

Rosen형 압전 변압기 구조를 적용한 자기-전기 복합체의 특성

박성훈¹, 윤운하², Deepak Rajaram Patil¹, 류정호^{1,3} 

¹ 영남대학교 신소재공학부

² 한국재료연구원 기능세라믹연구실

³ 영남대학교 재료기술연구소

Characteristics of Magnetolectric Composite with Rosen Type Piezoelectric Transducer Structure

Sung Hoon Park¹, Woon-Ha Yoon², Deepak Rajaram Patil¹, and Jungho Ryu^{1,3}

¹ School of Materials Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

² Functional Ceramics Group, Korea Institute of Materials Science (KIMS), Changwon 51508, Korea

³ Institute of Materials Technology, Yeungnam University, Gyeongsan 38541, Korea

(Received August 23, 2021; Revised August 30, 2021; Accepted August 30, 2021)

Abstract: Magnetolectric (ME) composite is composed of a piezoelectric material and a magnetostrictive material. Among various ME structures, 2-2 type layered ME composites are anticipated to be used as high-sensitivity magnetic field sensors and energy harvesting devices especially operating at its resonance modes. Rosen type piezoelectric transducer using piezoelectric material is known to amplify a small electrical input voltage to a large electrical output voltage. The output voltage of these Rosen type piezoelectric transducers can be further enhanced by modifying them into ME composite structures. Herein, we fabricated Rosen type ME composites by sandwiching Rosen type PMN-PZT single crystal between two Ni layers and studied their ME coupling. However, the voltage step-up ratio at the resonance frequency was found to be smaller than the value calculated with α_{ME} value. The ATILA FEA (Finite Elements Analysis) simulation results showed that the position of the nodal point was changed with the presence of a magnetostrictive layer. Thus, while designing a Rosen type ME composite with high performance in a resonant driving situation, it is necessary to optimize the position of the nodal point by optimizing the thickness or length of the magnetostrictive layer.

Keywords: Magnetolectric, Piezoelectric, Resonance, Rosen type piezoelectric transducer, Composite

자왜 재료와 압전 재료의 계면 결합 현상을 이용하는 자기-전기(MagnetoElectric, ME) 복합체는 자기장을 인가

했을 때, 자왜 금속이 가지는 자왜(magnetostrictive) 특성에 의해 자왜 금속에서 변형이 발생하게 되고, 이 변형으로 인해 계면 결합되어 있는 압전 재료가 응력을 받으면서 정압전 효과에 의해 전기적인 신호를 발생한다 [1-4]. ME 복합체는 자왜 재료와 압전 재료의 형상과 상호 결합 구조에 따라 층상구조(2-2 구조), 입자분산형(0-3 구조), 섬유형(1-3 구조) 등 다양한 구조로 제작될 수 있다 [5]. 이 중

✉ Jungho Ryu; jhryu@ynu.ac.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.

2-2 구조의 층상형 ME 복합체는 일반적으로 강한 탄성과 결합력을 가지는 에폭시 접착제를 이용하여 자왜 금속과 압전 재료를 계면 결합시킨 구조를 가지기 때문에, 다른 복합체 구조에 비해 제작하기 쉽고, 자기-전기 결합 특성이 우수한 장점이 있다 [6]. 지금까지의 대부분의 2-2 구조 층상형 ME 복합체는 특별한 전압 증폭 기구의 적용 없이 단순 판형 적층체의 횡방향 공진 모드나 굴곡 변형 모드를 이용하여 자기장 입력에 따른 전기적인 출력 신호를 발생시키고, 이 신호를 이용한 고감도 자기장 센서, 에너지 하베스팅 소자로 활용되고 있다 [7,8]. 센서나 에너지 하베스팅 소자의 경우 출력신호의 크기가 클수록 활용 가능성은 더욱 커진다. 따라서 공진모드에서 전기적인 출력 신호를 더욱 향상시킬 수 있는 새로운 개념의 ME 복합체 구조의 성공적인 연구 개발 시 ME 복합체의 활용범위는 더욱 확대될 수 있을 것이다.

압전 소재를 이용한 Rosen형 압전 변압기는 작은 입력 전압을 고전압으로 승압하는 소자로서, 디스플레이의 형광램프 구동에 널리 사용되고 있다 [9].

일반적인 Rosen형 압전 변압기는 그림 1(a)와 같이 판형의 압전 세라믹 내에 31 모드와 33 모드 두 방향으로 분극이 형성되어 있다. 입력 전기신호를 소자에 인가하면, 31 모드로 분극이 형성된 압전 세라믹이 변형을 발생하고, 이 변형으로 인해 33 모드로 분극이 형성된 부분에서 변형이 증폭되면서 승압된 출력전압이 발생한다 [10,11]. 이러한 Rosen형 압전 변압기는 구동 원리에 의해 공진 모드일 경우에 그 효과가 유의미해진다. Rosen형 압전 변압기의 원리를 이용한 ME 복합체는 같은 원리로 전기적인 출력 신호를 증폭시킬 수 있지만, 기존의 전기적인 입력에 의한 공진 변형이 아닌 자기장 변화에 따른 자왜 변형을 이용하여 공진 구동을 시키게 된다. 즉 그림 1(b)에 도시한 바와 같이 자기장을 이용한 Rosen형 ME 복합체는 횡방향 31 모드로 분극이 형성된 압전 세라믹 부분에 자왜 금속을 접착하고, 이 상태에서 복합체의 공진 주파수와 동일한 주파수

를 가지는 자기장을 인가하게 되면 자왜 금속의 변형으로 인해 압전 세라믹에서 변형이 발생하게 된다. 이 변형으로 인해 33 모드로 분극이 형성된 부분으로의 변형이 증폭되면서 압전효과에 의한 전기적 출력이 증폭되는 원리를 이용하게 된다 [12]. 이러한 원리를 사용하면 기존의 단순 2-2 판상형 ME 구조에 비하여 월등히 우수한 출력 전기신호를 낼 수 있는 ME 복합체의 제조가 가능할 것이다.

압전 단결정은 세라믹에 비해 우수한 압전상수(d_{ij} , g_{ij}), 전기기계결합계수(electro-mechanical coupling factor, k_{ij}), 유전상수를 가지고 있다 [13,14]. 따라서 세라믹이 아닌 압전 단결정을 이용해서 ME 복합체를 제작하게 되면, 압전 세라믹 소재를 이용한 ME 복합체에 비하여 월등히 우수한 자기-전기 결합 특성을 얻을 수 있다 [15,16]. 본 연구에서는 압전 단결정의 우수한 전기 기계적 특성을 활용하여 Rosen형 압전 변압기의 원리를 적용한 층상 구조의 ME 복합체를 제작하고 특성을 평가하였다.

Rosen형 ME 복합체 제작을 위해서 자왜 금속으로는 $5\text{ mm} \times 11\text{ mm} \times 0.25\text{ mm}$ 크기의 Ni (99.5%, Alfa Aesar, USA), 압전재료로는 $5\text{ mm} \times 22\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$ 크기의 PMN-PZT (CSM1, Ceracomp, Korea) 단결정을 이용하였다. Ni과 PMN-PZT 단결정의 계면 결합을 위하여 점도가 낮고, 탄성계수(Young's modulus)가 높은 특성을 가지는 에폭시 접착제(Duralco 4461, Cotronics, USA)를 사용하였다 [6].

압전 단결정을 분극한 후 그림 2와 같은 구조로 Ni 자왜 금속에 접착하였다. 단결정의 총 길이 22 mm 중 11 mm는 [001] 방향(두께 방향)으로 전극을 형성하고, 1 kV/mm로 10분 동안 상온에서 전기장을 인가하여 횡방향 31 모드가 되도록 분극하였다. 분극이 형성되지 않은 11 mm를 [010] 방향(길이 방향)으로 전극을 형성한 후 종방향 33 모드가 되도록 분극을 진행했다. 이때, 31 모드로 분극된 단결정 부분이 후속 33 모드 분극 시 받을 수 있는 전기장의 영향을 최소화하기 위하여 31 모드로 분극된 부분의 전극

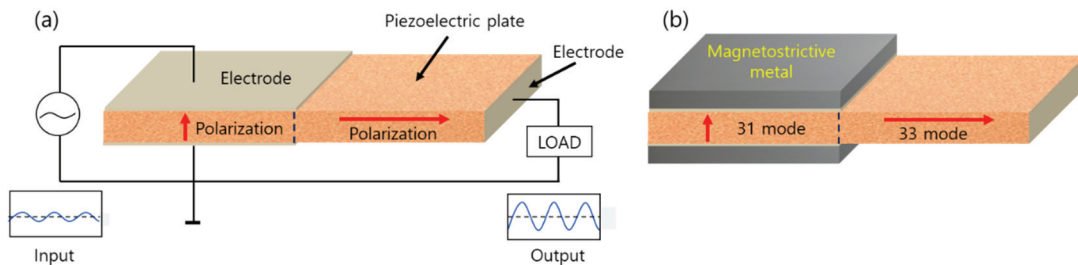


Fig. 1. Schematics of (a) typical Rosen type piezoelectric transducer structure and (b) ME composite with Rosen type piezoelectric transducer structure.

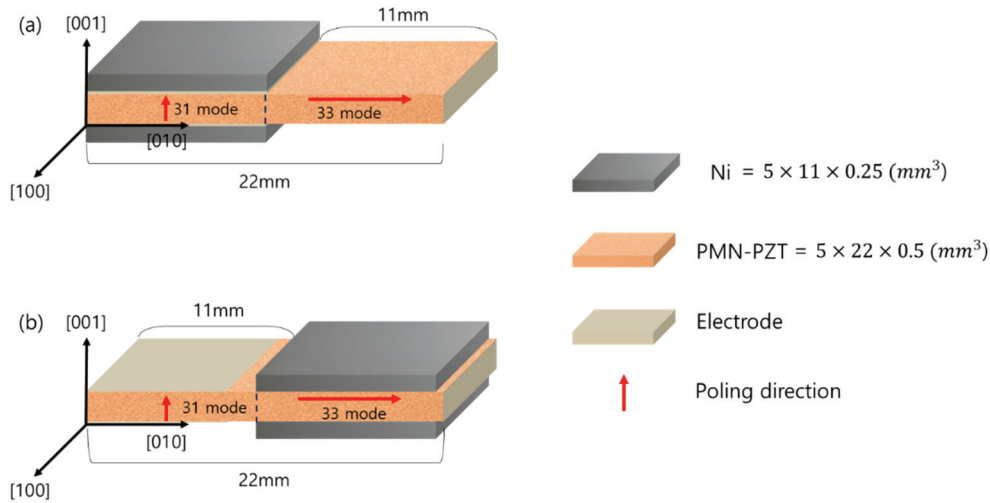


Fig. 2. Schematics of Rosen type piezoelectric transducers with Ni plates attached (a) on the surface having 31 mode polarization (31-Ni) and (b) on the surface having 33 mode polarization (33-Ni).

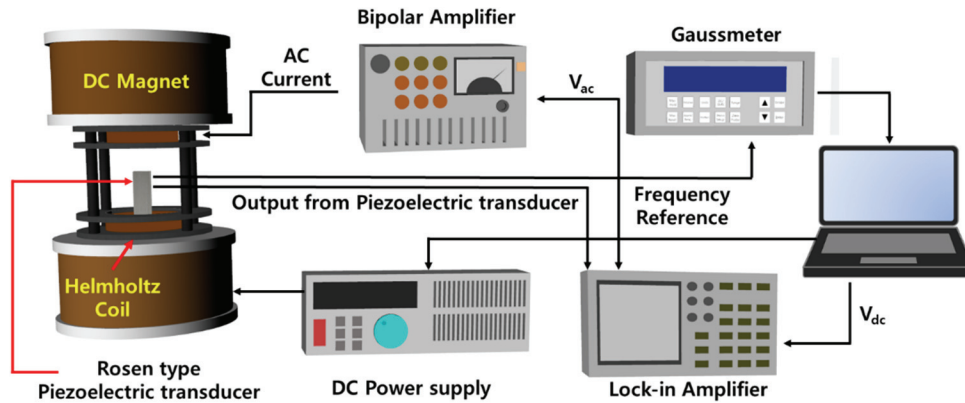


Fig. 3. Measurement set-up for ME properties.

들은 Cu tape을 이용해 단락시킨 뒤, 단락된 두 전극과 압전 단결정판의 분극이 되지 않은 11 mm 길이 방향에 전기장을 1 kV/mm로 인가하여 33 모드로 부분적 분극을 진행했다. 분극이 된 압전 단결정은 그림 2와 같이 두 가지 조건으로 자왜 금속을 접착하고 복합체의 전기적인 특성과 ME 결합 특성을 평가하였다. 첫 번째[그림 2(a), 이하 31-Ni 샘플]는 자기장을 시편의 길이 방향으로 인가했을 때, 자왜 특성으로 인해 자왜 금속이 변형하게 되면 압전 단결정이 31 모드로 변형하게 되고, 이 변형이 33 모드로 분극이 형성된 단결정 부분의 변형을 일으키면서 전기적 신호를 발생시킨다. 두 번째[그림 2(b), 이하 33-Ni 샘플]는 자기장을 시편의 길이 방향으로 인가했을 때, 자왜 금속의 변형에 의해 압전 단결정이 33 모드로 변형하면서 전기

적 신호를 발생시킨다. 두 방법으로 자왜 금속과 압전 단결정을 접착한 뒤, impedance analyzer (E4990A, Keysight, USA)를 이용해서 복합체의 공진주파수를 측정하였다.

ME 결합 특성은 그림 3에 도시된 바와 같이 Helmholtz coil (M125-1AH, MMS Tech CO, Korea)과 전자석 (KR Tech, Korea)을 이용해서 DC 자기장과 AC 자기장이 동시에 인가된 상황에서 발생하는 전기적인 신호를 측정하여 ME 결합 특성을 평가하였다. Lock-in 증폭기 (SR865A, Stanford Research Systems, USA)를 이용해서 AC 전기신호를 발생시키면, 고속 Bipolar 증폭기 (HSA4011, NF, Japan)에서 AC 전류를 증폭시키고, 이 증폭된 전류는 Helmholtz coil에 전달되면서 샘플에 AC 자

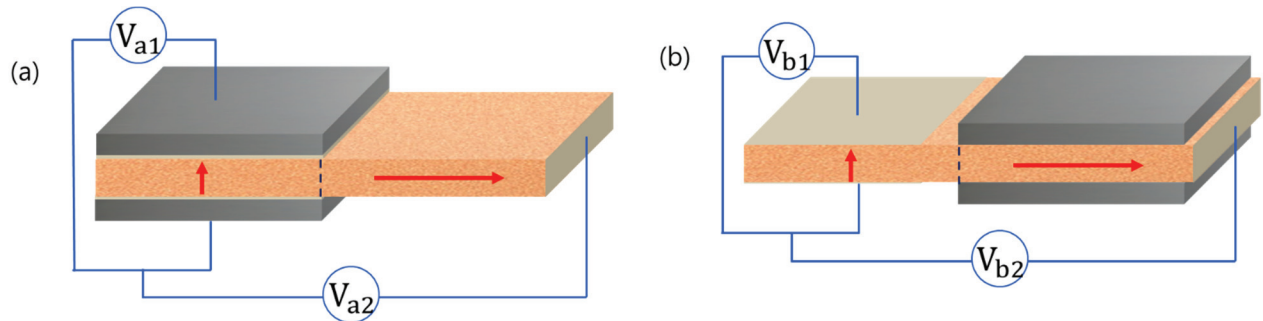


Fig. 4. Schematics of Rosen type piezoelectric transducers (V_1 = Output properties from the polarized area with 31 mode, V_2 = Output properties from the polarized area with 33 mode). (a) 31-Ni, Ni plate attached on the surface having 31 mode polarized and (b) 33-Ni, Ni plate attached on the surface having 33 mode polarized.

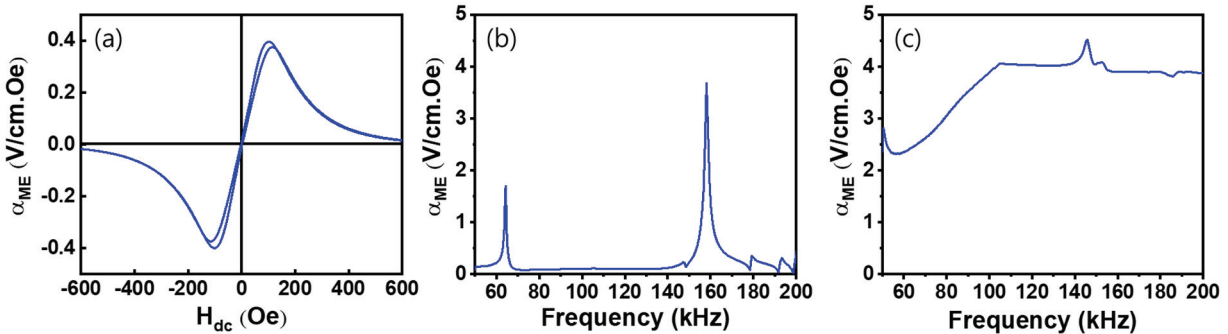


Fig. 5. ME voltage coefficient, α_{ME} for 31-Ni ME composite, (a) off-resonance magnetolectric voltage coefficient, α_{ME} , of Rosen type piezoelectric transducer under an H_{dc} of 1 Oe at 1 kHz, (b) frequency dependency of α_{ME} , from V_{a1} at 0 Oe, and (c) frequency dependency of α_{ME} , from V_{a2} at 101 Oe bias field.

기장을 인가한다. 직류 전원 공급기에서 발생된 전류는 전자석으로 전달되면서 샘플에 DC 자기장을 인가한다 [17]. 비공진 상태의 ME 결합 특성 평가를 위해서 DC 자기장(-600~600 Oe)과 AC 자기장(1 kHz, 1 Oe)을 ME 복합체에 동시에 인가해서 ME 결합 특성 값을 측정했다. 비공진 상태의 ME 특성을 평가한 후 공진 상태의 ME 특성에 대한 증폭 현상을 검증하기 위해 50~300 kHz 범위의 주파수에서 전기적 출력 값을 측정했다.

제작된 Rosen형 압전 변압기의 특성을 그림 4와 같이 31 모드로 분극이 형성된 V_1 과 33 모드로 분극이 형성된 V_2 로 나눠서 측정을 진행하였다. V_{a1} 은 자기장을 인가했을 때 자왜 금속이 변형하면 압전 단결정이 응력을 받으면서 31 모드 특성의 전기적인 신호를 발생시킨다. 이는 Rosen형 압전 변압기의 증폭원리가 아닌 일반적인 판상형 ME 복합체의 ME 결합 특성이다. 그림 4(a)와 같이 31 모드로 분극된 압전 단결정에 결합되어 있는 자왜 금속을 단락시킨 뒤 33 모드로 분극된 압전 단결정에서의 자기장에 따른 발생전압을 측정하면, Rosen형 압전 변압기의 증폭원리

에 의해 증폭된 V_{a2} 를 측정할 수 있다. 그림 4(b)는 자기장을 인가했을 때 33 모드로 분극된 부분에서 변형이 발생하게 되면서 전기적 특성(V_{b2})을 얻을 수 있으며, 이 또한 Rosen형 압전 변압기의 증폭원리를 이용하는 것은 아니다.

그림 5는 제작된 Rosen형 압전 변압기 구조를 적용한 ME 복합체의 특성을 측정한 결과이다. 31-Ni 샘플의 비공진 상태에서의 ME 결합 특성을 측정하기 위해 1 kHz의 자기장을 인가하여 ME 결합 특성(자기-전기 결합 전압 계수, ME voltage coefficient, α_{ME})을 측정하였고, 인가한 자기장의 주파수 변화에 따른 ME 결합 특성을 측정하였다.

비공진 상태에서의 V_{a1} 에 대한 ME 결합 특성을 평가하기 위해 샘플의 길이 방향으로 DC 자기장(H_{dc})을 -600~600 Oe 크기로 변화시켰으며, AC 자기장은 1 kHz, 1 Oe로 인가하였다. 공진 상태의 V_{a1} 과 V_{a2} 에 대한 ME 특성 값, α_{ME} 를 평가하기 위해 50~200 kHz의 주파수 범위 내에서 비공진 상태에서 ME 특성 값이 최대가 되는 바이어스 자기장 (bias magnetic field)인 101 Oe가 인가된 상태에서 측정하였다. 비공진 상태에서의 V_{a1} 에 대한 α_{ME} 특성[그림 5(a)]은

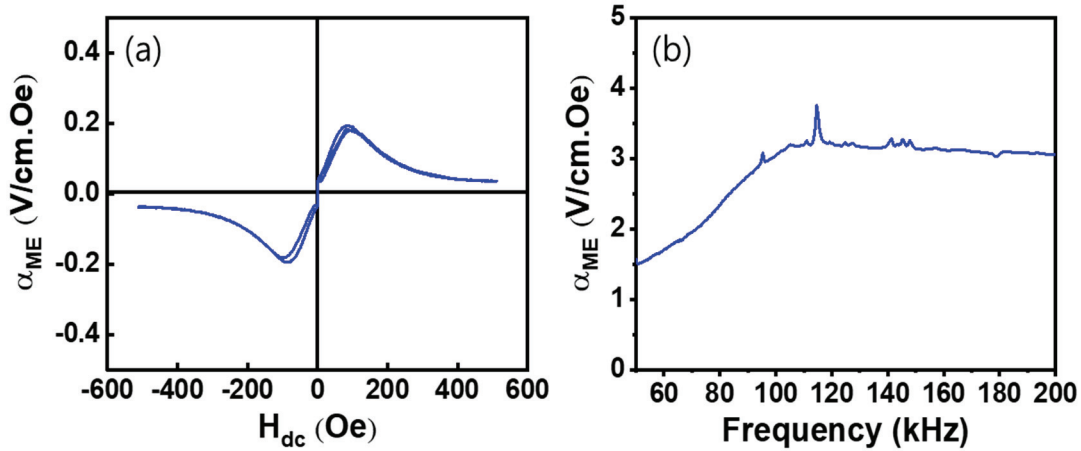


Fig. 6. ME voltage coefficient, α_{ME} for 33-Ni ME composite, (a) off-resonance α_{ME} , of Rosen type piezoelectric transducer under H_{ac} of 1 Oe at 1 kHz and (b) frequency dependency of α_{ME} , from V_{b2} at 87.6 Oe bias field.

전형적인 판상형 구조를 가지는 ME 복합체의 ME 결합 특성이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 101 Oe의 바이어스 자기장을 인가했을 때 α_{ME} 값이 396 mV/cm·Oe로 가장 높게 측정되었다. 공진 상태에서의 V_{a1} 에 대한 ME 특성[그림 5(b)]은 주파수가 64 kHz일 때 1.7 V/cm·Oe, 158 kHz일 때 3.7 V/cm·Oe로 두 번째 공진 상태에서 2배 이상 더 높은 출력 특성을 확인할 수 있었다. 공진 시 높은 α_{ME} 값이 얻어지는 것은 판상형 구조의 ME 복합체에서 보이는 일반적인 현상으로, 본 연구에서는 약 5배 이상의 높은 α_{ME} 특성이 공진 상태에서 얻어졌다. 공진 상태에서 압전 변압기의 원리에 의해 증폭이 될 것으로 예상되었던 V_{a2} 에 대한 α_{ME} 특성[그림 5(c)]은 동일한 조건에서 145.85 kHz에서 4.52 V/cm·Oe로 가장 높은 특성 값을 얻을 수 있었다. 하지만 측정된 결과에서 기본적인 노이즈성의 α_{ME} 값이 모든 측정 주파수 대역에서 관찰되었으며, 공진 주파수에서의 특성 값의 변화는 V_{a2} 에 대한 α_{ME} 값보다 증폭비가 크지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 예상과 달리 압전 변압기의 증폭원리가 V_{a2} 에 효과적으로 작용하지 않았음을 의미한다.

그림 6은 33-Ni 샘플의 ME 결합 특성을 비공진 상태와 주파수 변화에 따른 측정 결과를 보여준다. ME 결합 특성은 자기장을 인가했을 때, 자왜 금속과 압전 단결정이 직접적으로 결합이 되어 있는 상태일 때 측정이 가능하다. V_{b1} 의 경우, 31 모드로 분극이 형성된 부분에 자왜 금속이 접착되어 있지 않기 때문에 자기장을 인가했을 때 자기장에 대한 자왜 변형이 압전 소재로 전달될 수 없으므로, V_{b1} 에 대한 ME 특성은 측정되지 않았다. 비공진 상태에서의 V_{b2} 에 대한 ME 특성[그림 6(a)]은 바이어스 자기장이 87 Oe

일 때, 특성 값이 193 mV/cm·Oe로 가장 높게 측정되었다. 공진 상태에서의 ME 특성[그림 6(b)]은 50~200 kHz 주파수 범위 내에서 바이어스 자기장을 87.6 Oe로 가했을 때, 114.5 kHz에서 3.8 V/cm·Oe로 가장 높게 측정되었다.

비공진 상태에서의 33-Ni 샘플의 α_{ME} 값이 31-Ni 샘플에 비해 상대적으로 낮게 측정되었다. 원리적으로 33 모드의 압전 상수는 31 모드에 비하여 높은 값을 가지기 때문에 높은 α_{ME} 값을 가질 것으로 예상되었으나, 이는 긴 길이 방향의 분극이 상대적으로 짧은 방향의 분극보다 불안정하였을 수 있음을 의미한다. 또한 주파수 변화에 따른 α_{ME} 값의 변화 역시 31-Ni 샘플의 측정 결과와 유사하게 모든 측정 주파수 대역에서 노이즈성의 α_{ME} 값이 관찰되었으며, 공진 주파수에서의 특성 값의 변화는 31-Ni 샘플에 대한 α_{ME} 값보다도 낮은 증폭비를 가지는 것이 확인되었다. 이는 33-Ni 구조의 샘플은 압전 변압기의 원리가 적용되지 않고, 자체의 공진현상에 의해서만 ME 결합 특성이 나타난 것으로 해석할 수 있다. 이때 Ni이 부착되어 있지 않은 두께 방향으로 분극된 압전판 영역은 공진현상 시 오히려 ME 결합 특성에 악영향을 주는 것으로 볼 수 있다.

자왜 금속이 31 모드로 분극이 형성된 부분에 접착된 상태(31-Ni 샘플)에서 공진 상태에서의 ME 특성을 비교했을 때, V_{a2} 에 대한 ME 특성이 V_{a1} 에 대한 ME 특성보다 월등히 높을 것으로 예상하였지만, 증폭된 ME 결합 특성을 얻을 수 없었다. 이에 대한 원인을 파악하기 위하여 ATILA 상용 유한요소해석(finite elements analysis, FEA) 프로그램을 이용하여 공진 상태에서의 진동 모드를 해석하여 그림 7에 도시하였다. 일반적인 Rosen형 압전 변압기와 같이 자왜 금속을 접착하지 않은 경우[그림 7(a)], 변형은

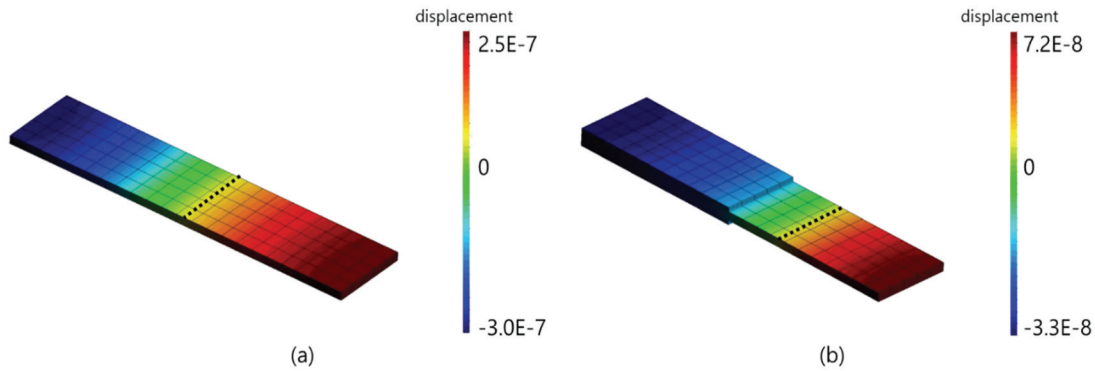


Fig. 7. Finite element analysis (ATILA) simulation results of (a) piezoelectric plate without magnetostrictive Ni plates and (b) ME composite with Rosen type ME composite (31-Ni) at resonance frequency.

최소이지만 응력이 최대가 되는 nodal point가 압전판의 중앙 부분에 위치하게 되어 33 모드로 분극된 부분에서 전압 증폭효과가 크게 나타난다. 반면, 본 연구의 31-Ni ME 복합체와 같이 자왜 금속을 접착한 경우[그림 7(b)]에는 자왜 금속의 질량과 부피에 의해 복합체의 nodal point의 위치가 중앙에서 벗어나게 되고, 따라서 전기적인 출력 특성이 일부 상쇄된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 nodal point의 이동은 자왜 금속의 두께, 길이, 압전판의 전극 패턴 조정을 통해 가능하다. 즉 nodal point의 위치를 복합체의 분극이 교차하는 위치로 조정하면, 압전 변압기 효과에 의해 더욱 우수한 ME 결합 특성을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 공진구동 상황에서 우수한 특성을 가지는 Rosen형 ME 복합체 설계시 자왜 금속의 두께 혹은 길이를 조정해서 nodal point의 위치를 최적화한 연구가 진행되어야 한다.

ORCID

Jungho Ryu

<https://orcid.org/0000-0002-4746-5791>

감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회 창의성 융합사업(CAP-17-04-KRISS)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] K. Ko, B. I. Noh, and S. C. Yang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 229 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.4.229>]

[2] J. H. Cho and W. Jo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 149 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.3.149>]

[3] S. Park, M. Peddigari, G. T. Hwang, W. H. Yoon, A. Kumar, and J. Ryu, *Appl. Phys. Lett.*, **115**, 102901 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5120092>]

[4] J. Yang, Y. Wen, P. Li, X. Dai, and M. Li, *J. Magn.*, **16**, 150 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.4283/JMAG.2011.16.2.150>]

[5] H. Palneedi, V. Annapureddy, S. Priya, and J. Ryu, *Actuators*, **5**, 9 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.3390/act5010009>]

[6] S. H. Kim, A. Thakre, D. R. Patil, S. H. Park, T. A. Listyawan, N. Park, G. T. Hwang, J. Jang, K. H. Kim, and J. Ryu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 19983 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.1c00922>]

[7] Y. Wang, F. Wang, S. W. Or, H.L.W. Chan, X. Zhao, and H. Luo, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 113503 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2976329>]

[8] L. Chen and Y. Luo, *J. Magn.*, **20**, 347 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4283/JMAG.2015.20.4.347>]

[9] F. Wang, J. Wu, Y. Jia, H. Zhu, X. Zhao, and H. Luo, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 073903 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2752747>]

[10] M. Guo, K. H. Lam, D. M. Lin, S. Wang, K. W. Kwok, H.L.W. Chan, and X. Z. Zhao, *J. Mater. Sci.*, **43**, 709 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-007-2199-0>]

[11] Y. H. Hsu, C. K. Lee, and W. H. Hsiao, *IEEE Trans. Ultrason. Eng.*, **52**, 1829 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2005.1561639>]

[12] Y. Jia, H. Luo, X. Zhao, and F. Wang, *Adv. Mater.*, **20**, 4776 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200800565>]

[13] R. C. Kambale, W. H. Yoon, D. S. Park, J. J. Choi, C. W. Ahn, J. W. Kim, B. D. Hahn, D. Y. Jeong, B. C. Lee, G. S. Chung, and J. Ryu, *J. Appl. Phys.*, **113**, 204108 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4804959>]

[14] J. Hur, I. T. Seo, D. H. Kim, S. Nahm, J. Ryu, S. H. Han, C. Y. Kang, and S. J. Yoon, *J. Am. Ceram. Soc.*, **97**, 3157 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.13079>]

[15] N. Cai, J. Zhai, C. W. Nan, Y. Lin, and Z. Shi, *Phys. Rev. B*, **68**,

- 224103 (2003). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.68.224103>]
- [16] J. Ryu, S. Priya, K. Uchino, H. E Kim, and D. Viehland, *J. Korean Ceram. Soc.*, **39**, 813 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.4191/kcers.2002.39.9.813>]
- [17] G. T. Hwang, H. Palneedi, B. M. Jung, S. J. Kwon, M. Peddigari, Y. Min, J. W. Kim, C. W. Ahn, J. J. Choi, B. D. Hahn, J. H. Choi, W. H. Yoon, D. S. Park, S. B. Lee, Y. Choe, K. H. Kim, and J. Ryu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 32323 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b09848>]