

## 녹색교통망을 위한 진동력 발전 기초 실험연구

### A Basic Experimental Study on Vibration Power Generator for A Green Traffic Network

조병완\* · 이윤성\*\* · 김영지\*\*\* · 박정훈\*\*\*\*

Jo, Byung-Wan · Lee, Yun-Sung · Kim, Young-Ji · Park, Jung-Hoon

#### Abstract

A Basic experimental study for the development of vibration-power generation system from the vibration energy of urban infrastructure, such as a railroad, highway, and bridges, was carried out to harvest electricity from moving vehicles. Starting with the proposal of vibration power generator which converts vibration energy to an electric power by using self-induction technology, the research explains the basic concept of self-induction technology and the dynamic characteristics of a vibration power generator. Also, in order to analyze the correlation of an electromotive force from vibration power generator which depends on external force and vibration speeds, many indoor experiments with various variables were achieved. Based on the experimental results, a vibration power generator system's ability were analyzed. With those results, basic data of vibration power generator system to acquire the maximum available power was confirmed.

**Keywords :** vibration energy, vibration power generator system, vibration power generator, self-induction, urban infrastructure

#### 요 지

본 논문에서는 도로와 철도에서 자동차와 열차주행시에 발생하는 진동에너지를 건축·토목 구조물에 활용 가능한 전기에너지로 변환하는 진동력 발전시스템 인프라 구축을 위한 기초·개념에 대해 연구하였다. 본 연구에서는 자기유도기술을 활용하여 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 진동력 발전장치를 제안하고, 자기유도기술의 기본 원리 및 진동력 발전장치의 동적 특성에 대해 설명하였다. 마지막으로 외력과 진동속도에 따라 진동력 발전장치에서 발생하는 기전력의 세기와 상관관계를 분석하기 위해 다양한 변수를 두고 실내실험을 수행하였고, 이러한 실험결과를 토대로 시험용 진동력 발전장치의 적용성과 효율성을 분석하여, 최대 가용 전력을 획득하기 위한 진동력 발전시스템의 최적설계에 대한 기초 자료를 확보하였다.

**핵심용어 :** 진동에너지, 진동력 발전시스템, 진동력 발전장치, 자기유도기술, 건축·토목 구조물

#### 1. 서 론

최근 고유가와 지구온난화에 따른 저탄소산업 등 국내·외 환경변화에 따라, 녹색 신·재생 에너지가 각광을 받고 있다. 여기서 신·재생 에너지는 태양광, 풍력, 바이오, 지열 등 8개 재생에너지분야와 수소에너지, 연료전지, 석탄액화가스화의 신에너지 3개 분야로, 재생에 가능한 도시·환경속의 에너지를 변환시켜, 화석연료에너지를 대체하는 청정녹색 에너지기술의 모두를 의미한다.

전 세계적인 녹색뉴딜정책의 붐을 따라, 대한민국 정부는 저탄소 녹색성장 기조 아래 그린홈/그린스쿨, 녹색교통망 같은 신개념의 녹색SOC(사회기반시설)구축을 계획하고 있다.

녹색교통망은 탄소를 배출하지 않는 수소·이차연료전지

차량이나, 하이브리드카, 청정에너지버스와 같은 녹색교통수단의 이용 외에도 자전거 및 녹색가로수를 통한 유산소 생성량과 포장도로나 도로교통시설물의 열, 온도, 진동, 압력 등 폐기되는 에너지를 회수하는 에너지 하베스팅 개념의 교통망으로 정의할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 도로·교량·철도 관련구조물의 차량 이동하중으로 인한 진동에너지를 회수하여 무공해 녹색전기에너지로 변환하기 위하여, 자기유도기술개념의 진동력 발전 가능성을 검증하고, 자동차와 열차주행에 따른 진동속도와 외력의 상관관계, 진동력 발전시스템의 자력의 세기와 전력생산 가능성에 대한 기초연구를 수행하고, 제안된 진동력 발전 장치를 건축·토목구조물중의 하나인 교량(성동교)에 설치함으로써 실제 구조물의 상시 진동을 이용하여 전기에너지를 생산하는 진동력발전 시스템

\*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 정교수 · 공학박사 (E-mail : joycon@hanmail.net)

\*\*한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : nike-shoo@hanmail.net)

\*\*\*한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : heakmasa@nate.com)

\*\*\*\*정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (E-mail : goolss@nate.com)

의 실용성과 실효성을 보이고, 미래 녹색교통망의 에너지 하베스팅 개념을 정립하고자 한다.

현재 진동을 이용하여 전기에너지를 생산하는 방법에는 가장 대표적인 것으로 압전 효과를 이용하는 기술(금명훈, 2003; 김동성 등, 2004; 박종수 등, 2006; 곽문규 등, 2008, 최범규 등, 2008)과 이 밖에 자기 유도를 이용한 기술, 정전용량의 변화를 이용한 기술, 그리고 진동을 터빈의 회전 에너지로 변환시켜 발전하는 기술 등 크게 4종류로 나눌 수 있으며, 본 연구에서는 도로나 철도 관련 구조물의 차량주행에 따른 진동하중을 전자기유도를 통해 전기에너지를 생산하고자 한다.

## 2. 진동력 발전의 개요

전자기유도에 대한 기본 원리는 Fig. 1과 같이 코일에 자속을 변화시킬 때, 코일에서 기전력이 발생하는데 이 현상을 전자기유도라 한다. 전류가 흐르면 주위에 자기장이 생기는 것처럼, 코일(도체)주위에 자기장이 발생하면 전자의 움직임이 발생한다. 이것이 곧 전자의 흐름이 되어 전류가 만들어지는 것이다(Jones, 2001). 이러한 전자기 유도원리를 이용하여 실제 건축-토목 구조물에서 상시적으로 발생하는 상하 미소진동을 이용하여 종래의 회전 운동식 발전기와 달리 영구자석의 상하왕복운동으로 전기를 발생시키는 것이 진동력 발전 시스템이다. 진동력 발전 시스템은 구조물의 진동에너지를 이용하므로 동력이 필요 없으며 본 논문에서 제안된 진동력 발전장치는 기존의 재생에너지인 풍력, 태양력, 조력

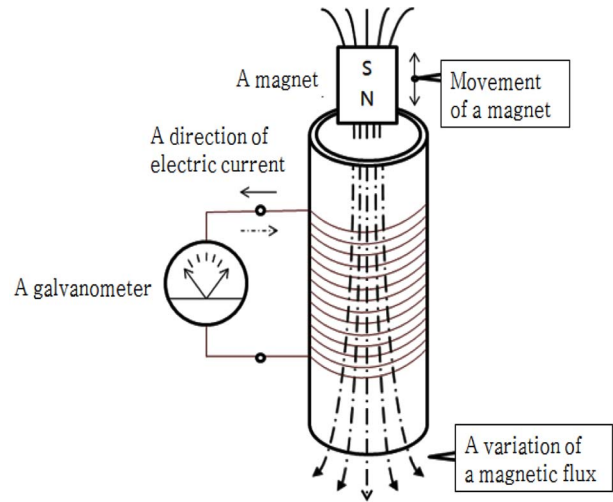


Fig. 1. Electromagnetic induction

등과 달리 임의의 위치에 독립적으로 설치할 수 있고, 외부적 환경(일기변화)에 거의 무관하게 항상 일정한 발전량을 가지며, 반영구적인 수명을 가지는 등의 장점을 가지고 있다.

## 3. 진동력 발전시스템의 가능성

진동력 발전시스템은 건축-토목 구조물에서 발생하는 상시 진동을 사용하여 발전하는 방식이므로 진동력 발전장치에 입력되는 진동에너지의 수준을 산정하여 진동력 발전 시스템의 가능성을 확인할 필요가 있다. 진동력 발전장치의 동특성을 결정하기 위한 차량이나 열차 주행시의 진동의 크기와

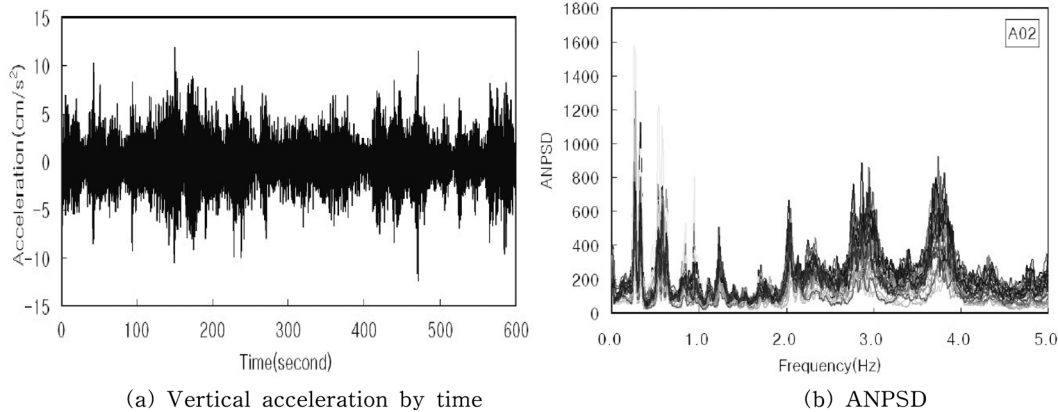


Fig. 2. Measurement data of Seohae Grand Bridge

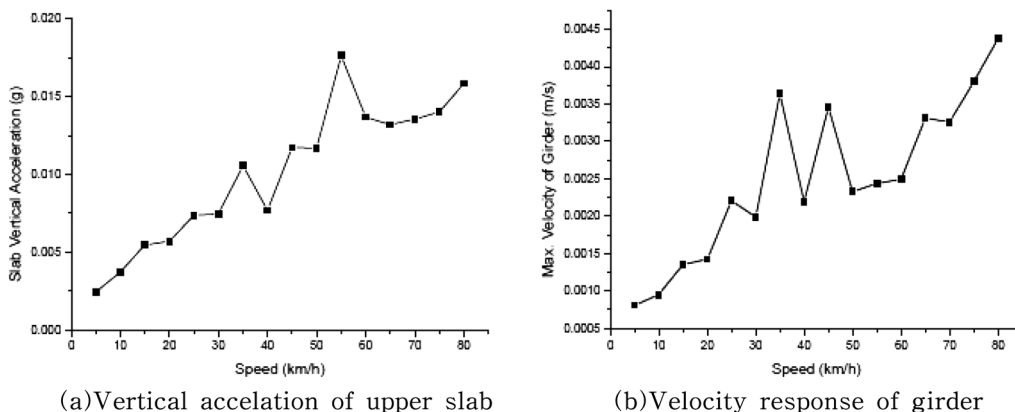


Fig. 3. PSC U-type girder bridge of dynamic response

주파수대를 파악하기 위하여 평상시 서해대교와 경량전철 주행에 따른 PSC U형 거더 교량의 계측자료를 확보하여 Fig. 2, 3에 정리하였다(박종칠 등, 2006; 김성일 등, 2006). Fig. 2는 서해대교 측경간 하행측 보강형(A02)의 수직방향 가속도 시간이력과 같은 위치에서 30시간 동안 측정된 가속도에 대한 ANPSD를(박종칠 등, 2006), Fig. 3은 철도교량에서 경량전철의 주행하중으로 인해 발생하는 진동을 알기 위해 PSC U형 거더 교량의 경량전철 주행에 의한 동적응답을 나타낸 것이다(김성일 등, 2006).

Fig. 2, 3을 통해 진동에너지 발생시키는 상시 진동이 발생하고, 진동력 발전장치의 설계가 용이한 1[Hz] 이상의 주파수 영역(최남섭 등, 2003)에서도 많은 진동이 발생한다는 것을 알 수 있으며, 이를 통해 진동력 발전시스템의 실제 적용 가능성을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3을 보면 주행 중인 열차의 속도가 클수록 발생하는 진동에너지 역시 커진다는 것을 알 수 있으며 진동력 발전 시스템을 열차의 평균주행속도가 빠른 부분에 설치하는 것이 더욱 효과적이며, 많은 전기에너지를 생산할 수 있다는 결론에 이른다.

#### 4. 진동력 발전장치 제작

본 연구에서는 자기유도기술을 활용하여 도로·교량·철도관련 구조물에서 자동차와 열차주행시에 발생하는 진동 에너지를 전기로 변환하는 개념·방법에 대한 기초실험을 위해 Fig. 4와 같은 진동력 발전장치를 설계하였다. Fig. 2를 통해 0.5[Hz]의 저주파진동에서 잘 작동할 수 있도록 하기 위하여 기초실험용 진동력 발전장치는 막대모양의 아크릴관 안에 상호 동일한 극으로 대향 결합된 네오디뮴 자석2개와 상, 하 각 끝 지점에 자석의 척력을 활용하기 위한 네오디뮴 자석을 각 1개씩 부착하였다. 아크릴관 외부에는 코일을 설치하여 전자기유도방식을 통해 기전력이 발생할 수 있게 하였다. Table 1은 진동력 발전장치에 사용된 네오디뮴 자석의 물리적 특성을 나타낸다.

이 진동력 발전장치는 외부의 운동에너지로 인해 내부에 삽입되어 있는 네오디뮴자석이 상하로 왕복운동을 하게 되며, 각 끝지점에 삽입된 자석과 상하왕복운동하는 자석간에 상호 척력이 발생하고, 내부의 네오디뮴자석은 효과적으로 매우 빠르게 왕복운동을 하게 된다(연구자석간의 척력을 이용하므로 미세한 진동으로도 내부 네오디뮴자석이 효과적으

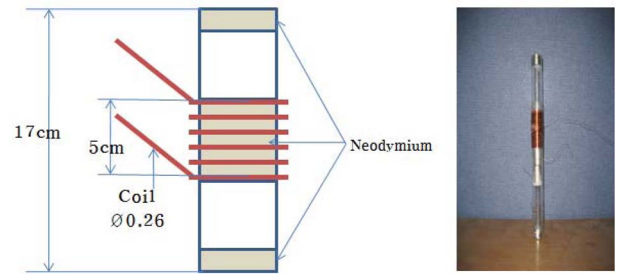


Fig. 4. Vibration power generation device

Table 1. Physical Properties

Curie Temperature	310~370°C
Maximum Operating Temperature	80~180°C
Resistivity	160 μΩ · cm
Hardness	560~580 Hv
Density	7.4 g/cm <sup>3</sup>
Temperature Coefficient of Br	-0.12~-0.10%/°C
Temperature Coefficient of iHc	-0.6%/°C

로 움직이게 된다.). 내부 네오디뮴자석의 상하왕복운동을 통해 자속의 변화가 발생하게 되고, 전자기유도에 의해 외부에 설치한 코일에는 유도기전력이 발생한다(Amirtharajah et al., 1998).

#### 5. 실험 방법

자동차와 열차주행시에 발생하는 외력의 크기는 주행속도와 차량·열차의 하중에 따라 달라지고, 다양한 수직하중에 의해 전달되는 진동에너지에 따라 진동력 발전시스템에서 발생하는 유도기전력의 크기 또한 다르다. 따라서 진동력 발전장치에 가해지는 외부에너지와 진동력 발전장치의 진동속도와 발생하는 유도기전력의 상관관계를 분석하는 것이 중요하다. 이러한 진동력 발전시스템의 구현에 필요한 기초데이터 확보를 위한 실험을 위하여 먼저 Fig. 5와 같은 실험장치를 설계, 제작하였다. 실험 장치에는 도로·교량·철도관련 구조물에서의 반복적인 차량하중을 묘사하기 위하여 12V의 DC모터에 회전판을 연결하여 진동력 발전장치에 지속적인 외력을 가해줄 수 있게 하였고, 모터에 연결되는 회전판의 무게를 달리하여 외력의 변화를 줄 수 있게 하였

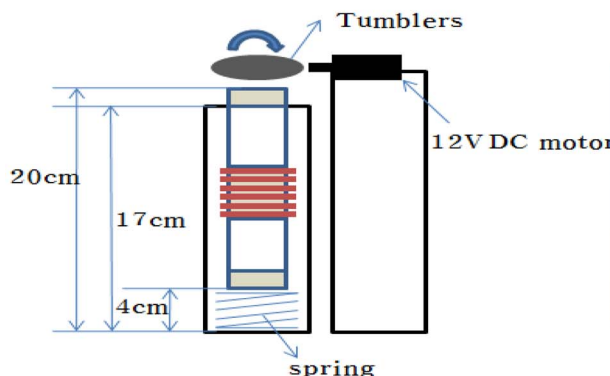


Fig. 5. Vibration power generation experimental device

다. 또한 실험장치의 밑면에는 스프링이 부착되어있어, 외력을 받은 진동력 발전장치는 위에서 가해주는 회전판의 압력과 밑면의 스프링의 탄성력에 의해 상하로 왕복운동을 하게 된다. 12V의 DC모터에는 스피드 조절 장치가 연결되어있어, 진동력 발전장치의 상하 왕복운동의 속도를 조절 가능케 한다.

도로교통진동은 도로의 구조, 노면의 조건 및 차속, 통행량 차종 등 여러 조건에 의해 변화된다. 식 (1)은 이러한 진동 변화요소들에 대한 사항들을 고려하여 실험적결과를 통해 일본 건설성에서 제시한 진동에측식이다(박진형, 2004).

$$L_{10} = a \log(\log Q^*) + b \log V + c \log M + d + \alpha_o + \alpha_s + \alpha_f dB \quad (1)$$

여기서,  $Q^*$ 는 500초당 1차선당 등가교통량[대/500초/차선],  $V$ 는 평균주행속도[km/h],  $M$ 은 상하차선 합계의 차선수, a,b,c,d는 도로구조에 대한 계수,  $\alpha_o$ 는 노면의 평탄성에  $\alpha_s$  의한 보정치,  $\alpha_f$ 는 도로구조에 의한 보정치, 는 탁월주파수에 의한 보정치이다. 식 (1)을 보면 도로교통진동량과 등가교통량 [ $Q^*$ ], 평균주행속도[V]는 서로 비례한다는 것을 알 수 있다. 실험을 단순화 하기 위하여 교통량을 회전판이 진동력 발전장치에 가해주는 외력, 평균주행속도를 12VDC모터의 회전수[RPM]로 대체하였다. 등가교통량의 경우 통행하는 차량의 수이므로 통행량과 차량의 수는 비례하고, 통행량이 많을수록 그만큼 도로에 가해지는 하중역시 증가한다고 볼 수 있다. 즉, 차선이 같을 경우 통행량이 두배일 경우 통행하는 차량의 수 역시 2배이므로 도로에 가해지는 하중역시 2배라 볼 수 있다. 따라서 본 실험에서는 12V-DC모터에 무게가 다른 회전판을 연결하여 진동력 발전 장치에 가해주는 외력을 4.9N-19.6N으로 변화하여 실험하였다. 또한 도로의 한 지점을 A라 했을 때 평균주행속도[V]가 클수록 A지점을 통과하는 시간이 짧을 것이다. 차량의 통과속도가 빠르다면 그만큼 A지점에서 발생하는 진동의 주기 역시 빠르므로, 진동력 발전장치에 전달되는 진동에너지의 전달 속도가 빠르다는 것이며, 이것을 12V-DC모터의 회전수를 RPM60-RPM240으로 조절하여 표현하였다. 이번 기초실험의 목적은 진동의 발생시점에서 진동력 발전장치에 도달되는 에너지의 양이 아닌 단순히 실제 진동력 발전장치에 가해지는 진동에너지의 크기와 진동속도의 변화에 따라 발생하는 유도기전력과의 상관관계를 분석하려는 것으로써 위의 방법과 같이 하중의 크기와 진동의 속도를 실험에 용이하게 하였으

며, 외력의 크기와 진동속도를 제외한 나머지 조건은 모두 동일하다고 가정하였다.

Fig. 6은 진동력 발전 장치의 구조와 동적 특성을 나타낸다. Fig. 6에서 점선모양의 화살표는 자석의 자력방향을 나타내는데, 진동력 발전장치에 외부에너지가 가해지면 내부에 삽입된 자석은 양 끝단에 부착되어 있는 자석과의 척력으로 인해 가해진 에너지에 비해 더 많은 왕복운동을 하게 되므로, 진동에너지를 전기에너지로 변환하기에 매우 효율적인 구조이다.

a-b-c-d는 코일권선이며, 코일권선 내부에 원형 네오디뮴자석이 배열되어 있어, 자석이 상하 왕복운동을 함으로써 전자기유도에 의해 유도기전력이 생성된다. 여기서 사용한 코일의 길이 L은 자속( $\Phi$ )의 방향과 직각인 권선의 길이로써,

$$L = \pi \times \text{아크릴관과의 외경} \times \text{코일권선수} \quad (2)$$

로 볼 수 있고,  $\overline{ab}$ 와  $\overline{cd}$  부분은 자속과 직각의 방향을 이루지 않으므로 기전력의 생성에 기여하지 못하는 권선부분이다(박창욱, 1996; Jones, 2001).

도로 및 철도에서 자동차와 열차주행시에 발생하는 진동에너지를 전기로 변환하는 진동력 발전시스템구현을 위한 기초실험에서는 자력세기에 따른 유도기전력의 세기를 비교하기 위하여 진동력 발전장치에  $\phi 20$ ,  $\phi 30$ ,  $\phi 40$ 의 외경을 갖는 네오디뮴 자석을 삽입하여 3개의 실험체를 제작하였고, 진동력 발전장치에 가해지는 외부에너지와 진동속도에 의해 발생하는 유도기전력의 세기를 비교하기 위하여 각각의 실험체에 대하여 진동속도와 외력의 크기를 달리하여 발생하는 유도기전력을 관찰하였다.

Table 2는 자력의 세기( $\phi 20$ ,  $\phi 30$ ,  $\phi 40$ )에 따라 진동속도(RPM60, 120, 180, 240)와 외력(4.9N, 9.8N, 14.7N, 19.6N)의 변화를 주어 진동력 발전장치에서 발생한 유도기전력의 세기와 전류, 전력 값을 기록한 것이고, Table 3은 실험에 사용한 재원을 표시한 것이다. 실험은 각각에 대해 500회를 실시하였고, 표에 나타난 것은 평균값을 산정한 것이다.

## 6. 실험결과 분석

### 6.1 진동속도와 유도기전력의 세기 분석

Fig. 7은 진동속도에 따른 유도기전력의 세기를 그래프로 나타낸 것이다. 유도기전력은 진동속도에 따라 2차곡선을 그

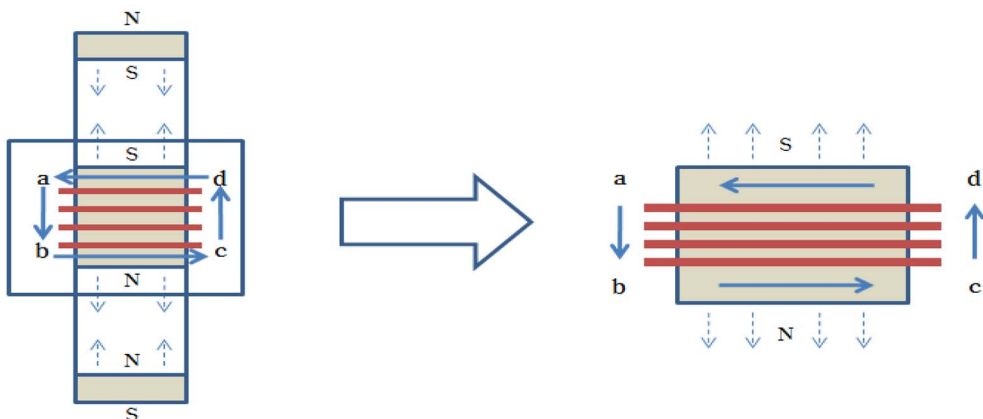


Fig. 6. Dynamic Propertie of Vibration power generation device

Table 2. Induction electromotive force strength along a vibration speed and external force

(a) Diameter of development device inner magnet  $\phi 20$

N	RPM	RPM60	RPM120	RPM180	RPM240
	4.9N		0.70V	0.87V	1.38V
		0.014A	0.017A	0.028A	0.037A
		0.01W	0.015W	0.038W	0.068W
9.8N		1.12V	1.88V	2.78V	4.16V
		0.022A	0.038A	0.056A	0.083A
		0.025W	0.071W	0.155W	0.346W
14.7N		1.65V	2.70V	4.05V	5.45V
		0.033A	0.054A	0.081A	0.109A
		0.054W	0.146W	0.328W	0.594W
19.6N		2.71V	3.83V	6.23V	7.39V
		0.054A	0.077A	0.125A	0.148A
		0.147W	0.293W	0.776W	1.092W

(b) diameter of development device inner magnet  $\phi 30$

N	RPM	RPM60	RPM120	RPM180	RPM240
	4.9N		0.43V	0.66V	1.62V
		0.009A	0.013A	0.032A	0.071A
		0.004W	0.009W	0.052W	0.252W
9.8N		1.47V	2.13V	3.81V	6.33V
		0.029A	0.043A	0.076A	0.127A
		0.043W	0.091W	0.290W	0.801W
14.7N		2.22V	3.51V	5.61V	7.13V
		0.044A	0.070A	0.112A	0.143A
		0.099W	0.246W	0.629W	1.017W
19.6N		2.42V	4.46V	7.13V	9.27V
		0.048A	0.089A	0.143A	0.185A
		0.117W	0.398W	1.017W	1.719W

(c) Diameter of development device inner magnet  $\phi 40$

N	RPM	RPM60	RPM120	RPM180	RPM240
	4.9N		0.24V	0.45V	1.91V
		0.005A	0.009A	0.038A	0.093A
		0.001W	0.004W	0.073W	0.429W
9.8N		1.97V	2.76V	5.00V	8.09V
		0.039A	0.055A	0.100A	0.162A
		0.078W	0.152W	0.500W	1.309W
14.7N		3.25V	4.18V	8.15V	13.75V
		0.065A	0.084A	0.163A	0.275A
		0.211W	0.349W	1.328W	3.781W
19.6N		4.44V	5.44V	9.53V	15.94V
		0.089A	0.109A	0.191A	0.319A
		0.394W	0.592W	1.816W	5.082W

리는 것을 알 수 있다. 도선에 유도되는 전압은 코일에 감긴 전선의 수와 코일을 통과하는 자기장의 시간당 변화율에

Table 3. Revenue source of a vibrational energy development device

(a) Diameter of development device inner magnet  $\phi 20$

Length of coil	25.13[m]
Resistance of coil	12.52[ $\Omega$ ]
Density of magnetic flux surface	4016.78[G]
Spring constant	87.37[N/m]
Neodymium magnet	$\phi 20$ , 20T

(b) Diameter of development device inner magnet  $\phi 30$

Length of coil	37.70[m]
Resistance of coil	18.79[ $\Omega$ ]
Density of magnetic flux surface	4538.97[G]
Spring constant	87.37[N/m]
Neodymium magnet	$\phi 30$ , 20T

(c) Diameter of development device inner magnet  $\phi 40$

Length of coil	50.27[m]
Resistance of coil	25.05[ $\Omega$ ]
Density of magnetic flux surface	5181.65[G]
Spring constant	87.37[N/m]
Neodymium magnet	$\phi 40$ , 20T

비례하고, 이 관계를 정리한 것이 패러데이의 법칙이다. 또한 코일을 지나는 자기력선속이 변할 때 유도되는 전류는, 그 자기력선속(자속)의 변화(증,감)을 방해하는 방향으로 흐르게 되는데 이것을 렌츠의 법칙이라 한다. 즉, 유도기전력은 자속의 증감을 방해하는 방향으로 나타난다는 것이다. 앞서 설명한 패러데이의 법칙과 렌츠의 법칙을 방정식으로 표현하면 식 (3)와 같다.

$$\varepsilon = (-)n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = (-)n \frac{\Delta(BS)}{\Delta t} \quad (\Phi = BS) \quad (3)$$

여기서 음[-]의 부호는 유도기전력의 방향을 나타내고,  $\varepsilon$ 는 유도기전력[V],  $n$ 은 코일권수,  $\Delta \Phi$ 는 자속의 변화량[Wb],  $\Delta t$ 는 시간의 변화량[S],  $B$ 는 자속밀도[Wb/m<sup>2</sup>],  $S$ 는 자기장이 지나는 면적[m<sup>2</sup>]이다(Jones, 2001; 박창욱, 1996). 교량이나 철도에서 차량운행에 따라 진동 속도가 증가할수록 진동력 발전장치의 내부에 삽입되어 있는 네오디뮴자석의 상하반복 운동이 비약적으로 증가하게 되고, (3)식에서  $\Delta \Phi / \Delta t$ 의 값이 크게 증가하게 된다. 이로 인해 발생하는 유도기전력의 크기도 진동속도가 커짐에 따라 선형적인 증가가 아닌 2차곡선의 형태로 증가하게 되는 것을 알 수 있다. 초기 적은 외력에서 진동속도가 적을 경우에는  $\phi 20$ 의 네오디뮴자석이 삽입된 진동력 발전장치에서 발생하는 유도기전력이  $\phi 30$ ,  $\phi 40$ 의 자석이 삽입된 장치보다 큰 것으로 나타났으며, 이는  $\phi 30$ ,  $\phi 40$ 의 네오디뮴자석의 경우  $\phi 20$ 의 자석보다 상대적으로 더 큰 증량으로 인해 상하반복운동을 시키는데 있어서 더 큰 힘이 필요하기 때문이다. 하지만  $\phi 30$ ,  $\phi 40$ 의 네오디뮴자석이 반복운동을 하는데 충분한 힘이 주어질 경우에는  $\phi 20$ 에서 발생하는 전압 값보다 매우 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로, 진동력 발전 시스템을 구축할 경우 무조건 자력의 세기가 큰 자석보다는 설치 환경에 맞게 적절한 증량의 자



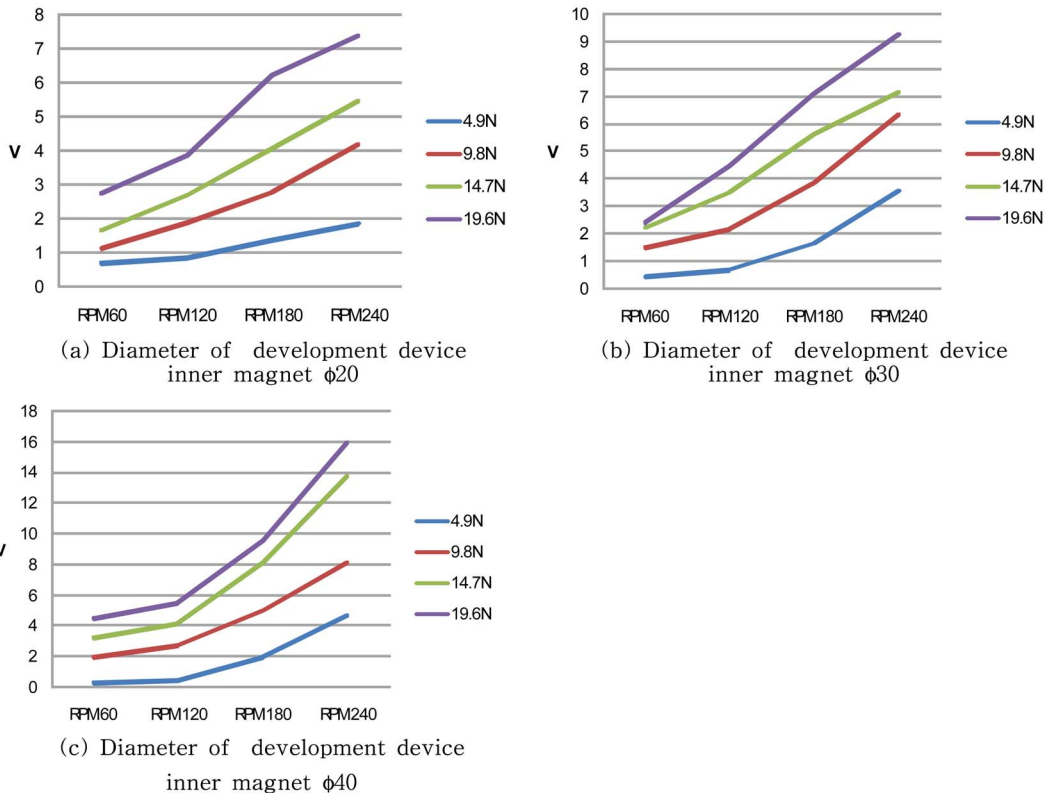


Fig. 7. Induction electromotive force strength along a vibration speed

석을 선택하는 것이 중요한 것으로 나타났다. 예를 들어, 작은 진동에너지가 발생하는 곳에는 자력의 세기는 약하지만 그 것을 상쇄시킬수 있을 만큼 더 많은 움직임을 통해 자속의 시간당 변화량을 크게 줄 수 있는 자석을 선택하는 것이 더 큰 효율을 기대할 수 있다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

## 6.2 외부에너지와 유도기전력의 세기 분석

Fig. 8은 진동력 발전장치에 가해진 외력에 따라 발생하는 유도기전력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 진동속도를 제어한 상태에서 외력의 변화를 달리할 경우 역시 유도기전력의 세기는 비례한다는 것을 그래프를 통해 알 수 있다. 이는 진동력 발전장치에 가해지는 외력의 힘이 클 경우 내

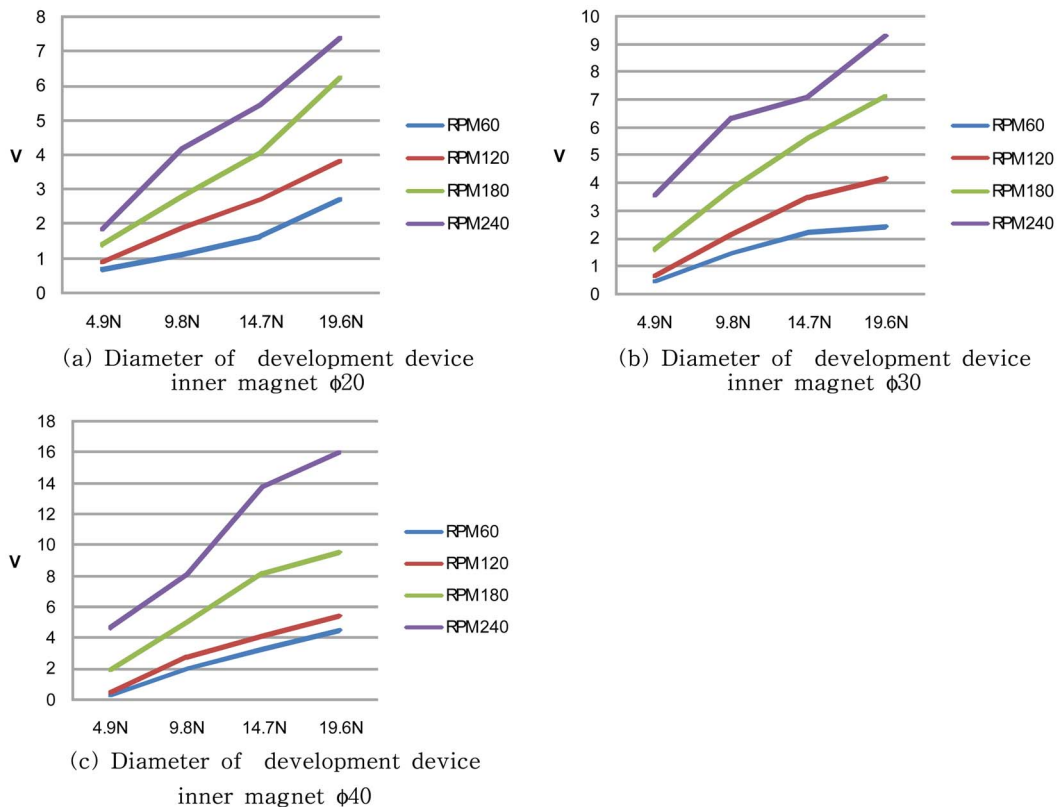


Fig. 8. Induction electromotive force strength along external force

부에 삽입되어있는 네오디뮴 자석은 상하왕복거리는 증가하고, 더 빠른 속도로 상하왕복운동을 하게 되고, 그로인해 (3)식에서의  $\Delta\Phi/\Delta t$ 의 값이 증가하고, 유도기전력의 크기가 증가하는 것이다. 이러한 실험값을 통해 같은 진동속도를 발생시킨다 할지라도 가해지는 외부에너지의 크기가 크면 클수록 더 큰 전압값을 얻어낼 수 있는 것으로 나타났다.

### 6.3 파형 분석

Fig. 9은 진동력 발전장치에서 발생하는 유도기전력의 파형을 나타낸 것이다. 다양한 상황에 따른 진동력 발전장치에서 발생하는 전압의 세기와 전압 발생의 규칙성에 대해 좀더 자세한 분석을 위해 Table 4와 같은 조건하에서 앞선 실험과 동일한 방법으로 실험을 실시하였다. 파형은 싸인파를 형성하며 각 주기마다 발생하는 파형의 끝부분이 최대 발생전압이다.

실험을 통해 얻어진 Fig. 9의 파형을 통해 유도기전력의 방향을 알 수 있는데, 이는 앞에서 열거한 렌즈의 법칙으로 간단히 설명이 된다. Fig. 9의 (a)와 (c), (b)와 (d)를 비교하면 외력의 힘이 세고 진동속도가 빠를수록 고전압의 유도기전력이 발생한다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 9의 파형을 자세히 살펴보면 미세한 전압발생을 볼 수 있다. 이는 진동력발전장치에 삽입되어있는 네오디뮴자석이 순간 빠른 속도로 움직일때 큰 전압값이 발생하다 움직임을 멈추면 미세한 전압이 발생하고, 움직임을 멈추는 순간 즉, 네오디뮴자석의 상하왕복운동거리의 양 끝단에서는 전압값이 0인 것을 확인할 수 있다. 특히 Fig. 9의 (d)를 보면 파형의 크기가 불규칙하고, 상대적으로 작은 전압값의 파형을 볼 수 있는데 이것은 진동력 발전장치의 진동속도를 빨리할 경우 내부에 삽입되어있는 네오디뮴자석의 움직임이 멈추기도 전에 또다시 외력이 가해짐으로써 움직임의 방향이 달라 에너

Table 4. Experimental variables

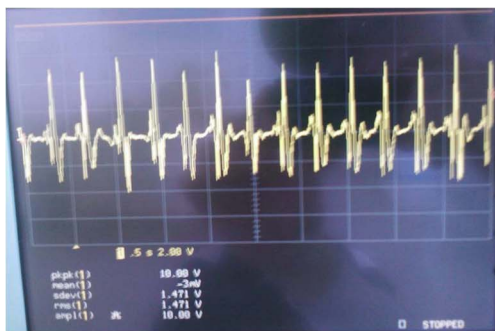
(a)	(b)
$\phi 40, 19.6\text{N, RPM}180$	$\phi 30, 14.7\text{N, RPM}120$
(c)	(d)
$\phi 40, 4.9\text{N, RPM}60$	$\phi 30, 14.7\text{N, RPM}240$

지의 상쇄로 인해 실제 가해진 외력보다 더 적은 힘으로 운동을 하게 되고 그 결과 자속의 시간적 변화율의 값이 작아져서 발생하는 현상이다. 결과적으로 진동력 발전시스템의 구조적 상태를 고려하지 않은 채 무조건적인 큰 외력과 진동속도를 부여해주는 것은 매우 비효율적인 것으로 나타났다(최호웅 등, 2000).

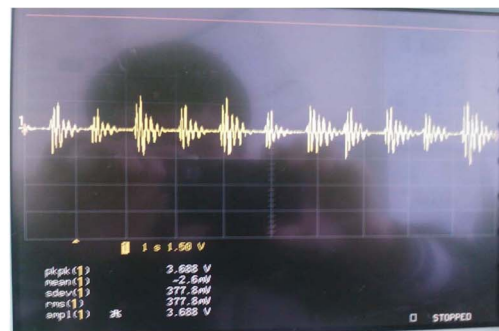
### 7. 진동력 발전장치의 성능 실험

본 연구에서는 Fig. 4에서 제작한 진동력 발전장치를 한양대학교 근처에 위치한 성동교에 직접 설치하여 발전성능 및 제안된 진동력 발전시스템의 실현가능성을 검토하였다. 성동교에서 발생하는 진동에너지의 수준을 알아보기 위하여 P3 구간 하부에 가속도계를 설치하여 계측하였고, Fig. 10은 설치된 가속도계로부터 수집된 정상시 성동교의 가속도 시간 이력과 FFT 분석신호를 나타낸 것이다.

Fig. 11은 성동교 P3구간 하부에 설치한 진동력 발전장치의 성능을 나타낸 것이다. Fig. 10과 Fig. 11에서 성동교에서 발생하는 상시진동은 대략  $-8\text{mG}\sim 8\text{mG}$ 값을 나타내는데 반해 진동력 발전장치의 움직임은  $-1.5\text{mG}\sim 1.5\text{mG}$ 로서 진동에너지의 전달과정에서 에너지 손실이 발생했다는 것을 알 수 있다. 또한 P3구간 하부의 수직진동에 의한 발전장치의 성능을 보면 대략  $10\text{mV}$ 의 유도기전력이 발생하고, 평균발전용량은  $2\mu\text{W}$ 로서, 이는 약  $7.2\text{mWh}$ 의 용량을 갖는 발전



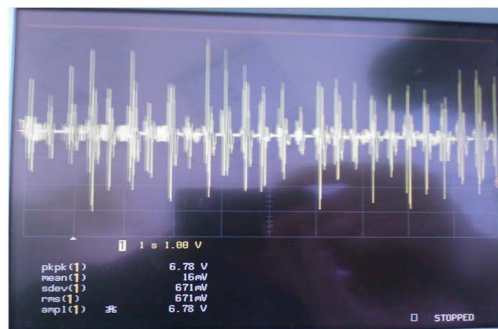
(a) High voltage waveform



(b) Regularity waveform

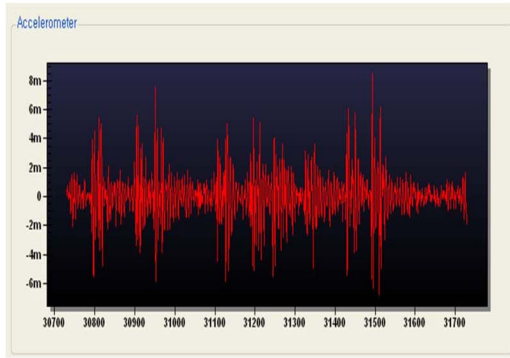


(c) Low voltage waveform

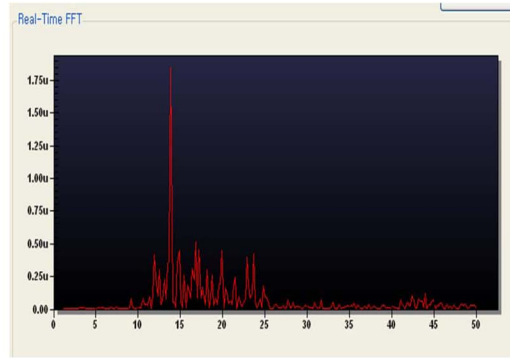


(d) Irregularity waveform

Fig. 9. Induction electromotive force waveform

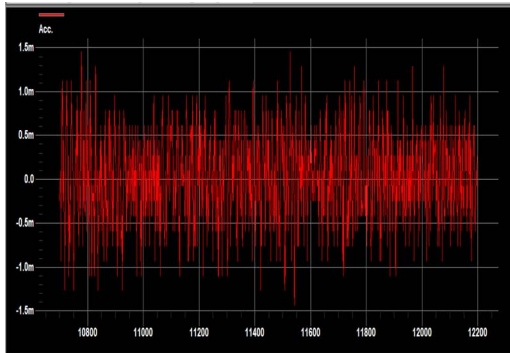


(a) Acceleration by time

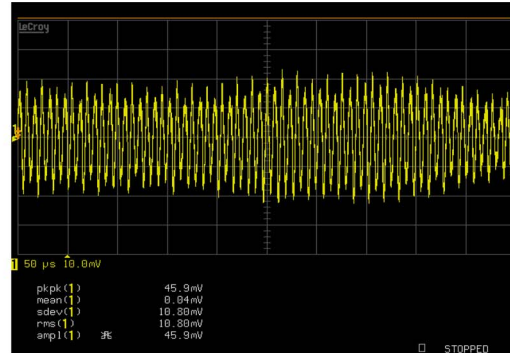


(b) FFT analysis

Fig. 10. Measurement data of seongdong bridge



(a) Acceleration by time of a vibration power generation device



(b) Voltage waveform of a vibration power generation device

Fig. 11. Performance of a vibration power generation device

기에 해당한다. 실험을 통한 진동력 발전장치의 발전량이 대단히 작아 실용적이지 않다고 할 수 있으나, 진동력 발전장치의 공진주파수를 설치하려는 구조물의 고유주파수에 보다 가깝게 설계함으로써 에너지 손실을 줄이고, 진동력 발전장치에서 발생하는 유도기전력의 크기는 자력의 세기와 코일의 감는 횟수에 따라 달라지므로 좀 더 많은 전력을 생산할 수 있도록 개선할 여지가 있으므로, 건축-토목구조물의 상시 진동을 이용한 진동력 발전시스템은 실제 적용의 타당성과 실효성을 갖는다고 사료된다.

## 8. 결 론

녹색뉴딜개념의 차세대 녹색교통망을 위한 에너지회수 (Energy harvesting) 기술을 위해 국가 주요 사회기반시설인 도로 및 철도 교통망에서, 차량의 고속이동으로 인한 구조물의 광대한 진동 에너지를 전자기 유도방식에 따라 전기 에너지로 변환하기 위한 진동력 발전의 기초 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 교통관련 구조물에서 자동차와 열차주행시에 발생하는 진동 에너지를 전기에너지로 변환하기 위해 내부에 삽입된 네오디뮴자석의 상하반복운동을 통한 전자기 유도 방식을 이용한 진동력 발전장치의 구조를 제안하였다.
2. 본 기초 실험을 통해 진동력 발전시스템의 유도기전력의 세기는 자속의 변화량에 따라 달라지는 것으로 나타났으며, 패러데이의 법칙에 의해 기전력이 생성된다는 것을 확인하였다.

3. 진동력 발전장치에서 발생한 기전력의 파형분석을 통해 유도기전력의 방향을 렌츠의 법칙으로 설명하였고, 이를 통해 진동력 발전장치 내부자석의 상하반복운동에 의한 자속의 방향에 따라 생성되는 기전력의 방향을 쉽게 파악할 수 있게 되었다.
4. 외력과 진동속도에 따른 유도기전력 발생 특성 분석을 통해 실제 건축-토목구조물에 필요한 전력을 생산하기 위해 구축해야할 진동력 발전 시스템에 대한 최적 설계에 필요한 기초자료를 확보하였다.
5. 성동고 P3구간 하부에 제작된 시험용 진동력 발전장치를 설치하여 구조물의 상시진동을 이용한 진동력 발전시스템의 가능성을 검증하였다.

진동력 발전장치의 성능실험의 결과 현 단계에서 진동력 발전은 그 효율성이 낮은 편이지만 전력생산의 발전량과 효율성이 높아진다면 생활속 진동 에너지를 활용하여 무공해 전력의 대량 생산이 가능하게 될 것이다. 이는 정부에서 추진하고 있는 녹색뉴딜사업과 부합하는 친환경 전력발전 시스템으로서 건축-토목 구조물에서의 실제적인 활용이 가능하게 된다면 녹색·신재생 에너지 시장을 주도하게 될 것이며 이로 인한 경제적 파급효과는 실로 엄청날 것이다.

## 참고문헌

- 김동석, 박관수, 최형식, 이병우(2004) 보행에너지를 이용한 압전식 발전장치 개발에 관한 연구, 2004년도 대한전기학회 하



- 계학술대회 논문집, 대한전기학회, pp. 974-976.
- 김성일, 여인호, 이인규, 김성춘(2006) 경량전철 교량 상부구조의 주행열차하중에 의한 진동 및 소음 분석, 2006년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 한국철도학회, pp. 9-16.
- 곽문규, 김기영, 강호용, 김내수(2008년) 압전소자를 이용한 진동 에너지 수집 장치 개발, 한국정밀공학회지, 한국정밀공학회, 제25권, 제4호, pp. 32-38.
- 금명훈(2003년) 압전 재료를 이용한 진동에너지 변환 전력발생 시스템 연구, 석사학위논문, 서강대학교.
- 박진형(2004년) 도로건설사업에 따른 지반진동영향 검토 및 대책, 기술기사, 건설기술연구소
- 박종수, 남윤수(2006년) 적응 제어를 이용한 압전 소자로부터의 에너지 회수에 대한 연구, 한국정밀공학회지, 한국정밀공학회, 제23권, 제6호, pp. 64-71.
- 박종철, 박찬민, 김병화, 이일근, 조병완(2006년) 장기계측에 의한 서해대교 사장교의 동특성 평가, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제10권, 제6호, pp. 115-123
- 박창욱(1996) 전기자기학, 통일출판사.
- 최남섭, 김재민(2003년) 건전도 감시용 자립형 계측유닛을 위한 진동발전시스템, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제7권, 제2호(통권 제30호), pp. 85-92.
- 최범규, 이재윤, 이우훈, 오재근(2008) 압전 효과를 이용한 에너지 포집 시스템에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 한국정밀공학회, 제25권, 제2호, pp. 115-122.
- 최호용, 정상용, 정현교, 최양승, 김규만(2000) 휴대용 기기충전형 선형 발전기 특성 해석, 2000년도 대한전기학회 추계부문 학술대회 논문집, 대한전기학회, pp. 297-299.
- Amirtharajah, R. and Chandrakasan, A. (1998) *Self-powered signal processing using vibration based power generation*, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 33, pp. 687-695.
- Edwin R. Jones (2001) *대학일반물리학*, 북스힐.
- (접수일: 2009.5.22/심사일: 2009.7.20/심사완료일: 2009.9.29)