

자기센서용 Ni-PZT-Ni, Co, Fe 적층구조 소자의 ME 특성

류지구^{1,a}, 전성준¹

¹ 부경대학교 전자공학과

Magnetoelectric Characteristics on Layered Ni-PZT-Ni, Co, Fe Composites for Magnetic Field Sensor

Ji-Goo Ryu^{1,a} and Seong-Jeub Jeon¹

¹ Department of Electronic Engineering, Pukyong National University, Busan 608-747, Korea

(Received December 29, 2014; Revised December 31, 2014; Accepted January 5, 2015)

Abstract: The magnetoelectric characteristics on layered *Ni-PZT-Ni, Co, Fe* composites by epoxy bonding for magnetic field sensor were investigated in the low-frequency range. The ME coefficient of *Ni-PZT-Ni, Ni-PZT-Co* and *Ni-PZT-Fe* composites reaches a maximum of 200 mV/cm·Oe at $H_{dc}=110$ Oe, 106 mV/cm·Oe at $H_{dc}=90$ Oe and 87 mV/cm·Oe at $H_{dc}=160$ Oe, respectively. A trend of ME characteristics on *Ni-PZT-Co, Ni-PZT-Fe* composites was similar to that of *Ni-PZT-Ni* composites. The ME output voltage shows linearly proportional to ac field H_{ac} and is about 0~150 mV at $H_{ac}=0\sim 7$ Oe and $f=110$ Hz in the typical *Ni-PZT-Ni* sample. The frequency shift effect due to the load resistance R_L shows that the frequency range for magnetic field sensor application can be modulated with appropriate load resistance R_L . This sample will allow for a low-magnetic ac field sensor in the low-frequency (near $f=110$ Hz).

Keywords: Magnetic field sensor, Magnetoelectric effect, Laminate structure, Magnetostriction coefficient

1. 서 론

ME (magnetoelectric) 소자는 자기-전기 상호작용에 근본을 두고 있다. ME 효과는 외부자기장이 ME 소자에 인가되면 자성물질의 자왜현상이 전기 분극된 압전물질에 전달되어 기전력이 유도되는 현상이다 [1,2]. 이러한 ME 소자는 제조공정이 간단하고 구조가 단순하면서 별도의 전원 없이 기전력이 발생하므로 자기센서, ME 메모리, 액츄에이터 및 트랜스듀스 등 그 응용이 다양하다 [3,4].

ME 효과는 단일상 물질(single-phase material)에서 먼저 관측되었으며 이후 2상 벌크구조 및 압전체/자성체의 적층구조(laminate structure)에서도 나타났다 [4-6]. 그 중에서도 적층구조가 벌크형 소자보다 ME 계수가 크므로 최근 연구의 중심이 되고 있다 [4,7,8]. 이러한 적층구조의 ME 효과는 압전층의 압전 효과와 자성체층의 자왜효과가 상호 결합에 의하여 나타나는데, Terfenol-D 및 Metaglas와 같은 거대 자왜 물질과 PZT 조합에서 큰 ME 전압이 나타남을 보였다 [4]. 한편, 천이금속 강자성체는 금속이므로 압전체와 조합하면 전극 및 자성체 역할을 동시에 할 수 있어 적층구조 소자 제조에 유리하다.

수년 전 Laletin, et al.은 이러한 천이금속 강자성체인 Fe, Co 및 Ni를 PZT와 조합하여 적층구조의 ME 소자를 연구하였으며 [9], 최근에는 Ni를 기본으로

a. Corresponding author; ryujg@pknu.ac.kr

한 다양한 구조의 ME 소자의 연구가 보고되고 있다 [8,10-13]. 특히 K. Bi et al은 Ni을 기반으로 자왜크기가 다른 비대칭 자성체를 PZT와 조합할 때 유용한 특성 변화를 보고하였다 [12].

본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 종래의 Co-PZT-Co와 Fe-PZT-Fe구조가 가지는 히스테리시스 현상 및 선형성 등을 개선하고자 Ni을 기반으로 한 Ni-PZT-Co, Ni-PZT-Fe 및 Ni-PZT-Ni 구조를 선택하였다. 소자 제조는 단순한 제조법의 하나인 강력 에폭시 접착법으로 ME 소자를 제조하였다. 특히 이러한 구조소자의 실용화를 알아보기 위하여 낮은 교류자기장 주파수 영역(10 Hz~6 kHz)에서 ME 특성의 주파수 의존성, 직류와 교류 자기장 의존성 및 부하저항 R_L 의존성을 조사하였으며 대표적인 Ni-PZT-Ni의 공진영역 특성도 알아보았다.

2. 실험 방법

2.1 샘플제조

압전체 PZT는 전통적인 고체반응 방법으로 공기 중에서 제조하였다. 그 구성은 시약급인 PbO, ZrO₂, TiO₂와 Nb₂O₅를 사용하고 0.9 wt%의 Nb₂O₅가 첨가된 Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O₃로 조성하였다. 이 분말을 습식 혼합하고 YSZ 그라인드 매질(직경 5 mm)에서 불밀을 16시간 수행하였다. 이 분말을 900°C에서 2시간 동안 아르미나(Al₂O₃) 용기 속에서 하소하였으며, 하소된 분말을 다시 10시간 동안 불밀을 하였다. 샘플 형성은 1,000 kg/cm²의 압력에서 이루어졌으며 형성된 이 샘플을 MgO 용기 내 1,200°C에서 약 2시간 소결하였다. 이 샘플은 장방형상(4×10 mm, 두께 1 mm)으로 연마하여 양면에 은(silver) 전극을 입혔다. 그리고 약 100°C Si 오일 속에 샘플을 담그고 30 kV/cm의 전장으로 약 20분 간 분극 처리하였다.

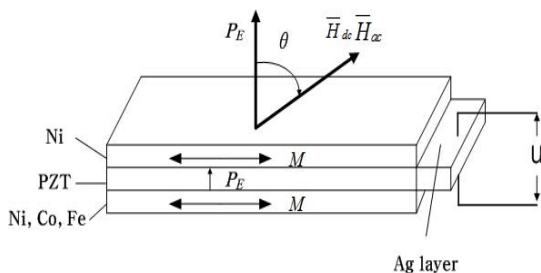


Fig. 1. Schematic geometry arrangement of the sample.

ME 샘플에 사용된 자성체 포일은 Aldrich회사 제품인 Ni, Co, Fe 각각 두께가 0.125 mm, 0.1 mm, 0.1 mm를 사용하였다. 먼저 PZT 표면을 아세톤으로 세정하고 PZT와 자성체 포일과의 강한 접착을 위하여 에폭시(UHU, D인드렘텍 회사) 접착제로 처리한 후 약 5 kg 하중으로 공기 중 약 2시간 부하 처리를 하였다.

그림 1은 제조된 샘플의 구조를 나타낸 것이다.

2.2 측정

ME 효과를 측정하기 위하여 직류자기장과 교류자기장을 각각 발생시킬 수 있도록 동심형 구조의 Helmholtz를 그림 2와 같이 만들고 ME 소자와 자속 프로브를 코일 중앙에 놓았다.

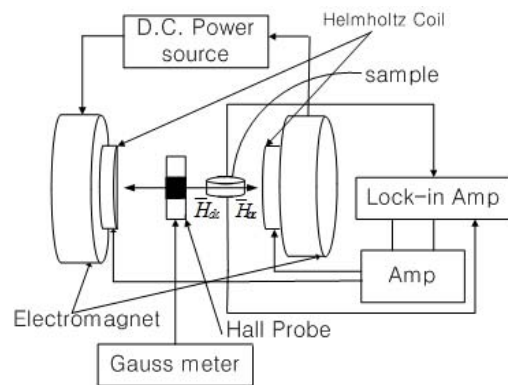


Fig. 2. Schematic of experiment set-up.

ME 소자에 출력전압을 유지시키기 위하여 교류자기장의 크기는 1 Oe이고, 주파수 10 Hz~6 kHz를 인가하고, 직류자기장의 크기는 0~1 kOe로 하였다. 교류자기장을 일정하게 유지하고 교류자기장 방향과 동일한 방향으로 직류 자기장을 변화시키면서 Lock-in-amplifier(model SR830)로 ME 전압을 측정하였다. 한편 샘플의 공진영역에서 공진 특성은 함수발생기의 출력을 교류증폭기로 증폭한 후 Helmholtz 코일에 인가하여 교류자기장을 발생시키고 ME 샘플의 출력전압은 오실로스코프로 측정하였다. 일반적으로 ME 계수 α_E 는 다음 식에서 얻어진다.

$$\alpha_E = \frac{U}{d \times H_{ac}} \quad (1)$$

여기서 U, d, 그리고 H_{ac}는 각각 ME 전압, PZT의

두께 및 교류자기장의 세기를 나타낸다. 또한 전기분극 P_E 에 대해서 교류자기장(H_{ac}) 및 직류자기장(H_{dc})와 수직인 경우($\theta = \pi/2$, transverse mode), 나란한 경우($\theta = 0$, longitudinal mode), 그리고 이루는 각 θ 의 크기에 따른 각도 의존성 측정도 하였다. 모든 측정은 실온과 공기 분위기에서 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 낮은 교류자기장 주파수(10 Hz~ 6 kHz)에 대한 ME 계수의 의존성을 나타낸 것이다.

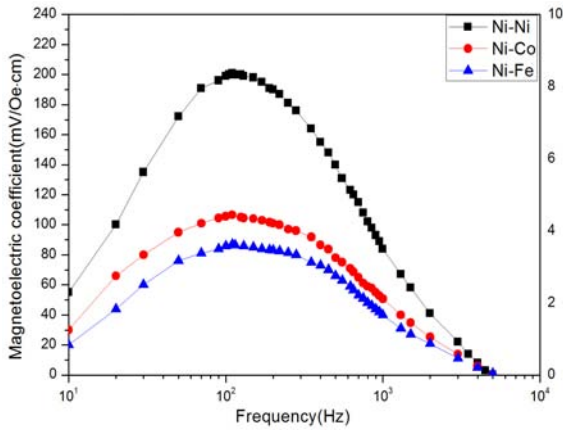


Fig. 3. Dependence of the magnetoelectric coefficient vs. frequency of ac magnetic field on transverse mode.

사용된 샘플은 Ni-PZT-Ni, Ni-PZT-Co, 그리고 Ni-PZT-Fe 샘플이다. 측정은 교류자기장 $H_{ac}=1$ Oe와 최대 ME 계수를 나타내는 직류자기장 $H_{dc}=110$ Oe(Ni-PZT-Ni), 90 Oe(Ni-PZT-Co), 그리고 160 Oe(Ni-PZT-Fe)에서 수행되었다. H_{ac} 와 H_{dc} 는 같은 평면에서 동일한 방향으로 인가하였다. f 가 증가함에 따라 ME 계수는 증가하다가 $f=110$ Hz 부근에서 각각 최대치 200 mV/cm·Oe, 106 mV/cm·Oe, 그리고 87 mV/cm·Oe를 보였으며 더욱 f 가 증가되면 급격하게 감소하는 특성을 나타내었다. 이러한 특성곡선의 형태는 다른 연구자의 결과와 비슷하였으며 [14,15], NiZnFe₂O₄+PZT 구조에서도 매우 유사하였다 [16].

이 샘플에서 최적 교류자기장 주파수는 $f=110$ Hz 부근이라 할 수 있다. 주파수 영역 10 Hz~6 kHz에서 ME 계수의 감소는 압전체와 자성체의 도전을 변화에

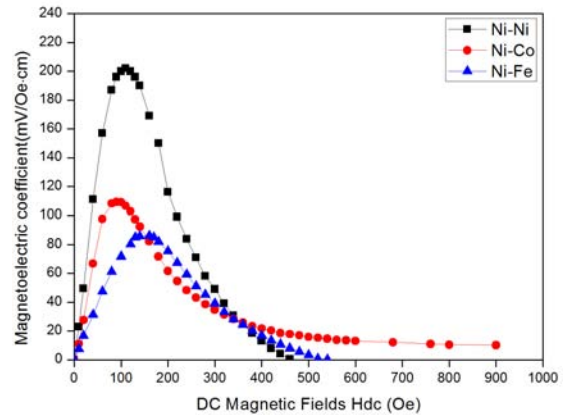


Fig. 4. Dependence of the magnetoelectric coefficient vs. bias static magnetic field at $f=110$ Hz.

의거하여 출력계측기와 임피던스 정합이 벗어난 탓으로 판단된다 [14,15]. 도전율의 변화는 압전체에 바람직하지 않은 전하의 누설에 기여하는 것으로 설명된다 [17]. 자성체 Ni, Co, Fe 조합에 의한 ME 계수의 차이는 그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 자왜 (magnetostriction) λ 의 H_{dc} 에 대한 변화율에 관계한다고 볼 수 있다. ME 효과는 동역학적 현상이므로 직류자기장 센서는 교류자기장이 존재할 때 실현될 수 있다.

그림 4는 바이어스 직류자기장 H_{dc} 에 대한 ME 계수의 의존성을 나타낸 것이다. 측정은 transverse mode에서, 교류자기장 $H_{ac}=1$ Oe, 주파수 $f=110$ Hz일 때 수행되었다. H_{dc} 가 0으로부터 증가할 때 ME 계수는 급격하게 증가하여 H_{dc} 에 강한 의존성을 나타내었다.

Ni-PZT-Ni 샘플은 $H_m=110$ Oe, Ni-PZT-Co 샘플은 $H_m=90$ Oe 그리고 Ni-PZT-Fe는 $H_m=160$ Oe될 때까지 모두 급격히 증가하였다. 그 이후 ME 계수는 H_{dc} 증가에 따라 급격히 감소하였다. 특히 비대칭구조가 종래의 Co-PZT-Co, Fe-PZT-Fe가 가지는 히스테리시스현상 및 선형성도 개선되는 바람직한 특성을 보였다. 최대 ME 계수값은 대표적인 Ni-PZT-Ni에서 약 200 mV/cm·Oe였다. 이 샘플의 ME 계수 값은 다른 제조법의 Ni-PZT-Ni구조 [10,11]와 비슷하거나 오히려 감소하였다. 이것은 Ni층과 압전체와의 에폭시 접착으로 인한 자왜의 전달감소 및 압전체에 대한 자성체 두께의 비가 작아서 자성체가 PZT에 충분한 압축 응력 작용을 하지 못한 탓으로 생각된다 [3,18,19]. 이러한 ME 계수의 H_{dc} 의존성은 자왜계수 $q = \partial\lambda/\partial H$ 의 변화량에 관계된다 [5,20].

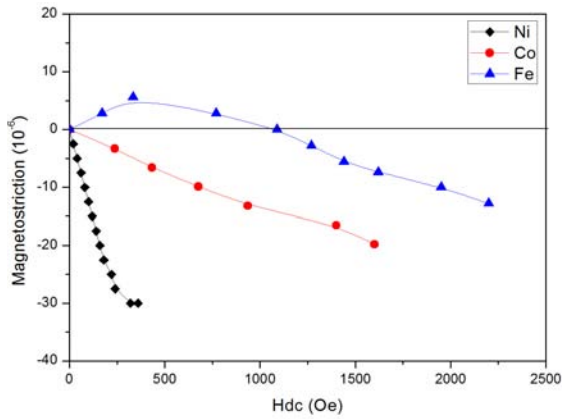


Fig. 5. Magnetostriction(λ) vs. bias static magnetic field parallel to the sample plane.

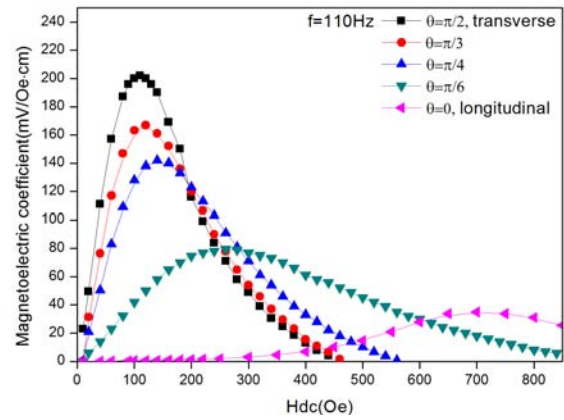


Fig. 7. ME coefficient measured of different direction between electrical polarization P_E and H_{dc} , H_{ac} field.

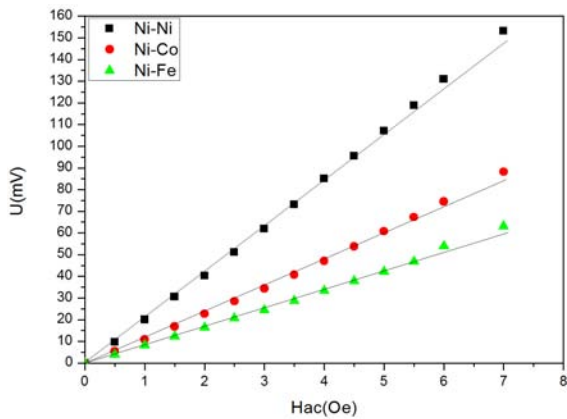


Fig. 6. Output voltage U as a function of the ac magnetic field H_{ac} .

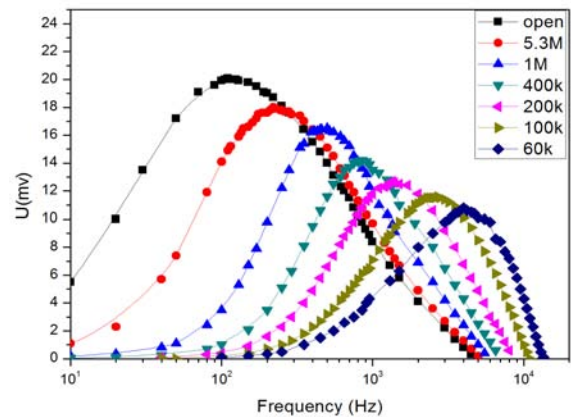


Fig. 8. Frequency dependence of ME voltage for the Ni-PZT-Ni sample at $H_{ac}=1$ Oe, $H_{dc}=110$ Oe and various load resistance R_L .

그림 5는 그림 3,4,6의 특성 설명을 뒷받침하기 위하여 Ni(두께 0.125 mm), Co(0.1 mm) 그리고 Fe(0.1 mm) 자성체 포일에 있어서 직류자기장 H_{dc} 에 대한 자왜(magnetostriction)의 변화율을 측정 한 것이다. 이 측정은 스트레인 게이지(CAS회사:AP-II 시리즈)을 이용하여 수행되었으며 알려진 바와 같이 그 중 Ni가 H_{dc} 의존성이 가장 우수하였다. 이러한 특성으로 보아서 그림 3,4,6에서 자성체에 따른 ME 계수 및 출력전압 차이가 설명될 수 있다. 즉 ME 계수와 출력전압은 자왜계수에 비례하기 때문이다.

그림 6은 교류자기장 센서의 실용성을 조사하기 위하여 교류자기장 주파수 $f=110$ Hz와 각각 구성소자의 최대 출력전압을 나타내는 H_{dc} 에서 H_{ac} 에 대한 출력전

압을 나타낸 것이다. 특히 비대칭 구성소자인 Ni-PZT-Co, Ni-PZT-Fe 소자도 비교적 우수한 선형 특성을 보였다. 그 중 Ni-PZT-Ni 구성이 $H_{ac}=0\sim 7$ Oe 범위에서 약 0 ~ 150 mV의 높은 출력전압을 나타내었으며 선형성도 비교적 우수함을 보였다. 이러한 특성을 고려할 때 Ni-PZT-Ni 샘플은 낮은 교류자기장주파수 $f=110$ Hz와 직류자기장 $H_{dc}=110$ Oe에서 낮은 교류자기장 센서로서 활용될 수 있음을 보여준다.

그림 7은 대표적 소자 Ni-PZT-Ni 샘플의 특성인데 그림 1에서 나타낸 바와 같이 PZT의 전기분극 P_E 와 자기장 (H_{dc} , H_{ac})과의 사이각 θ 가 변화할 때 ME 계수에 대한 H_{dc} 의존성을 나타낸 것이다. 측정은 H_{ac} 와

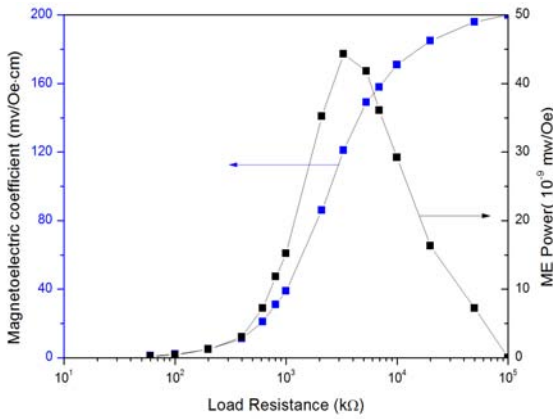


Fig. 9. ME coefficient and ME Power as a function of electrical load resistance R_L .

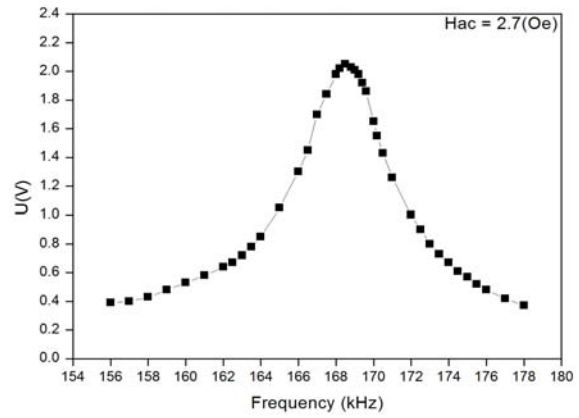


Fig. 10. Frequency dependence of ME voltage at $H_{dc}=110$ Oe, $H_{ac}=2.7$ Oe and resonance frequency range for the Ni-PZT-Ni sample.

H_{dc} 를 동일한 방향으로 두고 $H_{ac}=1$ Oe와 $f=110$ Hz에서 수행되었다. ME 계수의 크기는 $\theta = \pi/2$, 즉 P_E 와 H_{ac} , H_{dc} 가 수직(transverse mode)일 때 최대치가 얻어졌다. 한편 사잇각 θ 가 감소함에 따라 ME 계수 크기는 감소하고 그 피크치도 H_{dc} 가 높은 쪽으로 이동하는 복잡한 변화를 보여주고 있다. 이러한 ME 계수의 사잇각 θ 의존성은 자왜현상이 압전체 PZT에 작용하는 스트레인(strain)에 관계된다고 알려져 있다 [21,22]. 자기장이 P_E 와 나란하게 인가될 때 Ni층은 전기분극 P_E 방향으로 신축하므로 PZT의 스트레인은 샘플 두께방향으로 일어나게 된다. 이 경우 작은 자왜작용으로 인하여 ME 계수가 작아진다. 반면 자기장이 P_E 와 수직($\theta = \pi/2$)으로 인가되면 Ni층은 샘플 길이 방향으로 신축하게 되어 PZT의 스트레인은 길이방향으로 일어나므로 큰 자왜작용으로 큰 ME 계수가 얻어지게 될 것이다. 그리고 $0 < \theta < \pi/2$ 각도 범위에서 자기장은 전기분극 P_E 방향과 평행하거나 수직인 두 성분의 합으로 표현될 수 있다. 즉 $H = H_{\perp} + H_{\parallel} = H \sin\theta + H \cos\theta$ 이다. 이 경우 자왜 크기는 두 자기장 성분 합으로 작용하게 되므로 PZT는 전단 스트레인(shear strain)을 일으키게 될 것이다. 이 때 ME 계수는 $\theta = 0$ 일 때와 $\theta = \pi/2$ 일 때의 사잇값이 될 것이다.

그림 8은 ME 소자의 실용성을 조사하기 위한 특성인데 대표적인 Ni-PZT-Ni 샘플에서 여러 가지 부하저항 R_L 크기에 따른 ME 전압의 교류자기장 주파수의 의존성을 나타낸 것이다. 측정은 $H_{ac}=1$ Oe, 최적 $H_{dc}=110$ Oe일 때 수행하였다. 부하저항 R_L 의 효과에 대한 연구보고가 있으나 모두 공진주파수 영역에서 측

정한 것이다 [23,24]. 반면 본 연구에서 이 특성은 비공진 영역인 낮은 주파수(10 Hz ~ 6 kHz)에서 측정된 것인데 부하저항 R_L 의 효과는 전기회로 시뮬레이션에서도 유사한 결과를 보였다 [25].

그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 이 ME 샘플에 부하저항 $R_L=1$ MΩ을 접속하였을 때 교류자기장 주파수를 10 Hz부터 서서히 증가시키면 ME 전압은 서서히 증가하다가 약 500 Hz 부근에서 16.5 mV의 전압이 나타나고 그 이상의 주파수에서는 서서히 감소하였다. 그리고 부하저항이 감소할수록 최대 ME 전압은 낮아지고 출력전압의 최대치가 되는 교류자기장 주파수는 높은 주파수로 이동하였다. 이러한 현상은 전기회로에서 임피던스 정합(matching)으로 설명될 수 있다. 본 실험의 ME 샘플은 분극 처리한 소자이므로 정전용량 C 성분이라고 하면 ME 샘플의 임피던스는 $X_C = 1/2 \pi fC$ 가 된다. 따라서 임피던스 정합이 되기 위해서는 $X_C = R_L$ 이므로 $f = 1/2 \pi CR_L$ 이 되는 셈이다. ME 샘플 측정 구성에서 저항이 R_L 로 대표되는 것은 다음과 같이 설명될 수 있다. 측정 시 계측기 입력저항 R_E , 압전체의 저항 R_C , 그리고 부하저항 R_L 이 서로 병렬 연결되어 있다. 이 때 R_L 이 R_C 나 R_E 보다 작아서 근사적으로 R_L 로 대표할 수 있게 된다 [24,26]. 즉 $f = 1/2 \pi CR_L$ 식에서 R_L 이 감소하면 ME 전압 피크가 높은 주파수 쪽으로 이동함을 알 수 있게 된다. 이러한 R_L 에 의한 주파수 이동은 센서응용에 있어서 구동주파수 범위가 적당한 R_L 로 변화될 수 있음을 지시해준다.

그림 9는 여러 부하저항 R_L 에 대해서 ME 전력과

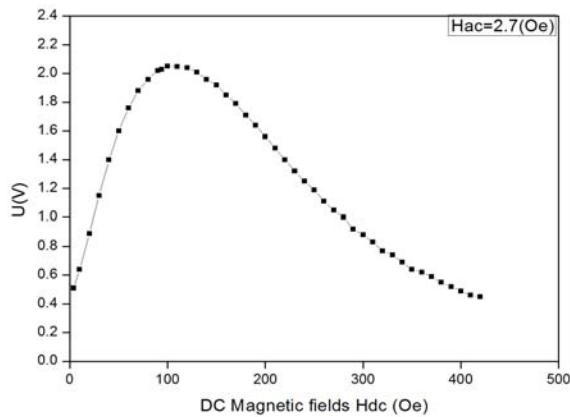


Fig. 11. ME voltage dependence on the bias magnetic field(H_{dc}) at $f_r=168.5$ kHz for Ni-PZT-Ni sample.

ME 계수의 의존성을 나타낸 것이다. ME 계수는 그림 8에서 얻어졌으며 ME 전력은 $P=U^2/R_L$ 식에 의하여 계산하였다. ME 계수는 R_L 증가에 따라 점차 증가하다가 $R_L > 20$ M Ω 에서 포화되는 것으로 나타났다. 반면 ME 전력은 R_L 증가에 따라 급격히 증가하다가 $R_L=3.3$ M Ω 일 때 최대전력 44.3×10^{-9} mW/Oe에 도달하였으며 그 이후 R_L 증가에 따라 급격히 감소하였다. 이러한 최대전력 피크는 전술한 바와 같이 ME 샘플이 출력 임피던스와 부하임피던스의 정합에 의한 것이라 할 수 있다. 이러한 현상은 다른 ME 소자에서도 보여주고 있다 [23,24,27].

그림 10은 대표적인 Ni-PZT-Ni 샘플에서 $H_{ac}=2.7$ Oe, $H_{dc}=110$ Oe일 때 ME 전압의 공진주파수 특성을 나타낸 것이다. ME 전압의 공진피크는 168.5 kHz 부근에서 나타났으며 최대 ME 전압은 2.05 V로 측정되었다. 이 공진주파수는 전기기계 공진(electromechanical resonance) 주파수와 관련된다고 알려져 있다 [28,29]. 다른 ME 소자와 마찬가지로 공진주파수 영역에서 구동할 때 높은 ME 출력전압을 얻을 수 있을 것이다.

그림 11은 대표적인 Ni-PZT-Ni 샘플에서 공진주파수 $f_r=168.5$ kHz, $H_{ac}=2.7$ Oe일 때 ME 전압의 직류 자기장 H_{dc} 의존성을 나타낸 것이다. 이러한 경향은 낮은 주파수 영역에서 측정된 그림 4와 유사하였으며 모두 $H_{dc}=110$ Oe에서 최대치를 보였다. H_{dc} 가 0으로 부터 증가할 때 ME 전압은 H_{dc} 에 강한 의존성을 나타내었으며 ME 전압 피크 이후 H_{dc} 가 더욱 증가하면 ME 전압은 점차적으로 감소하고 있다.

4. 결론

에폭시 접착방법으로 Ni-PZT-Ni, Ni-PZT-Co 및 Ni-PZT-Fe 구조의 ME 소자를 제작하여 낮은 교류자기장주파수(10 Hz~ 6 kHz) 영역에서 ME 특성을 비교 조사하였다. 비대칭 소자인 Ni-PZT-Co, Ni-PZT-Fe 소자의 특성은 Ni-PZT-Ni 소자와 유사한 특성 경향을 보였으며, 최대 ME 계수는 Ni-PZT-Ni, Ni-PZT-Co 및 Ni-PZT-Fe에서 각각 $f=110$ Hz, $H_{dc}=110$ Oe일 때 약 200 mV/cm·Oe $H_{dc}=90$ Oe일 때 약 106 mV/cm·Oe 및 $H_{dc}=160$ Oe일 때 약 87 mV/cm·Oe이었다.

대표적인 Ni-PZT-Ni 샘플에서 주파수 $f=110$ Hz, $H_{ac}=0 \sim 7$ Oe 범위에서 약 0~150 mV의 높은 출력전압과 선형성을 나타내었다. 부하저항 R_L 에 의한 교류자기장주파수 이동은 센서 응용에 있어서 구동주파수가 알맞은 R_L 로 변화될 수 있음을 보여주었다. 한편 공진 특성에서 공진주파수 $f_r=168.5$ kHz, $H_{dc}=110$ Oe 및 $H_{ac}=2.7$ Oe일 때 최대 ME 전압은 약 2.05 V로 측정되었다. 이 샘플은 낮은 교류자기장 주파수에서 낮은 교류자기장 센서로서 활용할 수 있으리라 생각한다.

REFERENCES

- [1] C. W. Nan, *Phys. Rev.*, **B50**, 6082 (1994).
- [2] S. V. Suryanarayana, *Bull. Mater. Sci.*, **17**, 1259 (1994).
- [3] J. Ryu, S. Priya, K. Uchino, and H. E. Kim, *J. Electroceram.*, **8**, 107 (2002).
- [4] C. W. Nan, M. I. Bichurin, S. D. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, *J. Appl. Phys.*, **103**, 031101 (2008).
- [5] R. Grössinger, G. V. Duong, and R. Sato-Turtelli, *J. Magn. Magnetic Mater.*, **320**, 1972 (2008).
- [6] J. Ryu, A. V. Carazo, K. Uchino, and H. E. Kim, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 4948 (2001).
- [7] J. Zhai, Z. D. Xing, S. X. Dong, L. F. Li, and D. Viehland, *J. Am. Ceram. Soc.*, **91**, 351 (2008).
- [8] D. T. Huong Giang, P. A. Duc, N. T. Ngoc, and N. H. Duc, *Sensor and Actuator*, **A179**, 78 (2012).
- [9] V. M. Laletin, N. Paddubnaya, G. Srinivasan, C. P. De Vreugd, M. I. Bichurin, V. M. Petrov, and D. A. Filippov, *Appl. Phys. Letter.*, **87**, 222507 (2005).
- [10] K. Bi, Y. G. Wang, and W. Wu, *Sensor and Actuators.*, **A165**, 48 (2011).
- [11] K. Bi, Y. G. Wang, W. Wu, and D. A. Pan, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, 132002 (2010).
- [12] K. Bi, Y. G. Wang, and W. Wu, *Scripa Materialia*, **63**,

- 589 (2010).
- [13] D. R. Patil, R. C. Kambale, Y. Chai, W. H. Yoon, D. Y. Jeong, D. S. Park, J. W. Kim, J. J. Choi, C. W. Ahn, B. D. Hahn, S. Zhang, K. H. Kim, and J. H. Ryu, *Appl. Phys. Lett.*, **103**, 052907 (2013).
- [14] Y. K. Fetisov, A. A. Bush, K. E. Kamentsev, A. Y. Ostashchenko, and G. Srinivasan, *IEEE Sensor Journal.*, **6**, 935 (2006).
- [15] A. A. Bush, K. E. Kamentsev, V. F. Meshcheryakov, Y. K. Fetisov, D. V. Chashin, and L. Y. Fetisov, *ISSN 1063-7842, Technical Physics.*, **54**, 1342 (2009).
- [16] J. G. Ryu and S. T. Chung, *J. Sensor Sci. & Tech.*, **22**, 379 (2013).
- [17] G. V. Duong, R. Groessinger, M. Schoenhart, and D. Bueno-Nasgues, *J. Magn. Magnetic Mater.*, **316**, 390 (2007).
- [18] D. A. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, and L. J. Qiao, *J. Phys: Condens Matter*, **20**, 025203 (2008).
- [19] C. W. Nan, G. Liu, and Y. Lin, *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 4366 (2003).
- [20] G. Srinivasan, E. T. Rasmussen, and R. Hayes, *Phys. Rev.*, **B67**, 014418 (2004).
- [21] N. H. Duc and D.T.H. Giang, *J. Alloys compd.*, **449**, 214 (2008).
- [22] J. Ryu, S. Priya, A. V. Carazo, K. Uchino, and H. E. Kim, *J. Am. Ceram. Soc.*, **84**, 2905 (2001).
- [23] Y. J. Wang, X. G. Zhao, W. N. Di, H. S. LuO, and S. W. Or, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 143503 (2009).
- [24] Y. J. Wang, X. G. Zhao, J. Jiao, L. H. Liu, W. N. Di, H. S. Luo, and S. Or, *J. Alloys Compd.*, **500**, 224 (2010).
- [25] S. T. Chung and J. G. Ryu., *J. KIEEME*, **26**, 515 (2013).
- [26] S. Dong, J. Zhai, Z. P. Xing, J. F. Li, and D. Viehland, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 102901 (2005).
- [27] L. Wang, Z. F. Du, C. F. Fan, L. H. Xu, H. P. Zhang, and D. L. Zhao, *J. Alloys Compd.*, **509**, 7870 (2011).
- [28] D. C. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, and L. J. Qiao, *Smart Mater. Struct.*, **16**, 2501 (2007).
- [29] W. Wu, Y. G. Wang, and K. Bi, *J. Magn. Magnetic Mater.*, **323**, 422 (2011).