

PZT계 압전 세라믹 파이버 복합체의 기계적 물성과 압전 풍력 에너지 하베스팅 특성

이민선^{1,2}, 박진우², 정영훈¹ 

¹ 한국세라믹기술원 광전자부품소재센터

² 연세대학교 신소재공학과

Mechanical Properties and Wind Energy Harvesting Characteristics of PZT-Based Piezoelectric Ceramic Fiber Composites

Min-Seon Lee^{1,2}, Jin-woo Park², and Young-Hun Jeong¹

¹ Optic & Electronic Components Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Korea

² Department of Materials Science and Engineering, Yonsei University, Seoul 03722, Korea

(Received November 16, 2020; Revised December 24, 2020; Accepted December 28, 2020)

Abstract: Piezoelectric ceramic fiber composite (PCFC) was fabricated using a planar electrode printed piezoelectric ceramic fiber driven in transverse mode for small-scale wind energy harvester applications. The PCFC consisted of an epoxy matrix material and piezoelectric ceramic fibers sandwiched by interdigitated electrode (IDE) patterned polyimide films. The PCFC showed an excellent mechanical performance under a continuous stress. For the fabrication of PCB cantilever harvester, five PCFCs were vertically attached onto a flexible printed circuit board (PCB) substrate, and then PCFCs were serially connected through a printed Cu circuit. The energy harvesting performance was evaluated applying an inverted structure, which implies its free leading edge located at an open end but the trailing edge at a clamped end, to enhance strain energy in a wind tunnel. The output voltage of the PCB cantilever harvester was increased as the wind speed increased. The maximum output power was 17.2 μ W at a resistance load of 200 k Ω and wind speed of 9 m/s. It is considered that the PCB cantilever energy harvester reveals a potential use for wind energy harvester applications.

Keywords: Piezoelectric, Ceramic fiber, Wind energy, Aeroelastic flutter energy harvesting

1. 서론

에너지 하베스팅 기술은 주변 환경에서 에너지 소스를 수확하여 전기 에너지로 변환할 수 있는 기술이다.

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

Copyright ©2021 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.

지구상에서 무한히 얻을 수 있는 에너지 자원 중 태양, 소수력, 조류, 바람 등은 친환경 에너지이자 자원 고갈 문제가 없기 때문에 이를 효율적으로 이용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-3]. 특히, 바람을 이용하여 전기에너지를 얻을 수 있는 풍력발전 기술은 자원의 고갈 우려 및 유해성이 없는 청정 신재생 에너지로 손꼽히고 있다. 이러한 풍력 발전기는 바람에 의해 날개가 회전하면서 회전력으로 전기 에너지를 생산하는 원리를 가지는 장치이다 [4,5]. 풍력 발전기는 대

형화될수록 출력 효율이 높아지는 장점이 있지만, 소음과 진동 문제로 인한 문제점이 끊임없이 제기되고 있다. 최근에는 기상관측기기, 스마트팜, 스마트시티 등 IoT 시스템용 저전력 센서를 구현하기 위한 소규모 풍력발전기술에 대한 관심이 증가하고 있다.

이러한 미소 풍력을 전기 에너지로 바꾸는 변환 기술은 압전(piezoelectric) [6,7], 마찰(triboelectric) [8,9], 전자기(electromagnetic) [10,11], 정전(electrostatic) [12,13] 원리와 같이 다양한 메커니즘을 사용할 수 있다. 특히 압전을 이용한 풍력 에너지 하베스팅 기술은 단순한 구조와 우수한 전기-기계 변환 효율을 갖기 때문에 높은 전력 밀도를 갖는 장점이 있다. 또한, 최근에는 보다 높은 에너지 변환 효율을 얻기 위하여 aeroelastic flutter [14,15], vortex-induced vibration [16,17], turbulence-induced vibration [18,19], galloping [20,21] 등 압전을 이용한 다양한 에너지 변환 방식의 풍력 에너지 하베스팅 기술이 연구되고 있다. 특히, aeroelastic flutter 하베스팅은 부수적인 구조물(bluff body, flap 등) 없이 단순히 유연한 기판만을 사용하여 바람에 의해 큰 변형을 일으켜 전기 에너지를 얻는 장점을 가지며, 풍속이 증가함에 따라 flutter의 진동 진폭이 비선형적(non-linear)으로 증가하는 특징을 갖는다 [22].

압전 세라믹 파이버 복합체(piezoelectric ceramic fiber composite, PCFC)는 압전 세라믹 소재를 파이버 형태로 가공한 후 에폭시 레진을 파이버 사이에 채운 뒤 고분자 소재의 필름으로 압전 세라믹 파이버의 위/아래 면에 접합한 구조를 갖는다. PCFC는 깨지기 쉬운 소재인 세라믹과는 달리 큰 변형과 기계적 유연성을 가지기 때문에 우수한 내구성을 나타내며 더불어 높은 압전 특성을 나타내어 aeroelastic flutter 하베스터에 적합한 소재이다 [23,24]. 이러한 PCFC는 일반적으로 구동방법에 따라 길이 모드(longitudinal mode)와 두께 모드(transverse mode) 구조를 갖는다. 길이 모드는 IDE (interdigitated electrode) 패턴이 프린팅된 고분자 필름을 압전 세라믹 파이버 위/아래 면에 접합한 구조로 두께 모드보다 높은 압전 성능을 나타내는 것으로 알려져 있으나 [25], IDE 패턴으로 인해 발생하는 불균일한 전기장에 의해 압전 세라믹이 충분히 분극 되지 않는 단점을 갖는다. 반면, 두께 모드는 평면형(planar) 전극이 프린팅된 압전 세라믹 파이버 위/아래 면에 IDE 고분자 필름을 접합한 구조로 압전 세라믹 파이버 표면 전체에 전극층이 형성되어 있기 때문에 균일한 전기장을 형성할 수 있으며, 안정적으로 분극할 수 있는 장점이 있다 [26].

본 연구에서는 우수한 압전 특성을 갖는 soft계 $Pb(Zr,Ti)O_3$ 압전 세라믹을 이용하여 두께 모드 구조의 PCFC를 제조하였다. 제조된 PCFC는 굽힘 강도 및 벤딩 테스트를 통해 기계적 물성을 평가하였으며, 이를 유연한 PCB (printed circuit board) 캔틸레버에 부착하여 flutter 구조의 풍력 에너지 하베스터를 제조하였다. 또한, PCB 캔틸레버는 다양한 풍속 및 부하저항에서 출력 전력 특성을 평가하여 미소 풍력 에너지 하베스터로 활용 가능성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 압전 세라믹 파이버 복합체(PCFC) 제조

본 연구에서는 압전 세라믹 파이버 복합체(PCFC)를 제조하기 위해 우수한 압전 물성을 가지는 soft계 PZT 소재의 압전 세라믹 플레이트(plate)를 이용하였으며, 유전 및 압전 특성을 아래 표 1에 나타내었다.

두께 모드 PCFC 제조를 위하여 Ag 평판형 전극이 인쇄된 15 mm (가로) × 52 mm (세로) × 0.2 mm (두께) 크기의 압전 세라믹과 Cu IDE 전극이 인쇄된 20 mm (가로) × 68 mm (세로) × 0.07 mm (두께) 크기의 PI (polyimide) 필름을 사용하였다. Ag 평판형 전극을 갖는 압전 세라믹 플레이트는 dicing saw (ADS-200, AM technology, Korea)를 이용하여 약 170 μm 의 너비를 갖는 파이버 어레이로 가공하였다. 이때, 압전 세라믹 파이버 어레이의 칩 플라잉(chip flying)을 방지하기 위하여, 파이버 제조 공정 시 접착력을 가진 polyolefine (PO) 캐리어(carrier) 필름을 이용하였다. PCFC 제조를 위하여 압전 세라믹 파이버 사이를 에폭시 레진(resin)으로 채웠으며, 에폭시가 완전히 충전된 압전 세라믹 파이버 어레이는 PI 필름 접합

Table 1. Dielectric and piezoelectric properties of soft-PZT piezoelectric ceramic plate for piezoelectric ceramic fiber composite.

Piezoelectric properties	Values
Coupling coefficient (k_p)	59.2%
Mechanical quality factor (Q_m)	50
Piezoelectric charge constant (d_{33})	396 pC/N
Piezoelectric voltage constant (g_{33})	12×10^{-3} V · m/N
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	3,853
$\tan\delta$	1.8%

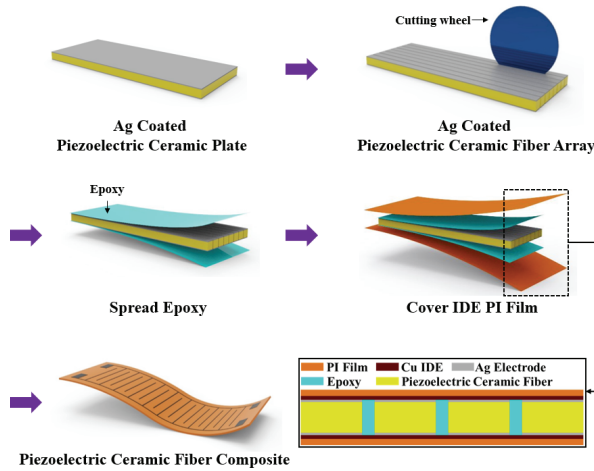


Fig. 1. Schematics of fabrication process for piezoelectric ceramic fiber composite.

용 에폭시를 균일하게 도포한 후 WIP (warm isostatic press)로 250 bar, 65°C에서 20분간 가압 경화하였다. 제조된 PCFC는 120°C oil bath에서 3.5 kV/mm의 전계 조건으로 20분간 분극을 실시하였다. 그림 1은 본 연구에서 제조한 두께 모드의 PCFC의 제조 공정 모식도를 보여주고 있다. 압전 세라믹 파이버 복합체(PCFC)의 제조 시 plate형 압전 세라믹의 위, 아래면에 인쇄된 전극은 Cu IDE (interdigitated electrode)가 인쇄된 커버용 PI 필름과 패키징 공정 시 접합되며 압전 소재에서 출력되는 전기 신호를 추출할 수 있다. 그림 1의 PCFC의 길이 방향과 수직인 단면을 보면 압전 세라믹 파이버의 표면 Ag 전극은 커버용 Cu IDE 패턴과 밀착하며 접합되고, 접합용 에폭시는 이웃하는 Cu IDE 핑거(finger) 사이의 틈(gap)을 충진하면서 커버 PI 필름과 평판형 압전 세라믹 파이버 어레이 면과 완전한 접합을 이루게 된다.

2.2 Flutter 구조의 미소 풍력 에너지 하베스터 제조와 특성 평가

본 연구에서는 flutter 구조 풍력 에너지 하베스터를 제조하기 위해 5개의 PCFC를 수직으로 어레이 하여 제조한 PCFC 어레이와 5개의 PCFC가 각각 다른 길이 및 두께를 가진 PCB (printed circuit board) 캔틸레버에 부착된 형태로 제작하였다. PCB 캔틸레버는 5개의 PCB 기판이 수직으로 배열된 구조이며, 한쪽 끝부분에서 기판 전체가 연결되어 각 캔틸레버에 부착

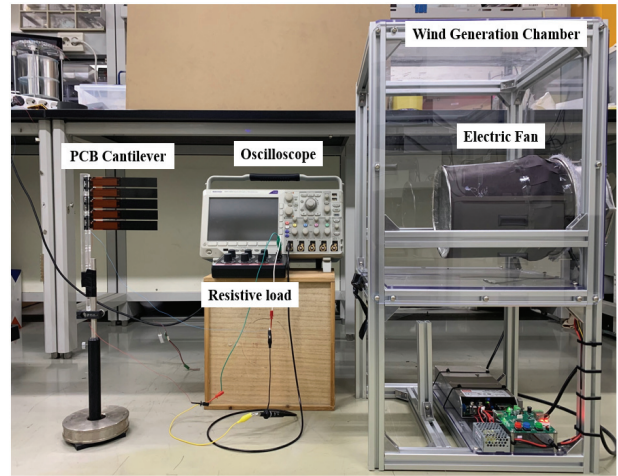


Fig. 2. Experimental set-up of wind tunnel to evaluate the wind energy harvesting performance.

될 PCFC를 전기적으로 연결 시켜줄 Cu 회로가 인쇄되어 있다. 캔틸레버의 너비는 모두 20 mm로 동일하며, 각 캔틸레버는 2.5 mm의 간격을 가진다. PCB 캔틸레버는 160 mm (길이) × 0.45 mm (두께), 160 mm (길이) × 0.65 mm (두께), 150 mm (길이) × 0.8 mm (두께)로 각각 제작되었으며, 각각 PCB 캔틸레버 1, PCB 캔틸레버 2, PCB 캔틸레버 3으로 명명하였다. PCFC는 에폭시를 이용하여 길이 및 두께가 다른 PCB 캔틸레버에 가압오븐을 이용하여 5 bar, 65°C에서 10분간 가압경화하여 부착하였다. PCFC가 부착된 PCB 캔틸레버는 출력 성능 측정을 위하여 캔틸레버가 모두 연결되어 있는 한쪽 끝을 아크릴 재질의 지지대에 단단히 고정하여 flutter 구조의 PCB 캔틸레버 하베스터를 제조하였다. 제조된 PCFC는 기계적 물성을 평가하기 위해 3점 굽힘 강도 테스터(RB301, R&B, South Korea)와 벤딩 테스트기(CTLM500, Ceratorq, Korea)를 이용하여 내구성 테스트를 실시하였다. PCFC 어레이와 PCB 캔틸레버의 진동 특성 평가를 위해 shaker (Bruel & Kjaer, 4809, Denmark), 고속 bipolar amplifier (NF, HSA4014, USA), functional generator (Agilent, 33220A, USA)를 사용하였다. 또한 오실로스코프(Wavejet 322, LeCroy, Japan), power meter (WT310, Yokogawa, Japan)와 풍속계(Testo416, TESTO, Germany)를 사용하여 다양한 부하저항에서 풍속 변화에 따른 풍력 에너지 하베스터의 출력 전압을 측정하였다. 풍속 조건에 따른 발전 특성 평가 시험은 그림 2와 같이 자체 제작한 소형 풍동 장치를 활용하였으며, 장

치의 한쪽 끝단은 풍속 제어가 가능한 전기 팬으로 구성되어 있고, 맞은편에는 본 연구에서 제작한 flutter 구조의 PCB 캔틸레버 하베스터가 위치한다. 전기 팬의 인가 전압 제어를 통해 팬의 회전수를 조절하면서 풍동 환경을 구성하고 하베스터의 위치와 동인한 지점에서 풍속계(anemometer)를 이용하여 시험 풍속을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 동일한 사이즈(15×52×0.2 mm)의 압전 세라믹을 이용하여 제조한 압전 세라믹 플레이트와 PCFC의 하중에 따른 변형을 나타내었다. 일반적으로 하중과 변형은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E = \frac{l^3 F}{4bh^3 \delta} \quad (1)$$

여기서, E, l, B, h는 각각 굽힘 계수, 지지핀 사이의 스펠 길이, 빔의 폭, 빔의 두께를 나타낸다. 따라서 3점 굽힘 테스트에서 굽힘 탄성률은 빔의 변형에 반비례하며 굽힘 강성은 굽힘 계수와 동일하다. 3점 굽힘 테스트를 위한 셋업 이미지는 그림 3에 삽입되었다. 압전세라믹 플레이트에 하중이 인가되면서부터 변형이 발생하였으며, 0.2 N의 하중에서 0.9 mm의 최대 변형을 가진 후 파괴되었다. 압전 세라믹 플레이트는 높은 Young's modulus로 인해 단단하기 때문에 쉽게 구부러지지 않고 최대 강도 이상에서 파괴되는 것을 알 수 있었다. 한편 PCFC는 3점 굽힘 테스트 최대 변형인 3 mm까지 진행되어도 파괴가 일어나지 않았다. 이는 PCFC의 경우, 압전 세라믹 파이퍼와 에폭시 사이의 우수한 결합력으로 압전 세라믹 파이퍼에 유도된 하중이 에폭시를 통해 파이퍼 구조에 균일하게 전달되기 때문이다 [27].

PCFC의 기계적 내구성을 평가하기 위해 5개의 PCFC를 준비하였으며, 벤딩 테스트를 이용하여 각 PCFC의 출력 전압 변화를 측정하였다. 각 샘플의 출력 전압은 정규화한 평균값을 그림 4에 나타내었다. 각 PCFC는 그림 4에 삽입된 이미지와 같이 지그(jig) 양 끝단에 단단히 고정된 상태로 지그의 일측면이 1 m/s의 속도로 선형으로 왕복운동하며 10⁵ 사이클의 움직임을 반복하였다. 이때, PCFC가 최대 굴곡되었을 때의 곡률 반경은 약 5.4 mm를 나타내었다. 각

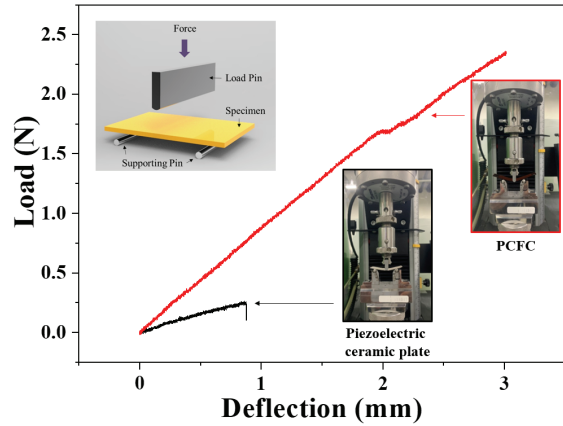


Fig. 3. Load-deflection curves of piezoelectric ceramic plate and piezoelectric ceramic fiber composite.

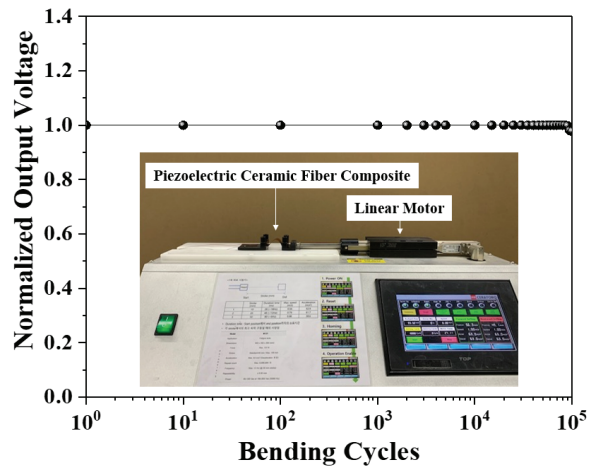


Fig. 4. Normalized output voltage of PCFC during bending test of 10⁵ cycles. [Inset: Experimental set-up for the bending test]

PCFC는 지그에 고정된 채 10⁵ 사이클의 벤딩 시험을 반복하면서 시험 전과 후의 평균 출력 전압의 변화는 약 2% 이내의 감소 수준을 보여주면서 매우 안정적인 내구성을 가짐을 확인하였다. PCFC는 벤딩 테스트 후 외부 형상으로 판단하였을 때, 벤딩된 방향으로 약간 구부러진 듯한 형상 변화가 미미하게 나타났으나, 소자 전체가 압전 세라믹 파이퍼의 횡방향으로 깨지거나 PI 필름이 찢어지는 등의 중대한 기계적 결함은 발생하지 않았다. 이를 통해 PCFC는 외부에서 인가되는 반복된 응력에도 전기적 및 기계적 특성을 비교적 안정적으로 유지할 수 있음을 확인할 수 있었다.

네 가지 타입의 flutter 구조 하베스터는 풍력 시험에 가장 적합한 구조를 선정하기 위하여 진동에 의한

출력 전압 특성을 평가하였다. 일반적으로 풍력 환경은 일정한 진동 주파수를 가지지 않기 때문에 사인파(sine wave) 형태의 진동을 인가하지 않고 펄스(pulse) 형태의 힘을 인가하여 출력 특성을 평가하였다. 그림 5는 제조된 PCFC 어레이 및 PCB 캔틸레버의 전기적 출력 특성을 나타내었다. PCFC 어레이 및 각 PCB 캔틸레버의 지지대를 가진기에 단단히 고정된 후 200 mV_{p-p} 크기의 펄스를 20초 동안 약 3초 간격으로 인가하였다. PCFC 어레이, PCB 캔틸레버 1, 2, 3에서 평균 피크 전압($V_{peak,avg}$)은 각각 0.7, 2.8, 6.3, 9.5 $V_{peak,avg}$ 를 나타내었다. 일반적으로 PCFC의 출력 전압 대비 PCB 캔틸레버의 출력 전압이 증가하는 이유는 펄스(pulse) 신호가 인가되었을 때, 어레이를 구성하는 각각의 개별 PCFC와 PCB 캔틸레버의 심의 유무, 심의 두께, 길이에 따라 PCFC에 전달되는 스트레인(strain) 에너지의 크기가 변화되기 때문이다. 심이 존재하면 펄스 인가 시 PCFC의 변형이 증가하며, 이는 심의 탄성에 의한 스트레인 에너지가 PCFC에 충분히 전달되기 때문이다. 캔틸레버의 PCB 심이 있는 경우끼리 비교하면, 심의 상하 진동 시 고정되지 않은 심의 끝단 변형(δ)을 나타내는 아래 식 (2)에 따라,

$$\delta \propto \frac{PL}{EI} \quad (2)$$

변형의 크기는 P (pressure)와 L (length of shim)에 비례하고 E (elastic modulus)와 I (inertia momentum)에 반비례하기 때문에, 심의 길이(L)가 짧아지면 변형은 작아지게 된다. 이는 PCFC에 인가되는 스트레인 에너지가 줄어들게 되므로 변형과 비례하여 출력 전압이 줄어들게 된다. 또한, 심의 단면이 사각형인 경우 I는 심 두께(h_s)의 세제곱에 비례하기 때문에 두께가 증가하면 변형은 더욱 작아지게 되어 PCFC에 인가되는 스트레인 에너지가 줄어들어 PCFC의 출력 전압은 더욱 낮아진다. 따라서 각 개별 시편의 부피 변수에 기인하는 변형의 크기는 표 2에 나타내었듯이 PCB 심의 길이가 가장 짧고 두께가 가장 두꺼운 PCB 캔틸레버 3의 변형이 제일 작고, PCB 캔틸레버 3 < PCB 캔틸레버 2 < PCB 캔틸레버 1의 순으로 변형의 크기가 증가하게 된다. 출력 전압의 크기도 동일한 순서대로 증가하여 PCB 캔틸레버 1이 가장 큰 출력 전압을 나타내게 된다.

그러나 그림 5에서 보여준 결과는 각 시험시편이 어레이 구조를 가지기 때문에 이를 구성하는 개별 PCB

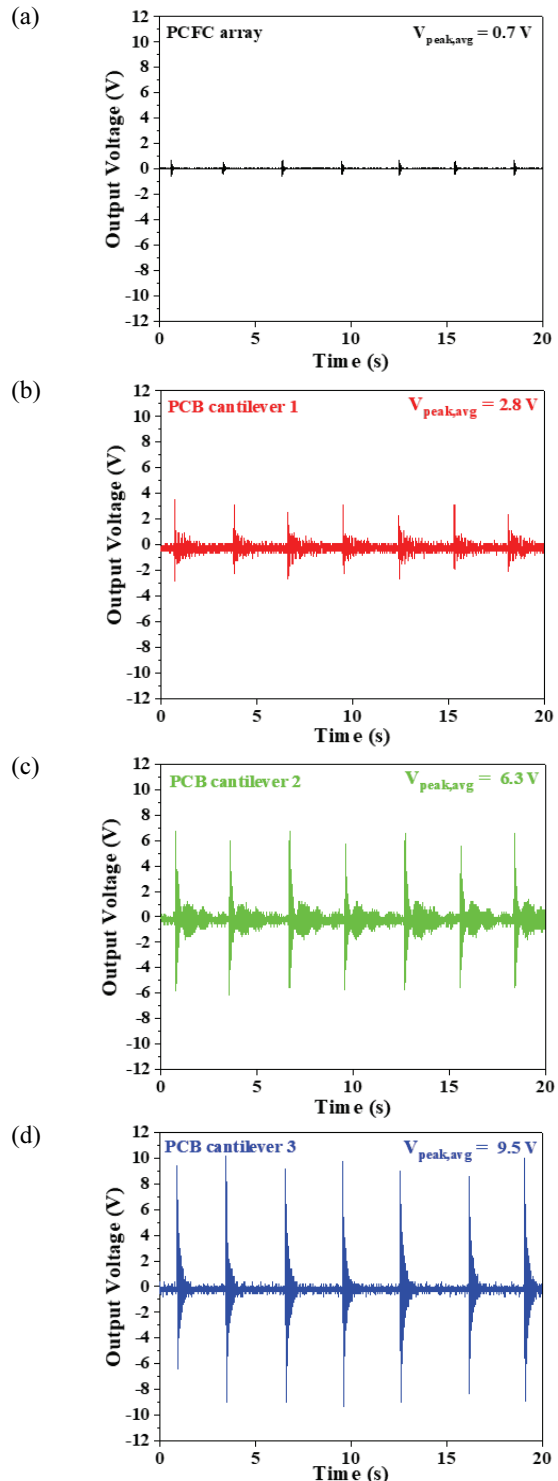


Fig. 5. Spectra of output voltage for flutter harvesters under pulse signal: (a) PCFC array, (b) PCB cantilever 1, (c) PCB cantilever 2, and (d) PCB cantilever 3.

Table 2. Various structural parameters of PCFC and various PCB cantilevers.

Dimension (mm)	PCFC	PCB cantilever 1	PCB cantilever 2	PCB cantilever 3
PCFC ($w \times L \times h_p$)		20×68×0.34		
PCB shim	Width (w)	20	20	20
	Length (L)	N/A	160	150
	Thickness (h_s)		0.45	0.65
Natural frequency (kHz)	18.6	6.4	6.6	8.8

캔틸레버 간 시간 동기화한 위상(phase)의 정합 특성이 출력 전압 특성에 주요한 영향을 미친다. 즉, 개별 PCB 캔틸레버의 출력 전압 특성보다는 총 5개의 직렬로 연결되는 각 PCB 캔틸레버의 출력 전압의 위상차가 없어야 전압 손실을 최소화하며 이상적인 에너지 하베스팅 특성을 도출할 수 있다. 본 연구에서의 3종 PCB 캔틸레버 어레이의 경우 개별 캔틸레버의 전압 특성과 달리, 어레이 PCB 심의 길이가 짧고 두께가 두꺼울수록 펄스 인가 시 각 캔틸레버 간의 상호 전압 위상차가 줄어들면서 직렬 출력 전압이 극대화되고 감쇠 진동이 최소화되는 특성을 나타내었다(PCB 캔틸레버 3의 경우). 하지만 PCB 캔틸레버 1과 같이 심의 길이가 상대적으로 길고 두께가 얇은 경우, 어레이를 구성하는 개별 캔틸레버의 변형이 크기 때문에 개별 출력 전압은 가장 우수하지만, 각 캔틸레버가 독립적으로 진동하면서 상호 간 위상차가 가장 크게 나타나기 때문에 전압 손실이 커져서 오히려 직렬 출력 전압은 가장 낮게 나타났다. 이와 함께 감쇠 진동은 지속적으로 나타나는 것을 관찰할 수 있다.

그림 6(a)는 진동 테스트 결과 가장 우수한 전압 특성을 나타내는 PCB 캔틸레버 3의 모식도를 나타낸다. PCB 캔틸레버 3의 PCB 캔틸레버는 20 mm (길이) × 160 mm (세로) × 0.8 mm (두께)의 크기를 가지며, 지지대가 위치하는 한쪽 끝단에서 모두 연결된 구조를 갖도록 설계하였다. 또한 이 연결 부분에는 각각의 캔틸레버를 직렬로 연결하기 위한 Cu 재질의 회로가 인쇄되어 있으며, 회로가 위치한 가장 아랫부분에 전기 신호 출력을 위한 두 개의 터미널이 위치한다. 각 PCFC는 PCB 캔틸레버에 부착한 후, 납땀을 통해 기관의 회로와 전기적으로 연결시켜 주었다. 제조된 PCB 캔틸레버의 실제 이미지를 그림 6(b)에 나타내었으며, 설계대로 잘 제조된 것을 알 수 있다.

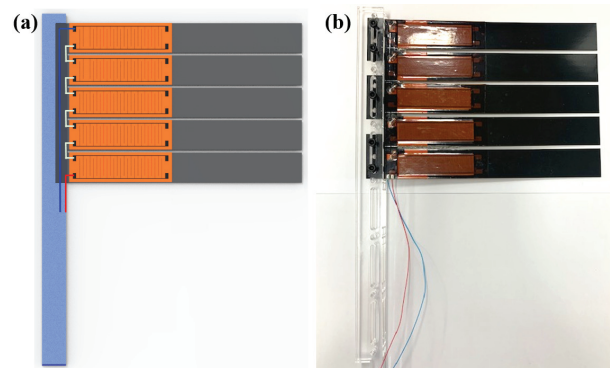


Fig. 6. (a) Schematics and (b) real image of fabricated PCB cantilever energy harvester.

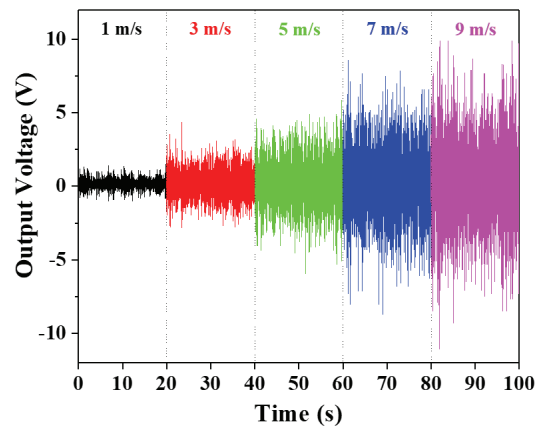


Fig. 7. Spectra of output voltage of PCB cantilever energy harvester under various wind speed from 1 m/s to 9 m/s at resistive loads of 250 kΩ.

일반적으로 aeroelastic flutter 구조의 하베스터는 풍속이 증가함에 따라 비선형적으로 출력 특성이 증가하는 경향을 나타낸다 [22]. 본 연구에서 제조된 PCB 캔틸레버 하베스터가 aeroelastic flutter 구조를 갖는지 확인하기 위하여 풍속의 증가에 따른 PCB 캔틸레버 하베스터의 출력 전압을 평가하였다. 이때, PCB 캔틸레버 하베스터의 free-end가 바람의 진행방향과 마주 보고 있으며, 날개부를 이어 주는 고정부가 뒤쪽으로 위치하는 inverted 구조 구조를 적용하였다. 이러한 inverted 구조는 바람에 의해 보다 큰 변위를 발생시켜 PCB의 변형 에너지를 PCFC로 효율적으로 전달할 수 있는 장점을 가진다. 그림 7에서 보듯이 PCB 캔틸레버 하베스터는 풍속이 증가함에 따라 출력 전압도 증가하는 경향을 나타내었으며, 1 m/s에서 7 m/s

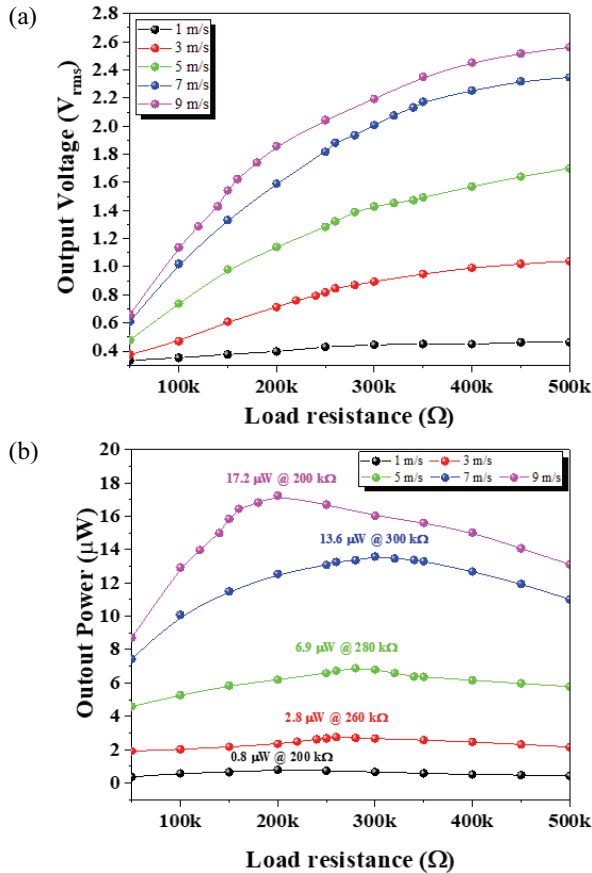


Fig. 8. (a) Variations of output voltage and (b) output power spectra as a function of load resistance with increasing wind speed from 1 m/s to 9 m/s for PCB cantilever energy harvester.

까지의 풍속에서는 출력 전압이 급격하게 증가하지만, 7 m/s를 초과하는 풍속에서는 출력 전압의 변화량이 적은 것을 알 수 있다. 이를 통해 PCB 캔틸레버 하베스터가 aeroelastic flutter 하베스터 구조를 잘 반영하고 있는 것을 확인하였다.

그림 8은 PCB 캔틸레버 하베스터의 부하 저항과 풍속 변화에 따른 출력 전압 및 전력 특성을 각각 나타내었다. 그림 8(a)는 5 kΩ에서 500 kΩ까지 부하저항을 변화시키면서 풍속을 1 m/s에서부터 9 m/s까지 2 m/s 간격으로 변화시켰을 때의 출력 전압을 RMS (root mean square)값으로 측정하였다. PCB 캔틸레버 하베스터는 모든 풍속에서 부하저항이 200 kΩ에서 300 kΩ까지는 출력 전압이 급격하게 증가하다가 이후 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 그림에 나타내지는 않았지만 모든 풍속에서 500 kΩ 이상의 부하 저항에서

Table 3. Comparison of wind energy harvesting performance for PCB cantilever energy harvester under various wind speed from 1 m/s to 9 m/s.

Properties	PCB cantilever energy harvester				
Wind speed (m/s)	1	3	5	7	9
Load resistance (kΩ)	200	260	280	300	200
Output power (μW)	0.8	2.8	6.9	13.6	17.2
Power density (μW/cm ³)	0.07	0.23	0.56	1.13	1.43

는 출력 전압의 증가가 미미하였다. 또한, 풍속에 따른 출력 전압은 1 m/s에서 7 m/s까지는 일정한 수준으로 증가하는 것을 알 수 있으나, 7 m/s를 초과하면서 증가폭이 크게 감소하였다. 이는 PCB 캔틸레버의 소재가 비교적 낮은 Young's modulus를 갖는 고분자 소재이기 때문에 풍속의 증가에 따라 선형적으로 특성이 증가하지 않는 것을 보여준다. 그림 8(b)는 부하 저항과 풍속 변화에 따른 출력 전력 특성을 나타내었다. 출력 전력은 $P=V_{rms}^2/R$ 식을 이용하여 도출하였다. 여기서 P는 출력 전력, V_{rms}는 RMS 출력 전압, 그리고 R은 부하저항을 각각 나타낸다. PCB 캔틸레버 하베스터는 1, 3, 5, 7, 9 m/s의 풍속과 최적 부하저항 200, 260, 280, 300, 200 kΩ에서 각각 0.8, 2.8, 6.9, 13.6, 17.2 μW의 최대 출력 전력을 나타내었다. 풍속이 7 m/s를 초과하면서 PCB 캔틸레버 하베스터는 큰 변형은 유지하지만 오히려 fluttering이 감소하게 되는데, 이는 낮은 탄성률과 비교적 두꺼운 두께를 갖는 PCB 캔틸레버 소재에 의해 발생하는 현상으로 매칭 임피던스의 증가에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 최대 출력 전력은 PCB 캔틸레버 하베스터의 총 부피를 고려하여 power density로 나타내면 각각 0.8, 2.8, 6.9, 13.6, 17.2 μW/cm³로 변환된다. PCB 캔틸레버 하베스터의 풍속 변화에 따른 최적 부하저항에서의 출력 특성을 비교하여 표 3에 요약하였다.

PCB 캔틸레버의 하베스팅 성능을 평가하기 위해서는 발생 에너지의 평가가 필요하다. 그림 9는 PCB 캔틸레버 3을 이용하여 1 m/s에서 9 m/s까지 2 m/s 간격의 풍속 변화에 따라 최적 부하저항에서 800초 동안 생성되는 에너지 변화를 나타낸다. 본 연구에서 제작한 PCB 캔틸레버의 발생 에너지(E_G)는 식 (3)을 이용하여 계산하였으며, t는 측정 시간, V는 출력 전압, R은 부하저항을 각각 나타낸다.

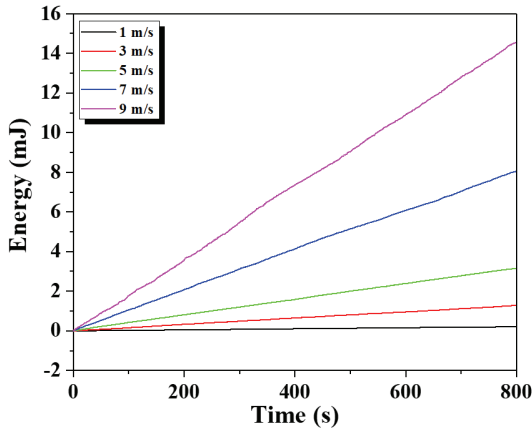


Fig. 9. Energy curve of PCB cantilever energy harvester at optimal resistive loads.

Table 4. Summary of generated energy of PCB cantilever energy harvester under various wind speed from 1 m/s to 9 m/s at optimal resistive loads.

Properties	PCB cantilever energy harvester				
	1	3	5	7	9
Wind speed (m/s)	1	3	5	7	9
Maximum energy (mJ)	0.2	1.3	3.2	8.1	14.6
Energy generation rate (mJ/min)	0.01	0.1	0.2	0.6	1.1

$$Energy(E_G) = \int_{t_1}^{t_2} V^2/Rdt \quad (3)$$

풍속이 일정하게 유지되는 경우 시간의 경과에 따라 PCB 캔틸레버 에너지 하베스터에서 발생하는 출력 전압은 비교적 일정하게 나타나기 때문에 각 풍속 조건에서 시간 경과에 따른 출력에너지도 비교적 선형적으로 증가하는 것을 확인하였다. 800초 경과 시 최대 발생 에너지는 1, 3, 5, 7, 9 m/s의 풍속 조건에서 각각 0.2, 1.3, 3.2, 8.1, 14.6 mJ을 나타내었다. 또한, 이를 에너지 발생 속도로 환산하면 각각 0.01, 0.1, 0.2, 0.6, 1.1 mJ/min로 계산할 수 있다. 실제 환경에서는 보다 불규칙적인 풍밀 환경으로 인하여 발생 에너지량의 정확한 예측이 어렵지만 실험실 환경을 기준으로 일정한 풍속의 에너지를 인가해 준다면, 각 풍속 조건에서 1,000, 100, 50, 17, 9분의 시간이 경과하면 약 10 mJ의 에너지가 생성 가능하다. 통상적으로 10 mJ 수준의 에너지 예산이면 소형 IoT 센서의 구동이 가능

하기 때문에 온도, 미세먼지 등의 측정을 위한 저전력 IoT 센서와 같이 센싱 기능의 정확도와 통신 주기의 제어에 따라 소비 전력을 제어할 수 있는 경우, 본 연구에서는 도출한 수준의 에너지량으로 mW급 저전력 IoT 센서류에 적용이 가능할 것으로 예측된다.

4. 결론

본 연구에서는 평판형 전극이 인쇄된 soft계 압전 세라믹을 이용하여 두께 모드 압전 세라믹 파이버 복합체(PCFC)를 제조하였다. PCFC는 3점 굽힘 강도 테스트와 벤딩 테스트를 통해 외부에서 인가되는 응력하에도 우수한 기계적 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 이를 이용하여 5개의 PCFC가 부착된 PCB 캔틸레버 하베스터를 제조하였다. 제조된 PCB 캔틸레버 하베스터는 진동 테스트를 통해 우수한 출력 전압 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 미소 풍력 에너지 하베스팅 특성을 평가하기 위해 큰 변형을 유도할 수 있는 inverted 구조로 PCB 캔틸레버 하베스터를 배치하였다. 제조된 하베스터는 풍속이 증가함에 따라 출력 특성도 증가하는 aeroelastic flutter 구조를 잘 나타내었으며, 특히 9 m/s의 풍속과 200 kΩ의 부하저항에서 17.2 μW의 최대 출력 전력을 나타내었다. 이를 총 부피를 고려한 전력 밀도로 환산하면 1.43 μW/cm³으로 나타낼 수 있다. 이는 PCB 캔틸레버 하베스터가 IoT 산업에 사용되는 다양한 저전력 기기에 충분히 적용 가능함을 보여준다.

ORCID

Young-Hun Jeong

<http://orcid.org/0000-0003-4716-0290>

감사의 글

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

REFERENCES

- [1] A. Mohammadnia, A. Rezanian, B. M. Ziapour, F. Sedaghati,

- and L. Rosendahl, *Energy Convers. Manage.*, **205**, 112352 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112352>]
- [2] Y. Xie, S. Wang, S. Niu, L. Lin, Q. Jing, Y. Su, Z. Wu, and Z. L. Wang, *Nano Energy*, **6**, 129 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.03.015>]
- [3] H. Mutsuda, S. Rahmawati, N. Taniguchi, T. Nakashima, and Y. Doi, *Sustainable Energy Technol. Assess.*, **35**, 160 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.07.001>]
- [4] E. Çelik, E. Kurt, and N. Öztürk, *Int. J. Electron.*, **107**, 226 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1080/00207217.2019.1643039>]
- [5] http://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%92%8D%EB%A0%A5_%EB%B0%9C%EC%A0%84 (2020).
- [6] W. Wang, X. He, X. Wang, M. Wang, and K. Xue, *Sens. Actuators, A*, **279**, 467 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.06.059>]
- [7] J. Wang, S. Gu, C. Zhang, G. Hu, G. Chen, K. Yang, H. Li, Y. Lai, G. Litak, and D. Yurchenko, *Energy Convers. Manage.*, **213**, 112835 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112835>]
- [8] Y. Feng, L. Zhang, Y. Zheng, D. Wang, F. Zhou, and W. Liu, *Nano Energy*, **55**, 260 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.10.075>]
- [9] W. Sun, Z. Ding, Z. Qin, F. Chu, and Q. Han, *Nano Energy*, **70**, 104526 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104526>]
- [10] Z. Lu, Q. Wen, X. He, and Z. Wen, *Appl. Sci.*, **9**, 4823 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/app9224823>]
- [11] B. Yan, N. Yu, L. Zhang, H. Ma, C. Wu, K. Wang, and S. Zhou, *Smart Mater. Struct.*, **29**, 025022 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ab62e1>]
- [12] M. Perez, S. Boisseau, P. Gasnier, J. Willemin, M. Geisler, and J. L. Reboud, *Smart Mater. Struct.*, **25**, 045015 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/4/045015>]
- [13] M. Bi, Z. Wu, S. Wang, Z. Cao, Y. Cheng, X. Ma, and X. Ye, *Nano Energy*, **75**, 104968 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104968>]
- [14] H. Elahi, M. Eugeni, F. Fune, L. Lampani, F. Mastroddi, G. P. Romano, and P. Gaudenzi, *Micromachines*, **11**, 933 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3390/mi1100933>]
- [15] M. Zhou, Q. Chen, Z. Xu, and W. Wang, *AIP Adv.*, **9**, 035213 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5082811>]
- [16] W. J. Su and W. Y. Lin, *Int. J. Mech. Sci.*, **173**, 105457 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105457>]
- [17] F. M. Gharghani, M. A. Bijarchi, O. Mohammadi, and M. B. Shafii, *Int. J. Low-Carbon Tech.*, (In press). [DOI: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa060>]
- [18] J. D. Hobeck and D. J. Inman, *Smart Mater. Struct.*, **21**, 105024 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/21/10/105024>]
- [19] H. Liu, S. Zhang, T. Kobayashi, T. Chen, and C. Lee, *Micro Nano Lett.*, **9**, 286 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1049/mnl.2013.0750>]
- [20] D. Zhao, X. Hu, T. Tan, Z. Yan, and W. Zhang, *Energy Convers. Manage.*, **222**, 113260 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113260>]
- [21] J. Wang, L. Geng, S. Zhou, Z. Zhang, Z. Lai, and D. Yurchenko, *Acta Mech. Sin.*, **36**, 592 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10409-020-00928-5>]
- [22] L. Zhao and Y. Yang, *Smart Struct. Syst.*, **19**, 67 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.12989/sss.2017.19.1.067>]
- [23] J. Liu, H. Zuo, W. Xia, Y. Luo, D. Yao, Y. Chen, K. Wang, and Q. Li, *Microelectron. Eng.*, **231**, 111333 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2020.111333>]
- [24] J.A.D.C. Dias, V.C.D. Sousa, A. Erturk, and C.D.M. Junior, *Smart Mater. Struct.*, **29**, 105006 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab9add>]
- [25] S. Ju, S. H. Chae, Y. Choi, and C. H. Ji, *Sens. Actuators, A*, **226**, 126 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.02.025>]
- [26] L. Nelson, C. Bowen, R. Stevens, M. Cain, and M. Stewart, *Proc. Smart Structures and Materials 2003: Active Materials: Behavior and Mechanics* (Smart Structures and Materials, San Diego, USA, 2003) p. 556. [DOI: <https://doi.org/10.1117/12.484738>]
- [27] P. K. Vallittu, *J. Prosthet. Dent.*, **81**, 318 (1999). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(99\)70276-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(99)70276-3)]