

자기센서용 $Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9$ 적층구조 소자의 ME 특성

류지구⁺ · 전성준

Magnetolectric Characteristics on Layered $Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9$ Composites for Magnetic Field Sensor

Ji-Goo Ryu⁺ and Seong-Jeub Jeon

Abstract

The magnetolectric characteristics on layered $Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT$ and $Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9$ ($t_m=0.017, 0.034$ mm) composites by epoxy bonding for magnetic field sensor were investigated in the low-frequency range and resonance frequency range. The optimal bias magnetic field H_{dc} of these samples was about 23~63 Oe range. The Me coefficient of $Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9$ ($t_m=0.034$ mm) composites reaches a maximum of 186 mV/cm·Oe at $H_{dc}=63$ Oe, $f=50$ Hz and a maximum of 1280 mV/cm·Oe at $H_{dc}=63$ Oe, resonance frequency $f_r=95.5$ KHz. The output voltage shows linearity proportional to ac fields H_{ac} and is about $U=0\sim 130.6$ mV at $H_{ac}=0\sim 7$ Oe, $f=50$ Hz, $U=0\sim 12.4$ V at $H_{ac}=0\sim 10$ Oe, $f_r=95.5$ KHz(resonance frequency). The optimal frequency($f=50$ Hz) of this sample is around the utility ac frequency($f=60$ Hz). Therefore, this sample will allow for ac magnetic field sensor at utility frequency and low bias magnetic fields H_{dc} .

Keywords: Magnetic field sensor, Magnetolectric effect, Magnetostriction coefficient, Electromechanical coefficient, Load resistance

1. 서 론

ME(magnetolectric)소자는 자기-전기 상호작용에 근본을 두고 있다. ME효과는 외부 자기장이 ME소자에 인가되면 자성물질의 자왜현상이 전기분극된 압전물질에 전달되어 압전효과에 의해 기전력이 유도되는 현상이다[1,2].

이러한 ME소자는 구조와 제조 공정이 단순하여 자기센서, ME메모리, 액츄에이터 및 트랜스 듀스 등, 그 응용이 매우 다양하다[3,4].

ME효과는 비록 단일상 물질(single-phase material)에서 먼저 관측되었다 하더라도 압전체/자성체의 적층구조(laminate structure)의 경우 ME계수가 대단히 크므로 최근에 연구의 중심이 되고 있다[4-7].

이러한 적층구조의 ME효과는 압전층의 압전효과와 자성체

층의 자왜효과가 상호 결합에 의하여 나타나는데 *Terfenol-D*와 같은 거대 자왜물질과 기계-전기결합계수가 큰 *PZT* 조합에서 ME출력전압이 크게 나타남을 보였다. 그러므로 적층구조 소자의 바람직한 ME특성은 적당한 자성체와 압전소자를 선택함으로써 이루어질 수 있을 것이다[3,8].

ME효과는 동역학적 현상이므로 교류 자기장 센서는 바이어스 직류 자기장이 존재할 때 실현 될 수 있다. 직류 자기장 H_{dc} 값이 크게되면 센서의 크기 증가, 에너지의 증가 및 잡음 발생 등의 단점이 있으므로 최근 직류 자기장 H_{dc} 를 제로(zero)로하는 쉘프 바이어스 구조 및 H_{dc} 를 감소시키는 연구보고가 있다 [9,10]. 여기에 사용되는 자성체는 *Fe*를 기본으로 한 물질인데 높은 투자율과 낮은 포화 자화도를 가지는 *FeCuNbSiB* 자성체 포일을 주로 사용하고 있다.

본 연구에서는 이러한 점을 감안하여 비교적 낮은 바이어스 직류 자기장 H_{dc} 에서 ME출력을 얻을 수 있도록 투자율이 비교적 크고 낮은 포화자화도를 갖는 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 자성체 포일을 선택하였다. 실험 샘플은 자성체 포일과 단결정 *PZT*를 2층막(bilayer) 구조 및 자성체 두께를 달리한 3층막(trilayer) 구조로 하였다. 소자제조는 단순한 제조법의 하나인 강력 에폭시 접착법으로 ME 소자를 제조하고 이러한 구조의 ME소자의 실용화를 알아보기 위하여 낮은 교류 자기장 주파수 영역(10 Hz~1.5 KHz)과 공진 주파수 영역(70~110 KHz)에서 ME특성의 주파수 의존성, 직류

Department of Electronic Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea 599-1, Daeyon 3-Dong, Nam-Gu, Busan, Korea

⁺Corresponding author: ryujg@pknu.ac.kr

(Received : May. 13, 2015, Accepted : May. 27, 2015)

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.

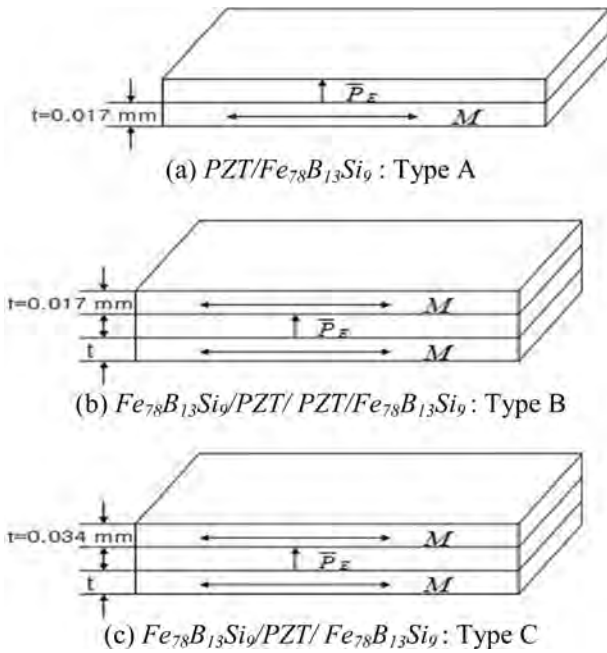


Fig. 1. Schematic geometry arrangement of the sample.

와 교류 자기장의 의존성 및 부하저항 R_L 의 의존성 등을 비교, 조사하였다.

2. 실험

2.1 샘플제조

사용된 압전소자는 PMN-PZT 단결정(single crystal)으로 세라콤 회사 제품인 CPSC 150-85을 선택하였는데 그 크기는 $10 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$ 이며 압전소자 표면에 은(silver)으로 코팅한 전극으로 되어있다.

한편 자성체 재료는 Fe를 기본으로 한 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 로 두께는 약 0.017 mm 이며 자왜율은 약 30×10^{-6} 이다.

먼저 압전체 표면을 아세톤으로 세정하고 압전체와 자성체 포일과의 강한 접착을 위하여 에폭시(UHU, D 인드렘텍회사) 접착제로 처리한 후 약 5 kg하중으로 공기 중 2시간 부하처리를 하였다.

사용된 샘플구성은 Fig. 1과 같이 3 가지 종류로 선택 하였는데 Fig. 1(a)는 자성체포일을 한 쪽면에 Fig. 1(b)는 자성체포일을 양면에 접착하고, Fig. 1(c) 소자는 자성체포일을 에폭시로 두 겹(두께 0.034 mm)으로 한 후 압전체 양면에 접착하였다.

2.2 측정

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

ME 소자에 출력전압을 유기시키기 위하여 교류자기장의 크기는 1 Oe이고, 주파수 10 Hz~1.5 KHz를 인가하고, 직류자기장

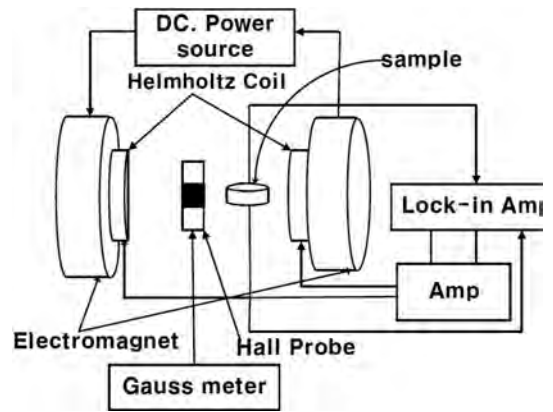


Fig. 2. Schematic of experiment set-up.

의 크기는 0~500 Oe로 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.

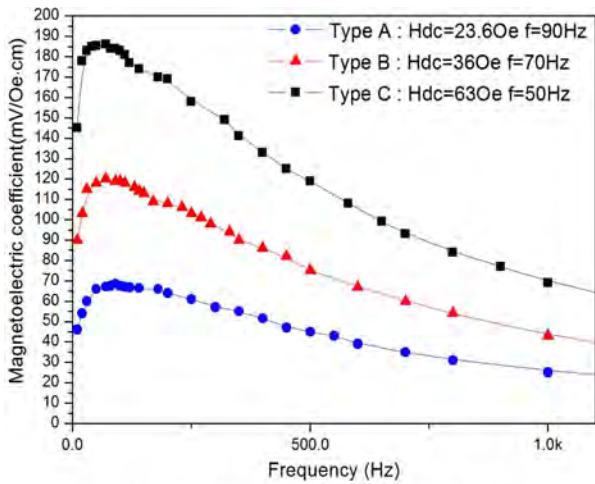
$$\alpha_E = \frac{U}{d \times H_{ac}} \quad (1)$$

여기서 U , d , 그리고 H_{ac} 는 각각 ME 전압, PZT의 두께 및 교류자기장의 세기를 나타낸다. 그리고 전기분극 P_E 에 대해서 교류자기장(H_{ac}) 및 직류자기장(H_{dc})와 수직인 경우 (transverse mode) 일 때 ME 계수가 크므로 본 실험에서는 이 transverse mode로 하였다. 또한 H_{ac} 와 H_{dc} 는 같은 평면에서 동일한 방향으로 인가하였다.

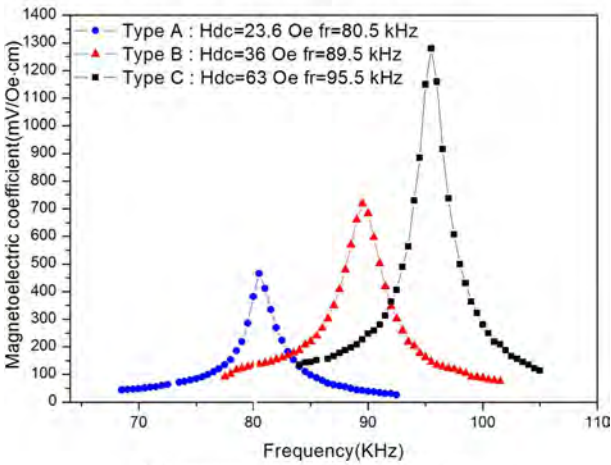
3. 실험결과 및 논의

Fig. 3은 교류자기장 H_{ac} 주파수 f 에 대한 ME 계수의 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 낮은 주파수(10 Hz~1.5 KHz) 영역에서 측정한 것이며 Fig. 3(b)는 70~110 KHz의 높은 주파수 영역의 공진 주파수에서 측정한 것이다.

사용된 샘플은 Fig. 1과 같은 구조의 3 종류이며 H_{ac} 와 H_{dc} 는 같은 평면에서 동일한 방향으로 인가하였다. 측정은 교류 자기장 $H_{ac}=1 \text{ Oe}$ 와 최대 ME 계수를 나타내는 직류 자기장 H_{dc} 일 때 수행되었다. Fig. 3(a)의 저주파 영역에서는 최적 H_{dc} 일 때 f 가 증가함에 따라 ME 계수는 급격히 증가하다가 type A는 $H_{dc}=23.6 \text{ Oe}$ 일 때 $f=90 \text{ Hz}$ 부근에서 68 mV/cmOe , type B는 $H_{dc}=36 \text{ Oe}$ 일 때 $f=70 \text{ Hz}$ 부근에서 120 mV/cmOe , type C는 $H_{dc}=63 \text{ Oe}$ 일 때 $f=50 \text{ Hz}$ 부근에서 186 mV/cmOe 의 피크를 보였으며 f 가 더욱 증가 할수록 서서히 감소하는 특성을 보였다. 그 중 자성



(a) low frequency (10 Hz ~ 1.5 KHz)



(b) resonance frequency region

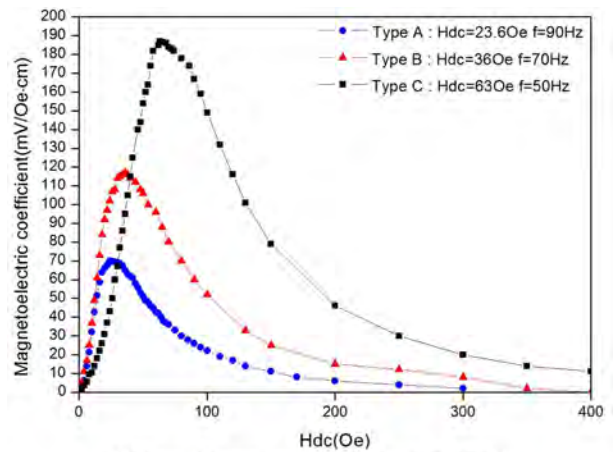
Fig. 3. Dependence of the magnetolectric coefficient vs. frequency of ac magnetic field on transverse mode.

체의 두께가 큰 type C가 큰 ME 계수를 나타내었다.

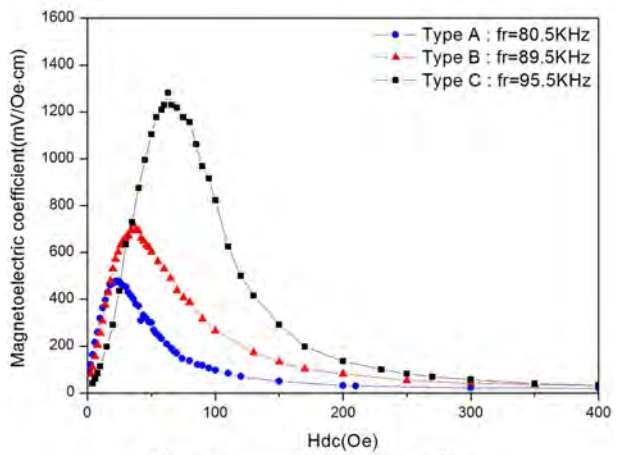
이러한 특성곡선의 형태는 Fe 를 기본으로 한 재료에서의 결과와 유사하였다[11,12]. 주파수 영역 10 Hz~1.5 KHz 에서 ME 계수의 감소는 압전체와 자성체의 도전을 변화에 의하여 출력 계측기와 임피던스 정합이 벗어난 탓으로 설명되며[13,14], 도전을 변화는 압전체에 바람직하지 않은 전하의 누설에 기여하는 것으로 판단된다[15].

이 샘플 중에서 type B, C는 저주파 구동시 상용 교류 주파수 60 Hz와 비슷하므로 낮은 H_{dc} 에서 교류전류센서로서의 실용화에 유리하다고 판단된다.

한 편 Fig. 3(b)는 3 종류 샘플을 높은 주파수 영역, 즉 공진 주파수 영역에서 ME 계수의 주파수 의존성을 측정 한 것인데 type A는 $H_{dc}=23.6$ Oe 일 때 $f_r=80.5$ KHz, ME 계수는 465 mV/cmOe, type B는 $H_{dc}=36$ Oe 일 때 $f_r=89.5$ KHz, ME 계수는 719 mV/cmOe, 그리고 type C는 $H_{dc}=63$ Oe 일 때 $f_r=95.5$ KHz, ME 계수는 1280 mV/cmOe 로 나타내었다.



(a) low frequency (10 Hz ~ 1.5 KHz)



(b) resonance frequency region

Fig. 4. Dependence of the magnetolectric coefficient vs. bias static magnetic fields.

이러한 결과를 보아 H_{dc} 가 수 십 Oe 정도에서 공진 피크가 나타나는 것은 Fe 를 기본으로 한 자성체와 함께 샘플로 사용된 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 자성포일이 유연하고 투자율이 큰 탓으로 판단한다[16,17]. 그리고 자성체 포일의 두께가 증가 할수록 공진주파수 f_r 는 ME 계수와 함께 증가하고 있다. 이러한 특성 곡선의 경향은 $Ni/PZT/Ni$ 구조에서도 보여주고 있다[12,18,19].

이것은 자성체 포일이 두꺼우면 압전체 PZT 의 변형(strain)이 더 효율적 이서 ME 계수는 증가하게 되고, 자성체 구조가 더 뾰뚱해져 공진주파수 f_r 이 증가하는 것으로 설명된다[19]. 이러한 공진 주파수는 전기기계공진 (electromechanical resonance) 주파수와 관련된다[20]. 공진 시 ME 계수 피크 값은 효율적인 압자계수 (piezomagnetic coefficient), 압전계수 (piezoelectric coefficient), 유연성 및 유전율 등에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다[21].

한 편 낮은 주파수 영역에서나 공진 주파수 영역에서 최대 ME 계수를 나타내는 H_{dc} 값은 type A는 약 23.6 Oe, type B는 약 36 Oe, 그리고 type C는 약 63 Oe로 동일한 값에서 구동하

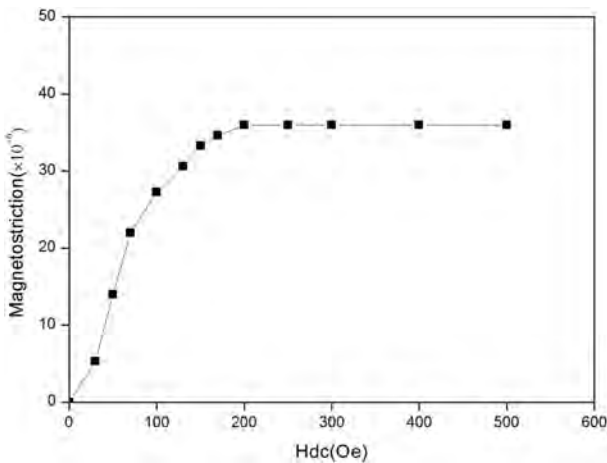


Fig. 5. Magnetostriction(λ) vs. bias static magnetic fields parallel to the sample plane.

고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 바이어스 직류 자기장 H_{dc} 에 대한 ME계수의 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 낮은 주파수 일 때, Fig. 3(b)는 공진 영역의 주파수에서 측정된 것인데 모두 특성경향은 유사함을 보이고 있으며 type A인 경우 $H_{dc}=23.6$ Oe, type B 일 때 $H_{dc}=36$ Oe 그리고 type C 일 때 $H_{dc}=63$ Oe으로 측정되었다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 자성체포일의 두께에 따라 ME 계수는 증가하고 있으며, H_{dc} 가 0으로부터 증가 할 때 ME 계수는 급격히 증가하여 낮은 H_{dc} (약 수십 Oe)에 강한 의존성을 나타내었다. 최대 ME계수를 나타내는 H_{dc} (약 수십 Oe) 이후 H_{dc} 가 증가함에 따라 ME계수는 점차 감소하고 있다. 이러한 특성경향은 다른 연구보고와 유사하였다[22,23].

이러한 ME 계수의 H_{dc} 의존성은 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 자왜계수 $q = \partial\lambda/\partial H$ 의 변화량에 관계된다[24,25].

Fig. 5는 Figs. 3, 4의 특성설명을 뒷 받침 하기 위하여 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 자성체 포일을 두 겹으로 한 경우(약 $t_m=0.034$ mm)에 있어서 직류 자기장 H_{dc} 에 대한 자왜(magnetostriction) 변화율을 측정 한 것 이다. 이 특성에서 자왜계수 $q = \partial\lambda/\partial H$ 는 H_{dc} 가 약 70 Oe 이하에서 가장 큰 변화를 보임으로 Fig. 3, 4에서 알 수 있는 바와 같이 낮은 H_{dc} (type A는 23.6 Oe, type B는 36 Oe 그리고 type C는 63 Oe)에서 최대 ME 계수가 나타남이 설명 될 수 있다. 한편 H_{dc} 가 200 Oe를 넘는 경우 거의 포화가 되므로 ME 계수가 매우 작아지게 되는 셈이다.

자왜율 측정은 스트레인지게이지(CAS 회사:AP-II 시리즈)를 이용하여 수행되었으며, 이 특성은 Fe를 기본으로 한 자성체 $Fe_{70}Pd_{30}$ 등과 같이 (+)자왜율을 보이며 특성경향도 유사하였다[12].

Fig. 6은 ME소자의 실용성을 알아보기 위한 특성인데 대표적인 type C($Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9$, $t_m=0.034$ mm) 샘플에서 부하저항 R_L 크기에 따른 ME계수의 주파수 의존성을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 낮은 주파수 영역(10 Hz~1.5 KHz) 그리고 Fig. 6(b)는 공진주파수영역(82~106 KHz) 일 때 측정된 것으로, $H_{ac}=1$

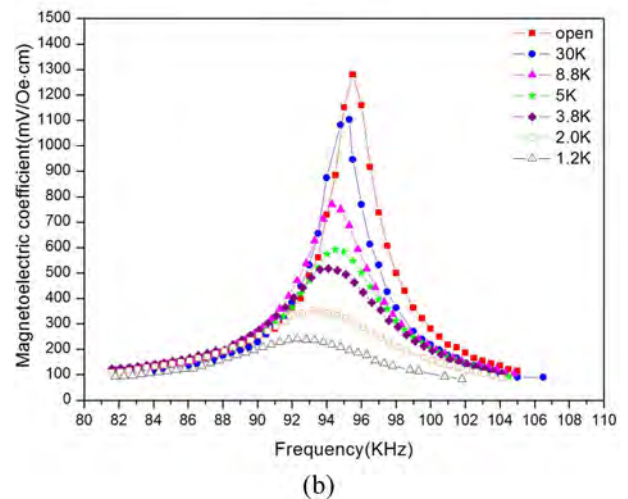
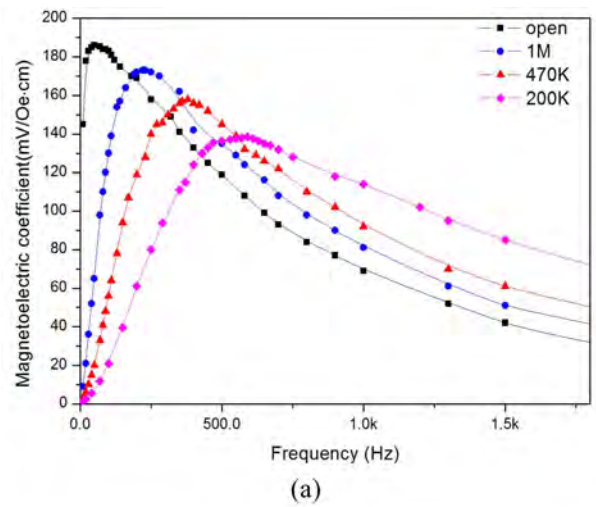


Fig. 6. Frequency dependence of ME voltage for the type C sample at $H_{ac}=1$ Oe, $H_{dc}=63$ Oe and various load resistance R_L .

Oe, 최적 $H_{dc}=63$ Oe일 때 수행되었다.

낮은 주파수영역(10 Hz~1.5 KHz) 일 때 Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 부하저항 R_L 이 감소할수록 최대 ME계수는 낮아지고 피크치를 나타내는 교류자기장 주파수는 높은 주파수 쪽으로 이동하였다. 이러한 현상은 전기회로에서 임피던스 정합(matching)으로 설명할 수 있다.

즉 저주파 영역 구동일 때 ME샘플의 등가모델[26]은 R_cC 병렬회로로 고려하고 있다. ME샘플 측정 구성에서 저항 R_L 이 계측기 입력저항 R_E , 압전체저항 R_c 와 병렬로 연결되므로 R_L 이 R_c 나 R_E 보다 작아서 근사적으로 R_L 로 대표할 수 있게 된다[27,28]. ME샘플은 분극처리한 소자이므로 정전용량 C 성분이라고 하면 ME샘플의 임피던스는 $X_c=1/2\pi fC$ 가 된다. 따라서 임피던스 정합이 되기 위해서는 $X_c=R_L$ 이므로 $f=1/2\pi CR_L$ 는 셈이다. 즉 이 식에서 R_L 이 감소하면 ME계수 피크가 높은 주파수로 이동함을 알 수 있게 된다. 이러한 특성 경향은 벌크형 및 Ni/PZT/Ni ME 소자와 유사하였다[29,30].

공진주파수영역 (82~106 KHz) 일 때 Fig. 6(b)에서 알 수 있

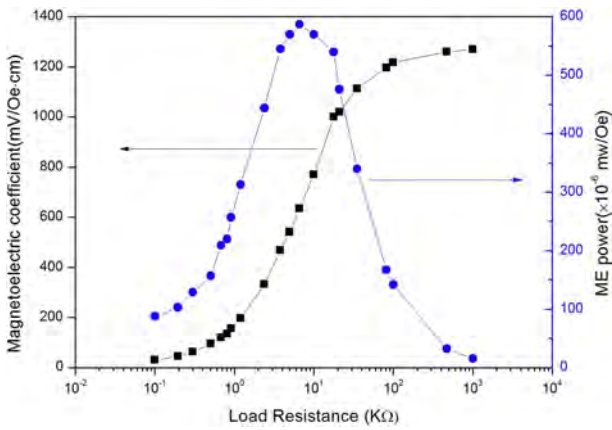


Fig. 7. ME coefficient and ME power as a function of electrical load resistance R_L .

듯이 부하저항 R_L 이 증가함에 따라 ME계수의 피크는 점차 공진 주파수가 높은 주파수 쪽으로 이동하고 있으며 R_L 을 접속하지 않은 개방회로조건(open-circuit condition) 일 때 $f_r=95.5$ KHz, ME계수 $\alpha_E=1280$ mV/cm·Oe을 나타내었다. 이러한 특성 경향 관측은 다른 물질의 소자에서도 보여주고 있다[27,31].

부하저항 R_L 변화에 의한 공진 주파수의 이동 및 ME계수의 피크치 변화에 대한 명확한 해석자료를 아직 접하지 못하였지만, 부하저항 R_L 이 감소할수록 ME계수의 피크치가 낮은 공진 주파수쪽으로 이동하는 것은 압전소자에 의해 주어지는 정전용량이 증가하기 때문이다. 즉 압전소자의 전기-기계결합계수($K31$)는 부하저항이 감소함에 따라 작아지고 유전율을 증가시키는 성향을 가지고 있기 때문이라고 판단된다.

Fig. 7은 대표적인 소자 type C의 공진주파수($f=95.5$ KHz) 일 때 나타낸 특성인데 여러 부하저항 R_L 에 대해서 ME전력과 ME계수의 의존성을 나타낸 것이다.

ME계수는 Fig. 6(b)에서 얻어졌으며 ME전력은 $P=U^2/R_L$ 식에 의해 계산하였다. ME계수는 R_L 의 증가에 따라 점차 증가하다가 $R_L>100$ KΩ에서 포화되는 것으로 나타났다. 반면 ME전력은 R_L 증가에 따라 급격히 증가하다가 $R_L=6.6$ KΩ 부근일 때 최대 ME전력 587×10^{-6} mW/Oe에 도달하였으며 그 이후 R_L 증가에 따라 급격히 감소하였다. 이러한 최대전력 피크는 ME샘플이 출력 임피던스와 부하임피던스의 정합(matching)에 의한 것이라 할 수 있다. 이러한 현상은 다른 ME소자에서도 보여주고 있다[11,29].

Fig. 8은 교류자기장 센서의 실용화를 조사하기 위하여 대표적인 소자 type C에서 낮은 구동 주파수 50 Hz (Fig.8(a))와 공진파수 $f_r=95.5$ KHz (Fig. 8(b)) 그리고 $H_{dc}=63$ Oe의 최대 출력 전압을 나타내는 조건일 때 교류 자기장 H_{ac} 에 대한 출력전압을 나타낸 것이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 모두 출력전압 U 는 H_{ac} 에 대해서 비교적 우수한 선형특성을 나타내었다. Fig. 8(a)는 $f=50$ Hz, $H_{dc}=63$ Oe일 때 $H_{ac}=0\sim7$ Oe 범위에서 약 0~130.6mV의 출력전압을 나타내었으며 특히 상용주파수(60 Hz)와 유사한

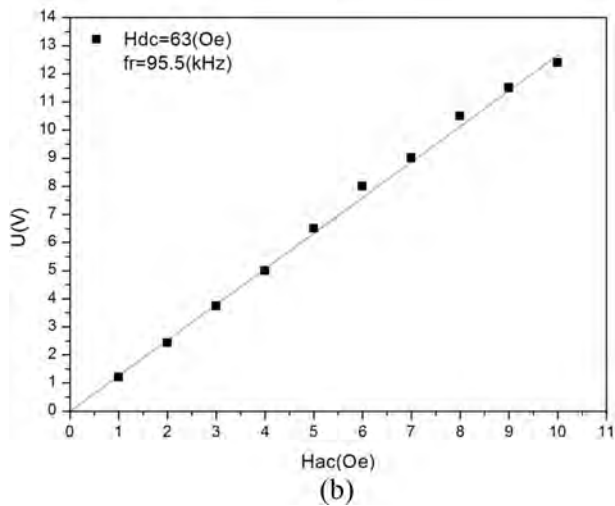
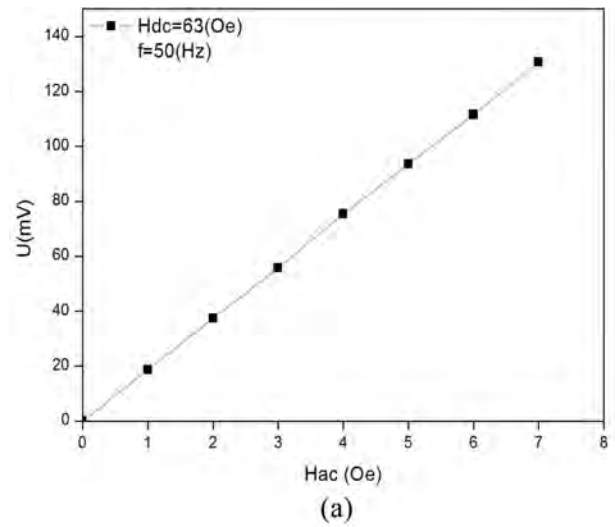


Fig. 8. Output voltage U as a function of the ac magnetic fields H_{ac} .

주파수에서 최적치를 보이므로 상용주파수 교류 자기장 센서로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 8(b)는 공진 주파수 $f_r=95.5$ KHz, $H_{dc}=63$ Oe 일 때 $H_{ac}=0\sim10$ Oe 범위에서 약 0~12.4 V의 높은 출력전압을 보였다.

이러한 샘플은 비교적 낮은 H_{dc} 에서 교류 자기장센서로서 활용될 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

에폭시 접착방법으로 $Fe_{78}B_{13}Si_9$ 자성체 포일과 단결정 $PMN-PZT$ 를 2층막(bilayer)구조와 자성체 두께를 달리한 3층막(trilayer) 구조 등으로 제작하여 낮은 교류 자기장 주파수 영역(10 Hz~1.5 KHz)과 공진 주파수 영역(70~110 KHz)에서 ME특성을 비교 조사하였다. 이 ME소자들은 낮은 직류 바이어스 H_{dc} (23~63 Oe)에서 모두 유사한 특성 경향을 보였으며 대표적 소자 type

$C(Fe_{78}B_{13}Si_9/PZT/Fe_{78}B_{13}Si_9, t_m=0.034 \text{ mm})$ 에서 낮은 교류 자기장 주파수인 경우 ME계수는 186 mV/cmOe ($H_{dc}=63 \text{ Oe}$, $f=50 \text{ Hz}$) 그리고 공진 주파수인 경우는 1280 mV/cmOe ($H_{dc}=63 \text{ Oe}$, $f_r=95.5 \text{ KHz}$)이었다.

부하저항 R_L 에 의한 교류 자기장 주파수 의존성은 낮은 주파수 구동과 공진 주파수영역 구동에서 서로 상반된 특성을 나타내었다.

한편 $f=50 \text{ Hz}$, $H_{dc}=63 \text{ Oe}$ 일 때 교류 자기장 $H_{ac}=0\sim 7 \text{ Oe}$ 범위에서 출력전압 $U=0\sim 130.6\text{mV}$, 공진 주파수 $f_r=95.5 \text{ KHz}$, $H_{dc}=63 \text{ Oe}$ 일 때 $H_{ac}=0\sim 10 \text{ Oe}$ 범위에서 $U=0\sim 12.4 \text{ V}$ 의 높은 출력전압과 선형성을 보여주었다. 이 샘플은 특히 저주파 구동시 주파수가 상용 교류 주파수(60 Hz)와 비슷하므로 상용 교류 자기장센서로서 응용이 유리하다고 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ce-Wen Nan, "Magnetolectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases", *Phys. Rev. B*, Vol. 50, pp. 6082-6068, 1994.
- [2] S. V. Suryanarayama, "Magnetolectric interaction phenomena in materials", *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 17, No. 7, pp. 1259-1270, 1994.
- [3] J. Ryu, S. Priya, K. Uchino, and H. E. Kim, "Magnetolectric effect in composites of magnetostriction and piezoelectric materials", *J. Electroceram.*, Vol.8, pp. 107-119, 2002.
- [4] Ce-Wen Nan, M. I. Bichurin, S. D. Dong, D. Viehland, and G. Srinivasan, "Multiferroic magnetolectric composites", *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, 031101, 2008.
- [5] J. Ryu, A. V. Carazo, K. Uchino, and H. Kim, "Piezoelectric and magnetolectric properties of lead Zirconate Titanate/Ni-Ferrite particulate composites", *J. Electroceram.*, Vol. 7, pp. 117-241, 2001.
- [6] Y. K. Fetisov, K. E. Kamentsev, A.Y. Ostashchenko, and G. Srinivasan, "Wide-band magnetolectric characterization of a ferrite-piezoelectric multilayer using a pulsed magnetic field", *Solid State Commun.*, Vol. 132, pp. 13-17, 2004.
- [7] D. V. Chashin, Y. K. Fetisov, E. V. Taftseva, and G. Srinivasan, "Magnetolectric effects in layered samples of lead Zirconium titanate and nickel films", *Solid State Commun.*, Vol. 148, pp. 55-58, 148.
- [8] G. Lawes and G. Srinivasan, "Introduction to magnetolectric coupling and multiferroic films", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 44, 243001, 2011.
- [9] D. Y. Huang, C. J. Lu, B. Han, X. Wang, C. X. Li, C. G. Xu, J. G. Gui, and C. G. Lin, "Giant self-biased magnetolectric coupling characteristics of three-phase composite with end-bonding structure", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 105, 263502, 2014.
- [10] C. J. Lu, C. G. Xu, L. Wang, J. P. Gao, J. G. Gui, and C. G. Lim, "Investigation of optimized end-bonding magnetolectric heterostructure for sensitive magnetic field sensor", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 85, pp. 115003, 2014.
- [11] L. Wang, Z. Du, C. Fan, L. Xu, H. Zhang, and D. Zhao, "Effect of load resistance on magnetolectric properties in FeGa/BaTiO₃/FeGa laminate composites", *J. Alloys Compd.*, Vol. 509, pp. 7870-7873, 2011.
- [12] T. Kubota, T. Okazaki, N. Endo, K. Mikami and Y. Furuya, "Output characteristics in Fe-Pd/PZT/Fe-Pd magneto-electric composites with Fe-Pd thick layer", *Sens. Actuator A-Phys.*, Vol. 200, pp. 11-15, 2013.
- [13] Y. K. Fetisov, A. A. Bush, K. E. Kamentsev, A. Y. Ostaschchenko, and G. Srinivasan, "Ferrite-piezoelectric multilayers for magnetic field sensors", *IEEE Sens. J.*, Vol. 6, No. 4, pp. 935-938, 2006.
- [14] A. A. Bush, K. E. Kamentsev, V. F. Meshcheryakov, Y. K. Fetisov, D. V. Chashin, and L. Y. Fetisov, "Low-frequency magnetolectric effect in a Galfenol-PZT planner composite structure", *Tech. Phys.*, Vol. 54, pp. 1314-1320, 2009.
- [15] G. V. Duong, R. Groessinger, M. Schoenhardt, and D. Bueno-Nasques, "The lock-in technique for studying magnetoelectric effect", *J. Magn. Magnetic Mater.*, Vol. 316, pp. 390-393, 2007.
- [16] P. Li, L. Chen, Y. Wen, D. Wang, and X. Huang, "Magnetic sensor employing piezoelectric Ceramic/Rare-earth Iron Alloy/High-Permeability FeCuNbSiB composite", *IEEE Sensors conference* pp. 1718-1721, 2010.
- [17] C. Lu, C. Xu, L. Wang, J. Gao, J. Gui, and C. Lin, "Investigation of optimized end-bonding magnetolectric heterostructure for sensitive magnetic field sensor", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 85, pp. 115003, 2014.
- [18] D. A. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, and L. J. Qiao, "Ni/PZT/Ni trilayered magnetolectric composites synthesized by electro-deposition", *J. Phys: Condens. Matter*, Vol. 20, pp. 05203, 2008.
- [19] D. A. Pan, J. J. Tian, S. G. Zhang, J. S. Sun, A. A. Volinsky, and L. J. Qiao, "Geometry effects on magnetolectric performance of layered Ni/PZT composites", *Mater. Sci. Eng. B-Adv. Funct. Solid-State Mater.*, Vol. 163, pp. 114-119, 2009.
- [20] D. A. Pan, Y. Bai, W. Y. Chu, and L. J. Qiao, "Magnetolectric coupling and the hydrogen effect on Ni-PZT-Ni trilayers made by electrodeposition", *Smart Mater. Struct.*, Vol. 16, pp. 2501-2504, 2007.
- [21] M. I. Bichurin, D. A. Filippov, and V. M. Petrov, "Resonance magnetolectric effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites", *Phys. Rev. B*, Vol. 68, pp. 132408, 2003.
- [22] D. A. Chashin, Y. K. Fetisov, E. V. Tafintseva, and G. Srinivasan, "Magnetolectric effects in layered samples of the Zirconium titanate and Nickel films", *Solid State Commun.*, Vol. 148, pp. 55-58, 2008.
- [23] H. Q. Shen, Y. G. Wang, D. Xie, and J. H. Cheng, "Magnetolectric effect in FeCo/PMN-PT/Feco trilayers prepared by electroless deposition of FeCo on PMN-PT crystals with various orientations", *J. Alloys. Comp.*, Vol. 610, pp. 11-14, 2014.
- [24] G. Srinivasan, E. T. Rasmussen, and R. Hayes, "Magnetolectric effects in ferrite lead Zirconate titanate layered composites: The influence of Zinc substitution in ferrites", *Phys. Rev. B*, Vol. 67, 014418, 2004.
- [25] R. Grossinger, G. V. Duong, and R. Sato-Turtelli, "The

- physics of magnetoelectric composites”, *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 320, pp. 1972-1977, 2008.
- [26] Z. P. Xing, J. Y. Zhai, S. X. Dong, J. F. Li, D. Viehland, and W. G. Odend, “Modeling and detection of quasi-static nanotesla magnetic field variations using magnetoelectric laminate sensor”, *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 19, 015206, 2008.
- [27] Y. J. Wang, X. G. Zhao, J. Jiao, L. H. Liu, W. N. Di, H. S. Luo, and S. W. Or., “Electrical resistance load effect on magnetoelectric coupling of magnetostrictive/piezoelectric laminate composite”, *J. Alloys Compd.*, Vol. 500, pp. 224-226, 2010.
- [28] S. Dong, J. Zhai, Z. P. Xing, J. F. Li, and D. Viehland, “Extremely low frequency response of magnetoelectric multilayer composites”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, 102901, 2005.
- [29] J. G. Ryu, and S. J. Jeon, “Magnetoelectric characteristics on layered Ni-PZT-Ni, Co, Fe, composites for magnetic field sensor”, *J. Korean Inst. Electr. Electro. Mater. Eng.*, Vol. 28, No. 2, pp. 92-98, 2015.
- [30] J. G. Ryu, and S. T. Chung, “Load resistance influence of magnetoelectric characteristics on $\text{NiZnFe}_2\text{O}_4$ +PZT composites for magnetoelectric sensor”, *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 22, No. 6, pp. 379-386, 2013.
- [31] Y. J. Wang, X. G. Zhao, W. N. Di, H. S. Luo, and S. W. Or., “Magnetoelectric voltage gain effect in a long-type magnetostrictive/piezoelectric heterostructure”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 95, 1435003, 2009.