

BaTiO₃-Poly Vinylidene Fluoride 복합 압전발전기의 출력특성에 미치는 배합비와 분극의 효과

김희태¹ · 박상식^{1,2†}

¹경북대학교 에너지신소재화학공학과, ²경북대학교 미래과학기술융합학과

Effects of Mixing Ratio and Poling on Output Characteristics of BaTiO₃-Poly Vinylidene Fluoride Composite Piezoelectric Generators

Hee-Tae Kim¹ and Sang-Shik Park^{1,2†}

¹Department of Energy Materials & Chemical Engineering, Kyungpook National University,
Sangju 37224, Republic of Korea

²Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University,
Sangju 37224, Republic of Korea

(Received October 9, 2023 : Revised November 2, 2023 : Accepted November 18, 2023)

Abstract BaTiO₃-Poly vinylidene fluoride (PVDF) solution was prepared by adding 0~25 wt% BaTiO₃ nanopowder and 10 wt% PVDF powder in solvent. BaTiO₃-PVDF film was fabricated by spreading the solution on a glass with a doctor blade. The output performance increased with increasing BaTiO₃ concentration. When the BaTiO₃ concentration was 20 wt%, the output voltage and current were 4.98 V and 1.03 μ A at an applied force of 100 N. However, they decreased when the over 20 wt% BaTiO₃ powder was added, due to the aggregation of particles. To enhance the output performance, the generator was poled with an electric field of 150~250 kV/cm at 100 °C for 12 h. The output performance increased with increasing electric field. The output voltage and current were 7.87 V and 2.5 μ A when poled with a 200 kV/cm electric field. This result seems likely to be caused by the c-axis alignment of the BaTiO₃ after poling treatment. XRD patterns of the poled BaTiO₃-PVDF films showed that the intensity of the (002) peak increased under high electric field. However, when the generator was poled with 250 kV/cm, the output performance of the generator degraded due to breakdown of the BaTiO₃-PVDF film. When the generator was matched with 800 Ω resistance, the power density of the generator reached 1.74 mW/m². The generator was able to charge a 10 μ F capacitor up to 1.11 V and turn on 10 red LEDs.

Key words piezoelectric nanogenerator, BaTiO₃-Poly vinylidene fluoride, composite film, poling process.

1. 서 론

사물 인터넷(IoT), 웨어러블 장비 등 전자기기와 관련된 기술이 발전하면서 최근 휴대용 전자기기에 대한 관심이 높아지고 있다.¹⁾ 일반적으로 휴대용 전자기기의 경우 배터리를 전력원으로 활용하지만, 배터리의 제한적인 수명으로 인해 많은 연구자들은 영구 전력원에 대한 관심을 보

이고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 버려지는 폐에너지를 수집하여 전기 에너지로 활용하는 에너지 하베스팅에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.²⁾ 다양한 환경에서 발생하는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 압전 소자는 다양한 구조 및 환경 조건에서 안정적으로 전기적 에너지를 수확할 수 있는 대표적인 에너지 하베스팅 기술이다.³⁾

[†]Corresponding author

E-Mail : parkss@knu.ac.kr (S.-S. Park, Kyungpook Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, 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.

과거 많은 연구자들은 전기적 특성이 매우 우수한 $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]_2\text{O}_7$, $\text{Pb}[\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]_2\text{O}_7$ - PbTiO_3 , $\text{Pb}[\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}]_2\text{O}_7$ - PbTiO_3 ⁴⁾와 같은 Pb (lead)기반의 무기 압전 물질을 이용하여 압전발전기를 제작하여 왔으나 환경 보호 및 독성 문제로 인하여 납사용이 제한되었다. 이에 따라 BaTiO_3 , KNN [$(\text{K}_{1/2}\text{Na}_{1/2})\text{NbO}_3$], ZnSnO_3 , CdS ^{4,5)}와 같이 무연(lead free) 압전 물질을 이용한 압전 발전기가 연구되어 왔다. 무기 압전 물질을 이용한 압전 발전기는 우수한 전기적 출력 특성을 보이는 장점을 보이고 있으나, 높은 취성을 보이는 단점을 가지고 있어 적용에 한계가 있다. 이에 따라 PVDF (polyvinylidene difluoride), PVDF-TrFE (polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene)와 같은 기계적 특성이 뛰어난 고분자를 이용한 유기 압전 발전기가 함께 연구개발되었다. 그러나 고분자 기반의 유기 압전 발전기는 뛰어난 유연성에 반해 기존의 무기 압전 발전기에 비하여 전기적 특성이 우수하지 않다는 단점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 ZnO/PDMS (polydimethylsiloxane),⁵⁾ $\text{BaTiO}_3/\text{PDMS}$,⁶⁾ $\text{BaTiO}_3/\text{CNT}$,⁷⁾ ZnO/PVDF ⁸⁾와 같은 무/유기 혼합 압전 발전기에 대한 연구가 진행되고 있다.

무기 압전 물질과 함께 강유전성 갖는 고분자 압전 발전기는 자가발전 소자의 분극을 강화시켜 높은 전기적 특성을 출력하는데 이점을 보이고 있다. PVDF는 대표적인 강유전성을 보이는 고분자로 화학적, 열적 안정성을 보이고 있어 다양한 분야에 적용 가능하며 무기물에 비하여 뛰어난 유연성을 보이고 있어 기계적 안정성을 크게 높여준다.^{9,10)} 또한 PDMS와 같은 비강유전성 고분자에 비해 압전 계수가 높아 기계적 에너지가 인가될 때 더 많은 전하를 생성시켜 우수한 전기적 특성을 보인다. 특히 분극처리 공정 시 PVDF는 다른 유기 압전 물질에 비해 높은 폭으로 출력 전압이 증가한다고 보고되고 있다.^{11,12)}

분극처리공정은 일반적으로 압전 물질에 강한 전기장을 가해 재료 내의 전기적 쌍극자가 정렬되도록 하여 영구적인 극성을 생성시키는 과정이다.¹³⁾ 분극처리공정에 영향을 주는 요소로는 전계의 세기, 전계가 인가되는 시간, 분극처리 온도가 있다. Xie et al.¹⁴⁾ 연구팀이 보고한 바에 의하면 분극공정 시 전계의 세기가 크고 인가 시간이 길어질수록 출력 전압과 전력 밀도가 높아질 수 있다고 보고하고 있다. 또한 분극공정 시 온도는 압전 계수와 압전 재료의 기계적 특성에 영향을 미친다고 보고되고 있다.¹⁵⁾

본 연구에서는 우수한 전기적 특성을 보여주는 무기 압전 물질인 BaTiO_3 나노 입자와 높은 유연성과 강유전특성을 보이는 PVDF를 혼합하여 BaTiO_3 -PVDF 막 기반 복합 압전 발전기를 제작하였다. BaTiO_3 -PVDF 복합 압전막은 닥터 블레이드 법을 이용하여 제작하였는데 BaTiO_3 나노

입자의 배합비와 균일한 분산이 출력특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 다양한 BaTiO_3 배합비로 막을 제작하여 발전기의 출력특성을 평가하였다. 또한 분극처리공정을 최적화하기 위해 BaTiO_3 -PVDF 복합 압전 발전기를 다양한 조건에서 분극처리하여 출력 특성을 평가하였고 이를 통해 저전력 소형 소자, 웨어러블 소자 등에서 BaTiO_3 -PVDF 복합 압전 소자의 적용 가능성을 평가하였다.

2. 실험 방법

용매내 BaTiO_3 나노분말을 균일하게 분산하기 위하여 acetone과 DMAc (dimethylacetamide)를 7:3 비율로 혼합한 용매에 BaTiO_3 분말(99.9%, 200 nm, US3830, US Nano, US Reserch Nanomaterials, USA)을 10~25 wt% 첨가하여 교반기를 이용하여 2시간 교반을 진행한 후 초음파 분산기(Q125-Sonicator, Qsonica, USA)를 이용해 20 kHz의 진동수로 30분간 분산처리하였다. 그 후 10 wt%의 PVDF 분말(44080, Alfa Aesar)을 첨가하여 2시간 교반을 추가로 진행하여 BaTiO_3 -PVDF 용액을 제작하였다. 제작된 용액을 유리 기판위에 적정량을 흘려주고 닥터 블레이드(doctor blade)를 이용하여 막의 박리나 손상이 발생하지 않는 두께인 40 μm 로 막을 형성하였고 60 °C 온도의 건조기에서 5분 동안 건조 후 박리하여 BaTiO_3 -PVDF 막을 제작하였다. 이후 압전 발전기제작을 위해 BaTiO_3 -PVDF막을 3 cm × 3 cm 크기로 재단 후 양면에 스퍼터링 공정을 통하여 Ag 전극을 형성하였고 외부 회로와 연결하기 위해 Cu 테이프를 이용하여 Cu 선을 부착하였다. 이후 외부로부터 발전기의 손상을 막기 위해 높이 3 mm의 틀에 소자를 삽입 후 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS: Sylgard, 184 Silicone elastomer, Dow, USA)과 경화제를 10:1의 비율로 혼합하여 부은 후 60 °C에서 1시간동안 경화시켜 캡슐화된 압전발전기를 제작하였다. 압전발전기의 제작 공정과 유연성을 보이는 압전발전기의 사진을 Fig. 1(a)에 나타내었다. 또한 BaTiO_3 -PVDF 압전발전기의 압전 특성을 향상시키기 위하여 고전압전원공급기(EPR-10P15, Matsusada, Japan)를 이용해 100 °C에서 12시간동안 100~250 kV/cm의 전계를 인가하여 분극처리를 진행하였다. 분극처리공정의 개략도는 Fig. 1(b)에 나타내었다.

제작된 BaTiO_3 -PVDF 막의 표면과 단면형상, BaTiO_3 분말의 분산정도를 확인하기 위해 주사전자현미경(FESEM, Regulus 8220, HITACHI, Japan)을 이용하였고, BaTiO_3 -PVDF의 결정구조는 X-ray diffractometer (XRD, Empyrean, PANalytical, UK)를 이용하여 분석하였다. 압전발전기의 출력특성을 평가하기 위하여 가압시험기(Pushing machine,

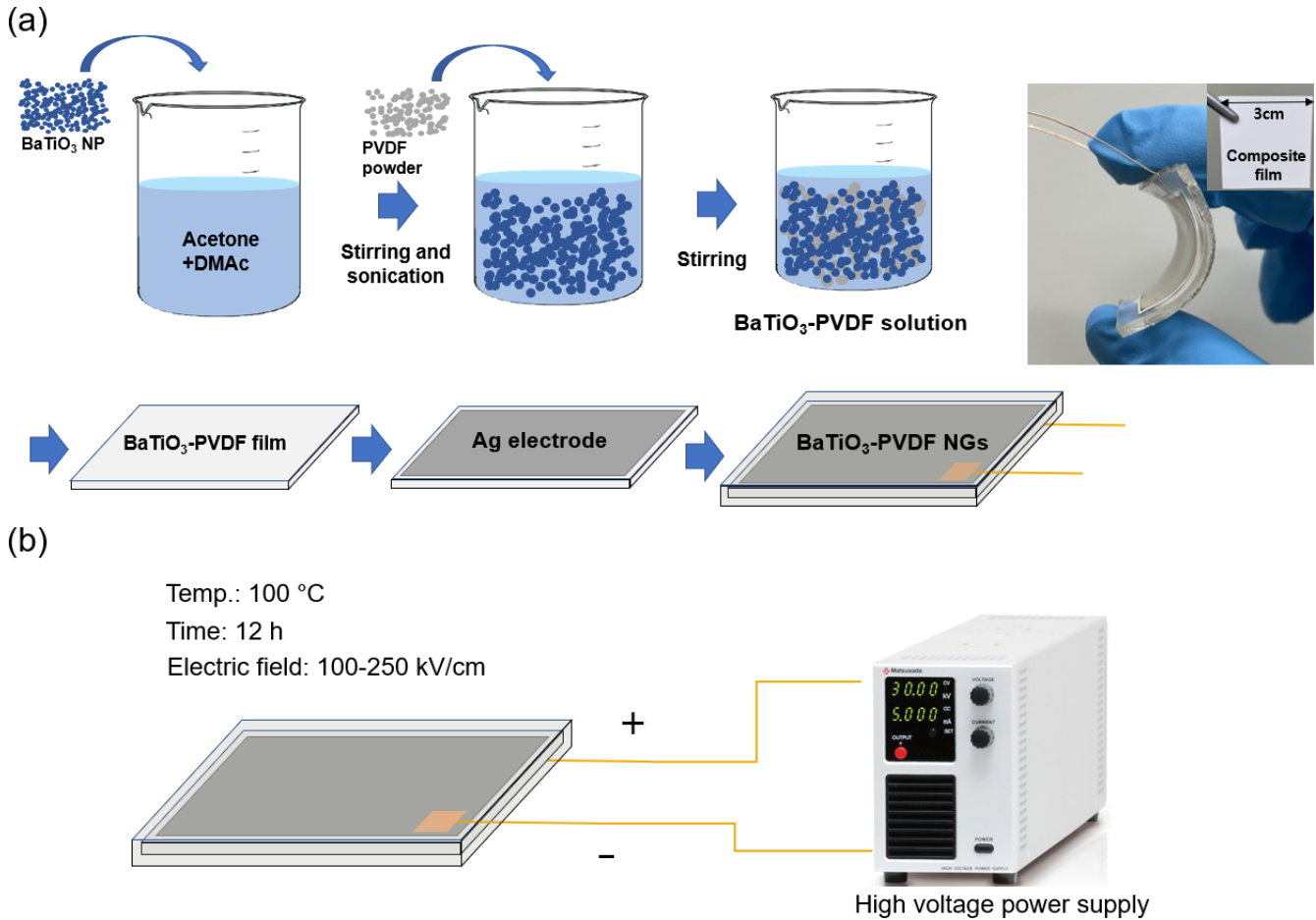


Fig. 1. (a) Fabrication process for piezoelectric generator based on PVDF matrix and BaTiO₃ powder and an actual piezoelectric generator made of piezoelectric composite, (b) schematic of poling process of piezoelectric generator.

SnM, Korea)를 통해 하중을 인가하였고 출력되는 전기신호를 디지털 멀티미터(DMM7510, Keithley, USA), 디지털 오실로스코프(TBS2102, Tektronix, USA)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 본 연구에 사용된 BaTiO₃ 분말의 SEM 이미지와 XRD 회절패턴을 보인다. BaTiO₃ 분말은 평균적으로 200~300 nm 크기와 대체적으로 구형의 입상을 확인할 수 있다. Fig. 2(b)의 BaTiO₃ 분말의 XRD 회절패턴은 BaTiO₃ 분말이 전형적인 정방정(tetragonal) 구조를 가짐을 보인다. 특히 22.2°와 45.4°의 (100)과 (200) 피크가 분리되어 나타나는데 a축 배향이 우선함을 보인다. 이는 합성된 정방정의 BaTiO₃ 분말에서 나타나는 전형적인 특성이다.^{6,11,16} Fig. 3은 BaTiO₃ 첨가량에 따른 복합체 막의 표면 SEM 사진이다. Fig. 3(a)는 PVDF에 BaTiO₃를 미첨가한 막이며, Fig. 3(b~d)는 각각 10 wt%, 15 wt%, 20 wt%의 BaTiO₃를

첨가한 막이다. 10~20 wt%의 BaTiO₃가 첨가된 경우는 BaTiO₃ 분말들이 PVDF 모체에 균일하게 분산되어 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(e)는 BaTiO₃ 첨가량이 25 wt%인 시편으로 막 표면에 BaTiO₃ 입자들이 균일하게 분산되지 못하고 한 곳에 뭉쳐 응집됨을 보인다. 분말의 응집 정도는 용매의 종류, 농도, 분말의 형상, 크기 등 다양한 요인에 따라 달라질 수 있는데 Tao et al.¹⁷⁾은 스핀 코팅을 이용하여 제작된 PVDF-BaTiO₃ 막을 제작 시 BaTiO₃ 분말이 5~10 wt%일 때 입자들이 고르게 분산되며 15 wt% 이상 첨가되었을 때 입자의 응집이 발생한다고 보고하였고, Niu et al.¹⁸⁾은 BaTiO₃ 분말을 부피분율로 30% 이상 첨가시 응집이 일어나고 절연 파괴강도가 감소하는 것으로 보고하고 있다. Fig. 2(f)는 BaTiO₃ 첨가량이 20 wt%인 막의 단면 SEM 사진인데 약 40 μm의 두께와 막의 상하부에 균일한 입자분산을 보이는 치밀한 구조를 보인다.

Fig. 4(a, b)는 분극처리 전 다양한 BaTiO₃ 배합비를 갖는 시편에 가압시험기를 이용하여 100 N의 힘을 가하면서 출력되는 전압과 전류 특성이다. 순수 PVDF막의 경우, 출

력전압과 전류가 각각 1.86 V와 392 nA를 보이며, BaTiO₃ 첨가량이 20 wt%까지 증가하였을 때 전압은 최대 4.98 V, 전류는 최대 1.03 μ A까지 증가함을 확인하였다. 그러나 BaTiO₃ 첨가량이 25 wt%일 때 전압과 전류는 각각 1.23 V,

512.83 nA로 20 wt%일 때에 비해 감소하였다. 25 wt% 첨가 시편에서 출력 전압, 전류의 감소이유는 Fig. 3(d, e)에 보인 것처럼 BaTiO₃가 20 wt% 첨가된 막의 경우 BaTiO₃ 입자들이 고르게 분산되어 있지만, 25 wt% 첨가된 막의

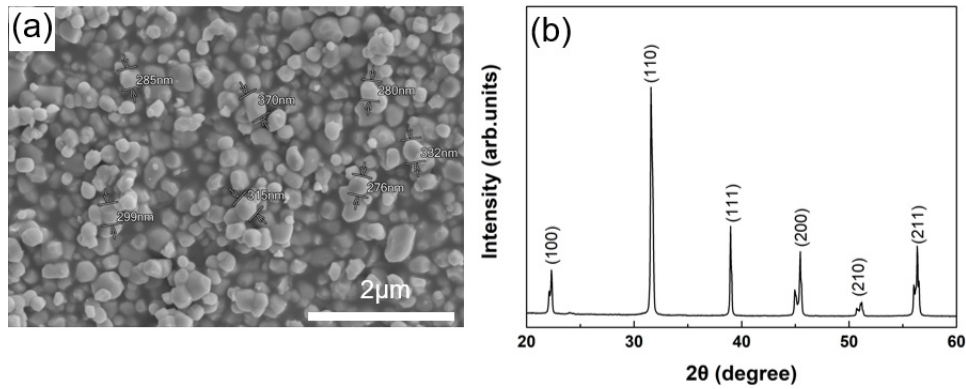


Fig. 2. (a) SEM image and (b) XRD pattern of BaTiO₃ powder.

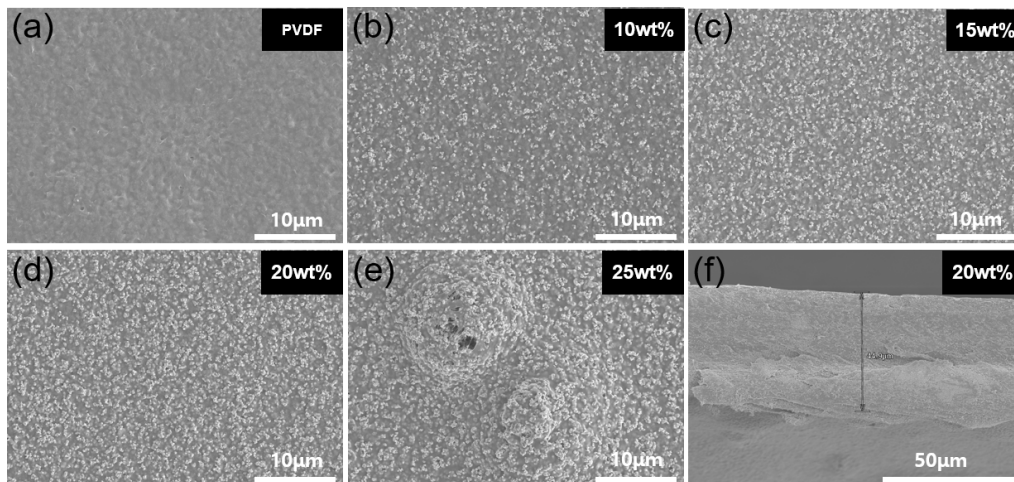


Fig. 3. Surface SEM image of (a) PVDF film and BaTiO₃-PVDF film with (b) 10 wt%, (c) 15 wt%, (d) 20 wt% and (e) 25 wt% BaTiO₃, (f) SEM cross section image of 20 wt% BaTiO₃-PVDF film.

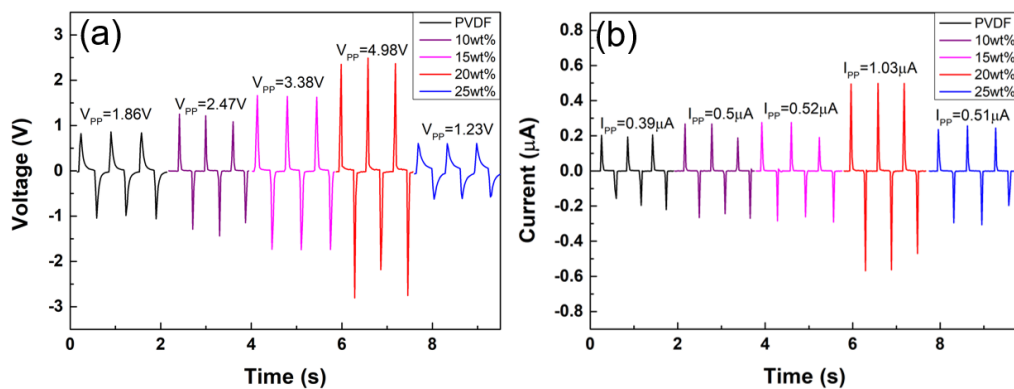


Fig. 4. The open circuit voltage and short circuit current of piezoelectric generator as a function of BaTiO₃ concentration under the 100 N load.

경우 BaTiO₃ 입자들이 PVDF 내에 균일하게 분산되지 않고 응집되기 때문으로 판단된다. 유·무기복합압전소자에서 무기 압전 입자들의 분산정도가 압전 특성에 영향을 준다는 사실은 다수 연구에서 보고된다.¹⁹⁻²¹⁾ 25 wt% 첨가된 막이 가장 낮은 출력특성을 보이는 이유는 입자들의 과도한 응집으로 인한 구조적 결함과 표면거칠기의 증가로 인한 전극계면과의 불안정한 접촉에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 20 wt%의 BaTiO₃의 배합비를 최적조건으로 결정하였다.

제작된 압전발전기의 출력 성능을 향상시키기 위해 분극처리를 진행하였다. 분극처리 시 공정온도와 시간을 각각 100 °C와 12 h으로 고정하고 인가전계를 달리하여 분극전계의 세기가 압전발전기의 출력특성에 미치는 영향을 확인하였다. 20 wt% BaTiO₃의 배합비를 갖는 압전체막으로 제작한 발전기를 150~250 kV/cm의 전계 조건범위에서 분극처리를 진행하였으며 가압시험기를 이용하여 100

N의 하중을 반복적으로 인가하여 출력특성을 확인하였다. 이때 발전압전기에서 출력된 전기적 특성을 Fig. 5(a, b)에 나타내었다. 분극전계가 증가함에 따라 분극 전 시편에 비해 출력 전압과 전류가 증가하는 경향을 보이다가 250 kV/cm의 전계인가 시편에서 감소하는 결과를 보인다. 이는 250 kV/cm의 전계에서 절연파괴현상을 보이면서 분극이 진행되지 않았기 때문이다. BaTiO₃와 PVDF의 절연강도는 각각 1,500 kV/cm이상과 150 kV/cm 정도로 보고되나²²⁾ 제조조건에 따라 다양한 절연강도 값을 보인다. 200 kV/cm의 전계에서 분극처리를 진행했을 때, 출력 전압은 7.87 V, 전류는 2.5 μA로 나타났다. 특히 전류는 분극처리 공정을 통해 분극처리전 1.03 μA에서 2.5 μA로 대략 2배 이상 증가하는 것을 확인하였다. 이는 유사한 다른 압전발전기에 비해 높은 출력값이라 할 수 있다.^{11,21-26)} 본 연구에서는 공정조건상 압전체막의 두께를 40 μm로 고정하여 실험하였으나 압전체의 두께가 증가함에 따라 출력전압

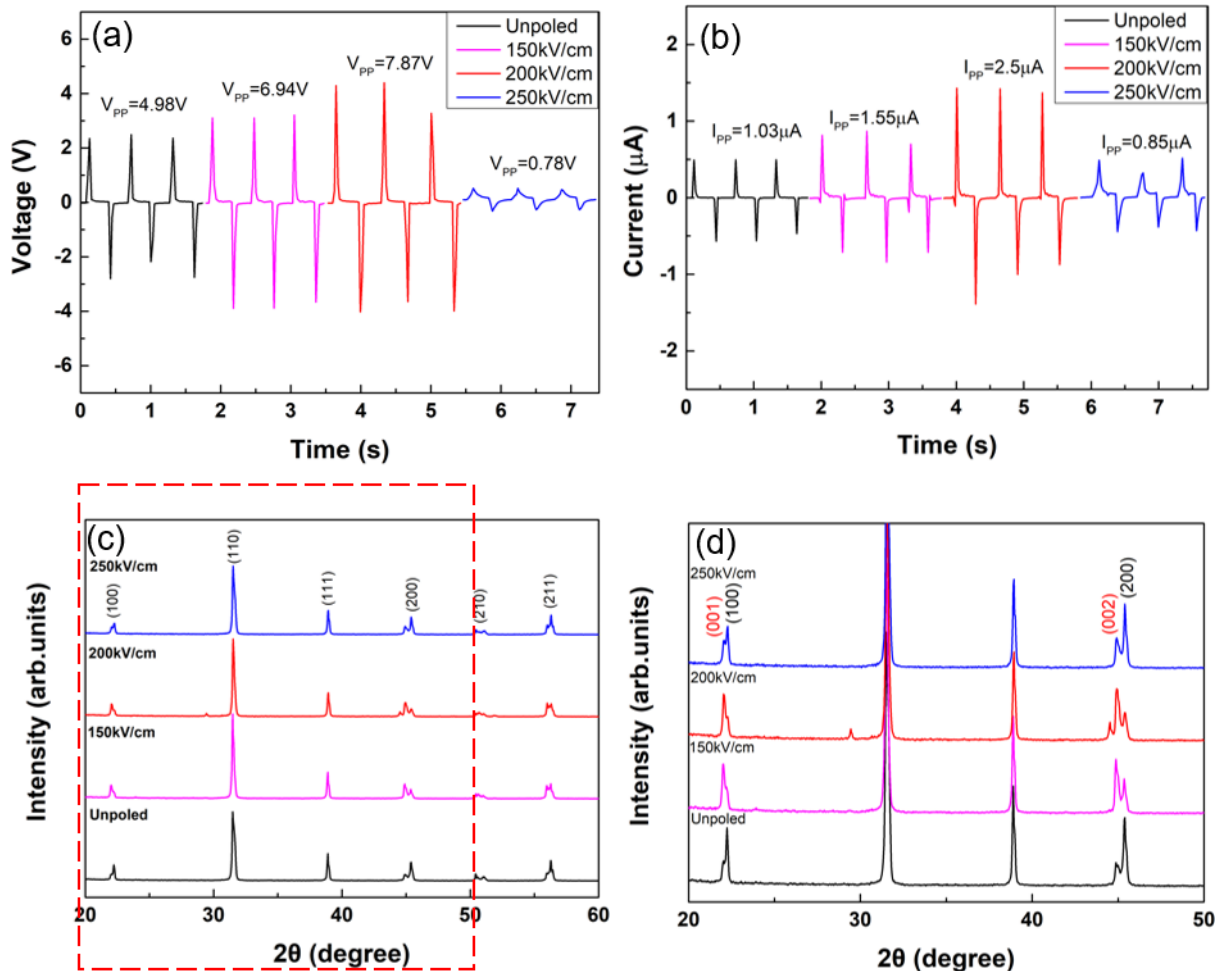


Fig. 5. (a) The open circuit voltage and (b) short circuit current of piezoelectric generators as a function of poling electric field under applied force of 100 N, (c) XRD patterns of BaTiO₃-PVDF films according to poling electric field, (d) magnified view of the main XRD peak at 2θ = 20-50°.

Table 1. Output performance of piezoelectric generators fabricated with BaTiO₃ composite films.

	BTO concentration (wt%)	Size (cm ²)	Thickness (μm)	Force (N)	Open circuit voltage (V)	Short circuit current (μA)	Power density (mW/m ²)
BTO-PVDF (this work)	20	2.5 × 2.5	40	100	7.87	2.5	1.74
BTO-PVDF ¹¹⁾	17	1 × 1	60	1 MPa	35	0.6	
BTO-PVDF ²¹⁾	10	1.5 × 1.5			7.2	0.038	
BTO-P (VDF-TrFE) ²³⁾	20	1 × 1	55	50	26.4	0.6	0.012
BTO-PVDF ²⁴⁾	10			(bending) 0.192 %	3~4	0.2~0.25	
BTO-PVDF ²⁵⁾	4			2	4.7		

이 증가하는 것이 일반적이다. Table 1에는 BaTiO₃ 기반 압전 발전기들의 출력 특성을 비교하여 나타내었다.

Fig. 5(c, d)는 20 wt% BaTiO₃-PVDF 막을 여러 전계 조건에서 분극처리한 후 분석한 XRD 패턴이다. 막 제조시 추가적인 열처리과정을 거치지 않아 PVDF의 결정화 피크는 나타나지 않는다. BaTiO₃ 분말은 Fig. 2에서 확인한 것처럼 정방정의 구조를 보이며 분극전계를 증가시키에 따라 22.2°와 45.4° 피크의 강도가 감소하고 22.03°와 44.88° 피크의 강도가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 피크 강도의 변화는 (100), (200) 방향으로 배향되었던 BaTiO₃ 입자들이 전계에 의해 결정구조의 c축 방향인 (001), (002) 방향으로 정렬되면서 나타나는 현상이라 할 수 있다. XRD 피크의 변화로 나타나는 c축 배향성은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = \frac{I_{(00l)}}{I_{(h00)} + I_{(00l)}} \quad (1)$$

α 는 c축으로 배향된 정도를 나타내며, $I_{(h00)}$ 과 $I_{(00l)}$ 는 각각 (h00)면과 (00l)면의 회절피크 강도를 나타낸다. 분극처리된 BaTiO₃-PVDF 막의 경우 (001)과 (002) 피크는 각각 $\alpha_{(001)} = 0.3$ 과 $\alpha_{(002)} = 0.26$ 로 나타났다. 150 kV/cm의 전계에서 분극처리 하였을 때, $\alpha_{(001)} = 0.64$, $\alpha_{(002)} = 0.61$ 로, 전계의 크기가 200 kV/cm일 때, $\alpha_{(001)} = 0.65$, $\alpha_{(002)} = 0.64$ 로 전계의 크기가 커질수록 c축 배향성의 증가를 보였다. 이러한 결과는 타 연구자들의 연구결과와 유사한 경향을 보이는데 Dudem et al.²⁷⁾은 압전체가 외부 전계에 의해 c축으로 배향되면서 압전 쌍극자를 형성하기 용이해지며 출력 특성이 향상될 수 있다고 보고하였고, Yan and Jeong²⁸⁾은 BaTiO₃ 나노선의 압전 특성에 대한 연구에서 BaTiO₃ 나노선을 분극처리 하였을 때 (200) 방향 피크의 강도가 줄어

들며 (002)면 방향 피크의 증가를 보고하였다. 250 kV/cm 전계에서 분극처리 하였을 경우 절연파괴에 의해 분극처리된 BaTiO₃-PVDF 막과 유사한 XRD패턴을 나타내는 것으로 보인다.

제작된 압전발전기는 Fig. 6(a)와 같이 정류회로를 거쳐 직류 신호로 변환하였고 1 MΩ에서 1 GΩ까지의 외부저항을 연결하여 출력전압과 전류를 측정하였다. Fig. 6(b, c)는 압전발전기에 연결한 외부저항의 크기에 따른 출력특성을 보인다. 저항값의 증가에 따라 출력전압의 증가와 전류의 감소를 보인다. 출력 전압은 1 GΩ의 저항에서 4.24 V까지 증가하였고, 전류는 311.1 nA까지 감소하였다. 각 저항에 따른 출력 전력밀도는 아래 식 (2)로 계산하였다.

$$P = V \times I / A \quad (2)$$

여기서, V와 I는 각각 압전발전기로부터 출력되는 개회로 전압과 폐회로 전류이며 A는 압전발전기의 전극 면적(2.8 × 2.8 cm²)이다.

식에 따라 계산된 압전발전기의 전력밀도를 Fig. 6(c)에 나타내었는데 압전발전기의 최대 전력 밀도는 800 MΩ의 저항에서 1.74 mW/m²으로 나타났다. Fig. 6(d)는 압전발전기에 10~100 μF의 전해커패시터를 연결하여 가압시험기로 반복적으로 하중을 인가하면서 충전특성을 평가한 결과이다. 압전발전기에 100 N의 힘을 인가하였을 때 커패시터의 정전용량이 증가함에 따라 최대 충전전압이 감소하였고, 10 μF의 커패시터의 경우 약 300 s 동안 1.11 V까지 충전하는 특성을 보였다.

Fig. 7(a)는 제작된 BaTiO₃-PVDF 압전발전기의 실제 적용성을 확인하기 위해 LED발광 시험을 진행하였다. 브레드보드를 통해 정류회로와 연결된 압전발전기는 10개의 적색 LED전구를 안정적으로 발광시켰다. 또한 압전발전

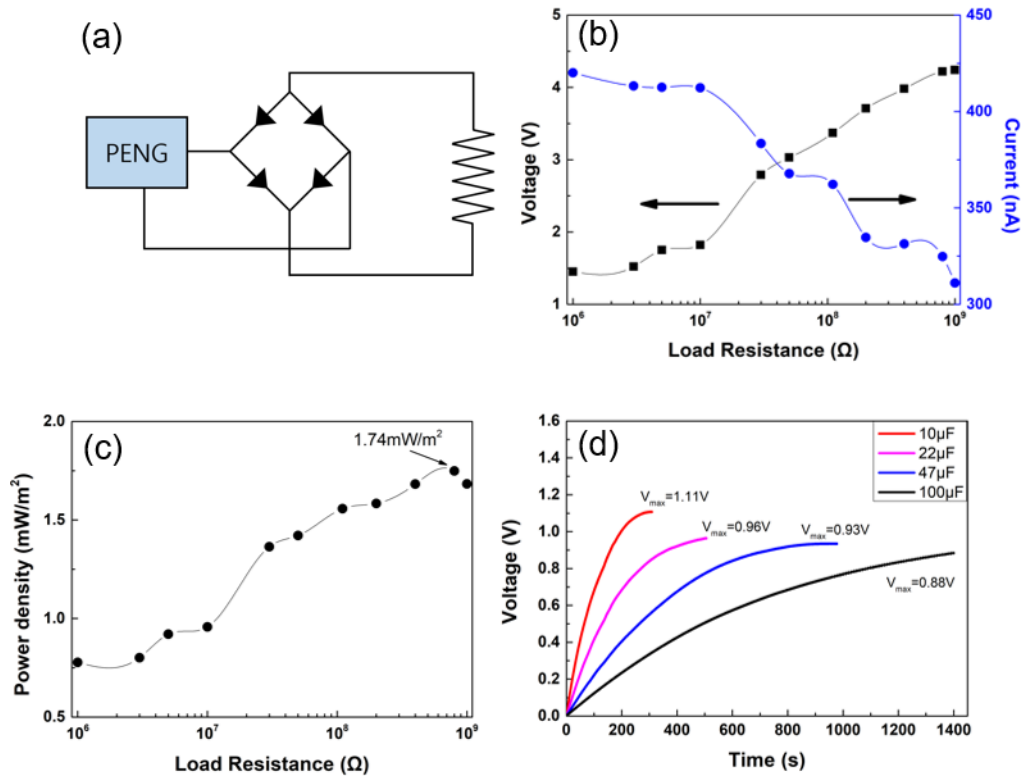


Fig. 6. (a) Circuit schematic of the practical application of piezoelectric nanogenerator, (b) output voltage and current and (c) power density according to load resistance, and (d) charging behavior of a commercial capacitors using the generator device output.

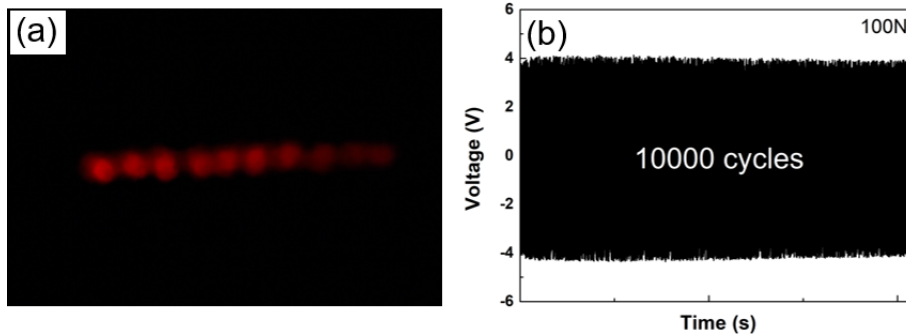


Fig. 7. (a) LED lighting test and (b) durability test analysis of the piezoelectric generator at the 100 N mechanical loading.

기의 기계적 내구성을 확인하기 위하여 가압시험기를 이용하여 100 N의 하중을 반복적으로 인가하여 출력되는 전압의 변화를 측정하였다. Fig. 7(b)에 보인 것처럼 10,000 회 동안 하중이 반복적으로 인가되었을 때, 출력 전압은 약 8 V로 큰 변화없이 유지됨을 보여 본 연구에서 제작된 BaTiO₃-PVDF 압전발전기의 내구성이 우수함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 유연성을 갖는 BaTiO₃-PVDF 압전발전

기를 제작하여 BaTiO₃의 배합비와 분극전계에 따른 압전발전기의 특성을 평가하였다. 분산특성과 출력특성 측면에서 20 wt%의 BaTiO₃분말 첨가가 최적의 조건임을 보였고 분극 전의 시편에서 출력 전압과 전류는 각각 4.98 V와 1.03 μ A로 나타내었다. 발전기 성능의 향상을 위해 200 kV/cm의 전계에에서 분극처리를 진행한 후 출력 전압과 전류는 각각 7.87 V와 2.5 μ A로 증가함을 보였다. 이러한 출력특성의 변화는 BaTiO₃ 입자들의 c축 배향성이 증가함에 기인함을 확인하였다. 이후 출력전력을 확인하기 위하여 800 M Ω 의 저항을 연결하였을 때 최대 전력밀도는 1.74 mW/m²를 나타내었다. 연결된 커패시터의 정전용량에 따

라 충전전압과 충전시간의 변화를 보였고 10 μF 의 커패시터를 연결하였을 때 최대 1.11 V까지 충전시켰다. LED발광 시험을 통해 10개의 적색 전구를 발광시키는 것을 확인하였으며 압전발전기의 안정성을 평가하기 위한 내구성 시험에서는 100 N의 하중을 10,000회 인가하였을 때 출력 전압이 저하되지 않고 일정하게 유지하였다. 이를 통해 공정조건의 조절을 통해 제작된 유연성을 갖는 $\text{BaTiO}_3\text{-PVDF}$ 압전발전기는 저전력 소형 소자, 웨어러블 소자, 센서 등에 적용 가능할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (NRF-2021R1A5A8033165).

References

1. Y. Zhang, C. K. Jeong, T. Yang, H. Sun, L. Q. Chen, S. Zhang, W. Chen and Q. Wang, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 14546 (2018).
2. P. Hu, L. Yan, C. Zhao, Y. Zhang and J. Niu, *Compos. Sci. Technol.*, **168**, 327 (2018).
3. C. Sohn, H. Kim, J. Han, K. T. Lee, A. Šutka and C. K. Jeong, *Nano Energy*, **103**, 107844 (2022).
4. J. Gao, D. Xue, W. Liu, C. Zhou and X. Ren, *Actuators*, **6**, 6030024 (2017).
5. K. Batra, N. Sinha and B. Kumar, *Ceram. Int.*, **46**, 24120 (2020).
6. G. Suo, Y. Yu, Z. Zhang, S. Wang, P. Zhao, J. Li and X. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 34335 (2016).
7. J. Yan and Y. G. Jeong, *Compos. Sci. Technol.*, **144**, 1 (2017).
8. C. Jin, N. Hao, Z. Xu, I. Trase, Y. Nie, L. Dong, A. Closson, Z. Chen and J. X. J. Zhang, *Sens. Actuators, A*, **305**, 111912 (2020).
9. X. Chen, X. Han and Q.-D. Shen, *Adv. Electron. Mater.*, **3**, 1600460 (2017).
10. X. Tian, Y. Liu, J. Deng, L. Wang and W. Chen, *Sens. Actuators, A*, **306**, 111971 (2020).
11. Y. Zhao, Q. Liao, G. Zhang, Z. Zhang, Q. Liang, X. Liao and Y. Zhang, *Nano Energy*, **11**, 719 (2015).
12. D. Y. Hyeon and K.-I. Park, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **26**, 119 (2019).
13. X. Zhang, M. Q. Le, O. Zahhaf, J. F. Capsal, P. J. Cottinet and L. Petit, *Mater. Des.*, **192**, 108783 (2020).
14. K. Xie, Q. Peng, Y. Li and C. Tan, *Ceram. Int.*, **49**, 13339 (2023).
15. S. K. Sharma, A. K. Sivarathri and V. S. Chauhan, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **31**, 20168 (2020).
16. H. Qian, G. Zhu, H. Xu, X. Zhang, Y. Zhao, D. Yan, X. Hong, Y. Han, Z. Fu, S. Ta and A. Yu, *App. Phys. A*, **126**, 294 (2020).
17. X. Tao, H. Jin, M. Ma, L. Quan, J. Chen, S. Dong, H. Zhang, C. Lv, Y. Fu and J. Luo, *Phys. Status Solidi A*, **216**, 1900068 (2019).
18. Y. Niu, K. Yu, Y. Bai and H. Wang, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr., Freq. Control*, **62**, 108 (2015).
19. J. X. Chen, J. W. Li, C. C. Cheng and C. W. Chiu, *ACS Omega*, **7**, 793 (2022).
20. F. Wang, H. Sun, H. Guo, H. Sui, Q. Wu, X. Liu and D. Huang, *Ceram. Int.*, **47**, 35096 (2021).
21. H. Guo, Q. Wu, H. Sun, X. Liu and H. Sui, *Mater. Today Energy*, **17**, 100489 (2020).
22. Prateek, V. K. Thakur and R. K. Gupta, *Chem. Rev.*, **116**, 4260 (2016).
23. M. Sahu, S. Hajra, K. Lee, P. Deepti, K. Mistewicz and H. J. Kim, *Crystals*, **11**, 85 (2021).
24. X. Chen, X. Li, J. Shao, N. An, H. Tian, C. Wang, T. Han, L. Wang and B. Lu, *Small*, **13**, 1604245 (2017).
25. H. S. Kim, D. W. Lee, D. H. Kim, D. S. Kong, J. Choi, M. Lee, G. Murillo and J. H. Jung, *Nanomaterials*, **8**, 777 (2018).
26. H. Kong, Y. Jin, G. Li, M. Zhang and J. Du, *Adv. Eng. Mater.*, **25**, 2201660 (2023).
27. B. Dudem, D. H. Kim, L. K. Bharat and J. S. Yu, *Appl. Energy*, **230**, 865 (2018).
28. J. Yan and Y. G. Jeong, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 15700 (2016).

<저자소개>

김희태

경북대학교 에너지신소재화학공학과 학생

박상식

경북대학교 에너지신소재화학공학과 교수

경북대학교 미래과학기술융합학과 교수