_2 첨가에 따른 Hardening effect에 의한 것임.
- MnO_2의 첨가량이 2.0 mol%를 초과하게 되면 다시 Q_m이 감소하는 것을 확인할 수 있는데 이는 MnO_2 과량 첨가에 따른 과다 액상 생성 및 이차 상 증가에 의한 것으로 예상할 수 있음.
- 약 1.5 mol%의 MnO_2가 첨가된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2를 1150°C에서 4시간 동안 소결 하였을 경우 $d_{33} \times g_{33}$=15.7K, k_p=0.55, Q_m=1645의 매우 높은 압전 특성을 나타냄.
- 높은 압전 특성을 가지는 PZT-PZNN 세라믹에 MnO_2를 첨가하여 Q_m=1645까지 증가를 유도하였고, 좋은 압전 특성을 유지하며 목표를 달성함.

○ CuO등의 첨가제를 이용하여 900℃ 이하의 저온 소결을 유도함.

- $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 세라믹스에 CuO를 추가 첨가하여 과제 목표를 달성함.
- 상기 개발한 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2조성의 소결 온도를 추가적으로 낮추어 과제 목표인 900℃ 소결을 달성하기 위해 CuO를 첨가함.

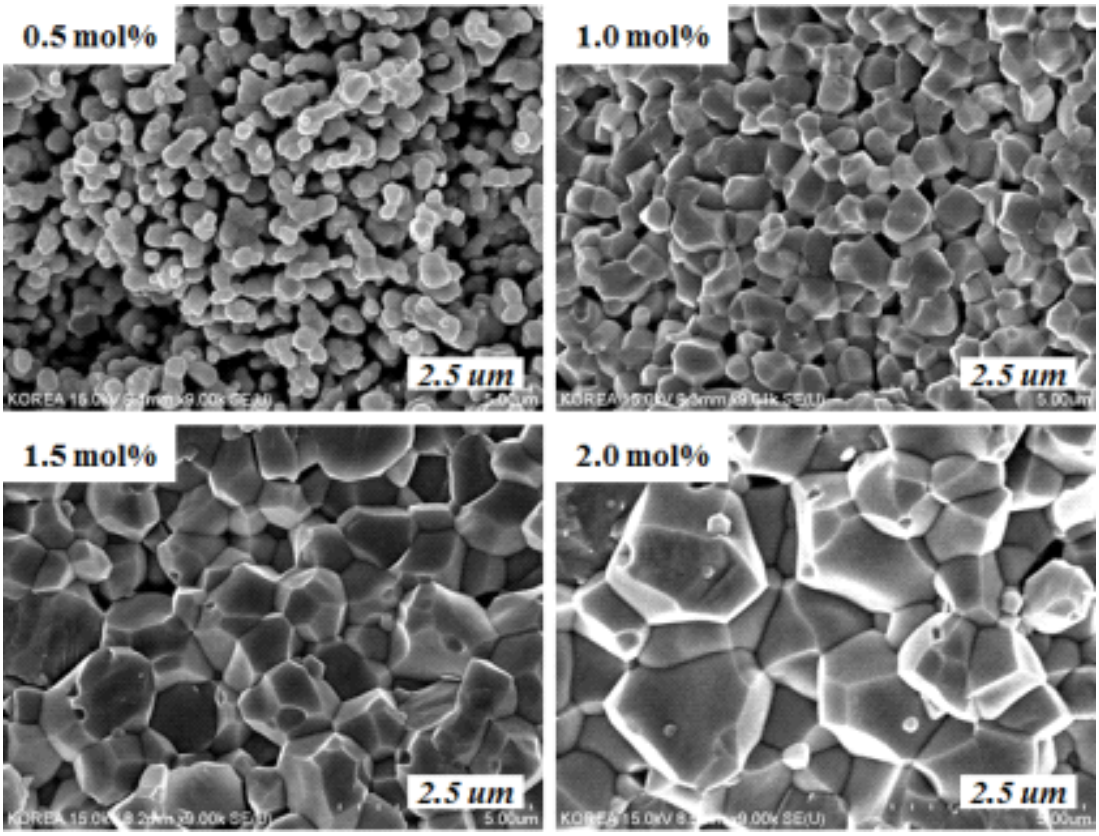


그림 35. 900℃ / 12시간 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO2 + x mol% CuO 세라믹스의 CuO 첨가량에 따른 미세구조 사진

- CuO 첨가량이 1.0 mol% 이하인 경우에는 매우 porous 한 미세구조가 관측 되었으며, 입도 크기 또한 매우 작은 것을 알 수 있어, 시편의 소결이 완벽히 이루어지지 않은 것임을 알 수 있음.
- CuO의 첨가량이 1.5 mol% 이상이 되면, 치밀화 및 입도 성장이 나타나는 것을 알 수 있으며, 이는 CuO 첨가량 증가에 따른 액상 형성과 밀접한 관련이 있는 것으로 판단됨.
- 2.0 mol%의 CuO가 첨가된 경우 압도 사이즈가 가장 컸으며, 그로 인해 압전 및 유전 특성이 가장 우수할 것으로 예상됨.

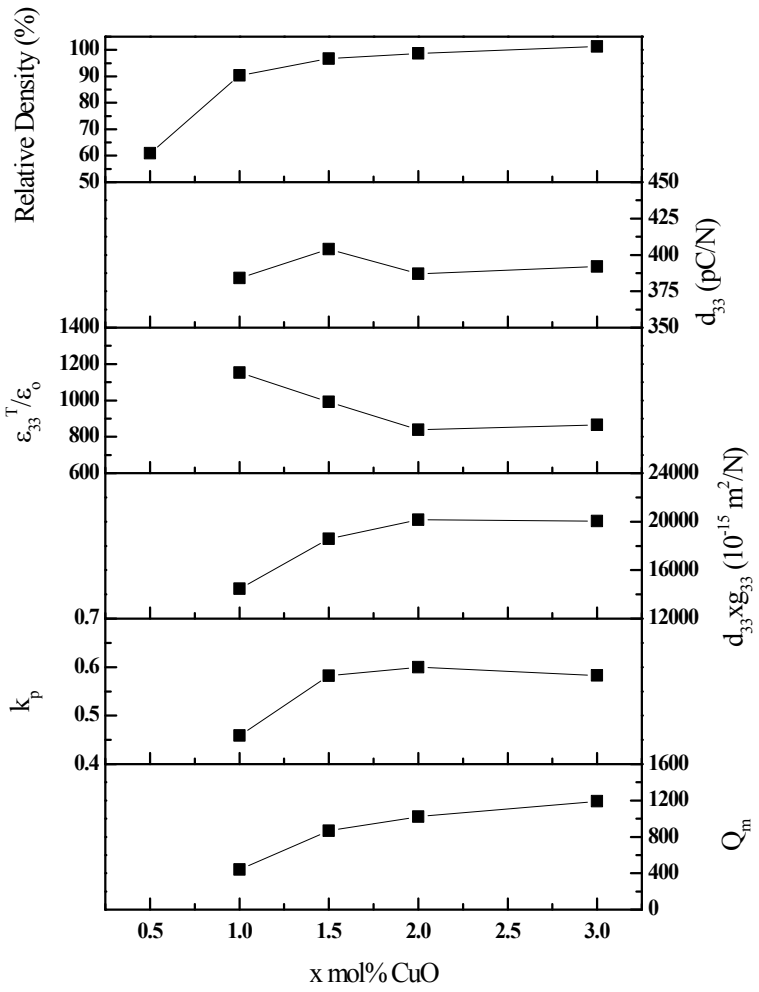


그림 36. 900℃ / 12시간 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + x mol% CuO 세라믹스의 CuO 첨가량에 따른 압전 및 유전 특성

- CuO 첨가량이 1.0 mol% 이하인 경우에는 소결이 잘 일어나지 않은 것을 알 수 있으나 CuO가 증가함에 따라 소결 밀도가 증가하고 그에 의해 유전율을 제외한 모든 압전 특성이 증가함.
- 이러한 압전 특성의 증가는 소결 밀도와 입도 크기 증가에 의한 것으로 판단되며 앞선 SEM 결과와도 부합함.
- 유전율의 경우 CuO 첨가량 증가에 따라 지속적으로 감소하게 되는데 이는 PZT계열의 세라믹스에서 종종 나타나는 현상임.
- Uchino 등의 보고에 따르면 입도 사이즈가 작아짐에 따라 유전율이 감소하지만, 특정 입도 사이즈 이하에서는 입도 사이즈가 감소할수록 유전율이 다시 상승한다고 하였으며, 이때의 특정 입도 사이즈는 대략 1~3 μm 정도임.
- 본 개발 조성도 위 거동을 따랐을 것으로 판단되며, 그에 의해 CuO 첨가량이 증가함에 따라 입도가 커지지만 유전율은 감소하는 것으로 생각됨.
- 개발 조성은 약 2.0 mol%의 CuO가 첨가되었을 때, $d_{33} \times g_{33}$=20161, k_p=0.6, Q_m=1020의 가장 우수한 압전 특성을 나타냄.

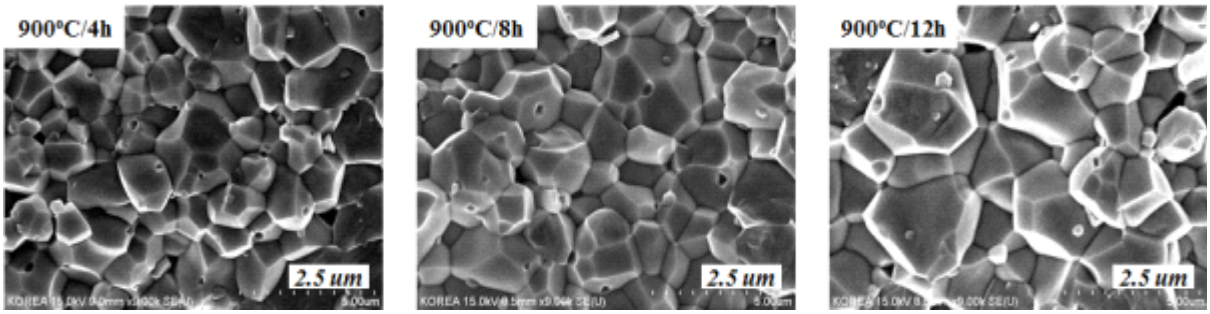


그림 37. 900℃에서 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 소결 시간에 따른 미세구조 사진

- 소결 시간이 증가함에 따라 입도 성장이 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있으며, 이러한 소결 시간에 따른 입도 크기 차이는 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2.0 mol% CuO 세라믹스의 압전 및 유전 특성에 매우 큰 영향을 미쳤을 것으로 판단됨.
- 소결 시간에 따라 상대 밀도의 변화는 거의 없었으며, 모든 시편이 소결이 잘된 것으로 나타남.
- 소결 시간이 증가함에 따라 압전 특성이 증가하고 유전율이 감소하게 되는데 이는 앞선 SEM 이미지에서도 알 수 있듯이 입도 크기의 증가의 의한 것임을 알 수 있음.
- $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2.0 mol% CuO 세라믹스를 900℃에서 12시간 동안 소결할 경우 가장 우수한 압전 특성을 얻을 수 있었고 과제 목표를 충분히 달성할 수 있었음.

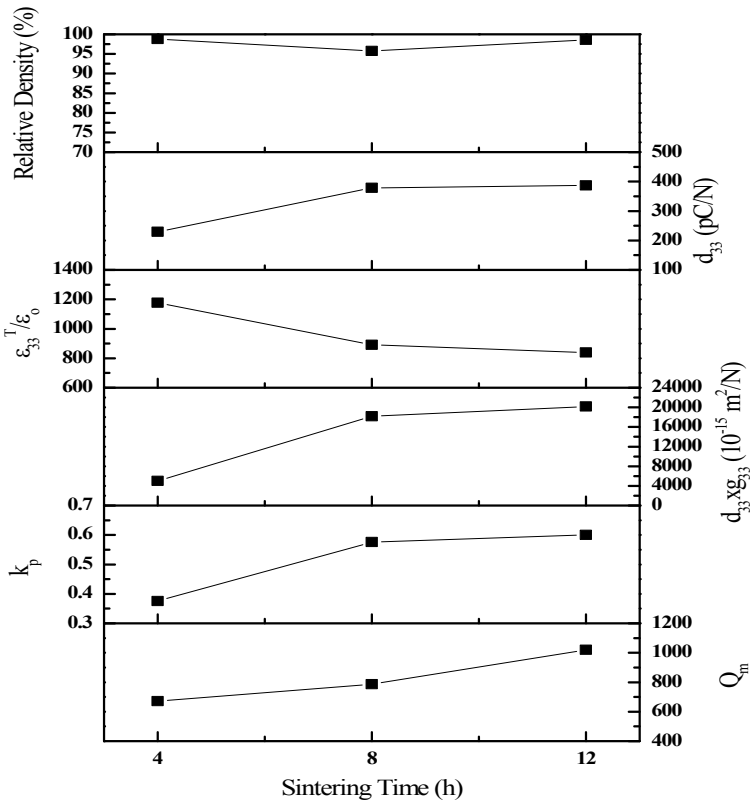


그림 38. 900℃에서 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 소결 시간에 따른 압전 및 유전 특성

다. $d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900°C의 압전 세라믹 조성

○ 개발 조성의 MLCC 및 소자적용 가능성 판단을 위한 전극 반응성 연구

- 개발 조성을 전극과 함께 동시소성한 후 XRD 분석을 통하여 이차상 형성 여부 관측
- 상기 개발 조성의 MLCC 적용을 위하여 동시 소성 시 전극과의 반응성 여부를 관측 함.
- 전극은 100% Ag 전극으로써 녹는점이 960℃인 상용 전극을 사용 하였으며, 전극과 세라믹 파우더를 섞어 green body를 형성한 후, 소결하여 XRD 분석을 통해 이차상 형성 여부를 관측함.

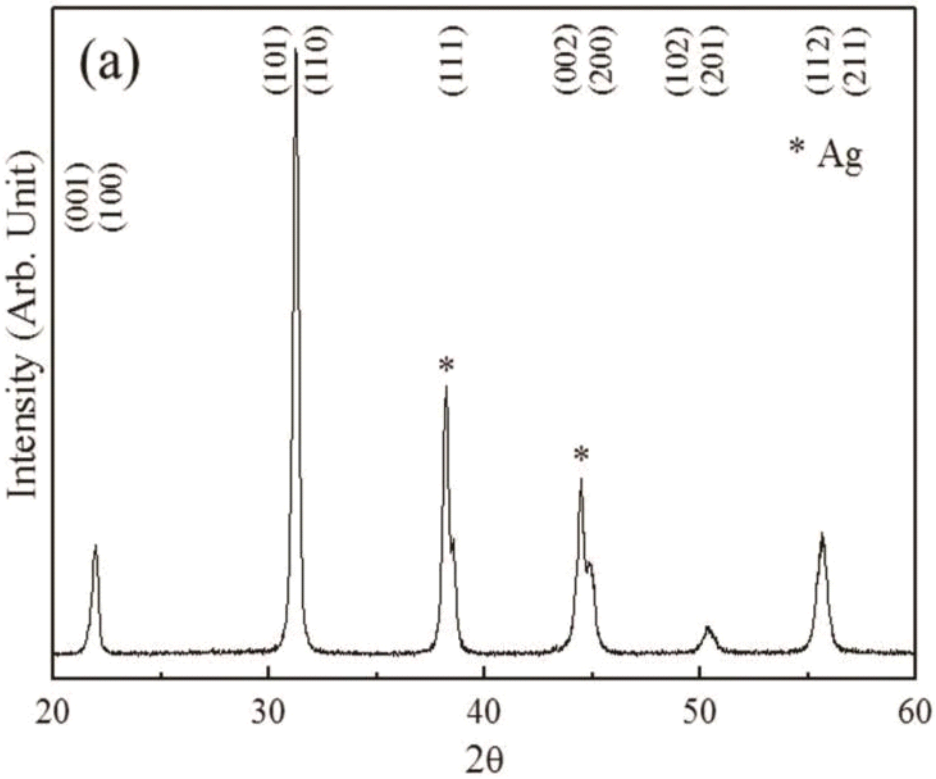


그림 39. 900℃에서 12시간 동안 Ag 전극과 동시 소성된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 XRD 패턴

- XRD 분석 결과 세라믹과 순수 Ag를 제외한 어떠한 이차상도 발견되지 않았음을 알 수 있고, 이는 동시소성 과정에서 세라믹은 전극과 반응하지 않았음을 나타내며, 상기 개발 조성은 MLCC 공정에 충분히 적용이 가능한 것임을 알 수 있음.

3. 3차년도 연구수행

가. 열차적용운전 평가 및 수정 보완 (0.15 mW/cm^3)[9)]

○ 현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토

- 현재 운행 중인 열차 중에서 확대 보급예정인 ITX-청춘 열차에서 실험을 진행함.
  (2차년도 평가위원 의견을 반영함. 추후 현대로템(차량제작업체)의 자문에 따라 차세대 전동차(대불 시험선) 및 ITX-청춘 모두 실험을 하였음.)

- 2차년도에 선정하였던 **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 이외에 1) 자력을 이용한 발전, 2-1) 진자를 이용한 발전, 2-2) 구슬을 이용한 타격형 발전, 2-3) 스프링과 진자를 이용한 발전 모델을 제작하여 시스템변화에 따른 압전 발전량을 분석함.

- 추가적으로, 열차가 지나갈 때 3) 풍력을 이용한 모델을 제작하여 실제 적용함.

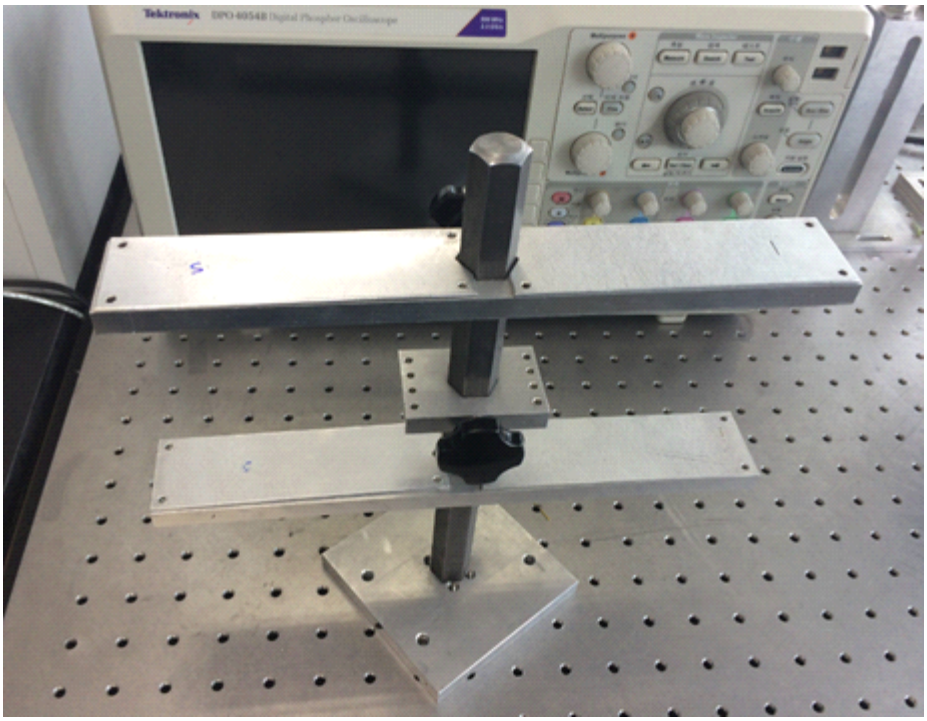


그림 40. 자력을 이용한 발전 시스템

- 1) 자력을 이용한 발전 시스템은 한쪽의 자석을 고정한 후, 다른 한쪽의 자석의 거리를 변화하여 실험하였으며 위・아래의 자석 배치는 S극으로 고정했을 때 거리 3 cm에서 최대 627.8 mV의 전압을 보임.

9) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

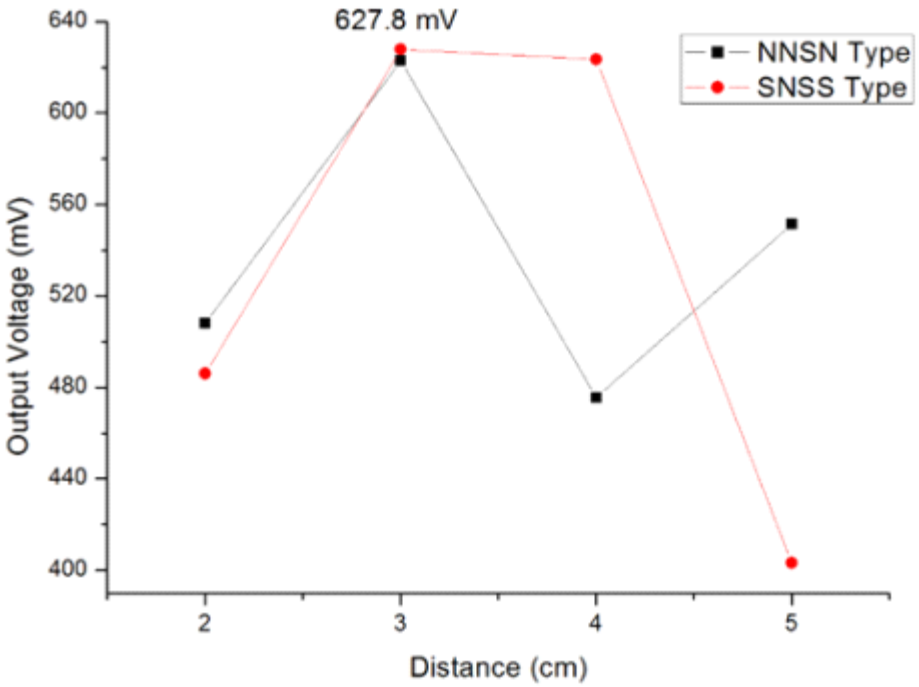


그림 41. 자력을 이용한 발전 시스템의 거리에 따른 발전량 그래프

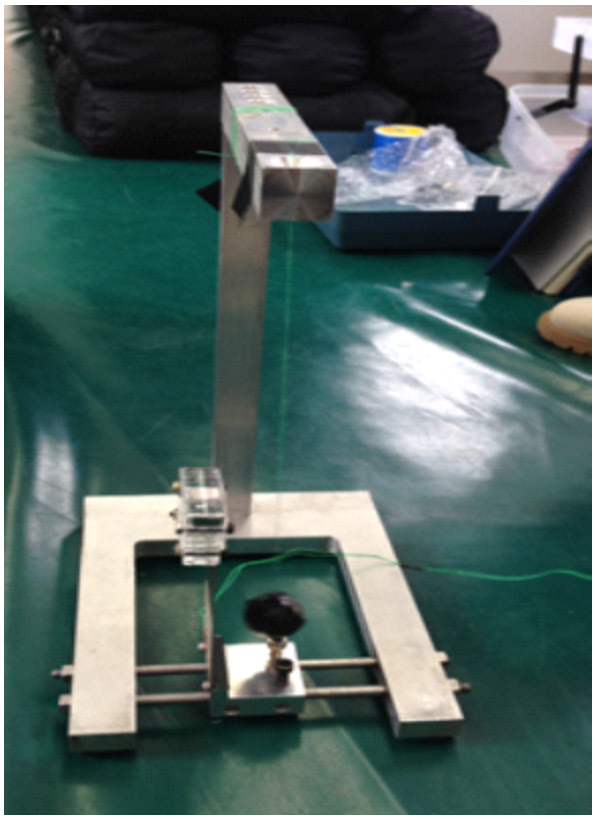


그림 42. 구슬을 이용한 타격형 발전시스템

- 2-1) 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템은 열차가 운행할 때 생기는 관성력으로 인해 실에 매달린 구슬이 압전체를 직접적으로 타격하여 발전하는 방식이며, 70 kΩ의 저항에서 최대 12.7 μW의 발전량을 나타냄.

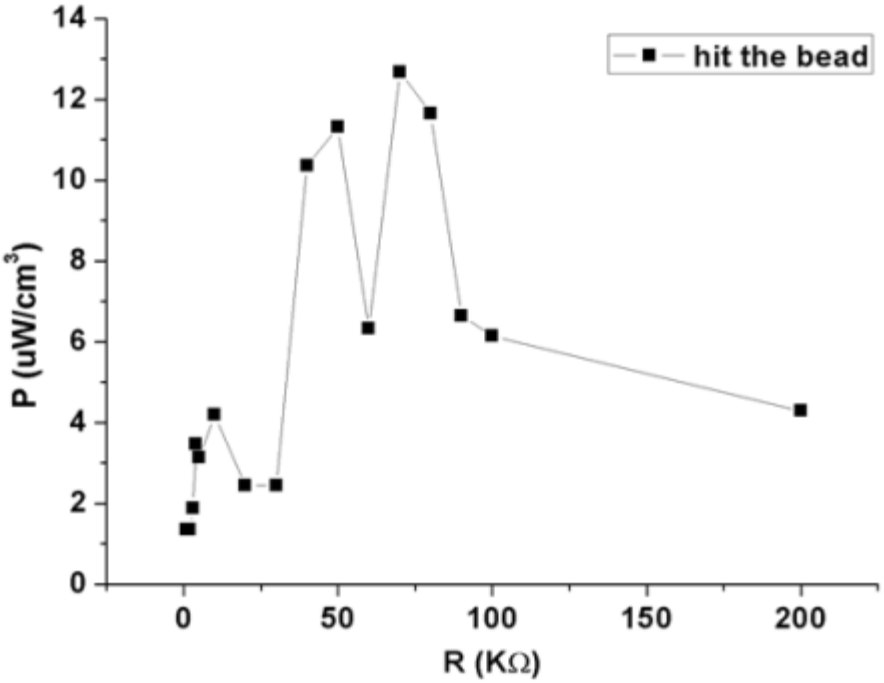


그림 43. 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템의 저항에 따른 발전량 그래프



그림 44. 진자를 이용한 발전 시스템

- 2-1) 진자를 이용한 발전 시스템은 고정 실 끝에 자석을 매달아 열차의 관성으로 인해 불규칙적으로 운동하는 자력을 이용한 발전 방식이며, 50 kΩ의 저항에서 최대 29.4 μW의 발전량을 나타냄.

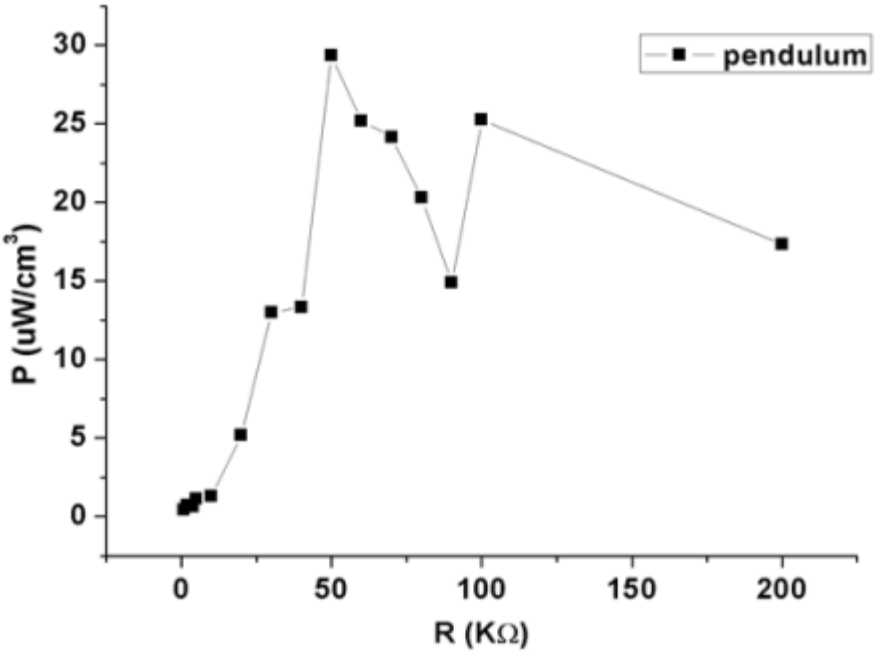


그림 45. 진자를 이용한 발전 시스템의 저항에 따른 발전량 그래프

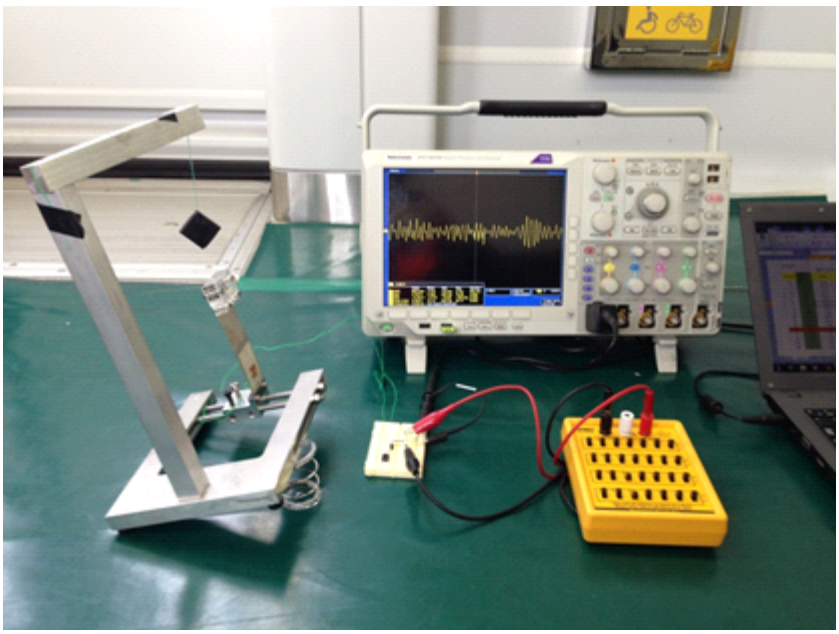


그림 46. 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템

- 2-2) 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템은 진자를 이용한 발전 시스템의 바닥에 스프링을 부착하여 열차의 관성력뿐만 아니라 열차의 진동까지 효과적으로 흡수할 수 있도록 설계된 시스템이며 발전량은 60 kΩ의 저항에서 최대 86.0 μW의 값을 나타냄.

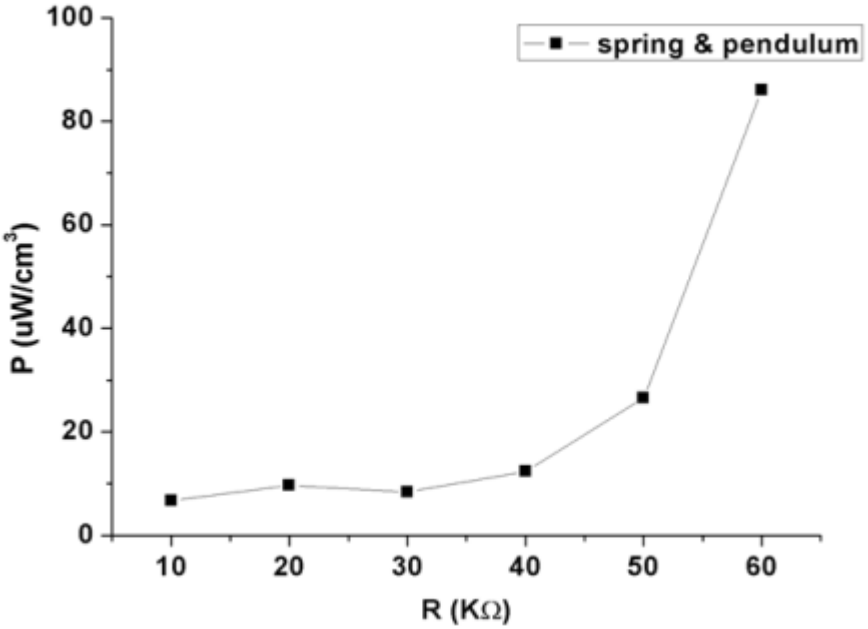


그림 47. 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템의 저항에 따른 발전량

- 진자를 이용한 발전 시스템, 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템, 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템의 발전량을 비교한 결과 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템의 발전량이 가장 높았음.

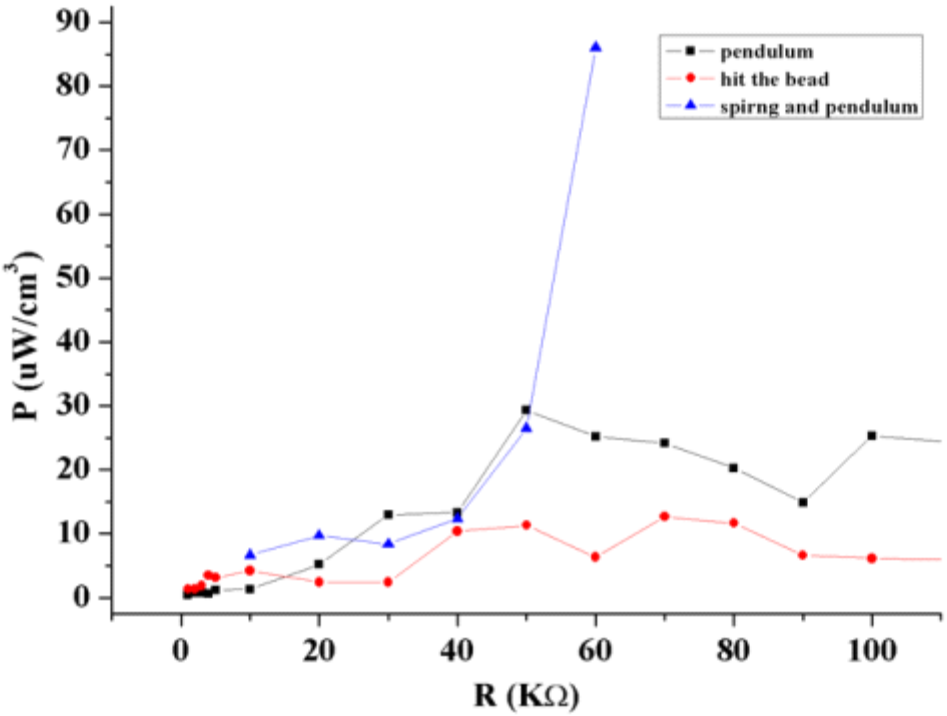


그림 48. 진자를 이용한 발전 시스템, 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템, 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템의 발전량을 비교

- 추가적으로 실험한 ⑤풍력을 이용한 발전 시스템은 바람에 의해 회전하는 회전자 내부에 부착된 자석이 압전체에 부착된 자석에 인력과 척력이 교대로 작용하면서 전력을 생산하도록 설계되었으며, 50 kΩ의 저항에서 최대 6.0 mW의 발전량을 나타냄.

- 이 결과는 최종 목표 (0.15 mW/cm^3)대비 40배 향상된 결과임. 하지만 풍력을 이용한 발전 시스템은 열차의 공기저항을 무시한 실험으로, 추후 발전 시스템의 추가적인 연구가 반영된다면 상당한 발전량을 수확할 수 있을 것으로 판단됨.

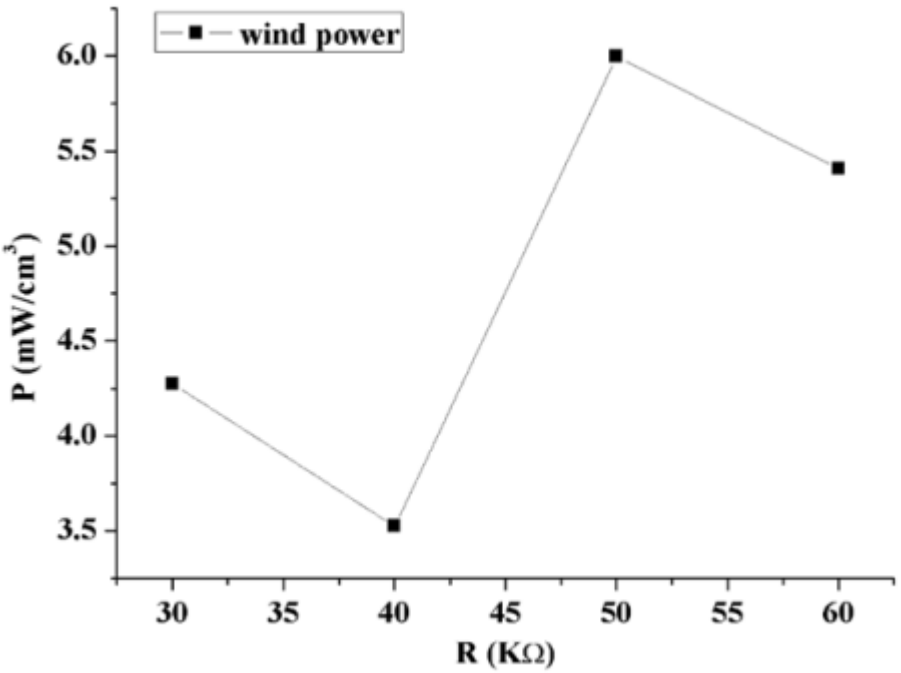


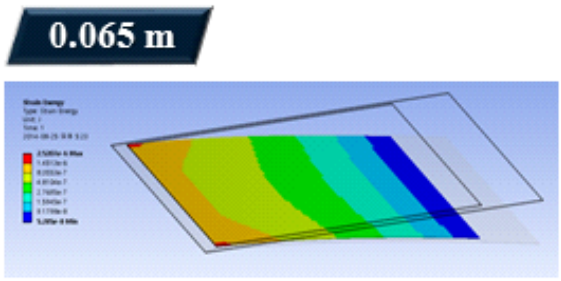
그림 49. 풍력을 이용한 발전 시스템의 저항에 따른 발전량

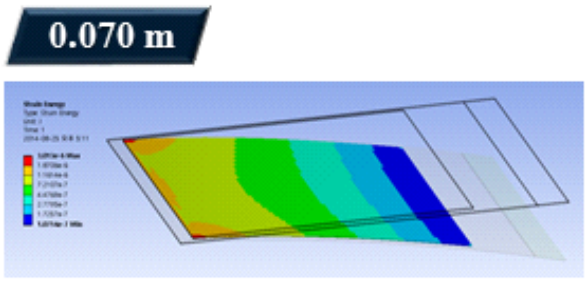


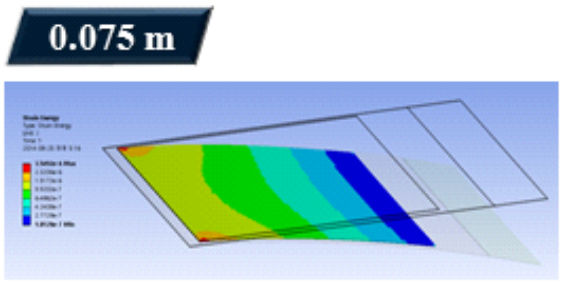
그림 50. 풍력을 이용한 발전 시스템

○ 시스템 보완 및 개선

- **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템을 개선하기위해 FEA(Finite-Element Analysis) Program의 일종인 ANSYS를 사용함. 단위 부피당 변형에너지를 최대화하고 변형량을 늘리기 위해 압전소자의 길이가 길어지는 반면, 세라믹의 부피를 줄이기 위해 세라믹의 길이는 줄어드는 결과가 도출됨.







Total Strain Energy [mJ]			
Length [m] \ Mass [kg]	0.050	0.100	0.200
0.065	0.182	0.726	2.906
0.070	0.227	0.906	3.625
0.075	0.290	1.159	4.638

그림 51. Substrate의 길이에 따른 압전 소재의 변형에너지 변화

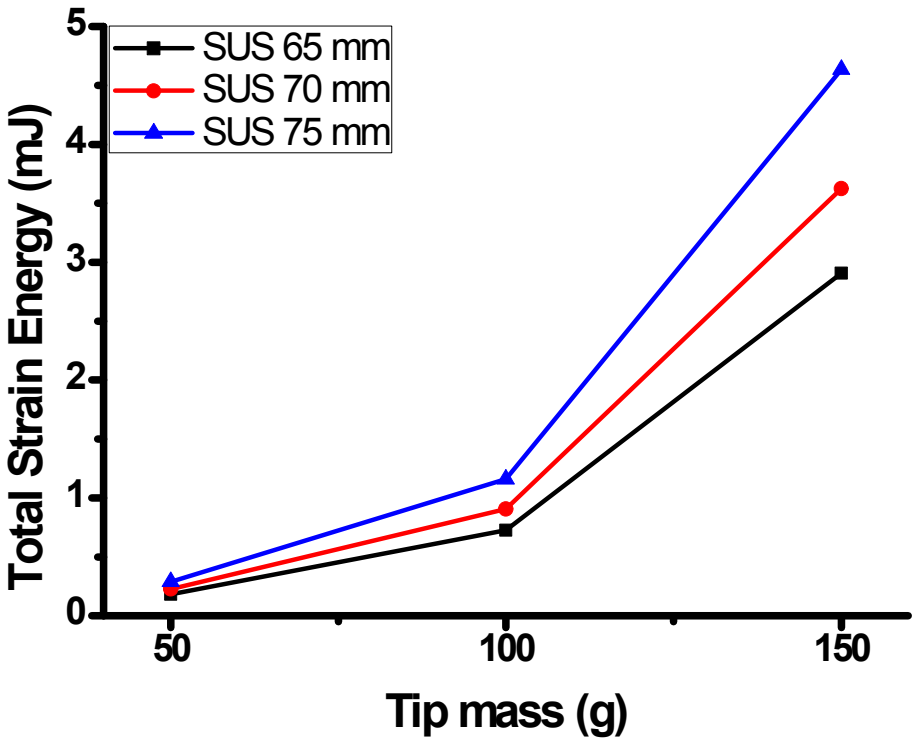


그림 52. Substrate의 길이에 따른 압전 소재의 변형에너지 변화 그래프

- **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템을 개선하기위해 보조재의 길이가 서로 다른 3종류의 압전체를 열차에 적용하여 실험한 결과 tip mass가 50 g, 100 g 인 경우에는 보조재의 길이가 길어질수록 발전량이 더 큼을 알 수 있었음.
- Tip mass의 무게 증가는 열차 전체무게의 증가로 이어져 손실을 초래할 수 있기 때문에 tip mass가 가벼운 조건에서 압전 발전량이 최고의 값을 보인 75 mm의 보조재를 사용하여 실험을 진행하기로 함.

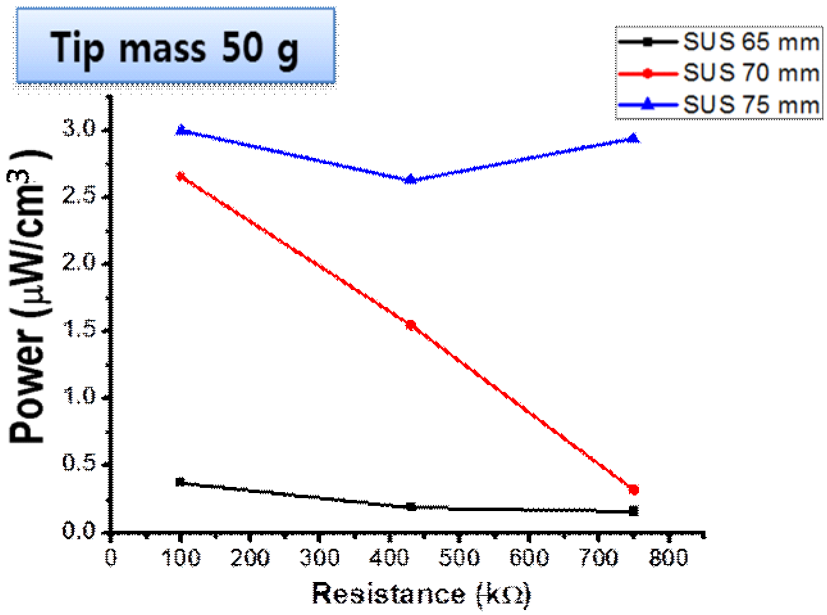


그림 53. Tip mass가 50g 일 때, 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류의 발전량

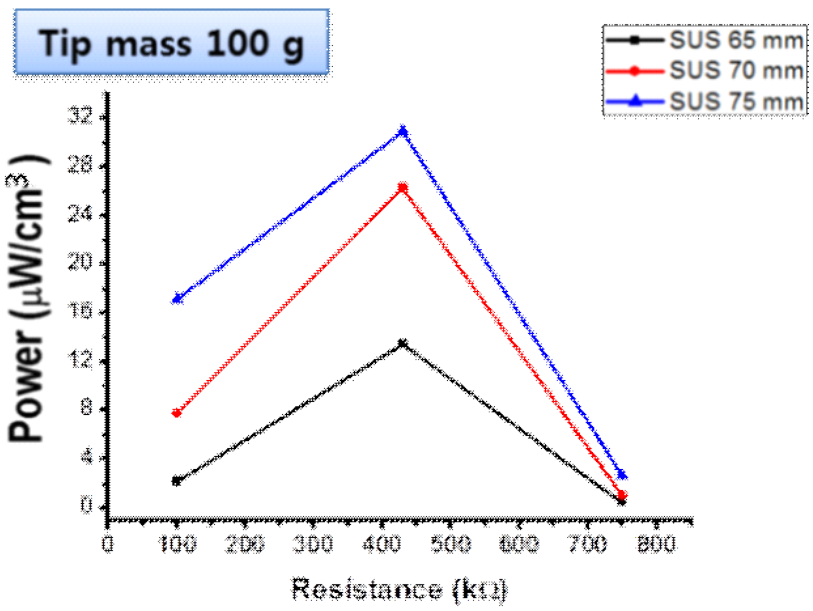


그림 54. Tip mass가 100g 일 때, 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류의 발전량

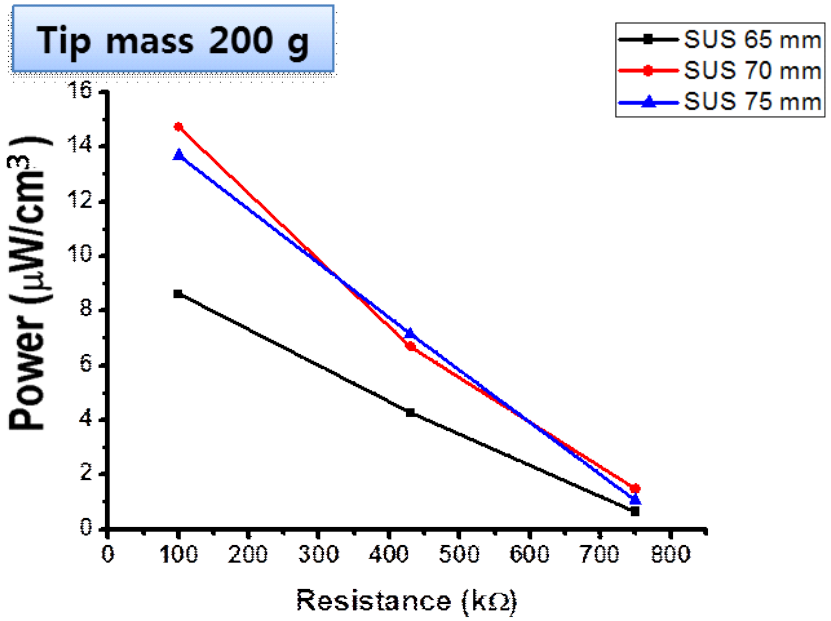


그림 55. Tip mass가 200g 일 때, 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류의 발전량

- FEA의 결과에서 볼 수 있듯이, substrate의 길이가 길어질수록 압전 소자에 가해지는 변형에너지의 합이 증가함을 알 수 있음. 이 결과에 따라 tip mass가 가벼운 범위(50 g, 100g)에서는 변형에너지의 증가로 인한 압전 발전량이 증가함을 알 수 있었음.
- 하지만 tip mass가 200 g을 초과하는 경우 substrate가 버틸 수 있는 항복 범위를 초과한 것으로 판단됨.

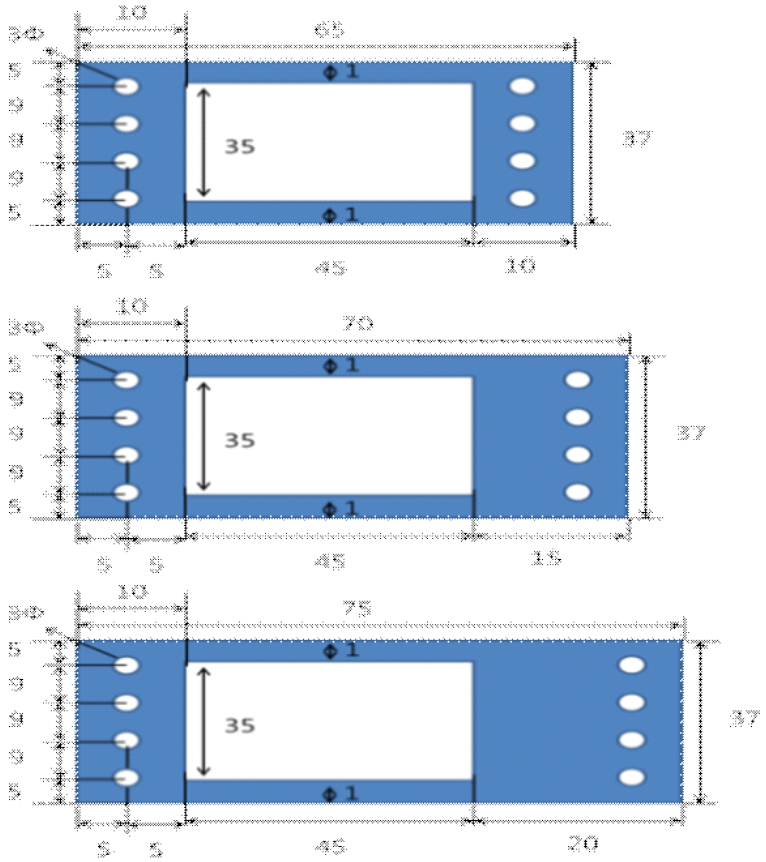


그림 56. 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류

- 압전 소자는 진동 가속도에 따라 매칭이 되는 저항 값이 달라지므로, 최적의 매칭저항을 찾기 위해 ITX-청춘 열차의 진동 가속도를 측정 및 분석함.

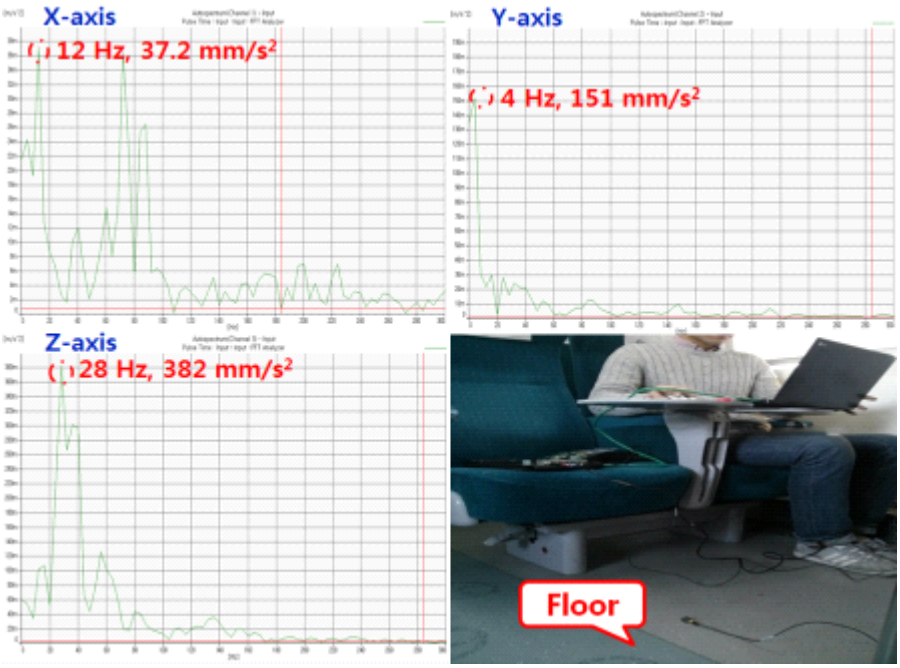


그림 57. ITX-청춘의 진동 그래프 및 실험사진

- 열차의 진동 가속도를 분석한 결과를 이용하여 종전의 실험에서 채택된 보조재 길이 75 mm 압전체의 최적 저항 값을 도출함.

표 6. 압전 세라믹의 사이즈 및 물성 값

명칭	기호	단위	값
커패시턴스	C_p	$N \cdot m/V^2$	1.42.E-07
압전변형상수 (piezoelectric charge constants)	d_{31}	10^{-12} m/V	-200
압전유전상수 (piezoelectric voltage constants)	g_{31}	10^{-3} V·m/N	-11.1
길이	L	m	0.045
너비	b	m	0.035
두께	t_a	m	0.0002

$$C_P = \frac{d_{31} \times L \times b}{g_{31} \times t_a} \qquad (1)$$

$$R_{opt} = \frac{1}{C_p \times \omega} \qquad (2)$$

- (1)식은 압전 세라믹의 커패시턴스를 계산하는 공식이고, (2)식은 계산된 압전 세라믹의 커패시턴스와 가해지는 진동 주파수를 이용하여 압전체의 최적 저항을 계산하는 식임.

- 위 식을 통해 열차의 주파수가 각각 20 Hz와 30 Hz 이라고 가정하여 최적 저항을 계산했을 때 저항 값은 각각 39 kohm과 56 kohm임. 도출된 최적 저항 값을 적용하여 0.71 mW/cm^{3}의 발전량을 내었음. 이는 최종 목표 발전량인 0.15 mW/cm^{3}의 4.7배의 값임.



그림 58. 채택된 보조재 75 mm의 압전소자로 ITX-청춘에서 실시한 실험사진

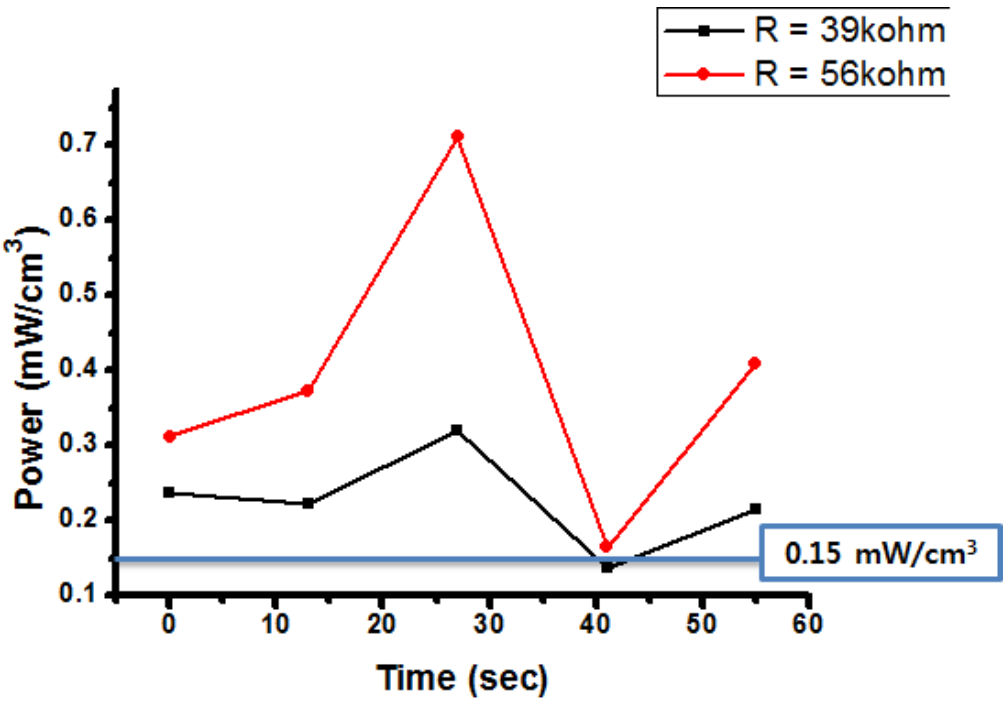


그림 59 ITX-청춘(가평역~평내호평역 구간) 열차에서 측정한 압전소자의 시간에 따른 발전량

- 또한 추가적으로, 일반적으로 후막 압전 소자보다 더 높은 발전량을 낼 수 있다고 알려진 단결정으로 제작된 압전 세라믹을 주문하고 보조재와 부착하여 추가적인 실험을 위한 압전 소자를 제작함.



그림 60. 주문 제작한 단결정 압전 세라믹 (1/2)



그림 61. 주문 제작한 단결정 압전 세라믹 (2/2)

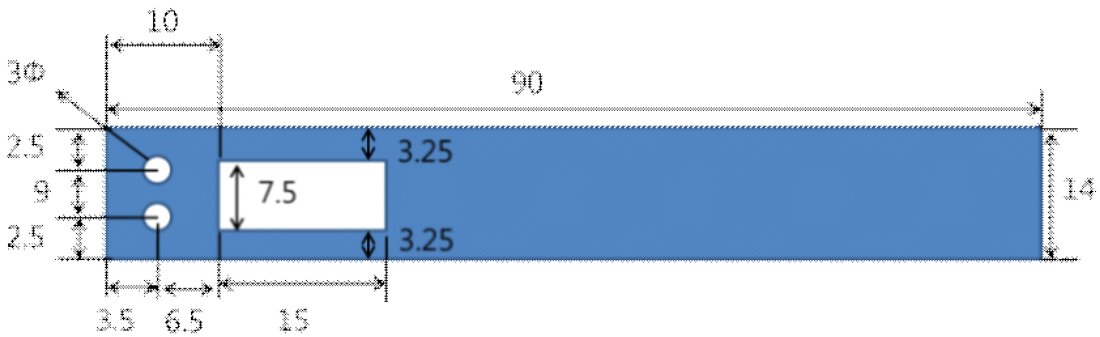


그림 62. 주문 제작한 단결정 압전 세라믹를 부착한 압전 소자

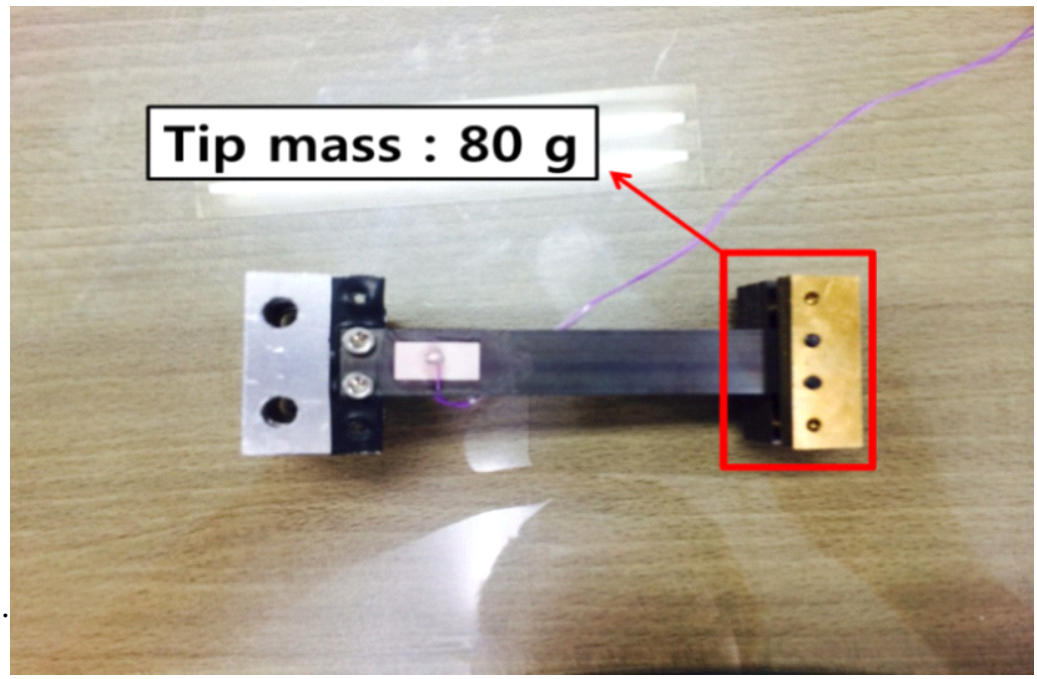


그림 63. 주문 제작한 단결정 압전 세라믹을 부착한 압전 소자와 tip mass

- 추가적으로 제작한 단결정 압전 소자를 이용하여 ITX-청춘 열차(평내호평역~남춘천역)에서 실험한 결과, 전 구간에서 최종 목표 발전량인 0.15 mW/cm^{3}를 달성하였을 뿐만 아니라 최대 발전량 2.26 mW/cm^{3}까지 달성함. 이는 목표 발전량인 0.15 mW/cm^{3}의 약 15배에 해당하는 값임. 각각의 측정값은 10초간의 rms 값임.

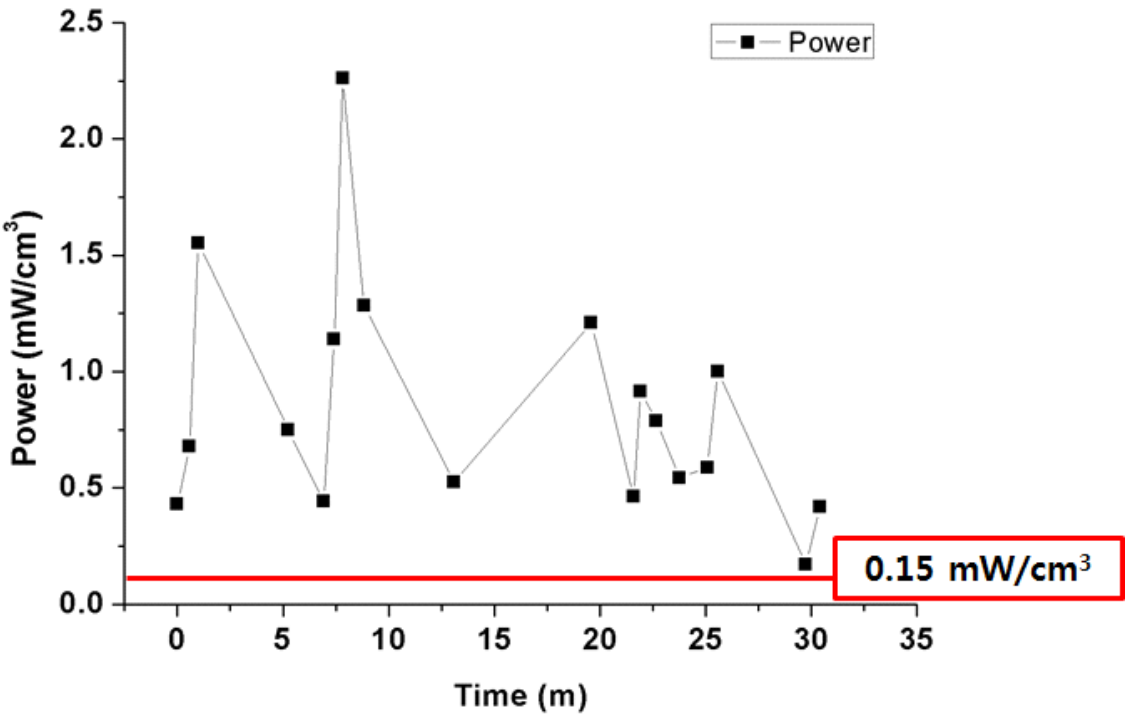
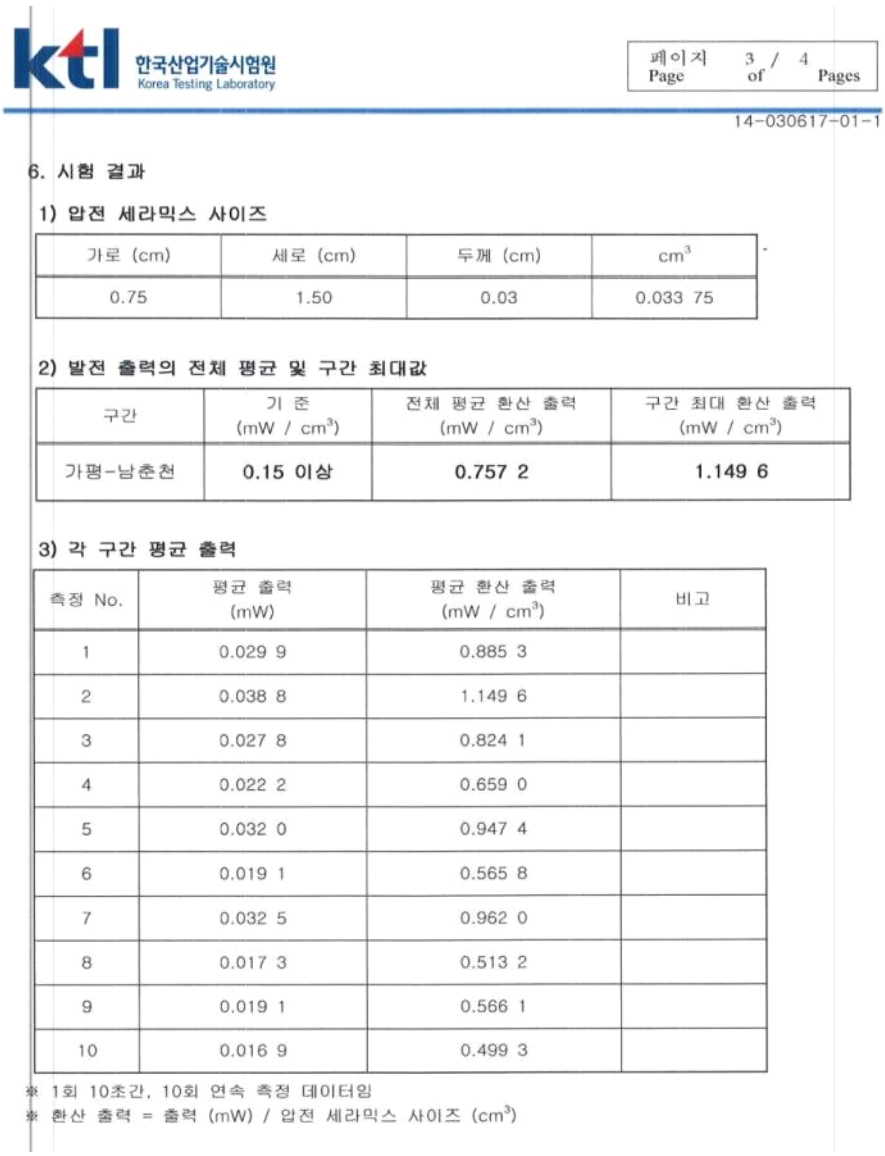


그림 64 ITX-청춘 열차(평내호평역~남춘천역)에서 측정한 단결정 압전소자의 시간에 따른 발전량

- 결과적으로 2차년도에 달성한 0.095 mW/cm^{3}의 발전량과 비교하여 후막 압전소자에서 달성한 0.71 mW/cm^3 의 발전량은 시스템의 성능이 747% 향상된 결과임.
- 또한, 압전 단결정의 1.15 mW/cm^3 결과는 1,211% 시스템 성능이 향상된 결과임.

○ 결과 평가 및 분석

- 전체적인 발전량이 후막 압전소자보다 단결정 압전소자가 더 높았기 때문에 KTL (한국산업기술시험원)으로부터 인증을 받을 때는 단결정 압전소자를 사용하여 ITX-청춘 열차(가평역~남춘천역 구간)에서 구간 평균 0.76 mW/cm^3, 구간 최대 1.15 mW/cm^{3}를 달성하였음.
- 이는 10초 동안 최종 목표 발전량(0.15 mW/cm^3) 대비 약 7.6배 값이며, 100초 동안 진행된 실험 구간 평균 대비 약 5.0배 향상된 값임.



ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

페이지 Page 3 / 4 of Pages

14-030617-01-1

6. 시험 결과

1) 압전 세라믹스 사이즈

가로 (cm)	세로 (cm)	두께 (cm)	cm^3
0.75	1.50	0.03	0.033 75

2) 발전 출력의 전체 평균 및 구간 최대값

구간	기 준 (mW / cm^3)	전체 평균 환산 출력 (mW / cm^3)	구간 최대 환산 출력 (mW / cm^3)
가평-남춘천	**0.15 이상**	**0.757 2**	**1.149 6**

3) 각 구간 평균 출력

측정 No.	평균 출력 (mW)	평균 환산 출력 (mW / cm^3)	비고
1	0.029 9	0.885 3	
2	0.038 8	1.149 6	
3	0.027 8	0.824 1	
4	0.022 2	0.659 0	
5	0.032 0	0.947 4	
6	0.019 1	0.565 8	
7	0.032 5	0.962 0	
8	0.017 3	0.513 2	
9	0.019 1	0.566 1	
10	0.016 9	0.499 3	

※ 1회 10초간, 10회 연속 측정 데이터임
※ 환산 출력 = 출력 (mW) / 압전 세라믹스 사이즈 (cm^3)

그림 65. 최종 목표 발전량에 대한 인증서

표 7. 단결정 압전소자와 후막 압전소자의 단위 체적당 발전량 및 가격당 발전량 비교

	단위 체적당 발전량 (mW/cm^3)	가격 (만 원)	단위 체적 및 가격당 발전량 (mW/cm^3/만원)
단결정 압전소자	1.15	10	0.12
후막 압전소자	0.71	3	0.24

- 후막으로 제작된 압전 소자는 단결정으로 제작된 압전 소자에 비해 단위 체적당 발전량은 0.62배로 낮지만, 단위 체적당 발전량에 가격까지 고려한 발전량은 후막으로 제작된 압전 소자가 단결정으로 제작된 압전 소자보다 우위에 있음.
- 압전체 단가의 경제성을 고려한 발전량을 비교하여 보면, 후막의 경우 0.24 mW/cm^3/만원, 단결정의 경우 0.12 mW/cm^3/만원으로 후막이 200% 더 효율적임. 따라서 후막 압전소자에 대한 집중적인 연구 및 개발이 반드시 필요함.

- 본 연구 개발 결과는 상용 중인 열차의 진동의 분석을 통하여 개발되었기 때문에 열차에 특화된 압전 에너지 하베스팅이라고 말할 수 있음. 압전 에너지 하베스팅 시스템이 설계되는 일련의 과정은 동일하나 다른 이동수단 (자동차, 버스, 비행기, 화물 열차 등)에 적합한 압전 에너지 하베스팅 시스템을 설계하기 위해서는 각각의 진동에 대하여 분석이 이루어져야함.

나. $d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100,000, Young's Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성

○ ZnO등의 첨가제를 통하여 Fatigue Cycle의 향상을 유도

- 2차년도에 제작된 $d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃ 의 특성을 가지는 압전 조성을 가공하여 실제 에너지 하베스팅용 캔틸레버에 부착한 뒤 최대의 진폭과 그에 따른 최대의 압전 발전량을 보이는 60Hz에서 압전 전압 및 전류를 측정함.
- 압전 재료의 파손 및 압전 특성의 파괴가 생기는지 분석하기 위해 120,000 번의 가진을 통하여 Fatigue Cycle에 대한 특성을 분석함.

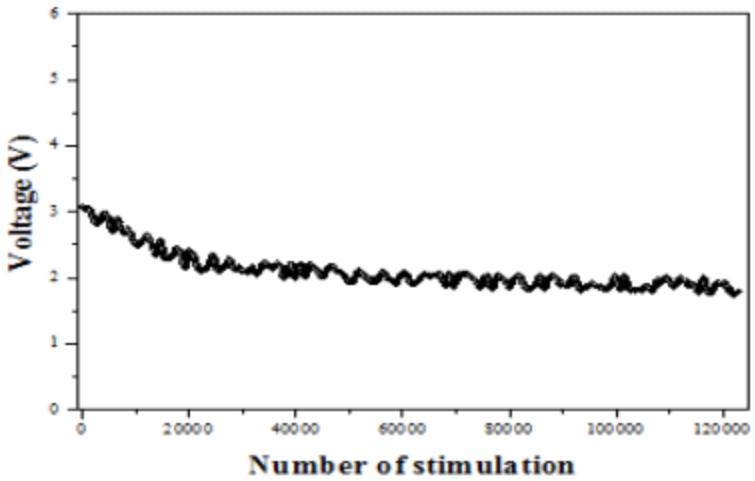


그림 66. 진동에 따른 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.28PZ_{0.4}N_{0.6}N$ + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 전압

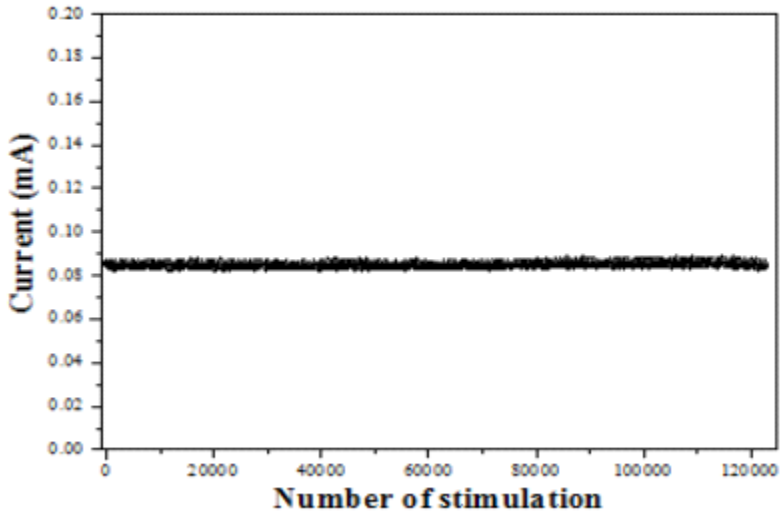


그림 67. 진동에 따른 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.28PZ_{0.4}N_{0.6}N$ + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 전류

- 위의 결과를 보면 전압의 경우 초기 값에 비해 소폭 감소가 있었지만 120,000번 실험동안 초기 특성을 유지함을 함을 보였음. 따라서 crack, failure 등으로 인한 파괴가 일어나지 않고 압전 특성이 유지됨을 확인할 수 있음.
- 따라서 최대의 진폭을 가지는 60 Hz에서 30분 이상을 재료의 피로현상 없이 얻을 수 있었음.
- 실제 기기 적용 시 공진 주파수에서보다 작은 진폭의 진동이 소자에 가해질 것이며 60 Hz 보다 매우 작은 진동수의 진동이 가해질 것으로 예상되기 때문에 실험 결과인 30분보다 훨씬 긴 시간동안 재료의 피로현상 없이 소자가 안정적으로 작동 할 수 있을 것이라 예상함.
- 따라서 별도의 첨가물의 첨가 없이도 본 세라믹은 100,000 이상의 cycle에도 failure가 일어나지 않는 우수한 특성을 보임.

○ 낮은 Young’s Modulus를 가지는 최적의 소결 조건 확립

- 상기 개발한 조성의 파우더를 900°C에서 12시간동안 소결하여 가로 10mm, 세로 10mm, 두께 5mm로 가공하여 Young’s modulus를 측정한 결과 약 81 GPa로, 목표치에 99% 달성하여 에너지 하베스팅에 적합한 기계적 특성을 가진다고 할 수 있음.
- 본 연구의 목표치인 80 GPa에 매우 소량 미치지 않는 수치였으나 시편의 두께, 그리고 미세한 crack에 따라 충분히 오차 범위 안에 해당 되는 것으로 보이고 과제 목표와 거의 동일한 수치라 판단함.
- 또한 소결 시간에 따라 정확히 어떤 편차 범위를 보이고 1 GPa 이상으로 충분히 편차를 보이는지 조사하고자 소결시간을 감소시킨 시편의 Youngs modulus를 측정함.
- 같은 재료를 900℃ 2시간 소결하여 Youngs modulus 측정하였더니 57 GPa의 값을 나타냄.
- 이는 소결 시간에 따른 Youngs modulus의 편차가 매우 크며 81 GPa이 매우 짧은 시간 동안의 소결 조건의 변화에도 감소할 수 있으며 뿐만 아니라 소결 시간에 따라 값을 tuning 할 수 있다는 가능성을 제시해 줌.

다. 개발 조성의 상용화를 위한 신뢰도 평가 (신뢰도>95%)

○ 개발 조성의 상용화를 위해 다양한 조건에서 신뢰성 평가 시행

- 다음 그림과 같이 개발 조성의 모조성 0.72PZT-0.28PZNN을 열에 충분히 노출시킨 후 (4시간) 특성을 평가함.
- 모조성에 대한 특성 변화를 평가한 뒤 추후 첨가물이 첨가되었을 때의 특성 평가를 진행하고자 하였음.
- 약 250°C에서 curie temperature에 가까워짐에 따라 dipole의 정렬이 풀어지기 시작함.
- 그러나 200°C 까지는 유전율을 제외하고 다른 특성에서의 변화는 보이지 않음.

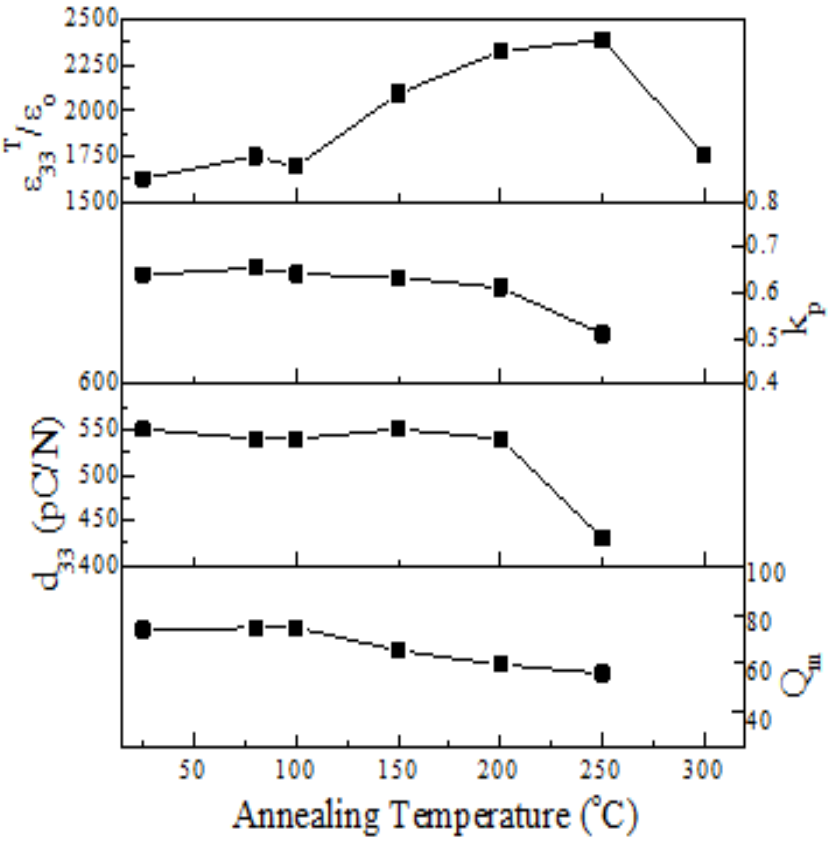


그림 68. 0.72PZT-0.28PZNN의 열처리 온도에 따른 특성 변화

- 유전율의 변화를 더욱 자세히 분석하기 위해 시간의 변화에 따른 유전율의 변화를 아래 그림과 같이 분석함.
- 그 결과 처음 온도 자극을 주었을 때 일시적인 특성의 변화 (Δt)가 발생한 후 일정 시간이 지나면 일정 값을 유지함.
- 유지하는 값은 초기 값과 Δp만큼 차이가 발생하나 한번 자극을 준 뒤 안정화된 후에는 동일 크기의 자극에 대해서 변화하지 않음을 알 수 있었음.
- 따라서 유전율의 경우 온도 자극에 대해 반응하나 한번 자극이 주어진 후 안정화되면 그 후 동일 크기의 자극에 대해 신뢰성 있는 거동을 보이며 따라서 산업화를 위해서는 가능한 범위의 자극을 재료에 미리 가한 후 (작동 온도 범위) 이를 안정화시키면 과제의 목표인 상업화를 위한 신뢰성 확보를 달성할 수 있음을 알았음.

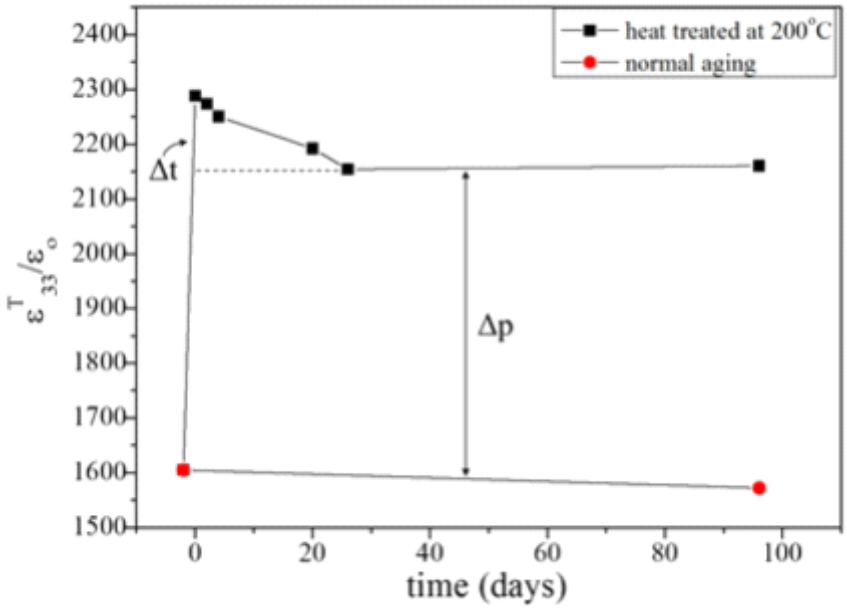


그림 69. 0.72PZT-0.28PZNN 세라믹에 자극을 주었을 때 시간에 따른 안정화 거동

- 온도에 따른 유전율의 변화를 모조성 뿐만 아니라 여러 가지 첨가물을 여러 함량을 첨가했을 경우에 대해서 Δt를 측정하고 분석하였음.
- 위 실험에서 첨가하였던 MnO_2를 함량별로 첨가하였을 때 아래 그림에서와 같이 1.0 mol%를 첨가했을 때는 유전율의 변화가 첨가하지 않았을 때에 비하여 크게 나타났으나 1.5 mol% 이상의 MnO_2가 첨가되었을 때는 첨가하지 않았을 때보다 유전율의 변화 폭이 적었음.
- 1.5 mol% MnO_2가 첨가된 세라믹에 CuO를 첨가하여 저온소결을 진행하였을 때 모조성에 온도 자극을 주었을 때와 비슷한 정도의 유전율 변화를 나타내었으며 따라서 첨가물이 첨가되었을 시에 모조성에서 일어난 것과 비슷한 정도의 안정화가 이루어질 것으로 예상됨.

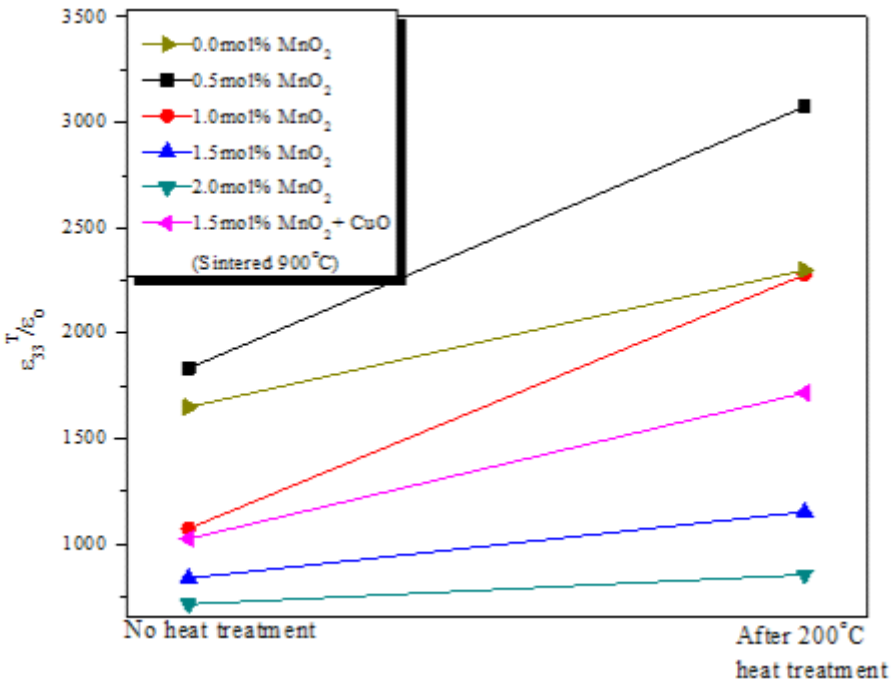


그림 70. 0.72PZT-0.28PZNN에 여러 첨가물을 넣었을 때 열 충격에 대한 유전율의 변화

○ 미세 구조가 신뢰도에 미치는 영향 파악

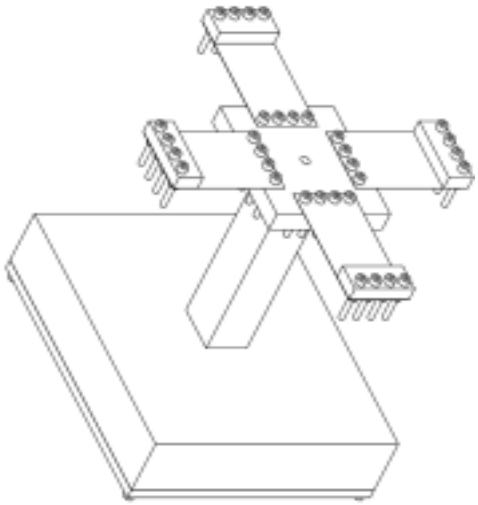
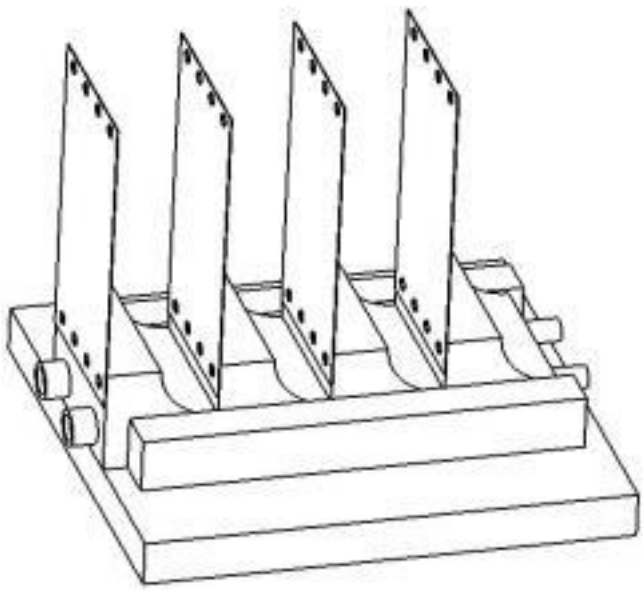
- 앞선 실험에서 0.72PZT-0.28PZNN에 MnO_2를 첨가함에 따라 grain의 성장을 확인하였음.
- 또한 MnO_2 첨가량에 따라 MnO_2가 증가할 수록 열 충격시 일시적인 변화 Δt가 감소함을 확인함.
- 따라서 MnO_2 첨가에 의해 grain 성장이 일어나고 이러한 미세구조의 변화가 열 충격을 재료에 가했을 시 재료에서 일어나는 유전율의 일시적인 변화를 최소화함을 밝혔으며 grain이 클수록 신뢰도가 증가한다고 말할 수 있음.

제3절 연구수행결과 및 결과의 검증 방법 등

1. 연구수행결과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	• 철도차량별 진동 측정 및 분석	- 각 열차별 진동 분석 ① KTX : 테이블에서 Y축의 진동이 약 320 mm/s^{2}로 가장 큰 값으로 분석됨. ② KTX - 산천 : 바닥에서 Z축의 진동이 약 300 mm/s^{2}으로 가장 큰 값으로 분석됨. ③ 새마을호 : 테이블에서 X축이 약 400 mm/s^{2}로 가장 큰 값으로 분석됨. ④ 무궁화호 : 바닥에서는 약 1 m/s^{2}로 가장 큰 값으로 분석됨.
	• 한국 철도시설공단과 업무 협조 체제 구축	- 철도차량에서의 원활한 연구 진행을 위해서 한국철도기술연구원과 양해각서를 통한 업무 협조 체제 구축
	• 압전 발전 시스템 방식 결정	- 검토된 압전 발전 시스템 방식 종류에 대한 채택 여부 ① Steel ball을 이용한 발전 (불채택) ② Spring을 이용한 발전 (불채택) **③ Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 (채택)** ④ 프로펠러를 이용한 발전 (불채택) ⑤ 철도 차량의 브레이크형 발전 (불채택)
	• 압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작 착수	- 기본적인 cantilever beam 형식을 substrate, Piezo ceramic의 두께 및 tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 방식을 택하여 초기 모델을 제작함. - 기둥 상부에 부착된 4 개의 cantilever는 각기 다른 공진주파수를 갖도록 서로 다른 크기와 tip mass를 갖도록 설계되었는데, 이는 불규칙한 열차 진동을 효과적으로 흡수하여 발전하기 위한 것임.

	※ 압전 발전을 위한 철도 차량 선별(2차년도 연구내용 조기수행)	- KTX, KTX-산천, 새마을호, 무궁화호 등 총 4 개의 열차에서 창틀, 테이블, 바닥에서 열차의 진동을 측정한 결과, 2 Hz에서 약 1 m/s^2의 가장 큰 진폭을 나타낸 무궁화호의 바닥이 압전 에너지 하베스팅 시스템 설치에 가장 적절할 것으로 판단됨.
	■ PZT 세라믹스에 PZNN을 포함한 relaxor를 고용하여 압전 특성의 향상을 유도	- Zn:Ni 6:4에서 MPB 조성을 가지며 Zn의 비율이 MPB보다 증가했을 때, d_{33}는 감소하고 유전율은 큰 변화가 없으나, Zn의 비율이 감소하면 d_{33} 값에 비해 유전율이 큰 폭으로 감소하여 x Zn이 0.4일 때, 압전 특성 값인 $d_{33} X g_{33}$는 최대값을 가짐.
	■ Relaxor의 고용량과 Zr/Ti 비율에 따른 MPB변화를 이해하고 그 근방에서 $d_{33} \times g_{33}$가 우수한 조성을 선택	- PZNN의 조성이 0.28일 때 MPB조성을 가지며 MPB조성보다 PZNN의 양이 많을 경우 유전율이 d_{33}에 비해 큰 폭으로 감소하게 되며 x=0.31에서 $d_{33} X g_{33}$는 21.5k 값을 가짐.
	※ 높은 압전 특성을 가지는 세라믹스에 첨가제를 넣어 Q_m 증가와 소결온도 감소를 유도 (CuO를 넣어 저온 소결 유도, MnO_2를 넣어 Q_m 증가 유도 조기수행)	- 0.5mol%의 CuO와 1.5mol%의 MnO_2가 첨가 되었을 때, 900℃의 소결온도에서 $d_{33} \times g_{33}$ = 13 k, k_p = 0.5, Q_m = 550의 우수한 압전 특성 값을 나타냄.
2차년도	■ 압전 발전을 위한 철도 차량 선별	- 추가적인 열차별 진동 분석 ① ITX - 청춘(청량리-남춘천 구간) : 바닥에서 Z축의 진동이 약 382 mm/s^2로 가장 큰 값으로 분석됨. ② 누리로(수원-오산 구간) : 바닥에서 X축의 진동이 약 442 mm/s^2으로 가장 큰 값으로 분석됨. ③ 누리로(오산-수원 구간) : 바닥에서 Z축이 약 352 mm/s^2로 가장 큰 값으로 분석됨. ④ 분당선(기흥-신갈 구간) 바닥에서 Y축이 약 596 mm/s^2로 가장 큰 값으로 분석됨.

		⑤ 신분당선(청계산입구-양재시민의숲 구간) : 바닥에서 Z축이 약 327 mm/s^{2}로 가장 큰 값으로 분석됨. ⑥ 차세대 전동차 : 바닥에서 Z축이 약 771 mm/s^{2}로 가장 큰 값으로 분석됨.
	■ 압전 발전 시스템 제작	- 1차년도 채택한 substrate, Piezo ceramic의 두께 및 tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 방식을 개량한 cantilever 형 시스템을 제작함.  그림 71. 압전 발전 시스템 제작 설계도  그림 72. Cantilever II 형 설계도 - Right-angle cantilever - 철도차량의 계단 및 내부 바닥에 설치 가능한 압전 발판형 시스템을 제작함.

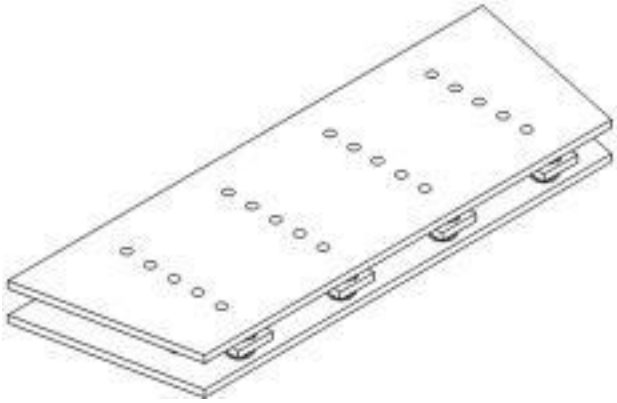


그림 73. 압전 발판형 시스템의 설계도
- 조립 후 모습

■ 압전소자 제작 및 정류 DC/DC 회로 선정

- 압전소자 제작 (압전 후막 공정 확립)
: 0.69PZT-0.31PZNN 조성의 압전 후막을 각각 1000℃, 1080℃, 1100℃에서 소결하여 최적의 소결온도 및 공정 조건을 확립했으며, 3×5 cm^2 크기의 압전 소자를 제작하여 2차 충격을 포함한 타격 실험을 수행하여 60 kΩ에서 최대 16.4 mW 발전함.

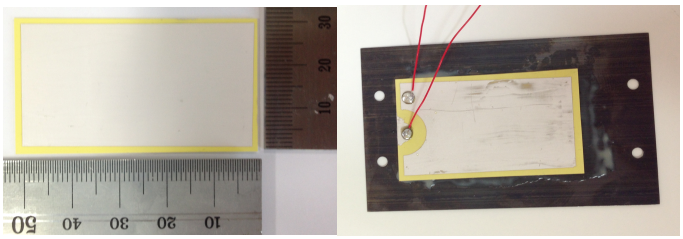


그림 74. 최종 완성된 PZT-PZNN thick film 및 SUS에 부착된 압전 소자

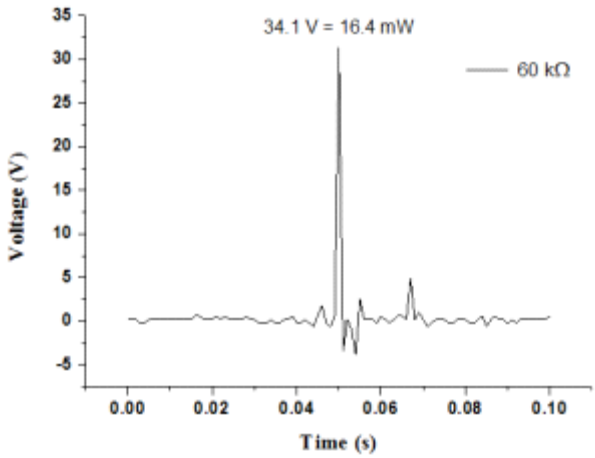
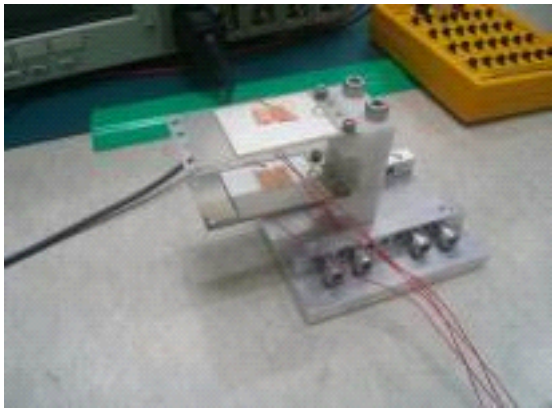
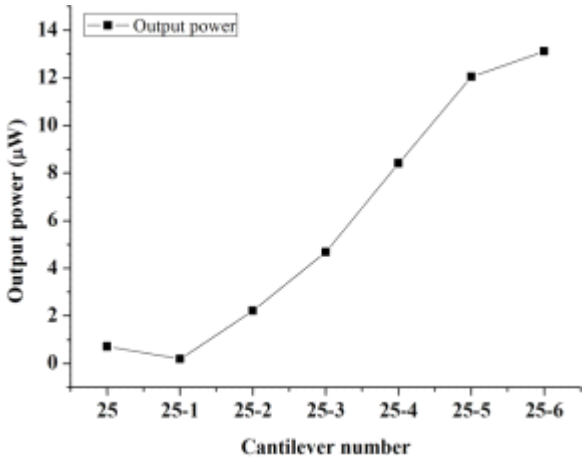
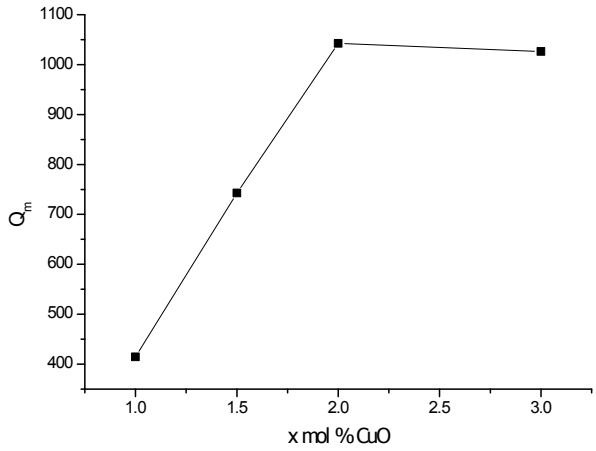
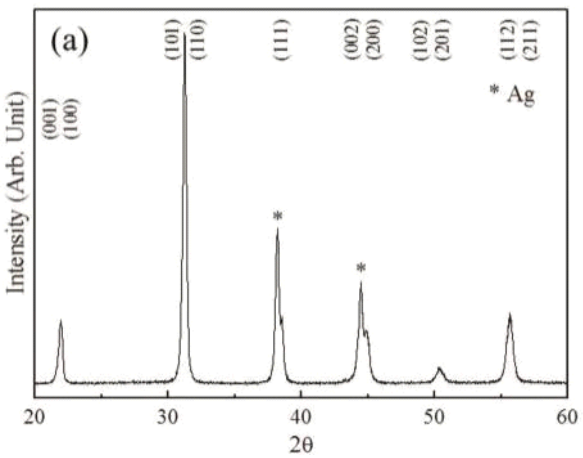
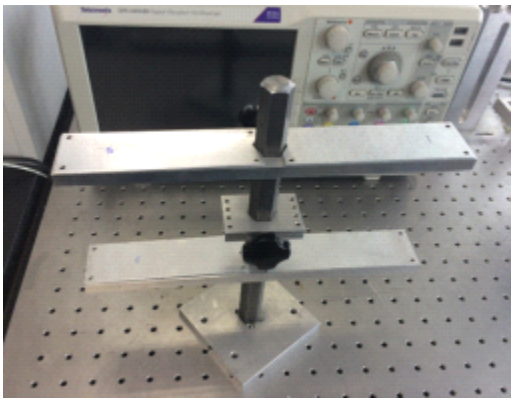


그림 75. 2차 충격된 타격 실험을 통한 압전 성능 분석

- 정류 DC/DC 회로 선정
① AC/DC 정류기로는 일반적으로 가장 많이 사용되는 브릿지 다이오드 소자를 정류 회로로 선정함.

		② 출력밀도가 높아 msec의 단주기 출력 변동에도 대응 가능하고, 추가적인 보호회로 없이도 안정성이 보장되며 우수한 충/방전 효율을 갖는 슈퍼커패시터가 적합한 것으로 검토됨. (슈퍼커패시터 사용을 위한 전압 조정기는 LM7805 regulator를 선정함.)
	■ 열차에 현장 적용하여 성능시험	- Cantilever 형 시스템을 차세대 전동차의 1호차 바닥에 설치하여 실험을 진행하였으며 열차가 운행할 때의 발전량을 측정함.  그림 76. Cantilever II 개선형 시스템의 현장 적용사진 - 에너지 효율이 가장 높은 66 Hz에서 압전 cantilever의 조건과 부착된 tip mass의 무게를 변수로 하여 실험한 결과 단위 체적당 발전량 약 95 μW/cm^3 를 얻었음. (단위 체적당 발전량 약 95 μW/cm^3 은 변경전 최종목표의 95 %에 해당하는 결과임.)  그림 77. 8 종류의 압전 cantilever를 차세대 전동차에 적용하여 얻은 발전량

	■ 높은 압전 특성을 가지는 세라믹 조성에 MnO_2를 첨가하여 Q_m의 증가를 유도	- 높은 압전 특성을 가지는 MPB 조성에 MnO2를 첨가하였으며, 첨가에 따라 Hardening effect로 인해 Qm이 증가함.  그림 78. MnO_2 증가에 따른 Q_m 증가 그래프
	■ CuO등의 첨가제를 이용하여 900℃ 이하의 저온 소결을 유도	- CuO를 추가적으로 첨가함으로써 900℃이하의 저온 소결이 가능하였으며, 미세구조 제어를 통해 압전 및 유전 특성의 제어가 가능해 과제 목표를 달성함.
	■ 개발 조성의 MLCC 및 소자적용 가능성 판단을 위한 전극 반응성 연구	- 전극 물질과 세라믹 물질을 섞어 동시 소성한 결과 어떠한 반응도 일어나지 않았음을 확인함.  그림 79. 900℃에서 12시간 동안 Ag 전극과 동시 소성된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-0.28PZNN + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 XRD 패턴

3차년도	■ 현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토 및 분석	- 상용화된 열차에서 실험을 하라는 평가위원의 의견에 따라 ITX-청춘 열차에서 실험을 다시 진행함. (2차년도 목표부터 재 수행함.) - 기존에 선정했던 **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 이외에 1) 자력을 이용한 발전, 2-1) 진자를 이용한 발전, 2-2) 구슬을 이용한 타격형 발전, 2-3) 스프링과 진자를 이용한 발전 모델을 제작하여 실제 적용함.  그림 80. 자력을 이용한 발전 시스템  그림 81. 진자를 이용한 발전 시스템

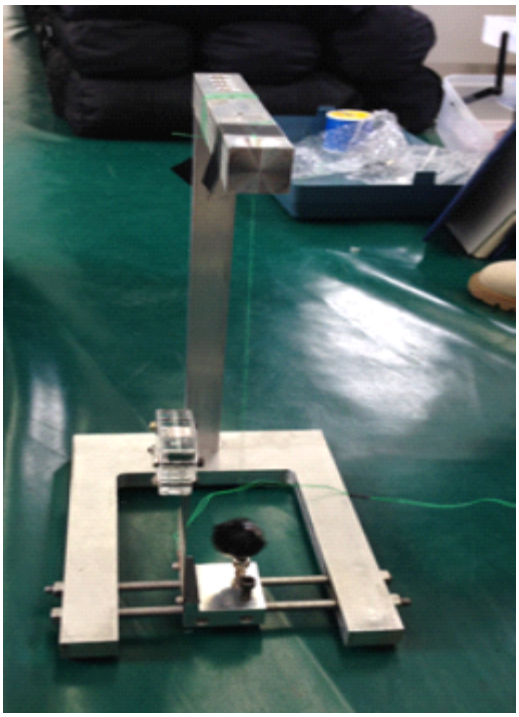


그림 82. 구슬을 이용한 타격형
발전시스템

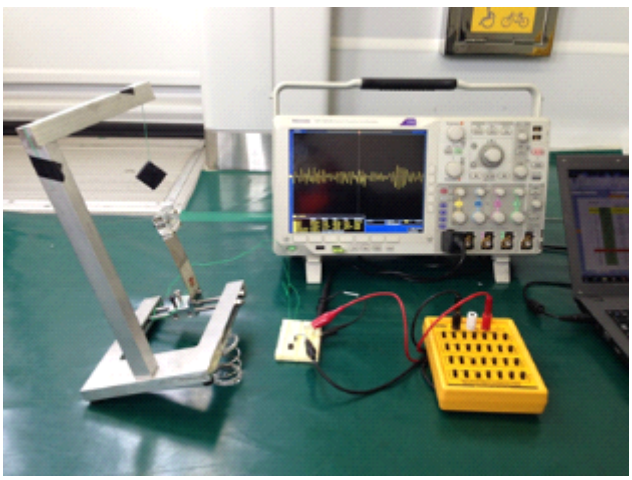


그림 83. 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템

- 또한, 추가연구로써 열차가 운행할 때 열차 외부의 풍력을 이용할 수 있도록 압전 발전 시스템을 설계하여 제작 및 적용한 결과 단위 체적당 최대 약 6 mW/cm^3 의 발전량을 나타냄.

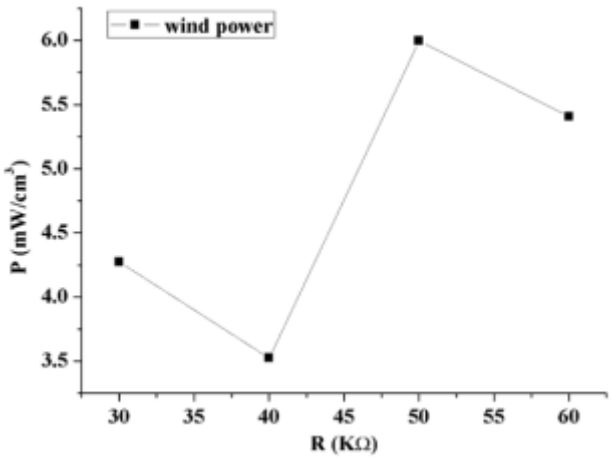


그림 84. 풍력을 이용한 발전 시스템의 저항에 따른 발전량

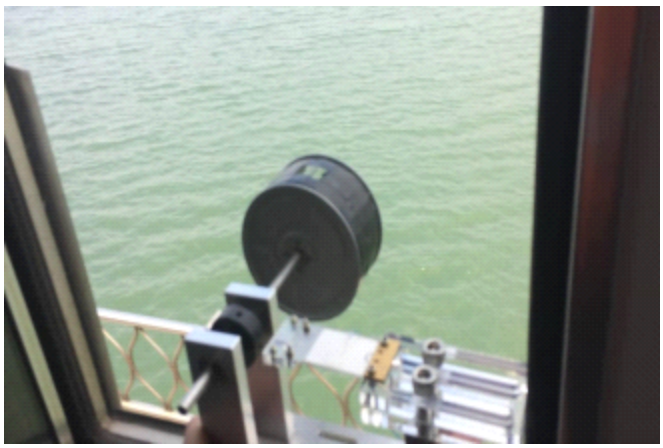


그림 85. 풍력을 이용한 발전 시스템

■ 시스템 보완 및 개선

- 1차년도에 채택하였던 **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템을 개선하기위해 FEA Program의 일종인 ANSYS를 이용하여 최적화를 진행함.

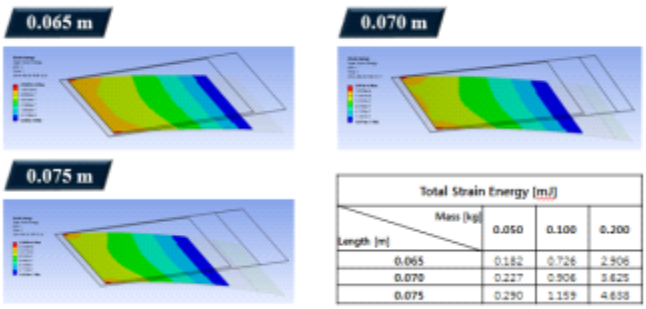


그림 86. Substrate의 길이에 따른 압전 소재의 변형에너지 변화

- 최적화 결과를 검증하기 위해 설계된 압전체 3종류를 열차에서 실험한 결과 보조재의 길이가 길어질수록 압전 세라믹에 응력이 집중되므로 발전량이 더 커짐을 알 수 있었음.

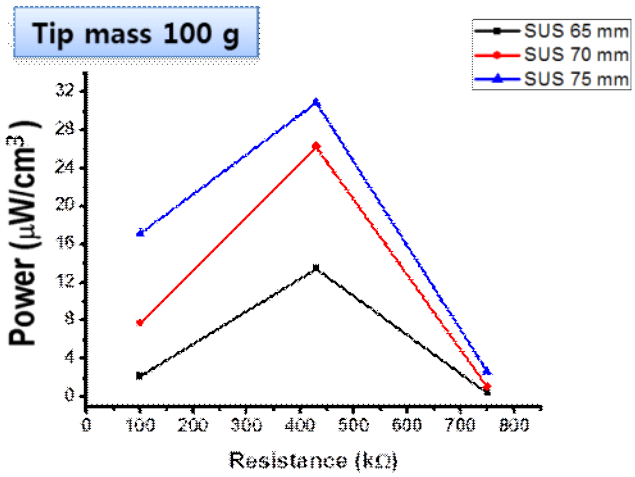


그림 87. Tip mass가 100g 일 때, 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류의 발전량

- 실험을 통해 가장 큰 발전량을 나타낸 보조재의 길이가 75 mm인 압전체를 이용하여 실험을 진행하기로 함.

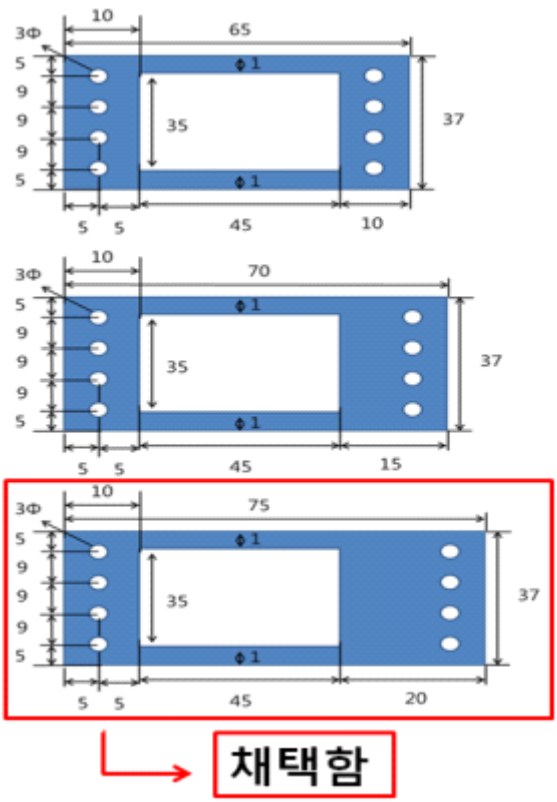


그림 88. 보조재의 길이가 서로 다른 압전체 3종류

- ITX-청춘 열차의 진동 가속도를 측정 및 분석한 결과를 통해 채택한 압전체의 최적 저항 값(39 kohm, 59 kohm)을 도출하고 이를 통해 최종 목표 발전량인 0.15 mW/cm^{3}를 달성하였을 뿐만 아니라 최대 발전량 0.71 mW/cm^{3}까지 달성함. 이는 최종 목표 발전량인 0.15 mW/cm^{3}에 비해 약 4.7배 높은 값임.



그림 89. 채택된 보조재 75 mm로 ITX-청춘에서 실시한 실험사진

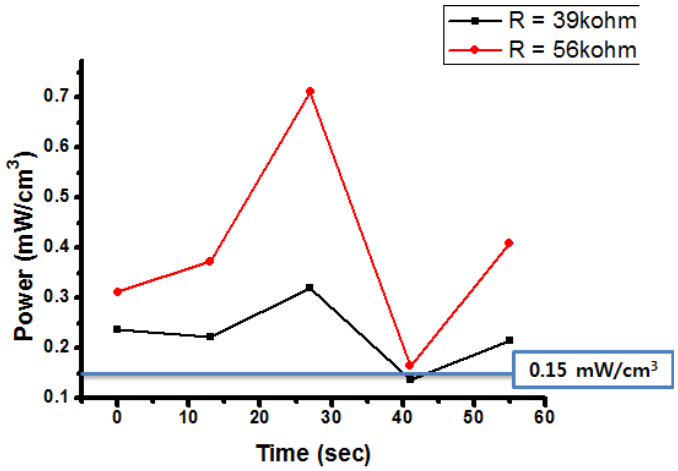


그림 90 ITX-청춘(가평역~평내호평역 구간) 열차에서 측정한 최적 저항 연결시 채택된 압전소자의 발전량

- 추가적으로 제작한 단결정 압전소자를 이용하여 ITX-청춘 열차의 평내호평역~남춘천역 구간에서 발전량을 측정한 결과 전 구간에서 최종 목표 발전량인 0.15 mW/cm^3 이상의 전력을 수확하였으며, 최대 1.15 mW/cm^3 (목표 대비 약 767%)의 결과를 얻었음.
(용산역~평내호평역 및 남춘천역~춘천역 구간은 잦은 승하차와 실험 준비로 인해 실험이 불가함)

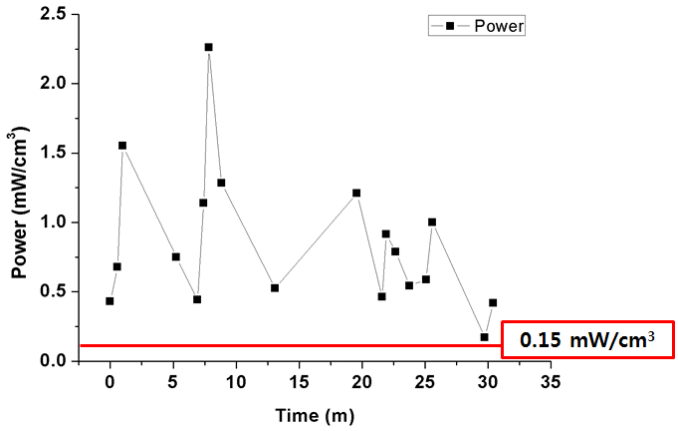


그림 91 ITX-청춘 열차의 평내호평역~남춘천역 구간에서 시간에 따른 발전량

■ 결과 평가 및 분석

- ITX-청춘 열차에서 KTL(한국산업기술시험원)로부터 최종년도 목표인 **열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm³)** 에 대한 발전량 인증 평가를 수행함.

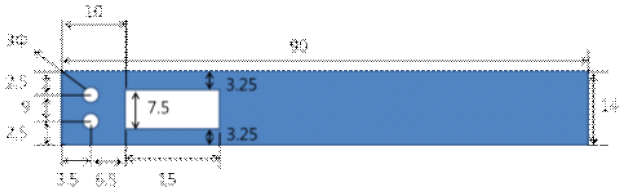


그림 92. 발전량 인증시 사용된 압전소자의 사이즈

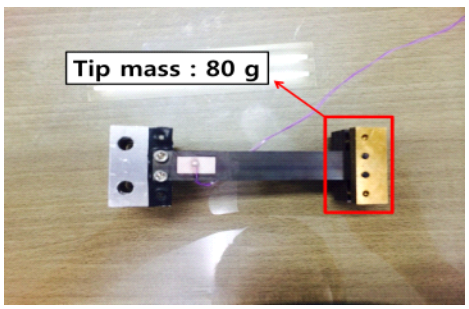


그림 93. 인증시 사용된 압전소자의 실제사진 및 tip mass의 무게

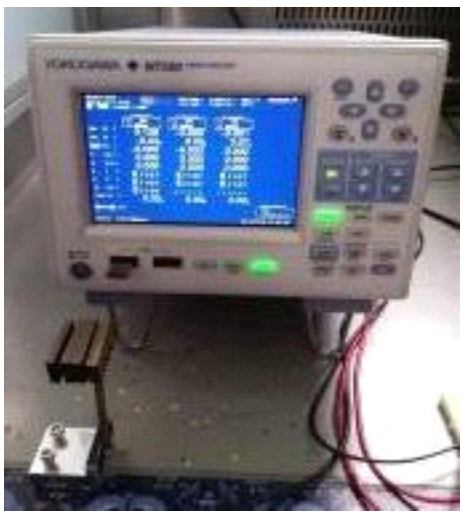
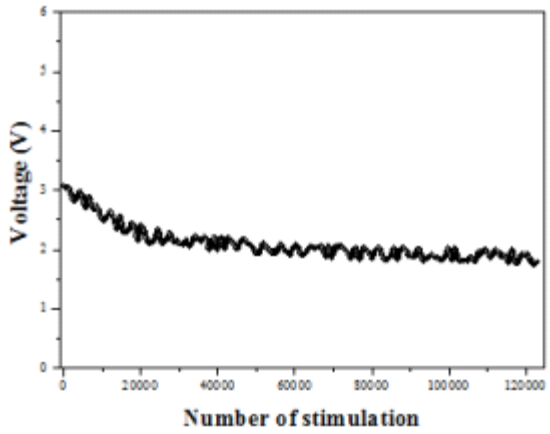
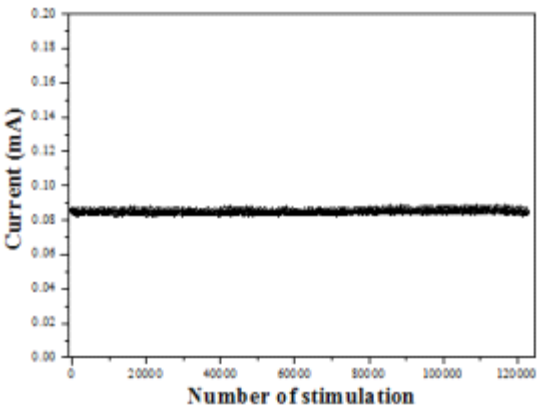
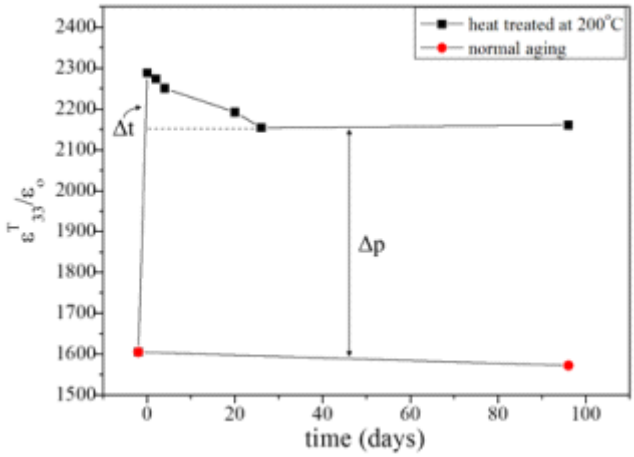
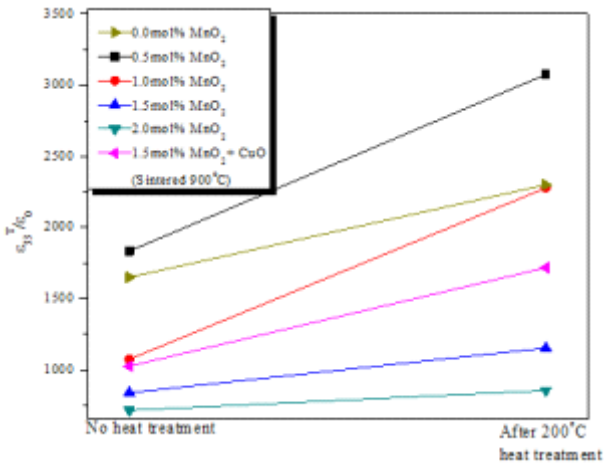


그림 94. 열차 내 인증 실험

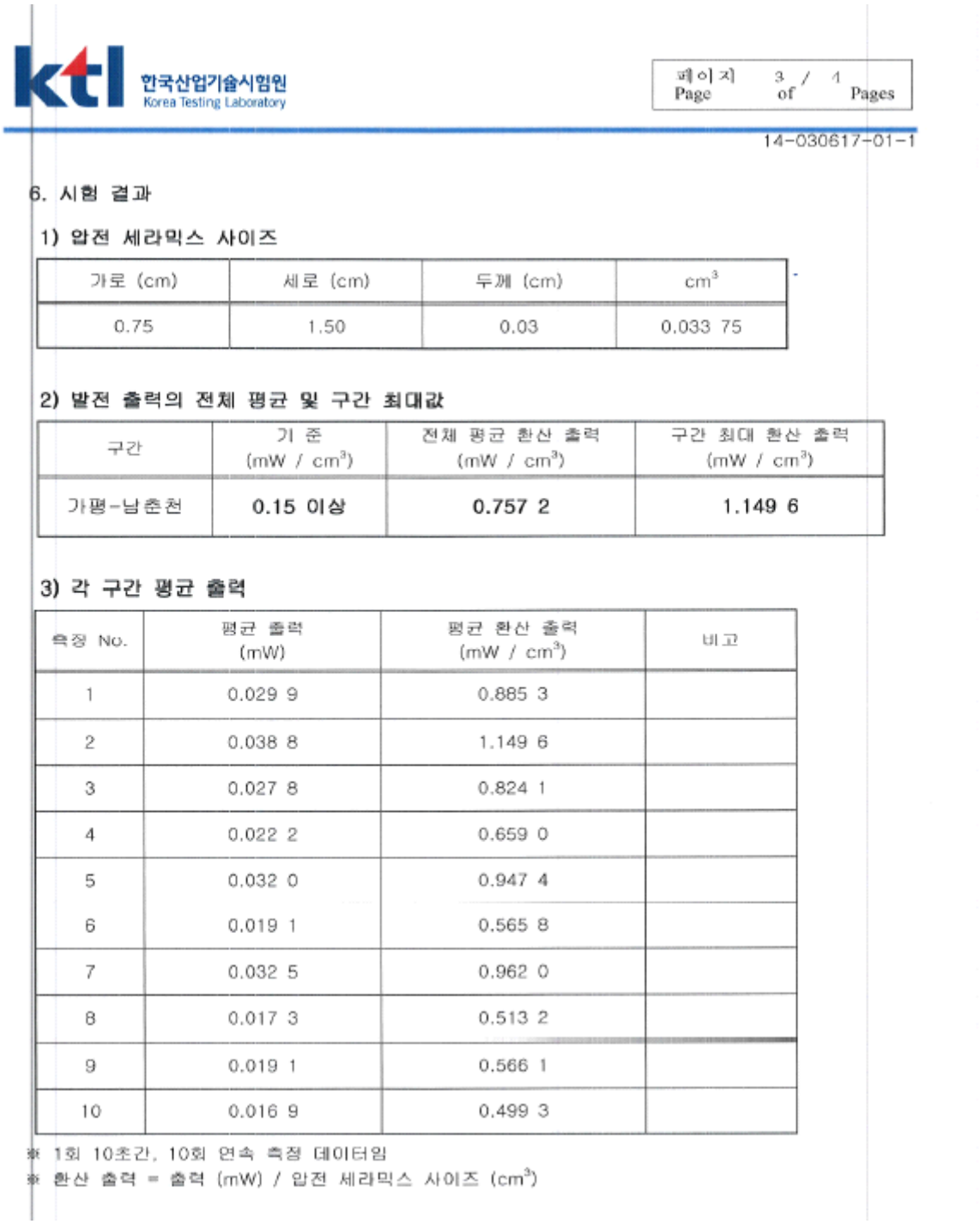
	■ ZnO등의 첨가제를 통하여 Fatigue Cycle의 향상을 유도	- 첨가물의 첨가 없이도 100,000 이상의 cycle에서 fatigue 일어나지 않음.  그림 95. 진동에 따른 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.28PZ_{0.4}N_{0.6}N$ + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 전압  그림 96. 진동에 따른 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.28PZ_{0.4}N_{0.6}N$ + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 전류
	■ 낮은 Young's Modulus를 가지는 최적의 소결 조건 확립	- 상기 소결 조건 (900℃ 12시간)에서 약 81 GPa을 가짐을 확인함. - 900°C 2시간 소결했을 시 57 GPa을 가지며 따라서 소결 시간에 따라 Youngs Modulus 편차 매우 크고 소결 시간이 조금만 감소해도 1 GPa은 변화할 수 있는 값임 - 소결 시간에 따라 Youngs modulus 큰 폭으로 조절 가능함 확인

	■ 개발 조성의 상용화를 위해 다양한 조건에서 신뢰성 평가 시행	- 유전율을 제외한 특성의 변화 없었고 유전율의 경우 일시적인 변화 (Δt) 후에 안정되어 유지되고 같은 크기의 자극에 대해 변화 없음.  그림 97. 0.72PZT-0.28PZNN 세라믹에 자극을 주었을 때 시간에 따른 안정화 거동
	■ 미세 구조가 신뢰도에 미치는 영향 파악	- MnO_2 첨가에 따라 grain 성장이 일어나고 grain이 클수록 일시적인 유전율의 변화(Δt)가 적음을 확인함.  그림 98. 0.72PZT-0.28PZNN에 여러 첨가물을 넣었을 때 열 충격에 대한 유전율의 변화

2. 연구수행결과의 검증 방법

가. 열차적용운전 평가 및 수정보완 (0.15 mW/cm^3)[10]

○ KTL(한국산업기술시험원)으로부터 목표값에 관한 인증을 수행함.
○ 시험성적서 번호 : 14-030617-01-1[11]



ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

페이지 Page 3 / 4 of Pages

14-030617-01-1

6. 시험 결과

1) 압전 세라믹스 사이즈

가로 (cm)	세로 (cm)	두께 (cm)	cm^3
0.75	1.50	0.03	0.033 75

2) 발전 출력의 전체 평균 및 구간 최대값

구간	기 준 (mW / cm^3)	전체 평균 환산 출력 (mW / cm^3)	구간 최대 환산 출력 (mW / cm^3)
가평-남춘천	**0.15 이상**	**0.757 2**	**1.149 6**

3) 각 구간 평균 출력

측정 No.	평균 출력 (mW)	평균 환산 출력 (mW / cm^3)	비고
1	0.029 9	0.885 3	
2	0.038 8	1.149 6	
3	0.027 8	0.824 1	
4	0.022 2	0.659 0	
5	0.032 0	0.947 4	
6	0.019 1	0.565 8	
7	0.032 5	0.962 0	
8	0.017 3	0.513 2	
9	0.019 1	0.566 1	
10	0.016 9	0.499 3	

※ 1회 10초간, 10회 연속 측정 데이터임
※ 환산 출력 = 출력 (mW) / 압전 세라믹스 사이즈 (cm^3)

그림 99. KTL 시험 성적서 결과

10) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.
11) 전체 시험성적서는 부록에 포함됨.

나. $d_{33} \times g_{33}$>15K, k_p>0.6, Q_m>1000, 소결온도<900℃, Fatigue Cycle>100,000, Young's Modulus<80GPa의 압전 세라믹 조성

○ KICET(한국세라믹기술원)으로부터 목표값에 관한 인증을 수행함.
○ 시험성적서 번호 : 2014-2553, 2014-2562

시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원	성적서번호 : 2014-2553	KICET
우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	페이지 (1)/(총 1)	

1. 의 뢰 자
   - ㅇ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ㅇ 주 소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ㅇ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 06일
2. 시험성적서의 용도 : 과제인증용
3. 시험 시료명/물질 : PZT-PZNN
4. 시험기간 : 2014년 08월 06일 ~ 2014년 08월 11일
5. 시험방법 : 기기분석
6. 시험환경
   - ㅇ 온도 : (24 ± 1)℃ , 습도 : (35 ± 1)% R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목		시험분석결과	시험분석방법	비고
PZT-PZNN	d33*g33상수 (㎡/N)	1	$17\,632 \times 10^{-15}$	기기분석	
		2	$16\,827 \times 10^{-15}$		
		3	$17\,567 \times 10^{-15}$		
		4	$17\,723 \times 10^{-15}$		
		5	$16\,985 \times 10^{-15}$		
	기계손실상수 (Qm)	1	1 098		
		2	1 197		
		3	1 012		
		4	1 120		
		5	1 090		
	기계전기결합상수 (Kp) (%)	1	0.601		
		2	0.604		
		3	0.602		
		4	0.601		
		5	0.604		

참고) 상기 측정에서 d33*g33은 Piezotest d33, radiant technologies/HP 4194A technologies, Kp와 Qm은 HP 4194A Agilent technologies를 이용하여 측정한 결과임.

확 인	시험자 : 이 미 재 (2442)	기술책임자 : 최 철 호

2014 . 08 . 11

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(3)

그림 100. KECET 시험 성적서 결과 (1/3)

시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원 우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	성적서번호 : 2014-2562 페이지 (1)/(총 1)	KICET

1. 의 뢰 자
   - ㅇ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ㅇ 주 소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ㅇ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 07일
2. 시험성적서의 용도 : 과제인증용
3. 시험 시료명/물질 : PZT-PZNN
4. 시험기간 : 2014년 08월 06일 ~ 2014년 08월 11일
5. 시험방법 : ASTM E 494
6. 시험환경
   ㅇ 온도 : (24 ± 1) ℃ , 습도 : (42 ± 1) % R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
PZT-PZNN	영률 (GPa)	81	ASTM E 494	

확 인	시험자 : 조 광 연 (77	기술책임자 : 최 철 호

2014 . 08 . 11

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(03)

그림 101. KECET 시험 성적서 결과 (2/3)

시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원 우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	성적서번호 : 2014-2663-6 페이지 (1)/(총 1)	KICET

1. 의 뢰 자
   - ㅇ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ㅇ 주　　소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ㅇ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 18일
2. 시험성적서의 용도 :　품질관리
3. 시험 시료명/물질 :　압전세라믹-6
4. 시험기간 :　2014년 08월 18일 ~ 2014년 08월 19일
5. 시험방법 :　ASTM E 494
6. 시험환경
   - ㅇ 온도 : (24 ± 1)℃ ,　습도 : (42 ± 1)% R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
압전세라믹-6	영률 (GPa)	57	ASTM E 494	

확 인	시험자 : 조 광 연 (77	기술책임자 : 최 철 호

2014 . 08 . 20

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(03)

그림 102. KECET 시험 성적서 결과 (3/3)

○ 압전 세라믹 조성 ($d_{33} \times g_{33}$, k_p, Q_m)

- 압전 상수 d_{33}와 유전 상수 $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$, k_p, 그리고 Q_m은 국제적으로 정해진 규격이 없어 결과의 검증이 쉽지 않음.
- 따라서 본 연구에서는 특성 값의 객관성을 위해 세라믹 전문 기관인 한국세라믹기술원에 특성 분석 의뢰를 하여 본 연구의 신뢰성을 높이고자 하였음.
- 그 결과 한국세라믹기술원의 측정 결과와 고려대학교의 측정 결과의 큰 차이가 없음을 알 수 있음.

	d33 × g33	kp	Qm
고려대학교 측정	20.161K	0.6	1020
인증기관 측정 (한국세라믹기술원)	17.756K	0.604	1197

- 다만 $d_{33} \times g_{33}$값의 경우 d_{33} 측정 방법의 차이에 의해 고려대와 한국세라믹기술원 간의 차이가 나타났지만, 과제 목표 $d_{33} \times g_{33}$ = 15K를 달성하기에 충분한 값이 한국세라믹기술원에서도 측정되었음.
- 압전 특성인 d_{33} 측정은 표준화된 측정 방법 없이 디스크의 모양과 측정자의 측정 방법, 측정 장비 모델에 따라 오차가 많이 발생되는 것으로 알려져 있음.
- 하지만 본 과제의 목표 값인 $d_{33} \times g_{33}$ = 15K 는 고려대에서의 측정방법과 한국세라믹기술원에서의 측정방법 모두 충분히 달성하였음을 알 수 있음.

○ 일반적으로 세라믹의 경우 100 GPa 이상의 Young's Modulus값을 가지며 매우 탄성적인 세라믹의 경우라도 80 GPa 정도의 값을 가짐. 따라서 80 GPa 이하의 Young's modulus를 가질 때 하베스팅 시 일반 세라믹에 비해 잘 깨지지 않고 탄성적으로 외부 진동에 대해 반응할 수 있을 것이라 판단됨. 또한 그 값을 정확히 측정하기 위하여 추후 여러 개의 시편을 제작한 후 이들 값들의 평균을 구하는 것이 합리적일 것이라 판단됨. 또한 소결 시간을 미세하게 조절하여 이가 영률에 미치는 영향을 파악하는 것도 소결 시간에 따른 Young's modulus의 변화를 이해하는 데 이롭다고 판단됨.

○ 개발된 조성을 캔틸레버에 부착하여 최대의 진폭과 그에 따른 최대의 압전 발전량을 보이는 60 Hz에서 실험을 진행함. 60 Hz의 진동을 가했을 때 약 30분 동안 진동을 가하면 100,000번의 자극이 소자에 가해지게 됨. 따라서 최대의 진폭을 가지는 60 Hz에서 30분 이상을 재료의 피로현상 없이 얻을 수 있었음. 실제 기기 적용 시 공진 주파수에서보다 작은 진폭의 진동이 소자에 가해질 것임. 또한 60 Hz보다 매우 작은 진동수의 진동이 가해질 것으로 예상됨. 따라서 실험 결과인 30분보다 훨씬 긴 시간동안 재료의 피로현상 없이 소자가 안정적으로 작동 할 수 있을 것이라 예상함.

○ 본 연구의 조성에는 인체에 유해한 납(Pb)의 함량이 큼. 인체에 유해한 물질에 대해 규제가 커져가기 때문에 납을 함유하지 않는 비연 재료에 대한 관심이 커져가고 있음. 이미 본 과제

에서와 같이 압전 소재에 첨가제를 첨가하여 Q_m을 증가시킨 연구가 세계 곳곳에서 진행되었으며 따라서 향후 개발된 비연 재료를 철도에 부착하여 에너지를 수확하는 연구가 필요 할 것으로 보임.

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

제1절 열차별 진동 특성 측정 및 분석단계를 걸쳐 선별되어진 열차 조건에서, 압전 하베스팅 시스템을 이용하여 0.15 mW/cm^{3}를 발전

○ 본 연구성과는 열차별로 서로 다른 진동을 분석하고 결과 값을 응용하여 제작된 단위 체적당 0.71 mW/cm^3 (단결정 1.15 mW/cm^3)의 발전량을 낼 수 있는 압전 하베스팅 시스템으로써 세계 최초로 열차의 진동을 효과적으로 수확할 수 있도록 설계 및 제작되었음.

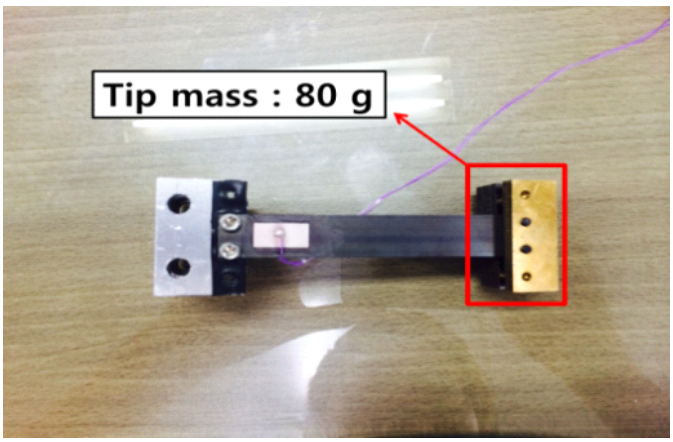


그림 103. 발전량 인증시 사용된 압전소자의 실제사진 및 tip mass의 무게

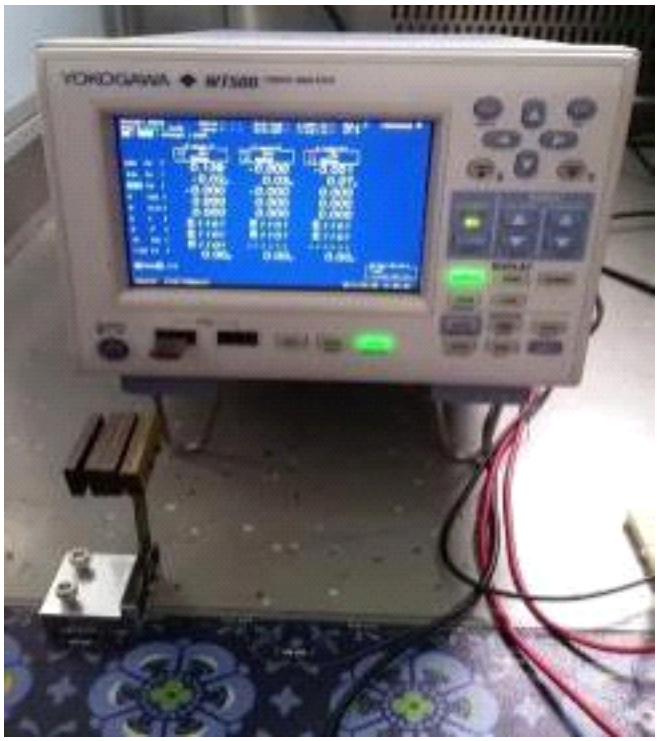


그림 104. 열차 내 발전량 인증 실험

제2절 고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발

(d_{33} x g_{33} ≧ 15K, k_p ≧ 0.6, Q_m ≧ 800, 소결온도 ≦ 1000℃의 압전 세라믹 조성 개발)

○ 압전체의 압전 특성(d_{33})와 유전율($\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$), 그리고 k_p는 일반적으로 서로 비례하는 상관관계를 가지고 있고 이들과 Q_m은 일반적으로 반비례하는 상관관계를 가지기 때문에 $d_{33}\times g_{33}$와 Q_m이 동시에 높은 재료를 얻기는 쉽지 않으나 본 연구에서는 d_{33}가 높고 유전율이 낮은 PZT-PZNN 시스템을 연구하고 Hardening을 일으키는 MnO_2를 첨가하고 소결을 도와주는 CuO를 첨가함.

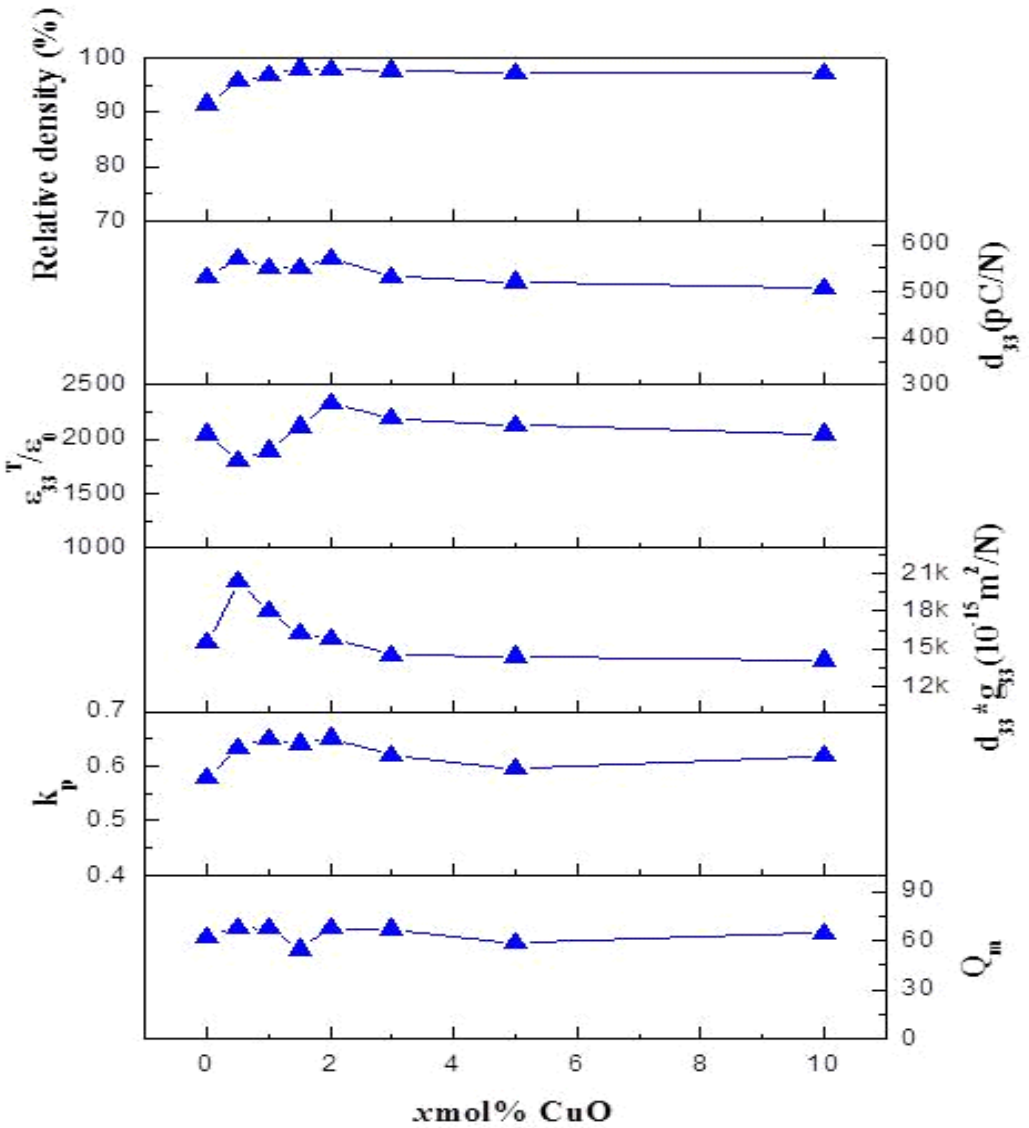


그림 105. $0.69PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.31PZ_{0.4}N_{0.6}N$ 세라믹스에 CuO를 첨가하여 900℃에서 소결했을 때의 압전 특성

제3절 고성능 압전 에너지 하베스팅용 소자 개발

(Energy density ≧ 10 mW (인가응력 = 0.3G), 압전 세라믹 사이즈 = 5 cm x 3 cm)

○ 본 연구 과제를 통해 개발된 압전 에너지 하베스팅용 소자는 높은 인가 응력에 견디는 동시에 높은 energy density를 가지도록 제작되었음. 이는 높은 발전량과 내구성을 바탕으로 압전 에너지 하베스팅 시장 선점을 가능케 할 것임.

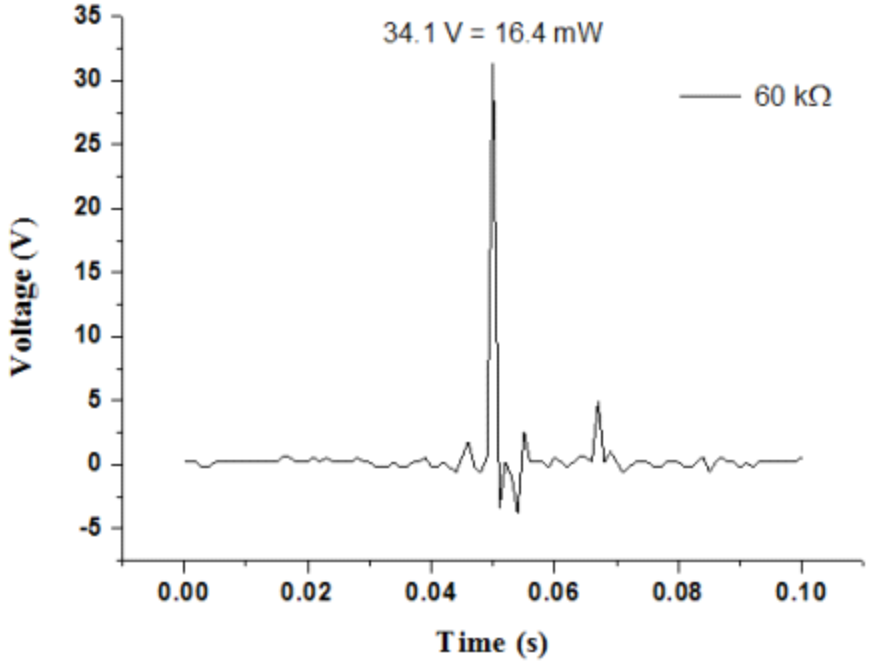


그림 106. 2차 충격 타격 실험을 통한 압전 성능 분석

제4절 $d_{33} \times g_{33}$ > 15K, k_P > 0.6, Q_m > 1000, Fatigue Cycle > 100000, 소결온도 < 900℃, Young's Modulus < 80 GPa의 압전 세라믹 조성

○ 본 연구에서는 철도 차량에서의 압전 에너지 하베스팅을 위해 에너지 하베스팅 특성과 기계 전기 변환 특성, 그리고 기계적 특성이 모두 훌륭한 조성을 개발함.

○ 실제 에너지 하베스팅 적용 시 값싼 상용 전극과의 동시 소성이 가능하도록 900℃ 이하에서의 저온 소결을 달성함.

○ 최종적으로 소결온도 900℃, $d_{33} \times g_{33}$ = 20.161, k_p = 0.6, Q_m = 1020, Young's modulus = 81 GPa, Fatigue cycle 100,000이상의 우수한 특성을 가지는 조성을 개발함.

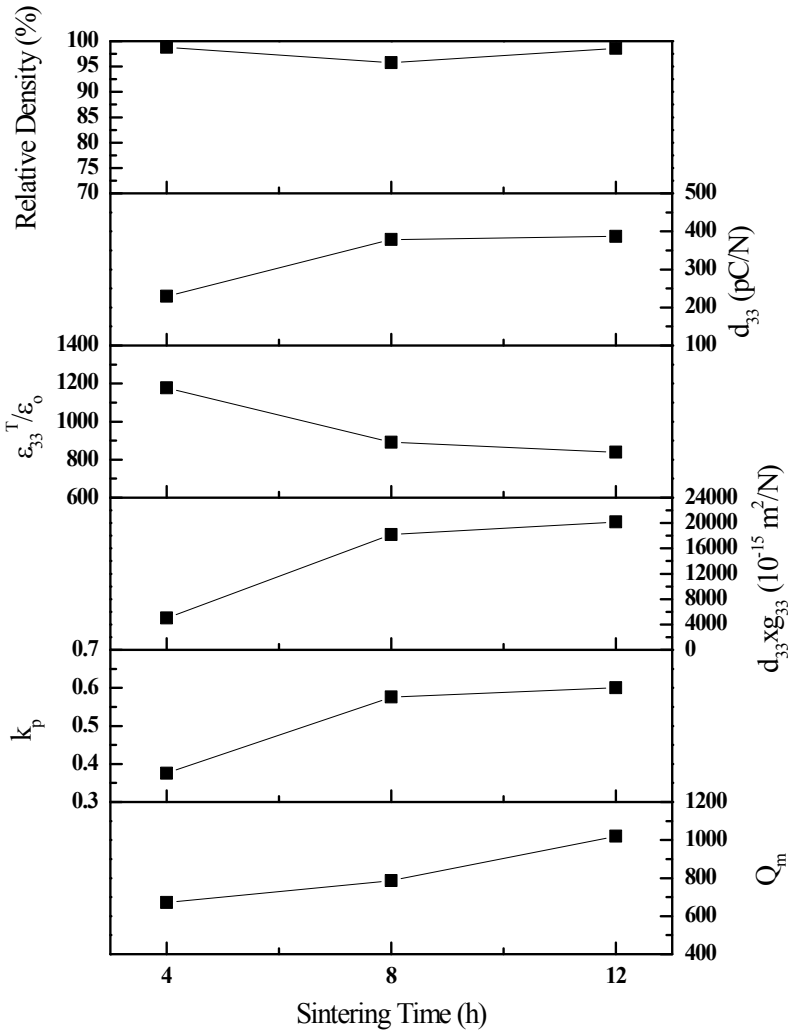


그림 107. 900°C에서 소결된 $0.72PZ_{0.47}T_{0.53}$-$0.28PZ_{0.4}N_{0.6}N$ + 1.5 mol% MnO_2 + 2 mol% CuO 세라믹스의 소결 시간에 따른 압전 및 유전 특성

제5절 압전 발전 시스템 제작

- 압전소자 제작 및 정류 회로, DC/DC 회로 선정
- 압전 하베스팅 시스템 제작
- 차량을 모사한 시뮬레이터 제작
- 제작된 압전 하베스팅 시스템 평가
- 열차 조건을 선정하여 열차 적용 운전
- 열차적용운전 평가 및 수정 보완

○ 본 압전소자의 제작을 통해 압전 후막 공정을 확립하였으며 최적의 소결온도 및 공정 조건 또한 도출함. 압전 후막 공정 확립 및 지속적인 연구를 통하여 원가에 비해 상대적으로 높게 형성되어 있던 압전소자의 cost-down이 이루어질 수 있음.

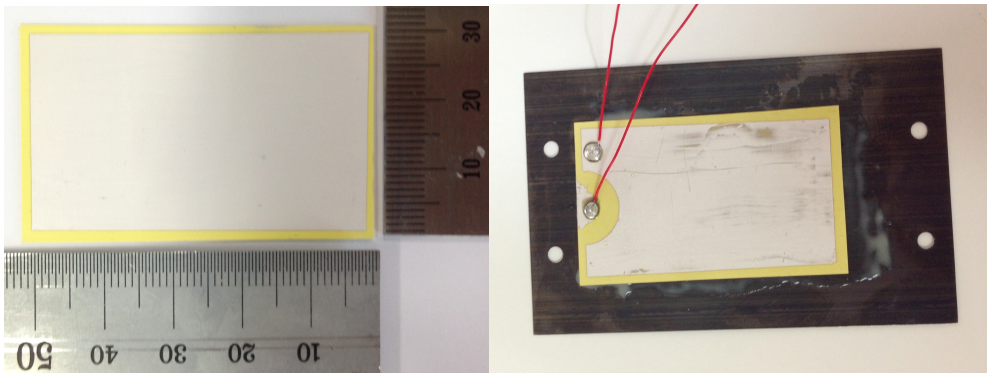


그림 108. 최종 완성된 PZT-PZNN thick film 및 SUS에 부착된 압전 소자

○ 또한 출력 전압이 AC인 압전 소자의 전력을 효과적으로 정류할 수 있는 브릿지 다이오드 소자를 정류 회로로 선정하였으며 전압 조정기는 LM7805로 선정함. 또한 단주기 출력 변동에도 대응이 가능하며 우수한 충/방전 효율을 갖는 슈퍼 커패시터를 충전 소자로 선정함.

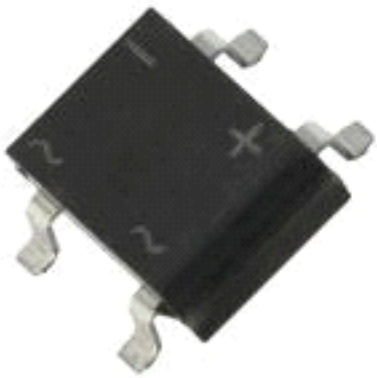


그림 109. 브릿지 다이오드 정류 소자 (DF04)



그림 110. 정전압 조정기 LM7805

○ 총 3년간의 연구 기간을 통해 총 14 종류의 압전 발전 시스템을 제작함.

- ① Steel ball을 이용한 발전,
  ② Spring을 이용한 발전,
  ③ Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전,
  ④ 프로펠러를 이용한 발전, ⑤ 철도 차량의 브레이크형 발전,
  ⑥ cantilever Ⅰ형, ⑦ cantilever Ⅱ형, ⑧ cantilever Ⅱ개선형,
  ⑨ 압전 발판형 시스템, ⑩ 자력을 이용한 발전, ⑪ 진자를 이용한 발전,
  ⑫ 구슬을 이용한 타격형 발전, ⑬ 스프링과 진자를 이용한 발전,
  ⑭ 풍력을 이용한 발전 시스템

○ 진동 측정 및 분석 기기(Bruel & kjaer)를 통하여 열차의 진동을 측정하고 실험실에서 분석 및 재현하여 차량의 진동을 모사할 수 있도록 함.

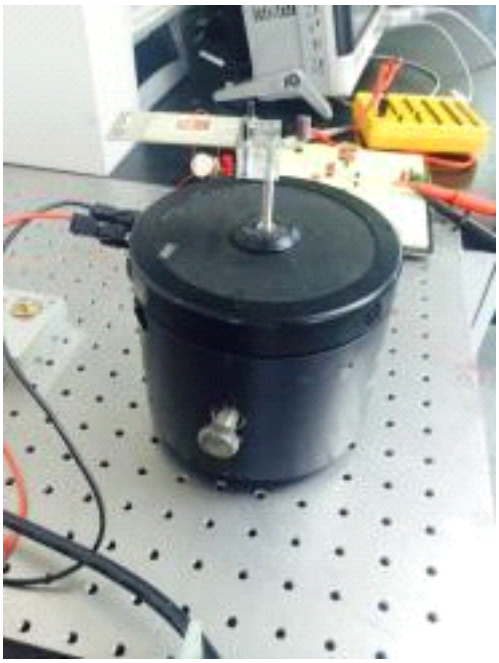


그림 111. 열차의 진동을 모사하기 위한 가진기 (Vibration exciter)

○ 총 연구기간동안 KTX, KTX-산천, 새마을호, 무궁화호, ITX-청춘, 누리로, 분당선, 신분당선, 차세대 전동차 등 총 9 종류 열차의 진동을 측정 및 분석하였고 평가위원의 의견 및 자체 분석 결과를 통하여 ITX-청춘 열차를 시스템 적용 열차로 최종 선정하였음.

○ 제작된 총 14종류의 압전 하베스팅 시스템 가운데 자체 평가를 거쳐 **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템이 최종적으로 채택되었으며 채택된 압전 하베스팅 시스템은 전문기관으로부터 최종 목표 발전량에 대한 인증을 수행함.

제6절 주요 연구성과(학술적 성과 및 기술적 성과)

1. 학술적 성과

	수행연도	건수	논문 제목	저널 및 학회명	비고
논문	1차 년도	1건	Low temperature sintering of ZnO and MnO_2-added $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ ceramics	Journal of the European ceramic society	SCI
	2차 년도	3건	Designing a piezoelectric energy harvesting system for the superconductor Maglev	Journal of Electroceramics	SCI
			Piezoelectric energy harvesting system for the vertical vibration of superconducting Maglev train	Journal of Electroceramics	SCI
			Relation between piezoelectric properties of ceramics and output power density of energy harvester	Journal of European Ceramic Society	SCI
	3차 년도	12건	Study on Application of Piezoelectricity to Korea Train eXpress(KTX)	Ferroelectrics	SCI
			Design of Piezoelectric Energy Harvesting System by Magnetic Force-Controlled Resonance Frequency	Ferroelectrics	SCI
			Restoration and Reinforcement Method for Damaged Piezoelectric Materials	Ferroelectrics	SCI
			Stress Distribution Design of Additional Substrate for Piezoelectricity	Ferroelectrics	SCI
			Design of a New Piezoelectric Energy Harvester Based on Secondary Impact	Ferroelectrics	SCI

			Study on the Strain Effect of a Piezoelectric Energy Harvesting Module	Ferroelectrics	SCI
			Study of Charging Efficiency of a Piezoelectric Energy Harvesting System Using Rectifier and Array Configuration	Ferroelectrics	SCI
			Effective Piezoelectric Area for Hitting-Type Piezoelectric Energy Harvesting System	Japanese Journal of Applied Physics	SCI
			Optimal design and application of a piezoelectric energy harvesting system using multiple piezoelectric modules	Journal of Electroceramics	SCI
			Design of an impact-type piezoelectric energy harvesting system for increasing power and durability of piezoelectric ceramics	Japanese Journal of Applied Physics	SCI
			Piezoelectric Ceramics for Use in Multilayer Actuators and Energy Harvesters	Journal of American Ceramic society	SCI
			Influence of sintering conditions on piezoelectric properties of $KNbO_3$ ceramics	Journal of European Ceramic Society	SCI
학술발표	**1차 년도**	14건	Feasibility Study on Piezo-electric Damping using Piezoelectric Actuator for a Superconductor Flywheel Energy Storage	6th The International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (IWPMA)	국외
			Piezoelectric energy harvesting system for the vertical vibration of superconducting Maglev train	6th The International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (IWPMA)	국외
			Study of Theory About Composition of Piezoelectric Module for Energy Harvesting System	6th The International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (IWPMA)	국외

			Study of stabilization for earthquake shock absorption device by applying eddy current	24th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY	국외
			Designing a piezoelectric energy harvesting system for the super conducting Maglev	24th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY	국외
			The effect of superconductor bearing on piezoelectric energyharvestingsystemusingfluidf low	24th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERCONDUCTIVITY	국외
			Piezoelectric energy harvesting system for the application of Korea Train eXpress(KTX)	Energy harvesting, storage and wireless sensor networks Europe 2012 Germany	국외
			Piezoelectric energy harvester using $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ and CuO-added $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ Ceramics	9^{th} International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators	국외
			ELECTRICAL PROPERTIES OF $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ THIN FILMS GROWN BY RF MAGNETRON SPUTTERING	11^{th} European Conference on Applications of Polar Dielectrics	국외
			EFFECT OF A SUPERCONDUCTOR FLY-WHEEL ENERGY STORAGE DAMPING BY USING PIEZOELECTRIC ACTUATOR	KIASC Conference 2011	국내
			Piezoelectric energy harvesting system for the application of superconducting maglev train	KIASC Conference 2011	국내
			Study on Eddy Current effect for Application of Earthquake Shock Absorbtion Device	KIASC Conference 2011	국내
			Improving Stiffness on Superconductor Levitation by Applying Eddy Current Effect for Earth Quake Shock Absorption	2012 초전도 공동 워크샵	국내
			The Feasibility Study of Application for a Superconductor Bearing on Piezoelectric Energy Harvesting System using Fluid Flow	2012 초전도 공동 워크샵	국내

	2차 년도	18건	Effect on Hitting-typed Piezoelectric Energy Harvesting System with The Area of Hit Piezoelectric Device	IWPMA & EHW 2013	국외
			Study on Optimized Conditions for The Impact-based Piezoelectric Energy Harvesting System	IWPMA & EHW 2013	국외
			Study on Increasing Current for Hitting Type of Piezoelectric Energy Harvesting System	IWPMA & EHW 2013	국외
			Improved Characteristics of Piezoelectric Energy Harvesting System with Change of Total Stiffness	IWPMA & EHW 2013	국외
			압전 시스템의 탄성 변환에 따른 영향 연구	한국전기전자재료학회 2012년도 추계학술대회	국내
			차세대 전동차를 이용한 압전성 적용에 관한 연구	한국전기전자재료학회 2012년도 추계학술대회	국내
			여러 개의 압전체 배열을 통한 압전 에너지 하베스팅에 관한 연구	한국전기전자재료학회 2012년도 추계학술대회	국내
			다수의 압전체로 구성된 압전 에너지 하베스팅 시스템의 최적 설계조건에 관한 연구	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			차세대 전동차를 이용한 3축 발전량 측정 실험을 통한 철도 차량용 압전 에너지 하베스팅 시스템 설계	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			스프링과 캔틸레버 압전소자를 이용한 압전타일 발전량 증대	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			압전 에너지 하베스팅 시스템의 전류증가를 위한 연구	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			고효율 압전 에너지 하베스팅을 위한 변형량과 전류 관계 분석	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			압전소자를 이용한 진동 흡수 시스템 설계	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내

			압전 외팔보 시스템에 가해지는 단위면적당 힘의 변화에 따른 발전량 분석	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			외팔보 보조재의 강성 변화에 따른 압전 에너지 하베스팅 특성 연구	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			타격 기반 압전 에너지 하베스팅 시스템의 충전효율 최적화 연구	한국전기전자재료학회 2013년도 하계학술대회	국내
			Synthesis and Piezoelectric Properties of KNbO3 and (Na1-xKx)NbO3 Nanowires Grown by Hydrothermal Method	한국세라믹학회	국내
			Piezoelectric Properties of the Crystalline $0.95(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$-$0.05CaTiO_3$ Thin Film Grown by RF Sputtering	한국세라믹학회	국내
	3차 년도	28건	Study on Energy Storage Device for the Impact-Based Piezoelectric Energy Harvesting System	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Pin Structured Substrate Design for Piezoelectric Ceramic Material	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Study on Increasing Current for Hitting Type of Piezoelectric Energy Harvesting System	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Effect on Hitting-Typed Piezoelectric Energy Harvesting System With the Area of Hit Piezoelectric Device	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Study of Optimizing Acceleration Distribution on Time-Varying with Equal Input Energy in Piezoelectric Energy Harvesting	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Multi Piezoelectric Array Energy Harvesting System for Watt Level Power	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Relationship Between Current and Impedance in Piezoelectric Energy Harvesting System for water waves	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Study on Piezoelectric Energy Harvesting System for Applying Vibration of Commercial Trains in Korea	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외

			Improved Characteristics of Piezoelectric Energy Harvesting System with Change of Total Stiffness	proceedings of 10th international workshop, hannover, 2013	국외
			Design of Piezoelectric Energy Harvesting System with Protective Urethane Rubber Coating	International Conference on Advanced Electromaterials 2013 [ICAE 2013]	국외
			The Effect of Tip-Mass on Impact-Based Piezoelectric Energy Harvesting System	International Conference on Advanced Electromaterials 2013 [ICAE 2013]	국외
			Designing and Manufacturing a Piezoelectric Tile for Harvesting Energy from Footsteps	International Conference on Advanced Electromaterials 2013 [ICAE 2013]	국외
			Design of Impact Type Piezoelectric Energy Harvesting System for Increasing Power and Durability of Piezoelectric Ceramics	International Conference on Advanced Electromaterials 2013 [ICAE 2013]	국외
			Effect of viscosity and thickness in PZT-PZNN tape casting process for energy harvesting system	Electronic Materials and Applications 2014	국외
			Thickness Optimization of 0.69PZT-0.31PZNN thick film for energy harvesting module	Electronic Materials and Applications 2014	국외
			Optimization of Tape Casting Procedure for Enhancing PZT-PZNN Thick Film Density	한국세라믹학회 춘계 학술대회	국내
			Study on CuO doping effect on 0.69PZT-0.31PZNN for multi-layer piezoelectric energy harvesting system	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외
			Optimization study on Impact rods for piezoelectric energy harvesting system	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외
			Hybrid (d_{33} and d_{31} mode) type piezoelectric energy harvesting system resulting 92 W output power	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외

			Study on sintering temperature effect for enlarging area of 0.69PZT-0.31PZNN thick film	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외
			Study on the sintering temperature and the temperature gradient	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외
			Effect of Ball size and Ball Milling Time on Piezoelectric Properties of 0.69PZT-0.31PZNN	2014 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric, International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices & Workshop on Piezoresponse Force Microscopy (ISAF/IWATMD/PFM)	국외
			압전 소자와 전자기 유도방식의 하이브리드 에너지 하베스팅 연구	한국전기전자 재료학회 하계학술대회	국내
			Investigationon Electrical properties of the crystalline Calcia-stabilized Zirconia Thin film grown on the Pt/Ti/SiO2/Si Substrate by RF magnetron sputtering	한국세라믹학회	국내
			Study of efficiency optimization by input power in piezoelectric energy harvester	Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference	국내
			압전 에너지 하베스팅 시스템에서 타격발전에 대한 소음 분석	Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference	국내
			스프링의 탄성력을 이용한 압전 하베스팅 시스템 설계	Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference	국내
			압전 에너지 하베스팅 적용을 위한 영구자석을 이용한 가진기 설계	Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference	국내

2. 기술적 성과

	수행연도	건수	특허명	출원번호
특허	1차년도	4건	이동체 적용 압전 하베스팅 시스템	2012-0022441
			리프 스프링을 이용한 압전 하베스팅	10-2012-0069037
			이동수단의 손잡이에 응용되는 압전 하베스팅 시스템	10-2012-0069036
			에너지 하베스팅용 고성능 압전재료 및 이의 제조방법	2011-0106252
	2차년도	5건	터널에서 이동하는 철도차량에 의한 공기 흐름을 이용한 압전 발전 장치	2013-0067785
			열차내부의 관성력을 이용한 압전 발전 장치	2013-0067789
			철도차량 객차 사이에 적용되는 압전 하베스팅 시스템	2013-0067794
			철도 차량 내부 좌석에 적용되는 압전 하베스팅 시스템	2013-0067798
			적층형 에너지 하베스팅 적용을 위한 고효율 입전 세라믹 조성	2013-0074257
	3차년도	5건	진자형 압전 에너지 하베스터	10-2014-0083643
			진동 에너지를 활용한 압전 하베스팅 모듈	10-2014-0083641
			철도 진동 및 승하차시 문의 동력을 이용한 압전 에너지 하베스팅 시스템	10-2014-0083642
			페이지 전환 장치	10-2014-0060317
			압전 에너지 하베스팅용 세라믹 조성물, 이의 제조방법 및 이를 이용한 압전 에너지 하베스터	10-2014-0094487

제7절 기술 실시 및 적용사례

○ **Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전** 시스템

- 1차년도에 채택한 발전 방식으로써 꾸준히 시스템에 대한 보완 및 개선이 진행됨. 열차의 진동 분석을 통하여 substrate 및 piezo ceramic, tip mass의 무게 등이 최적화됨.

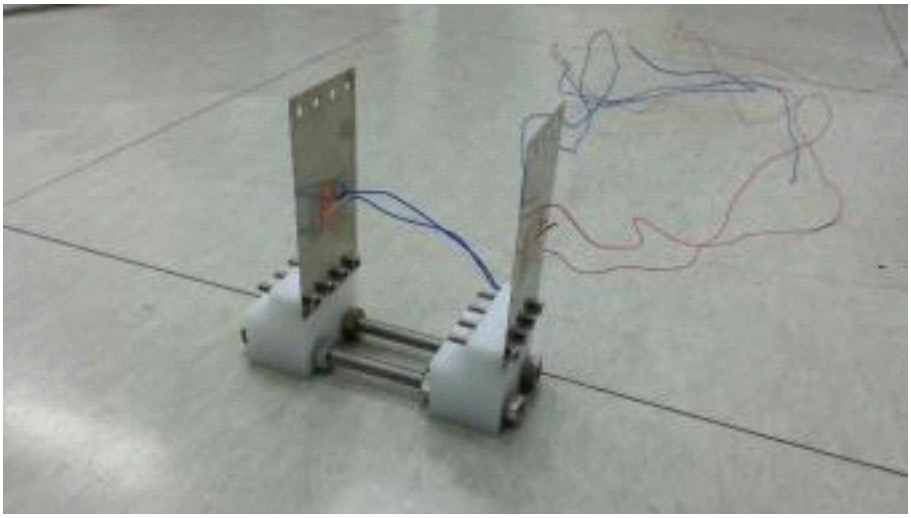


그림 112. Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 시스템 시제품

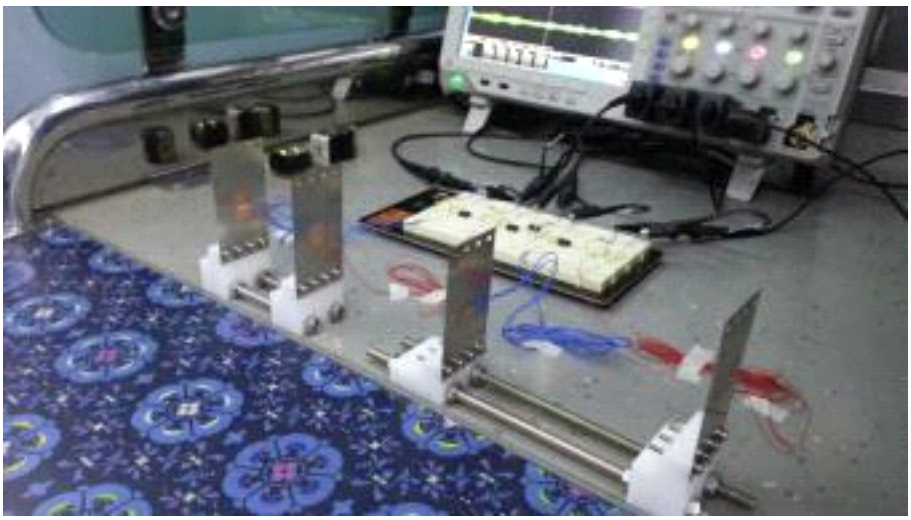


그림 113. Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 시스템의 실제 적용

○ 자력을 이용한 발전

- 압전소자의 끝단에 부착된 자석은 tip mass의 역할을 함과 동시에 압전소자의 상하에 고정된 자석과의 상호작용을 통해 운행하는 철도 차량으로부터 가해지는 진동을 증폭시키는 역할을 함.

- 압전소자의 상하에 고정된 자석과 진동의 조건에 따라 교체가 가능하며 상하의 자석과 압전소자에 부착된 자석의 거리 또한 조절이 쉽도록 설계되었음.



그림 114. 자력을 이용한 발전 시스템 시제품



그림 115. 자력을 이용한 발전 시스템의 실제 적용

○ 진자 응용형 발전

- 진자를 이용한 발전
  - 하단에 고정된 압전소자의 끝단에 부착된 자석은 상단의 실에 연결된 자석과 상호작용을 하며 발전을 함. 상단의 실에 연결된 자석은 열차의 관성에 의해 불규칙적인 운동을 하면서 열차의 진동을 증폭시키는 역할을 함.

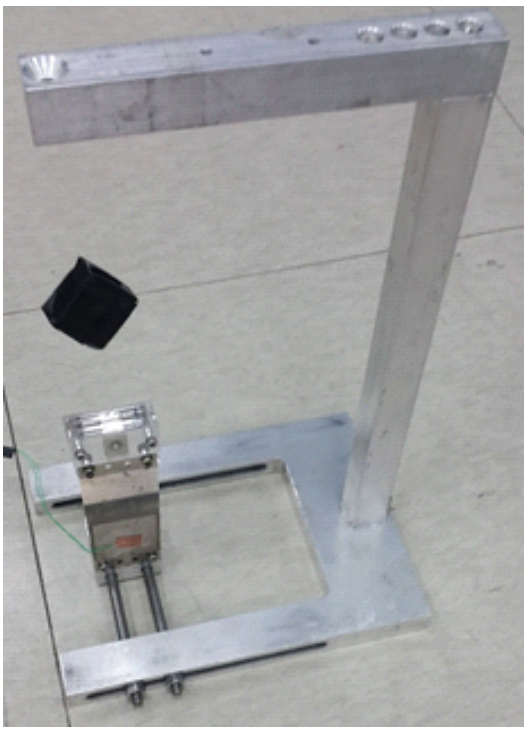


그림 116. 진자를 이용한 발전 시스템 시제품



그림 117. 진자를 이용한 발전 시스템

- 구슬을 이용한 타격형 발전
  - 상단의 실에 연결된 구슬은 열차의 관성에 의해 불규칙적인 운동을 하면서 하단에 고정된 압전소자를 직접적으로 타격하여 발전을 함.



그림 118. 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템 시제품

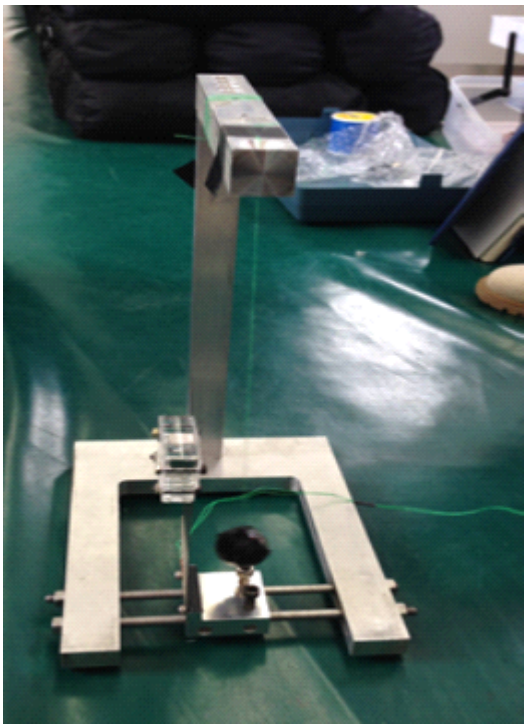


그림 119. 구슬을 이용한 타격형 발전시스템의 실제 적용

- 스프링과 진자를 이용한 발전
  - 진자를 이용한 발전과 마찬가지로 하단에 고정된 압전소자의 끝단에 부착된 자석은 상단의 실에 연결된 자석과 상호작용을 하며 발전을 함. 또한 시스템 바닥과 열차 바닥에 연결된 스프링은 열차의 진동을 직접적으로 받아들이고 증폭시키는 역할을 함. 따라서 본 시스템은 열차의 관성력과 진동을 동시에 수확할 수 있음.



그림 120. 스프링과 진자를 이용한 발전

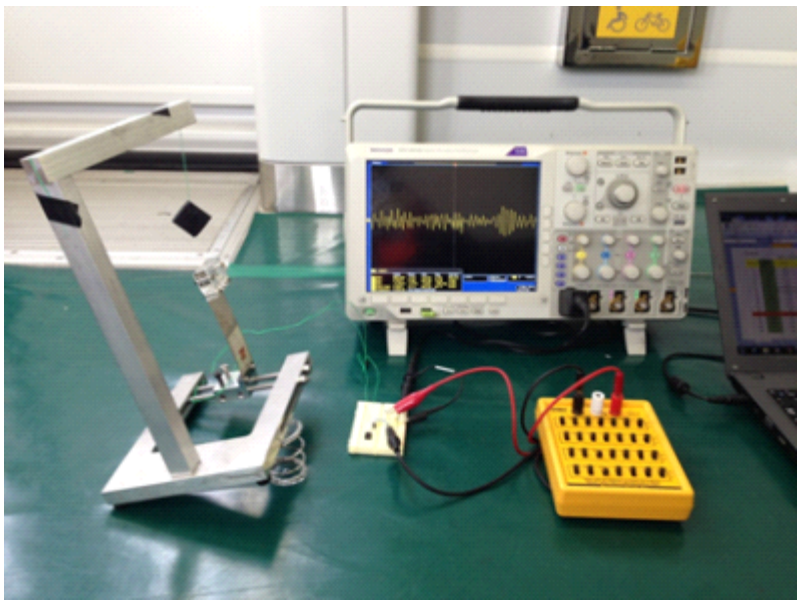


그림 121. 스프링과 진자를 이용한 발전 시스템의 실제 적용

○ 풍력을 이용한 발전 시스템

- 열차가 운행할 때 발생하는 맞바람을 이용하여 발전하는 시스템임. 풍력을 회전 에너지로 변화하고 회전자에 부착된 자석과 압전소자의 끝단에 부착된 자석의 상호작용을 통해 발전하기 때문에 발전량이 높음과 동시에 내구성 또한 우수함.

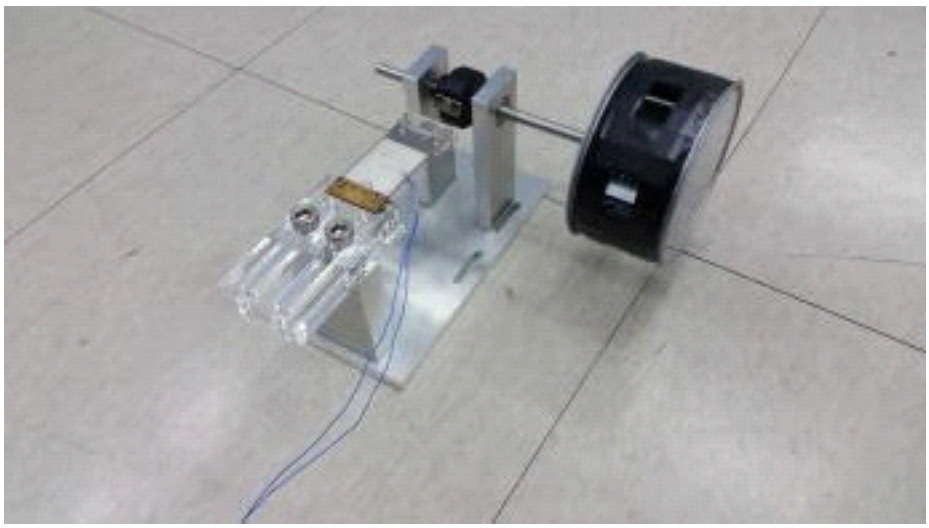


그림 122. 풍력을 이용한 발전 시스템 시제품



그림 123. 풍력을 이용한 발전 시스템의 실제 적용

제8절 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

○ 화석에너지 사용에 따른 환경파괴 및 지구 온난화 가속으로 온실가스 문제가 심각하여 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 다양한 에너지 사업이 제기됨.

○ 또한, 지속적 유가 상승과 화석 연료의 고갈은 세계 각국의 에너지 자원 확보경쟁의 심화를 초래하고 있음.

○ 지속적인 사회·경제적 발전을 위한 동력을 제공하는 동시에 환경 및 사회·정치적 파급효과에 대처할 수 있는 대체 에너지의 확보는 전 세계가 직면한 중대 과제 중 하나임.

○ 에너지 하베스팅은 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 친환경 발전 기술로써 국내외 다양한 기업에서 중장기적인 개발 계획을 수립하여 과감한 정책적, 재정적 지원을 하고 있음.

○ BCC research(2012)에 따르면 미국, 아시아, 유럽(중동, 아프리카)의 에너지 하베스팅 시장은 연평균 복합 성장률(CAGR) 40.8 %로 성장해 2017년엔 5배 이상으로 커질 것으로 예상하고 있음[12].

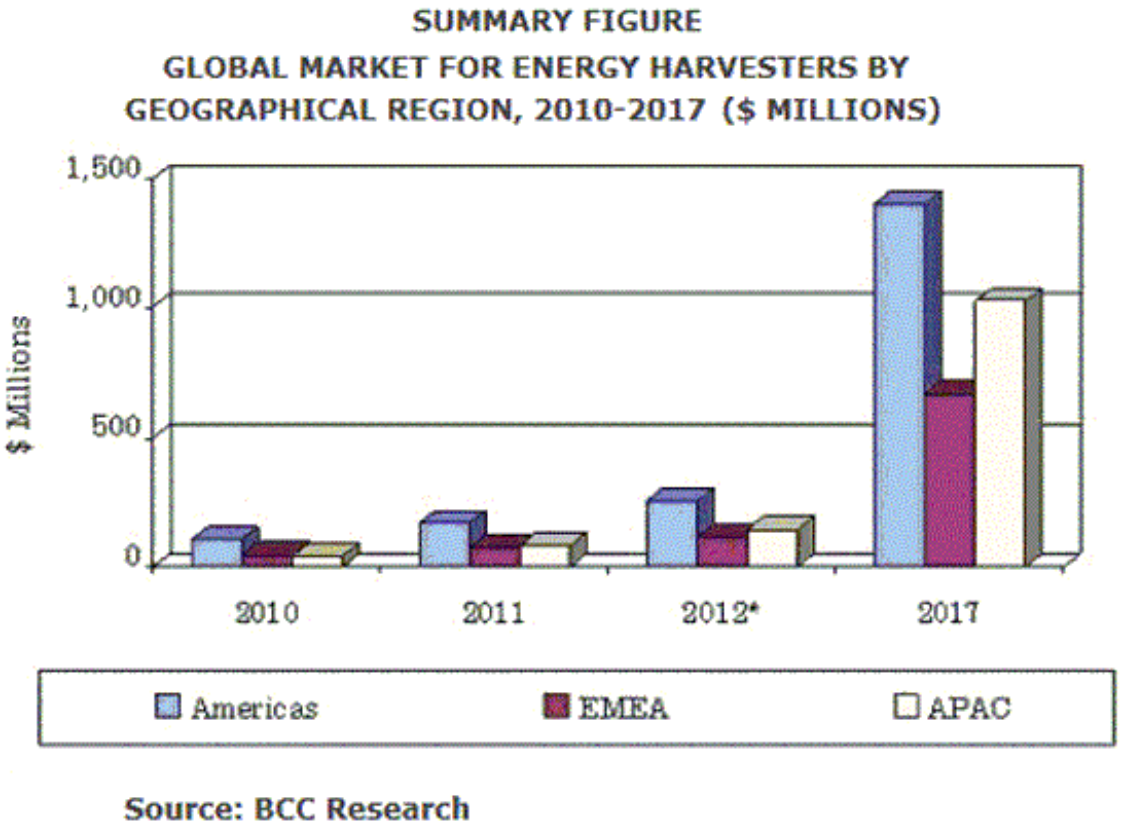


그림 124. 세계 각 지역의 에너지 하베스팅 시장 (출처: BBC Research)

12) BBC research report global markets, Technologies and devices for energy harvesting, Oct, 2012. (Report code : EGY097A)

○ Pike Research의 최신 시장 조사 보고서[13]에 따르면 에너지 하베스팅 시장 규모는 연평균 복합 성장률(CAGR) 37.6%로 성장할 것으로 예측됨.
(BCC research는 40.8%)

○ 에너지 하베스팅 시장은 2015년에 11조 원까지 성장할 것으로 예상되며, 압전 발전의 대용량화가 달성될 경우 어플리케이션 영역의 확대로 인해 2020년에는 50조 원에 육박할 것으로 예상됨.

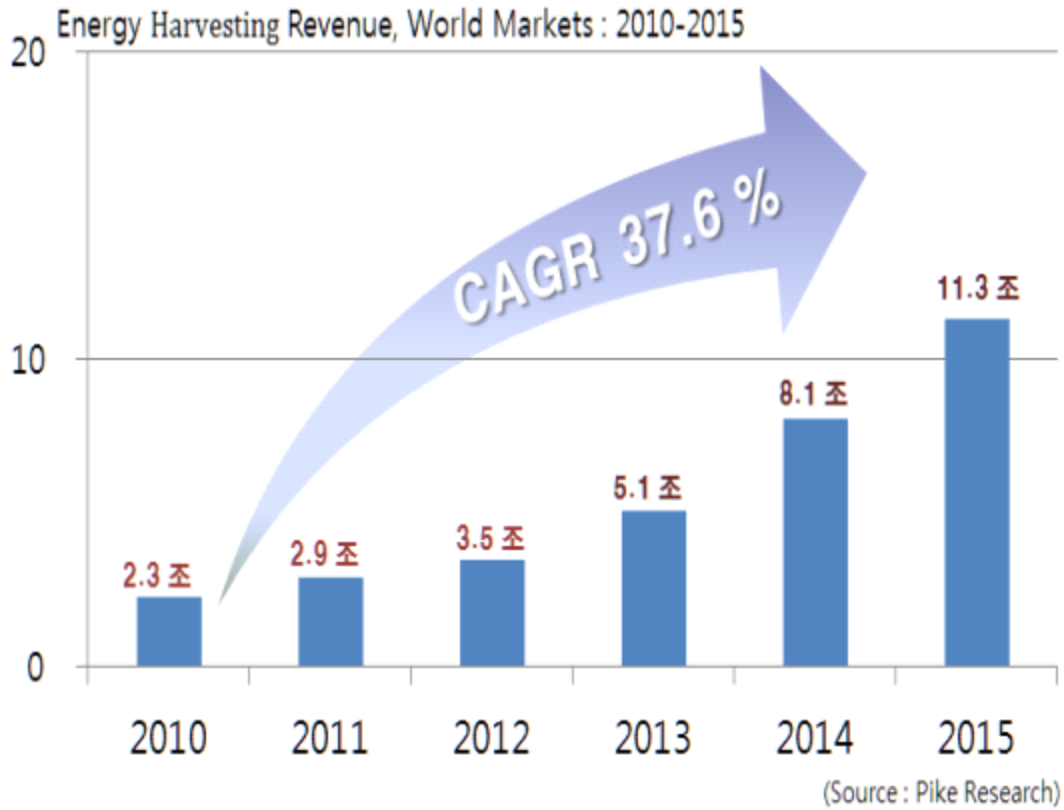


그림 125. 에너지 하베스팅 시장예측 (출처:Pike Research)

13) Pike Research report Energy Harvesting Revenue, World Markets : 2010-2015.

제4장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 당해연도 수행 진도율

구분 / 개발내용	연구개발기간												진도(%)
	8월	9월	10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	
현차 시험 평가를 통한 성능/신뢰성 검토	■	■	■	■	■	■	■	■					100%
시스템 보완 및 개선			■	■	■	■	■	■	■	■			100%
결과 평가 및 분석					■	■	■	■	■	■	■	■	100%
ZnO 첨가	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			100%
소결조건 확립							■	■	■	■	■	■	100%
신뢰성 평가	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■			100%

2. 연구개발 성과점검 달성도

가. 1차년도 성과점검기준표

	성과목표		성과검증 기준 (1차년도)						가중치
			성과지표		목표수준		측정방법	검증 방법	
					목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	1-1	철도 차량별 진동 측정 및 분석	①	순간최대 발전량	철도 차량별 진동 데이터	철도 차량별 진동 데이터	진동 데이터 유무	진동 데이터	4
	1-2	철도기술연구원과 업무 협조 체제	②	Test result	1건	1건	업무 협조 공문 유무	공문	3
	1-3	압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작	③	압전 발전 시스템 디자인 설계 및 제작	설계도	설계도	설계도 유무	설계도	5
	2-1	고성능 압전 재료 개발	①	d_{33} x g_{33}	13K	13K	IEEE resonance 법	발표	2
			②	k_p	0.5	0.5	IEEE resonance 법	발표	2
			③	Q_m	500	500	IEEE resonance 법	발표	2
	2-2	고 내구성 압전 재료 개발	①	Fatigue cycle	-	-	-	-	-
			②	소결 온도	1000℃	1000℃	소결 후 밀도측정	발표	2
			③	young's modulous	-	-	stress-strain test	발표	-
	총 계								20

	목표		목표 건수	달성 건수	증빙	달성율(%)	가중치
양적 점검 지표	1	특허출원/등록	4	4	출원번호	100	50
	2	시작품제작	-	-	사진 및 동영상	-	-
	3	SCI 논문	1	1	게재	100	50
	총 계						100%

나. 2차년도 성과점검기준표

	성과목표		성과검증 기준 (2차년도)						가중치
			성과지표		목표수준		측정방법	검증방법	
					목표치	달성치			
성과질적목표점검	1-1	압전 발전 소자 제작 (5 x 3 cm^2) (최대발전량 ≧10 mW)	①	순간최대발전량	10 mW	10 mW	고정밀 전력계 측정	측 정 데이터	4
	1-2	열차에 현장 적용하여 성능시험	②	Test result	실험 데이터	실험 데이터	실험 데이터 비교	발표	8
	2-1	고성능 압전 재료 개발	①	d_{33} x g_{33}	14K	14K	IEEE resonance 법	발표	2
			②	k_p	0.55	0.55	IEEE resonance 법	발표	2
			③	Q_m	800	800	IEEE resonance 법	발표	2
	2-2	고 내구성 압전 재료 개발	①	Fatigue cycle	-	-	-	발표	-
			②	소결 온도	900℃	900℃	소결 후 밀도측정	발표	2
			③	young's modulous	-	-	stress-strain test	발표	-
	총 계								20

	목표		목표 건수	달성 건수	증빙	달성율(%)	가중치
양적점검지표	1	특허출원/등록	5	5	출원번호	100	30
	2	시작품제작	1	3	사진 및 동영상	300	40
	3	SCI 논문	3	3	게재	100	30
	총 계						100%

다. 3차년도 성과점검기준표

	성과목표		성과검증 기준 (3차년도)						가중치
			성과지표		목표수준		측정방법	검증 방법	
					목표치	달성치			
성과 질적 목표 점검	1-1	철도 차량 적용운전 평가 (0.1 mW/cm^3)	①	10초간 평균 최대 발전량	0.15 mW[14]	1.1496 mW	고정밀 전력계 측정	측정 데이터	10
	1-2	시스템 보완 및 개선	②	시스템 성능 향상율	10% 향상	747% (※1,211%)	실험 데이터 비교	발표	2
	2-1	고성능 압전 재료 개발	①	d_{33} x g_{33}	15K	17.723K	IEEE resonance 법	발표	1
			②	k_p	0.6	0.604	IEEE resonance 법	발표	1
			③	Q_m	1000	1197	IEEE resonance 법	발표	2
	2-2	고 내구성 압전 재료 개발	①	Fatigue cycle	100000	120000	-	발표	2
			②	소결 온도	900℃	900℃	소결 후 밀도측정	발표	1
			③	young's modulous	80GPa	81GP (※57GPa)	stress-strain test	발표	1
	총 계								20

		목표	목표 건수	달성 건수	증빙	달성율(%)	가중치
양적 점검 지표	1	특허출원/등록	4	5	출원번호	125%	30
	2	시작품제작	1	4	사진 및 동영상	400%	40
	3	SCI 논문	2	12	게재	600%	30
	총 계						100%

14) 2차년도 연차평가 이후 평가의견에 따라 150% 향상 조정함.

제2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

1. 기술적 중요성 및 파급효과

○ 본 연구를 통해 발전 효율이 높은 압전 하베스팅 시스템을 개발하여 스마트 그리드 사업에 큰 영향력을 줄 것으로 예상됨.

○ 개발되어질 시스템은 현재 운행 중인 열차에도 적용 가능함.

○ 열차 1량 당 발전량은 KTX 면적 기준으로 LED (소비전력 20 ㎽/개 기준) 약 2,000개 점등, 초전도 자기부상 열차인 Transrapid 면적 기준, 약 3,750개의 LED를 점등 가능

○ 중국 상하이 푸둥 국제공항, 상하이 자기부상 시범운행선 (구간길이: 30.5 km) 에서 운행 중인 Transrapid를 기준, 열차 1량의 면적은 약 75 m^2 (길이 약 25 m x 폭 약 3 m)로 약 75 W 이상의 전력 생산 (ref:Transrapid .International GmbH & Co. KG) 가능함.

○ 신기술 확보 및 세계적인 수준 달성 : 에너지 하베스팅 개념의 실용화 및 파생상품 개발 가능성 제공

○ 기술의 적용범위 및 용이성 : 열차 및 각종 운송수단 내 각종 조명, 센서, 휴대용 전원장치에 활용할 수 있는 독립전원으로 사용 가능함.

○ 친환경적 측면에서 국가적으로 좋은 이미지를 가질 수 있으며, 전 국민적으로 그린에너지를 사용하게 하는 환경운동적인 효과를 거둘 수 있음.

○ 저탄소 녹색성장의 중요성에 대한 국민적 공감대가 형성되고 있는 시점에서 버려지고 있는 진동에너지를 전기에너지로 변환시켜 사용함으로써 대한민국 녹색에너지 정책에 새로운 가능성 제시

○ 국내외로 많이 연구된 바 없는 압전 하베스팅 기술로 볼 때, 이 분야의 연구 개발에서 선도적인 역할을 할 것임.
- 본 연구 개발을 다른 국가에 비해 일찍 시작함으로써 세계 시장 선점이 가능하며, 압전 하베스팅 시스템 규격 및 효율을 국제 표준화 달성 가능
- 압전 하베스팅 시스템 분야에서 전문가 양성 및 우수 기술력 확보를 세계 시장에서 선두적인 기술로 수출 효과를 향상시킴.
- 또한, 신재생에너지 기술로 청정 국가이미지 제고 가능

○ 진동 에너지 자가발전 시스템용 압전소자의 구조설계 및 기술 국산화가 필요함.

○ 이러한 전체적인 내용을 볼 때, 우수한 압전 하베스팅 기술을 보유하기 위해 본 연구를 통하여 다른 나라에 압전 하베스팅 기술을 수출하여 경제적 이익을 볼 수 있음.

○ 기술 개발의 원천기술 확보 및 제품개발로 인한 기술의 표준화로 인해 사업 분야에서의 세계적 시장 선점이 가능하며 기술 선도를 통해 국제 표준화 달성 가능

제3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석(시장창출, 고용창출 등)

1. 경제적 중요성 및 파급효과

○ 현재는 국내외에서 압전 시장 태동기로 구체적인 국내외의 시장규모를 정확히 산출하기는 어려우나 압전체를 이용한 디바이스 부문의 세계시장을 참고로 하여 본 기술과 직간접적으로 관련된 시장의 규모 예측이 가능함.

○ 압전 디바이스 중 본 기술과 직접적 관령이 있는 다층 바이몰프 액츄에이터, 압전 발전기가 가장 크게 성장할 것이며, 성장률은 연간 51.5%로 추정됨.
(iRAP : www.innoresearch.net)

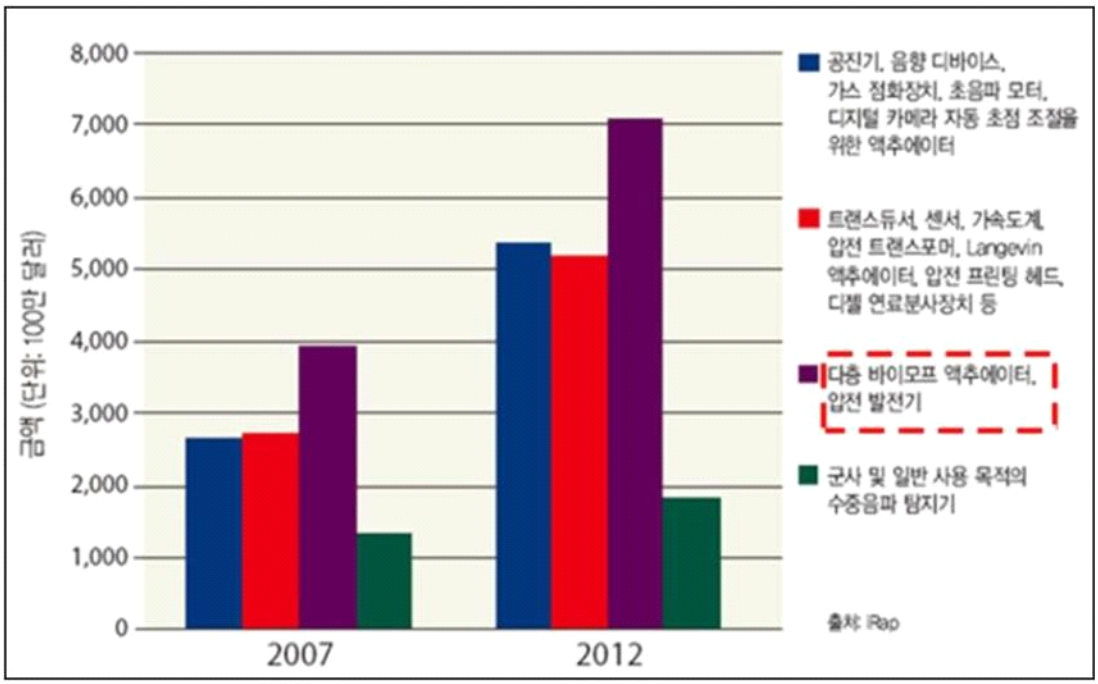


그림 126. 압전 디바이스의 타입별 세계시장 규모(출처: iRAP)

○ 현재 우리나라의 진동 발전 모듈의 시장 규모는 2014년 약 9조 원으로 예측됨.

※ 산출근거 : 진동 발전 디바이스의 일본 시장은 2014년에 약 23조 원으로 예측됨. 일본의 인구(약 1억 2,796만 명) 대 우리나라의 인구비(약 5,050만 명)를 통해 우리나라의 진동 발전 모듈 시장을 예측하면, 2014년에 약 9조 원으로 예측됨.[15)]

15) 일본 야노(Yano) 경제연구소

○ 현재 개발되지 않은 신기술로 조기 기술 확보가 이루어질 경우, 외국으로의 기술 수출을 통해 많은 수출효과가 발생할 수 있음.

○ 진동에너지를 이용한 압전 하베스팅 기술개발은 각종 휴대기기에서 소비된 폐건전지의 배출을 줄일 수 있음.
- 이에 따른 반영구적 에너지 절감 및 수은, 납, 망간 등에 의한 중금속 오염의 가능성을 배제함.
- 새로운 개념의 에너지 발전장치의 핵심 요소기술을 확보함으로써 국가 에너지 산업 경쟁력을 증진시킬 수 있음.

○ 친환경적 측면에서 국가적으로 좋은 이미지를 가질 수 있으며, 전국적으로 그린에너지를 사용하게 하는 환경운동적인 효과를 거둘 수 있음.

○ 저탄소 녹색성장의 중요성에 대한 국민적 공감대가 형성되고 있는 시점에서 버려지고 있는 진동에너지를 전기에너지로 변환시켜 사용함으로써 대한민국 녹색에너지 정책에 새로운 가능성 제시함.

○ 에너지 관련 신산업 창출효과
- 국민경제 성장은 생산유발효과와 고용창출효과로 구분할 수 있음.
- 직접효과는 압전 하베스터 설치 등으로 인한 건설부문의 경제적 파급효과이며, 간접효과는 신 산업창출로 인한 국민경제의 부가가치와 고용창출을 의미함.
- 신 개념 그린에너지 인프라 기술 확립을 통해 세계 에너지 산업을 선도할 수 있음.
- 친환경 에너지원인 압전을 이용한 에너지 하베스팅 시장의 증가로 인해 화석 연료의 고갈 및 온실가스 배출에 대한 문제를 해결할 수 있음.

○ 에너지와 환경문제를 획기적으로 해결하고 저탄소 녹색성장에 기여할 수 있는 신개념 그린에너지 인프라 기술 확립을 통해 에너지 기술 선진국으로 도약 가능함.



그림 127. 저탄소 녹색성장에 기여하는 에너지 하베스팅 기술

2. 경제적 고용창출 효과

○ 기술혁신이 고용에 미치는 효과의 방향은 기술혁신의 성격, 영향을 미치는 기간, 가격과 수요의 탄력성, 산업 특성, 거시경제 상황 등 복합적 상호작용에 의해 결정됨.

○ 기술혁신이 고용을 증대시키는 경우에 한정하여 정리하면, 기술혁신의 고용창출 메커니즘은 세 가지 경로로 요약됨.
- R&D 직군에 대한 직접적 고용 증가
- 기술을 이용한 직접 창업
- 생산성 증대나 제품혁신에 의한 수요 창출 (기업성장)

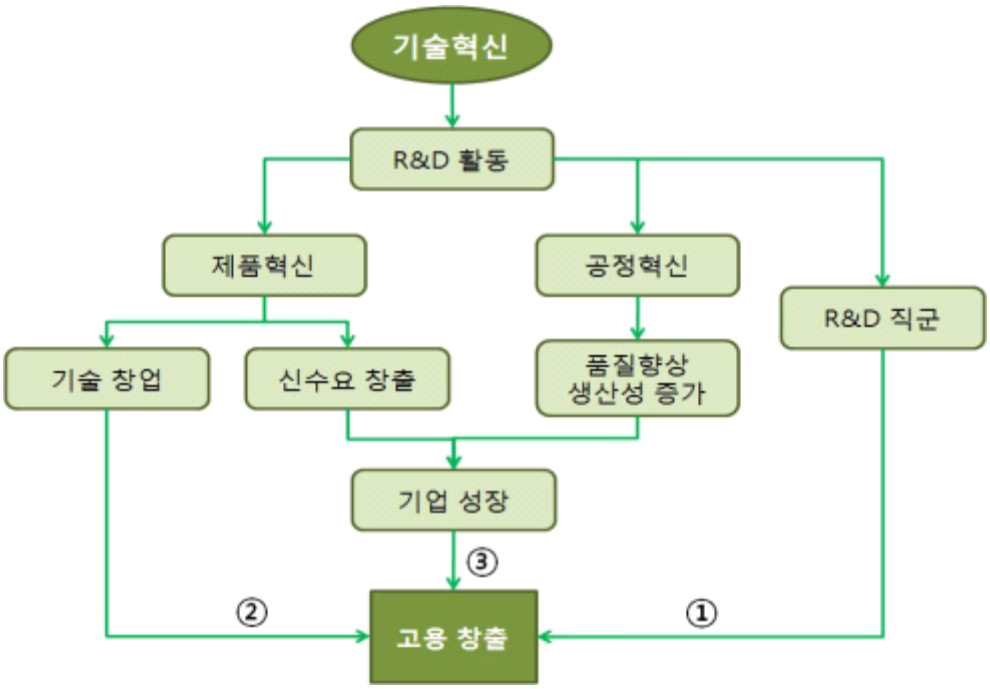


그림 128. 기술혁신의 고용창출 메커니즘

○ 기술혁신의 고용창출 효과
- 무수한 센서를 가동시킬 수 있는 압전 발전기반의 독립 전원 기술을 바탕으로 고용창출 및 매출 증대 효과
- 압전 소재 및 압전 하베스터의 생산을 위한 공장의 생산라인의 고용창출 효과
- 건설부문(하베스터 설치공사)의 경제적 파급효과로 직접적인 고용창출
- 설치 완료한 시제품의 관리를 위해 유지보수로 인한 고용창출
- 압전 하베스터의 교육을 통한 일자리의 전문성이 부여됨.

제4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

○ 현 정부는 『신·재생에너지 공급의무화제도 관리 및 운영지침』을 개정 및 고시하여 신·재생에너지의 사용을 의무화하였으며, 신·재생에너지 생산인증서를 신설하여 이에 대한 중요도를 크게 높였음.

○ 국내에서 2030년까지의 그린에너지 기술개발 로드맵을 마련하여 에너지 위기를 극복하는 단계이며 미래 그린에너지 시장선점을 위해 투자를 확대하고 있음.

○ 최근 수년간 원자력 발전에 대한 불안 요소로 인해 원자력 발전 비중이 감소되었고 정부의 신·재생에너지 관련 정책 및 지원이 확대됨에 따라 본 과제는 반드시 필요함.

○ 정부에서는 화석연료의 한계, 높은 원유가에 대처하기 위한 방안으로 태양광이나 열을 이용하는 신재생에너지의 보급을 확대하여 왔으나 높은 발전단가와 초기의 설비비용, 소형화의 어려움 등으로 인해 경제성이 낮아 후퇴와 전진을 반복하고 있는 실정임.

○ 정부에서는 2030년까지 전체 에너지 비중을 현재의 2.6%에서 11%로 높인다는 비전을 제시하고 있음.

○ 압전 에너지 하베스팅 기술은 타 신재생 에너지 기술에 비해 제작비 및 유지비가 상대적으로 저렴하며 면적 대비 높은 발전 효율을 갖는 특성으로 인해 소형화가 가능하고 시·공간적 제약이 적어 설치비용 회수 기간이 짧음.

○ 2012년 지식경제부에서 발표한 자료에 따르면 우리나라의 해외 에너지 의존도는 96% 수준에 육박하고 있어 본 과제 달성을 통하여 국내 에너지 자립도를 높이고 국가경쟁력을 확보할 수 있음.

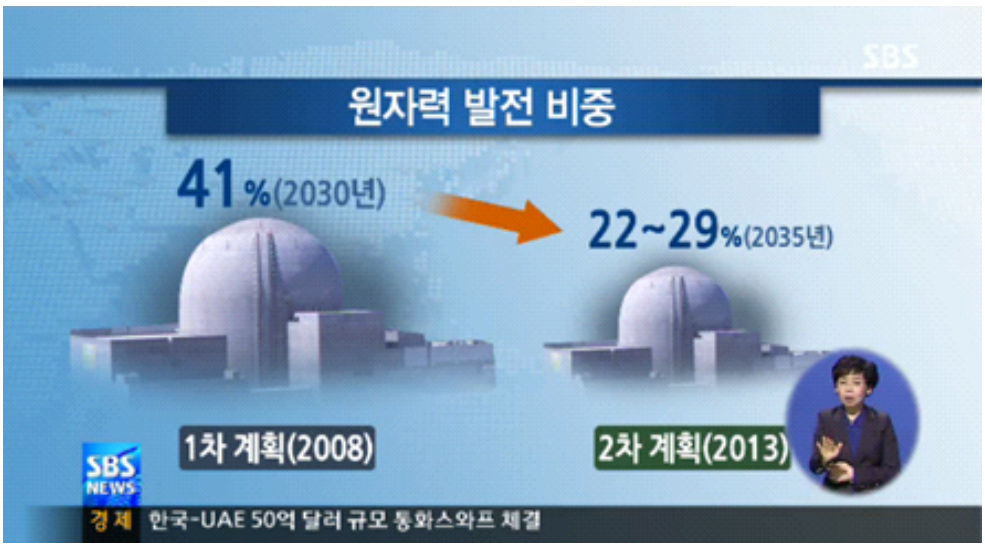


그림 129. 정부의 원자력 발전 비중 감축 계획

제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제1절 연구성과 향후 활용방안

○ 본 과제를 통해 개발된 압전 에너지 하베스팅 시스템을 현재 운행 중인 ITX-청춘에 적용할 시 열차 1량의 면적은 60 m^2 (길이 약 20 m ×폭 약 3 m)로 약 20 W 이상의 전력 생산 가능함.

○ 발생된 전력은 갑작스러운 정전 혹은 사고뿐만 아니라 항시 센서 구동을 가능케 하여 안전성 향상 및 전력 저감을 위한 다양한 센서의 전력원으로 사용 가능함.
- 온도/습도 센서의 경우 약 14,300개의 센서를 구동시킬 수 있음.
- 가스 센서의 경우 약 90개의 센서를 구동시킬 수 있음.
- LED 비상용 전구 약 3개를 구동시킬 수 있음.
- 평상시 저장장치에 저장되어 비상시 피난유도등이나 비상조명등과 같은 전등의 전력으로 활용 가능함.

○ 현재 개발된 압전 하베스팅 시스템은 ITX-청춘 열차의 객실 바닥에 설치하도록 설계되었으며 열차가 최고 속도에 이르렀을 때 최고 발전량을 낼 수 있음. 따라서 본 시스템을 상용화하기 위해서 시스템의 운전 조건을 만족시켜야 함.

○ 압전을 이용한 에너지 하베스팅 시스템은 소형·경량화가 가능하여 미세한 전자부품에 적용이 될 수 있음. 이와 더불어 압전 에너지 하베스팅 시스템은 독립적인 자가발전 시스템이므로 각종 전자기기의 전원으로의 활용도가 높을 것으로 예상되고 있음. 전 세계 전자기기의 에너지 하베스팅 및 저장장치 시장은 지속적인 증가세를 유지하여 2019년도에는 10,000백만 개를 상회할 것으로 전망되고 있음[16].

센서명	센서이름	소비전력	작동 (V),(I)
온도/습도센서	TC77-3.3MOA	1.4 mW	5.5 V, 0.25 mA
	TCN75-5.0MOA	1.4 mW	5.5 V, 0.25 mA
	HT-01DV		5.5 V
가속도/자이로 센서	MMA7260QT	1.8 mW	3.6 V, 0.5 mA
	MMA6280QT	1.8 mW	3.6 V, 0.5 mA
	ADXL202JQC	2.6 mW	5.25 V, 0.5 mA
기울기센서	초소형 (S1)	5 mW	5 V, 1 mA
	SW-392	12 mW	12 V, 1 mA
압코올 센서	MQ-303	10 mW	3 V
MOTION 센서	인체감지센서모듈 NT0072	15 mW	15 V, 1 mA
연기/불꽃 센서	UVTRON(R2868)	35 mW	350 V, 0.1 mA
전류센서	WCS2702	36 mW	12 V, 3 mA
터치센서	ADM1101	55 mW	5.5 V, 10 mA
가스센서	iAQ-engine	225 mW	5.0 V, 45 mA





그림 130. 개발된 압전 하베스팅 시스템의 활용처

16) “Energy Harvesting and Storage for Electronic Devices 2009-2019“ IDTechEx

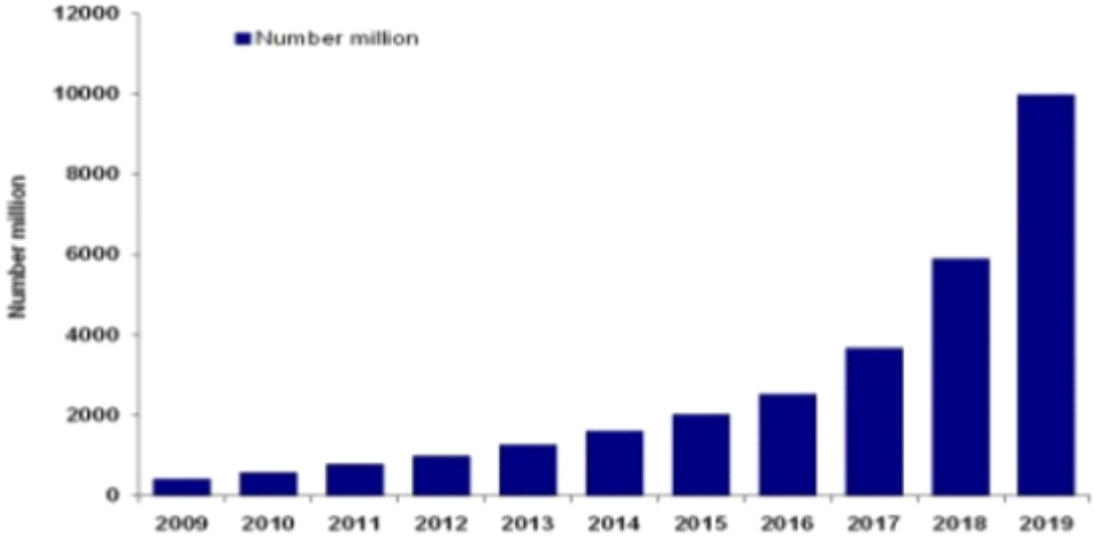


그림 131. 전자기기의 에너지 하베스팅 및 저장장치 시장 전망

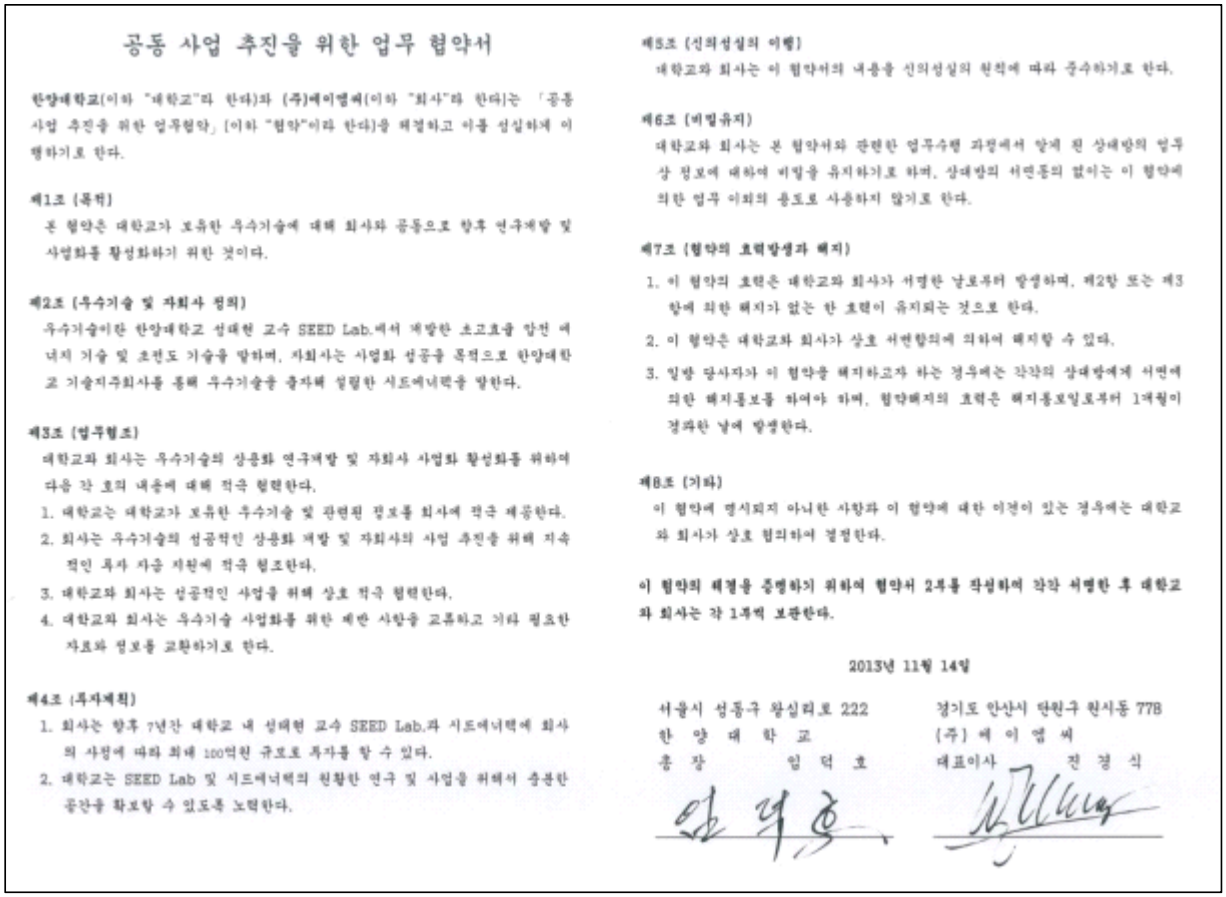
○ 또한 R&D를 통해 개발된 '철도차량의 적용을 위한 압전 하베스팅 시스템 개발'의 연구 개발 결과를 이용하여 즉각적인 철도 차량 적용 및 시범 운전이 가능하므로 철도 차량 종류에 따라서 다양하게 모의 테스트를 진행할 수 있을 것으로 판단됨.

○ 에너지 하베스팅은 기존의 에너지원을 대체할 수 있는 친환경 발전 기술로써 국내외 다양한 기업에서 중장기적인 개발 계획을 수립하여 과감한 정책적, 재정적 지원을 하고 있음.

○ 새로운 개념의 압전 에너지 하베스팅 시스템의 개발을 위한 원천기술의 확보는 향후 신규산업 창출 효과를 가지며 국내외 신규시장 선점을 가능케 함.

○ 또한, 본 프로젝트를 수행한 한양대학교는 2012년 9월에 **㈜시드에너텍**을 설립함으로써, 압전 에너지 하베스팅 기술을 이용하여 사업화를 성공시킴.

○ 더욱 활발한 연구개발과 기술 사업화를 위해 2013년 11월 **㈜**amc를 통해 한양대학교 기술지주 자회사인 ㈜시드에너텍과 공동사업 추진 업무협력을 체결하고 이에 따라 향후 7년간 100억 원의 투자를 협약함. 2013년 12월 **㈜시드에너텍**을 인수 후 **㈜amc에너지**로 상호변경 하였음.



공동 사업 추진을 위한 업무 협약서

한양대학교(이하 "대학교"라 한다)와 **(주)에이엠씨**(이하 "회사"라 한다)는 「공동 사업 추진을 위한 업무협약」(이하 "협약"이라 한다)을 체결하고 이를 성실하게 이행하기로 한다.

제1조 (목적)

본 협약은 대학교가 보유한 우수기술에 대해 회사와 공동으로 향후 연구개발 및 사업화를 활성화하기 위한 것이다.

제2조 (우수기술 및 자회사 정의)

우수기술이란 한양대학교 심태현 교수 SEED Lab.에서 개발한 초고효율 압전 에너지 기술 및 초민도 기술을 말하며, 자회사는 사업화 성공을 목적으로 한양대학교 기술지주회사를 통해 우수기술을 출자해 설립한 시드에너텍을 말한다.

제3조 (업무협조)

대학교와 회사는 우수기술의 상용화 연구개발 및 자회사 사업화 활성화를 위하여 다음 각 호의 내용에 대해 적극 협력한다.

1. 대학교는 대학교가 보유한 우수기술 및 관련된 정보를 회사에 적극 제공한다.
2. 회사는 우수기술의 성공적인 상용화 개발 및 자회사의 사업 추진을 위해 지속적인 투자 자금 지원에 적극 힘쓰한다.
3. 대학교와 회사는 성공적인 사업을 위해 상호 적극 협력한다.
4. 대학교와 회사는 우수기술 사업화를 위한 제반 사항을 교류하고 기타 필요한 자료와 정보를 교환하기로 한다.

제4조 (투자제척)

1. 회사는 향후 7년간 대학교 내 심태현 교수 SEED Lab.과 시드에너텍에 회사의 사정에 따라 최대 100억원 규모로 투자를 할 수 있다.
2. 대학교는 SEED Lab 및 시드에너텍의 원활한 연구 및 사업을 위해서 충분한 공간을 확보할 수 있도록 노력한다.

제5조 (신의성실의 이행)

대학교와 회사는 이 협약서의 내용을 신의성실의 원칙에 따라 준수하기로 한다.

제6조 (비밀유지)

대학교와 회사는 본 협약서와 관련한 업무수행 과정에서 알게 된 상대방의 업무상 정보에 대하여 비밀을 유지하기로 하며, 상대방의 서면동의 없이는 이 협약에 의한 업무 이외의 용도로 사용하지 않기로 한다.

제7조 (협약의 효력발생과 해지)

1. 이 협약의 효력은 대학교와 회사가 서명한 날로부터 발생하며, 제2항 또는 제3항에 의한 해지가 없는 한 효력이 유지되는 것으로 한다.
2. 이 협약은 대학교와 회사가 상호 서면합의에 의하여 해지할 수 있다.
3. 일방 당사자가 이 협약을 해지하고자 하는 경우에는 각각의 상대방에게 서면에 의한 해지통보를 하여야 하며, 협약해지의 효력은 해지통보일로부터 1개월이 경과한 날에 발생한다.

제8조 (기타)

이 협약에 명시되지 아니한 사항과 이 협약에 대한 이견이 있는 경우에는 대학교와 회사가 상호 협의하여 결정한다.

이 협약의 체결을 증명하기 위하여 협약서 2부를 작성하여 한한 서명한 후 대학교와 회사는 각 1부씩 보관한다.

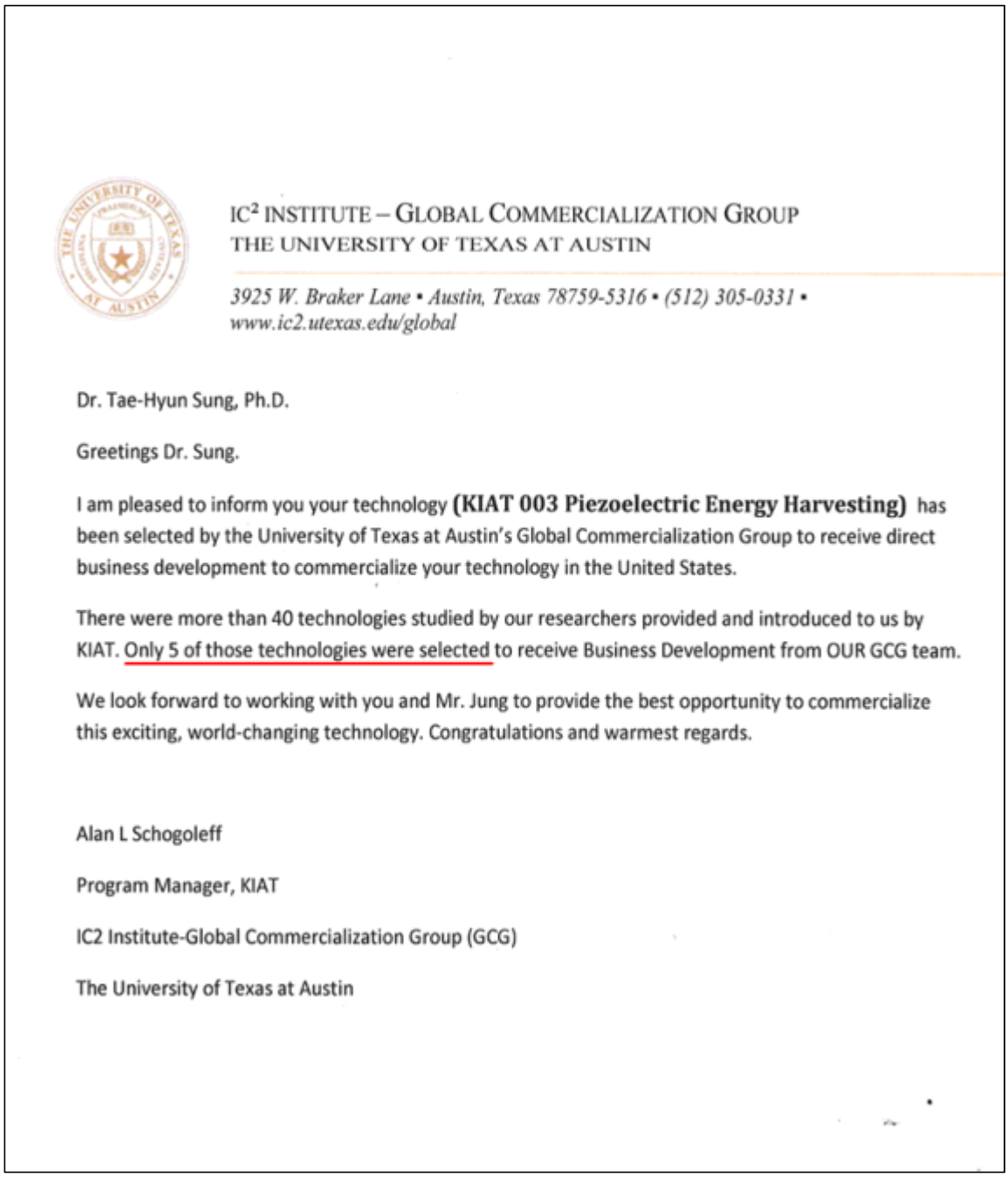
2013년 11월 14일

서울시 성동구 왕십리로 222
한 양 대 학 교
총 장 임 덕 호

경기도 안산시 단원구 원시동 778
(주) 에 이 엠 씨
대표이사 전 경 식

그림 132. 한양대학교 - ㈜에이엠씨 공동 사업 추진 협약서

○ 추가적으로, IC^2 Institute Global Commercialization Group, Texas 는 본 기술을 국내 136개 지주회사 기술 중 최종기술 the best 5로 선정하였음. 본 연구를 통해 개발된 기술의 효용성 및 사업성을 대외적으로 검증받음.



IC² INSTITUTE – GLOBAL COMMERCIALIZATION GROUP
THE UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN

3925 W. Braker Lane • Austin, Texas 78759-5316 • (512) 305-0331 •
www.ic2.utexas.edu/global

Dr. Tae-Hyun Sung, Ph.D.

Greetings Dr. Sung.

I am pleased to inform you your technology **(KIAT 003 Piezoelectric Energy Harvesting)** has been selected by the University of Texas at Austin's Global Commercialization Group to receive direct business development to commercialize your technology in the United States.

There were more than 40 technologies studied by our researchers provided and introduced to us by KIAT. Only 5 of those technologies were selected to receive Business Development from OUR GCG team.

We look forward to working with you and Mr. Jung to provide the best opportunity to commercialize this exciting, world-changing technology. Congratulations and warmest regards.

Alan L Schogoleff

Program Manager, KIAT

IC2 Institute-Global Commercialization Group (GCG)

The University of Texas at Austin

그림 133. The Best 5 Technologies selected by IC^2 Institute

제2절 추가연구 필요성

○ 본 연구의 조성에는 인체에 유해한 납(Pb)의 함량이 큼. 인체에 유해한 물질에 대해 규제가 커져가기 때문에 납을 함유하지 않는 비연 재료에 대한 관심이 커져가고 있음. 이미 본 과제에서와 같이 압전 소재에 첨가제를 첨가하여 Qm을 증가시킨 연구가 세계 곳곳에서 진행되었으며 따라서 향후 개발된 비연 재료를 철도에 부착하여 에너지를 수확하는 연구가 필요 할 것으로 보임.

○ 정확한 Young' s modulus 측정을 위하여 추후 여러 개의 시편을 제작한 후 이들 값들의 평균을 구하는 것이 합리적일 것이라 판단됨.

- 또한 소결 시간을 미세하게 조절하여 이가 영률에 미치는 영향을 파악하는 것도 소결 시간에 따른 영율의 변화를 이해하는 데 이롭다고 판단됨.

○ 본 연구개발 과제를 통해 세계 최초로 열차의 진동을 수확하는 시스템이 개발되었으나 예산 및 연구 기간의 부족으로 인하여 추가 연구가 진행되어야할 필요성이 있다고 판단됨.

- 본 연구 과제의 최종 목표인 0.15 mW/cm^3 발전량은 상용화된 전자기기에 바로 적용하기에는 상대적으로 적은 발전량이므로 이를 높이기 위한 추가 연구가 필수적임.
- 본 연구개발 결과로서 제시된 압전 에너지 하베스팅 시스템은 열차의 정상 운행 시에는 우수한 내구성을 보이나 열차의 이상 운행 시 시스템의 손상이 발생할 수 있음.
- 이러한 시스템의 손상 방지를 위해 압전 에너지 하베스팅 시스템의 내구성 향상 및 열차 이상 운행 시 시스템 손상 방지 관련 연구가 필요하다고 판단됨.
- 압전 에너지 하베스팅 시스템을 통해 수확한 전력을 조명과 다양한 휴대용 기기의 충전 전원으로 활용하기 위해 고효율 전력 변환 및 저장회로를 연구개발 할 필요가 있음.
- 본 연구 과제의 압전 에너지 하베스팅 시스템의 상업화를 위해서는 시스템 제작비용 절감 연구가 필요함. 특히 전체 시스템 제작비용 중 상당 부분을 차지하는 압전 소자 제작비용의 절감을 위해서, 압전 소자 제작 기술에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단됨.

○ 본 연구개발 결과를 확대 적용하여, 본 연구 과제의 대상인 철도 차량뿐만 아니라 자동차, 배, 비행기 등 다양한 운송수단에 특화된 압전 에너지 하베스팅 시스템 또한 연구가 개시되어야함.



그림 134. 다양한 응용이 가능한 압전 하베스팅

참고문헌

1) “Innowattech Alternative Energy Harvesting System” 기술 동영상 자료. (www.innowattech.co.il)
2) Pike Research report Energy Harvesting, Revenue, World Markets : 2010 - 2015
3) BBC research report global markets, Technologies and devices for energy harvesting, Oct, 2012. (Report code : EGY097A)
4) California Energy Commission Final project report, Jan, 2014. (http://www.genziko.com)
5) Farbod Khameneifar and Mehrdad Moallem, “A Piezoelectric Energy Harvester for Rotary Motion Applications: Design and Experiments,” IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 18, NO. 5, OCTOBER 2013
6) Daniel Song and Tae Hyun Sung, “Study on Application of Piezoelectricity to Korea Train eXpress (KTX),” Ferroelectrics, 449, 11-23, 2013
7) Chan Ho Yang and Tae Hyun Sung, “Design of Piezoelectric Energy Harvesting System by Magnetic Force-Controlled Resonance Frequency,” Ferroelectrics, 449, 24-32, 2013
8) Ju-hyun Yoo and Sang-ho Lee, “Piezoelectric and Dielectric Properties of Low Temperature Sintered Pb(Mn1/3Nb2/3)0.02(Ni1/3Nb2/3)0.12(ZrxTi1-x)0.86O3SystemCeramics,” trans. electr. electron. Mater., 10, 121-124 (2009)
9) Yohachi Yamashita, “Improved Ferroelectric Properties of Niobium-Doped Pb[(Sc1/2Nb1/2)Ti]O3CeramicMaterial,” Communications & Review Papers, 32, 5036-5040, (1993)

10) Rashed Adnan Islam and Shashank Priya, “High-Energy Density Ceramic Composition in the System Pb(Zr,Ti)O3-Pb[(Zn,Ni)1/3Nb2/3]O3,” J. Am. Ceram. Soc., 89, 3147 (2006)
11) S. Priya, “Criterion for Material Selection in Design of Bulk Piezoelectric Energy Harvesters,” IEEE Trans. Ultrason. Rerroelectr. Freq. Control, 57 [12] 2610-2 (2010)
12) Guochu Deng, Qingrui Yin, Aili Ding, Xinsen Zheng, Wenxiu Cheng, and Pingsun Qiu, “High Piezoelectric and Dielectric Properties of La-Doped 0.3Pb(Zn1/3Nb2/3)O3-0.7Pb(ZrxTi1-x)O3CeramicsNearMorphotropicPhaseBoundary,” J. Am. Ceram. Soc., 88 [8] 2310-2314 (2005)
13) Ruijuan Cao, Guorong Li, Jiangtao Zeng, Suchuan Zhao, Liaoying Zheng, and Qingrui Yinz, “The Piezoelectric and Dielectric Properties of 0.3Pb(Ni1/3Nb2/3)O3-xPbTiO3-(0.7-x)PbZrO3FerroelectricCeramicsNeartheMorphotropicPhase Boundary,” J. Am. Ceram. Soc., 93 [3] 737-741 (2010)
14) Qun Liu, Qingchi Sun, Weibing Ma, Minmin Li, Qing Xu, and Qi Zhang, “Large-strain 0.7Pb(ZrxTi1－x)O3-0.1Pb(Zn1/3Nb2/3)O3-0.2Pb(Ni1/3Nb2/3)O3Piezoelectricceramicsforhigh-temperatureapplication,” J. Eur. Ceram. Soc., 34, 1181-1189 (2014)
15) H. Tang , M.F. Zhang , S.J. Zhang , Y.J. Feng , F. Li , and T.R. Shrout, “Investigation of Dielectric and Piezoelectric Properties in Pb(Ni1/3Nb2/3)O3-PbHfO3-PbTiO3TernarySystem,” J. Eur. Ceram. Soc., 33, 2491-2497 (2013)

[부 록]

1. 2차년도 평가의견에 따른 보완대비표

첨부

평가위원 의견사항 보완대비표

□ 과제정보

과제명	주관연구기관	연구책임자	서 명
철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발	한양대학교	성태현	

구분	보완요청내용	보완여부 (√표기)	보완답변 (해당 보고서 페이지 기재 또는 보완 증빙서류 별도 제출)
종합의견서	- 연구목표 및 내용에 대하여 전문인증기관의 인증서 등을 통해 객관성 확보 필요 - 경제성 및 안전성 등의 분석을 보완하여 실용화 방안을 구체적으로 제시 - 운영기관 및 차량제작업체 의견 수렴을 조속히 진행하여 연구진행 필요 - 차년도 연구비 적절성을 검토하여 조정 필요 - 차년도 연구체계 구성시 철도운영기관을 참여할 수 있도록 조정 필요 - 연구계획의 적합성에 대하여 "일부보완"으로 판단	√ 보완 □ 부분보완 □ 보완불가	ㅇ 연구목표 및 내용에 대하여 전문인증기관인 한국산업기술시험원의 인증서 의뢰를 통하여 객관성 확보하겠음. ㅇ 경제성 및 안정성 등의 분석을 보완하여 실용화 방안을 제시 하겠음. ㅇ 당해연도인 3차년도에서는, 운영기관과 차량제작업체의 의견을 수렴하겠음. ㅇ 차년도 연구비는 평가위원님들의 의견에 따라 국외출장비는 삭감하여 전문인증기관의 인증료로 전용하였음. ㅇ 차년도 연구체계 구성시 철도운영기관인 철도시설공단의 참여를 요청하겠음.

- 1 -

그림 135. 2차년도 평가의견에 따른 보완대비표

○ 2차년도 연차평가 이후 평가위원 의견사항에 따른 보완대비표를 작성하여 당해연도 목표에 반영하였음.

○ 전문기관인증 : 인증을 받을 수 있는 정성적 목표는 모두 관련 전문인증기관에 의뢰하여 인증을 받음. (본문 연구내용 및 첨부자료에 증빙자료 포함)
○ 운영기관 차량제작업체와의 협의 : 철도차량 제작업체인 현대로템과의 협의를 통하여 과제 목표 및 기술에 대한 자문을 받음.
○ 국외출장비 삭감 : 국외출장비를 삭감하여 전문인증기관의 인증료로 사용함.
○ 철도시설공단과의 협의 및 실용화 방안 : 철도시설공단의 협의를 통해 실용화 방안에 대한 자문을 받음.

가. 운영기관 차량제작업체와의 협의

기 술 자 문 서

1. 사 업 명 : 철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발
2. 자 문 일 : 2014. 1. 7
3. 의 견

◎ 압전하베스팅 시스템은 철도차량 분야 이외에도 다양한 분야에 적용이 가능하므로 지속적인 연구개발이 이루어져야할 미래 기술로 사료됨. 특히, 히팅 및 센서로서의 응용 분야 확대도 가능할 것으로 보임.

◎ 철도차량 적용을 위해서 차량 실내에 국한하지 않고 차량 외부(대차, 옥상)에서는 더 높은 발전효율을 얻을 수 있을 것으로 기대됨.

◎ 현재 차량제작사에서 제작 중인 차량 및 영업운행에 투입되고 있는 차량에 대해서는 다양한 시험이 현실적으로 불가능하므로 현재 시험운행 중인 차세대전동차 등과 같은 시험 차량에서 다양한 조건에 대해서 시험을 수행하여 결과를 비교하는 것이 연구에 도움이 될 것으로 사료됨.

◎ 향후 실용화를 위해서는 발전량 증대 이외에도 보다 높은 전압의 출력이 요구되며, 철도 관련 규격을 참고하여 환경조건(온도, 진동 등)에 대해서도 시스템 적용이 가능하도록 사전 검토가 되어야할 것으로 사료됨.

2014 년 1 월 7 일

작 성 자 : 현대로템 선임연구원 김 행 구 (인)

그림 136. 현대로템 기술자문서

○ 평가위원의 의견에 따라 차량제작업체인 현대로템과의 협의를 진행함.
○ 2차년도 평가의견에 따르면 실제 운행되는 차량에 대하여 실험을 진행하여야 한다고 하였지만, 차량제작업체인 현대로템과의 협의에서는 다양한 실험이 불가능하기 때문에 시험 운행 중인 차세대전동차 등과 같은 시험 차량에서 수행하는 것이 연구에 도움이 될 것으로 판단함.
○ 모든 의견을 반영하여 3차년도는 시험 운행 중인 차량 및 실제 운행되는 차량에 대해서도 연구를 수행함. (인증은 실체 차량인 ITX-청춘선에서 진행함.)
○ 또한 본 기술은 미래 기술로써, 다양한 응용분야에 적용가능 할 것으로 판단함.

나. 철도시설공단과의 협의 및 실용화 방안 모색



그림 137. 철도시설공단과의 협의

○ 평가위원의 의견에 따라 한국철도시설공단과의 협의를 진행함.
(KR연구원/기술연구처 김도원 소장, 박종원 부장, 임남희 차장)

○ 새로운 원천기술로써 많은 응용분야에 적용할 수 있을 것이라는 의견과 함께 추후 발전량 향상에 관한 연구가 추가적으로 시행된다면 파급효과는 매우 클 것으로 판단하였음.

○ 철도차량에 적용하기 위한 압전 발전 하베스팅의 실용화에 관해서는 비상용 등과 같은 철도에 사용되는 저전력 응용분야를 제시하여주셨으며, 이러한 제품들이 철도에 적용될 경우 사고방지 및 안전성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대하였음.

○ 또한, 본 기술 개발을 통해 0.71 mW/cm^3 (단결정: 1.15 mW/cm^3)의 전력 수확이 가능하기 때문에 여러 개의 압전 소자를 하나의 모듈로 제작하여 다양한 센서에도 적용할 경우 편의성 및 안전성이 향상될 것으로 판단하였음.

센서명	센서이름	소비전력	작동 (V),(I)
온도/습도센서	TC77-3.3MOA	1.4 mW	5.5 V, 0.25 mA
	TCN75-5.0MOA	1.4 mW	5.5 V, 0.25 mA
	HT-01DV		5.5 V
가속도/자이로 센서	MMA7260QT	1.8 mW	3.6 V, 0.5 mA
	MMA6280QT	1.8 mW	3.6 V, 0.5 mA
	ADXL202JQC	2.6 mW	5.25 V, 0.5 mA
기울기센서	초소형 (S1)	5 mW	5 V, 1 mA
	SW-392	12 mW	12 V, 1 mA
알코올 센서	MQ-303	10 mW	3 V
MOTION 센서	인체감지센서모듈 NT0072	15 mW	15 V, 1 mA
연기/불꽃 센서	UVTRON(R2868)	35 mW	350 V, 0.1 mA
전류센서	WCS2702	36 mW	12 V, 3 mA
터치센서	ADM1101	55 mW	5.5 V, 10 mA
가스센서	iAQ-engine	225 mW	5.0 V, 45 mA

그림 138. 센서별 소비 전력

2. 정량적 및 정성적 성과 증빙자료

가. 최종년도 성과 점검 기준표

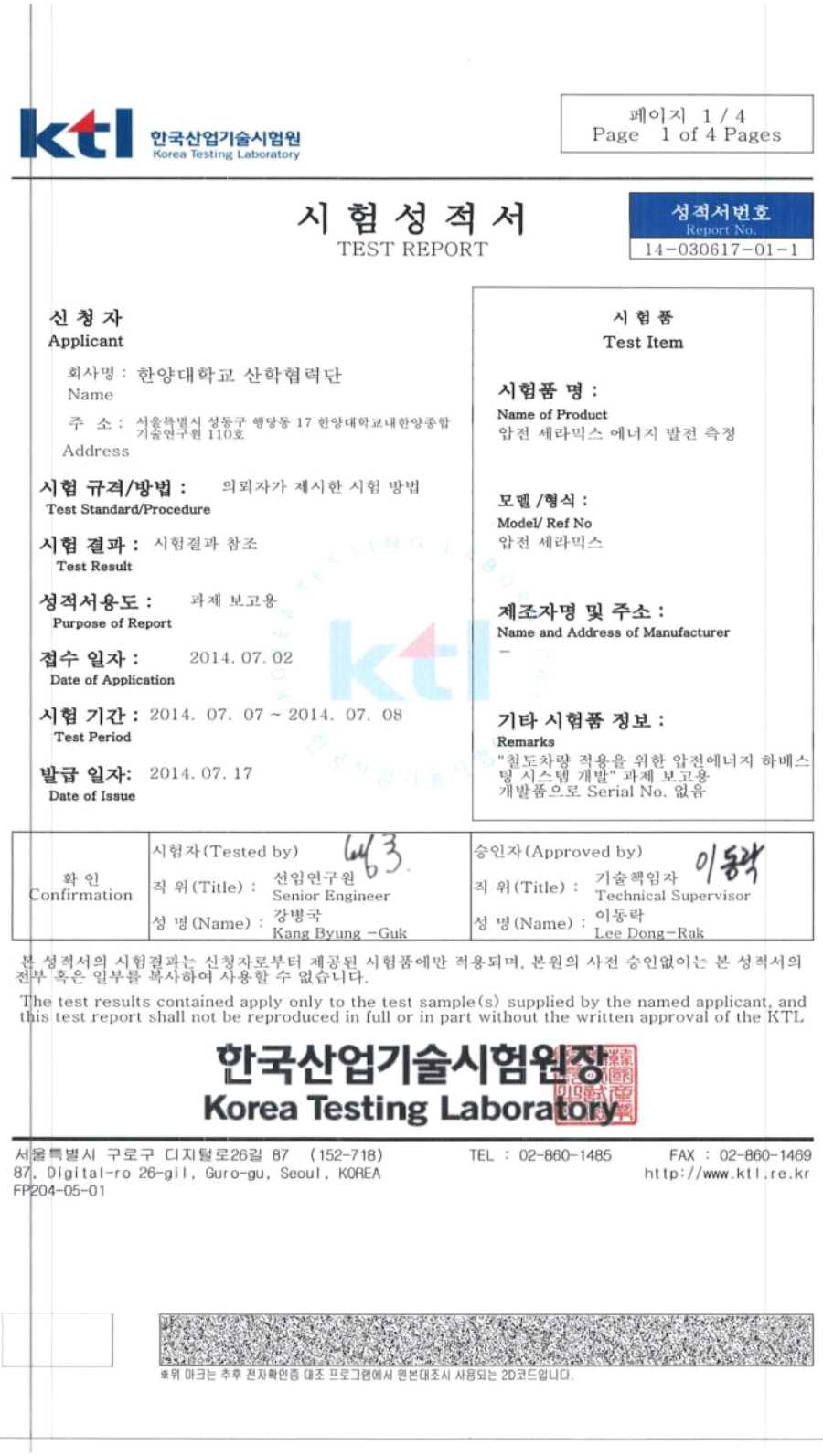
3차년도 성과점검기준표

	과제명	성과목표		성과지표		성과검증 기준				가중치 (총 20점)	달성평점 (1~5)
						목표수준		측정방법	검증 방법		
						목표치	달성치				
성과 질적 목표 점검	철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발	1-1	철도 차량 적용운전 평가 (0.1 mW/cm^3)	②	10초간 평균 최대 발전량	0.15 mW	1.1496 mW	고정밀 전력계 측정	측정 데이터	10	
		2-2	시스템 보완 및 개선	②	시스템 성능 향상율	10% 향상	747% (※ 1,211%)	실험 데이터 비교	발표	2	
	고성능 에너지 하베스팅용 압전 조성 개발	3-1	고성능 압전 재료 개발	①	$d_{33} \times g_{33}$	15K	20K	IEEE resonance 법	발표	1	
				②	k_p	0.6	0.6	IEEE resonance 법	발표	1	
				③	Q_m	1000	1020	IEEE resonance 법	발표	2	
		3-2	고 내구성 압전 재료 개발	①	Fatigue cycle	100000	120000	-	발표	2	
				②	소결 온도	900°C	900°C	IEEE resonance 법	발표	1	
				③	young`s modulous	80GPa	81GPa (※ 57GPa)	IEEE resonance 법	발표	1	
	질적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성평점 ×가중치)									20	0
	환산점수										1.0

		목표	목표건수	달성건수	증빙	인정건수	달성율	가중치 (총 100점)	달성평점
양적 지표 점검	사업연계지표	특허출원/등록	4	5	출원번호	5	125%	30	37.5
		시작품제작	1	4	사진 및 동영상	4	400%	40	160
		SCI논문	2	12	게재	12	600%	30	180
	양적목표 종합점수 = ∑ (성과목표별 달성율 ×가중치)							100	377.5
	환산점수								5.0

그림 139. 3차년도 성과점검기준표

나. 최종년도 증빙자료 - 0.15 mW/cm^3 발전량



ktl 한국산업기술시험원 Korea Testing Laboratory

페이지 1 / 4
Page 1 of 4 Pages

시 험 성 적 서
TEST REPORT

성적서번호 Report No. 14-030617-01-1

신 청 자 Applicant

회사명 : 한양대학교 산학협력단
Name

주 소 : 서울특별시 성동구 행당동 17 한양대학교내한양종합기술연구원 110호
Address

시험 규격/방법 : 의뢰자가 제시한 시험 방법
Test Standard/Procedure

시험 결과 : 시험결과 참조
Test Result

성적서용도 : 과제 보고용
Purpose of Report

접수 일자 : 2014. 07. 02
Date of Application

시험 기간 : 2014. 07. 07 ~ 2014. 07. 08
Test Period

발급 일자: 2014. 07. 17
Date of Issue

시 험 품 Test Item

시험품 명 :
Name of Product
압전 세라믹스 에너지 발전 측정

모델 /형식 :
Model/ Ref No
압전 세라믹스

제조자명 및 주소 :
Name and Address of Manufacturer
-

기타 시험품 정보 :
Remarks
"철도차량 적용을 위한 압전에너지 하베스팅 시스템 개발" 과제 보고용
개발품으로 Serial No. 없음

확 인 Confirmation	시험자(Tested by)	승인자(Approved by)
	직 위(Title) : 선임연구원 Senior Engineer	직 위(Title) : 기술책임자 Technical Supervisor
	성 명(Name) : 강병국 Kang Byung-Guk	성 명(Name) : 이동락 Lee Dong-Rak

본 성적서의 시험결과는 신청자로부터 제공된 시험품에만 적용되며, 본원의 사전 승인없이는 본 성적서의 전부 혹은 일부를 복사하여 사용할 수 없습니다.

The test results contained apply only to the test sample(s) supplied by the named applicant, and this test report shall not be reproduced in full or in part without the written approval of the KTL

한국산업기술시험원장
Korea Testing Laboratory

서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (152-718) TEL : 02-860-1485 FAX : 02-860-1469
87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA http://www.ktl.re.kr
FP204-05-01

※위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

그림 140. KTL(한국산업기술시험원) 시험성적서 (1/4)

1. 시험 개요

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 압전 세라믹스(Piezoelectric ceramics)에 대하여 "철도차량 적용을 위한 압전 에너지 하베스팅 시스템 개발" 과제 보고 목적으로 의뢰자가 제시한 방법으로 시험함

2. 대상 시험품의 정격

과제개발품으로 정격 없음

3. 시험 기준

의뢰자가 제시한 시험 기준

4. 시험 방법

- ITX 제2019호 가평-남춘천 구간에서 열차 바닥에 압전 세라믹스 발전장치를 설치하고 1회 10초간, 연속 10회 발전된 전력을 측정함.
- 부하 저항 400 kΩ

5. 측정장비

장비명	모델명	제조사	교정일자
POWER ANALYZER	WT500	YOKOGAWA	2014. 03. 24

※위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

그림 141. KTL(한국산업기술시험원) 시험성적서 (2/4)

6. 시험 결과

1) 압전 세라믹스 사이즈

가로 (cm)	세로 (cm)	두께 (cm)	cm^3
0.75	1.50	0.03	0.033 75

2) 발전 출력의 전체 평균 및 구간 최대값

구간	기 준 (mW / cm^3)	전체 평균 환산 출력 (mW / cm^3)	구간 최대 환산 출력 (mW / cm^3)
가평-남춘천	**0.15 이상**	**0.757 2**	**1.149 6**

3) 각 구간 평균 출력

측정 No.	평균 출력 (mW)	평균 환산 출력 (mW / cm^3)	비고
1	0.029 9	0.885 3	
2	0.038 8	1.149 6	
3	0.027 8	0.824 1	
4	0.022 2	0.659 0	
5	0.032 0	0.947 4	
6	0.019 1	0.565 8	
7	0.032 5	0.962 0	
8	0.017 3	0.513 2	
9	0.019 1	0.566 1	
10	0.016 9	0.499 3	

※ 1회 10초간, 10회 연속 측정 데이터임
※ 환산 출력 = 출력 (mW) / 압전 세라믹스 사이즈 (cm^3)

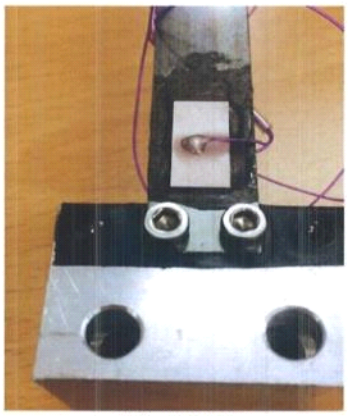
※위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

그림 142. KTL(한국산업기술시험원) 시험성적서 (3/4)

7. 사진



압전 세라믹스 발전 장치



압전 세라믹스

위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

그림 143. KTL(한국산업기술시험원) 시험성적서 (4/4)

다. 최종년도 증빙자료 - 압전 세라믹 조성 개발

시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원	성적서번호 : 2014-2553
우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	페이지 (1)/(총 1)

1. 의 뢰 자
   - ○ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ○ 주 소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ○ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 06일
2. 시험성적서의 용도 : 과제인증용
3. 시험 시료명/물질 : PZT-PZNN
4. 시험기간 : 2014년 08월 06일 ~ 2014년 08월 11일
5. 시험방법 : 기기분석
6. 시험환경
   - ○ 온도 : (24 ± 1)℃ , 습도 : (35 ± 1)% R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목		시험분석결과	시험분석방법	비고
PZT-PZNN	d33*g33상수 (㎡/N)	1	$17\,632 \times 10^{-15}$	기기분석	
		2	$16\,827 \times 10^{-15}$		
		3	$17\,567 \times 10^{-15}$		
		4	$17\,723 \times 10^{-15}$		
		5	$16\,985 \times 10^{-15}$		
	기계손실상수 (Qm)	1	1 098		
		2	1 197		
		3	1 012		
		4	1 120		
		5	1 090		
	기계전기결합상수 (Kp) (%)	1	0.601		
		2	0.604		
		3	0.602		
		4	0.601		
		5	0.604		

참고) 상기 측정에서 d33*g33은 Piezotest d33, radiant technologies/HP 4194A technologies, Kp와 Qm은 HP 4194A Agilent technologies를 이용하여 측정한 결과임.

확 인	시험자 : 이 미 재 (2442)	기술책임자 : 최 철 호

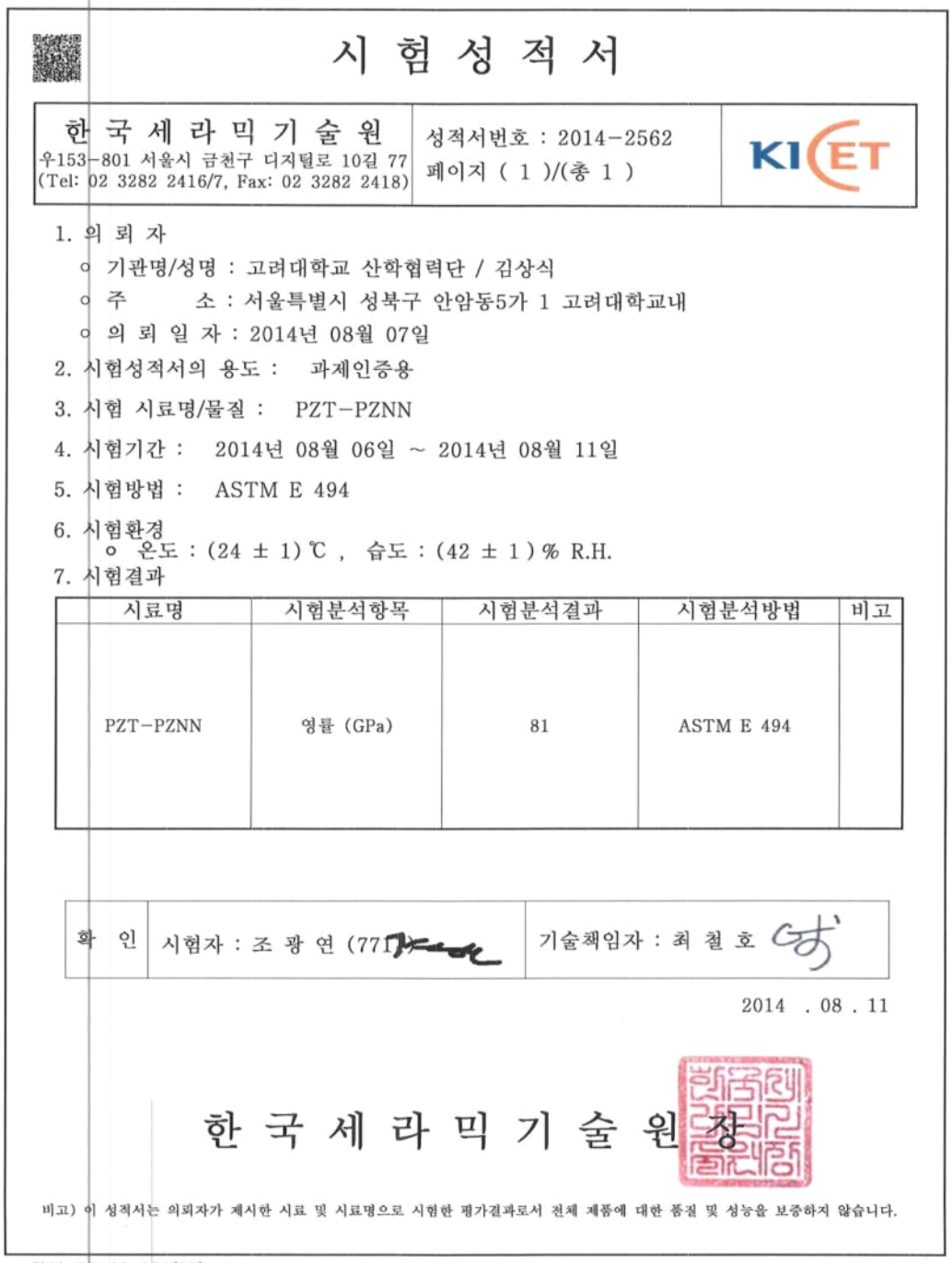
2014 . 08 . 11

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(3)

그림 144. KECET(한국세라믹기술원) 시험성적서 (1/3)



시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원 우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	성적서번호 : 2014-2562 페이지 (1)/(총 1)	KICET

1. 의 뢰 자
   - ㅇ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ㅇ 주 소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ㅇ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 07일
2. 시험성적서의 용도 : 과제인증용
3. 시험 시료명/물질 : PZT-PZNN
4. 시험기간 : 2014년 08월 06일 ~ 2014년 08월 11일
5. 시험방법 : ASTM E 494
6. 시험환경
   - ㅇ 온도 : (24 ± 1) ℃ , 습도 : (42 ± 1) % R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
PZT-PZNN	영률 (GPa)	81	ASTM E 494	

확 인	시험자 : 조 광 연 (77	기술책임자 : 최 철 호

2014 . 08 . 11

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

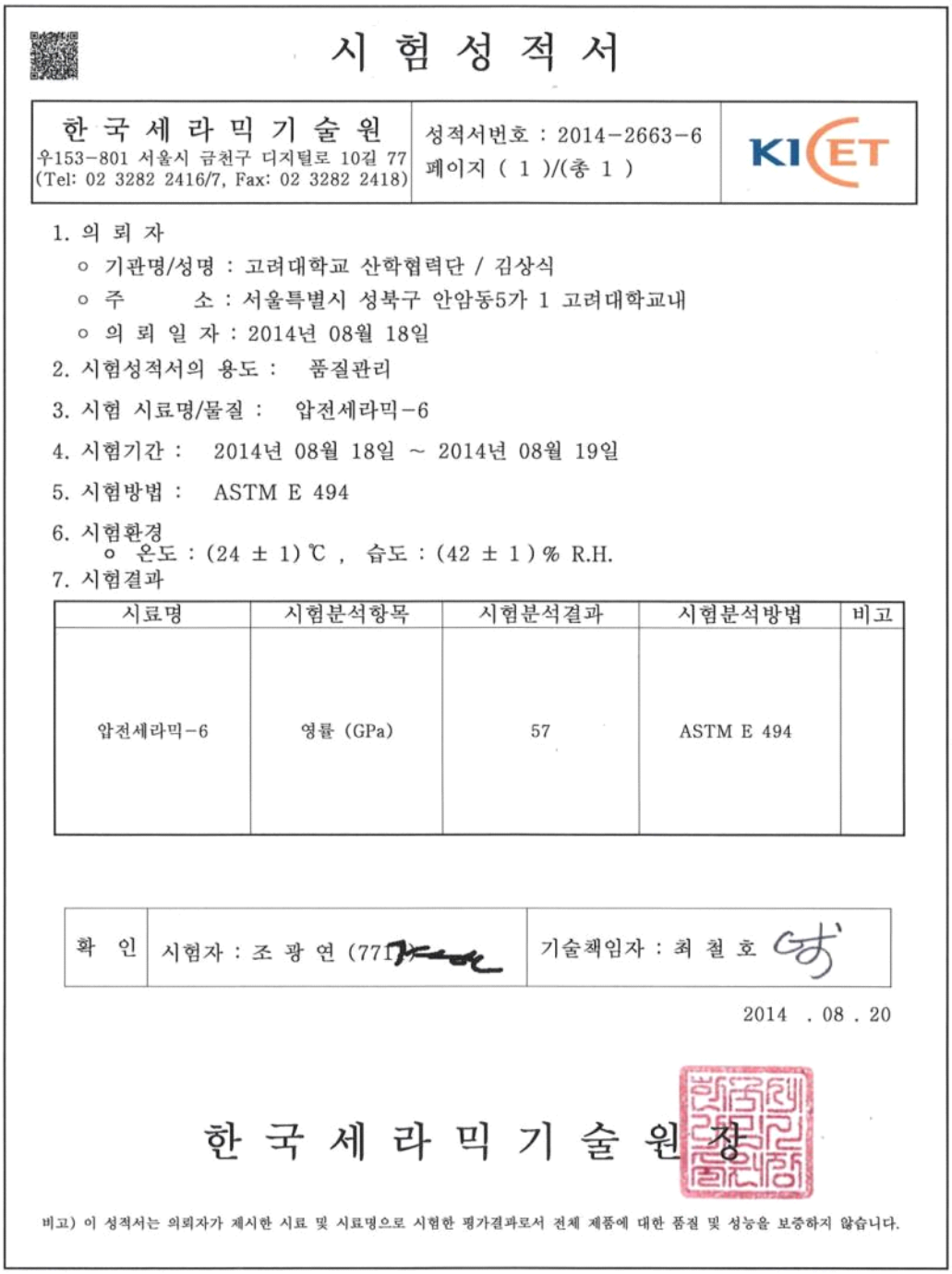
비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(03)

그림 145. KECET(한국세라믹기술원) 시험성적서 (2/3)

○ 2번의 영률(GPa)를 측정하였으며, 최종 과제 달성 조건인 900℃ 조건에서 12시간 소결하였을 경우 81 GPa를 달성하였음.

○ 12시간 소결하였을 경우 최종결과 대비 99%의 결과를 달성하였으며, 1%는 소결 조건에 따른 error range라고 할 수 있음.



시 험 성 적 서

한 국 세 라 믹 기 술 원 우153-801 서울시 금천구 디지털로 10길 77 (Tel: 02 3282 2416/7, Fax: 02 3282 2418)	성적서번호 : 2014-2663-6 페이지 (1)/(총 1)	KICET

1. 의 뢰 자
   - ㅇ 기관명/성명 : 고려대학교 산학협력단 / 김상식
   - ㅇ 주 소 : 서울특별시 성북구 안암동5가 1 고려대학교내
   - ㅇ 의 뢰 일 자 : 2014년 08월 18일
2. 시험성적서의 용도 : 품질관리
3. 시험 시료명/물질 : 압전세라믹-6
4. 시험기간 : 2014년 08월 18일 ~ 2014년 08월 19일
5. 시험방법 : ASTM E 494
6. 시험환경
   ㅇ 온도 : (24 ± 1) ℃ , 습도 : (42 ± 1) % R.H.
7. 시험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
압전세라믹-6	영률 (GPa)	57	ASTM E 494	

확 인	시험자 : 조 광 연 (77	기술책임자 : 최 철 호

2014 . 08 . 20

한 국 세 라 믹 기 술 원 장

비고) 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 평가결과로서 전체 제품에 대한 품질 및 성능을 보증하지 않습니다.

양식-PB-03-02A(03)

그림 146. KECET(한국세라믹기술원) 시험성적서 (3/3)

○ 최종 과제 달성 조건인 900℃ 조건에서 2시간 소결하였을 경우 57 GPa를 달성하였음.
○ 최종결과인 80 GPa 이하를 만족 시키는 결과임.

라. 최종년도 증빙자료 - 특허출원/등록 (목표 4건, 달성 5건)

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.07.04
특기사항	심사청구(무) 공개신청(무)
출원번호	10-2014-0083643 (접수번호 1-1-2014-0632000-88)
출원인 명칭	한양대학교 산학협력단(2-2004-011427-6)
대리인 성명	특허법인무한(9-2007-100061-4)
발명자 성명	성태현 조재용 김선중 황성주 홍성광 양찬호 정현준 송준후 김정훈
발명의 명칭	진자형 압전 에너지 하베스터

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 147. 출원된 특허 증빙자료(1/5)

관인생략

출원번호통지서

출 원 일 자	2014.07.04
특 기 사 항	심사청구(무) 공개신청(무)
출 원 번 호	10-2014-0083641 (접수번호 1-1-2014-0631998-38)
출원인 명칭	한양대학교 산학협력단(2-2004-011427-6)
대리인 성명	특허법인무한(9-2007-100061-4)
발명자 성명	성태현 황성주 김선중 양찬호 홍성광 김정훈 송준후 정현준 안정환
발명의 명칭	진동 에너지를 활용한 압전 하베스팅 모듈

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
 ※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
 ※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
 ※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
 ※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
 ※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
 ※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 148. 출원된 특허 증빙자료(2/5)

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.07.04
특기사항	심사청구(무) 공개신청(무)
출원번호	10-2014-0083642 (접수번호 1-1-2014-0631999-84)
출원인 명칭	한양대학교 산학협력단(2-2004-011427-6)
대리인 성명	특허법인무한(9-2007-100061-4)
발명자 성명	성태현 양찬호 김선중 황성주 홍성광 김정훈 송준후 정현준 우민식
발명의 명칭	철도 진동 및 승하차시 문의 동력을 이용한 압전 에너지 하베스팅 시스템

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [견자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 149. 출원된 특허 증빙자료(3/5)

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.05.20
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호	10-2014-0060317 (접수번호 1-1-2014-0472376-19)
출원인명칭	한양대학교 산학협력단(2-2004-011427-6)
대리인성명	특허법인무한(9-2007-100061-4)
발명자성명	성태현 김선중 황성주
발명의명칭	페이지 전환 장치

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)]를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 150. 출원된 특허 증빙자료(4/5)

관인생략

출원번호통지서

출원일자	2014.07.25
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(5304)
출원번호	10-2014-0094487 (접수번호 1-1-2014-0701317-42)
출원인 명칭	고려대학교 산학협력단(2-2004-017068-0)
대리인 성명	특허법인 충현(9-2010-100021-9)
발명자 성명	남산 허준 김종현
발명의 명칭	압전 에너지 하베스팅용 세라믹 조성물, 이의 제조방법 및 이를 이용한 압전 에너지 하베스터

특 허 청 장

<< 안내 >>

1. 귀하의 출원은 위와 같이 정상적으로 접수되었으며, 이후의 심사 진행상황은 출원번호를 통해 확인하실 수 있습니다.

2. 출원에 따른 수수료는 접수일로부터 다음날까지 동봉된 납입영수증에 성명, 납부자번호 등을 기재하여 가까운 우체국 또는 은행에 납부하여야 합니다.
※ 납부자번호 : 0131(기관코드) + 접수번호

3. 귀하의 주소, 연락처 등의 변경사항이 있을 경우, 즉시 [출원인코드 정보변경(경정), 정정신고서]를 제출하여야 출원 이후의 각종 통지서를 정상적으로 받을 수 있습니다.
※ 특허로(patent.go.kr) 접속 > 민원서식다운로드 > 특허법 시행규칙 별지 제5호 서식

4. 특허(실용신안등록)출원은 명세서 또는 도면의 보정이 필요한 경우, 등록결정 이전 또는 의견서 제출기간 이내에 출원서에 최초로 첨부된 명세서 또는 도면에 기재된 사항의 범위 안에서 보정할 수 있습니다.

5. 외국으로 출원하고자 하는 경우 PCT 제도(특허·실용신안)나 마드리드 제도(상표)를 이용할 수 있습니다. 국내출원일을 외국에서 인정받고자 하는 경우에는 국내출원일로부터 일정한 기간 내에 외국에 출원하여야 우선권을 인정받을 수 있습니다.
※ 제도 안내 : http://www.kipo.go.kr-특허마당-PCT/마드리드
※ 우선권 인정기간 : 특허·실용신안은 12개월, 상표·디자인은 6개월 이내
※ 미국특허상표청의 선출원을 기초로 우리나라에 우선권주장출원 시, 선출원이 미공개상태이면, 우선일로부터 16개월 이내에 미국특허상표청에 [전자적교환허가서(PTO/SB/39)를 제출하거나 우리나라에 우선권 증명서류를 제출하여야 합니다.

6. 본 출원사실을 외부에 표시하고자 하는 경우에는 아래와 같이 하여야 하며, 이를 위반할 경우 관련법령에 따라 처벌을 받을 수 있습니다.
※ 특허출원 10-2010-0000000, 상표등록출원 40-2010-0000000

7. 기타 심사 절차에 관한 사항은 동봉된 안내서를 참조하시기 바랍니다.

그림 151. 출원된 특허 증빙자료(5/5)

Ferroelectrics, 449:11–23, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822759

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Study on Application of Piezoelectricity to Korea Train eXpress (KTX)

DANIEL SONG, CHAN HO YANG, SEONG KWANG HONG, SE BIN KIM, MIN SIK WOO, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Downloaded by [Hanyang University] at 18:06 23 September 2013

In this study, we have investigated application of piezoelectricity to actual commercially operating high-speed Korean train. We recorded and analyzed the vibrations of commercial Korea Train eXpress (KTX). We experimented with different cantilever beam thicknesses (0.25 mm, 0.6 mm, and 1.0 mm) and different piezoelectric material dimensions (length × width × thickness, 10.0 mm × 10.0 mm × 0.5 mm, 20.0 mm × 10.0 mm × 0.5 mm, and 30.0 mm × 10.0 mm × 0.5 mm) on real data from recorded random frequencies and train vibration amplitudes. The addition of tip masses on the cantilever beam decreased the resonance frequency range when the vibrations were constant but not when they were random. The optimal condition was experimentally found, to involve decreasing the piezoelectric substrate beam thickness and increasing the piezoelectric substrate beam area rather than merely increasing the tip mass. The most effective method to improve the operational sensitivity was combination of decreasing the resonance frequency by adding tip masses, decreasing beam thicknesses, and increasing beam areas.

Keywords Piezoelectricity; vibration; train

1. Introduction

High-speed trains are defined as those operating at speeds greater than 250 km/h [1]. South Korea is the fifth country to operate high-speed trains in 2004, after France, Japan, Germany, and Spain [2]. On April 1st, 2004, the Korea Train eXpress (KTX) was launc-hed for commercial operations by the Korea Railroads Corporation (KORAIL) [3]. The KTX train operates at more than 300 km/h, and hence, vibrations occur on the KTX passenger body from sources such as railroad structures, tunnels, and other conditions [4]. The energy in these mechanical vibrations, which is otherwise wasted, can be effectively converted into useful electrical energy by piezoelectric materials. Many studies have been conducted to develop efficient piezoelectricity-based methods to obtain electrical energy by converting ambient vibrations [5–9].

Theoretically, a piezoelectric material generates maximum output power when the vibrations of the total mechanical system including the attached cantilever beam are at their resonance frequency range. However, the frequency range and amplitude of the ambient

Received September 26, 2012; in final form April 2, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 152. SCI 논문 증빙자료 (1/12)

Ferroelectrics, 449:24–32, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822763

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Design of Piezoelectric Energy Harvesting System by Magnetic Force–Controlled Resonance Frequency

CHAN HO YANG, DANIEL SONG, MIN SIK WOO, SEONG KWANG HONG, KI HWAN BAEK, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

We designed a piezoelectric energy harvesting system that can be controlled the resonance frequency to the frequency of external energy. A permanent magnet (10 mm × 10 mm × 5 mm) was affixed to the free end of cantilever, and a permanent magnet was affixed to each of the four faces of a rotor at 90° angles. The effect of the dimension of the permanent magnets (20 mm × 20 mm × 10 mm, 30 mm × 20 mm × 10 mm, and 40 mm × 20 mm × 10 mm) and the effect of the pole array (NNNN, SSSS, NSNS, and NNSS) were experimentally tested. The optimum conditions were selected by testing varied distances between the magnets at varied rpm. The experiments demonstrated that the maximum output voltage was generated for the largest magnet and the minimum distance. The most effective way to control the resonance frequency was to modify the pole arrays of magnets affixed to the rotor. Furthermore, the optimum conditions were determined at each distance by changing the pole array and rpm. Simulation software supports the experimental results.

Keywords Piezoelectric energy harvesting; magnetic force; resonance frequency

Downloaded by [Hanyang University] at 18:10 23 September 2013

1. Introduction

Recently piezoelectric energy harvesting [1, 2] has appealed to many researchers owing to the potentiality of converting a variety of energy such as vibration [3, 4], raindrops [5], flowing water [6, 7], human-powered [8, 9], and wind [10] to electrical energy.

The fundamental governing equations [11] of piezoelectricity are as follows:

$$S = s^{E}T + dE \tag{1a}$$

$$D = dT + \varepsilon^{T}E \tag{1b}$$

where S and T are the mechanical strain and stress, respectively; E and D are the electric field and displacement, respectively; d is the piezoelectric strain constant; s and ε are elastic compliance and the piezoelectric material's permittivity constant, respectively.

In this paper, we generated electrical energy using the interaction between a permanent magnet affixed to the free end of cantilever and an external permanent magnet, which produces vibration [12, 13]. Equation (1b)indicates that when a larger stress is applied to the piezoelectric material, a larger electric displacement is caused. Approximately, the

Received September 28, 2012; in final form April 8, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 153. SCI 논문 증빙자료 (2/12)

Ferroelectrics, 449:52–61, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822769

Downloaded by [Hanyang University Seoul Campus] at 06:14 27 August 2014

Restoration and Reinforcement Method for Damaged Piezoelectric Materials

SEONG KWANG HONG, MIN SIK WOO, DANIEL SONG, CHAN HO YANG, KI HWAN BAEK, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

This study investigated the effects of strain and crack formation on the performance of damaged piezoelectric materials as well as methods to restore damaged electrodes and reinforce the piezoelectric material. Specifically, this study investigated whether Ag paste (thickness: 0.1 mm) could restore electrical contact in damaged electrodes, and whether a coating of UV curable resin could provide reinforcement against crack formation. Experiments were conducted with a piezoelectric material on a steel cantilever substrate. The substrate was subjected to impact at various distances from the free end of the piezoelectric material to vary the applied strain. It was found that the output voltage increased with the strain (distance of impact from free end) until crack formation, which led to a large decrease in output. However, Ag paste could successfully restore electrical contact. Furthermore, before crack formation, coating with UV curable resin increased the maximum strain, and therefore, maximum electrical output, as well as cycle life.

Keywords Piezoelectric energy harvesting; crack; damaged; reinforcement; repair; strain control; restoration

1. Introduction

Piezoelectric materials generate mechanical stress when subjected to an electric potential and generate an electric potential when subjected to mechanical stress. Therefore, they are used widely in applications such as sensors, actuators and energy harvesters [1–6]. The piezoelectric charge constant d and voltage constant g are important to piezoelectric material characteristics affecting the efficiency of piezoelectric energy harvesting from mechanical stress [7]. Materials of large $d_{33} \times g_{33}$ values have a small dielectric loss [8–9].

The linear constitutive equations for piezoelectric effect are given by Eq. (1∼2).

$$S = s^E T + dE \tag{1}$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \tag{2}$$

Where, S and T is the strain and stress of mechanical, E is the electric field strength, D is the electric displacement, s is the compliance tensor, and ε is the dielectric permittivity. These two equations represents that electric displacement is proportional to the applied stress and that strain is proportional to applied stress, respectively. Because the produced voltage is proportional to the electric displacement, the strain of mechanical is proportional to the

Received September 28, 2012; in final form April 2, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 154. SCI 논문 증빙자료 (3/12)

Ferroelectrics, 449:72–82, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822772

Downloaded by [Hanyang University Seoul Campus] at 06:15 27 August 2014

Stress Distribution Design of Additional Substrate for Piezoelectricity

JEONG HUN KIM, SINICHI HIDAKA, DANIEL SONG, KI HWAN BAEK, SE BIN KIM, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

This study was conducted to analyze a relationship between deformation degree curvature and output voltage of piezoelectric system, as well as to interpret the calculated and experimented data. Basically, the experiment was conducted by using tip masses of 10, 20, and 30 g to two different thicknesses of piezoelectric materials (0.15 mm and 0.2 mm). With this approach, the result showed that the lowest average 1_x value had the highest voltage, 26.12 V m/s^2 when the vibration acceleration was 4 m/s^2. On the other hand, the lowest standard deviation of curvature ratio, ρ, had highest voltage, 58.98 V when the vibration acceleration was of 40 m/s^2. Overall, this study demonstrates that the deformation degree and curvature ratio are related and proves they can be controlled.

Keywords Vibration; stress distribution; curvature ratio; additional substrate

1. Introduction

Generally, the piezoelectric effect can be used for converting mechanical energy to electrical energy. Therefore, it is a useful application for energy harvesting in MEMS devices and actuators [1–7]. However, there is a problem that the frictional characteristics of ceramic piezoelectric materials could lead to cracking, breakdown under high impact, and large deformation. The vibration type piezoelectric energy harvesting system has been improved against damage formation in the piezoelectric material, and experiments were held for effectively transferring power to improve output voltage generation. Unfortunately, such influential factors affect the performance, since the output voltage of a piezoelectric module is proportional to the degree of deformation of the piezoelectric material [8, 9]. However, the constant of proportionality is changed depending on the module design [10]. A piezoelectric module could be affected by longitudinal (d_{33}) or transversal (d_{31}) strain. Here, we consider a module affected by transversal strain so that the d_{31} coefficient would be applicable. The original plate and types of other additional substrates' shapes were attached to the cantilever beam types in piezoelectric energy harvesting system. Therefore, describing the relationship between the output voltage and additional substrate design for optimizing the plates in order to distribute stress evenly across the piezoelectric energy harvesting are the focus of this study.

Received September 30, 2012; in final form April 12, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 155. SCI 논문 증빙자료 (4/12)

Ferroelectrics, 449:83–93, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822773

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Design of a New Piezoelectric Energy Harvester Based on Secondary Impact

HYUN JUN JUNG, KI HWAN BAEK, SINICHI HIDAKA, DANIEL SONG, SE BIN KIM, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Downloaded by [Hanyang University Seoul Campus] at 06:15 27 August 2014

Two models for an energy harvester imparting rotational energy to piezoelectric materials are presented, in order to compare the effects of applying identical amounts of energy to a cantilever beam by changing the total displacement per unit time, and applying a secondary impact. For a piezoelectric energy harvester given a high total impulse per unit time with low total displacement per unit time, higher power outputs were generated at lower resistive loads. Conversely, for a harvester given high total displacement per unit time with low total impulse per unit time, power output was higher at high resistive loads. At matched impedance, the secondary-impact-type piezoelectric energy harvester generated higher power output than the hitting-type piezoelectric energy harvester did at low resistive load. Optimized response of secondary-impact-type piezoelectric energy harvester was obtained at a frequency of 60 Hz with a low resistive load of 1 kΩ. The generated output power was measured as 124 mW, which corresponds to power density of 140 mW/cm^3 for the entire cantilever beam, and a power density of 342 mW/cm^3 for only the piezoelectric material volume (including sliver paste volume). For a harvester without a secondary impulse at low resistive loads (1 kΩ), the optimizing frequency was between 20 and 30 Hz, with an output power of 22 mW, which corresponds to a 25 mW/cm^3 power density for entire cantilever beam and power density of 60 mW/cm^3 for only the piezoelectric material volume(including sliver paste volume).

Keywords energy harvesting; piezoelectric; secondary; impact

1. Introduction

Energy harvesting has been actively studied, using piezoelectric conversion from mechanical energy to electrical energy. [1–2]. Several studies in particular have assessed shock and impact type piezoelectric energy harvesters [3–6].

The objective of the study described here was to compare differences in the application of total displacement per unit time and total impulse per unit time to a cantilever beam in the condition where the external energy remains the same. In this paper, two optimized energy harvesting models imparting rotational energy to piezoelectric materials are presented. In the first model (the "hitting type piezoelectric energy harvester"), a cantilever beam made of a piezoelectric material is struck repeatedly using a motor-driven stick and then a cantilever beam was vibrating freely. The second model (the "secondary impact type piezoelectric energy harvester") involves applying a secondary, discrete impulse using a fixed stick to stop vibration in the beam at the point where it has returned to its initial position (i.e., at

Received September 26, 2012; in final form April 2, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 156. SCI 논문 증빙자료 (5/12)

Ferroelectrics, 449:33–41, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822765

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

Study on the Strain Effect of a Piezoelectric Energy Harvesting Module

MIN SIK WOO, SEONG KWANG HONG, HYUN JUN JUNG, CHAN HO YANG, DANIEL SONG, AND TAE HYUN SUNG*

Department of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Downloaded by [Hanyang University Seoul Campus] at 06:16 27 August 2014

In order to investigate the relationships among strain, frequency, and output power, a novel piezoelectric energy harvesting module with controllable strain was designed. Conventional vibration module can control over strain through variation in tip mass, but it is also affected by vibration frequency. In the contrast, the designed controllable strain module allows more accurate strain control at various frequencies through adjustment of the displacement of the free end of the cantilever from 5 mm to 45 mm. Experimental results proved that both types of modules exhibit an increase in open circuit output voltage with strain. But output voltage was decreased when the piezoelectric ceramic broke at severe strain. In addition, it was confirmed that the proposed module design can keep the strain constant, which allows investigation into the relationship between frequency and output power. At constant strain, the matching impedance was found to be low at high frequency. Thus, as effect of strain to the piezoelectric energy harvesting module, the optimum conditions for harvesting maximum power are found to be high frequency and the largest strain do not degrade the piezoelectric plate.

Keywords Piezoelectric energy harvesting; strain effect; PZT

1. Introduction

Experts in a variety of area have interested in the investigation for new and more reusable sources of energy. One specific part of investigation is harvesting of unused energy from sources. Actually, there are various ranges of wasted-energy sources such as water flow, human movement, vibrations, wind, and ocean waves. A piezoelectric energy harvesting system can recover this unused energy effectively [1–5].

Most researches heretofore on piezoelectric energy harvesting have focused on the vibration module that a cantilever structure of a piezoelectric module, vibrating at its resonant frequency to harvest energy [6–10]. In previous study, distinctly, the greater is the strain applied to the piezoelectric material, the larger are the output voltage and electric power obtained [12, 13]. However, because of the limitations of the conventional vibration module design, the influences of frequency on the electric power at constant strain are not yet well comprehended.

In this study, we propose a novel module in order to control over the strain in the piezoelectric ceramic through adjustment of the displacement of the cantilever free end. With this proposed controllable strain module, we have studied the effects of strain on output

Received September 26, 2012; in final form April 2, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 157. SCI 논문 증빙자료 (6/12)

Ferroelectrics, 449:42–51, 2013
Copyright © Taylor & Francis Group, LLC
ISSN: 0015-0193 print / 1563-5112 online
DOI: 10.1080/00150193.2013.822767

Downloaded by [Hanyang University Seoul Campus] at 06:17 27 August 2014

Study of Charging Efficiency of a Piezoelectric Energy Harvesting System Using Rectifier and Array Configuration

KI HWAN BAEK, SEONG KWANG HONG, SE BIN KIM, JEONG HUN KIM, AND TAE HYUN SUNG*

Departments of Electric Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

This paper suggests the design in rectifier and array configuration for an impact-based piezoelectric energy harvesting (PEH) system, to investigate the charging efficiency. In the design of the rectifier, it is suggested that rectifying the signal from each piezoelectric module separately generates more electrical energy and charges a capacitor faster than using a single rectifier for all modules connected in series. In the structural design, the array was designed into two conditions: impacted simultaneously and impacted sequentially with a phase difference (30°, 60°, 90°, 120°, 150° and 180°). We show that when impacted sequentially with a phase difference, this allows faster charging rates of energy harvesting. Additionally, distribution of the torque required to transform the piezoelectric modules was found to be another advantage from this condition. These results could be used in the design of more-efficiently-charging impact-based PEH system.

Keywords Piezoelectric energy harvesting system; multiple piezoelectric array; impact; rectifier; array configuration

1. Introduction

We can harvest electrical energy from mechanical energy through the piezoelectric effect [1]. This phenomenon has received substantial interest, to develop applications such as piezoelectric energy harvesting (PEH) systems from ambient sources, which has the potential to solve future energy problems [2–6]. At present, most studies on PEH are concentrated on using a single module. However, PEH systems will require an innovative increase in the output power, which could be achieved by using an optimized array of numerous piezoelectric modules.

Most studies on PEH systems have focused on 3 main areas: the mechanical design, the rectifier circuits of the energy harvesting system, and the energy storage system. The electrical energy is harvested from mechanical energy caused by impacts or vibrations through the piezoelectric modules [7, 8]. The mechanical energy caused by impacts can generate more power than vibrations, so the impact-type energy harvester was chosen as for this paper. Additionally, circuit is an important factor in determining the efficiency of the entire energy harvesting system. The circuit is comprised of a bridge rectifier and capacitors. An AC voltage generated from the piezoelectric modules must be modified for

Received September 28, 2012; in final form August 4, 2013.
*Corresponding author. E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 158. SCI 논문 증빙자료 (7/12)

Japanese Journal of Applied Physics 52 (2013) 10MB03 **REGULAR PAPER**
http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.10MB03

Effective Piezoelectric Area for Hitting-Type Piezoelectric Energy Harvesting System

Hyun Jun Jung[1], Daniel Song[1], Seong Kwang Hong[1], Yooseob Song[2], and Tae Hyun Sung[1]*

[1]*Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 136-791, Korea*
[2]*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 136-791, Korea*
E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

Received December 7, 2012; accepted July 24, 2013; published online October 21, 2013

The effective piezoelectric material area was determined by comparing data for different lengths of piezoelectric material on a substrate plate for a hitting-type piezoelectric module. Experimental results show that longer piezoelectric material lengths enable higher output power per unit volume. Further, as the piezoelectric material length increases, the maximum output power frequency increases and the matching impedance, or resistive load, decreases. In modeling the piezoelectric modules (cantilever beam), a UV resin coating was used to enhance the output power per unit volume in a hitting-type piezoelectric energy harvesting system. Comparison results of with UV and without UV coating showed that as the piezoelectric material length increases, UV coating has a greater effect on increasing the output power.
© 2013 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

Ambient energy scavenging is a widely studied topic. Current studies in this field are mainly focused on approaches that use piezoelectricity, which allows mechanical energy to be converted into electrical energy.[1–6] The main piezoelectric energy harvesting system uses vibration type by a cantilever.[7–10] A study on the optimization of the effective piezoelectric area from vibration sources showed that decreasing the area of the piezoelectric material from the free end of the cantilever resulted in an optimized piezoelectric area that was two-thirds of the substrate plate.[11] Several studies were conducted in hitting type of piezoelectric energy harvesting system based on impact for applying ambient energy source, for example, wind energy and water flow energy. These previous studies showed that hitting type of piezoelectric energy harvesting system generates much higher output power than vibration type.[12–14] However, the effective piezoelectric area of a hitting-type energy harvesting system (hereafter, hitting system) has not been investigated as yet. Here in, the effective piezoelectric material area was determined by comparing data for different lengths of piezoelectric material on the substrate plate of a hitting-type piezoelectric module. Then, the piezoelectric modules (cantilever beam) were modeled to enhance the output power per unit volume in a hitting system.

2. Experimental Procedure

Figure 1 shows a schematic diagram of the experimental procedure. The maximum motor torque was 1 N m and maximum rotation was 1100 rpm. A Tektronix DPO-3014 oscilloscope and piezoelectric module, custom manufactured by Hi-globe were used in this experiment. Table I summarizes the material properties of the piezoelectric module.

2.1 Effect of output power per unit volume based on area of piezoelectric material in hitting system

Piezoelectric material parts were placed at the fixed end of the system to determine the optimized piezoelectric material area for the vibration system. In a hitting system, the length of the stainless steel substrate plate was fixed and the area of piezoelectric material was varied. In order to investigate the effect of varying the piezoelectric material area on the output power per unit volume, three piezoelectric modules were designed that had the same width and different lengths of 11, 22, and 33 mm, as shown in Fig. 2.

The hitting depth between the hitting stick (motor-driven stick) and the piezoelectric module was set to 2 mm and was



Fig. 1. (Color online) Experimental setup: (a) DC-motor, (b) oscilloscope, (c) DC motor controller, (d) rpm sensor, (e) hitting stick, and (f) piezoelectric module (made by Hi-globe).

Table I. Material properties for piezoelectric modules.

Piezoelectric material	Value
Density (g/cm^3)	7.6
Elastic constants S_{11}^E, S_{11}^D (10^{-12} m^2/N)	13.8, 11.8
Piezoelectric voltage constants g_{33}, g_{31} (10^{-3} V m/N)	22.1, −11.1
Piezoelectric charge constants d_{33}, d_{31} (10^{-12} M/V)	450, −200
Stainless steel (SUS-301)	Value
Density (g/cm^3)	8
Young's modulus (GPa)	200

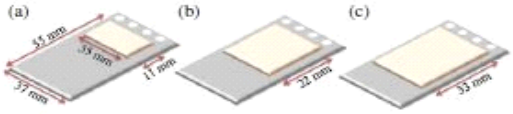


Fig. 2. (Color online) Dimensions of piezoelectric modules. The top of the module is formed of piezoelectric material, and the upper part of the piezoelectric module is stainless steel (SUS-301) (made by Hi-globe).

 © 2013 The Japan Society of Applied Physics

그림 159. SCI 논문 증빙자료 (8/12)

J Electroceram (2014) 32:396–403
DOI 10.1007/s10832-014-9934-0

Optimal design and application of a piezoelectric energy harvesting system using multiple piezoelectric modules

Jae Won Moon · Hyun Jun Jung · Ki Hwan Baek · Daniel Song · Se Bin Kim · Jeong Hun Kim · Tae Hyun Sung

Received: 25 December 2013 / Accepted: 22 May 2014 / Published online: 31 May 2014
© Springer Science+Business Media New York 2014

Abstract To enhance the output power of piezoelectric energy harvesting system up to the watt level, we designed a multi-piezoelectric array (MPA) energy harvesting system that can overcome the limitations of a single-piezoelectric harvesting systems. The MPA energy harvesting system was designed using an impact-type harvester utilizing a hitting stick, as such systems can generate higher output power than vibration-type methods using a cantilever in a single-piezoelectric energy harvesting system. We investigated the effects that various connection and rectification methods had on the output power of a piezoelectric energy harvesting system consisting of four $35\times45\times0.2$ mm^3 piezoelectric modules. We found that the output power was highest when each module was rectified before the modules were connected in parallel and that the optimal load resistance was inversely proportional to the number of modules if they were connected in parallel. To obtain watt-level power from the proposed MPA energy harvesting system, we designed a system consisting of 102 piezoelectric modules based on the derived optimized experimental conditions, from which we were able to obtain an output power of 1.99 W at 1800 hpm (hits per minute) and 500 Ω.

Keywords Piezoelectric · Energy harvesting · Impedance matching · Multi-piezoelectric array

1 Introduction

As wireless sensors and portable electronics are an essential part of ubiquitous environments, demand for their use has recently begun to increase rapidly. Such devices require independent power sources, and although batteries are typically used to serve this purpose, their use has drawbacks that include short lifetimes, periodic replacement costs, and environmental pollution upon disposal. Energy harvesting from vibration, which can be accomplished using a number of technologies that include piezoelectric [1–5], electromagnetic [6, 7], and electrostatic [8, 9] methods, has recently emerged as an alternative means of overcoming battery-related drawbacks.

Although piezoelectric harvesting produces the highest energy density among the methods listed above [10, 11], piezoelectric systems have not received as much attention as other harvesting methods because, until a few years ago, the power scale of piezoelectric systems was only in the microwatt range. Although piezoelectric systems have recently attained the milliwatt scale, this still remains insufficient to serve as an independent power source for electronic devices [12]. One way of overcoming the shortfall of individual devices is to use systems consisting of multiple piezoelectric modules. By optimizing a multiple-module piezoelectric energy harvesting system, or multi-piezoelectric array (MPA), it is possible to generate power at the watt scale. Instead of a vibration-type system, we designed an impact-type MPA energy harvesting system in which the modules are struck by rotating sticks on a motor axis, as this configuration can generate more output power than can a typical vibration-type system [13–18].

The purpose of this study is to find optimal design of the MPA energy harvesting system that can generate watt level power using natural energy, such as water flow and wind. This optimal design would enable to minimize the loss of combined output power compared to the simple sum of each piezoelectric module.

For this study, we designed a piezoelectric energy harvesting system consisting of four piezoelectric modules and derived its optimal design conditions. Impedance matching method was used only the resistive impedance matching, because the conjugate matching in piezoelectric energy

J. W. Moon · H. J. Jung · K. H. Baek · D. Song · S. B. Kim · J. H. Kim · T. H. Sung (✉)
Department of Electrical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Republic of Korea
e-mail: sungth@hanyang.ac.kr

그림 160. SCI 논문 증빙자료 (9/12)

Japanese Journal of Applied Physics 53, 08NB03 (2014) **REGULAR PAPER**
http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.08NB03

Design of an impact-type piezoelectric energy harvesting system for increasing power and durability of piezoelectric ceramics

Hyun Jun Jung[1], Jae Won Moon[1], Yooseob Song[2], Daniel Song[1], Seong Kwang Hong[1], and Tae Hyun Sung[1]*

[1]*Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 136-791, Korea*
[2]*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul 136-791, Korea*
E-mail: sungth@hanyang.ac.kr

Received January 3, 2014; accepted May 24, 2014; published online July 17, 2014

The purpose of this study is to design a piezoelectric energy harvester (PEH) that not only resists damage but also generates a higher power when impact is applied. To increase the generated power and durability a PEH, in this study, we investigated a new model and carried out numerical simulations of and experiments on the PEH. The numerical simulation results show that the stress distribution of the proposed PEH is more uniform than that of a conventional impact-type PEH. Thus, the proposed PEH decreases its possibility of being damaged. Experimental results for power under a matched impedance condition show that the maximum RMS powers of the conventional impact-type and proposed PEHs were 0.69 mW at 16 kΩ and 3.97 mW at 7 kΩ, respectively. Furthermore, the peak power of the proposed PEH was 518 mW, which was 3,047% higher than that of the conventional impact-type PEH having a peak power of 17 mW. © 2014 The Japan Society of Applied Physics

1. Introduction

Self-generation systems have recently received considerable attention owing to the development of mobile devices and low-power sensor technology.[1–9] The piezoelectric energy harvester (PEH), a type of self-generation system, has also attracted attention.[10–18] The PEH may be classified to be of the vibration or impact type.[19] The vibration-type PEH has been extensively studied, but its generated power is very low. In contrast, the impact-type PEH has higher generated power than the vibration-type PEH,[20–22] and a new impact-type design (secondary impact) was proposed for optimizing the model for maximum power generation.[23] However, it is easily damaged owing to the brittleness of the piezoelectric when impact is applied to the PEH.[24–26] Accordingly, there is a limit to the improvement in power generation. The purpose of this study is to design a PEH that not only resists damage but also generates a higher power when impact is applied to the PEH. To increase the power generation and durability of the PEH, in this study, we proposed a new model and carried out numerical simulations of and experiments on the PEH.

2. Design and numerical simulation

2.1 Design

We designed a PEH that is more durable than the conventional impact-type PEH, as shown in Fig. 1(a). In order to reduce damage to the piezoelectric material of the proposed PEH, a deformation-limiting device was designed. Figure 1(b) shows the deformation-limiting device of the proposed PEH system. The deformation limiting device was designed to be placed closer to the free end of the harvester than to the end of the piezoelectric material in order to limit displacement to the piezoelectric material of the proposed PEH.

In addition, secondary impact was applied to achieve higher power generation than that achieved with a conventional impact-type PEH, as shown in Fig. 1(c). In a previous study, a secondary-impact type harvester with a higher total impulse per unit time and a lower total displacement per unit time generated higher power outputs than a conventional impact-type PEH at low resistive loads. On the other hand, a conventional impact-type PEH with a higher total displacement per unit time and a lower total impulse per unit time generated higher power outputs than a secondary-impact-type harvester at high resistive loads. However, under a matched-impedance condition, the secondary-impact-type harvester generated a higher power than a conventional impact-type PEH.[23]

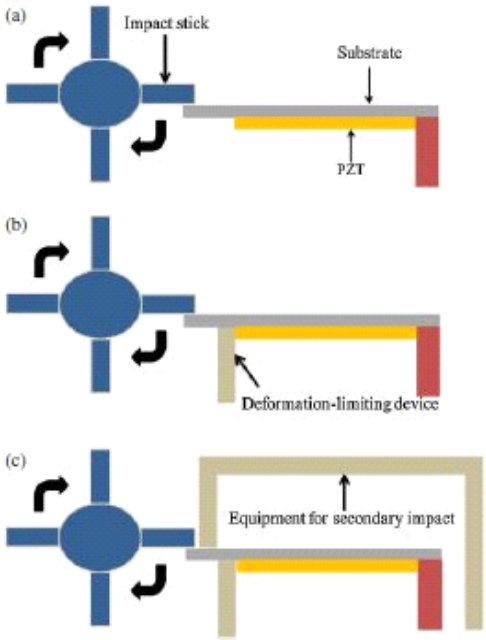


Fig. 1. (Color online) Schematic diagrams of (a) conventional impact-type PEH, (b) proposed PEH with a deformation limiting device, and (c) proposed PEH with a deformation limiting device and secondary impacter.

2.2 Numerical simulation

In this section, numerical simulations are performed in order to determine the behavior of a conventional impact-type PEH and the proposed PEH under impact loading. A linear constitutive relation including the mechanical–electrical

 © 2014 The Japan Society of Applied Physics

그림 161. SCI 논문 증빙자료 (10/12)

journal

J. Am. Ceram. Soc., 1 7 (2014)
DOI: 10.1111/jace.13079
© 2014 The American Ceramic Society

Piezoelectric Ceramics for Use in Multilayer Actuators and Energy Harvesters

Joon Hur,[‡] In-Tae Seo,[§] Dae-Hyeon Kim,[§] Sahn Nahm,[‡,§,†] Jungho Ryu,[¶] Seung Ho Han,[‖] Chong-Yun Kang,[‡,‡‡] and Seok-Jin Yoon[‡‡]

[‡]Department of Nano Bio Information Technology, KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Korea

[§]Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Korea

[¶]Functional Ceramics Group, Korea Institute of Materials Science, 66 Sangnam-Dong, Changwon, Kyungnam 641-831, Korea

[‖]Electronic Materials and Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute, Seongnam 463-816, Korea

[‡‡]Principal Research Scientist, Electronic Materials Center, Korea Institute of Science and Technology, 39-1 Hawolkok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 137-791, Korea

Microstructural and piezoelectric properties of 0.72Pb($Zr_{1-x}Ti_x$)–0.28Pb$(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ ($PZ_{1-x}T_x$-PZNN) ceramics with $0.50 \leq x \leq 0.55$ were investigated for evaluating the possibility of their use in multilayer actuators and energy harvesters, which demand a large piezoelectric strain constant (d_{33}) and a small dielectric constant ($\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$). The $PZ_{0.47}T_{0.53}$-PZNN ceramic with a morphotropic phase boundary (MPB) composition showed large d_{33} and $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ values, making it unsuitable for use in multilayer actuators and energy harvesters. However, the $PZ_{0.48}T_{0.52}$-PZNN ceramic with a rhombohedral structure showed a small $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ value of 1605, yet maintained a large d_{33} of 550 pC/N. Thermal stimulation did not have any significant effect on the piezoelectric properties of this specimen, except for a slight increase in the $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ value upon heating the specimen at 150°C for 4 h. In an effort to reduce the sintering temperature, CuO was used as an additive for the ceramic. As a result, the CuO-added $PZ_{0.48}T_{0.52}$-PZNN ceramic was well sintered at 900°C. In particular, the 1.0 mol% CuO-added $PZ_{0.48}T_{0.52}$-PZNN ceramic exhibited a large d_{33} value of 554 pC/N and a small $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ value of 1620, making it highly suitable for use in multilayer actuators and energy harvesters.

I. Introduction

In the last few decades, piezoelectric actuators have become key components in various applications such as positioners, motors and vibration suppressors.[1] Piezoelectric ceramics used in multilayer actuators are generally expected to have a large piezoelectric strain constant (d_{33}) for a large displacement, and a small dielectric constant ($\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$) for a small driving voltage of the device. In addition, piezoelectric ceramics with low sintering temperatures (< 960°C) are often preferred, as the melting temperature of Ag electrode used in the multilayer device is 961°C.[2]

Piezoelectric energy harvesters, which convert the wasted energy from mechanical vibrations into usable electrical energy, have been extensively investigated for use as power sources in wireless devices and various sensors.[3–11] Piezoelectric ceramics used in such devices should be capable of generating a considerable amount of electrical energy even for a small input vibration. The electrical energy density (u) produced by piezoelectric ceramics is generally expressed by the following equation: $u = (1/2)(d_{ij} \times g_{ij})(F/A)$,[12] where d_{ij} is the piezoelectric strain constant; g_{ij} is the piezoelectric voltage constant; F is the applied force; and A is the area of the specimen. According to the above-mentioned equation, piezoelectric ceramics should have a high transduction coefficient ($d_{ij} \times g_{ij}$) for use as successful piezoelectric energy harvesters. Furthermore, the piezoelectric voltage constant is given by $g_{ij} = d_{ij}/(\varepsilon_{ij}/\varepsilon_o)$, implying that piezoelectric ceramics are required to have a large d_{ij} but small $\varepsilon_{ij}/\varepsilon_o$ values to produce a large energy density. Furthermore, the dielectric loss ($\tan\delta$) should also be considered when evaluating the suitability of piezoelectric ceramics for use as energy harvesters because the performance of an energy harvester is affected by the electrical damping of piezoelectric ceramics.[13,14] Therefore, the figure-of-merit in the off-resonance (FOM_{off}) condition of piezoelectric ceramics for energy harvesters has been proposed as follows:[15]

$$FOM_{off} = \left|\frac{d_{ij} \times g_{ij}}{\tan\delta}\right|$$

Typically, piezoelectric energy harvesters generate large voltage and small current, while standard electronic circuits require high current at low voltage.[16] The voltage capacity of a normal battery is about 3.0 V. In other words, a voltage larger than 3.0 V is not necessary to recharge a battery.[17] Therefore, it is highly desirable to reduce the output voltage but simultaneously increase the output current of a piezoelectric energy harvester. To this end, multilayer piezoelectric energy harvesters have been reported to be a feasible option for reducing the output voltage while increasing the output current.[18]

Table I shows the d_{33}, $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$, k_p, $d_{33} \times g_{33}$ values and the sintering temperature of piezoelectric ceramics reported for use in actuators and energy harvesters. While the d_{33} value for most of the ceramics is large, the $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ value is also large and this results in small $d_{33} \times g_{33}$ values. Moreover, since the sintering temperature of ceramics showing a large d_{33} value is high, they are not suitable for use in multilayer devices. Therefore, it is required to develop piezoelectric ceramics that have a large d_{33} value but a small $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ value with a low sintering temperature for enabling the use of these ceramics in multilayer actuators and energy harvesters.

In this study, we have analyzed the structural and piezoelectric properties of novel 0.72Pb($Zr_{1-x}Ti_x$)-0.28Pb$(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ ($PZ_{1-x}T_x$-PZNN) ceramics with

G. Brennecka—contributing editor

Manuscript No. 34177. Received November 27, 2013; approved May 22, 2014.
†Author to whom correspondence should be addressed. e-mail: snahm@korea.ac.kr

그림 162. SCI 논문 증빙자료 (11/12)

+Model
JECS-9723; No. of Pages 8
ARTICLE IN PRESS

Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
Journal of the European Ceramic Society xxx (2014) xxx–xxx
www.elsevier.com/locate/jeurceramsoc

Influence of sintering conditions on piezoelectric properties of $KNbO_3$ ceramics

Dae-Hyeon Kim[a,1], Mi-Ri Joung[a,1], In-Tae Seo[a,1], Joon Hur[b,1], Jong-Hyun Kim[b,1], Bo-Yun Kim[b,1], Hwack-Joo Lee[c,2], Sahn Nahm[a,b,d,*]

[a] Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 1-5 Ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Republic of Korea
[b] Department of Information Technology-Nano Science, KU-KIST Graduate School of Converging Science and Technology, Korea University, 1-5 Ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Republic of Korea
[c] New Materials Evaluation Center, Korea Research Institute of Standard and Science Daeduk Science Town, Taejon 305-600, Republic of Korea
[d] Electronic Materials Center, KIST 39-1 Hawolkok-dong, Seongbuk-gu, Seoul 137-791, Republic of Korea

Received 4 February 2014; received in revised form 18 June 2014; accepted 25 June 2014

Abstract

A homogeneous $KNbO_3$ (KN) phase was formed in specimens that were sintered at 1020 °C and 1040 °C, without formation of the K_2O-deficient secondary phase, indicating that the amount of evaporation of K_2O during sintering was very small. However, the KN liquid phase was formed during sintering and assisted the densification of the KN ceramics. A dense microstructure was developed in the specimen sintered at 1020 °C for 6 h and abnormal grain growth occurred in this specimen. A similar microstructure was observed in the specimens sintered at 1040 °C for 1.0 h. The dielectric and piezoelectric properties of the KN ceramics were considerably influenced by the relative density. The KN ceramics sintered at 1020 °C for 6 h, which showed a large relative density that was 95% of the theoretical density, exhibited promising electrical properties: $\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_o$ of 540, d_{33} of 109 pC/N, k_p of 0.29, and Q_m of 197.
© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: $KNbO_3$; Lead-free piezoelectric ceramics; Liquid phase sintering

1. Introduction

Piezoelectric devices such as sensors, ultrasonic motors, transformers, and actuators have received considerable attention because of their wide range of applications. [1–3] Lead–zirconate–titanate ($Pb(Zr,Ti)O_3$ or PZT)-based ceramics have been used for these devices because of their outstanding piezoelectric properties.[2] However, PZT-based ceramics contain more than 60 wt% of PbO, which causes serious environmental problems. Therefore, since the beginning of this century, there has been an increasing number of investigations on lead-free piezoelectric ceramics such as $BaTiO_3$, $(Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO_3$, and $(Na_{0.5}K_{0.5})NbO_3$ (NKN).[3–6] In particular, NKN-based ceramics have attracted much interest because of their high piezoelectric properties and high Curie temperature (T_c).[7,8] However, NKN ceramics decompose easily in water, and Na_2O (or K_2O) evaporates during sintering at high temperatures (>1000 °C).[9] Therefore, it is very difficult to obtain dense NKN ceramics with homogeneous composition and reliable piezoelectric properties. In order to overcome this problem and improve the piezoelectric properties, many investigations have been conducted on NKN-based solid solutions.[9–15] In particular $(1-x)NKN-xLi(Nb, Ta, Sb)$ solid solutions have been studied extensively because

* Corresponding author at: Department of Materials Science and Engineering, Korea University, 1-5 Ga, Anam-dong, Seongbuk-gu, Seoul 136-701, Republic of Korea. Tel.: +82 2 3290 3279; fax: +82 2 928 3584.
E-mail addresses: daehyeon86@korea.ac.kr (D.-H. Kim), miri0805@korea.ac.kr (M.-R. Joung), tjdlsxo2000@korea.ac.kr (I.-T. Seo), 2007170023@korea.ac.kr (J. Hur), cristal9100@korea.ac.kr (J.-H. Kim), adorothy@korea.ac.kr (B.-Y. Kim), hjlee@kriss.re.kr (H.-J. Lee), snahm@korea.ac.kr (S. Nahm).
[1] Tel.: +82 2 3290 3701; fax: +82 2 928 3584.
[2] Tel.: +82 042 868 5449; fax: +82 042 868 5252.

http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.06.028
0955-2219/© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Please cite this article in press as: Kim D-H, et al. Influence of sintering conditions on piezoelectric properties of $KNbO_3$ ceramics. *J Eur Ceram Soc* (2014), http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.06.028

그림 163. SCI 논문 증빙자료 (12/12)

바. 최종년도 증빙자료 - 시작품제작 (목표 1건, 달성 4건)

○ Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 시스템

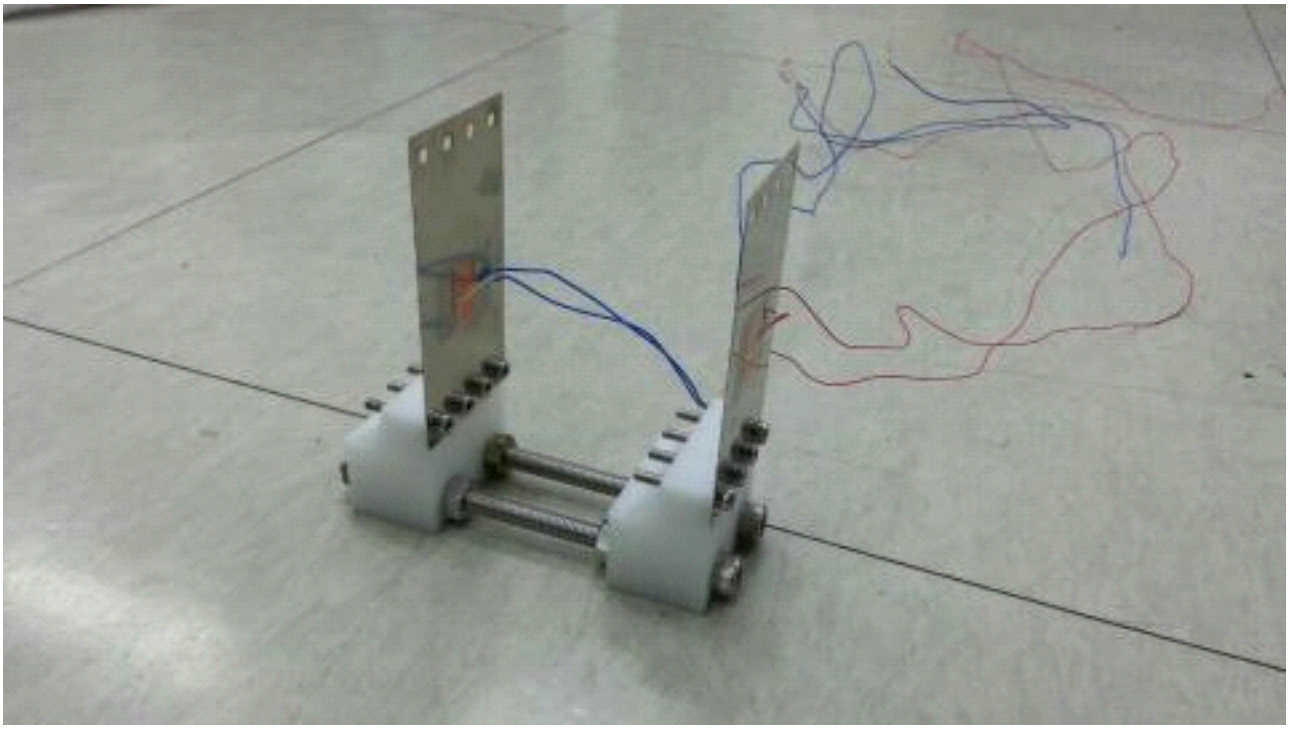


그림 164. Substrate, Piezo ceramic의 두께 및 Tip mass의 무게별 최적화를 통한 발전 시스템 시제품

○ 자력을 이용한 발전

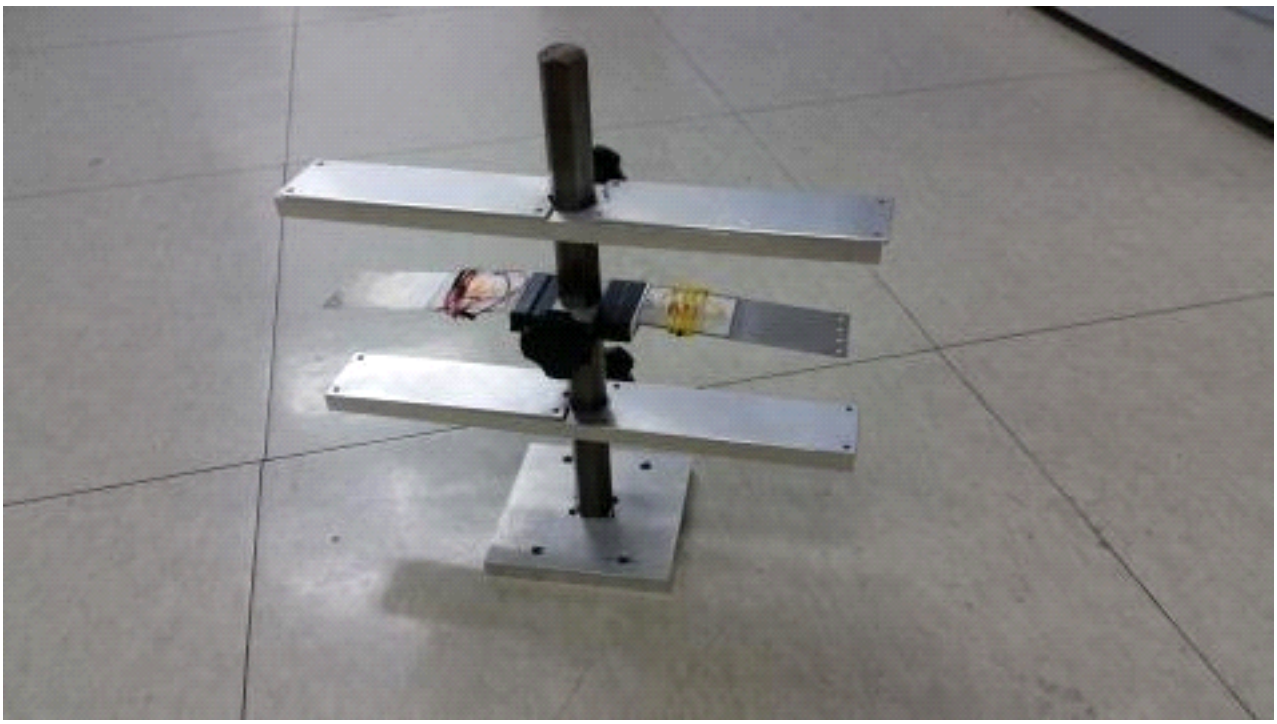


그림 165. 자력을 이용한 발전 시스템 시제품

○ 진자 응용형 발전

- 진자를 이용한 발전

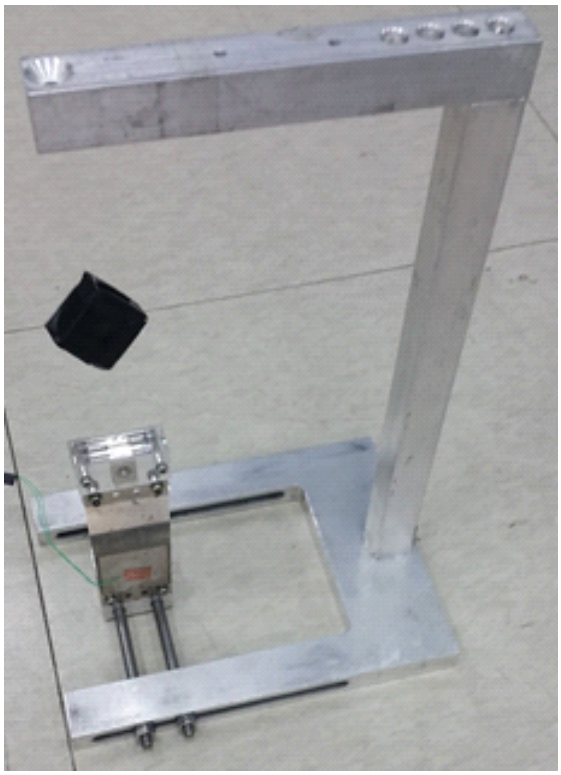


그림 166. 진자를 이용한 발전 시스템 시제품

- 구슬을 이용한 타격형 발전

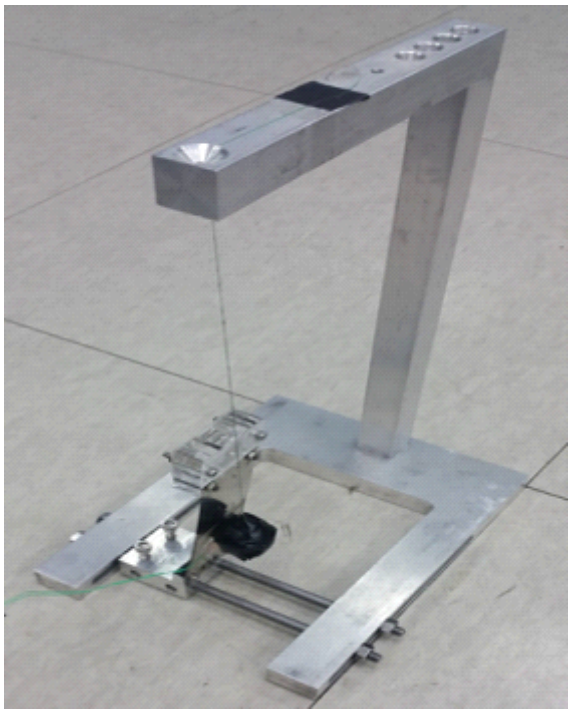


그림 167. 구슬을 이용한 타격형 발전 시스템 시제품

- 스프링과 진자를 이용한 발전

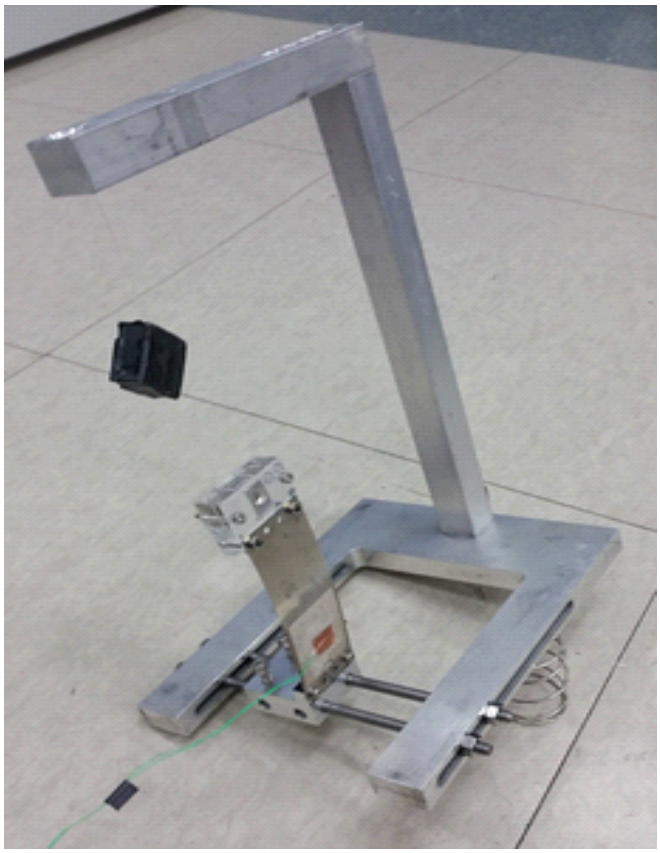


그림 168. 스프링과 진자를 이용한 발전

○ 풍력을 이용한 발전 시스템

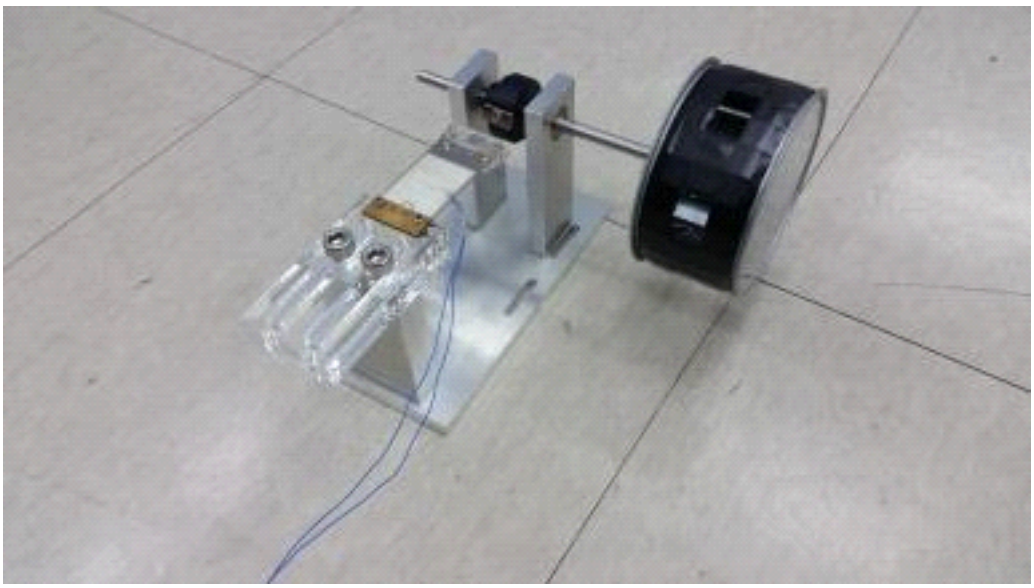


그림 169. 풍력을 이용한 발전 시스템 시제품

3. 최종년도 평가 의견사항 보완대비

가. 최종년도 성과 점검 기준표

붙임 2

연차(단계)실적·계획서 수정·보완 대비표

○ 과 제 명 : 철도차량 적용을 위한 압전하베스팅 시스템 개발
○ 연 구 기 관 : 한양대학교 산학협력단
○ 연 구 책 임 자 : 성 태 현 (인)
○ 평가결과 종합의견

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1)수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2)관련 페이지	주3)비고
수정·보완 사항	○실제 철도차량의 어떤 부분에 적용하고 활용할지에 대한 방안 제시 필요. 철도에 특화된 기술 제시 필요	☑보완 ☐보완불가	철도차량에 활용하기 위한 최적의 설치장소는 차량의 바닥면을 고려할 수 있으며, 현재의 제작된 시스템의 높이는 13 cm에 달하고 있으나 추후 연구개발이 지속될 경우 약 5 cm 정도의 높이로 제작이 가능할 것으로 판단됨. 가동할 수 있는 센서들은 TC77 - 3.3 MOA, TCN75-5.0MOA와 같은 온도/습도센서와 MMA7260QT, ADXL202JQC와 같은 가속도/자이로 센서 등을 가동시킬 수 있음. 추후 연구개발로 발전량을 향상시킬 경우 가동 센서의 종류가 더 다양해지며 활용방안도 폭넓어질 것으로 판단됨. 열차의 진동 에너지는 작은 편이므로 열차의 진동을 분석하고 이에 적합한 압전 에너지 하베스팅 시스템을 설계함. 비행기나 선박 등 진동 특성이 다른 이동 수단에 적용하기 위해서는 특성이 다른 압전 에너지 하베스팅 시스템이 설계되어야 함.	69, 125, 126	
	○목표설정의 근거와 실험조건을 보고서에 제시 필요	☑보완 ☐보완불가	철도 차량 중에서 비교적 진동이 제일 작은 초전도 자기부상열차 500 km/h에서 나타나는 진동수인 11 Hz와 28 Hz에서 최대 0.01 mW/cm^3 값을 얻었으며, 이 값의 10배에 해당하는 0.1 mW/cm^{3}로 목표를 정했음. (2	26, 36, 71, 93, 94, 141	

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1)수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2)관련 페이지	주3)비고
			차년도 평가이후 0.15 mW/cm^3 으로 목표 값 향상) 전자석 자기부상열차의 진동 대역폭은 약 0 ~ 300 Hz, 초전도 자기부상열차의 동대역폭은 약 0 ~ 56.5 Hz로 압전 발전에 충분하여 위와 같은 목표를 설정하였음.1) 또한 세라믹의 Young's modulus은 매우 크며, 특히 PZT의 구성 요소인 ZrO_2, TiO_2 모두 100 이상의 값을 가짐. 따라서 Young's modulus 이 세라믹 재료 중 매우 낮은 수준인 80 GPa 이하를 가지면 잘 깨지지 않고 외부 진동에 대해 탄성적으로 반응할 것으로 예측함. 영률(Young's modulus)의 측정 조건은 시험성적서에 명확히 명시됨. 또한 외부 자극이 가장 커지는 진동수(60Hz)에서 30분 이상 특성을 유지할 수 있다면 실제 열차 적용 시 재료의 피로 문제없이 적용할 수 있다 판단함. 따라서 재료의 피로 실험은 하베스터의 공진 주파수에서 진행됨. 열자극 실험을 제외한 모든 실험은 상온에서 진행됨. 유전율은 1 kHz에서 측정됨.		

1) IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002

○ 평가위원별 의견

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	[주1]수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	[주2]관련 페이지	[주3]비고
A위원	○소결시간에 따른 young계수 값의 변동성이 크므로 이에 대한 측정결과는 매우 믿기 어려움. 따라서 가장 최적조건인 900도 소결시간에 따른 계수의 변동성변화를 논의할 필요 있음	☑보완 □보완불가	가장 최적의 소결 조건은 900℃, 12시간이었으며, 이 조건에서 1차적으로 Young's modulus를 측정하였음. 하지만 Young's modulus의 변동량이 크므로 추후 10 개 이상의 시편을 제작하여 여러 측정을 하여 이의 평균값을 사용 하는 것이 합리적일 것이라 판단함. 또한 소결 시간을 미세하게 조절하고 이에 따른 Young's modulus의 변화를 측정 하는 것도 추후 Young's modulus에 관한 지식 습득을 위해 이롭다고 판단됨.	93, 94, 130	
	○피로사이클수의 기준에 대한 근거를 제시하고, 실제 운행 속에서 나타난 진동횟수와 상관성 입증 필요	☑보완 □보완불가	피로사이클은 제작한 캔틸레버의 진폭이 가장 커지는 공진 주파수(약 60 Hz)에서 진행되었음. 100,000 번의 진동이 가해지기 위해서는 60 Hz의 진동이 약 30 분간 가해져야함. 실제 운행 시 더 작은 진폭과 낮은 주파수에 노출되기 때문에 충분히 오랜 시간동안 열차에 부착되어 피로 현상 없이 에너지 하베스터가 작동될 것임을 예상할 수 있음.	36, 71, 93, 94	
	○상용화기술개발을 위해서 보다 현실적인 주행조건과 부착위치 등을 제시	☑보완 □보완불가	본 과제의 목표는 주행 중인 열차 내에서 실험되었으며 열차가 출발하여 일정한 속도에 도달하였을 때 측정을 시작하였음. 또한 모든 실험은 바닥에 모듈을 설치하여 진행함. 철도차량에 활용하기 위해 최적의 설치장소는 차량의 바닥면을 고려할 수 있으며, 현재의 제작된 시스템의 높이는 13 cm에 달하고 있으나 추후 연구개발이 지속될 경우 약 5 cm 정도의 높이로 제작이 가능할 것으로 판단됨.	125, 126	
B위원	○실제 철도차량에 적용시 설치 위치나 발생전력의 활용 방안 등에 대한 제시 등이 미흡	☑보완 □보완불가	실제 철도차량에 적용시 객실내의 바닥, 좌석 그리고 차량의 지붕에도 설치가 가능하여 이에 대한 특허 출원이 이미 완료됨. 철도차량에 활용하기 위해 최적의 설치장소는 차량의 바닥면을 고려할 수 있으며, 현재의 제작된	125, 126	

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1) 수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2) 관련 페이지	주3) 비고
			시스템의 높이는 13 cm에 달하고 있으나 추후 연구개발이 지속될 경우 약 5 cm 정도의 높이로 제작이 가능할 것으로 판단됨. 가동할 수 있는 센서들은 TC77-3.3MOA, TCN75-5.0MOA와 같은 온도/습도센서와 MMA7260QT, ADXL202JQC와 같은 가속도/자이로 센서 등을 가동시킬 수 있음. 추후 연구개발로 발전량을 향상시킬 경우 가동 센서의 종류가 더 다양해지며 활용방안도 폭넓어질 것으로 판단됨..		
C위원	○목표설정의 근거가 조금 미흡	☑보완 □보완불가	철도 차량 중에서 비교적 진동이 제일 작은 초전도 자기부상 열차 500 km/h에서 나타나는 진동수인 11 Hz와 28 Hz에서 최대 0.01 mW/cm^3 값을 얻었으며, 이 값의 10배에 해당하는 0.1 mW/cm^{3}로 목표를 정했음. (2차년도 평가이후 0.15 mW/cm^{3}으로 목표 값 향상) 전자석 자기부상열차의 진동 대역폭은 약 0 ~ 300 Hz, 초전도 자기부상 열차의 동대역폭은 약 0 ~ 56.5 Hz로 압전 발전에 충분하기에 위와 같은 목표를 설정하였음.2) 또한, 세라믹의 영률(Young's modulus)은 매우 크며, 특히 PZT의 구성 요소인 ZrO_2, TiO_2 모두 100 이상의 값을 가짐. 따라서 Young's modulus이 세라믹 중 매우 낮은 수준인 80 GPa 이하를 가지면 잘 깨지지 않고 외부 진동에 대해 탄성적으로 반응할 예측함. 또한 외부 자극이 가장 커지는 진동수에서 30분 이상 특성을 유지할 수 있다면 실제 열차 적용 시 재료의 피로 문제없이 적용할 수 있다고 판단됨.	26, 36, 71, 93, 94	

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1)수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2)관련 페이지	주3)비고
	○철도차량뿐 아니라 산업에 적용을 위해서라도 경제성에 대한 분석이 좀 더 필요할 것으로 판단됨 (시장성이 아닌 경제 효율성)	☑보완 □보완 불가	본 과제 시작 당시 소자 (3 × 5 cm)의 값은 60만원/개 이었으나 3년간 과제를 수행함에 따라 3만원/개 로 1/20단가 절감을 하였음. 그러나 아직 경제성을 논하기에는 좀 더 연구가 필요할 것으로 판단됨 본 과제가 원천기술 개발을 확보하는 점에 주력하여 차후 상업화를 위해 더 노력하겠음.		
	○추후 추가적인 기술 연구를 할 경우 적용 타겟을 명확히 하고 경제성 분석을 좀 더 구체적으로 진행하여야 할 것으로 생각됨.	-	발생된 전력은 안전성 향상을 위한 차량 대차 온도 감지 센서, 소음 및 진동 감지 센서 등의 전원으로 사용 가능하며, 평상시 저장장치에 저장되어 비상시 피난유도등이나 비상조명등과 같은 전등의 전력으로 활용이 가능함.	125, 126	
D위원	-	-			
E위원	○목표대비 성과가 700% ~ 800%에 이른다는 것은 설정된 목표수준이 다소 낮았던 것이 아닌가 생각됨	☑보완 □보완 불가	초기 설정 목표는 철도 차량 중에서 비교적 진동이 제일 작은 초전도 자기부상 열차 500 km/h에서 나타나는 진동수인 11 Hz와 28 Hz에서 최대 0.01 mW/cm^3 값을 얻은 후, 이 값의 10배에 해당하는 0.1 mW/cm^{3}로 매우 도전적인 목표를 정했음. 2차년도 까지 최종 목표 발전량의 95 %에 해당하는 값밖에 얻지 못하였으나 3차년도 하반기에 기계·전기·재료의 융합 기술을 통해 높은 성과를 얻을 수 있었음.	26, 48, 54, 79	현재는 과제가 종료된 시점이므로 목표를 변경할 수 없을 뿐만 목표수준은 과제 협약시 논의됐어야한다고 판단됨.
	○압전소자의 발전량을 높이는 기술적 key point가 무엇인지 명확히 할 필요	☑보완 □보완 불가	압전 소자의 발전량을 증가시키는 기술적인 key point는 기계·전기·재료의 융합 기술임. 한 분야만의 앞선 기술로는 달성이 결코 불가능하며 세 분야의 지속적인 연구 교류 및 기술의 융합을 통해 발전량을 크게 높일 수 있음.	95 ~ 100	
	○열차에 특화된 부분이 무엇인지를 명확히 할 필요가 있음.	☑보완 □보완 불가	이 연구는 열차의 진동에너지에 최적화된 압전에너지 하베스터에 관한 연구임. 열차의 진동 에너지	69, 125, 126	

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1)수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2)관련 페이지	주3)비고
			가 작은 편임에도 불구하고 열차의 진동을 분석하고 이에 적합한 압전 에너지 하베스팅 시스템을 설계하여. 초기 목표의 7배에 달하는 전력을 수확하는 기술을 확보함. 발생된 전력은 TC77-3.3MOA, TCN75-5.0MOA와 같은 온도/습도센서와 MMA7260QT, ADXL202JQC와 같은 가속도/자이로 센서 등을 가동시킬 수 있음. 추후 연구개발로 발전량을 향상시킬 경우 가동 센서의 종류가 더 다양해지며 활용방안도 폭넓어질 것으로 판단된다. 비행기나 선박 등 진동 특성이 다른 이동수단에 적용하기 위해서는 특성이 다른 압전 에너지 하베스팅 시스템이 그에 맞도록 연구 및 설계되어야 함.		
F위원	○목표설정의 객관적인 자료가 부족	☑보완 □보완불가	철도 차량 중에서 비교적 진동이 제일 작은 초전도 자기부상 열차 500 km/h에서 나타나는 진동수인 11 Hz와 28 Hz에서 최대 0.01 mW/cm^3 값을 얻었으며, 이 값의 10배에 해당하는 0.1 mW/cm^{3}로 목표를 정했음. (2차년도 평가이후 0.15 mW/cm^{3}으로 목표 값 향상) 전자석 자기부상열차의 진동 대역폭은 약 0 ~ 300 Hz, 초전도 자기부상 열차의 동대역폭은 약 0 ~ 56.5 Hz로 압전 발전에 충분하여 위와같은 목표를 설정함.3) 피로사이클은 최대 변위가 주어지는 조건에서 30분 이상 특성이 유지가 되는 조건임. 영률은 세라믹 중 매우 낮은 값인 80 GPa로 설정하였고 이를 보고서에 추가하였음.	18, 19, 26, 36, 54, 71, 93, 94	
	○소자설치 위치가 기차 내부보다 외부에 설치해야 에너지 수거를 극대화할 수 있	□보완 ☑보완불가	기차 외부에 압전 하베스팅 시스템 설치가 가능하다는 차량 제작업체 현대로템의 의견을 받았으나 본 과제의 목표와 맞지 않을		

구분	수정·보완의견 (요구사항)	반영여부 (√표기)	주1)수정·보완의견 (요구사항) 반영내용 요약	주2)관련 페이지	주3)비고
	고 실용성을 높일 수 있음. 미래 철도차량은 점점 진동을 줄이는 방향임		뿐만 아니라 열차 외부에서는 실험이 허용되지 않아서 실험을 진행하지 않았음.		
	○재현성과 신뢰성 검사(온도, 습도, 충격 등)와 같은 시스템 분석이 필요(압전시트 전극공정 개선 및 전극산화 방지기술 개발이 필요)	☑보완 □보완불가	재료의 압전 특성의 경우 같은 조성을 10 개 이상의 시편으로 만들어 세라믹 기술원에서 여러 번 측정하여 인증을 받았기 때문에 재현성의 문제는 없을 것으로 판단함. 또한 이 조성에 대하여 온도 변화에 따른 특성 변화, 충격 횟수에 따른 특성 변화를 측정하였음.	71, 141	
	○비납 재료를 이용하여 압전소자 개발 필요	☑보완 □보완불가	비납 재료를 이용한 압전 재료에 대한 연구는 이미 활발하게 진행되고 있으며 이미 본 과제와 같이 비납 재료에 hardening 현상을 일으켜 Q_m을 향상시키는 연구가 진행됨. 추후 이를 철도에 부착하여 에너지를 수확하는 연구 필요함.	93, 94, 130	
G위원	-	-			

주1) 수정·보완반영내용은 반드시 최종보고서 內에 반영하고 필요시 별지를 사용하여 작성하기 바람.
주2) 관련 페이지란에는 수정·보완요구사항을 반영한 보고서의 해당 page를 기입
주3) 비고란에는 수정·보완요구사항과 관련된 연구책임자의 의견을 기재(필요시)하고 별지가 있을 경우 별지의 제목을 기입할 것

2) IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002
3) IEEE Transactions on Applied superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 미래철도기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

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.

비매품

93560
9 788972 184539
ISBN 978-89-7218-453-9