

# 강합성 교량에 설치된 압전소자의 전력발생효과 분석

## Analysis of Electric Power Effect of Piezoelectric Element on Steel-concrete Composite Bridge

김 상 호<sup>1)</sup> · 정 치 영<sup>2)</sup> · 정 하 민<sup>3)</sup> · 안 진 희<sup>4)</sup>  
*Kim, Sang Hyo · Jung, Chi Young · Chung, Ha Min · Ahn, Jin Hee*

요 약 : 교량은 주행차량에 의하여 지속적이며 반복적인 변형에너지가 발생하며, 이러한 교량의 변형에너지를 압전소자를 이용하여 전기에너지로 변환 할 수 있다. 하지만 압전소자를 구조물에 부착하여 구조물의 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하기 위해서는 구조물에 작용하는 하중 및 하중에 따라 압전소자에서 발생하는 변형률 관계 등이 제시되어야 압전소자를 합리적으로 적용할 수 있는 가능성을 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 압전소자를 교량 구조물에 적용하였을 때 발생하는 전압을 평가하기 위하여 강교량을 모사한 강합성 거더 교량 실험체를 제작하고 교량의 하중효과 등을 고려한 하중을 재하하고 이에 따라 압전소자에서 발생하는 전압을 평가하고 압전전압의 제안식과 실험결과를 비교하였다. ABSTRACT : In general, moving vehicles generate continuous and repetitive strain of energy on bridges. The strain energy can convert to electric energy due to its piezoelectric element. However, some factors should be considered in order to reasonably assess the feasibility such as load distribution applied on bridges and the relationship of strains generated according to loads. This study was carried out to estimate the generated voltage when piezoelectric elements were installed to a bridge. A steel-concrete composite specimen was fabricated and loads were applied, considering vehicle load-effects. As a result, the voltage generated in the element was evaluated and compared with the analysis equation of the piezoelectric effect

핵심용어 : 강합성 교량, 압전소자, 전력발생, 발생전압

KEYWORDS : steel composite bridge, piezoelectric element, electric energy generation, generated voltage

### 1. 서론

현재 화석에너지의 무분별한 사용으로 인한 환경오염 및 지구온난화 문제와 화석에너지원의 고갈 등의 문제로 국내외에서 신·재생에너지에 대한 관심 및 연구가 폭발적으로 증가하고 있다. 국내에서도 “신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법”을 규정하여 해당분야에 대한 연구 및 사업 활성화가 이루어지고 있으며, 그림 1과 같이 국내 에너지생산량 중 신·재생에너지를 석유 1톤에 해당하는 열량으로 표시하면 2011년에 전체에너지 자원 중 5%수준으로 예상되고 있다. 현재 신·재생에너지로 주목받고 있는 태양광, 태양열, 풍력 등의 자연에너지 분야의 경우 전 설비의 설치를 위해 넓은 물리적 공간이 필요하여 국토가 협소한 우리나라에서는 경제적, 사회적 여건을 고려할 때 투자에 대한 발전효율의 측면에서 여러 가지 제약이 있다. 하지만, 국토전반에 건설되고 있는 SOC 시설물

을 신·재생 에너지 생산 시설로 활용할 수 있다면, 국토를 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

국내에 건설된 다양한 SOC 시설물 중 차량이 주행하는 교량의 경우 차량의 반복하중에 의하여 지속적이며 반복적인 교량의 처짐이 발생하고 이에 따라 교량구조물에 변형이 유도된다. 차량에 의하여 발생하는 교량의 지속적이며 반복적인 변형에너지를 에너지변환의 측면에서 전기에너지로 변환 할 수 있다면 교량을 통행하는 주행차량들에 의하여 지속적인 에너지를 생산 할 수 있다. 압전소자는 구조물에서 발생하는 변형에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 재료로 압전소자에 변형이 발생할 경우 재료 내에서의 전자기동이 발생하여 전기에너지가 생성된다. 따라서 교량구조물에서 발생하는 지속적인 변형에너지를 전기에너지로 변환 할 수 있다. 하지만 압전소자에서 발생하는 전기에너지의 크기가 매우 작아 그 활용도도가 떨어지는 것이 사실이다. 그래서 현재 국내·외에서 이에 대한 연구들이 활발

1) 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수(sanghyo@yonsei.ac.kr)  
2) 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정(cyjung@yonsei.ac.kr)  
3) (주)도화종합기술공사 구조부 사원(haminii@dohwa.co.kr)  
4) 교신저자. 연세대학교 BK21 미래사회기반시설산학연사업단 연구교수  
(Tel: 02-2123-2804, Fax: 02-313-2804, E-mail: palanorange@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

히 진행되고 있다(이형규 등, 2009; 요업기술원, 2006; Dong 등, 2005; Inman 등, 2005; Mateu 등, 2006). 예를 들어 저전류 특성을 가진 LED시스템들이 개발되고 있으며, 압전효율이 증가된 압전소자들이 계속 개발되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강합성 교량 시험체를 대상으로 차량의 하중효과 등을 고려한 하중을 재하하고 이에 따라 압전소자에서 발생하는 전압을 분석하여 압전소자를 구조물에 적용하였을 때 나타나는 압전효율 특성을 평가하고 압전효율을 평가할 수 있는 제안식과 실험결과를 비교하였다.

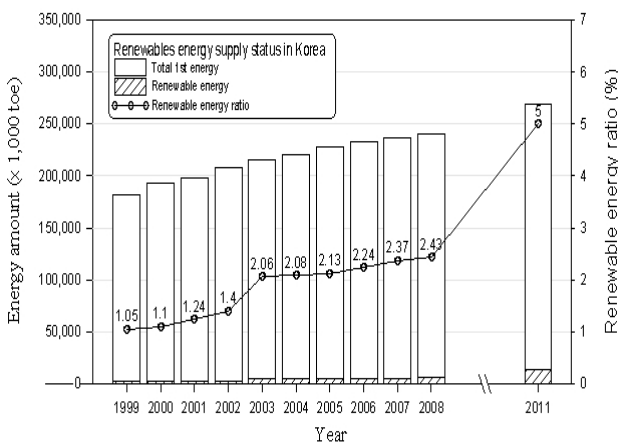
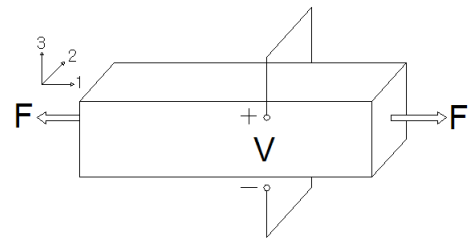


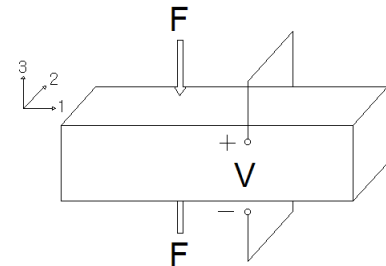
그림 1. 국내 에너지생산량 중 신재생에너지 사용비율 (에너지 관리공단, 2010)

## 2. 압전소자 및 강합성 교량 시험체 실험

압전소자는 1880년 Pierre Curie와 Jacques Curie 형제에 의하여 발견된 것으로 압전을 일컫는 단어인 'Piezoelectricity'는 1881년 Hankel에 의하여 '누르다(Press)'를 뜻하는 그리스어 piezein에서 차용되었다. 압전은 자연적인 물질의 성질을 발현한 현상으로 더 나은 압전 성질을 나타내기 위해 재료를 ceramic형태로 가공하여 사용하고 있다. 현재 가장 일반적인 형태의 압전재료는 Lead Zirconate-Titanates(PZTs)로 lead zirconate와 lead titanate의 고용체 형태로 존재한다. 압전현상은 압전체의 단위격자(unit cell)의 불균형적인 결합구조에 물리적인 외력이 작용하게 되면 폴링(Poling) 전압과 같이 극성을 갖는 전압이 전극을 넘어 나타나게 되고 이를 직접압전효과라고 한다. 압전소자는 일반적으로 외력이 가해지는 축과 전극이 수직을 이루는 31모드(그림 2(a))와 가속도계의 경우와 같이 외력을 가하는 축과 전극이 같은 면에 존재하는 33모드(그림 2(b))가 있다.



(a) 31mode

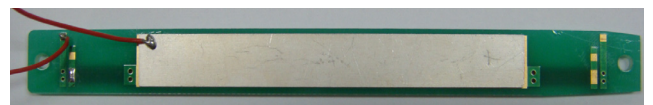


(b) 33mode

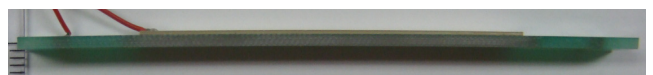
그림 2. 압전소자의 주요모드(Wang, 2001)

### 2.1 본 연구에 적용된 압전소자

강합성 교량의 압전효과를 분석하기 위하여 본 연구에서는 그림 2와 같은 31모드 unimorph형 압전소자가 사용되었다. 압전소자의 제원은 폭 8mm, 길이 60mm, 두께 0.55mm이며, 취성재료인 압전소자의 파손방지 및 부착 그리고 전압측정 등의 용이성을 위하여 폭 10mm, 길이 97mm의 PCB(Printed Circuit Board)에 압전소자를 부착하였다. 본 연구에서 사용된 압전소자는 지식경제부 산하 전자 및 정보산업 연구기관인 전자부품연구원에서 제작된 압전소자로 압전소자의 물리·전기적 특성은 표 1과 같다.



(a) 평면도



(b) 측면도

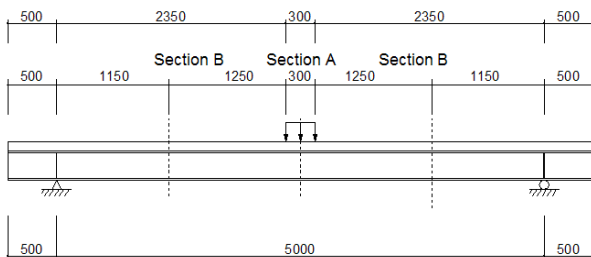
그림 3. 31모드 unimorph형 압전소자

표 1. 압전소자의 물리적 전기적 특성

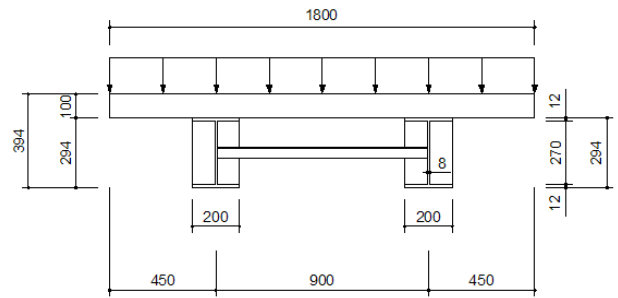
물리적 특성	Density ( $10^3\text{kg/m}^3$ )		7.7
	Young's Modulus	$Y_{31}^E$	6.6
		$Y_{33}^E$	6.3
	Curie Temperature( $^{\circ}\text{C}$ )		310
	Mechanical Q for a Thin Disk (Qms)		80
전기적 특성 ( $25^{\circ}\text{C}$ )	Dielectric Constant @ 1kHz		1830
	Dissipation Constant @ 1kHz Low field		1.60
	$k_{31}$ (%)		35
	$k_p$ (%)		61
	$k_{33}$ (%)		67
	$k_t$ (%)		45
	$k_{15}$ (%)		68
	$d_{31}$ (10-12m/V)		-150
	$d_{33}$ (10-12m/V)		420
	$d_{15}$ (10-12m/V)		515
	$g_{31}$ (10-3V·m/V)		-9.0
	$g_{33}$ (10-3V·m/V)		24
	$g_{15}$ (10-3V·m/V)		35

## 2.2 강합성 교량 시험체

본 연구에서는 압전소자를 구조물에 적용하여 발생하는 전기 특성을 평가하기 위하여 강합성 교량을 모사한 강거더 시험체를 제작하였다. 강합성 교량 시험체는 그림 3과 같이 길이 6.0m, 지간은 5.0m로 2개의 강거더가 0.9m간격으로 배치되었으며, 폭 1800mm, 두께 100mm의 콘크리트 바닥판이 설치되었다. 강거더는 폭 200mm, 플랜지 두께 12mm, 복부판 두께 8mm, 높이 270mm의 H형강이 사용되었다.



(a) 횡단면도



(b) 측면도

그림 4. 강합성 교량 시험체 제원 (mm)

## 2.3 실험방법 및 압전소자 부착위치

강합성 교량의 압전효과를 분석하기 위하여 제작된 강합성 시험체에 압전소자를 설치하고 하중재하 실험을 통하여 하중재하시 압전소자에서 발생하는 전압을 측정하였다. 시험체에 대하여 250kN 용량의 actuator를 이용하여 그림 3에 나타난 바와 같이 시험체 가운데 콘크리트 상부에 하중을 재하하여 그림 4와 같은 3점 휨 실험이 되도록 하였다.

시험체에는 그림 5에 나타난 것과 같이 강합성 거더 하부플랜지 상하면과 콘크리트 슬래브 하면에 총 10개의 압전소자가 설치되었다. 3점 휨실험에 따라 최대 모멘트가 발생하는 시험체 중앙부(그림 3 Section A)에 6개의 압전소자가 설치되었으며, 외측(그림 3 Section B)에 각각 2개의 압전소자가 설치되었다. 또한 압전소자외의 시험체에 변형률 게이지와 변위 측정을 위한 LVDT를 설치하여 발생전압과 함께 시험체의 거동을 비교하여 평가 할 수 있도록 하였다. 압전소자에서 발생하는 전압은 오실로스코프를 이용하여 측정하였으며, 변형률과 변위는 Data logger를 이용하여 측정하였다.

본 연구에서 압전소자에서 발생하는 전압을 정확하게 측정하기 위하여 하중재하 실험전에 계측용 케이블에서 발생할 수 있는 손실을 평가하였으며, 케이블의 전기적 손실을 최소화하기 위하여, 2464 data shield 4선 케이블을 데이터 계측용으로 사용하였다.

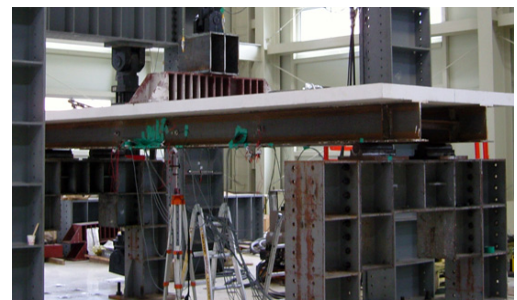
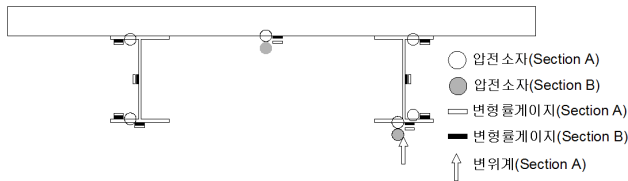


그림 5. 강합성 교량 시험체 및 하중재하 모습



(a) 압전소자 및 변형률계와 변위계 설치위치



(b) 압전소자와 변형률계 설치 모습

그림 6. 압전소자와 변형률 및 변위계의 설치위치 및 설치모습

## 2.4 하중재하 실험 개요

강합성 교량에 설치된 압전소자의 압전효과는 작용하중의 크기, 작용하중의 변화, 하중속도 등에 따라 변화 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 표 2와 같은 하중재하 실험을 실시하였다.

표 2. 하중재하 실험 개요

하중재하 실험	하중특성 및 개요
등속하중 실험	하중속도 변화 없이 등속하중을 10~100kN의 범위까지 변화
하중범위 변화 실험	하중속도 변화 없이 하중범위를 10~50kN의 범위까지 변화
하중속도 변화 실험	하중크기의 변화 없이 하중속도를 0.2~2.0Hz의 범위까지 변화

중으로 3.0kN의 하중을 재하한 후 등속하중 범위의 하중이 재하 되었다. 그림 6은 실험체에 재하된 등속하중이다.

그림 7은 등속하중 실험결과 강합성 교량시험체 단면 A의 하부플랜지 하면과 콘크리트 바닥판 하면에 설치된 압전소자에서 나타난 시간-전압관계를 나타낸 것이다. 그림 8에서 최대 휨모멘트가 작용하고 있는 단면 A에서 최대 인장응력이 작용하는 하부플랜지 하면에 설치된 압전소자에서 등속하중에 따라 약 (+)7~(-)7V 내외의 전압이 나타났다. 등속하중의 하중범위가 증가하는 경우 발생전압의 크기는 미소하게 증가하는 것으로 나타나고 있으나 발생전압이 하중범위가 증가하더라도 비례하여 증가하지 않는 것으로 나타났다. 그림 8에서 콘크리트 슬래브 하면에 설치된 압전소자의 경우 실험체의 중립축 부근에 압전소자가 설치됨에 따라 하중이 재하 되더라도 변형률이 작아 발생전압이 아주 미소하게 나타났다. 표 3은 등속하중 실험결과 나타난 압전소자 설치위치별 발생전압의 범위를 나타내었다.

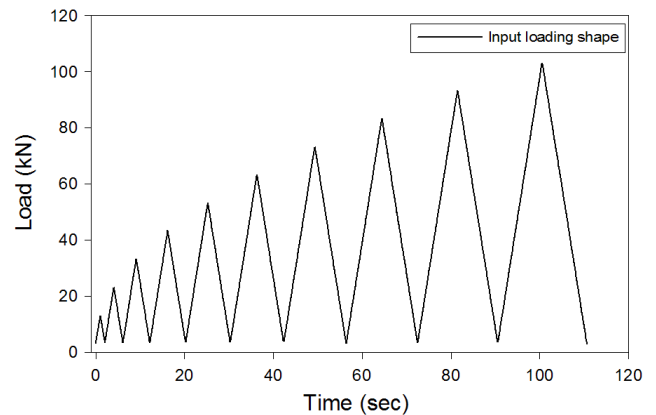


그림 7. 등속하중 실험의 재하하중

## 3. 강합성 교량 시험체에 대한 압전소자의 압전효율 실험 결과

### 3.1 등속하중 실험

압전소자는 불균형적인 결합구조에 외력이 작용할 경우 전압이 발생하게 된다. 압전소자의 전압발생효과가 하중크기에 따라 발생하는 구조물의 변형률과 어떠한 관계가 있는지를 평가하기 위하여 등속하중 실험을 실시하였다. 등속하중 실험은 강합성 교량시험체에 일정 재하속도의 하중을 재하하고 제거함으로써 하중증가에 따른 변형률 변화와 압전소자에서 발생하는 전압의 변화를 평가하였다. 이를 위하여 하중속도 10kN/sec로 최대하중범위 10.0kN에서 100.0kN까지 강합성 교량시험체에 정적하중을 재하 하였으며, actuator와 실험체에 초기하

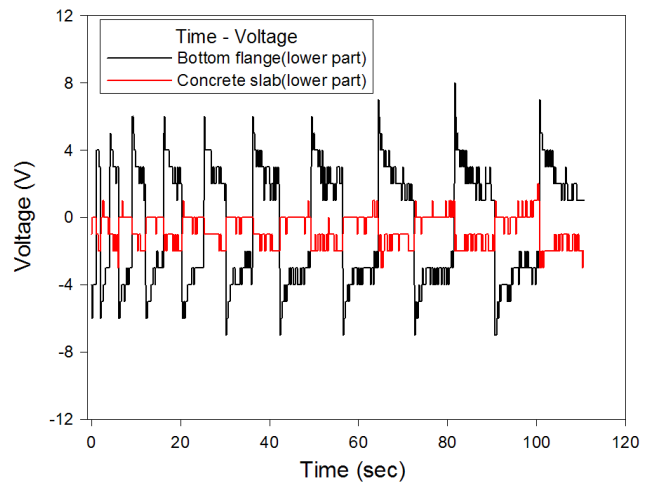


그림 8. 등속하중 실험의 시간 전압관계

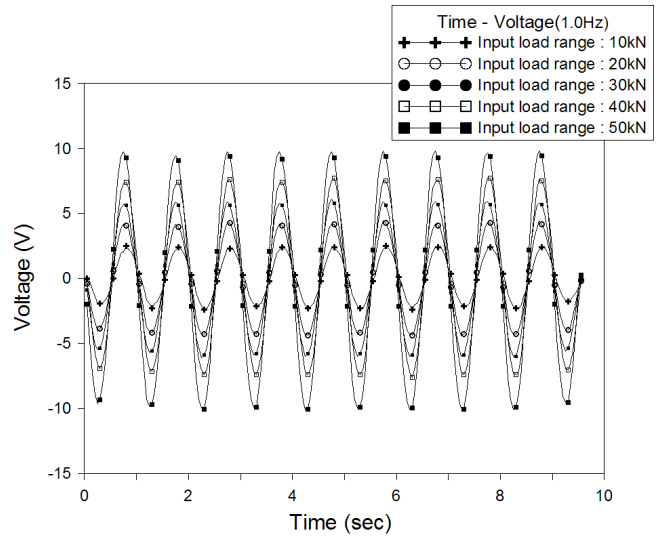
표 3. 등속하중 실험 발생전압 범위

하중범위	압전소자설치 위치	
	하부플랜지 하면 발생전압범위(V)	콘크리트 슬래브 하면 발생전압범위(V)
10.0kN	11.0	3.0
20.0kN	12.0	3.0
30.0kN	12.0	3.0
40.0kN	12.0	3.0
50.0kN	12.0	3.0
60.0kN	13.0	3.0
70.0kN	13.0	4.0
80.0kN	14.0	4.0
90.0kN	15.0	4.0
100.0kN	16.0	6.0

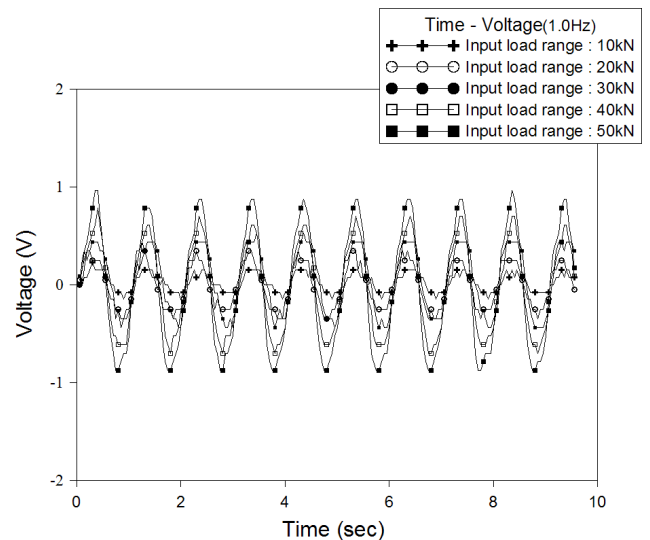
3.2 하중범위 변화 실험

등속하중 실험 결과 등속하중으로 하중을 재하하는 경우 압전소자에서 발생하는 전압이 재하 하중에 비례하여 증가하지 않으므로 하중속도를 고려하여 하중범위를 변화시켜 하중범위 변화에 따라 압전소자에서 발생하는 전압을 평가하였다. 이를 위하여 하중속도가1.0Hz인 경우에 대하여 하중범위를 10~50kN까지 10kN씩 변화시켜 압전소자에서 나타나는 발생전압의 변화를 평가하였다. 실험체에는 정현(sine)하중이 각각의 하중범위당 10회 반복되었다.

그림 9는 하중범위변화에 따라 나타난 강합성 교량 시험체의 하부플랜지 하부와 콘크리트 슬래브 하면에 설치된 압전소자에서 발생된 전압을 나타낸 것이다. 그림 9에 나타난 것과 같이 하중범위 실험 결과 하중범위 변화에 따라 재하하중과 동일한 파형의 전압이 나타나고 있으며, 하중범위의 증가에 따라 실험체에서 발생하는 변형률의 증가로 압전소자에서 발생하는 전압 또한 비례하여 나타나고 있음을 알 수 있다. 등속하중 실험의 경우 시험체에서 발생하는 변형률이 동일하나, 하중범위 변화 실험의 경우 변형률이 시간이 경과하면서 증가함에 따라 발생전압도 증가하였다. 표 4는 하중속도 변화에 따라 압전소자에서 발생한 전압범위의 변화를 나타내었다.



(a) 강합성 교량 시험체 하부플랜지 하면



(b) 강합성 교량 시험체 콘크리트 슬래브 하면

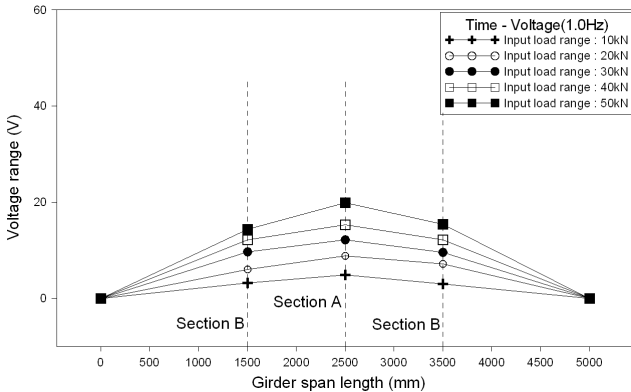
그림 9. 하중범위변화에 따른 시간-전압관계

표 4. 하중범위 변화 실험 발생전압 범위

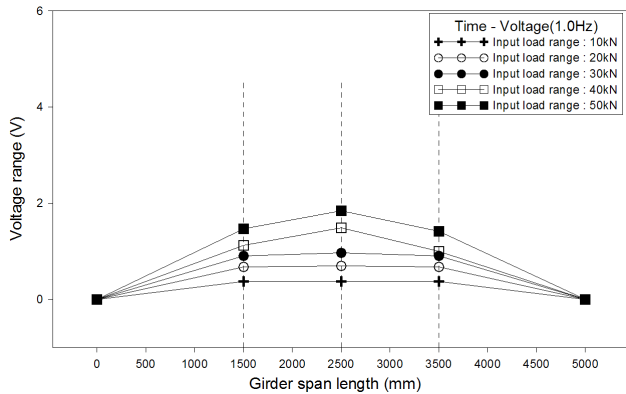
하중범위	압전소자설치 위치	
	하부플랜지 하면 발생전압범위(V)	콘크리트 슬래브 하면 발생전압범위(V)
10.0kN	4.92	0.38
20.0kN	8.80	0.70
30.0kN	12.20	0.96
40.0kN	15.30	1.49
50.0kN	19.89	1.84

그림 10은 시험체에 대한 하중범위가 10~50kN까지 10kN씩 증가하는 경우 하중범위에 따라 강합성 교량 시험체에 설치된 압전소자의 설치 위치에 따라 나타나는 압전소자의 발생전

압의 범위를 나타내었다. 강합성 교량 시험체 하부플랜지 하면에 설치한 압전소자의 경우, 발생하는 전압범위의 분포는 하중에 비례하고 시험체에 작용하는 모멘트 분포에 비례하여 나타나고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 변형률의 변화가 적은 콘크리트 슬래브 하면의 경우 발생하는 전압범위의 변화가 상대적으로 작게 나타났다. 하지만, 전압범위의 분포는 하부플랜지 하면의 경우와 같이 하중과 모멘트 분포에 비례하게 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.



(a) 강합성 교량 시험체 하부플랜지 하면



(b) 강합성 교량 시험체 콘크리트 슬래브 하면

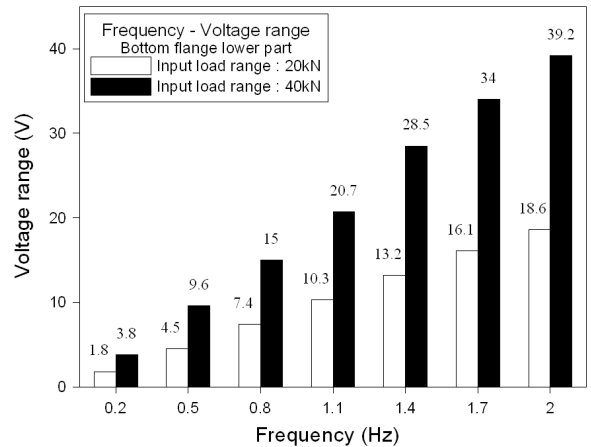
그림 10. 하중범위변화에 따른 교량시험체 위치별 발생전압 범위

### 3.3 하중속도 변화 실험

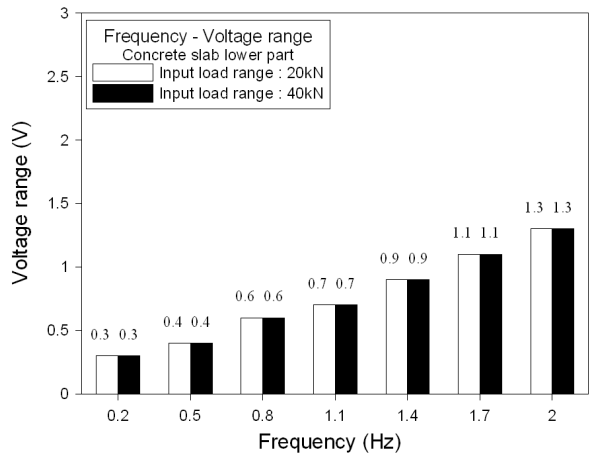
압전소자의 발생전압은 하중범위 뿐만 아니라 하중속도에 영향을 받을 수 있으므로 하중속도에 따라 압전소자에서 발생하는 전압을 평가하였다. 이를 위하여 시험체에 각각 20kN의 하중범위와 40kN의 하중범위의 하중에 대하여 0.2Hz에서 2.0Hz까지 하중속도를 변화하여 하중속도 변화에 따른 발생전압의 변화를 비교하였다. 시험체에 재하된 하중은 정현(sine)하중이 0.3Hz의 하중속도 변화로 각각의 하중속도당 4cycle의 반복하중이 재하 되었다.

하중속도 변화에 따라 강합성 시험체 하부플랜지 하면과 콘

크리트 슬래브 하면에 설치된 압전소자에서 발생하는 전압은 그림 11에 나타내었다. 그림 11은 2.0Hz의 하중속도로 20kN과 40kN의 하중범위의 하중이 재하된 경우 압전소자에서 발생하는 전압범위를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 11에서 동일한 하중속도에서 하중범위가 증가된 경우 발생하는 전압의 크기가 변화하고 있음을 확인 할 수 있다. 그림 11(a)는 실험체 바닥판 하면에 설치된 압전소자에서 발생한 전압이며, 그림 11(b)는 거더 하부플랜지 하면에서 발생한 전압을 나타내고 있다. 바닥판 하면에 설치된 압전소자의 경우 하중에 따른 변형률 변화가 적어 하중이 2배로 증가하더라도 중립축 부근 바닥판 하면에서의 변형률 차이가 상대적으로 적으므로 발생전압 또한 하중속도에 관계없이 유사하게 나타났다. 하지만 거더 하면에 설치된 압전소자에서 발생하는 전압의 경우 하중속도 증가에 따라 발생전압의 크기도 증가하며, 재하하중 범위의 증가에 따라 발생전압의 크기도 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.



(a) 하중속도-발생전압 범위(강거더 하부플랜지하면)



(b) 하중속도-발생전압 범위(바닥판 하면)

그림 11. 하중속도별 발생전압 변화

#### 4. 이론식과 실험결과 비교평가

압전재료가 PCB에 부착된 경우 압전소자에서 발생하는 전압은 압전재료에 작용하는 응력과 변형률에 따라 결정되며 이를 통하여 압전소자에서 발생하는 전압을 계산할 수 있다. 압전소자에서 발생하는 전압을 평가 할 수 있는 해석 모델은 Pin-force 모델, Enhanced pin-force 모델, Euler Bernoulli 모델(Wang, 2001)등이 제시되고 있으며, 본 연구에서는 실험결과 나타난 압전소자의 전압과 해석모델을 통하여 제시된 압전소자의 전압을 비교하였다.

#### 4.1 압전 전압이론식

##### 4.1.1 Pin-force 모델

일반적으로 압전재료는 PCB에 압전재료의 끝부분과 핀(Pin)연결로 부착하여 이용된다. 따라서 압전재료에 작용하는 전단력은 핀지지 선단에서 발생하는 전단력에 초점을 맞춰 설계하게 된다. 압전재료와 PCB의 기계적 힘 상관관계를 나타낸 것을 Pin-force 모델이라 한다. 두 재료를 결합한 압전재료와 PCB의 거동은 부재의 두께의 변화에 따라 응력이 선형으로 증감하는 오일러 빔 이론을 따르는 것으로 가정한다. 오일러 빔 이론에 따르면 응력은 두께에 대해 일정한 값을 갖기 때문에 압전재료의 굽힘 강도변화는 고려하지 않으며, 또한 PCB가 압전재료의 강도보다 5배 이상 큰 경우에는 해석이 제한된다. 그림 12는 unimorph방식 압전재료의 pin-force모델과 그 응력상태를 나타낸 것이다.

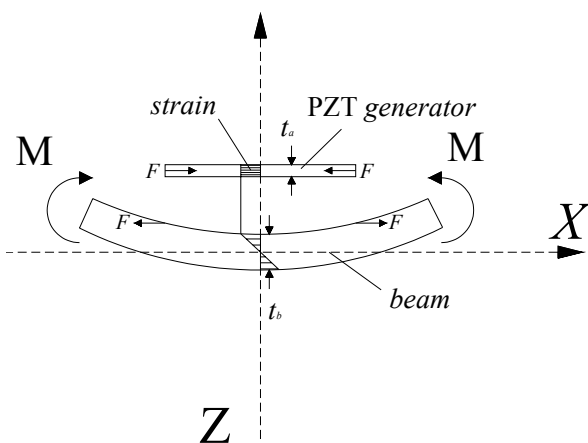


그림 12. Pin-force model을 적용한 unimorph형 압전소자(Wang, 2001)

그림 12에 나타난 것과 같이 압전재료가 PCB의 위에 접합되어 외부모멘트에 의해 pin-force가 작용하는 경우, 압전재료에

작용하는 응력  $\sigma_a$ 에 대한 변형률  $\epsilon_a$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 폭 b에 대하여 식(2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서, F는 모멘트가 압전재료에 작용하는 힘이다. PCB에 작용하는 변형률  $\epsilon_b$ 는 PCB의 곡률  $\kappa$ 를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 압전재료와 PCB가 일체로 거동한다고 가정할 때, 두 부재의 변형률은 동일하여야 한다. 따라서 식(2)와 식(3)에 따라 PCB의 곡률은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 외부 모멘트에 대하여 식(4)는 식(5)와 같이 표현 할 수 있다. PCB의 단면 2차모멘트를  $I_b$ 라고 하고, 식(4)를 식(5)에 적용하면 식(5)는 식(6)과 같이 나타낼 수 있고, 압전재료의 변형률과 응력도는 식(7), 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 압전재료에서 발생하는 응력에 의하여 압전재료 폴링면(Poling surface)에 발생하는 전압은 식(9)와 같다. 식(8)을 식(9)에 대입하여 모멘트에 관한 식(10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $g_{31}$ 은 압

전재료의 전압상수,  $\psi$ 는  $\frac{E_b t_b}{E_a t_a}$ 이다(Wang, 2001).

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} \tag{1}$$

$$\epsilon_a = \frac{F}{E_a b t_a} \tag{2}$$

$$\epsilon_b = \frac{-t_b}{2} \kappa \tag{3}$$

$$\kappa = -\frac{2F}{E_a b t_a t_b} \tag{4}$$

$$M_b = M - F \frac{t_b}{2} = (E_b I_b) \kappa \tag{5}$$

$$F = \frac{6 E_a t_a M}{3 E_a t_a t_b - E_b t_b^2} \tag{6}$$

$$\epsilon_a = \frac{6 M}{b(3 E_a t_a t_b - E_b t_b^2)} \tag{7}$$

$$\sigma_a = \frac{6 E_a M}{b(3 E_a t_a t_b - E_b t_b^2)} \tag{8}$$

$$V = g_{31} t_a \sigma_a \tag{9}$$

$$V = \frac{6 g_{31} M}{b t_b (3 - \psi)} \tag{10}$$

##### 4.1.2 Enhanced pin-force 모델

Enhanced pin-force 모델은 Pin-force모델을 보완하여 압전재료의 굽힘 강성을 고려한 모델이다. 그림 13과 같이 압전재료에 작용하는 모멘트가 중요하며, 압전재료 두께방향의 응력과 변형률은 PCB의 중립면으로부터의 변형양상을 따른다. 그림 13에서 PCB에만 작용하는 모멘트  $M_b$ 는 식 (11)과 같

으며, pin-force모델의 가정에 따라  $M_b = M_a = (E_a I_a)\kappa$  가 성립하고, 식(3)과 식(4)에 따라 작용하는 힘  $F$ 를 식(12)와 같이 구할 수 있다. 식(11)과 식(12)를 연립하여 곡률( $\kappa$ )를 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 동일한 방법으로 변형률( $\epsilon_a$ )과 응력( $\sigma_a$ )을 식(14), 식(15)와 같이 각각 유도하여 나타낼 수 있다. PCB와 압전재료의 두께비가  $T = \frac{t_b}{t_a}$  일 때, 식(14)에서 구한 응력을 발생전압식에 적용하면 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

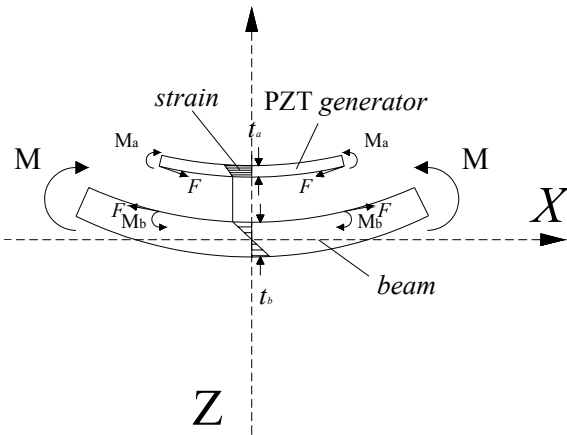


그림 13. Enhanced pin-force model을 적용한 unimorph형 압전소자 (Wang, 2001)

$$M_b = M - F \frac{t_b}{2} - M_b = (E_b I_b)\kappa \quad (11)$$

$$F = -\frac{E_a b t_a t_b}{2} \kappa \quad (12)$$

$$\kappa = \frac{12M}{-6E_a b t_a t_b^2 + E_a b t_a^3 + E_b b t_b^3} \quad (13)$$

$$\epsilon_a = \frac{6t_b M}{6E_a b t_a t_b^2 - E_a b t_a^3 - E_b b t_b^3} \quad (14)$$

$$\sigma_a = \frac{6E_a t_b M}{3E_a b t_a t_b^2 - E_a b t_a^3 - E_b b t_b^3} \quad (15)$$

$$V = \frac{6g_{31} T M}{b t_a (3T^2 - 1 - \psi T^2)} \quad (16)$$

#### 4.1.3 Euler Bernoulli 모델

Euler-Bernoulli 모델은 Piezoelectric material의 거동 해석 시 가장 정확도가 높은 해석법으로, Piezoelectric material과 PCB가 완전 결합되어 합성거동하고, 그림 14와 같이 두 부재가 새 중립축에 대해 변형하는 것으로 가정한다. Piezoelectric material 상부에서 중립축까지의 거리는 식

(17)과 같이 나타낼 수 있으며, 또한 발생전압 계산을 위한 Piezoelectric material의 평균변형률은 식(18)과 같다. 이때 두 부재의 단면2차모멘트는 각각 식(19), 식(20)과 같으므로, 식(19), 식(20)을 식(18)에 대입하여 변형률에 관해 정리하여 식(21)와 같이 나타낼 수 있다. 응력-변형률 관계에 따라 식(21)은 식(22) 같이 나타낼 수 있다. 따라서 응력과 변형률에 따라 발생전압을 식(23)과 같이 나타낼 수 있다.

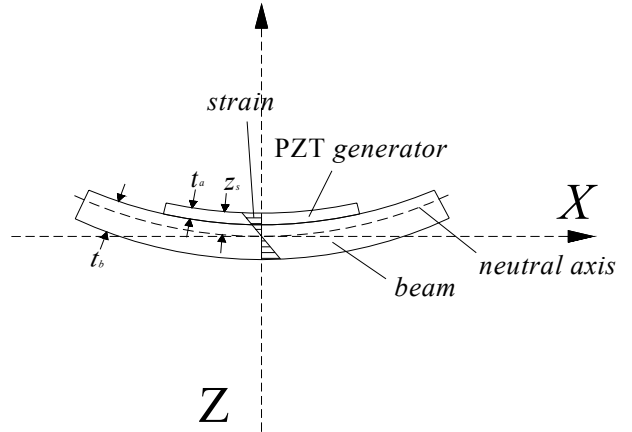


그림 14. Euler Bernoulli를 적용한 unimorph형 압전소자 (Wang, 2001)

$$z_s = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \frac{E_i}{E_r} A_i}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_r} A_i} = \frac{\frac{t_a}{2} t_a \frac{E_a}{E_b} + (t_a + \frac{t_b}{2}) t_b}{t_a \frac{E_a}{E_b} + t_b} \quad (17)$$

$$\epsilon_a = \frac{M}{E_a I_a + E_b I_b} (Z_s - \frac{t_a}{2}) \quad (18)$$

$$I_a = \int_{z_s + a}^{z_s} b z^2 dz = \frac{1}{3} b [z_s^3 - (z_s - t_a)^3] \quad (19)$$

$$I_b = \int_{-(t_a + t_b - z_s)}^{z_s - t_a} b z^2 dz = \frac{1}{3} b [(t_a + t_b - z_s)^3 - (z_s - t_a)^3] \quad (20)$$

$$\epsilon_a = \frac{6ME_b t_b (t_a + t_b)}{b [E_a^2 t_a^4 + E_b^2 t_b^4 + 2E_a t_a E_b t_b (2t_a^2 + 3t_a t_b + 2t_b^2)]} \quad (21)$$

$$\sigma_a = \frac{6ME_a E_b t_b (t_a + t_b)}{b [E_a^2 t_a^4 + E_b^2 t_b^4 + 2E_a t_a E_b t_b (2t_a^2 + 3t_a t_b + 2t_b^2)]} \quad (22)$$

$$V = -\frac{6g_{31} M \psi (1 + T)}{b t_a [1 + \psi^2 T^2 + 2\psi (2 + 3T + 2T^2)]} \quad (23)$$

#### 4.2 실험결과 및 이론식을 통한 압전전압 비교

그림 15는 시험체 하부플랜지 하면에 부착된 압전소자에서 하중범위가 50kN이며 하중속도는 1.0Hz인 조건에서의 실험 결과와 Pin-force 모델, Enhanced pin-force 모델, Euler



Bernoulli 모델을 통하여 이론적으로 계산된 전압을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 15에서 이론해를 통하여 계산된 결과는 강합성 교량 시험체에 부착된 변형률게이지를 통하여 계측된 변형률을 이용하여 압전소자에 작용하는 모멘트를 산정한 후 압전소자에서 발생하는 전압을 계산하였다.

그림 15에서 재하하중범위 50kN의 하중을 1.0Hz로 재하한 경우 하부플랜지 하면에 부착한 압전소자에서 발생하는 전압의 범위는 19.89V로 나타났으며, Pin-force 모델로 계산된 압전소자의 전압범위는 45.05V, Enhanced pin-force 모델로 계산된 압전소자의 전압범위는 53.41V로 평가되어 실제 구조물에서 나타난 압전소자의 전압범위가 이론식과 비교하여 적게 평가되었으나 Euler Bernoulli 모델로 계산된 압전소자의 전압범위는 21.01V로 다른 이론해와 비교하여 실험값과 유사한 결과를 가지는 것으로 나타났다.

표 5는 시험체 하부플랜지 하면에 부착된 압전소자에서 발생한 전압을 Pin-force 모델, Enhanced pin-force 모델, Euler Bernoulli 모델을 통하여 계산된 전압과 비교하여 평가한 것이다. Pin-force 모델과 Enhanced pin-force 모델의 경우 압전소자에 작용하는 응력분포에 따라 발생전압이 결정되나 본 실험에서 적용한 압전소자의 압전재료와 PCB에서 나타나는 전압이 실제 구조물에서 발생하는 변형률 변화속도를 전압으로 변환되는 과정에서 크게 평가되어 실험결과에서 나타난 전압에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 Pin-force 모델과 Enhanced pin-force 모델의 경우 강합성 교량 시험체와 비교하여 압전소자의 두께가 적고 압전소자에 작용하는 작용 모멘트는 계측결과로부터 유도되었기 때문에 해석 결과와 오차가 발생할 수 있다. 또한, 제안식의 경우 압전재료와 PCB만을 고려한 경우로 강합성 교량과 압전재료의 단면적의 차이가 매우 크므로 제안식으로 계산된 전압과 차이가 나타나는 것으로 판단된다. Euler-Bernoulli 모델의 경우 압전소자의 단면과 압전소자가 부착된 단면을 일체화된 단면으로 환산하여 발생전압을 평가하므로 실험결과와 가장 유사한 결과를 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

본 연구에 사용된 압전소자는 압전재료와 PCB가 부착된 형태로 이를 강합성 교량 시험체에 부착한 형태이다. 압전소자에서 발생하는 발생전압의 경우 압전재료와 PCB의 부착정도에 따라 변화할 수 있다. 압전재료와 PCB가 완벽하게 일체화 할 경우 압전재료에서 발생하는 전력이 최대화될 수 있으며, 압전소자가 부착된 PCB와 실험체간의 완벽한 일체화가 이루어져야만 최대 전력효과를 기대할 수 있다. 본 연구의 경우 압전소자와 실험체의 부착을 변형률 센서의 부착방법에 따라 압전소자를 실험체에 부착하였다. 그러나 실험과정에서 발생 가능한 압전재료와 PCB 그리고 강합성 교량 시험체간의 부착성 문제

는 전압이 변화하는 원인이 되고 이에 따라 이론식과 실험결과의 차이가 발생할 수 있다고 판단된다. 따라서 압전재료와 구조물간의 완벽한 부착을 확보할 수 있는 부착방법들이 고안되고 평가되어야 효과적인 압전효율을 예측할 수 있으며 압전효율을 극대화 할 수 있을 것이다.

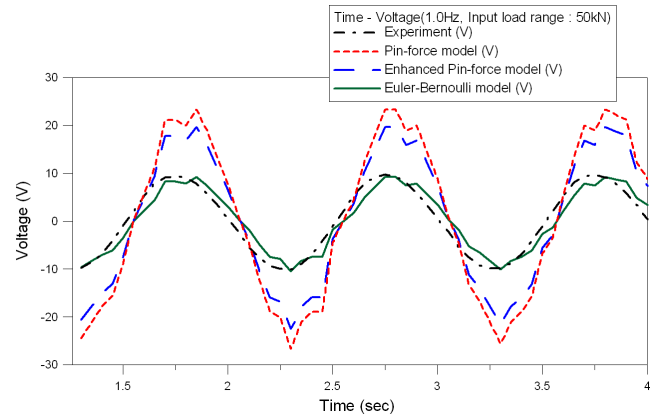


그림 15. 압전전압의 실험결과와 이론 전압비교

표 5. 실험결과와 이론 전압범위의 비교(하부플랜지 하면)

하중 재하 범위 (kN)	실험 전압 (V)	Pin-force(V), 실험/이론값	Enhanced pin-force(V), 실험/이론값	Euler-Bernoulli(V), 실험/이론값
10	4.92	12.20 (40.3%)	14.47 (34.0%)	5.69 (56.5%)
20	8.80	19.70 (44.7%)	23.37 (37.7%)	9.19 (95.8%)
30	12.20	27.22 (44.8%)	32.27 (37.8%)	12.69 (96.1%)
40	15.30	33.78 (45.3%)	40.05 (38.2%)	15.76 (97.1%)
50	19.89	45.05 (44.2%)	53.41 (37.24%)	21.01 (94.7%)

## 5. 결론

본 연구에서는 강합성 교량에 설치한 압전소자의 압전효율을 분석하기 위하여 강합성 교량 시험체를 대상으로 하중효과에 따라 압전소자에서 발생하는 전압을 분석하여 압전소자를 구조물에 적용하였을 때 나타나는 압전특성을 평가하고 압전효율을 평가할 수 있는 제안식과 실험결과를 비교하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 강합성 교량 시험체에 설치한 압전소자의 압전효과는 하

증증가에 따라 압전소자에 작용하는 변형률이 증가하더라도 시간에 따른 변화율(변형률 속도, strain rate)의 변화가 없을 경우 압전소자에서 발생하는 전압은 재하하중에 비례하여 증가하지 않는 것으로 나타났다. 하지만 변형률 속도가 발생하는 경우 하중범위 증가에 따라 압전소자에 발생하는 변형률의 시간적 증가로 압전소자에서 발생하는 전압 또한 하중범위증가에 비례하여 증가하였다.

- (2) 압전소자의 변형률 속도가 발생하는 경우, 압전소자가 설치된 위치의 변형률 분포에 따라 압전소자에서 발생하는 전압은 이에 비례하였다. 또한 시험체의 길이방향에 따라 시험체에 작용하는 모멘트 분포가 변화하여 변형률이 비례할 경우 단면의 변형률 변화와 같이 길이에 따라 변화된 변형률에 비례하여 압전소자에서 발생하는 전압이 변화하는 것으로 나타났다.
- (3) 실험체에 대한 하중속도가 변화하는 경우 압전소자에서 발생하는 전압은 하중속도 증가에 따라 발생하는 전압의 크기가 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.
- (4) 시험체 하부플랜지 하면에 부착된 압전소자에서 발생한 전압을 Pin-force 모델, Enhanced pin-force 모델, Euler Bernoulli 모델을 통하여 계산된 전압과 비교하여 평가하였다. Pin-force 모델, Enhanced pin-force 모델을 통하여 평가된 압전소자의 발생전압은 실험결과에서 나타난 전압에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 강합성 교량과 압전재료의 단면적의 차이가 매우 크므로 압전소자에서 발생하는 변형률과 응력을 효과적으로 평가하지 못하고, 압전소자와 시험체간의 부착성의 문제에 따른 것으로 판단된다. 하지만 Euler Bernoulli 모델은 압전소자의 단면과 압전소자가 부착된 단면을 일체화된 단면으로 환산하여 압전소자의 발생전압을 평가하므로 실험결과와 유사한 결과를 나타내고 있음을 알고 있다. 따라서 Euler Bernoulli 모델을 통하여 압전소자를 구조물에 적용하였을 때 나타나는 압전효율 특성을 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 압전소자를 실제 구조물에 적용하였을 때 나타나는 전기적 응답을 평가한 것으로 실용화에 필요한 전류 및 전력을 측정하고 평가하지는 못하였다. 압전소자에서 발생하는 전력은 전압의 제곱에 비례하고 저항에 반비례하므로 회로 내부의 저항을 감소시켜 낮은 저항에서 임피던스 정합을 유도하

고 g31, d31 등의 압전재료 고유성질을 개선하여야 실제 구조물에 적용하여 필요한 목적에 사용하기 위한 전력으로 활용 할 수 있을 것이다. 따라서 재료특성이 개선된 압전소자의 적용에 대한 연구와 함께 압전소자에서 나타나는 전기적 특성을 합리적으로 이용할 수 있는 전류와 전력에 관한 기술융합적 연구들도 진행되어야 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래사회기반시설 산학연공동사업단의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

에너지 관리공단(2010) 신·재생에너지 통계정보 시스템 홈페이지, (<http://konesis.kemco.or.kr/>).

요업기술원(2006) 압전 세라믹을 이용한 Automatic Power Generation System 기술개발에 관한 연구, 산업자원부 보고서.

이형규, 이우성, 강형원, 유명제(2009) 마이크로 에너지 변환 지능형 세라믹 소재 기술, 세라미스트, 제12권, 제4호, pp. 61-69.

Dong, B. and Li, Z. (2005) Cement-based piezoelectric ceramic smart composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, pp.1363-1371.

Inman, D.J. and Cudney, H.H. (2000) *Structural and Machine Design Using Piezoceramic Materials - A Guide for Structural Design Engineers*, NASA Langley Center.

Mateu, L. and Moll, F. (2006) Appropriate Charge Control of the Storage Capacitor in a Piezoelectric Energy Harvesting Device for Discontinuous Load Operation, *Sensors and Actuators*, Vol A, No. 132, pp.302-310.

Wang, K. (2001) *Modeling of Piezoelectric Generator on a Vibrating Beam. For completion of Class Project in ME 5984 Smart Materials*, Virginia Polytechnic Institute and State University.

(접수일자 : 2010. 5. 1/ 심사일 2010. 5. 20/  
게재확정일 2010. 10. 5)