

# 교량 무선센서 전원공급용 전자기를 이용한 광대역 에너지 하베스트의 진동시스템에 관한 연구

The research of energy harvester's the wideband vibration system from bridge for wireless sensor applications.

한기봉\* · 신동찬\* · 김영철†

Kibong Han, Dongchan Shin and Young-Cheol Kim

**Key Words** : wideband, energy harvester, vibration, electromagnetic, wireless sensor

## ABSTRACT

This paper presents the wideband vibration system of an electromagnetic vibration energy harvester that obtained electric power for wireless sensor applications from the ever-change vibrations of bridge. It is a system with two degree of freedom vibrations that are composed of two mass and two spring respectively. One system is housing mass and spring, the other is the magnetic mass and spring that is the vibration system construction's element of electromagnetic vibration energy harvester. In other words, it is called dynamic vibration absorber. This paper show that the ratio of housing mass to magnetic mass decides the bandwidth and the size of amplitude of magnetic mass in electromagnetic vibration energy harvester.

Therefore, it is necessary to improve the efficiency of energy in electromagnetic vibration energy harvester for wireless sensor applications.

## 기 호 설 명

여기에 기호설명을 아래와 같이 입력하십시오.

$M$  : 하우징과 하우징내부에 부착된 권선 질량

$C$  : 하우징과 진동물체사이의 감쇠계수

$K$  : 하우징과 진동물체사이의 연결된 스프링상수

$m$  : 영구자석의 질량

$C_g$  : 하우징과 영구자석사이의 감쇠계수

$K_g$  : 하우징과 영구자석사이의 스프링상수

## 1. 서 론

최근 무선기술 및 MEMS 같은 저 전력 전자기술의 발전과 더불어 초소형 저 전력 무선 센서노드

발이 빠른 속도로 진행되고 있다. 저 전력 무선센서 노드는 센서와 마이크로프로세서, 통신기능을 가지고 있어 구조물의 안전진단, 유지관리, 방재시스템에 사용하는데 제일 적합하다. 이를 동작시키는 데에는 전원이 필요하며 전선을 연결하여 전원을 공급하거나 배터리를 사용한다. 그러나 전선을 연결하는 것은 현실적으로 거리상의 한계를 가지고 있고, 배터리는 수명이 한정되어 있어서 정기적인 배터리교체 작업이 필수적인데 이는 많은 비용과 인력을 요구한다. 최근에는 이런 문제를 해결하기위해 주변에 널려있는 에너지를 유용한 전기에너지로 변환하는 에너지 하베스터 기술이 각광을 받고 있다. 주변에 널려있는 에너지원으로는 태양광, 열, 진동에너지 등이 있다. 태양광을 이용한 에너지 하베스터는 광전효과를 이용하여 전기에너지를 얻는 방법으로 효율은 높으나 항상 햇빛에 노출되어야하는 한계와 넓은 면적을 필요로 하고, 야간에 사용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 열을 이용한 에너지 하베스터는 주변에

\* 중원대학교

† 교신저자; 정회원, 한국기계연구원

E-mail : kyc@kimm.re.kr

버려진 열을 Seebeck효과를 이용하여 전기에너지를 얻는 방법으로 태양광발전에 비해 효율이 낮고, 높은 온도를 가진 열을 필요로 하기 때문에 조건을 충족하는 에너지를 구하기가 쉽지 않다. 반면에 진동을 이용한 에너지 하베스터는 우리 주변에 쉽게 발생할 수 있는 소음, 떨림과 같은 진동에너지를 전기 에너지로 변환하여 충전하는 기술이다.(1)(2) 특히 일상적인 움직임으로 시간에 제한 없이 지속적인 발전, 충전이 가능하기 때문에 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 진동 에너지 하베스터는 외부에서 들어오는 진동 주파수와 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템의 고유진동수가 일치할 때 최대 전력을 얻을 수 있지만 이를 벗어난 주파수 대역에서는 에너지 전환이 현저히 감소되는 단점을 갖는다.(3) 이를 극복하기 위해서 광대역 진동 에너지 하베스터 연구를 수행하였다. 이 방법은 주파수 별로 여러 개의 장치를 제작하여 외부로부터 유입되는 진동에 따라 그 주파수에 맞는 장치가 진동을 하여 최대의 전력을 생산하게 하는 것이다.(4),(5) 그러나 이는 여러 개의 장치 중에 하나만 작동하기 때문에 비효율적이다. 이를 보완하기 위해서 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템의 고유진동수를 외부에서 들어오는 진동주파수와 일치시키는 방법을 연구하였다.(6) 그러나 이 방법은 진동시스템의 고유진동수를 일치시키는데 투입되는 에너지와 이 장치에서 발생하는 에너지의 차이를 고려하면 오히려 발전량이 떨어짐을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점 들을 해결하기 위해서 에너지 하베스터를 구성하는 광대역 진동시스템을 제안하였다. 이는 진동구조물과 연결하는 스프링, 에너지 하베스터를 보호하는 하우징, 하우징에 고정된 권선코일, 권선코일과 상대운동을 일으키는 영구자석과 스프링으로 구성된다. 이는 2개의 스프링과 2개의 질량으로 구성된 동 흡진기의 원리를 적용한 2자유도를 갖는 진동시스템이다. 먼저 하우징과 진동물체와의 연결된 스프링은 하우징과 하우징에 고정된 권선의 질량을 고려하여 외부로부터 유입되는 진동 중심주파수와 일치하게 스프링을 설계하고, 다음은 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템을 외부로부터 유입되는 진동 중심주파수와 동일하게 설계한다. 제안한 광대역 에너지 하베스터의 특성을 알아보기 위해서 이를 구성하는 2개의 질량사이의 비에 따른 광대역 주파수 자동범위와 권선과 영구자석사이의 상대속도관계를 살펴 보

았다. 또한 이를 검증하기위해 자동차가 지나갈 때 자동차 속도에 따른 교량진동주파수와 진동의 크기를 이용하여 기존 방법과 제안한 방법과의 성능을 비교한 결과 제안한 방법이 작동 주파수 대역이 넓고, 발전량에 직접적으로 관계하는 권선과 영구자석 사이 상대속도가 큼을 알 수 있었다.

## 2. 광대역 에너지 하베스터의 진동시스템

### 2.1 광대역 진동에너지 하베스터의 구조

Figure 1은 진동을 하는 교량에 설치된 광대역 진동에너지 하베스터의 구조를 나타낸다. 광대역 진동에너지 하베스터는 진동구조체인 교량에 부착하는 기능뿐만 아니라 외부환경으로부터 에너지 하베스터를 보호하는 기능을 가진 케이스, 케이스 내부에 위치하면서 권선을 고정시켜주는 하우징, 케이스와 하우징을 연결하여 교량진동을 전달해주는 스프링, 하우징 내부중심에 위치한 영구자석, 하우징과 영구자석을 연결하여 하우징의 진동에너지를 전달하는 스프링, 하우징 내부 벽에 고정되어있어 영구자석과 상대운동을 하는 권선으로 구성되어 있다.

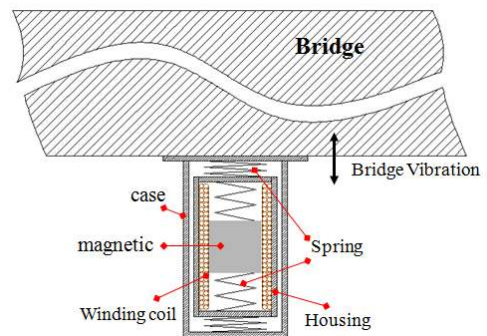


Figure 1 The schematic of wideband vibration energy harvester.

여기서 에너지 하베스터의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 자동차가 교량을 지나갈 때 자동차에 의해 교량에 진동이 생긴다. 교량에 생긴 진동은 교량에 부착된 에너지 하베스터의 케이스를 통하여 스프링과 하우징으로 구성된 진동시스템을 1차적으로 공진시킴으로써 하우징의 진동을 증폭시킨다. 증폭된 진동은 스프링과 영구자석으로 구성된 진동시스템을 2차적으로 공진시킴으로써 영구자석은 더욱 크게 진동을 하게 된다. 따라서 영구자석과 권선사이의 상대운동은 더욱 빨라지고, 이로 인해 권선내부

의 빨라진 자속변화속도에 의해 더 많은 전기에너지를 발생하게 된다.

## 2.2 광대역 하베스터의 진동시스템 모델

Figure 2는 광대역 에너지 하베스터의 진동 시스템 모델을 나타낸다. 여기서  $M$ ,  $C$ ,  $K$ 는 각각 하우징과 권선코일의 질량, 케이스와 하우징을 연결하는 스프링내부 감쇠계수 및 스프링 상수를 나타내고,  $m$ ,  $C_g$ ,  $K_g$ 는 각각 영구자석이 질량, 하우징과 영구자석을 연결한 스프링내부 감쇠계수 및 스프링 상수를 나타낸다.  $X_g(t)$ ,  $X_h(t)$ ,  $y(t)$ 는 각각 영구자석의 절대변위, 하우징의 절대변위, 교량으로부터 전달되는 진동변위를 나타낸다.

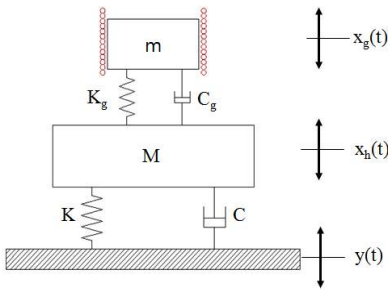


Figure 2 The mathematical model of wideband vibration system.

Figure 2를 수학적 모델 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M\ddot{x}_h + C(\dot{x}_h - \dot{y}) + K(x_h - y) + C_g(\dot{x}_h - \dot{x}_g) + K_g(x_h - x_g) = 0 \quad (1.1)$$

$$m\ddot{x}_g + C_g(\dot{x}_g - \dot{x}_h) + K_g(x_g - x_h) = 0 \quad (1.2)$$

$z_1 = x_h - y$  과  $z_2 = x_g - x_h$  을 식(1)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$M\ddot{z}_1 + C\dot{z}_1 + Kz_1 - C_g\dot{z}_2 - K_gz_2 = -M\ddot{y} \quad (2.1)$$

$$m\ddot{z}_2 + m\dot{z}_2 + C_g\dot{z}_2 + K_gz_2 = -m\ddot{y} \quad (2.2)$$

식(2)에서  $z_1$ ,  $z_2$ 는 각각 진동물체와 하우징의 상대변위, 하우징(권선코일)과 영구자석의 상대변위를 나타낸다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 광대역 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템의 특성을 파악하기위해서 먼저 자동

차가 교량을 통과할 때 자동차의 속도에 따른 교량의 진동을 측정된 다음 이에 적합한 진동시스템을 설계하였다. Table 1은 전륜 7톤, 중륜 10톤, 후륜 10톤, 총 중량 27톤을 가진 덤프트럭이 20km/h, 40km/h, 50km/h의 속도로 교량을 통과할 때 교량 진동을 측정된 값을 나타낸다.(7)

Table 1 The measured value of bridge vibration.

자동차 속도	교량 가속도	교량 진동수
20 km/h	0.414 m/s <sup>2</sup>	23.88 rad/sec
40 km/h	0.447 m/s <sup>2</sup>	21.99 rad/sec
50 km/h	0.348 m/s <sup>2</sup>	19.48 rad/sec

본 연구에서는 1차, 2차 공진주파수를 Table 1에서 측정된 교량진동 값을 참조하여 21.88 rad/sec로 각각 선정하였고, 동 흡진기 원리를 적용하여 에너지 하베스터의 진동시스템을 설계하였다. Table 2는 에너지 하베스터의 시스템사양을 나타낸다.

Table 2 The specification of energy harvester.

질량	감쇠 값	스프링 상수
M=2 kg	C= 0.89 N-s/m	K=967.2 N/m
m=0.05kg	C <sub>g</sub> = 0.11 N-s/m	K <sub>g</sub> =24.2 N/m

본 논문에서는 하우징 질량이 0kg인 경우는 에너지 하베스터를 구성하는 하우징과 진동구조물사이에 스프링으로 연결하지 않고 바로 단단하게 고정된 상태를 나타낸다. 즉, 기존 진동 에너지 하베스터를 의미한다.

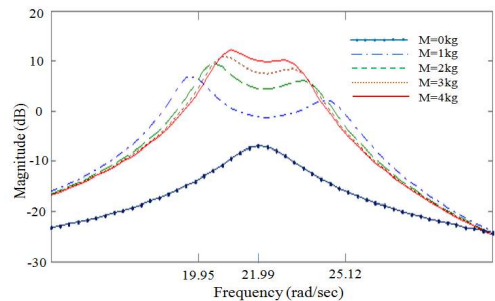
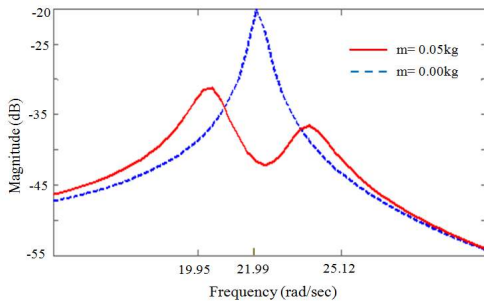


Figure 3 Frequency response of magnetic relative velocity according to housing mass.

Figure 3은 영구자석의 질량은 0.05kg으로 고정하고, 하우징의 질량을 0kg에서 4kg 증가할 때 하우징과 영구자석 사이의 상대속도에 대한 주파수 응답특성을 나타낸다. 여기서 하우징의 질량이 증가할

수록 상대속도는 커지는 반면 작동 주파수 대역폭은 감소함을 알 수 있다. 기존 에너지 하베스터는 공진주파수에서만 상대속도가 큰 반면 공진주파수 대역을 벗어날 경우는 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

이는 시시각각 변하는 주변에서 유입되는 다양한 진동 주파수를 가진 진동에너지로부터 운동에너지를 얻을 때 효율을 극대화 할 수 있다. 즉 하우징의 질량과 영구자석의 질량비를 적절하게 결정함으로써 사용주파수대역과 운동에너지를 최대로 얻을 수 있을 것으로 사료된다.



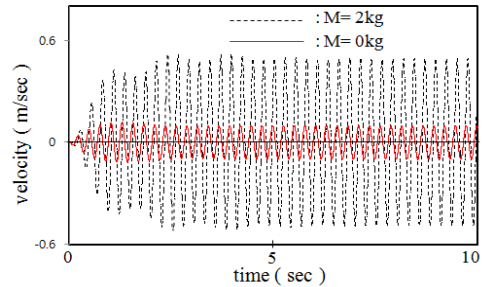
**Figure 4** Frequency response of housing relative displacement according to magnetic mass being.

Figure 4는 하우징 내부에 영구자석이 있을 때와 없을 때 하우징과 진동물체사이에 상대변위에 대한 주파수 특성을 나타낸다. 공진주파수 21.88 rad/sec 부근에서는 영구자석이 없을 때는 공진이 발생하지만 영구 자석이 있을 때는 오히려 상대 변위크기가 크게 감소됨을 알 수 있다.

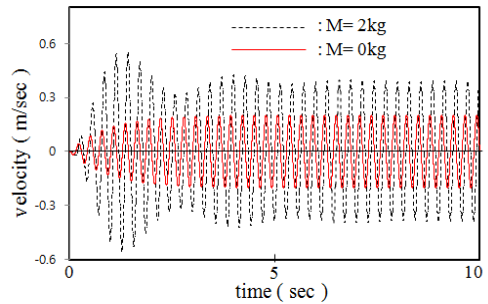
Figure 5(a)은 교량을 자동차가 20km/h 속도로 통과할 때 하우징과 영구자석사이의 상대속도의 크기를 나타낸다. 이 때 교량에 발생하는 진동주파수와 진동이 크기는 각각 23.88 rad/sec와  $0.414m/s^2$ 를 가진다. 본 연구에서 제안한 방법은 상대속도  $V_{p-p} = 1.0m/sec$  인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 0.2 m/sec$ 임을 알 수 있다. 이는 시스템 고유진동수를 벗어나는 대역에서 얻어지는 운동에너지크기는 기존 공진만을 이용한 방법보다 제안한 방법의 훨씬 큰 운동에너지를 얻음을 알 수 있다.

Figure 5(b)은 교량을 자동차가 50km/h 속도로 통과할 때 하우징과 영구자석사이의 상대속도의 크기를 나타낸다. 이 때 교량에 발생하는 진동주파수와 진동의 크기는 각각 21.99 rad/sec와  $0.447m/s^2$

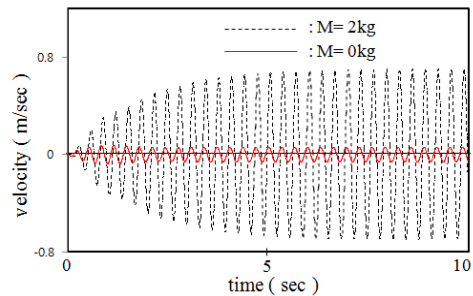
를 갖는다. 여기서 제안한 방법은 상대속도  $V_{p-p} = 0.8 m/sec$  인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 0.4 m/sec$ 임을 알 수 있다. 이는 시스템 공진 주파수 부근에서는 기존 시스템도 운동에너지를 많이 얻을 수 있음을 보여 준다. 그러나 제안한 방법에 비해 한계를 갖는다.



**Figure 5(a)** Relative velocity of magnetic according to vehicle velocity(20km/h).



**Figure 5(b)**Relative velocity of magnetic according to vehicle velocity (40km/h).

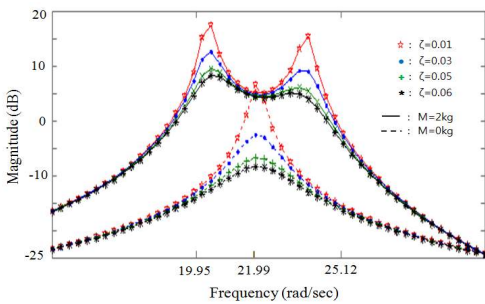


**Figure 5(c)** Relative velocity of magnetic according to vehicle velocity(50km/h).

Figure 5(c)은 교량을 자동차가 50km/h 속도로 통과할 때 하우징과 영구자석사이의 상대속도의 크

기를 나타낸다. 이 때 교량에 발생하는 진동주파수와 진동의 크기는 각각  $19.48 \text{ rad/sec}$ 와  $0.348 \text{ m/s}^2$ 를 갖는다. 여기서 제안한 방법은 상대속도  $V_{p-p} = 1.46 \text{ m/sec}$ 인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 0.12 \text{ m/sec}$ 임을 알 수 있다. 이는 시스템 고유진동수를 벗어난 대역에서는 기존 방법은 운동에너지를 얻기에는 부적합함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 광대역 진동에너지 하베스터가 덤프트럭이 교량을 다양한 속도로 통과 할 때 교량진동으로부터 얻어지는 운동에너지를 알아보았다. 제안한 방법은 트럭이 다양한 속도로 교량을 통과해도 그때마다 큰 운동에너지를 얻을 수 있는 반면에 기존의 방법은 시스템 고유진동수와 같은 입력이 들어올 때만 운동에너지를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이것은 하우징과 영구자석으로 이루어진 2자유도 진동시스템에 의해 2개의 고유진동수 사이에 존재하는 외부 진동을 이용할 수 있기 때문으로 사료된다.

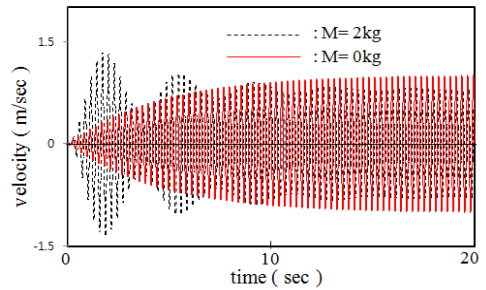


**Figure 8** Response of magnetic relative velocity according to damping ratio.

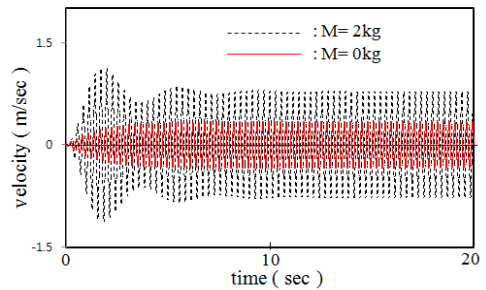
Figure 8는 영구자석과 하우징 사이 작용하는 감쇠비  $\zeta$ 가 0.01에서 0.06까지 증가할 때 영구자석과 하우징사이의 상대속도에 대한 주파수 응답을 나타낸다.  $21.88 \text{ rad/sec}$  주파수 대역에서는 제안된 에너지 하베스터는 감쇠 값에 덜 민감한 반면 기존 에너지 하베스터는 매우 민감함을 알 수 있다.  $21.88 \text{ rad/sec}$  주파수 대역을 벗어났을 때 제안한 방법은 오히려 공진을 일으키는 반면 기존 방법은 급격히 상대속도가 감속함을 알 수 있다.

Figure 9(a)는 진동 주파수가 하우징과 영구자석 사이에 발생한 감쇠 비에 따른 하우징과 영구자석사이의 상대속도를 나타낸다. 교량에 발생하는 진동주파수와 진동의 크기는 각각  $21.99 \text{ rad/sec}$ 와  $0.447$

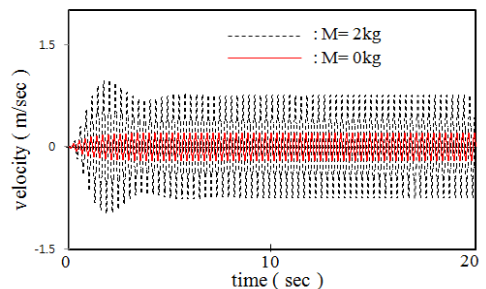
$\text{m/s}^2$ 이다. 여기서 감쇠 비  $\zeta=0.01$ 일 때, 제안한 방법은 상대속도가  $V_{p-p} = 1.58 \text{ m/sec}$ 인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 1.96 \text{ m/sec}$ 임을 알 수 있다.



**Figure 9(a)** Relative velocity of magnetic according to damping ratio( $\zeta=0.01$ ).



**Figure 9(b)** Relative velocity of magnetic according to damping ratio( $\zeta=0.03$ ).



**Figure 9(c)** Relative velocity of magnetic according to damping ratio( $\zeta=0.06$ ).

Figure 9(b)는 진동 주파수가 하우징과 영구자석 사이에 발생한 감쇠비에 따른 하우징과 영구자석사이의 상대속도를 나타낸다. 교량에 발생하는 진동주파수와 진동이 크기는 각각  $21.99 \text{ rad/sec}$ 와  $0.447$

$m/s^2$ 이다. 여기서 감쇠비  $\zeta=0.03$ 일 때, 제안한 방법은 상대속도가  $V_{p-p} = 1.54m/sec$  인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 0.68m/sec$ 임을 알 수 있다.

Figure 9(c)는 진동 주파수가 하우징과 영구자석 사이에 발생한 감쇠 비에 따른 하우징과 영구자석 사이의 상대속도를 나타낸다. 교량에 발생하는 진동 주파수와 진동의 크기는 각각  $21.99 rad/sec$ 와  $0.447 m/s^2$ 이다. 여기서 감쇠비  $\zeta=0.06$ 일 때, 제안한 방법은 상대속도가  $V_{p-p} = 1.5 m/sec$  인데 비해 기존 방법은  $V_{p-p} = 0.42 m/sec$ 임을 알 수 있다.

본 연구에서는 영구자석과 스프링으로 이루어진 공진주파수( $w_n=21.99rad/sec$ )에서 감쇠 비 변화에 따른 얻어지는 운동에너지를 알아보았다. 기존 진동 에너지 하베스터는 감쇠비가 증가할수록 속도가 급격히 작아지는 반면 제안한 방법은 아주 미소하게 작아짐을 알 수 있다. 이것은 하우징의 운동에너지가 영구자석으로 충분히 전달되고 있음을 보여준 것으로 사료된다. 또한 일반적으로 하우징과 영구자석 사이의 감쇠력은 공기저항, 스프링내부에 존재하는 감쇠, 및 영구자석과 권선의 상대운동에 의한 역기전력의 크기에 기인한다. 이중에도 특히 역기전력이 감쇠 비 증가에 큰 영향을 미친다. 즉 광대역 주파수에서는 제안한 방법이 기존 방법보다 영구자석의 운동이 증가하면 역기전력은 증가하지만 하우징에서 전달되는 운동에너지가 크기 때문에 전기에너지를 얻는데 훨씬 큰 장점을 가질 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 광대역 진동 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템을 제안하였고, 기존에 공진을 이용한 진동 에너지 하베스터의 진동시스템과 특성을 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 공진을 이용한 에너지 하베스터는 공진 주파수역에서만 운동에너지를 최대로 얻을 수 있는 반면에 제안한 방법은 광대역 주파수역에서도 훨씬 큰 운동에너지를 얻을 수 있다.
- 2) 하우징 질량과 영구자석질량의 크기를 조절하여 대역폭과 얻어지는 운동에너지크기를 결정할 수 있다.
- 3) 기존 방법에 비해 제안한 광대역 진동 에너지 하베스터는 감쇠 비(역기전력)증가에도 얻어지는 운동에너지에 미치는 영향이 미미함으로 진동 형 발전

기의 용량을 키울 수 있는 장점을 갖는다.

따라서 본 논문에서 제안한 광대역 진동 에너지 하베스터를 구성하는 진동시스템은 향후 교량과 같이 진동 주파수가 다양하게 변화하는 환경에서 운동 에너지를 이용하여 발전하는 진동 에너지 하베스터 연구에 크게 기여할 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 연구는 2012년 기계연구원 자체창의 연구사업의 지원 하에 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Bajeevan Amirtharajah, Anantha P. Chandrakasan, 1998, Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation, IEEE Journal of solid-state circuit. Vol. 33, No. 5, pp.687~695.
- (2) C.R. Saha, T.O'Donnell, N. Wang, P. McCloskey, 2008, Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, Sensors and Actuators A: Physical. Vol. 147, pp. 248~253.
- (3) Nibras Awaja, Dinesh Sood, Thurai Vinay, 2009, Design and Analyses of Electromagnetic Microgenerator, Sensors & Transducers Journal. Vol. 103, Issue 103, pp.109~121.
- (4) Ibrahim Sari, Tuna Balkan, Haluk Kulah, 2008, An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations, sensors and Actuators A: Physical. Vol. 145, pp. 405~413.
- (5) Marco Ferrari, Michele Guizzetti, Daniele Fisica della Materia INFN-CNR, 2008, Pizoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems, sensors and Actuators A: Physical. Vol. 142, pp. 329~335.
- (6) M S M Soliman, E M Abdel-Rahman, E F EI-Saadany, 2008, A wideband vibration-based energy harvester, J. Micromech. Microeng.. Vol. 18, pp.1~11.
- (7) Park Sun-Joon, Kang Sung-Hoo, Kim Bo-Hwoan, Kim Seung, 2009, Vibration Serviceability Evaluation of Prestressed Concrete Girder Bridge, 한국진동소음공학회 추계학술대회논문집. pp.781~786.