

## 압전 캔틸레버 스프링 구조물(SPCS)의 에너지 하베스팅 특성

김경범<sup>1</sup>, 김창일<sup>1</sup>, 정영훈<sup>1,a</sup>, 이영진<sup>1</sup>, 조정호<sup>1</sup>, 백종후<sup>1</sup>, 남 산<sup>2</sup>, 성태현<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국세라믹기술원 전자소재융합본부 지능형전자부품팀

<sup>2</sup> 고려대학교 신소재공학과

<sup>3</sup> 한양대학교 전기공학과

### Energy Harvesting Characteristics of Spring Supported Piezoelectric Cantilever Structure (SPCS)

Kyoung-Bum Kim<sup>1</sup>, Chang-Il Kim<sup>1</sup>, Young Hun Jeong<sup>1,a</sup>, Young-Jin Lee<sup>1</sup>, Jeong-Ho Cho<sup>1</sup>, Jong-Hoo Paik<sup>1</sup>, Sahn Nahm<sup>2</sup>, and Tae-Hyeon Seong<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Electronic and Material Ceramics Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, Seoul 153-801, Korea

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received July 19, 2012; Revised August 16, 2012; Accepted September 24, 2012)

**Abstract:** Spring supported piezoelectric cantilever structures (SPCS) were fabricated for vibration-based energy harvester application. We selected four elastic springs (A, B, C, and D type) as cantilever's supporter, each elastic spring has a different spring constant (S). The C type of SPCS ( $S_C$ : 4,649 N/m) showed a extremely low resonance frequency of 81 Hz along with the highest power output of 38.5 mW while the A type of SPCS ( $S_A$ : 40,629 N/m) didn't show a resonance frequency while. Therefore, it is considered that the lower spring constant lead to a lower resonance frequency of the SPCS. In addition, a tip mass (18 g) at one end of the SPCS could further reduce the resonance frequency without heavy degradation of power output.

**Keywords:** Piezoelectric energy harvester, PZT-C/N, Bimorph cantilever, Spring

#### 1. 서 론

최근에 압전 세라믹을 이용한 미활용 에너지를 수확하는 개념의 에너지 하베스팅 기술은 주변의 진동과 같은 기계적 에너지를 전기적 에너지로 바꾸는 대체 에너지원으로 많은 연구가 진행되어 왔다 [1-6]. 그러나 압전 세라믹을 이용한 에너지 하베스팅 장치는 mW급 이하의 저전력 출력을 생성하기 때문에 최

소 수십 mW급 이상의 소비전력을 요구하는 대부분의 전기장치로의 적용이 어려워 발전성능을 향상시키기 위한 많은 연구가 현재 진행 중에 있다. 최적의 복합 구조물의 설계를 통한 발전성능 향상 연구나 에너지 하베스팅을 위한 저전력 회로 설계를 통한 발전 효율 향상에 관한 연구 결과가 보고되고 있다 [7-13].

에너지 하베스팅을 위한 압전세라믹 소재는 보다 높은 에너지 밀도를 가지는 조성을 개발하기 위한 연구가 최근 보고되고 있다. 일반적으로 높은 에너지 밀도의 소재는 압전전압상수  $g$ 와 압전전하상수  $d$ 의 곱

a. Corresponding author: [yhjeong@kicet.re.kr](mailto:yhjeong@kicet.re.kr)

인  $d_{33} \cdot g_{33}$  인자를 이용하여 나타낼 수 있으며, 최근에 보고된 선행 연구 결과에 따르면  $0.68Pb(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3 - 0.32Pb[(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$  세라믹이  $d_{33} \cdot g_{33}$  값이  $20,056 \times 10^{-15} m^2/N$ 의 높은 에너지 밀도 특성을 가진다고 한다 [14-18]. 이 외에도 최적 복합구조물 설계를 통한 발전성 향상을 위해 질량체 무게 및 진동 빔 사이즈 형상 변화를 통한 최적 공진 주파수 설계, 3가지 형태의 PZT 바이몰프형 멀티레이어 제작, 그리고 바이몰프의 위치별 가해진 힘을 통한 특성 비교 연구를 통해 안전 에너지 하베스터의 성능을 향상시키기 위한 연구가 다양하게 보고되고 있다 [19-21]. 압전 에너지 하베스터는 주로 경도가 높은 금속 빔의 상 하단에 압전 필름을 붙인 후 한쪽 끝단은 고정된 후 외부 진동에 따라 빔이 변형되는 캔틸레버 구조물을 활용한다. 하지만, 이러한 캔틸레버 구조물은 고유 진동 주파수가 수백 Hz 수준으로 높아 실제 구조물이나 산업 환경에서 관찰 가능한 100 Hz 이하의 주파수에서 적용이 어려워 한쪽 끝단에 무거운 질량체를 고정하는 등의 주파수 강하 설계를 통해 실제 적용되고 있다. 하지만 이러한 질량체의 적용은 취성이 강한 압전 세라믹에 큰 스트레스를 인가하게 되어 압전 에너지 하베스터의 수명을 단축시키게 된다. 이에 본 연구에서는 압전 캔틸레버 빔의 지지체로서 다양한 스프링 상수를 가지는 스프링을 이용한 압전 캔틸레버 스프링 구조물 (SPCS)의 에너지 하베스터를 제작하여 주파수 강하 특성을 평가하고 하베스팅 성능을 평가한 후 적용가능성에 대한 연구를 진행하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 고에너지밀도를 가지는 압전세라믹 조성으로  $d \cdot g$  값 ( $14,634 \times 10^{-15} m^2/N$ )을 가지는  $0.72Pb(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3 - 0.28Pb[(Zn_{0.45}Ni_{0.55})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$  ( $0.72PZT - 0.28PZNN$ ) 조성을 이용하여 실험을 진행하였다. 원료 파우더로는  $PbO$  (99.9%),  $ZrO_2$  (99.9%),  $TiO_2$  (99.9%),  $NiO$  (99.9%),  $ZnO$  (99.9%), 그리고  $Nb_2O_5$  (99.9%) 모두 high purity chemical Co.(Japan) 사 제품을 이용하였다.

그림 1을 통하여 후막 세라믹공정을 나타내었다. 압전 조성  $0.72PZT - 0.28PZNN$  으로 일반적인 후막 세라믹 공정을 통해서 폴리에틸렌 병에 지르코니아 불을 이용하여 24시간 동안 불 밀링을 하여 믹싱 한 후에  $850^\circ C$ 에서 1시간 하소 처리를 한 뒤 다시 72 h

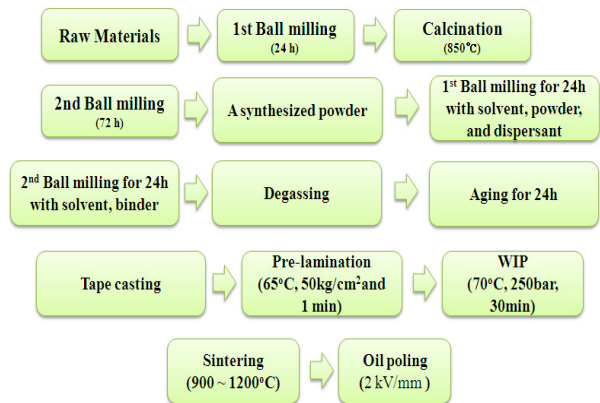


Fig. 1. 0.72PZT-0.28PZNN piezo thick film process and production method.

2차 불 밀링한 후,  $100^\circ C$ 에서 12시간 건조시킨 파우더를 polyvinyl butyral (BUT VAR, FERRO, USA), solvent (8541-4 100, DAEJU NG, KOREA), 그리고 plasticizer (B-73225, FERRO, USA)를 이용하여 적정 비율로 섞어 슬러리 상태로 제작한 후, 탈포 장비를 이용하여 30분 동안 슬러리 내부에 있는 기포를 제거하는 작업을 진행하였다. 슬러리 안정화 작업을 위해 24시간 동안 aging 처리한 후에, 테잎 캐스팅장비 (TECHGEN, KOREA)를 이용하여 두께  $30 \mu m$ 의 green sheet를 제조한 후 10장의 green sheet를 라미네이터 (TECHGEN, KOREA)로  $60^\circ C$ 에서 1분 동안  $50 kg/cm^2$ 의 압력을 가하여 적층하였다. 대략  $290 \mu m$  두께의 적층 sheet를 cutting 장비 (TECHGEN, KOREA)를 이용하여 가로로 30 mm, 세로길이를 40 mm로 절단한 뒤  $900^\circ C$ 에서  $1,200^\circ C$ 까지 2시간 동안 소결하였다. 소결체의 양 측면에 Ag 전극을 코팅한 후  $670^\circ C$ 에서 10분 동안 안정화 시켰다. 그리고 oil bath안에서 2 kV/mm의 직류전계를 30분 동안 인가하여 소결체를 분극하였다. 분극한 시편의 압전 특성을 분석하기 위하여 특성  $d_{33}$  meter (PM100, PIEZOTEST, United Kingdom)를 사용하였으며, 유전 특성은 impedance analyzer(impedance analyzer, HP 4194A, Hewlett packard, United state)으로 측정 및 계산하였다. 분극을 마친 압전 후막 소자를 가로 30 mm, 세로 70 mm stainless steel 기판에 접착제를 이용하여 부착하였다.  $0.72PZT - 0.28PZNN$  후막을 이용하여 SPCS로 제작하여 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF,

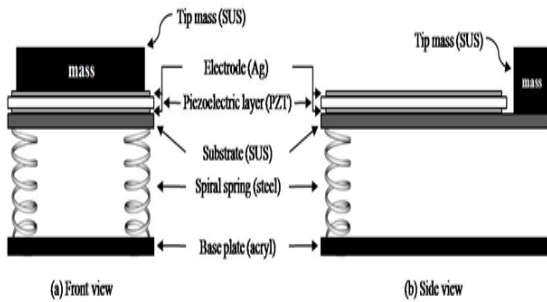


Fig. 2. Schematic diagram of the proposed piezoelectric cantilever spring structure (SPCS); (a) front view and (b) side view.

HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA), accelerometer (ACO, 3116, Japan)를 그리고 amplifier (LeCroy, Wavejet 322, Japan)를 사용하여 진동을 1 Hz에서부터 100 Hz까지의 주파수와 시간변화에 따른 전기적 특성을 평가하였다.

그림 2는 질량체가 부착된 SPCS를 정면과 옆면에서 바라본 모습을 나타낸다. 압전 캔틸레버 빔을 제작하기 위하여 1,050°C에서 소결한 0.72PZT-0.28PZNN 압전세라믹 후막을 stainless steel 기판에 접착제를 이용하여 부착하였으며, 캔틸레버 빔의 한 쪽 끝단에 동일한 SUS 재료의 질량체를 부착하였다. 캔틸레버 빔의 나머지 한 쪽 끝단은 두 개의 스프링을 이용하여 지지하였으며 캔틸레버 빔과 부착되지 않은 스프링의 나머지 한 쪽 끝단은 아크릴 재료의 base plate에 수직으로 세워 단단히 고정하였다. 이때 사용된 탄성 스프링은 A, B, C, D의 4가지 재료로 표 II를 통해서 각각의 길이는 모두 26.5 mm로 동일하나 코일 반경, 감긴 코일 회전수, 스프링의 회전 직경 및 스프링상수 (S)등 다양한 수치와 물성치를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

표 1은 900°C에서 1,200°C까지 다양한 온도에서 2 시간동안 소결한 0.72PZT-0.28PZNN 후막의 압전 및 유전 특성을 나타내었다. 소결온도가 1,050°C까지 증가하면서 유전상수와 압전전하상수 ( $d_{33}$ )는 각각 1,494와 440 pC/N으로 증가하였으나 온도를 더욱 증가시키면 모두 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만,

Table 1. Piezoelectric & dielectric properties of the 0.72PZT-0.28PZNN thick films sintered at various temperatures.

Sintering Temperature	$d_{33}$ (pC/N)	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	$Q_{ml}$	$g_{33}$ ( $10^{-3}$ Vm/N)	$d_{33}g_{33}$ ( $10^{-15}$ m <sup>2</sup> /N)
900 °C	102	816	79	14	1,440
1000 °C	200	846	23	27	5,339
1050 °C	440	1494	31	33	14,634
1100 °C	370	1,185	19	35	13,051
1200 °C	130	310	86	47	6,165

Table 2. Geometric and material parameters of the various spiral springs utilized as the cantilever beam supporter.

Spiral spring	Length (mm)	Wire diameter (d:mm)	No. of turns	Coil radius (R:mm)	C. Spring constant (S:N/m)	R. Spring constant (S:N/m)
A	26.5	1.45	10	2.38	40629	40950
B	26.5	0.95	14	1.70	14673	14320
C	26.5	0.97	8	3.09	4648	4330
D	26.5	0.7	12	2.05	2878	2900

압전전압상수 ( $g_{33}$ )는 소결온도가 900°C에서 1,200°C까지 증가하면서  $14 \times 10^{-3}$  Vm/N에서  $47 \times 10^{-3}$  Vm/N까지 계속 증가함을 확인하였다. 특히, 1,050°C에서 소결한 시편에서  $d_{33} = 440$  pC/N,  $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 1,494$ ,  $g_{33} = 33 \times 10^{-3}$  Vm/N로 비교적 높은 압전 및 유전 특성이 관찰되었으며, 에너지 밀도를 나타내는  $d_{33}g_{33}$  값은  $14,634 \times 10^{-15}$  m<sup>2</sup>/N으로 매우 높았다. 이로부터, 1,050°C에서 소결한 0.72PZT-0.28PZNN 압전세라믹 후막을 이용한 유니몰프 (unimorph)형의 SPCS를 제조하였다.

$$S(N/m) = \frac{\mu d^4}{64nR^3} \tag{1}$$

표 2를 통해서 스프링상수 S는 아래 식 1을 통하여 계산하였으며 여기서  $\mu$ 는 전단응력계수, n은 감긴 코일 회전수, d는 스프링의 직경, R은 감긴 코일의

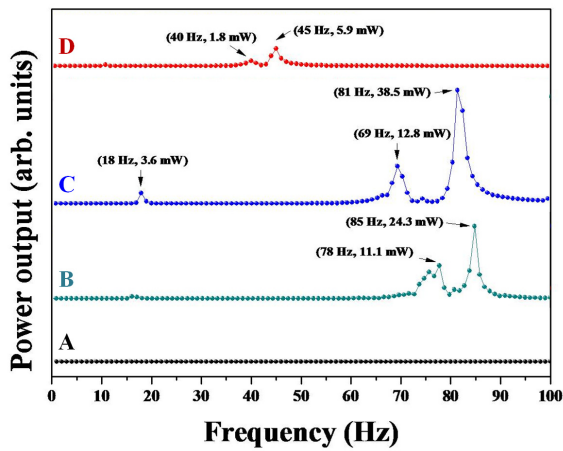


Fig. 3. Variations of the output power as a function of applied frequency for the various kinds of SPCS without tip mass.

반경을 각각 나타낸다. 측정 결과 C. Spring constant (계산된 스프링 상수값)와 R. Spring constant (측정된 스프링 상수값)은 오차 범위가 크지 않은 것으로 관찰되었다.

그림 3은 A, B, C, 그리고 D의 탄성 스프링을 이용하여 제조된 질량체를 사용하지 않은 SPCS로부터 1Hz에서 100 Hz까지 주파수를 가진기를 통해 두개의 스프링지지대에 직접 가하여 변화시키면서 발생된 출력 전력의 상대적 변화를 나타내었다. 여기서 에너지 하베스팅 특성을 평가하기 위해 도출된 출력전력(P)은 아래 식 (2)를 이용하여 계산하였다. 여기서  $v(t)$ 는 부하저항에 걸리는 전압을 나타내며, R은 부하저항, T는 외부 진동이 인가된 시간을 의미한다.

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

1 Hz에서 100 Hz까지 측정된 주파수 변화의 범위는 우리 주변의 빌딩, 산업 시설물 등 다양한 구조물이 가지는 고유주파수 범위로 통상적으로 관찰 가능한 주변 환경의 주파수 범위를 고려하였다. 본 실험 결과를 통해서 측정된 4가지 SPCS 샘플이 가지는 공진 주파수는 측정된 주파수 범위 내에서 서로 다른 공진 주파수를 가짐을 확인할 수 있었다. 비록 압전 켈털

레버 빔의 모양과 면적은 동일하지만 빔을 지지하는 스프링의 재료특성 및 물리적인 특성에 의해서 서로 다른 위치의 공진주파수 피크 (peak)가 관찰되었다. A의 경우, 공진 피크는 관찰되지 않았으며, B의 경우는 40 Hz와 45 Hz의 2개의 피크가, C의 경우는 69 Hz와 81 Hz에서 두개의 주된 피크가 관찰되었으며, 18 Hz에서 또한 상대적으로 약한 피크가 관찰되었다. 마지막으로 D의 경우는 각각 78 Hz와 85 Hz에서 강한 피크가 관찰되었으며, C와 유사하게 17 Hz 근처에서 약한 피크가 관찰되었다. A를 제외한 나머지 B, C, D 세 경우 모두 20 Hz 보다 낮은 주파수에서 약한 피크가 관찰되었으며, 상대적으로 높은 출력전력 강도의 두 개 피크가 측정 주파수 범위에서 공통적으로 관찰되었다. 모든 경우에서 가장 강력한 강도의 파워 피크를 가지는 주파수는 사용된 탄성 스프링의 스프링 상수 (S)의 크기가 클수록 보다 높은 주파수 대역에서 관찰됨을 확인하였다. 이로부터 지지대로 사용한 스프링의 기계적 탄성 요소인 스프링 상수가 높을수록 제조한 SPCS의 공진주파수가 높음을 확인할 수 있었으며, 스프링 상수가 가장 높은 A 샘플에서 공진현상이 관찰되지 않았다. 또한 낮은 스프링 상수의 스프링 지지대를 사용하여 무거운 질량체가 없어도 보다 낮은 주파수에서 작동 가능한 SPCS를 설계할 수 있음을 확인하였다. 하지만 출력 전력의 크기는 사용된 스프링의 직경, 코일의 굵기 등 여러 복합적인 요소에 기인한 것으로 판단된다. 한편, C 타입의 SPCS의 경우, 81 Hz의 주파수에서 38.5 mW의 가장 높은 출력전력 특성을 나타내었다. 그림 4는 C형 SPCS의 질량체 무게변화에 따른 출력 전압의 변화를 나타내었다. 이 때, SPCS에 인가된 가속도는 0.5G (G: 중력가속도 9.8 m/s)로 측정되었다. 이는 스프링-질량체-감쇠현상으로 이루어진 전형적인 탄성체 구조로서 질량체 변화에 따른 감쇠현상을 보여준다. 질량체를 6 g으로 사용하였을 때, 시간이 지날수록 출력 전압 (V)은 급격히 감소되어 4초 이후에는 피크를 관찰할 수 없었다. 하지만 질량체가 18 g까지 증가될수록 출력전압이 지속적으로 유지되는 시간은 현저히 증가됨을 관찰할 수 있었다.

질량체가 18 g일 때는 높아진 무게로 인해 다소 감소된 출력 전압을 확인할 수 있었다. 이와 같은 현상은 스프링과 질량체의 복합적인 관계로 인해 나타난 결과로 판단된다. 이와 같은 실험 결과를 통해 C형 SPCS의 경우, 지속적인 외부 진동이 존재하지 않는 환경에서 감쇠 효과를 최소화하고 에너지 하베스터로

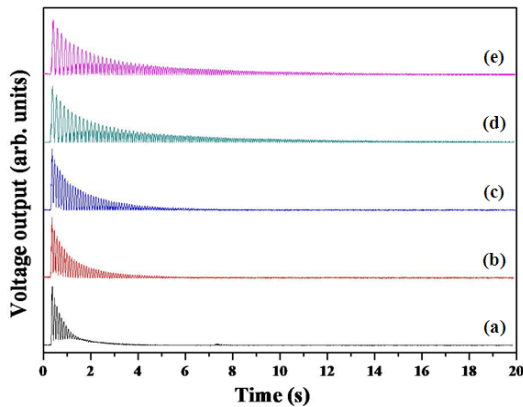


Fig. 4. Voltage response for the C type SPCS as a function of tip mass under base acceleration of 0.5 G (a) 6 g, (b) 7 g, (c) 8 g, (d) 17 g, and (e) 18 g.

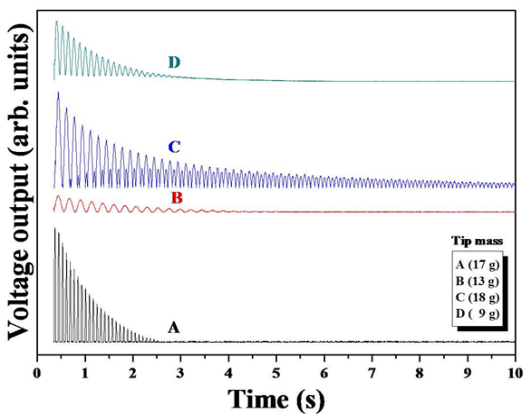


Fig. 5. Peak voltage response for the various kinds of SPCS with each tip mass under a base acceleration magnitude of 0.5 G.

서의 성능을 극대화하기 위한 최적화 구조는 질량체를 18 g으로 유지하는 것이 적당하였으며, 다른 형태의 SPCS도 유사한 방식으로 최적 질량체를 결정하였다. 이 때, A, B, D의 경우 각각 17 g, 13 g, 9 g의 질량체를 가질 때 감쇠현상을 최소화할 수 있었다. 가속도 0.5 G의 조건에서 최적의 질량체를 가진 4가지 종류의 SPCS의 주파수 변화에 따른 출력전압 특성을 그림 5로부터 참조할 수 있다.

그림 6은 A, B, C, 그리고 D의 스프링 종류와 최적 질량체에 따른 SPCS의 주파수 변화의 출력 전력 변화를 보여 준다. 실험 결과를 통해서 모든 샘플이

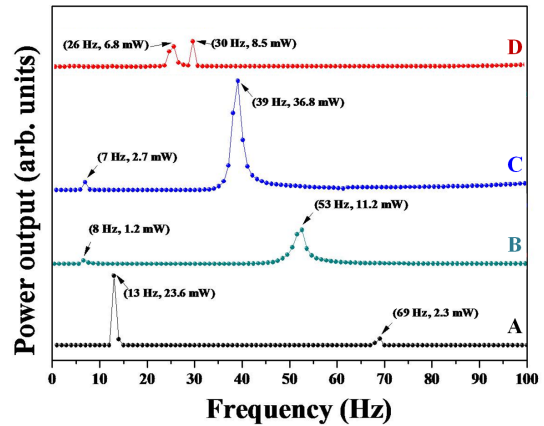


Fig. 6. Variations of the output power as a function of applied frequency for the various kinds of piezoelectric cantilever generators with each tip mass.

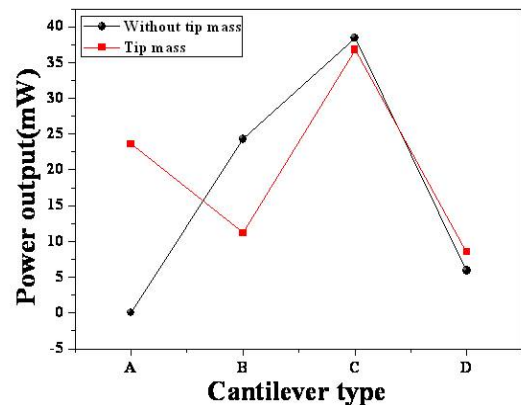


Fig. 7. Output power harvested from the various kinds of SPCS with optimized tip mass and without tip mass for 15s under a base acceleration magnitude of 0.5 G.

가지는 가장 강한 크기의 출력전력을 나타내는 공진 주파수의 위치가 질량체를 가지지 않은 경우의 공진 주파수보다 낮아진 것을 확인할 수 있었다. [그림 3 참조] 특히 A의 경우, 공진주파수가 13 Hz로 급격히 낮아졌음을 확인하였으며, 이 때 SPCS의 출력전력 특성은 23.6 mW로 상당히 우수하였다. 하지만 나머지 B, C, D의 경우는 질량체를 적용한 경우와 비교하여 유사하거나 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다. 그럼에도 불구하고 C의 경우 39 Hz에서 여전히 36.8 mW의 높은 출력 전력 특성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

그림 7은 4가지 SPCS의 최적 질량체에 따른 발전 특성을 0.5 G의 가속도로 가하여 15초 동안 측정하여 계산한 출력전력 특성을 정리한 결과를 보여준다. 이로부터 질량체의 효과는 SPCS의 공진주파수를 급격히 낮출 수 있음을 재확인할 수 있으며, 출력 전력을 극대화하기 위한 조건으로 질량체의 존재는 무관함을 알 수 있다. 이는 single 캔틸레버 빔이 가지는 외부 진동에 따른 자유도 (degree of freedom)가 지지체로서의 스프링에 기인한 탄성체의 결합으로 인해 다자유도 (multi degree of freedom)를 가지게 된 것에 기인한 것으로 추정된다. 일반적으로 스프링 구조를 갖는 single 캔틸레버에서 공진주파수 함수는 식 (3)을 이용하여 유도할 수 있다. 여기서 E는 탄성계수, I는 관성 모멘트, l은 캔틸레버 빔의 길이, m은 캔틸레버 빔의 질량을 의미한다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{l^3 m}} \quad (3)$$

하지만, 본 연구에서는 사용된 캔틸레버 빔이 압전 세라믹 후막과 접착체로 구성된 불균일한 재질로서 상기 함수의 적용이 적당하지 않을 뿐만 아니라 사용된 탄성 스프링의 직경, 코일의 굵기 및 질량체 등의 여러 복합적인 기계적 요소가 진동함수에 상당한 영향을 끼쳐 공진주파수를 예측하기가 매우 어려웠다. 이에 보다 정확한 모델링을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

고 에너지 밀도를 가지는 0.72PZT-0.28PZNN 조성을 이용하여 1,050°C에서 소결한 압전 후막을 통해, 두 개의 spring 지지대를 이용한 새로운 형태의 압전 캔틸레버 스프링 구조물 (SPCS)을 제작하였다. 제조된 4가지 이종의 탄성스프링을 사용한 SPCS에서 스프링 상수(S)가 높을수록 제조한 SPCS의 공진주파수가 높음을 확인할 수 있었다. 스프링 상수가 큰 A형 SPCS (spring constant: 40,629 N/m)의 경우 공진주파수가 관찰되지 않았으며 나머지 B-D형 SPCS 모두 100 Hz 이하에서 2개 이상의 공진 피크를 관찰할 수 있었다. 뿐만 아니라, C형 SPCS (spring constant: 4,648 N/m)의 경우 18 g의 질량체로 에너지 하베스

터로서 큰 출력전력의 감소 없이 공진주파수를 더욱 낮출 수 있었다. 결과적으로 스프링 구조물을 사용한 압전 캔틸레버 구조를 이용하여 홈, 빌딩, 산업 환경에서 적용가능한 주파수 (100 Hz 이하)를 이용한 에너지 하베스터의 설계가 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

This work was supported by the New & Renewable Energy Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea Government Ministry of Knowledge Economy. (No. 2010T100101097)

#### REFERENCES

- [1] X. Gao, W. H. Shih, and W. Y. Shih, *Appl. Phys. Lett.*, **97**, 233503 (2010).
- [2] H. Shen, J. Qiu, and M. Balsi, *Sensor. Actuat.*, **A169**, 178 (2011).
- [3] W. G. Li and S. He, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **57**, 868 (2010).
- [4] X. Chen, S. Xu, N. Yao, and Y. Shi, *Nano Lett.*, **10**, 2133 (2010).
- [5] G. W. Taylor, J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Powers, and T. R. Welsh, *IEEE J. Oceanic Eng.*, **26**, 539 (2001).
- [6] H. Lee, P. K. T. Mok, and W. H. Ki, *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems* (Geneva, Switzerland, 2000) p. 256.
- [7] B. H. Calhoun, D. C. Daly, N. Verma, D. F. Finchelstein, D. D. Wentzloff, A. Wang, S. H. Cho, and A. P. Chandrakasan, *IEEE Trans. Comput.*, **54**, 727 (2005).
- [8] M. Goldfarb and L. D. Jones, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, **121**, 566 (1999).
- [9] K. Sato, K. Okamoto, Y. Fuda, and T. Yoshida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 5378 (1994).
- [10] M. Umeda, K. Nakamura, and S. Ueha, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 3267 (1996).
- [11] M. Umeda, K. Nakamura, and S. Ueha, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 3146 (1997).
- [12] H. A. Sodano, D. J. Inman, G. Park, *Shock Vibr. Dig.*, **36**, 197 (2004).

- [13] H. A. Sodano, G. Park, and D. J. Inman, *Strain*, **40**, 49 (2004).
- [14] H. Kim, S. Priya, K. Uchino, and R. E. Newnham, *J. Electroceram.*, **15**, 27 (2005).
- [15] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieture, *IEEE Trans. Power Electron.*, **17**, 669 (2002).
- [16] R. Islam and S. Priya, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 0329 (2006).
- [17] L. Mateu and F. Moll, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16**, 835 (2005).
- [18] R. A. Islam and S. Priya, *J. Am. Ceram. Soc.*, **89**, 3147 (2006).
- [19] I. T. Seo, Y. J. Cha, I. Y. Kang, J. H. Choi, S. Nahm, T. H. Seung, and J. H. Paik, *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 1 (2011).
- [20] I. T. Seo, Y. J. Cha, I. Y. Kang, J. H. Choi, S. Nahm, T. H. Seung, and J. H. Paik, *J. Am. Ceram. Soc.*, **94**, 1 (2011).
- [21] H. C. Song, H. C. Kim, C. Y. Kang, H. J. Kim, S. J. Yoon, and D. Y. Jeong, *J. Electroceram.*, **23**, 301 (2009).