

## 바이몰프형 압전세라믹 캔틸레버를 이용한 수력에너지 하베스터 모듈 제작 및 발전 특성

김경범<sup>1</sup>, 김창일<sup>1</sup>, 윤지선<sup>1</sup>, 정영훈<sup>1,a</sup>, 남중희<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

## Fabrication and Energy Harvesting Characteristics of Water Energy Harvester Using Piezoelectric Ceramic Bimorph Cantilever

Kyoung-Bum Kim<sup>1</sup>, Chang-Il Kim<sup>1</sup>, Ji-Sun Yun<sup>1</sup>, Young Hun Jeong<sup>1,a</sup>, Jung Hee Nahm<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 October 12, 2012; Revised October 26, 2012; Accepted November 1, 2012)

**Abstract:** A new water energy harvester module, which is composed of piezoelectric bimorph cantilevers, harvesting circuit and a shaft with 16 impellers at a center axis, was fabricated for energy harvesting application. High energy density  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3 + 0.2 \text{ wt\% Cr}_2\text{O}_3 + 1.0 \text{ wt\% Nb}_2\text{O}_5$  (PZT-CN) thick film obtained by tape casting method was used for the bimorph cantilever. The PZT-CN bimorph cantilever with a proof mass of 49 g exhibited extremely high output power of 22.5 mW ( $24 \text{ mW}/\text{cm}^3$ ) at resonance frequency of 11 Hz. In addition, the fabricated water energy harvester has a cylindrical structure with 48 bimorph cantilevers clamped at inner surface. A significantly high output power of 433 mW was obtained at a rotation speed of 120 rpm with a resistive load of  $500 \Omega$  for the water energy harvester.

**Keywords:** Tape casting, PZT, Bimorph, Energy harvesting, Water energy

### 1. 서 론

최근 도로의 진동, 풍력, 빗방울과 같이 미활용되고 있는 미세한 주변 에너지를 수확하여 저장한 후 유용하게 활용하고자 압력, 충격, 진동과 같은 기계에너지를 전기에너지로 변환이 가능한 압전 에너지 변환 기술을 활용하여 다양한 산업 분야에 적용을 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다 [1-8]. 특히, 수력, 해양 에너지와 같은 유체에서 발생하는 진동과 압력을 이

a. Corresponding author; ykjeong@kicet.re.kr

용한 압전 에너지 하베스팅 기술은 강, 하천, 바다와 같은 지속적이고도 무한한 양의 에너지를 가지고 있어 에너지 변환 기술을 활용한 대체 전력 자원요소로서 엄청난 잠재력을 가지고 있다 [9-12]. 뿐만 아니라, 태양광 발전이나 풍력발전과 달리 자연 경관을 훼손시키지 않고 생태계를 보존하면서 에너지 생산이 가능해 친환경 에너지 기술로서 더욱 주목을 받고 있다. 미국의 Ocean Power Technologies사는 유연한 압전 소재를 활용한 해양에너지 하베스팅 장치를 특허 개발하였으며 [13], 플로리다 공대는 참치 꼬리 지느러미 형상의 힌지 (hinge)가 파도의 상하 진동에 의해 방향을 바꾸는 힘을 활용하여 적층형 압전체로부터 발전을 유도하는 장치를 개발하였으며 [14], SRI International은 EAP (electro-active polymer) 소재의 인공근육을 활용해 해양 너울의 진동으로부터 전기 에너지 생성이 가능한 Power Buoy를 개발하였다 [15,16]. 그러나, 보고된 대부분의 해양 에너지 압전 하베스터 모듈은 압전 세라믹에 비해 압전 전하상수( $d$ )가 10배 이상 낮은 압전성 고분자를 활용하거나 수 Hz 수준의 진동 주파수를 가지는 너울을 활용한 하베스터 구조를 가지기 때문에 출력되는 전력 수준은 만족스럽지 못하였다.

본 연구에서는 유체 에너지를 이용한 우수한 성능의 압전 에너지 하베스터를 개발하기 위해 높은 압전 에너지 밀도를 가지는  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3 + 0.2 \text{ wt\% Cr}_2\text{O}_3 + 1.0 \text{ wt\% Nb}_2\text{O}_5$  (PZT-CN) 세라믹 소재를 테이프 캐스팅 (tape casting) 공정을 통해 후막으로 제조한 후 이를 활용한 바이몰프 (bimorph)형 압전 캔틸레버 (cantilever)를 제작하였다. 일반적으로 압전에너지 하베스터로 적용하기 위한 구조물은 탄성체의 한쪽 끝단을 고정하고 나머지 한쪽 끝단을 개방하여 진동이 가능한 캔틸레버 구조물을 사용한다. 이러한 캔틸레버는 압전체 후막을 탄성체에 부착하는 방법으로 그림 1에서 보듯이 유니몰프 (unimorph)와 바이몰프 형태가 있으며, 유니몰프는 탄성체의 한쪽 면에 압전체 막을 부착하는 형태이고 바이몰프는 탄성체의 양쪽 면에 부착하는 형태이다. 유니몰프의 경우, 바이몰프에 비해 낮은 공진주파수를 가지기 때문에 낮은 주파수 대역에서도 공진현상이 발생하는 반면 바이몰프는 유니몰프에 비해 발전 특성은 우수하나 공진주파수가 높다 [17,18]. 그러므로 공진현상과 무관하게 압전체 막의 변형을 인가할 수 있도록, 캔틸레버의 개방된 한쪽 끝단을 기계적으로 타격할 수 있는 압전 바이몰프 구조를 활용하면 하면 보다 높은 출력 전력 성능을 낼 수 있다. 이에 본 연구에서는 수류와 같은 유체의 흐름을 압전 캔틸레버 한 쪽 끝단을 타격이 가능하도록 중앙에 회전하는 축을 가지는 실린더 형태의

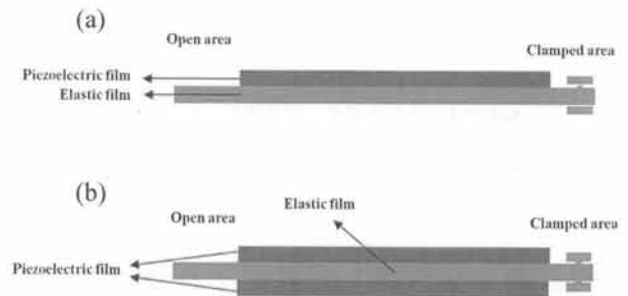


Fig. 1. Schematics of piezoelectric cantilever structure for (a) unimorph and (b) bimorph.

압전 바이몰프 캔틸레버 어레이 구조물을 제작하여 수력에너지를 전기 에너지로 변환이 가능한 수력에너지 하베스터 모듈을 제작한 후 이의 발전 특성을 평가하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 우수한 고에너지 밀도 특성을 가지는 PZT-CN 압전세라믹 후막 ( $d_{33} \cdot g_{33} = 14,072 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ )을 일반적인 테이프 캐스팅 공정을 통해 제조하였다. 기존의 보고에 따르면, PZT-CN 조성은 벌크와 후막 형태로 제조하였을 때 표 1에서 알 수 있듯이 에너지 변환 특성을 나타내는  $d_{33} \cdot g_{33}$  값이 각각  $15,180 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ 과  $14,072 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ 으로 매우 높아 고에너지 밀도를 가지는 에너지 하베스터 소재로 알려져 있다. 뿐만 아니라 벌크의 경우 전기기계결합계수 ( $k_p$ )도 59.5%로 우수한 압전 특성을 가지고 있다 [19,20]. 이에 본 연구에서는 수력에너지 하베스터 모듈을 구성하는 단위 캔틸레버용 압전 소재를 PZT-CN으로 선정하였다.

Table 1. Dielectric & piezoelectric properties of PZT-CN bulk & thick film.

| Type       | Sintering temperature (°C) | $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$ | $d_{33}$ (pC/N) | $k_p$ (%) | $d_{33} \cdot g_{33}$ ( $10^{-15} \text{ m}^2/\text{N}$ ) |
|------------|----------------------------|------------------------------|-----------------|-----------|-----------------------------------------------------------|
| bulk       | 1,200                      | 1,572                        | 460             | 59.5      | 15,180                                                    |
| thick film | 1,100                      | 1,069                        | 365             | -         | 14,072                                                    |

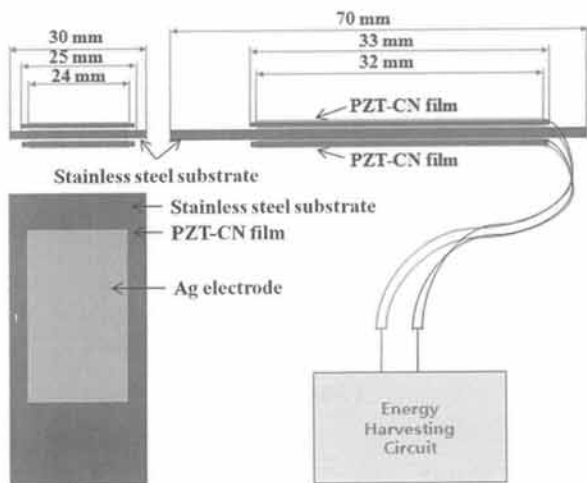


Fig. 2. Schematic diagram of fabricated piezoelectric PZT-CN bimorph harvester unit module.

원료 파우더는 PbO (99.9%), ZrO<sub>2</sub> (99.9%), TiO<sub>2</sub> (99.9%), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (99.9%), 그리고 Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (99.9%) 모두 High Purity Chemical Co.(Japan) 제품을 이용하였다. 일반적인 세라믹 공정을 통해서 폴리에틸렌 병에 지르코니아 볼을 이용하여 24시간 동안 볼 밀링을 하여 믹싱한 후에 건조한 분말을 850℃에서 1시간 하소 처리를 한 뒤 다시 72시간 동안 2차 볼 밀링한 후, 건조시킨 파우더를 polyvinyl butyral (BUTVAR, FERRO, USA), solvent (8541-4100, DAE JUNG, KOREA), 그리고 plasticizer (B-73225, FERRO, USA)를 이용하여 적정 비율로 섞어 슬러리 상태로 제조한 후, 탈포 장비를 이용하여 30분 동안 슬러리 내부에 있는 기포를 제거하는 작업을 진행하였다. 테일 캐스터 (TECHGEN, KOREA)를 이용하여 두께 30 μm의 그린시트를 제조한 후 10장의 그린시트를 가압 적층하였다. Cutting 장비를 이용하여 가로 30 mm, 세로 40 mm로 절단한 뒤 1,100℃에서 2시간 동안 소결하였다. 소결체의 양면에 Ag 전극을 코팅하여 670℃에서 10분 동안 안정화시킨 후 oil bath에서 2 kV/mm의 직류전계를 30분 동안 인가하여 분극을 수행하였다. 시편의 압전 특성은 d<sub>33</sub> meter (PM100, PIEZOTEST, United Kingdom)로 분석하였다. 분극을 마친 PZT-CN 압전 후막 소자는 그림 2에서 보듯이 가로 30 mm, 세로 70 mm stainless steel 기판의 상, 하단에 접착제를 이용하여 부착하여 바이몰프 (bimorph) 형태의 압전 하베스터 단위 소자를 제작하였다.

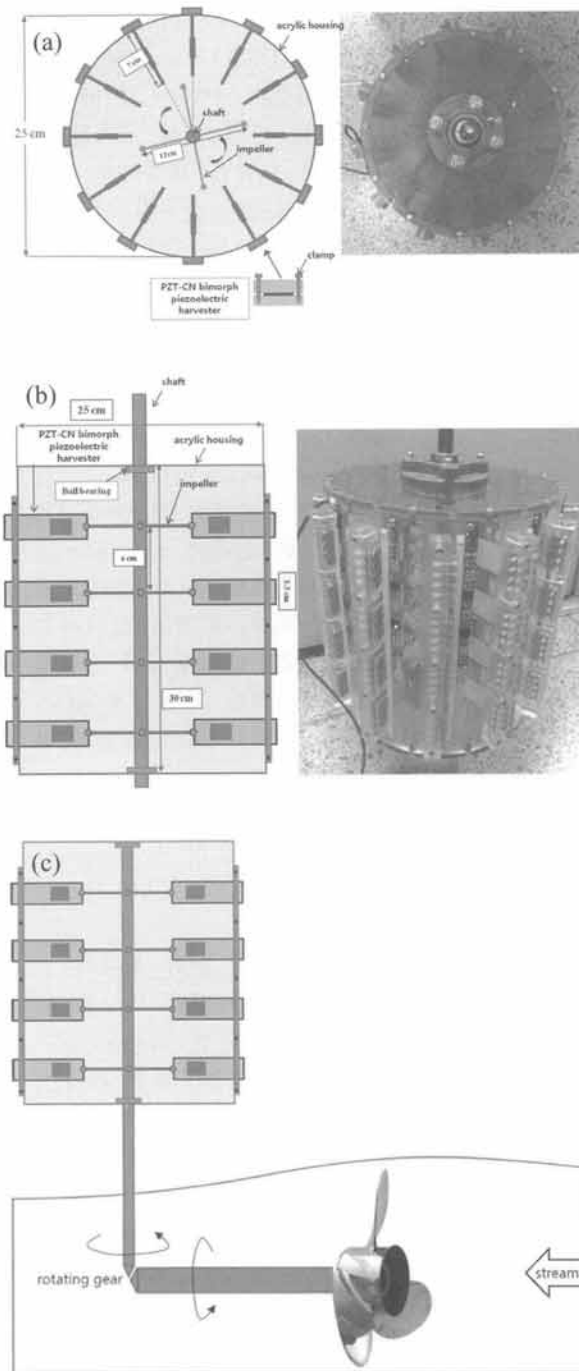


Fig. 3. (a) Top view and (b) front view images of the designed and fabricated water energy harvester and (c) an illustration of operating energy harvester in stream.

제작한 압전 하베스터의 출력 전력 특성을 평가하기 위하여 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속

bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA), accelerometer (ACO, 3116, Japan)를 사용하였다. PZT-CN 바이몰프 압전 하베스터 단위 소자의 발전 특성 평가를 확인한 후, 수력에너지 하베스터 모듈을 제작하기 위해 그림 3(a)에서 보듯이 실린더 형태의 하우징 구조 내부에 12개의 PZT-CN 바이몰프 압전 하베스터 단위 소자를 실린더 내벽에 동일한 간격으로 배열하였으며, 제작한 수력 하베스터 모듈은 그림 3(c)에서 보듯이 수류에 의해 회전하는 터빈과 연결된 축은 기어를 통해 회전 방향이 수직으로 전환되며 실린더 구조의 중심축에는 샤프트 (shaft)가 존재하고, 기어의 회전 속도에 따라 그림 3(b)에서 보듯이 실린더의 중심축을 관통하는 샤프트의 몸체에 붙어있는 각 층별 4개의 임펠러 (impeller)가 회전하며 실린더 하우징의 내벽에 고정되어 있는 바이몰프 하베스터의 고정되지 않은 한 쪽 끝단을 타격하게 되고, 타격된 에너지는 바이몰프의 변형을 유도하고 PZT-CN 후막의 변형에 의해 전기에너지로 변환된 에너지를 수확하게 된다. 제작된 수력 하베스터 모듈의 샤프트 회전 속도와 임피던스 매칭에 따른 발전 특성을 평가하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 4는 PZT-CN 압전 하베스터 단위 소자의 연결방식에 따른 공진 조건에서의 출력전압 특성을 보여준다. 최적 출력 특성을 나타낸 공진 조건은 임피던스 매칭은 510 k $\Omega$ 의 부하저항, 진동주파수 11 Hz, 검증질량 (proof mass)은 49 g이 인가되었다. Stainless steel 빔의 상, 하단 모두에 PZT-CN 후막 필름이 접합되어 있는 바이몰프 구조 [그림 4(a)]의 하베스터는 출력 전압이 약 50 V로 stainless steel 빔의 상단에만 또는 하단에만 접합되어 있는 유니몰프 구조 [각각 그림 4(b)와 4(c)]에서 나타나는 출력 전압인 35 V, 30 V 보다 훨씬 높은 특성을 나타낸다. 빔의 상단에만 붙어있는 유니몰프 구조의 전압 특성이 하단에만 붙어있는 구조보다 출력 전압이 높은 것도 주목할 만하다. 비록 그림에는 나타내지 않았지만 이는 proof mass가 빔의 하단에 접합되어 있기 때문에 공진 시 빔의 스트레칭에 의한 변위가 하단보다 상단에서 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 빔 상, 하단의 유니몰프 구조로 연결 시 출력 전압의 합 (65 V)은 바이몰프 구조의 경우 (50 V)와

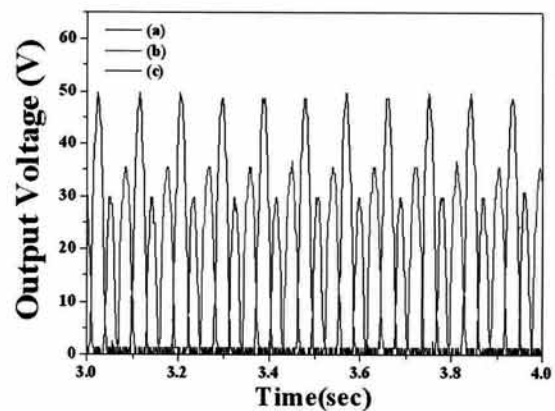


Fig. 4. The output voltage of PZT-CN piezoelectric harvester unit module for various cantilever types; (a) bimorph, (b) unimorph (piezo film on substrate), and (c) unimorph (piezo film under substrate).

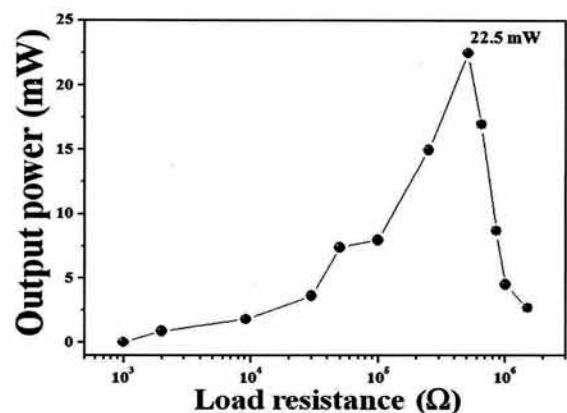


Fig. 5. The output power of PZT-CN bimorph piezoelectric energy harvester unit module with various load resistances.

비교하여 선형적으로 증가하지 않고 15 V 정도 높은 것을 알 수 있는데 이는 정류 회로나 하베스팅 회로의 기생 저항에서 발생하는 전압 손실에 기인한 것으로 판단된다.

그림 5는 PZT-CN 바이몰프 압전 하베스터 단위 소자의 공진주파수인 11 Hz에서의 상용 부하 저항 (load resistance) 크기에 따른 출력전력 특성을 나타낸다. 출력 전력의 크기는 부하 저항의 크기가 1 k $\Omega$ 에서부터 증가함에 따라 꾸준히 증가하는 경향을 나타내었으며, 510 k $\Omega$ 에서 최대 출력인 22.5 mW를 나

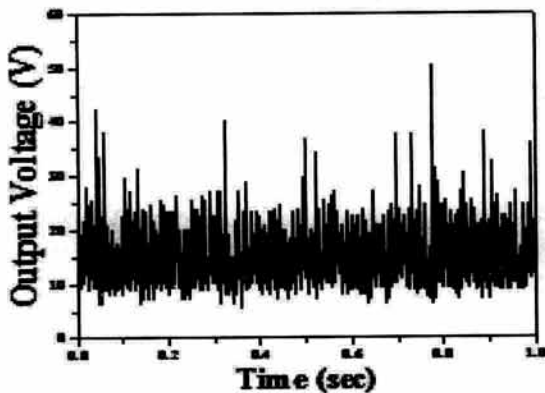


Fig. 6. Output voltage of the fabricated water energy harvester at rotation speed of shaft (120 rpm).

타내었다. 부하 저항의 크기가 더욱 증가하게 되면 출력 전력 특성이 저하되는 것으로 보아 임피던스 매칭 (impedance matching)이 510 kΩ에서 이루어지는 것으로 판단된다. 출력전력 특성은 기본적인 전력 계산 공식인 전력( $P$ )= 전압( $V$ )<sup>2</sup>/저항( $R$ )을 이용하였다. 도출된 출력전력으로부터 PZT-CN 바이몰프 단위 소자의 전력밀도는 24 mW/cm<sup>3</sup>로 계산되었다. 이는 기존에 보고된 캔틸레버 구조의 에너지 하베스터와 비교하여 보면 매우 우수한 출력 특성임을 알 수 있으며 이로부터 PZT-CN 후막 소재가 에너지 하베스팅을 위한 고에너지밀도 소재로서 적합함을 알 수 있으며 다양한 압전 하베스터 소재로서 활용이 기대된다.

그림 3에 나타낸 수력에너지 하베스터의 새프트를 회전모터를 이용하여 120 rpm으로 회전시켰을 때 시간경과에 따라 출력되는 전압 특성을 그림 6에 나타내었다. 48개의 바이몰프형 압전 하베스터는 모두 전기적으로 병렬로 연결되었으며 120 rpm의 회전 속도를 가지는 새프트는 초 당 2회의 완전한 회전을 하게 된다. 또한 한 층에 4개의 임펠러가 부착되어 있는 새프트의 회전에 의해 각 바이몰프 압전 하베스터는 초 당 8번의 임펠러 타격 (hitting)을 받으면서 변형과 회복을 반복하게 된다. 그림 6에 나타난 출력 전압의 크기는 측정된 범위 안에서 최대 피크 (peak)가 50 V이지만 실효 (root mean square) 전압은 14.8 V로 바이몰프 압전 하베스터 단위 소자의 공진 조건에서의 출력 피크 전압보다 훨씬 낮았다. 하지만, 새프트가 회전하는 동안 48개의 바이몰프 단위 하베스터의 일괄적인 기여로 최소 5 V 이상의 안정적이고,

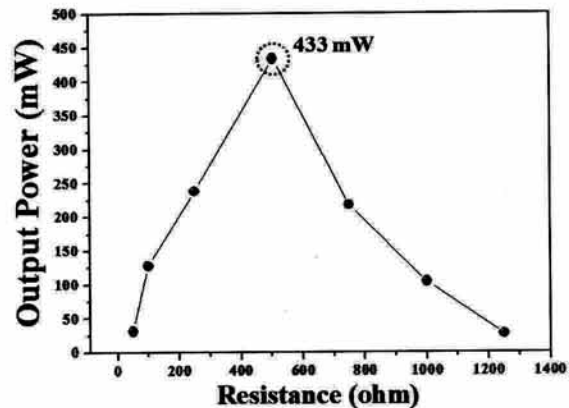


Fig. 7. Output power of the fabricated water energy harvester with a variety of load resistance.

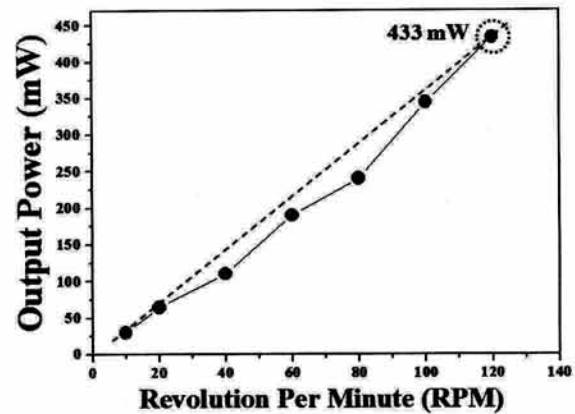


Fig. 8. Output power of the fabricated water energy harvester with a variety of rpm of shaft.

지속적인 출력 전압 특성을 나타내었다. 제작한 수력 에너지 하베스터를 120 rpm의 동일한 새프트 회전 속도를 인가한 상태에서 상용 저항을 다양하게 변화시켰을 때, 임피던스 매칭은 대략 500 Ω에서 나타났으며, 이 때 출력되는 전력은 433 mW를 나타내었다. [그림 7 참조]

그림 8은 제작한 수력에너지 하베스터의 새프트 회전 속도 변화에 따른 출력 전력 특성을 보여준다. 회전속도가 10 rpm에서 120 rpm까지 증가함에 따라 출력 전력은 대체로 선형적으로 증가하는 특성을 나타내었다. 붉은 점선으로 나타낸 회전 속도 증가에 따른 출력 전력의 크기 비는 약 3.6 mW/rpm 정도로 관찰되었다. 하지만 120 rpm 이상의 새프트 회전 속

도를 인가한 경우는 강한 회전으로 인하여 하베스터 모듈을 구성하는 바이몰프 단위 소자의 상당 수가 파괴되어 출력 전력이 급격히 낮아서 출력 특성을 표현하지 않았다. 이로부터 압전 세라믹의 내구성 문제는 고출력의 수력에너지 하베스터를 구현하기 위해 개선되어야 함을 알 수 있다. 수력에너지 하베스터의 실제 적용을 위하여 주변 하천 환경을 이용하여 현장 평가를 수행하였으나, 계측 장비를 이용한 평가 시 평가 시스템이 유선 (wired)으로 구성되어 있어서 높은 유속 환경에서 안정적인 시험 평가를 위한 설치가 불완전하여 실제 환경에서의 신뢰성 있는 데이터 수집은 어려웠다. 실제 환경에서의 평가 시스템 설치 문제의 해결을 통하여 추후 하천 에너지와 유사한 테스트 환경 구축을 통하여 실증 평가를 위한 지속적인 실험이 요구된다.

#### 4. 결 론

테이프 캐스팅 공정을 이용하여 제조한  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.54}\text{Ti}_{0.46})\text{O}_3 + 0.2 \text{ wt\% Cr}_2\text{O}_3 + 1.0 \text{ wt\% Nb}_2\text{O}_5$  (PZT-CN) 후막 세라믹으로 바이몰프 (bimorph)형 압전 캔틸레버 (cantilever)를 제작하였다. Proof mass 49 g, 주파수 11 Hz의 공진 환경에서 부하저항 510 k $\Omega$ 일 때, 최대 출력인 22.5 mW를 나타내었으며 계산된 상기 단위 소자의 전력밀도는 24 mW/cm<sup>3</sup>로 얻어졌다. 이러한 특성을 가지는 바이몰프 (bimorph)형 압전 캔틸레버 단위 소자 48개를 병렬 어레이 구조로 실린더 형태의 수력에너지 하베스터 모듈을 제작하였으며, 120 rpm의 선프트 회전 속도에서 500  $\Omega$ 의 부하저항으로 임피던스 매칭 시 433 mW의 우수한 발전 특성을 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 신재생에너지 기술개발사업 연구 과제입니다. (No. 2010T100101097)

#### REFERENCES

- [1] S. R. Anton and H. A. Sodano, *Smart Mater. Struct.*, 16, R1 (2007).
- [2] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, *IEEE Micro*, 21, 30 (2001).
- [3] J. Feenstra, J. Granstrom, and H. Sodano, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22, 721 (2008).
- [4] P. X. Gao, J. Song, J. Liu, and Z. L. Wang, *Adv. Mater.*, 19, 67 (2007).
- [5] Z. L. Wang and J. Song, *Science*, 312, 242 (2006).
- [6] H. C. Song, H. C. Kim, C. Y. Kang, H. J. Kim, S. J. Yoon, and D. Y. Jeong, *J. Electroceram.*, 23, 301 (2009).
- [7] Priya, *IEEE Trans. Ultra. Ferroelec. Freq. Cont.*, 57, 2610 (2010).
- [8] R. Guigon, J. J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse, *Smart Mater. Struct.*, 17, 015038 (2008).
- [9] J. J. Allen and A. J. Smits, *J. Fluids Struct.*, 15, 629 (2001).
- [10] J. H. Gerrard, *J. Fluid Mech.*, 25, 401 (1966).
- [11] H. Techet-Alexandra, J. Allen-James, and J. Smits-Alexander, *In Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2002.
- [12] R. Guigon, J. J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse, *Smart Mater. Struct.*, 17, 015039 (2007).
- [13] G. Taylor, U.S. Patent, 4404490 (1983).
- [14] N. Shinjo, *PhD. Dissertation, Florida Institute of Technology* (2005).
- [15] S. Chiba, M. Waki, R. Kornbluh, and R. Pelrine, *Proc. SPIE-EAPAD*, 6927, 692715 (2008).
- [16] S. Chiba, M. Waki, R. Kornbluh, and R. Pelrine, *Proc. SPIE-EAPAD*, 6524, 652424 (2007).
- [17] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors* (Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997) p. 129.
- [18] Phillips Components, *Piezo Ceramic Products* (Technical Information, 2000) p. 3.
- [19] C. M. Kim, *Master Thesis*, p. 95-110, Yonsei University, Seoul (2010).
- [20] K. B. Kim, C. I. Kim, Y. H. Jeong, Y. J. Lee, J. H. Cho, J. H. Paik, and S. Nahm, *J. Eur. Ceram. Soc.*, (In press)