

간접 충격을 이용한 압전 방식 진동형 에너지 하베스터

Piezoelectric Vibration Energy Harvester Using Indirect Impact

주 선 아* · 지 창 현†
(Suna Ju · Chang-Hyeon Ji)

Abstract - This paper presents an impact-based piezoelectric vibration energy harvester using a freely movable metal sphere and a piezoceramic fiber-based MFC (Macro Fiber Composite) as piezoelectric cantilever. The free motion of the metal sphere, which impacts both ends of the cavity in an aluminum housing, generates power across a cantilever-type MFC beam in response to low frequency vibration such as human-body-induced motion. Impacting force of the spherical proof mass is transformed into the vibration of the piezoelectric cantilever indirectly via the aluminum housing. A proof-of-concept energy harvesting device has been fabricated and tested. Effect of the indirect impact-based system has been tested and compared with the direct impact-based counterpart. Maximum peak-to-peak open circuit voltage of 39.8V and average power of 598.9 μ W have been obtained at 3g acceleration at 18Hz. Long-term reliability of the fabricated device has been verified by cyclic testing. For the improvement of output performance and reliability, various devices have been tested and compared. Using device fabricated with anodized aluminum housing, maximum peak-to-peak open-circuit voltage of 34.4V and average power of 372.8 μ W have been obtained at 3g excitation at 20Hz. In terms of reliability, housing with 0.5mm-thick steel plate and anodized aluminum gave improved results with reduced power reduction during initial phase of the cyclic testing.

Key Words : Energy harvesting, Indirect impact, MFC (Macro Fiber Composite)

1. 서 론

최근 인체 삽입형 의료기기, 웨어러블 전자기기, 무선 센서 노드 등의 기술 발달과 함께 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있다 [1-4]. 일반적으로 이러한 기기와 센서들은 전력 소모량이 작아 전기화학적 배터리를 사용하여 손쉽게 전력을 공급할 수 있지만, 응용분야에 따라 배터리 교체나 충전이 어렵거나 지속적인 충전이 필요한 경우 이러한 문제에 대한 별도의 해결방안이 요구된다. 인체에 삽입된 의료기기의 전원 교체를 위하여 수술이 요구되는 경우가 대표적인 사례이며, 해결방안의 일례로 에너지 하베스팅 기술을 활용하여 지속적으로 배터리를 충전하는 방법을 들 수 있다. 에너지 하베스팅 기술은 우리 주변에서 버려지거나 단기간에 유의미한 양의 에너지를 확보하기 어려운 에너지원을 이용하여 전기에너지를 확보하는 기술이다. 에너지 하베스터는 개별 기기에 부착된 소형 발전기로, 전자제품이나 무선 센서 등 다양한 기기들의 보조 전력원으로 활용할 경우 기기의 작동 수명을 연장시킬 수 있을 장점이 있다. 에너지 하베스터 기술을 활용하여 궁극적으로는 외부에서

의 전력 공급이나 전력원의 교체 없이 독립적으로 기기의 구동이 가능하도록 하려는 많은 연구가 이루어지고 있다. 환경 진동을 이용한 에너지 하베스팅 기술은 주변 환경에서 쉽게 전력을 획득할 수 있고 에너지 변환 메커니즘이 직관적이고 단순한 장점을 가지고 있다 [5-7]. 기존의 연구를 통하여 개발된 진동형 에너지 하베스터는 많은 경우 스프링 질량 시스템 구조를 활용하고 있으며 이 경우 외부에서 공급되는 진동의 주파수가 스프링 질량 시스템의 공진 주파수와 일치하지 않을 경우 출력이 크게 저하되는 단점이 있다. 또한 에너지 하베스팅 소자의 크기가 작아질수록 소자의 공진 주파수를 환경 진동에 가까운 낮은 주파수 대역으로 감소시키기 어려운 문제점이 있다[8, 9].

진동형 에너지 하베스터에 활용되는 전력 생성 메커니즘은 크게 압전, 전자기, 정전력 방식으로 나눌 수 있다[10, 11]. 압전 방식 에너지 하베스터의 경우 외부 요인에 의하여 압전 물질에 발생하는 기계적 변형이 전기 에너지로 변환되는 효과를 이용하여 주변 환경으로부터 가해지는 압력이나 진동을 사용 가능한 전기 에너지로 변환하여 준다. 압전 현상을 이용한 발전 방식은 기존의 자기 유도 현상을 이용한 발전 방식보다 구조가 단순하여 작은 크기의 소자로 진동을 전기 에너지로 쉽게 변환할 수 있을 뿐만 아니라 에너지 변환 효율 또한 높다는 장점을 가지고 있다 [12-17]. 압전 현상을 이용한 에너지 하베스터의 경우 일반적으로 외부 진동을 이용하여 압전 물질에 진동을 발생시키거나, 압전 물질에 직접적인 충격을 가하여 전력을 얻는 방식이 사용된다 [18, 19]. 따라서 진동 주파수 의존도가 높거나, 반복적인 충격으

† Corresponding Author : Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Ewha Womans University, Korea.
E-mail: cji@ewha.ac.kr

* Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Ewha Womans University, Korea.

Received : July 2, 2017; Accepted : August 24, 2017

로 인하여 장시간 사용 시 압전 물질의 신뢰도와 내구성을 저하시키는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 간접충격을 이용한 압전 방식 진동형 에너지 하베스터를 개발하였다. 인체 진동과 같이 낮은 주파수 대역에서 동작할 수 있도록 스프링 없이 채널 내에서 자유 진동하는 구형 질량체를 사용하고, 질량체가 하우징의 양 끝단과 충돌시 발생하는 진동을 압전 물질에 전달하는 간접 충격 방식을 적용하여 소자의 내구성을 향상시켰다. 그리고 질량체와 충돌하는 채널 끝단의 신뢰성을 향상시키기 위하여 끝단 재료의 변화에 따른 전력 감소 경향을 분석하였다.

2. 에너지 하베스터 설계

그림 1은 압전 방식의 진동형 에너지 하베스터의 모식도이다. 기존의 연구에서 개발된 충격을 이용한 압전 방식 에너지 하베스터의 경우 일반적으로 그림 1(a)와 같이 압전 물질에 직접적인 충격을 가하여 전력을 생성한다. 따라서 반복적인 충격에 의하여 압전 물질의 신뢰도와 내구성이 저하되는 단점이 있다. 또한, 압전 물질을 가격하는 질량체의 이동 방향과 압전 물질의 진동 방향이 일치하여야 하므로 소자의 크기를 감소시키기 어려운 단점

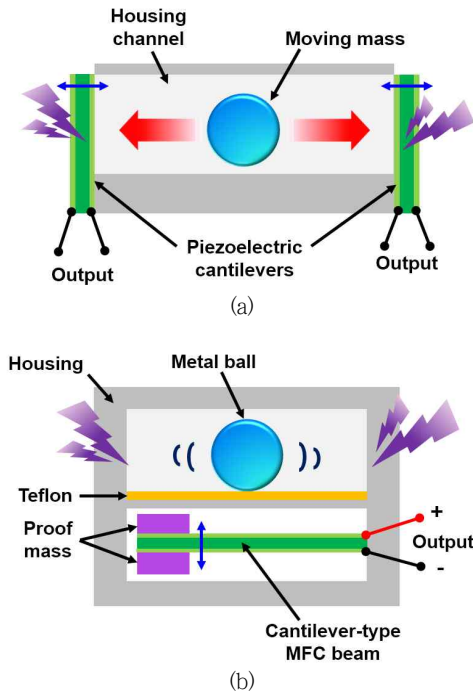


그림 1 압전 방식의 진동형 에너지 하베스터의 모식도: (a) 기존 연구에서 개발된 직접 충격 방식의 에너지 하베스터, (b) 제안된 간접 충격 방식의 에너지 하베스터

Fig. 1 Schematic diagram of the piezoelectric vibration energy harvester: (a) conventional impact-based piezoelectric energy harvester, (b) proposed energy harvester based on indirect impact

이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 1(b)와 같이 외부 진동에 의하여 자유롭게 움직이는 금속구가 일체형 하우징의 양 끝단과 충돌하면, 그 충격에 의한 진동이 압전 물질에 전달되어 전력을 발생시키는 매커니즘을 적용하였다.

제안된 에너지 하베스팅 소자는 채널 안에서 직선 왕복운동을 하는 직경 5mm의 텅스텐 카바이드 재료의 금속구와 알루미늄 하우징에 부착된 외팔보 형태의 압전 복합체로 구성되어 있다. 압전 복합체는 압전 물질인 MFC (Macro Fiber Composite) 끝단의 상하단에 구리 질량체를 부착한 구조물을 말한다. 압전 물질로 사용되는 유연 압전 복합소재인 MFC는 PZT-5A 기반의 단방향 압전 세라믹 파이버(piezoceramic fiber)의 상하단에 IDT (interdigitated) 패턴의 전극이 형성된 캡톤 (Kapton) 필름을 샌드위치 형태로 부착한 구조로, 매우 유연하고 내구성이 강하며 우수한 압전 특성을 가지고 있다 [20, 21].

3. 제작 결과

그림 2(a)에서 보는 바와 같이 알루미늄 블록을 CNC (Computer Numerical Control) 가공하여 끝단의 두께가 0.5mm 인 하우징을 제작하였고, 채널 바닥면에는 마찰을 최소화하기 위하여 0.5mm 두께의 테프론 (Teflon) 시트를 부착하였다. 직경이 5mm인 텅스텐 카바이드 재료의 금속구를 채널 안에서 자유 진동하는 질량체로 사용하였으며, 금속구의 운동을 관찰하기 위해

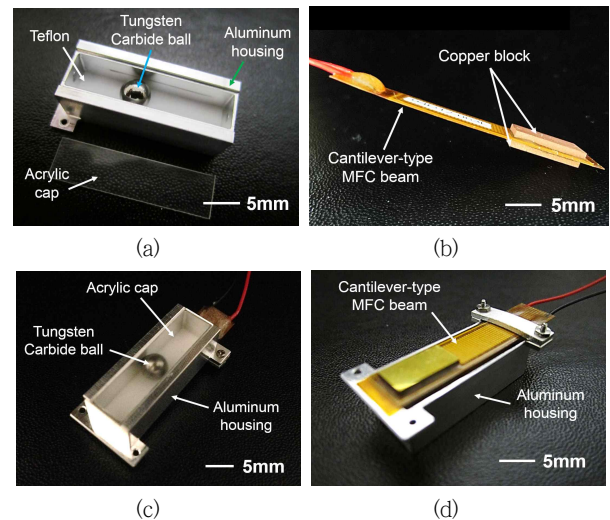


그림 2 제작된 에너지 하베스터: (a) 채널의 하단에 테프론을 부착한 알루미늄 하우징과 텅스텐 카바이드 금속구, (b) MFC에 구리 질량체를 부착한 압전 복합체, (c) 제작된 에너지 하베스터의 앞면, (d) 에너지 하베스터의 뒷면

Fig. 2 Assembled device: (a) aluminum housing with Teflon sheet at the bottom and a tungsten carbide ball, (b) MFC cantilever with copper blocks, (c) front-side of the fabricated piezoelectric energy harvester, (d) backside of energy harvester

여 하우징 캡은 0.5mm 두께의 투명 아크릴로 제작하였다. 그림 2(b)와 같이 압전 물질인 d_{31} 모드 MFC(Smart Material Corp., M2807-P2)의 한쪽 끝단에는 구리 질량체($10 \times 5 \times 1 \text{mm}^3$)를 위 아래에 부착하여 전력 생성 효율을 높였으며, 반대쪽 끝단을 그림 2(c), (d)와 같이 알루미늄 하우징에 마이크로 볼트와 너트를 이용하여 외팔보 형태로 고정하였다. 사용된 MFC의 크기는 $26 \times 6.5 \times 0.3 \text{mm}^3$ 이며 완성된 전체 소자의 크기는 $26 \times 10 \times 8 \text{mm}^3$ 이다.

4. 측정 결과

4.1 실험 방법

제작된 압전 방식 진동형 에너지 하베스터의 성능을 측정하기 위하여 3g의 입력 가속도를 인가하면서 주파수의 변화에 따른 출력 전압을 측정하였다. 인체의 움직임과 같은 저주파수 대역의 진동을 에너지원으로 활용하기 위하여 이전 연구 결과를 토대로 3g 이하의 가속도와 20Hz 이하의 진동 주파수를 측정 조건으로 설정하였고, 가진기(vibration exciter)의 성능 한계를 고려하여 10-20Hz의 정현파 진동을 1Hz씩 변화시키면서 소자의 장축 방향으로 인가하였을 때의 출력을 측정하였다 [22]. 그림 3은 가진기를 이용한 측정 장비의 구성과 외부 진동 방향을 제시한 사진이다.

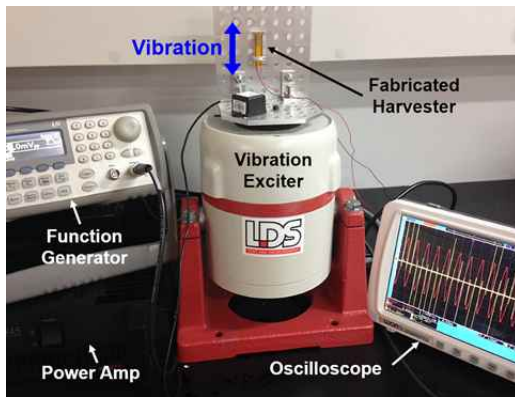


그림 3 가진기 실험을 위한 실험 장비 구성
Fig. 3 Experimental setup for the vibration exciter test

4.2 가진기 실험 결과

4.2.1 간접 충격 방식 검증

그림 4(a)는 제안된 소자이며, 4(b)와 (c)는 제작된 간접 충격 방식의 소자 성능을 검증하기 위한 두 가지 설정의 대조군 소자의 모식도이다. 첫 번째 대조군으로 직접 충격 방식의 소자(그림 4(b))를 제작하였다. 직접 충격 방식의 소자는 직선 운동하는 질량체와 압전체가 직접 접촉을 해야 하므로 두께가 얇고 긴 외팔보 형태의 압전 복합체는 구조상 채널 끝단에 배치되어야 한

다. 또한, 제안된 소자가 스프링 없이 자유 진동하는 질량체를 이용하므로 외부 진동에 의해 질량체가 직선 운동할 수 있도록 하우징의 채널이 압전 복합체에 수직 방향으로 배치되어야 한다. 두 번째 대조군으로는 외부 진동 방향과 압전 복합체의 진동 방

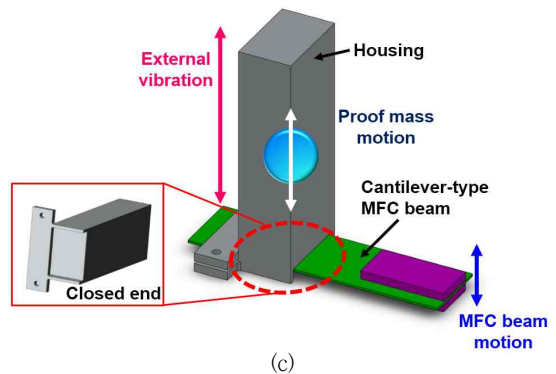
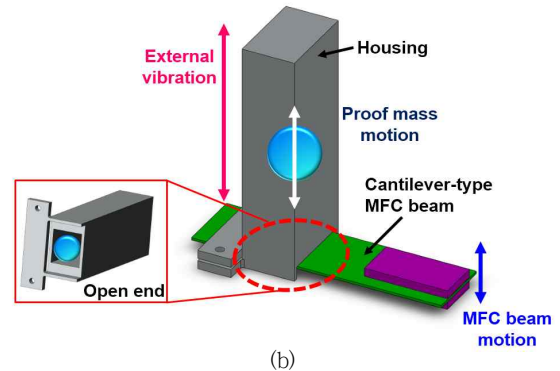
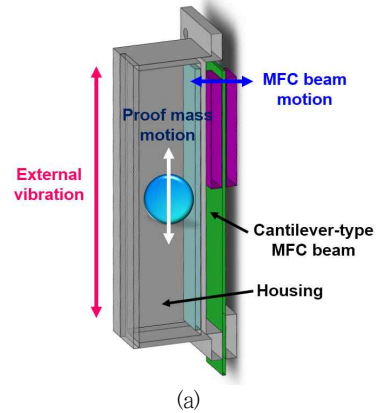


그림 4 간접 충격 방식의 에너지 하베스터 성능 검증을 위한 실험 설정: (a) 제안된 에너지 하베스터, (b) 직접 충격 방식의 에너지 하베스터, (c) 충격 방향을 달리한 에너지 하베스터

Fig. 4 Schematic diagram of the devices for performance verification of the indirect impact-based energy harvester: (a) proposed energy harvester, (b) energy harvester based on direct impact, (c) energy harvester with different impact direction

향이 일치하는 소자(그림 4(c))를 제작하였다. 일반적으로 종래의 압전 방식 에너지 하베스터는 출력을 높이기 위하여 외부 진동과

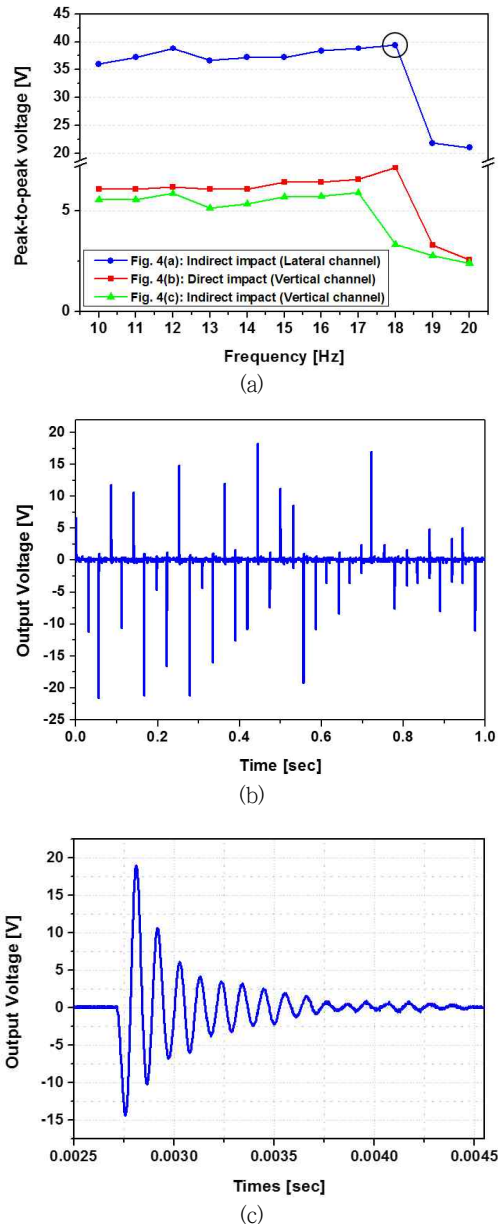


그림 5 제작된 에너지 하베스터의 측정 결과: (a) 세 가지 방식 소자의 최대 개방회로 전압 비교 (입력 가속도: 3g, 입력 주파수: 10~20Hz), (b) 제안된 소자의 최대 출력 조건에서의 개방회로 전압 파형 (입력 주파수 18Hz), (c) 개방회로 전압 파형 (b)의 확대도

Fig. 5 Experimental results: (a) peak-to-peak open circuit voltage of three different types of energy harvesters (3g acceleration at 10-20Hz applied), (b) open circuit voltage waveform of the proposed device at 18Hz vibration, (c) magnified view of the waveform

압전 물질의 진동 방향이 일치하도록 설계되었다. 단순한 외팔보 형태의 압전 물질이 외부 진동에 의하여 진동하거나, 질량체가 압전 물질을 가격하는 직접 충격 방식의 에너지 하베스터가 이러한 경우에 해당된다. 그림 4(b)와 (c)에서 보는 바와 같이 두 가지 형태의 대조군 소자들은 기본적으로 하우징의 채널이 압전 복합체에 수직 방향으로 배치되므로 소자의 크기를 감소시키기 어렵다.

그림 5(a)는 다양한 입력 주파수에 대하여 제안된 하베스터와 두 가지 설정의 대조군 소자의 최대 개방회로 전압을 비교한 그래프이다. 세 가지 경우 모두 무스프링 구조의 질량체를 이용하였으므로 출력의 낮은 주파수 의존성을 확인할 수 있었고, 제안된 소자인 간접 충격 방식의 진동형 에너지 하베스터의 경우 18Hz, 3g의 진동에서 최대 39.8V의 개방회로 전압을 나타내었다 (그림 5(b), (c)). 모든 소자가 19Hz 부근의 주파수에서 급격한 출력 저하를 나타내었는데, 이는 사용된 금속구의 움직임이 인가 주파수를 추종하지 못한 결과이다. 두 개의 대조군 소자의 출력 측정 결과 모든 주파수 대역에서 제안된 소자 대비 낮은 출력 전압을 나타내었다. 직접 충격 방식 소자(그림 4(b))의 경우 18Hz에서 최대 7.1V의 개방회로 전압을, 채널이 압전 복합체와 수직으로 배치된 간접 충격 방식 소자(그림 4(c))의 경우 17Hz에서 5.9V의 개방회로 전압을 나타내었다.

직접 충격 방식의 대조군 소자의 경우 질량체와 압전 물질인 MFC가 접촉하는 면이 일정하지 않으므로, 제안된 소자(그림 4(a)) 대비 진동 주파수와 진폭이 불규칙하고 상대적으로 낮은 경향을 나타내는 것이 낮은 출력의 원인이며, 실험을 지속할 경우 MFC의 성능이 급격히 저하되다가 파손되는 양상을 보였다. 간접 충격 방식의 대조군 소자의 경우 간접적인 충격을 이용하였으므로 질량체와 일체형 하우징의 충격에 의한 진동이 고정된 압전 복합체에 효율적으로 전달되지 못한 것으로 예상된다. 제안된 소자와 간접 충격 방식의 대조군 소자의 경우 질량체의 충돌하게 되는 채널의 끝단이 압전 복합체의 고정단과 연결되어 진동이 전달되는 점은 동일하나, 압전 복합체의 연결 방향이 상이하며 제안된 소자의 경우에 더 효율적으로 진동이 전달되었다. 제안된 소자의 최대 출력은 대조군인 직접 충격 방식 소자 대비 5.6배, 간접 충격 방식 소자 대비 6.7배 높은 것을 확인할 수 있었다.

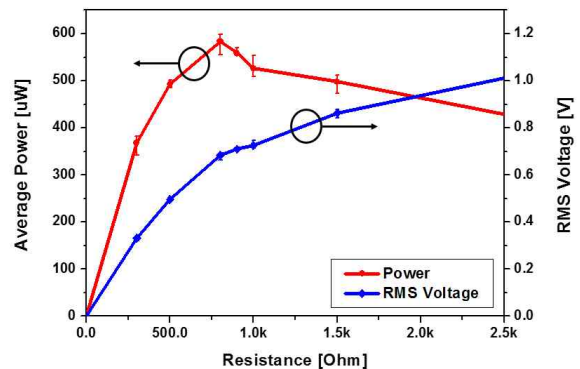


그림 6 부하 저항의 변화에 따른 출력 RMS 전압과 평균 전력 Fig. 6 RMS voltage and average power versus load resistance

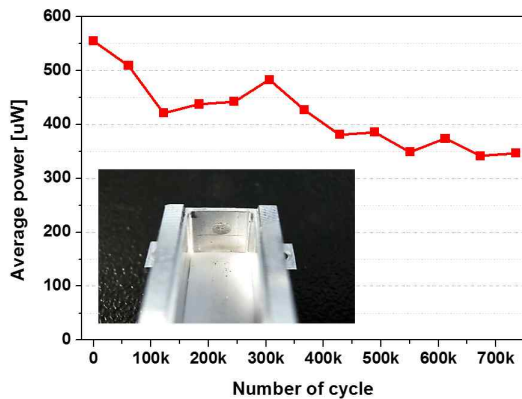


그림 7 반복 구동 실험 결과
Fig. 7 Average power variation during cyclic testing

그림 6은 부하 저항의 변화에 따른 RMS (root mean square) 전압과 평균 전력 측정 결과이다. 평균 전력 계산에는 식(1)을 사용하였으며 T , $v(t)$, R_L 는 각각 시스템의 주기, 순시 출력 전압, 부하 저항이다. 최대 출력 개방회로 전압의 생성 조건인 입력 주파수 18Hz와 입력 가속도 3g의 진동을 인가하였을 때, 부하 저항 800Ω에서 최대 598.9μW의 평균 전력을 나타내었고 이에 따른 평균 전력 밀도는 287.9μW/cm³이다.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{v(t)^2}{R_L} dt \quad (1)$$

4.2.2 반복 구동 실험

제작된 소자의 신뢰도를 측정하기 위하여 입력 주파수 17Hz와 입력 가속도 3g의 진동을 734,400회 인가하였을 때의 평균 전력 변화를 측정하였다. 그 결과, 그림 7에서와 같이 초기 최대 전력이 급격히 감소하는 경향을 보였으며 지속적으로 진동이 가해질 경우 일정하게 전력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 734,400회 진동 후의 평균 전력은 346.9μW로 초기 평균 전력 554.8μW 대비 약 37%의 전력 감소가 관찰되었다. 이러한 출력 감소의 원인은 직접 충격 방식 소자에서와 같이 압전 물질의 훼손이 아닌 하우징의 채널 끝단의 변형과 균열 때문임을 확인하였다 (그림 7). 제안된 소자의 경우 출력 저하의 원인이 압전 물질의 성능 저하가 아니므로 하우징 끝단의 구조 및 재질의 최적화를 통하여 소자의 성능을 개선할 수 있다.

4.3 하우징의 구조 및 재질의 영향 분석

4.3.1 하우징 구조의 영향

채널 내에서 자유 진동하는 금속구가 일체형 하우징의 끝단과 충돌할 때 압전 물질에 진동이 전달되는 것을 확인하였으므로, 충격력을 증가시키기 위하여 하우징 내의 채널을 두 개로 나누고 그 안에 두 개의 금속구가 충돌하는 방식의 소자를 제작하였다

(그림 8(a)). 또한 채널 끝단의 벽을 판 스프링으로 가정하고 스프링 상수 변화에 따른 출력의 변화를 관찰하였다. 스프링 상수를 감소시키기 위하여 알루미늄 하우징의 기계가공 시 채널 한쪽 끝단을 S형태의 스프링으로 제작하고, 압전 복합체가 고정되는 하우징 끝단의 모양에 따라 출력이 어떻게 변화하는지 비교하였다 (그림 8(b)).

그림 8과 같이 두 가지 형태의 소자를 제작하고 그 성능을 측정하기 위하여 10~20Hz, 3g의 정현파 진동을 가진기로 인가하고 개방회로 전압을 측정하였다. 그림 9는 개별 소자의 최대 개방회로 전압 (maximum peak-to-peak open circuit voltage)을 비교한 그래프이다. 서로 다른 세 가지 구조의 소자; 1) 채널 양 끝단이 모두 평평한 판 형태인 경우(그림 8(a)), 2) 한쪽 끝단은 평평한 판이고 다른 한쪽은 S형태의 스프링인 하우징을 사용하였으며 압전체의 고정단이 평평한 판 쪽인 경우, 3) 두 번째 경우와 하우징 구조는 동일하나 압전체의 고정단이 S형태의 스프링 쪽인 경우 (그림 8(b))에 대하여 출력을 측정하였다. 그림 9에서와 같이 세 가지 경우 모두 출력의 낮은 주파수 의존성을 확인할 수 있었지만 전체적으로 모두 앞서 확인한 단일 채널 구조의 하우징을 사용한 소자보다 낮은 개방회로 전압을 나타내었다. 각각의 최대 개방회로 전압은 양 끝단 모두 판인 경우 27.8V

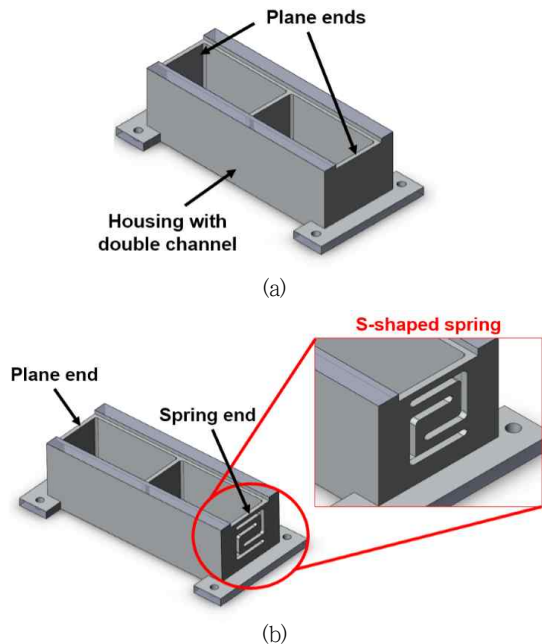


그림 8 더블 채널을 이용한 하우징의 모식도: (a) 더블 채널의 양 끝단이 0.5mm 두께의 얇은 판 형태인 소자, (b) 더블 채널의 한쪽 끝단은 얇은 판 형태이고 다른 한쪽 끝단은 스프링인 소자

Fig. 8 Schematic diagram of housing with double channel: (a) both ends of the double channel formed with 0.5 mm-thick plate, (b) one end of the double channel formed with thin plate and the other formed with S-shaped spring

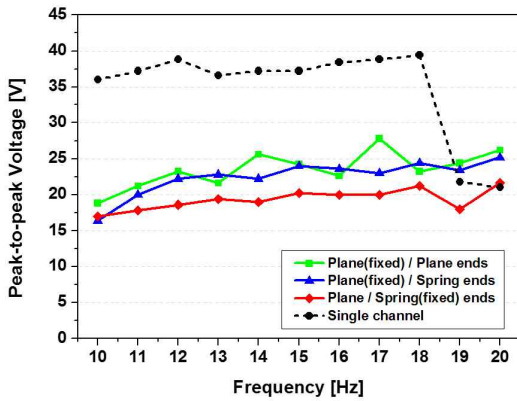


그림 9 더블 채널을 이용한 에너지 하베스터의 개방회로 전압 비교 (입력 가속도: 3g, 입력 주파수: 10-20Hz)

Fig. 9 Peak-to-peak open circuit voltage of devices with double channel (3g acceleration at 10-20Hz applied)

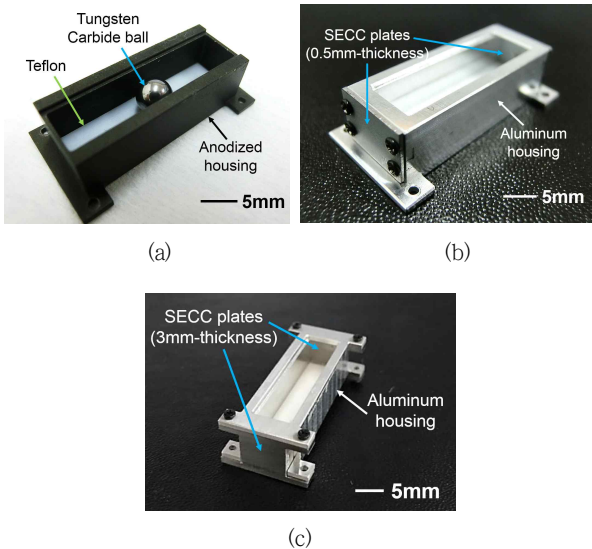


그림 10 신뢰도 개선을 위하여 제작된 에너지 하베스터: (a) 표면 아노다이징 처리된 알루미늄 하우징, (b) 끝단에 0.5mm 두께의 SECC 강판을 조립한 소자, (c) 끝단에 3mm 두께의 SECC 강판을 조립한 소자

Fig. 10 Devices fabricated for the improvement of long-term reliability: (a) device fabricated with anodized aluminum housing, (b) device with 0.5mm-thick SECC plates at both ends, (c) device with 3mm-thick SECC plates

(17Hz), 압전체의 고정단이 판 쪽이고 다른 쪽이 S형태의 스프링 인 경우 25.2V(20Hz), 압전체의 고정단이 S형태의 스프링 쪽이고 다른 쪽이 판인 경우 21.6V(20Hz)이었다. 세 가지 경우를 비교한 결과, 하우징 끝단의 스프링 상수가 상대적으로 높을수록 간접 충격 방식의 에너지 변환이 효율적이며 압전 복합체가 고정되는

하우징 끝단의 모양이 뿔려있는 구조가 아닌 막힌 구조일 경우 충격력의 전달이 용이하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 사용된 금속구가 채널의 길이가 줄어들 경우 충격력의 감소로 인하여 출력이 저하되었다.

4.3.2 하우징 재질의 영향

기존 하우징 채널 끝단의 변형에 의한 출력 감소 문제를 개선하기 위하여 하우징의 채널 끝단 재질을 변경한 소자들을 제작하여 그 성능을 비교하였다. 채널 끝단 재질의 영향을 확인하기 위하여 아노다이징 처리된 알루미늄 하우징을 사용한 모델과 알루미늄 하우징 끝단에 0.5mm와 3mm 두께의 SECC (Steel, Electrogalvanized, Cold-rolled, Coil) 강판을 조립한 모델을 제작하여 성능을 비교하였다(그림 10).

세 가지 모델의 에너지 하베스터의 성능을 측정하기 위하여 10-20Hz, 3g의 정현파 진동을 인가하고 출력 전압을 측정하였다. 그림 11은 각각의 하우징을 사용한 소자와 기존의 알루미늄 하우징을 사용한 소자의 최대 개방회로 전압을 비교한 그래프이다. 다른 모델과 다르게 두께 3mm의 SECC 강판을 사용한 경우에는 현저히 낮은 출력 전압을 나타내었다. 이는 강판의 두께가 두꺼워짐에 따라 상대적으로 반발계수(C_R , coefficient of restitution)가 낮아져 금속구의 운동을 원활하게 해주지 못했기 때문이다. 따라서 이 결과와 앞의 4.3.1의 결과를 종합해보면, 하우징 끝단의 스프링 상수가 무조건 높을수록 출력 향상에 도움이 되는 것이 아니고 채널 끝단의 반발계수가 일정한 수준을 유지하여야 함을 알 수 있다. 반발계수의 일반적인 정의는 식(2)로 표현되며 V_f 은 질량체가 충돌한 후의 속도이고 V_i 은 질량체가 충돌하기 전의 속도를 의미한다.

$$C_R = \frac{V_f}{V_i} \quad (2)$$

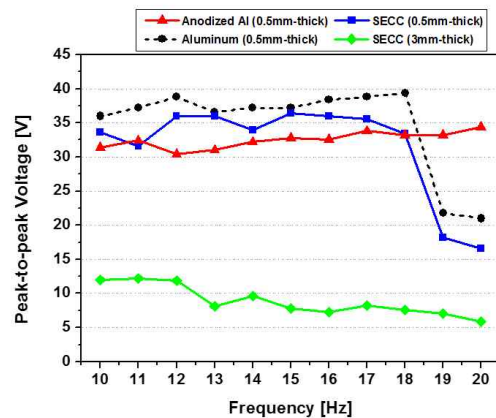


그림 11 하우징 재질에 따른 소자의 개방회로 전압 비교 (입력 가속도: 3g, 입력 주파수: 10-20Hz)

Fig. 11 Peak-to-peak open circuit voltage of the devices with different type of housing materials (3g acceleration at 10-20Hz applied)

또한, 기존의 알루미늄 하우징과 마찬가지로 0.5mm 두께의 SECC 강판을 사용한 경우 18Hz 이상의 주파수에서 급격한 출력 저하를 나타낸 반면에 아노다이징 처리된 알루미늄 하우징을 사용한 소자의 경우 모든 주파수 대역에서 출력이 일정하여 개선된 주파수 의존성을 나타내었으며, 이는 다른 모델에 비해 상대적으로 반발계수가 높아 주파수 증가에 따른 출력저하를 방지할 수 있었기 때문이다. 측정된 개별 소자의 최대 개방회로 전압은 두께 3mm의 SECC 강판을 사용한 경우 12.2V(11Hz), 두께 0.5mm의 SECC 강판을 사용한 경우 36.4V(15Hz), 아노다이징 처리된 알루미늄을 사용한 경우 34.4V(20Hz)이다.

그림 12는 입력 주파수 17Hz와 입력 가속도 3g의 진동을 734,400회 인가하였을 때의 전력 변화를 측정된 그래프이다. 위의 모델 중 최대 개방회로 전압이 현저히 낮은 두께 3mm의 SECC 강판을 사용한 모델을 제외한 두 가지의 모델로 측정을 진행하였다. 4.2.2의 반복 구동 실험에서와 같이 단순히 평균 전력 값으로만 측정 결과를 비교하면, 아노다이징 처리된 하우징의 경우 초기 전력 대비 54%, 끝단에 0.5mm 두께의 SECC 강판을 조립한 하우징의 경우 초기 전력 대비 8%의 전력 감소를 나타내었

다(그림 12(a)). 그러나 17Hz, 3g의 동일한 실험 조건으로 반복 구동 실험을 진행하였기 때문에 측정된 각 소자의 초기 최대 출력값은 최적화된 조건에서의 실제 소자 최대 출력값과 상이하다. 또한, 각 소자들의 임피던스 매칭된 부하저항이 모두 다르므로 소자의 절대적인 출력값 자체를 직접 비교하기는 어려우며 반복 구동 실험 과정에서 값의 변화가 불규칙적이므로 단순히 초기값 대비 변화된 전력의 비율로 신뢰도를 평가하기는 어렵다. 따라서 그림 12(b)와 같이 각 소자에 따른 반복 구동 실험 결과를 커브 피팅하여 초기 전력값 대비 출력값의 변화에 한정하지 않고 피팅된 그래프의 기울기의 변화로 구간별 출력 감소 경향을 분석하였다. 초기 전력 대비 변화율의 폭이 가장 작았던 SECC 강판을 사용한 경우에는 몇 구간에서 출력이 다시 증가하는 양상을 나타내었으며, 대체적으로 출력 변화의 폭이 크지 않으므로 상대적으로 높은 신뢰성과 재연성을 나타내었다. 반면에, 알루미늄 하우징을 사용한 경우 실험의 초기 단계인 200,000회까지 전력이 매우 급격히 감소하는 경향을 나타내었고 500,000회 이후부터 안정적인 출력을 보였다. 아노다이징 처리된 알루미늄 하우징은 초기 300,000회까지 매우 안정된 출력을 보였으나 그 이후에는 일정하게 감소하는 경향을 나타내었다. 이처럼 기존 알루미늄 하우징의 급격한 초기 출력 감소 문제를 개선하기 위하여 끝단의 재질을 SECC와 아노다이징 처리된 알루미늄으로 변화시킨 결과, 초기 출력 대비 출력 감소율을 향상시킬 수 있었으며, 하우징 재질의 선택과 최적화 된 끝단 두께 및 형상 설계를 통하여 높은 출력과 내구성을 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 논문에서는 자유롭게 움직이는 스프링이 없는 구조의 금속 구와 외팔보 형태의 압전 물질인 MFC를 이용한 충격 기반 압전 방식 진동형 에너지 하베스터를 제안하였다. 제작된 간접 충격 방식 소자의 성능을 검증하기 위하여 직접 충격 방식의 소자와 외부 진동 방향과 압전 복합체 진동의 방향을 고려하여 제작한 소자를 함께 비교하며 저주파수 대역에서 출력 개방회로 전압을 확인하였다. 그 결과, 간접 충격 방식의 제안된 소자는 입력 주파수 18Hz, 입력 가속도 3g에서 최대 39.8V의 개방회로 전압과 598.9μW의 평균 전력을 생성하였다. 또한, 제작된 소자의 반복 구동 실험을 통하여 초기 전력값이 매우 급격히 감소하는 것을 확인하였고, 그 이유는 하우징 끝단의 변화와 균열 때문임을 관찰할 수 있었다. 따라서 소자의 출력과 신뢰도를 향상시키기 위하여 하우징 끝단의 구조와 재질을 달리한 소자를 제작하고 각 소자들의 성능을 측정하였다. 그 결과 채널 끝단의 형상 또는 스프링 상수에 따라 충격에 의한 에너지 변환 효율을 최적화할 수 있음을 확인하였고, 끝단의 재질을 SECC 강판이나 아노다이징 처리된 알루미늄으로 교체했을 경우 주파수 특성과 기계적인 안정성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 아노다이징 처리한 알루미늄 하우징의 경우 개선된 주파수 특성을 나타내었으며 입력 주파수 20Hz, 입력 가속도 3g에서 최대 34.4V의 개방회로 전압과 372.8μW의 평균 전력을 생성하였다.

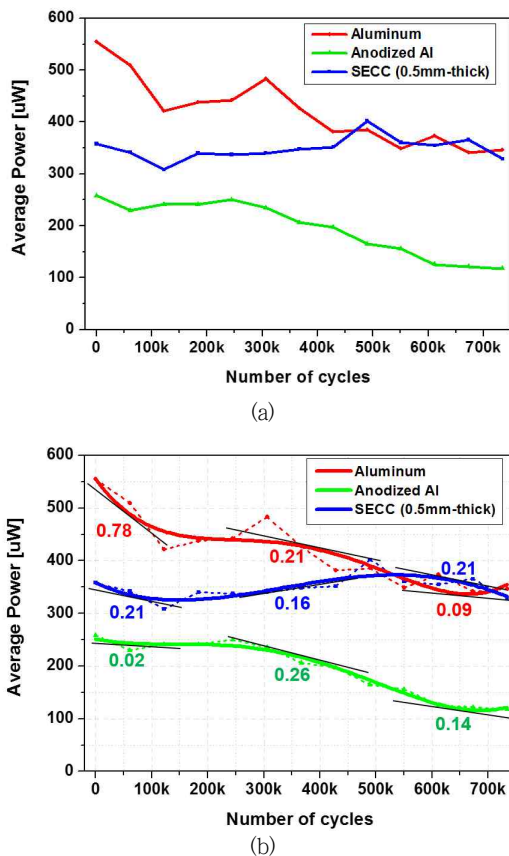


그림 12 하우징 재질에 따른 소자들의 반복 구동 실험 결과: (a) 측정된 전력 값의 출력 변화, (b) 커브 피팅된 출력 변화
 Fig. 12 Cyclic test results for devices with different type of housing materials: (a) average output power variation, (b) curve fitted power variation

감사의 글

이 논문은 2015학년도 이화여자대학교 대학원 장학금 지원에 의한 논문입니다.

References

- [1] K. Najafi, T. Galchev, E. E. Aktakka, R. L. Peterson, and J. McCullagh, "Microsystems for energy harvesting," Proc. of Transducers 2011, Beijing, China, June 5 - 9, 2011, pp. 1845 - 1850.
- [2] C. Knight, J. Davidson, and S. Behrens, "Energy options for wireless sensor nodes," Sensors, Vol. 8, pp. 8037 - 8066, 2008.
- [3] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," Proc. of the IEEE, Vol. 96, pp. 1457 - 1486, 2008.
- [4] D. Briand, E. Yeatman, and S. Roundy, Micro Energy Harvesting, WILEY-VCH, 2015.
- [5] R. L. Harne, and K. W. Wang, "A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems," Smart Materials and Structures, Vol. 22, pp. 023001, 2013.
- [6] H. Kulah, and K. Najafi, "Energy scavenging from low frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications," IEEE Sensors Journal, Vol. 8, pp. 261-268, 2008.
- [7] K. Ashraf, M. H. Md Khir, J. O. Dennis, and Z. Baharudin, "A wideband, frequency up-converting bounded vibration energy harvester for a low-frequency environment," Smart Materials and Structures, Vol. 22, pp. 025018, 2013.
- [8] M. A. Karami, and D. J. Inman, "Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters," Applied Physics Letter, Vol. 100, pp. 042901, 2012.
- [9] T. V. Galchev, J. McCullagh, R. L. Peterson, and K. Najafi, "Harvesting traffic-induced vibrations for structural health monitoring of bridges," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 21, pp. 104005, 2011.
- [10] S. P. Beeby, M. J. Tudor, and N. M. White, "Energy harvesting vibration sources for microsystems applications," Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 175-95, 2006.
- [11] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," Computer Communication, Vol. 26, pp. 1131 - 1144, 2003.
- [12] C. R. Saha, T. O'Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, "Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 147, pp. 248-253, 2008.
- [13] B. J. Bowers, and D. P. Arnold, "Spherical, rolling magnet generators for passive energy harvesting from human motion," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 19, pp. 094008, 2009.
- [14] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, "A scalable piezoelectric impulse-excited energy harvester for human body excitation," Smart Materials and Structures, Vol. 21, pp. 115018, 2012.
- [15] T. Galchev, E. E. Aktakka, and K. Najafi, "A piezoelectric parametric frequency increased generator for harvesting low-frequency vibrations," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 21, pp. 1311-1320, 2012.
- [16] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, "A piezoelectric frequency up-converting energy harvester with rotating proof mass for human body applications," Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 206, pp. 178-185, 2014.
- [17] T. Xue, X. Ma, C. Rahn, and S. Roundy, "Analysis of upper bound power output for a wrist-worn rotational energy harvester from real-world measured inputs," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 557, pp. 012090, 2014.
- [18] M. Renaud, and P. Fiorini, "Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator," Smart Materials and Structures, Vol. 21, pp. 049501, 2012.
- [19] M. Renaud, P. Fiorini, R. Van Schaijk, C. Van Hoof, "Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator," Smart Materials and Structures, Vol. 21, pp. 035001, 2009.
- [20] <http://www.smart-material.com/>
- [21] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, "An investigation into the performance of macro-fiber composites for sensing and structural vibration applications," Mechanical System and Signal Processing, Vol. 18, pp. 683 - 697, 2004.
- [22] S. Ju, S. H. Chae, Y. Choi, S. Lee, H. W. Lee, and C.-H. Ji, "A low frequency vibration energy harvester using magnetoelectric laminate composite," Smart Materials and Structures, Vol. 22, pp. 115037, 2013.

저 자 소 개



주 선 아 (Suna Ju)

1986년 5월 29일생. 2012년 이화여자대학교 전자공학과 학사. 2017년 이화여자대학교 전자전기공학과 석박통합과정 박사. 2017년~현재 이화여자대학교 전자전기공학전공 박사 후 연구원.



지 창 현 (Chang-Hyeon Ji)

1972년 2월 1일생. 1995년 서울대 전기공학과 학사. 1997년 동대학원 석사. 2001년 서울대 전기·컴퓨터공학부 박사. 2001년~2006년 LG전자기술원 선임 및 책임 연구원. 2006년~2011년 Georgia Institute of Technology 박사 후 연구원. 2011년~2012년 이화여자대학교 전자공학과 조교수. 2012년~2017년 이화여자대학교 전자공학과 부교수. 2017년~현재 이화여자대학교 전자전기공학전공 교수.