Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 32, No. 5, pp. 418-425 September 2019
DOI: https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.5.418
ISSN 1226-7945(Print), 2288-3258(Online)

PZT계 압전 세라믹 파이버 어레이 복합체를 이용한 미소 풍력 에너지 하베스터

이민선[1,2], 나용현[1], 박진우[2], 정영훈[1]
[1] 한국세라믹기술원 광전자부품소재센터
[2] 연세대학교 신소재공학과

Small-Scale Wind Energy Harvester Using PZT Based Piezoelectric Ceramic Fiber Composite Array

Min-Seon Lee[1,2], Yong-Hyeon Na[1], Jin-Woo Park[2], and Young-Hun Jeong[1]
[1] Optoelectronic Materials & Component Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea
[2] Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

(Received June 27, 2019; Revised July 25, 2019; Accepted July 29, 2019)

Abstract: A piezoelectric ceramic fiber composite (PCFC) was successfully fabricated using $0.69Pb(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3$-$0.31[Pb(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$ (PZT-PZNN) for use in small-scale wind energy harvesters. The PCFC was formed using an epoxy matrix material and an array of Ag/Pd-coated PZT-PZNN piezo-ceramic fibers sandwiched by Cu interdigitated electrode patterned polyethylene terephthalate film. The energy harvesting performance was evaluated in a custom-made wind tunnel while varying the wind speed and resistive load with two types of flutter wind energy harvesters. One had a five-PCFC array vertically clamped with a supporting acrylic rod while the other used the same structure but with a five-PCFC cantilever array. Stainless steel (thickness: 50 ㎛) was attached onto one side of the PCFC to form the PZT-PZNN cantilever. The output power, in general, increased with an increase in the wind speed from 2 m/s to 10 m/s for both energy harvesters. The highest output power of 15.1 ㎼ at 14 kΩ was obtained at a wind speed of 10 m/s for the flutter wind energy harvester with the PZT-PZNN cantilever array. The results presented here reveal the strong potential for wind energy harvester applications to supply sustainable power to various IoT micro-devices.

Keywords: Piezoelectric, Ceramic fiber, Wind energy, Ceramic composite, Energy harvesting

1. 서 론

태양, 소수력, 조류 등과 함께 지구상의 무한한 에너지 자원 중 하나인 바람은 친환경 에너지로서 오래전부터 이를 효율적으로 이용하기 위한 노력이 이어져 왔다. 바람을 이용하여 전기를 만드는 풍력발전 기술은 대표적인 청정 발전 기술로 자원 고갈의 우려가 없고 유해 물질을 발생시키지 않아 미래의 주요한 에너지 자원으로 기대되고 있다. 풍력 발전기는 회전 날개를 이용하여 풍력 에너지를 회전 에너지로 변환하는 로터(rotor)로부터 발전기(generator)를 구동하는 원리로 동작하는데 일반적인 풍력 발전 구조물은 블레이드(blade), 변속기어(gear), 발전 모터(generating motor) 등으로 구

✉ Young-Hun Jeong; yhjeong@kicet.re.kr

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성되며, 풍력 발전기의 효율을 높이기 위해 지속적으로 대형화되고 있다. 하지만 입지 조건이 까다롭고 소음 발생으로 인한 문제점이 제기되면서 다시금 소형 풍력 발전 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 나아가, 최근에는 기상 장치, 환경 센서, 스마트 농장 등 IoT 시스템의 전원 기술을 요구하는 산업 수요의 증가에 따라 단순한 구조를 가진 초소형의 풍력 에너지 하베스팅 기술이 많은 관심을 받고 있다 [1-4]. 이러한 미소 풍력을 전기로 바꾸는 에너지 변환 기술은 압전(piezoelectric) [5,6], 전자기(electromagnetic) [7,8], 정전(electrostatic) [9,10] 원리를 주로 이용하며, 특히 압전을 이용한 미소 풍력 에너지 하베스팅 기술은 구조가 단순하고 우수한 전기-기계 커플링 효과를 가지는 압전 소재를 이용하기 때문에 높은 전력 밀도를 가지는 장점을 가진다 [11]. 최근, 다양한 형상을 갖는 에너지 하베스팅 구조의 설계와 구현을 통해 풍력 에너지 하베스터의 변환 효율을 개선한 연구가 최근 보고되었다 [12-14].

미소 풍력 에너지 하베스터에 적용되는 압전 소재는 우수한 출력 전력 특성을 얻기 위해 물리적으로 큰 변형을 요구한다. 압전 세라믹 파이버 복합체(piezoelectric ceramic fiber composite, PCFC)는 높은 압전 특성을 갖는 세라믹 소재를 가공하여 파이버 형태로 제작한 후 에폭시(epoxy)를 이용, 각 세라믹 파이버를 규칙적으로 접합 및 배열(array)한 필름형 복합소재로서, 유연한 기계적 물성을 요구하는 압전 스트레인(strain) 센서와 굴곡 변형을 위한 액츄에이터(actuator) 분야에 널리 활용되고 있다 [15-17]. 이러한 PCFC는 fluttering 구조 [18]와 windmill 구조 [19] 등 미소 풍력 에너지 하베스터로도 최근 널리 응용되고 있다. 그림 1은 구동 방법에 따라 각각 길이 모드(longitudinal mode)와 두께 모드(transverse mode)를 가지는 일반적인 PCFC의 구조를 나타내고 있다. 길이 모드의 경우 IDE (interdigitated electrode) 패턴이 형성된 폴리머 필름이 압전 세라믹 파이버 어레이층의 위/아래 면에 직접적으로 접합된 구조를 가지며, 두께 모드의 경우 길이 모드와 달리 IDE 폴리머 필름과 압전 세라믹 파이버 어레이층 사이에 평면형(planar) 전극층이 추가적으로 삽입된 구조를 가진다. 압전 세라믹 파이버 어레이층과 전극층 및 IDE 폴리머 필름은 에폭시를 이용하여 접합된다. 길이 모드의 경우 IDE 구조로 인하여 압전 세라믹 파이버에 불균일하게 형성되는 전기장 구조로 인하여 충분한 분극을 형성하기 어려운 단점이 있다 [20,21]. 그러나 두께 모드의 경우 전극층을 쉽게 형성할 수 있고 분극 공정 시 균일한 전기장을 형성할 수 있어 길이 모드보다 안정적인 분극 구조를 형성할 수 있는 장점을 가진다.

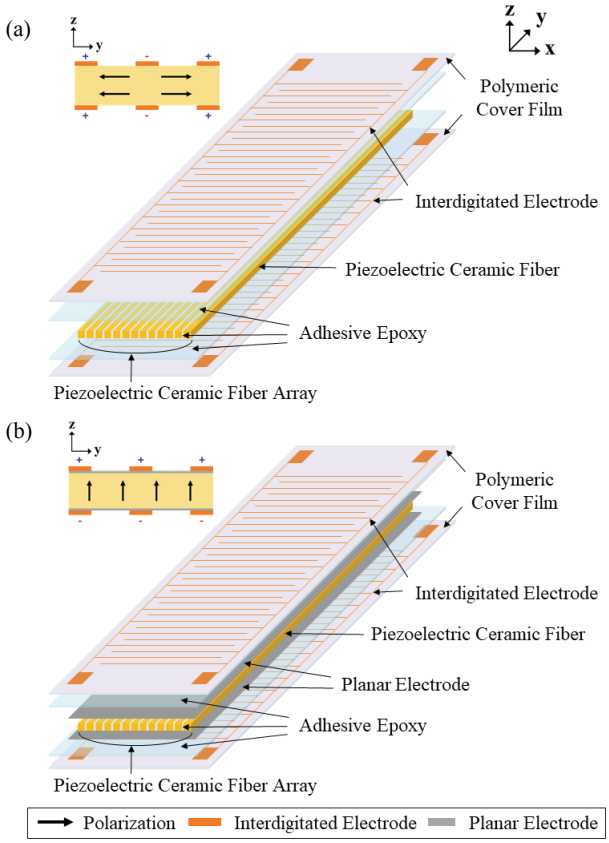

Fig. 1. Schematics of conventional piezoelectric ceramic fiber composites: (a) longitudinal mode and (b) transverse mode.

이에 본 연구에서는 우수한 압전 특성을 갖는 Pb(Zr,Ti)O_3계 압전 소재를 이용하여 두께 모드를 갖는 PCFC를 제조하였다. 이의 구조적 특성을 분석한 후, 총 5개의 PCFC를 어레이하여 flutter 구조의 풍력 에너지 하베스터를 제조하였다. 또한, 풍속 변화에 따른 전력 출력 특성 평가를 통하여 미소 풍력 에너지 하베스터로서 응용 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 PZT-PZNN 후막 세라믹 소자 제조

본 연구에서는 우수한 압전 물성을 가지는 0.69Pb$(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3$-0.31$[Pb(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$ (PZT-PZNN) 조성의 압전 세라믹을 이용하였다. PCFC 제조를 위한 압전 세라믹 파이버 소재는 PZT-

PZNN 후막을 이용하였으며, 일반적으로 사용되는 테이프 캐스팅 공정을 이용하였다. 슬러리를 제조하기 위해 PZT-PZNN 압전 파우더에 톨루엔(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), 에탄올(purity 99.5%, Samchun Pure Chemical, Korea), polyvinyl butyral (BM-SZ, Sekisui, Japan), dibutyl phthalate (purity 99.0%, Daejung Chemical & Metals, Korea) 및 분산제(BYK-111, BYK-Chemie GmbH, Germany)를 최적 비율로 첨가 및 혼합하였다. 혼합된 슬러리는 폴리에틸렌 재질의 병에 주입한 후, 다양한 지름의 지르코니아 볼(Φ = 3, 5, 10, 15 mm) 미디어를 이용하여 24시간 동안 혼합 분쇄하였으며, 망(mesh) 구조의 스크린(screen)을 이용해 혼합 슬러리를 균일한 크기로 체거름한 후, 진공 탈포기를 이용하여 -760 mmHg 진공도로 30분 동안 슬러리 내부의 기포를 제거하였다. 탈포된 슬러리는 테잎 캐스팅 장비(TCA-2000, Techgen, Korea)를 사용하여 닥터 블레이드(doctor blade)로 두께 약 35 ㎛의 그린 시트(green sheet)를 제조하였다. 제조한 압전 그린 시트 표면에 외부전극으로 사용할 평면형 전극을 스크린 마스크를 이용하여 프린팅 하였고, 전극으로는 1,050℃에서 동시 소성이 가능한 Ag/Pd (7:3) 페이스트(WT-SPD30-A, Winner Technology, Korea)를 이용하였다. 제조된 그린 시트는 라미네이터(Keko, Slovenia)로 60℃에서 13 MPa의 압력으로 총 3장을 적층하고 250 bar, 65℃에서 20분 동안 WIP (warm isostatic press, ILS-126, Keko, Slovenia) 처리하여 PZT-PZNN 압전 후막 세라믹을 제조하였다. 표 1은 최적 소결온도에서 제조한 벌크 형태와 후막 PZT-PZNN 세라믹의 압전 물성과 유전 물성을 각각 나타내었다.

Table 1. Comparison of piezoelectric properties of the 0.69Pb$(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3$-0.31$[Pb(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$ ceramics between a bulk disk and a thick film, both sintered at 1,050℃ for 1 h.

Piezoelectric properties	Bulk	Thick film
Sintering temperature	1,050℃	1,040℃
Piezoelectric charge constant (d_{33})	526×10^{-12} C/N	365×10^{-12} C/N
Piezoelectric voltage constant (g_{33})	30×10^{-3} Vm/N	32×10^{-3} Vm/N
Coupling coefficient (k_p)	74.2%	50%
Mechanical quality factor (Q_m)	64	74
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1,993	1,292.5
tanδ	1.9%	1.8%

2.2 압전 세라믹 파이버 복합체 (PCFC) 제조

본 연구에서는 두께 모드 PCFC 제조를 위하여 Ag/Pd 평판형 전극이 인쇄된 14 mm (가로) × 50 mm (세로) × 0.1 mm (두께) 크기의 PZT-PZNN 세라믹과 Cu IDE 전극이 인쇄된 19 mm (가로) × 68 mm (세로) × 0.075 mm (두께) 크기의 PET (polyethylene terephthalate) 필름을 사용하였다. Ag/Pd 표면 전극을 갖는 PZT-PZNN 후막 세라믹은 dicing saw (ADS-200, AM technology, Korea)를 이용하여 약 250 ㎛의 너비를 갖는 파이버 어레이로 가공하였다. 이때, 압전 세라믹 파이버 어레이의 칩 플라잉(chip flying)을 방지하기 위하여, 파이버 제조 공정 시 접착력을 가진 PO (polyolefin) 캐리어(carrier) 필름을 이용하였다. PCFC 제조를 위하여 압전 세라믹 파이버 사이를 에폭시 레진(resin)으로 채웠으며, 에폭시가 충진된 압전 세라믹 파이버 어레이는 PET 필름 접합용 에폭시를 균일하게 도포한 후 WIP로 250 bar, 65℃에서 20분간 가압 경화하였다. 제조된 PCFC는 100℃ oil bath에서 2.5 kV/mm의 전계 조건으로 30분간 분극을 실시하였다. 그림 2는 본 연구에서 제조한 두께 모드의 PCFC의 모식도를 보여주고 있다.

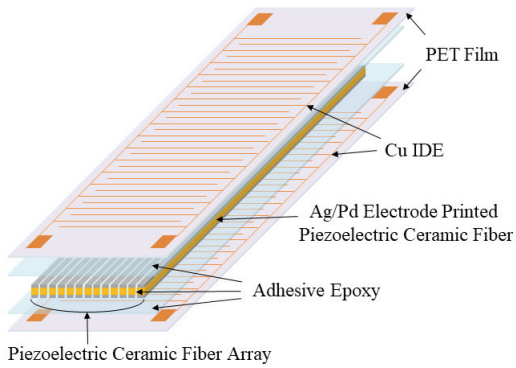

Fig. 2. Schematic of the PZT-PZNN piezoelectric ceramic fiber composite fabricated in this work.

2.3 Flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터 제조와 특성 평가

Flutter 구조의 풍력 에너지 하베스터는 PCFC 5개의 어레이와 PCFC 캔틸레버(cantilever) 5개 어레이로 이루어진 두 가지 형태로 각각 제작하였다. PCFC 캔틸레버는 에폭시를 이용하여 14 mm (가로) × 90 mm

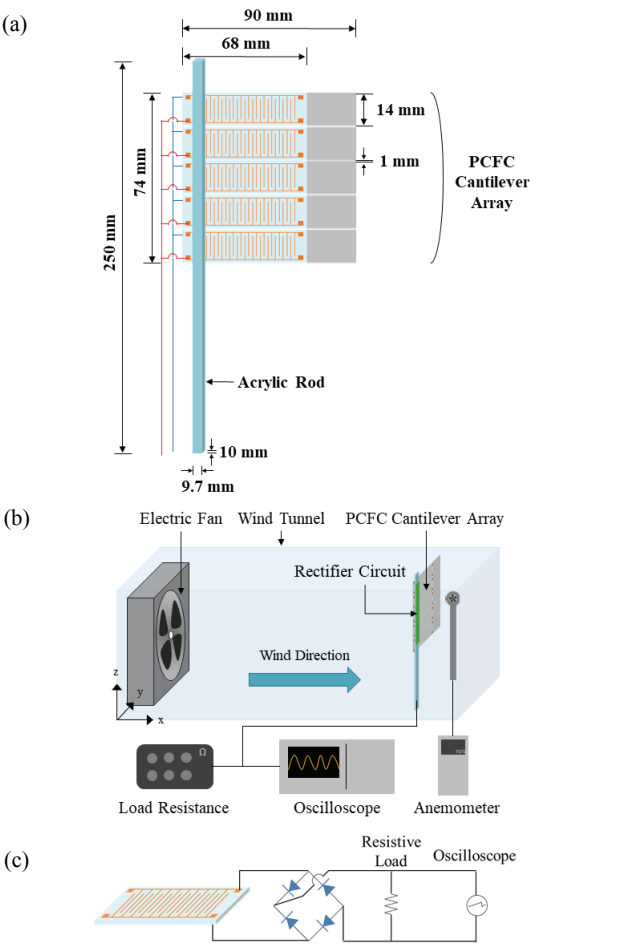

Fig. 3. Illustrated schematics of (a) the flutter wind energy harvester of PCFC cantilever array, (b) experimental set-up of wind tunnel to evaluate the wind energy harvesting performance, and (c) simplified equivalent electric circuit of the flutter wind energy harvester.

(세로) × 0.05 mm (두께) 크기를 갖는 stainless steel (SUS304) 소재의 유연한 탄성 기판과 PCFC를 접합한 구조를 가진다. 그림 3은 5개의 PCFC 캔틸레버 어레이로 구성된 flutter 구조의 풍력 에너지 하베스터의 도식화한 이미지를 보여주고 있다. 그림 3(a)에서 보듯이, PCFC 캔틸레버는 9.7 mm (가로) × 10 mm (세로) × 250 mm (길이)를 가지는 아크릴 막대(rod)에 단단히 고정되었으며, 총 5개를 1 mm 간격으로 각각 수직 방향으로 어레이하여 flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터를 제조하였다.

제조된 PCFC의 구조 분석을 위하여 광학 현미경 (BX51, Olympus, Japan)과 전계방출주사전자현미경 (FE-SEM, MIRA3LM, TESCAN, Czech Republic)을 이용하였다. 또한 오실로스코프(Wavejet 322, LeCroy, Japan)와 풍속계(Testo416, TESTO, Germany)를 사용하여 다양한 부하저항에서 풍속 변화에 따른 미소 풍력 에너지 하베스터의 출력 전압을 측정하였으며, 출력 전력 값은 $P = V_{rms}^2/R$ 식을 이용하여 도출하였다. 이때 P는 출력 전력, V_{rms}는 RMS (root mean square) 출력 전압, 그리고 R은 부하저항을 나타낸다. 풍력 시험은 그림 3(b)에서 보듯이 자체 제작한 소형 풍동 터널을 활용하였으며, 380 mm 길이의 변을 가지는 정사각형의 단면 구조를 가졌다. 풍동 터널의 한쪽 끝단은 풍속 제어가 가능한 전기 팬으로 구성되어 있고, 맞은편 끝단은 본 연구에서 제작한 flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터 시험체가 위치하며, 시험체와 동일한 위치에서 풍속계(anemometer)를 이용하여 측정하였다. 그림 3(c)에는 미소 풍력 에너지 하베스터의 등가 회로도를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

그림 4(a)와 (b)는 Cu IDE가 인쇄된 PET 필름과 압전 세라믹 파이버 어레이 구조의 도식화된 이미지를 각각 보여주고 있다. IDE 패턴의 구조는 길이 방향인 x축을 따라 약 14 mm의 간격을 두고 서로 평행한 두 개의 IDE strip과 이로부터 수직하게 배열된 다수의 IDE finger로 형성되어 있다. IDE finger의 너비와 길이는 각각 150 μm와 350 μm로 설계하였다. 두 IDE strip은 서로 전기적으로 절연되어 있으며 각 strip의 양 끝단에는 전기 신호 출력을 위한 3 mm × 4 mm 크기의 사각형 터미널이 2개씩 형성되어 있다. 압전 세라믹 파이버 어레이는 PZT-PZNN 세라믹 파이버가 총 47개 배열되어 있으나 그림 4(b)에는 이해를 위해 12개의 파이버로 구성된 압전 세라믹 파이버 어레이만을 나타내었다. 각 파이버의 길이는 50 mm이며, 그림 4(b)의 붉은 점선으로 그려진 사각형 부분을 확대한 이미지로부터 압전 세라믹 파이버의 너비와 각 파이버 사이의 간격을 채우는 접착 에폭시의 너비는 각각 250 μm와 50 μm이며, 세라믹 파이버 어레이의 총 면적은 14 mm × 50 mm로 그림 4(a)의 IDE finger가 배열된 면적과 동일함을 알 수 있다.

그림 5(a)는 PCFC 제조에 사용된 Cu/PET 필름의 표면을 광학현미경으로 측정한 이미지를 보여준다. Y축 방향으로 형성된 Cu IDE finger를 관찰할 수 있으며, 너비는 약 150 μm로 설계한 너비와 동일하게 형성

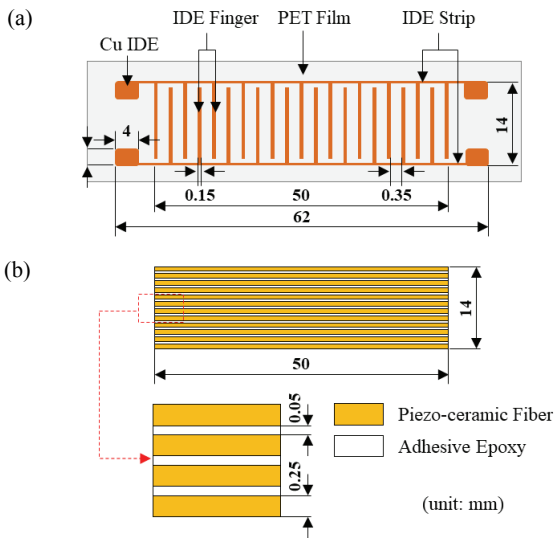

Fig. 4. Configurations of (a) Cu interdigitated electrode (IDE) printed PET film and (b) piezoelectric ceramic fiber array (the red-dashed rectangular is also enlarged).

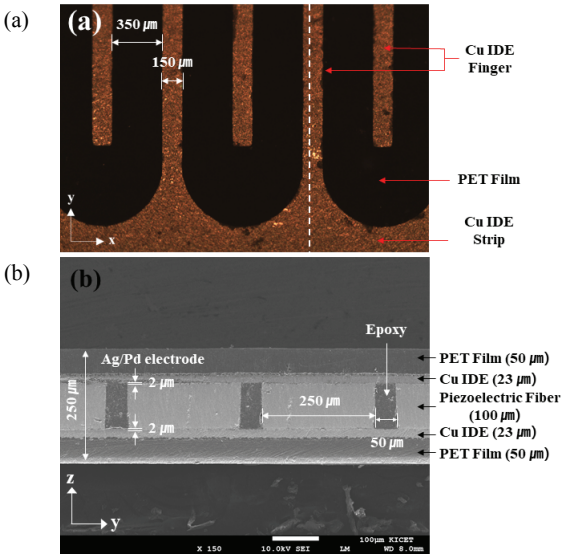

Fig. 5. (a) Surface optical microscope image of Cu IDE on the PET film and (b) cross-sectional FE-SEM image of the PCFC.

된 것으로 확인되었다. 서로 이웃하는 IDE finger의 간격은 약 350 μm로 일정한 간격을 두고 균일하게 형성되어 있음을 알 수 있으며, 그림 5(a)의 하단에 관찰된 Cu IDE strip이 마주하는 3개의 Cu IDE finger 끝단과 전기적 절연을 위하여 각 IDE finger의 간격인 350 μm보다 더 넓은 간격을 가지며 오목한 반원 구조의 패턴 형상을 이루고 있다. 제조한 PZT-PZNN 세라믹 파이버 어레이와 표면의 Cu/PET 필름과의 계면 구조를 확인하기 위하여 제조한 PCFC의 단면 이미지를 관찰하였다. 그림 5(b)는 그림 5(a)의 흰색 점선으로 표시한 y축 방향의 IDE finger 위치에서 절단한 PCFC의 단면 구조를 FE-SEM으로 관찰한 이미지를 나타낸다. 각 세라믹 파이버는 이웃하는 파이버를 포함하여 위, 아래의 Cu/PET 필름과 에폭시로 완전히 충진되어 있는 것을 확인하였다. 또한 그림 4(b)에서 이미 나타내었듯이, 가공된 PZT-PZNN 세라믹 파이버는 너비 250 μm와 두께 100 μm의 사각형 단면 구조를 가지며, 약 50 μm의 에폭시로 충진된 간격을 이루고 있음을 알 수 있다. 각 파이버는 약 2 μm 두께의 Ag/Pd 전극이 위, 아래에 형성되어 있으며, 이들 PZT-PZNN 세라믹 파이버 어레이층과 Cu/PET 필름의 계면도 안정적으로 접합되어 있음을 확인하였다.

그림 6(a)와 (b)는 PCFC와 PCFC 캔틸레버를 각각 5개 어레이하여 제조한 flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터의 실제 이미지를 각각 보여준다. 지지체인

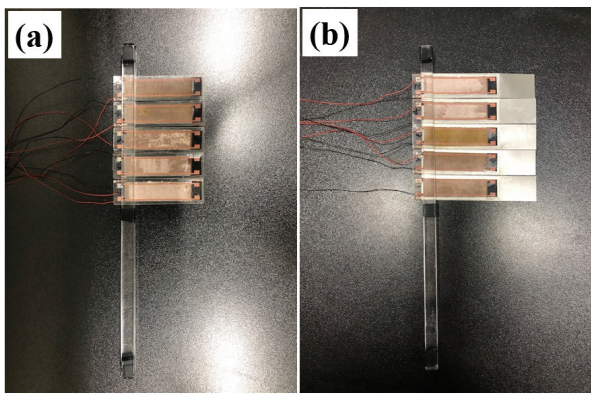

Fig. 6. Real images of the flutter wind energy harvesters: (a) PCFC array and (b) PCFC cantilever array.

아크릴 막대는 풍력 에너지 인가에 따라 세라믹 파이버에 전이되는 스트레인 에너지 효과를 극대화하기 위하여 PZT-PZNN 세라믹 파이버 어레이의 한쪽 끝을 단단히 고정한 채 결합되어 있다. 그림 6(b)에서는 PZT-PZNN PCFC의 하단에 부착되어 있는 은색의 SUS 탄성체 기판이 균일하게 배열되어 있는 캔틸레버 어레이를 확인할 수 있다.

그림 7은 PCFC와 PCFC 캔틸레버 어레이로 제조된 flutter 풍력 에너지 하베스터의 부하 저항과 풍속 변화에 따른 출력 전압 특성을 각각 나타내었다. 5 kΩ에서 50 kΩ까지 부하저항을 변화시키면서 풍속을 2 m/s에서부터 2 m/s 간격으로 10 m/s까지 변화시켜 출력

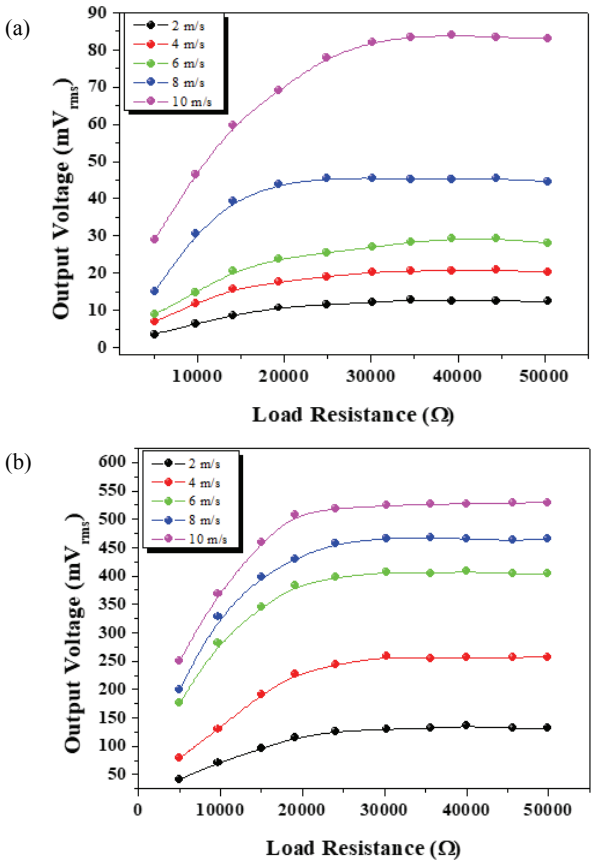

Fig. 7. Variations of output voltage dependent on load resistance with increasing wind speed from 2 m/s to 10 m/s for the flutter wind energy harvesters: (a) PCFC array and (b) PCFC cantilever array.

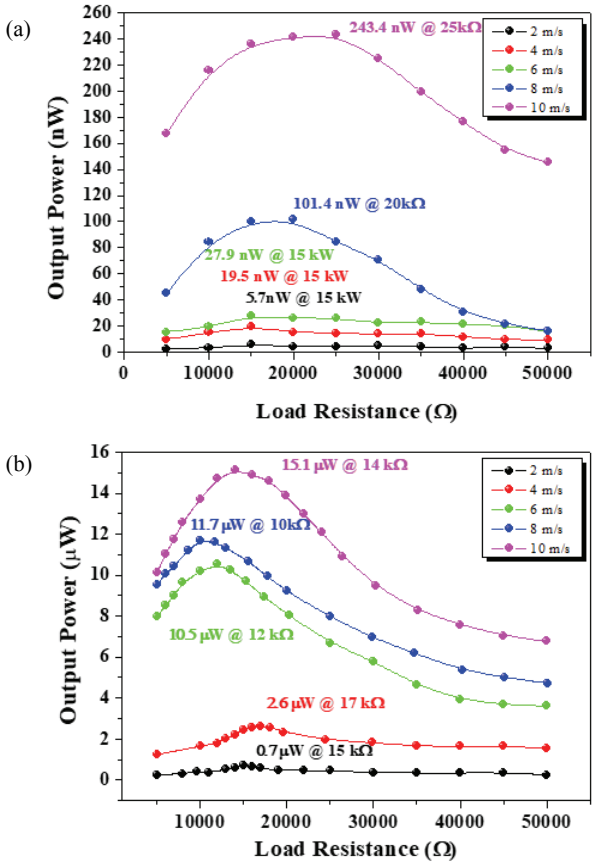

Fig. 8. Output power spectra dependent on load resistance with various wind speeds for the flutter wind energy harvesters: (a) PCFC array and (b) PCFC cantilever array.

전압을 RMS 값으로 측정하였다. 이때, 바람의 영향을 최대한 많이 받을 수 있도록 바람의 진행 방향과 어레이의 방향이 수직이 되게 위치하였다. 두 경우 모두 풍속이 강해짐에 따라 출력 전압은 증가하는 경향을 나타내었으며, 그림 7(a)에서 확인할 수 있듯이, PCFC 하베스터의 경우, 풍속이 6 m/s를 초과하면서 출력전압의 증가폭이 두드러지게 나타난 반면 PCFC 캔틸레버 하베스터의 경우, 풍속이 4 m/s를 초과하면서 급격히 증가하였음을 그림 7(b)에서 확인할 수 있다. 뿐만 아니라, 출력 전압의 크기도 PCFC 캔틸레버 하베스터의 경우에서 훨씬 증가함을 알 수 있다. 이로부터 50 ㎛ 두께의 SUS 박판은 동일한 풍력 조건에서 PCFC 필름에 전달하는 스트레인 에너지를 향상시키는데 매우 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다. 게다가, 낮은 풍속에서도 높은 출력 전압을 얻을 수 있는 효과를 가지는 것으로 관찰되었다. 제작한 두 경우의 풍력 하베스터는 부하 저항 증가에 따른 출력 전압의 변화는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 출력 전압은 포화 경향을 나타내면서 일정 크기의 부하 저항 이상에서는 더 이상 풍속이 증가하더라도 출력 전압의 상승효과는 미미하였다. 최대 출력 전압은 PCFC 하베스터의 경우, 풍속이 2 m/s에서 10 m/s로 강해짐에 따라 12.4 mV$_{rms}$에서 84.0 mV$_{rms}$로 증가하였으며, PCFC 캔틸레버 하베스터의 경우 132.7 mV$_{rms}$에서 529.8 mV$_{rms}$로 증가하였다.

그림 8은 PCFC와 PCFC 캔틸레버 어레이로 제조된 flutter 풍력 에너지 하베스터의 출력 전력 특성을 나타내었다. PCFC 하베스터의 경우 출력 전력은 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s, 8 m/s, 10 m/s에서 각각 5.7 nW, 19.5 nW, 27.9 nW, 101.4 nW, 243.4 nW로 나타났고, PCFC 캔틸레버 하베스터는 동일한 풍속 변화의 증가에 따라 각각 0.7 μW, 2.6 μW, 10.5 μW, 11.7 μW,

Table 2. Comparison of energy harvesting performance at wind speed of 10 m/s between the PCFC array and the PCFC cantilever array for flutter wind energy harvesting.

Array type	PCFC	PCFC cantilever
Wind speed (m/s)	10	10
Load resistance (kΩ)	25	14
Output power (μW)	0.2	15.1
Power density (μW/cm^3)	0.15	9.2

15.1 μW의 최대 출력 전력을 나타내었다. PCFC 어레이 하베스터의 경우 10 m/s에서 월등하게 증가한 출력 전력 특성을 나타낸 반면, PCFC 캔틸레버 어레이 하베스터는 4 m/s를 초과하는 풍속에서 급격히 개선된 출력 전력 특성을 나타내었다. 이는 출력 전압 변화를 나타내는 그림 7의 결과와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 두 시험체의 최대 풍속과 최적 부하저항에서의 출력 전력 특성을 비교하여 표 2에 요약하였다. 표 2에서 알 수 있듯이, 동일한 풍속 10 m/s에서 PCFC 캔틸레버 어레이 하베스터의 경우 상대적으로 훨씬 우수한 출력 전력 특성을 나타내었다. 어레이 총 부피를 고려한 출력 전력 밀도의 경우, PCFC 캔틸레버 어레이 하베스터가 9.2 μW/cm^{3}로 0.15 μW/cm^{3}의 PCFC 어레이 하베스터보다 약 61배 높은 성능을 나타내었다. 이는 캔틸레버에 사용된 탄성 기판의 효과로 바람과 닿는 면적이 증가하여 PCFC의 더 큰 변형이 유발되는 것에 기인한 것이다. 실제 측정한 결과, 동일한 풍속에서 PCFC와 PCFC 캔틸레버의 개방된 끝단의 최대 변형은 각각 35 mm와 60 mm로 관찰되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 $0.69Pb(Zr_{0.47}Ti_{0.53})O_3$-$0.31[Pb(Zn_{0.4}Ni_{0.6})_{1/3}Nb_{2/3}]O_3$ (PZT-PZNN) 세라믹을 이용하여 두께 모드를 갖는 압전 세라믹 파이버 복합체(PCFC)를 제조한 후 5개의 PZT-PZNN PCFC 어레이 구조와 50 μm 두께의 SUS 탄성 기판을 이용한 PZT-PZNN PCFC 캔틸레버 어레이 구조의 flutter형 미소 풍력 에너지 하베스터를 각각 제조하였다. PZT-PZNN PCFC는 에폭시 매트릭스 소재와 Ag/Pd 표면 전극을 갖는 14 mm (가로) × 50 mm (세로) × 0.1 mm (두께) 크기의 PZT-PZNN 세라믹 파이버 어레이가 Cu/PET 필름 사이에 삽입된 구조를 가진다. 제조한 두 종류의 flutter형 미소 풍력 에너지 하베스터를 이용하여 부하저항과 풍속의 변화에 따른 에너지 하베스팅 성능을 비교 평가하였다. 두 시험체 모두 풍속이 2 m/s에서 10 m/s로 증가함에 따라 출력 전압과 출력 전력 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, PCFC 캔틸레버 어레이 구조 하베스터의 경우 10 m/s의 풍속과 14 kΩ의 조건에서 15.1 μW의 최대 출력 전력 특성을 나타내며, 총 부피를 고려한 약 9.2 μW/cm^{3}의 전력밀도를 나타내었다. 이는 동일한 풍속에서 약 0.15 μW/cm^{3}의 출력 전력 밀도를 나타낸 PCFC 어레이 구조 하베스터의 특성과 비교하면 약 61배 높은 우수한 성능임을 확인할 수 있다. 이러한 PCFC 캔틸레버 어레이를 이용한 flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터는 다양한 IoT 기기에 지속가능한 전력을 공급할 수 있는 가능성을 가지는 것으로 평가된다.

ORCID

Young Hun Jeong https://orcid.org/0000-0003-4716-0290

감사의 글

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지기술개발사업 연구 과제입니다(No.20182020700430).

REFERENCES

[1] L. Zhao and Y. Yang, *Smart Struct. Syst.*, **19**, 67 (2017). [DOI: https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.1.067]

[2] Y. Guo, Y. Chen, J. Ma, H. Zhu, X. Cao, N. Wang, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **60**, 641 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.094]

[3] J. Zhang, Z. Fang, C. Shu, J. Zhang, Q. Zhang, and C. Li, *Sens. Actuators, A*, **262**, 123 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.05.027]

[4] Z. Zhao, X. Pu, C. Du, L. Li, C. Jiang, W. Hu, and Z. L. Wang, *ACS Nano*, **10**, 1780 (2016). [DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.5b07157]

[5] N. Wu, Q. Wang, and X. Xie, *Smart Mater. Struct.*, **22**, 095023 (2013). [DOI: https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/9/095023]

[6] S. Orrego, K. Shoele, A. Ruas, K. Doran, B. Caggiano, R. Mittal, and S. H. Kang, *Appl. Energy*, **194**, 212 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.016]

[7] N. Han, D. Zhao, J. U. Schluter, E. S. Goh, H. Zhao, and X. Jin, *Appl. Energy*, **178**, 672 (2016). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.013]

[8] P. Wang, L. Pan, J. Wang, M. Xu, G. Dai, H. Zou, K. Dong, and Z. L. Wang, *ACS Nano*, **12**, 9433 (2018). [DOI: https://doi.org/10.1021/acsnano.8b04654]

[9] R. T. Abdulmunam, L. Y. Taha, and P. C. Ivey, *Int. J. Inf. Electron. Eng.*, **2**, 912 (2012). [DOI: https://doi.org/10.7763/IJIEE.2012.V2.240]

[10] M. Perez, S. Boisseau, P. Gansnier, J. Willemin, and J. L. Reboud, *Smart Mater. Struct.*, **24**, 035004 (2015). [DOI: https://doi.org/10.1088/0964-1726/24/3/035004]

[11] www.seoul.co.kr/news/newsView.php?id=201711 20016001.

[12] L. B. Zhang, H. L. Dai, A. Abdelkefi, and L. Wang, *Appl. Phys. Lett.*, **111**, 073904 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1063/1.4999765]

[13] J. Zhang, Z. Fang, C. Shu, J. Zhang, Q. Zhang, and C. Li, *Sens. Actuators, A*, **262**, 123 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.05.027]

[14] C. H. Yang, Y. Song, J. Jhun, W. S. Hwang, S. D. Hong, S. B. Woo, and T. H. Sung, *J. Korean Phys. Soc.*, **73**, 1889 (2018). [DOI: https://doi.org/10.3938/jkps.73.1889]

[15] H. Xia, Y. Xia, Y. Ye, L. Qian, and G. Shi, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **66**, 8235 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2883277]

[16] M. Wu, X. Yuan, H. Luo, H. Chen, C. Chen, K. Zhou, and D. Zhang, *Phys. Lett. A*, **381**, 1641 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.02.025]

[17] D. Tan, P. Yavarow, and A. Erturk, *Compos. Struct.*, **187**, 137 (2018). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.056]

[18] E. Romero, V. Sundararajan, N. Bonilla, C. Matrinez, A. Rincon, In: ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2012. p.955-960. [DOI: https://doi.org/10.1115/IMECE2012-86992]

[19] D. Grzybek and P. Micek, *Phys. Scr.*, **94**, 095802 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab0d49]

[20] M. S. Lee, C. I. Kim, W. I. Park, J. H. Cho, J. H. Paik, and Y. H. Jeong, *Energy*, **179**, 373 (2019). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.215]

[21] X. Yuan, S. Zhu, X. Li, C. Chen, K. Zhou, and D. Zhang, *Mater. Des.*, **128**, 71 (2017). [DOI: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.04.098]