

# 자석바퀴기반 자기변형 에너지하베스터의 개념증명

## Proof-of-Concept of Magnetic Wheel-Based Magnetostrictive Energy Harvester

신봉희<sup>1</sup>, 박영우<sup>2,✉</sup>  
Bong-Hi Shin<sup>1</sup> and Young-Woo Park<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 인천대학교 컴퓨터공학부 (Department of Computer Science, Incheon National University)

<sup>2</sup> 충남대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University)

✉ Corresponding author: ywpark@cnu.ac.kr, Tel: +82-42-821-6874

Manuscript received: 2014.11.10. / Revised: 2015.4.19. / Accepted: 2015.4.26.

*This paper presents a proof-of-concept of a wheel-based magnetostrictive energy harvester (EH), which is a vibration-based EH. Coil-wound Galfenol cantilevers with two permanent magnets (PMs) act EH, while rotating wheels provide a forced vibration to EH. Four different cantilevers are designed and simulated for various end deflection. As expected from the simulation, the cantilever end deflection with triple cavity is the most. Three experiments are conducted to characterize the EH: the first with a magnetostrictive actuator, the second with a motor-driven wheel, and the third with the dummy weights. From the first experiment, the power reaches about 50 mV due to the relatively small displacement of the magnetostrictive actuator. From the second experiment, the power reaches about 120 mW. The power from the Galfenol cantilever is estimated to be about 60% of the total power from the wheel-based magnetostrictive EH.*

KEYWORDS: Energy harvesting (에너지하베스팅), Magnetostrictive material (자기변형재료), Galfenol (갈페놀), Cantilever (외팔보), Magnetic wheel (자석바퀴)

### 1. 서론

에너지하베스팅(Energy Harvesting)이란 버려지는 에너지를 수확하여 사용 가능한 전기 에너지로 변환하고 충전해 활용하는 새로운 형태의 재생형 에너지로 정의할 수 있으며,<sup>1</sup> 무선센서네트워크, 휴대용 기기, 웨어러블 기기 등과 같이 비교적 적은 에너지로 구동이 가능한 다양한 분야에 적용할 수 있다. 버려지는 에너지를 사용하는 친환경적인 에너지원으로는 대표적으로 바람, 태양광, 열, 풍력 등이 있다.<sup>2-4</sup> 이 중 진동에너지는 주변에서 가

장 흔히 볼 수 있기 때문에 에너지수확의 중요한 소스가 되고 있다. 이러한 진동기반 에너지하베스팅은 압전(Piezoelectricity), 정전력(Electrostatics), 자기변형(Magnetostriction), 전자기(Electromagnetics) 등의 다양한 메커니즘을 이용할 수 있다.<sup>6</sup> 이 중 압전메카니즘이 현재까지 가장 각광받고 있다고 할 수 있다. 압전재료의 경우 동일한 기능을 하는 에너지 발전장치보다 단위 면적당 발생 전력이 우수하고, 자기장의 영향을 받지 않아 다른 전기장치들과 같은 공간에 있어도 간섭이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 하지만 얇은 판으로 이루어진

압전재료는 큰 전압을 얻기 위해서 여러 개를 적층해야 하고, 전압은 재료의 변형에 비례하여 커지기 때문에 보다 큰 변형을 얻기 위해 더 큰 굽힘 현상을 유발시켜야 하므로 굽힘이 커짐에 따라 압전재료의 파손 위험이 커지는 단점이 있다.

이러한 문제점들을 해결할 수 있는 하나의 해법은 다른 메커니즘을 적용하는 것이다. 유사한 구성방정식을 사용하면서, 보다 큰 변형을 일으킬 수 있는 자기변형재료를 이용하는 것이다. 가장 널리 알려진 자기변형재료인 터페놀-디(Terfenol-D)는 위의 조건들을 만족하나 취성이 강하여 에너지하베스팅에는 적합하지 않다. 최근에 소개되고 있는 새로운 자기변형재료인 갈륨-철 합금 갈페놀(Galfenol)은 터페놀-디의 단점인 취성을 극복할 수 있어 굽힘모드에 적용 가능하다. 또한, 갈페놀은 터페놀-디에 비해 높은 인장강도, 큐리온도, 상대 투자율 등을 가진다. 따라서 갈페놀은 에너지하베스팅에 적합한 재료라고 할 수 있다. 본 논문에서는 다양한 형태의 갈페놀 외팔보를 설계하고, 이를 이용한 에너지하베스터를 제작한다.

본 논문에서 관심이 있는 에너지는 대형마트의 수많은 카트를 밀면서 버려지는 에너지로, 카트 바퀴의 회전운동을 자기변형 에너지하베스터의 가동에 이용하고자 한다. 생성된 전력은 저전력 시스템의 에너지원으로 쓰일 수 있어 새로운 시스템의 개발에 도움이 된다. 예를 들면 카트에 담은 물품들의 가격을 계산해주는 시스템이나 쇼핑 시 소모한 칼로리를 나타내주는 시스템 등에 사용할 수 있다. 이를 위해 자기변형 에너지하베스터의 양단에 영구자석을 위치시키고, 카트 바퀴에 영구자석을 배열하고자 한다.

## 2. 자기변형 에너지하베스터의 구조 설계

### 2.1 원리 및 개념

자기변형재료 주변의 자기장이 변하면 재료 내부의 자구가 자화되는 방향으로 틀어지게 되고 이 때문에 재료의 체적이 변하게 되는데 이러한 현상을 자기변형효과(Magnetostrictive effect) 혹은 줄 효과(Joule effect)라고 하며 이는 주로 구동기에 이용된다. 이와 반대로 외부에서 재료에 힘이 가해져 재료의 체적을 변화시키면 이로 인해 재료 주변의 자기장에 변화가 생기게 되는데 이러한 현상을 역 자기변형효과(Inverse magnetostrictive effect) 혹은 빌라리 효과(Villari effect)라고 하며 이는 주로 센서

에 이용된다.

자기변형 에너지하베스터는 이 역자기변형효과를 사용한다. 재료에 가해지는 진동 에너지는 외력으로 작용하여 재료의 체적을 변화시키고 체적 변화에 따른 자기장의 변화는 재료 주위를 감싸고 있는 코일을 통해 사용 가능한 전기 에너지 형태로 변환 할 수 있다. 이는 패러데이의 전자기 유도 법칙(Faraday's law of electromagnetic induction)을 통해 설명 가능하다. Table 1은 자기변형 에너지하베스터에 사용하는 갈페놀에 대한 물성치를 나타낸다.

### 2.2 외팔보 설계 및 유한요소 해석

자기변형재료에 진동 에너지를 직접적으로 전달하기 위한 대표적인 구조는 외팔보 형태이다.<sup>5</sup> 외팔보는 한쪽 끝이 고정되어 있고, 다른 끝은 받쳐지지 않은 상태로 되어 있는 보의 형태로 같은 길이의 일반적인 보에 비해 큰 휨 모멘트(Bending moment)를 받아 변형되기 쉽기 때문에 진동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 원리를 가진 자기변형 특성에 적합하다. 또한 자기변형재료를 이용한 에너지하베스터의 효율을 높이기 위해서 외팔보 자유단에서의 처짐을 높여야 하므로 Fig. 1과 같이 갈페놀을 이용한 외팔보를 설계하였다. 외팔보는 가로 15mm, 세로 100mm, 두께 3mm의 외형 치수를 가지고 있으며 자유단의 처짐을 증가시킬 수 있도록 외팔보의 중앙부에 사각 홈을 낸 구조

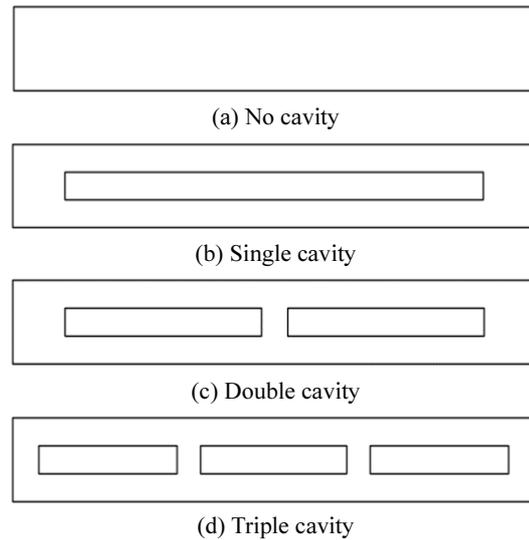


Fig. 1 Galfenol cantilevers (Top view)

를 추가한 총 4 가지 타입으로 설계되었다.

갈페놀 외팔보의 중앙부 형태에 따라 자유단에 서의 처짐이 증가하는지 검증하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 해석 방법은 유한요소 해석 툴인 앤시스(ANSYS) 정적 구조물(Static Structural) 해석을 사용하여 4 가지 외팔보의 한쪽 끝을 고정 단으로 설정하고 자유단에 10N의 집중하중을 인가시켰을 때의 총 변형(Total deformation)을 세분화 메쉬(Refinement mesh)를 사용하여 해석하였다. 갈페놀의 압자상수(Piezomagnetic constant)는 15-30nm/A로 낮아<sup>7,8</sup> 이로 인한 커플링 효과는 무시하고 Table 1에 있는 물성치만을 이용해 해석하였다. 메쉬 영역은 모든 면을 선택하였고 메쉬 사이즈는 기본값(Default)으로 설정하였으며 이 때 두께방향의 최대 요소 수는 5이다. 해석 결과는 Fig. 2에 나타나 있다.

Table 1 Material properties of Galfenol

Saturation strain	200 - 250ppm
Curie temperature	676.85 °C
Density	7800kg/m <sup>3</sup>
Young's modulus	75GPa
Tensile strength	350MPa

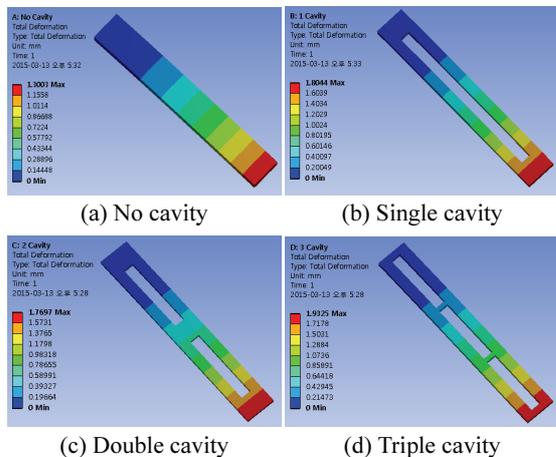


Fig. 2 FEA of Galfenol cantilevers

Table 2 Load analysis of Galfenol cantilevers

Type	Total deformation(mm)
No cavity	1.3003
Single cavity	1.8044
Double cavity	1.7697
Triple cavity	1.9325

해석 결과를 신뢰할 수 있는지 확인하기 위해 기본형태인 Fig. 1(a)의 외팔보의 처짐을 이론적으로 구하였다. 한 쪽 끝단이 고정되고 자유단에 집중하중 P를 인가하였을 경우의 외팔보의 처짐은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_{max} = (PI^3) / 3EI \tag{1}$$

여기서  $l$ 은 외팔보의 길이,  $E$ 는 영률(Young's modulus),  $I$ 는 외팔보의 단면이차모멘트(Geometrical moment of inertia)이다. Table 1에 있는 물성치를 대입하여 계산한  $\delta_{max}$ 는 1.316872428mm로, 이는 앤시스를 이용해 구한 시뮬레이션 값과 약 1.258%의 오차를 갖는다.

Table 2는 외팔보 타입 별 처짐을 나타낸 표이다. 유한요소 해석 결과를 보면 약간의 차이는 있으나 공통적으로 처짐을 증가시키기 위해 중앙부에 사각 홈을 낸 타입인 2, 3, 4의 처짐이 사각 홈을 내지 않은 타입 1에 비해 더 높은 것을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 위의 4 가지 타입의 갈페놀 외팔보를 제작하여 자기변형 에너지하베스터의 출력 전압 특성을 실험하였다.

### 2.3 자석바퀴 설계

자석바퀴는 한 개의 영구자석 어레이와 두 개의 플라스틱 디스크로 구성되어있으며, 두 개의 디스크 사이에 영구자석 어레이가 위치하는 샌드위치 구조이다. 제작된 자석바퀴는 전기모터에 연결되어 원하는 회전속도로 회전하게 된다.

### 3. 자기변형 에너지하베스터의 특성 실험

자기변형 에너지하베스터의 특성을 분석하기 위해 세가지 종류의 실험을 진행하였다. Fig. 3은 각 실험에 대한 실험장치 구성도이다. Fig. 3(a)는 자기변형 에너지하베스터의 구조가 적합한지에 대한 검증을 위해 외팔보의 자유단에 자기변형 구동기를 부착하고, 주파수의 변화에 따른 가진을 통해 전기에너지의 발생 여부를 보고자 한다. Fig. 3(b)는 자기변형 구동기 대신 자석바퀴를 이용하여 자기변형 에너지하베스터의 출력 특성을 보는 실험 장치 구성도로 카트 바퀴의 적용 가능성을 보고자 한다. 마지막으로 Fig. 3(c)는 무게 추를 이용해 자기변형재료 자체의 출력 특성을 검증하는 실험장치 구성도이다.

3.1 자기변형 구동기를 이용한 특성 실험

Fig. 3(a)의 실험 장치를 이용하여 자기변형 구동기를 이용한 자기변형 에너지하베스터의 구조 검증을 수행하였다. 구조의 적합성을 판단하는 것이기 때문에 코일 턴 수는 300, 600턴으로 고정해 따로 실험하였다. 자기변형 에너지하베스터의 구조는 갈페놀만 사용한 구조, 갈페놀에 영구자석을 부착한 구조, 영구자석과 패스를 모두 부착한 구조의 세 가지로 각 구조에 대해서 동일한 외력을 인가하였을 때 발생하는 유도 전압을 측정하여 분석하였다.

외력은 외팔보의 자유단에 부착된 자기변형 구동기를 통해 갈페놀로 인가된다. 이 때, 자기변형 구동기는 함수발생기(Agilent, 3320A)와 전류앰프

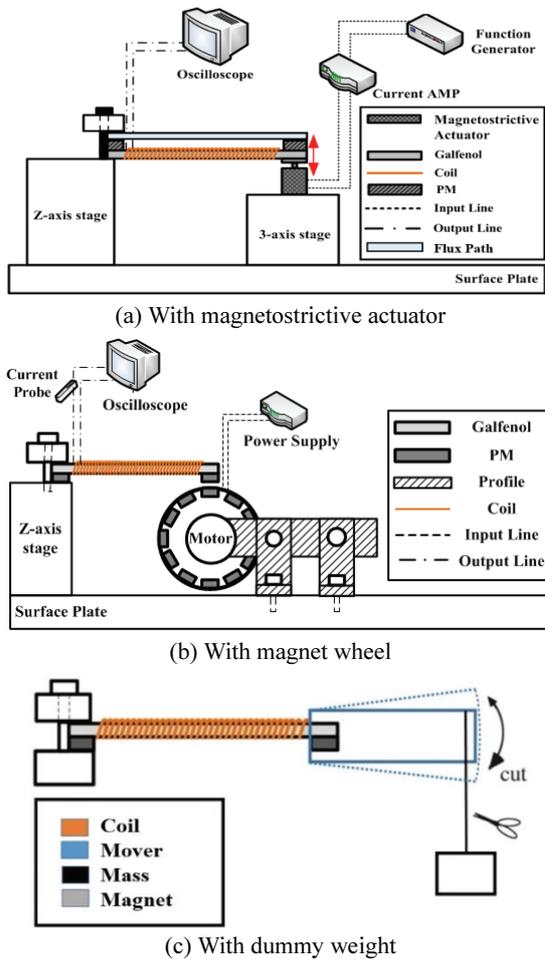


Fig. 3 Experiment setups

(Newton 4th, LPA05)를 사용하여 진폭 1A의 사인파를 10Hz ~ 300Hz의 주파수로 인가하여 자기변형 구동기의 변위량이 일정하도록 가진하였다. 전원 공급기(Agilent, U8031A)로 전원을 공급하고, 오실로스코프(Tektronix, TDS3014B)로 파형을 측정하였다. Fig. 4는 자기변형 구동기를 이용한 자기변형 에너지하베스터의 특성 실험 결과로 주파수 변화에 따른 최대 출력 전압을 나타낸다. Fig. 4(a)의 경우, 갈페놀 중앙부에 사각 홈이 없는 타입 1의 출력 전압이 가장 높지만 Fig. 4(b)와 (c)의 경우, 모두 갈페놀 중앙부에 2개의 사각 홈이 있는 타입 3의 출력이 가장 높은 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 예압(Preloading)에 따른 갈페놀의 자기장-변형률 곡선으로, 비선형적 특성을 갖는 갈페놀

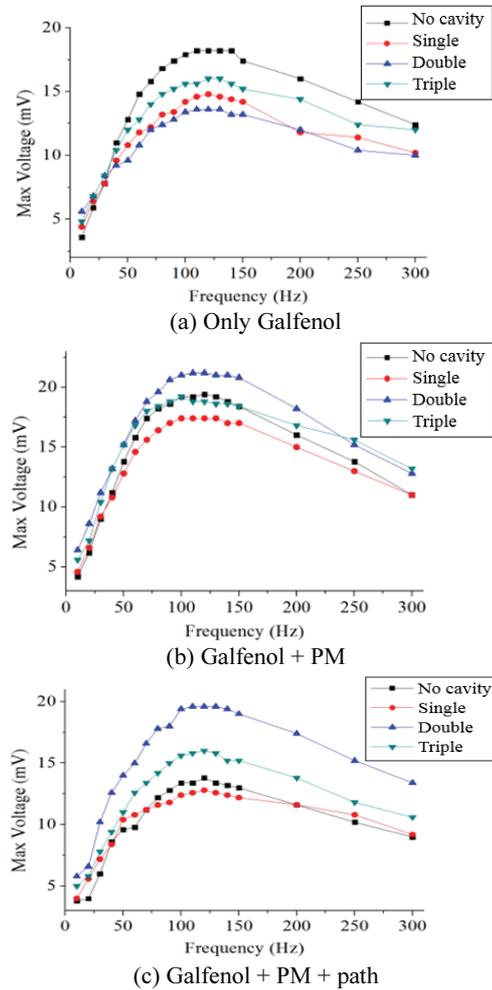


Fig. 4 Experiment result with actuator (300turns)

이 일정 구간에서는 선형적인 양상을 띄며 이 때 급격히 변형률이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실험에서는 예압을 주지 않은 상태에서 실험했으며, 영구자석을 이용해 바이어스를 걸어줌으로써 같은 자기장을 인가했을 때 변형률이 더 크다. 또한 길이방향으로 갈페놀이 늘어나 있는 상태여서 변형은 더욱 커지며, 영구자석이 갈페놀의 자화의 방향을 정렬해주므로 최대의 전기에너지를 생성할 수 있다.

한편 Fig. 4(c)의 경우, 최대 출력전압이 Fig. 4(b)보다 조금 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 갈페놀과 평행으로 위치한 패스가 오히려 자기변형 구동기에서 전달되는 진동 에너지를 흡수하여 실제로 갈페놀에 전달되는 외력이 감소하기 때문이다. 패스가 진동 에너지를 흡수한다는 것을 확인하기 위해 엔시스 하모닉 응답(Harmonic response)을 이용해 패스가 있는 경우와 없는 경우로 나누어 시뮬

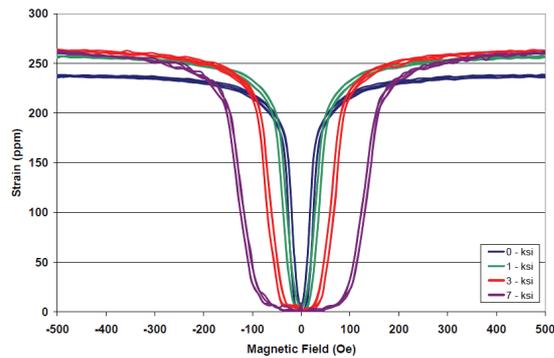


Fig. 5 S-H curve of Galfenol

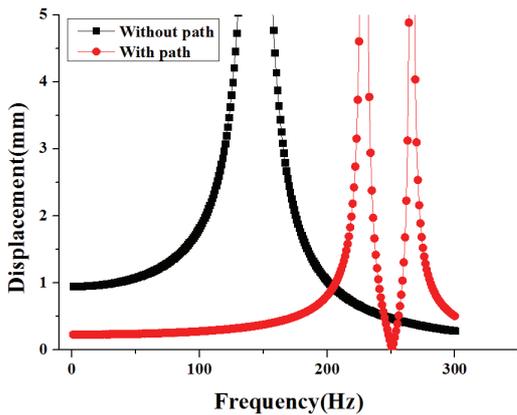
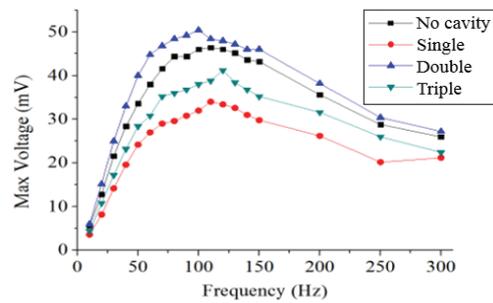


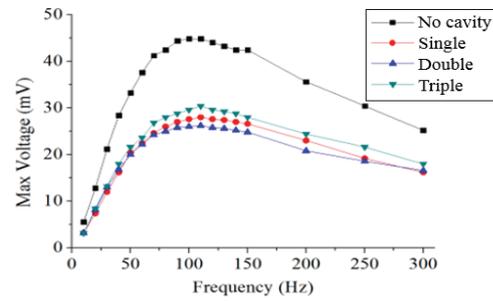
Fig. 6 Simulation result of Y-axis deformation of cantilever according to path

레이션하였다. 시뮬레이션 조건은 Fig. 2와 같고, 주파수 범위를 0 ~ 300Hz로 설정하였다. 해석 결과는 자유단 옆면의 Y축 방향 변형량을 보았다. 또한 Fig. 3(a)에서 나타냈듯 외팔보를 고정시키기 위해 고정단의 위, 아래를 물려놓았는데, 이를 시뮬레이션에 반영하기 위해 Fig. 2와는 다르게 고정지지점(Fixed support)을 고정단의 윗면과 아랫면에 각각 1cm씩 추가하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 6에 나타나있다.

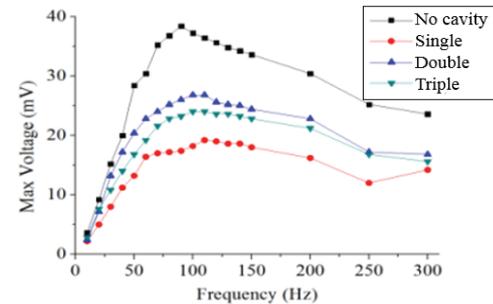
시뮬레이션 결과 패스가 있는 경우가 총 변형량이 작은 것을 확인할 수 있으며 특정 주파수에서 변형량이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 가진 주파수가 외팔보의 고유진동수와



(a) Only Galfenol



(b) Galfenol + PM



(c) Galfenol + PM + path

Fig. 7 Experiment result with actuator (600 turns)

근접함에 따라 공명현상이 발생하였기 때문이며, 패스가 있는 경우의 고유진동수가 높은 것을 확인할 수 있다.

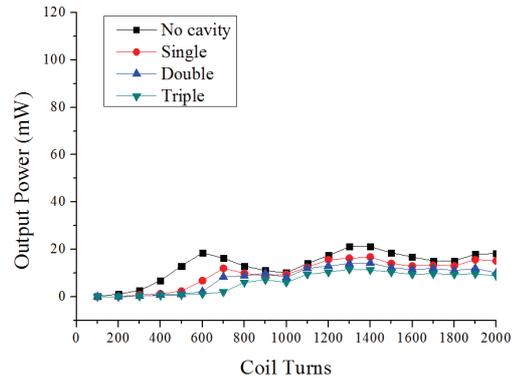
Fig. 7은 코일의 턴 수를 600으로 조정한 후의 실험결과를 나타낸 그래프로써 실험 조건은 앞선 300턴일 때와 동일하다. 실험 결과 전체적으로 출력 전압이 증가하는 모습을 보였고 특히 영구자석이나 패스가 없는 경우(Fig. 6(a)) 타입 1의 출력 전압이 가장 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 가장 높은 출력 전압을 발생시킨 구조는 첫 번째 실험과 마찬가지로 영구자석만 장착했을 때의 타입 3이다. 또한 100Hz 주변에서 출력이 최대가 되고 그 이상이 되면 다시 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 갈페놀이 갖는 고유진동수와 근접하게 주파수를 가진 했을 때 공명현상으로 인해 변형이 커지기 때문이다. 실험결과 실험을 통해 저잡이 발생할 때 전력이 생성되는 것을 알 수 있고, 적절한 가진 주파수가 요구된다는 것을 알 수 있다.

**3.2 자석바퀴를 이용한 특성 실험**

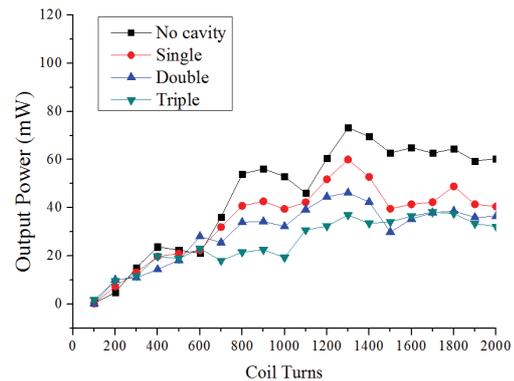
자석바퀴를 이용한 특성 실험은 Fig. 3(b)의 실험 장치를 이용하여 수행되었다. 자기변형 구동기 대신 자석바퀴의 회전을 이용해 갈페놀에 외력을 가하는 구조이다. 자석바퀴는 DC모터(Maxon motor, MSC130238)에 연결된 전원공급기를 통해 속도를 조절하였다. 코일의 두께는 0.177mm, 0.28mm, 0.49mm의 세 종류를 사용하여 100턴부터 2000턴까지 100턴 간격으로 출력전력을 측정하였다. 자석의 개수는 12개, 바퀴의 회전속도는 500rpm, 바퀴와 외팔보 사이의 수직거리는 8mm로 고정하였으며 패스는 사용하지 않았다. 이 때 갈페놀의 처짐은 약 3.18mm이다.

Fig. 8은 코일의 단면적과 턴 수에 따른 출력결과이다. 실험결과 코일의 단면적이 클수록 출력전력이 증가하였다. 식(2)는 패러데이의 법칙(Faraday's law)에 관한 수식으로, N은 코일의 턴 수, A는 코일의 단면적, B는 자속밀도이다. 식(1)에 의하면 코일에서 출력되는 전압은 코일의 턴 수와 단면적에 비례한다. 실험 결과 코일의 턴 수가 증가할수록 출력전력이 증가하는데, 각각 650턴, 750턴, 1100턴 이상부터는 포화상태에 이르러 더 이상 출력이 증가하지 않는다. 이는 코일의 단면적에 따라 전체 시스템의 질량이 바뀌게 되고, 고유진동수는 질량의 제곱근에 반비례하므로, 코일의 단면적이 클수록 고유진동수가 낮아져 같은 주파수

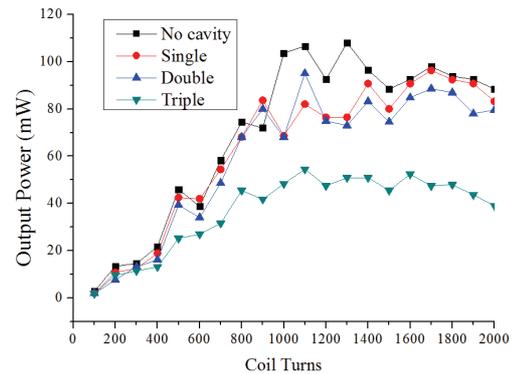
로 가진하여도 출력 전력이 달라질 수 있기 때문이다. 또한 단면적과 허용전류는 비례하므로 단면적이 작을 경우 코일의 턴 수나 갈페놀의 변형이 커도 포화상태에 빨리 도달하게 된다. 따라서 자기변형 에너지하베스터의 출력에 있어서 적절한 코일 턴 수가 요구된다는 것을 의미한다.



(a) Coil diameter = 0.177mm



(b) Coil diameter = 0.28mm



(c) Coil diameter = 0.49mm

Fig. 8 Experiment result with magnet wheel

$$V = -NA(dB/dt) \quad (2)$$

### 3.3 질량을 이용한 특성 실험

질량을 이용한 특성 실험은 Fig. 3(c)의 실험 장치를 통해 할 수 있다. 질량으로 재료에 외력을 가하기 때문에 재료 자체의 순수한 발생 전력을 파악할 수 있다. 실험에는 중앙부의 사각 홈이 없는 가장 기본 형태의 외팔보인 타입 1에 0.49mm의 직경을 갖는 코일을 1100턴 감고, 자유단에 1.5kg, 3kg의 무게 추를 매달았다. 이 때, 재료에 직접적으로 무게 추를 달게 되면 재료에 파손이 생길 수 있으므로 자유단 끝에 알루미늄재질의 가로 15mm, 세로 100mm, 두께 13mm의 외형 치수를 갖는 무버(Mover)를 체결하였다.

Fig. 9은 갈페놀에 패스를 붙이지 않고, 자유단에 1.5kg과 3kg의 무게 추를 매달았다 제거하였을 때 발생하는 출력 전력을 실험한 결과이다. 실험 결과를 통해 질량이 1.5kg에서 3kg로 증가하여 갈페놀의 처짐이 클수록 출력되는 전압이 높은 것을 확인할 수 있다. 또한 처짐에 따라 출력전압이 결정되는 것을 확인할 수 있다. 1.5kg의 질량을 달았을 때, 갈페놀의 처짐은 3.8mm이고, 3kg의 질량을 달았을 때는 7.3mm이다. Fig. 8에서 1.5kg을 사용하였을 경우와 Fig. 8(c)에서 1100턴인 경우를 비교했을 때, 자석바퀴를 이용한 경우의 약 60%의 출력이 나오는 것을 확인할 수 있다. 즉 자석바퀴에서 발생하는 자기장의 영향을 제외한 갈페놀의 진동만으로 생성되는 전력의 비율을 유추할 수 있다.

### 4. 결론

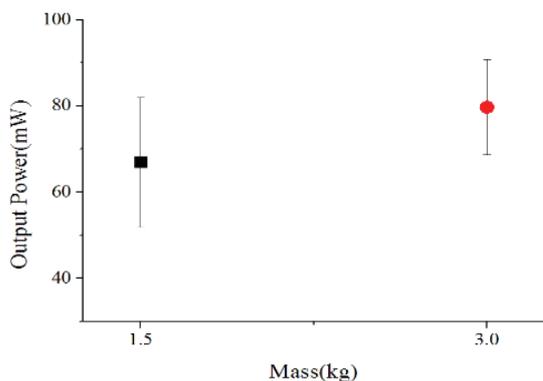


Fig. 9 Experiment result with mass

본 연구에서는 자기변형재료인 갈페놀을 사용하여 자기변형 에너지하베스터를 설계 및 제작 하였고, 전력 특성 실험을 수행하여 자기변형재료를 이용한 에너지하베스터의 개념을 증명하였다.

자기변형 에너지하베스터에서 진동에너지를 전기에너지로의 변환이 용이하도록 하기 위해 외팔보 형태의 에너지하베스터를 제작 하였고 외팔보의 처짐을 증가시키기 위해 유한요소 해석을 통해 4가지 타입의 외팔보를 설계하였다. 또한 주파수에 따른 자기변형 에너지하베스터의 출력 전압 특성을 코일의 턴수와 영구자석의 유무, 그리고 패스의 유무로 나누어 실험하였다. 실험 결과 자기변형재료의 변형이 클수록 출력전압이 높고, 코일의 턴수와 단면적을 적절하게 조절해야 한다는 것을 알 수 있다.

### 후 기

이 논문은 인천대학교 2013년 자체연구비 지원에 의하여 연구됨.

### REFERENCES

1. Round, S., "On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, pp. 809-823, 2005.
2. Beeby, S. P., Tudor, M. J., and White, N. M., "Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications," *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 175-195, 2006.
3. Kim, H. U., Tadesse, Y., and Priya, S., "Piezoelectric Energy Harvesting," Springer Science Business Media, LLC, 2009.
4. Ko, Y. H. and Yu, J. S., "Structural and Antireflective Properties of ZnO Nanorods Synthesized using the Sputtered ZnO Seed Layer for Solar Cell Applications," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol. 10, No. 12, pp. 8095-8101, 2010.
5. Park, J. H. and Park, S. H., "A Fundamental Study on Energy Harvesting System using Wing Type Beam Structure," *KSPE Spring Conference*, pp. 975-976, 2012.
6. Wu, X., Parmer, M., and Lee, D. W., "An Electromagnetic Energy Harvester based on Windmill-Structure," *KSPE Fall Conference*, pp. 673-674, 2013.

7. Yun, S. N., Kim, D. G., Boo, H. M., Seo, W. S., and Kong, T. W., "Character of Piezoelectric Energy Harvester by Vibration Frequency," KSPE Spring Conference, pp. 185-186, 2008.
8. Roundy, S. and Wright, P. K., "A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wireless Electronics," Institute of Physics Publishing, pp. 1131-1142, 2004.