

The Enhanced Off-Diagonal Magneto-Impedance Effect in Cu/Ni₈₀Fe₂₀ Core-Shell Composite Wires Fabricated by Electrodeposition under Torsional Strain

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

Sang Hun Lee

Department of Radiological Science, Kaya University, Gimhae 50830, Korea

(Received 31 July 2017, Received in final form 8 August 2017, Accepted 8 August 2017)

The magneto-impedance effect (MI effect) has been investigated in metal core/soft magnetic shell composite wires fabricated by electrodeposition of Ni₈₀Fe₂₀ on Cu wire (diameter 190 μm). The diagonal impedances Z_{zz} and $Z_{\theta\theta}$ in cylindrical coordinate showed strong MI effect for the magnetic field applied along z-axis, while the off-diagonal impedance $Z_{\theta z}$ showed very weak MI effect. We have tried to develop the Cu core/Ni₈₀Fe₂₀ shell composite wire having strong MI effect in off-diagonal impedance by electrodeposition under torsional strain. The core/shell composite wire electrodeposited under torsional angles above 270° showed significantly enhanced MI effect in the off-diagonal impedance. The maximum MI effect was observed in the composite wire electrodeposited under torsional angle of 360°. The developed method to enhance off-diagonal MI effect is expected to increase the applicability of the core/shell composite wire to magnetic sensor material.

Keywords : magneto-impedance effect, impedance tensor, metal core/soft magnetic shell composite wire, electrodeposition

비틀림 스트레인 하에서 전기도금으로 만든 Cu 코어/Ni₈₀Fe₂₀ 셸 복합 와이어에서 비대각 자기임피던스(Off-diagonal Magneto-Impedance) 효과의 증대

김동영 · 윤석수*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

이상훈

가야대학교 방사선학과, 경남 김해시 삼계로 208, 50830

(2017년 7월 31일 받음, 2017년 8월 8일 최종수정본 받음, 2017년 8월 8일 게재확정)

직경 190 μm Cu 와이어에 Ni₈₀Fe₂₀ 연자성 물질을 전기도금법으로 증착하여 금속 코어/연자성 셸 구조의 복합 와이어를 제작하고 이 와이어에서 자기임피던스 효과(MI 효과)를 연구하였다. 원통 좌표계에서 복합 와이어의 임피던스 텐서의 두 대각 성분 $Z_{\theta\theta}$ 와 Z_{zz} 는 z 방향으로 가한 자기장에 대해 큰 MI 효과를 나타낸 반면, 비대각 임피던스 $Z_{\theta z}$ 의 MI 효과는 매우 약하게 나타났다. 비대각 자기임피던스 효과가 큰 복합 와이어를 만들기 위해 비틀림 스트레인 하에서 전기도금하는 방법을 시도하였다. Cu 와이어의 한쪽 끝을 약 270° 이상 회전한 상태에서 전기도금 된 복합 와이어는 뚜렷하게 증대된 비대각 MI 효과를 보였으며 360° 회전한 상태에서 도금 된 와이어에서 최대의 비대각 MI 효과를 얻을 수 있었다. 본 연구를 통해 비대각 MI 효과가 큰 복합 와이어를 제작하는 방법을 개발한 것은 금속 코어/연자성 셸 복합 와이어의 자기센서 소재로서의 응용가능성을 높일 것으로 기대된다.

주제어 : 자기임피던스 효과, 임피던스 텐서, 금속 코어/연자성 셸 복합 와이어, 전기도금

I. 서 론

자기임피던스(magneto-impedance, MI) 효과는 연자성 재료에 교류전류를 인가하고 이때 유도되는 교류전압과 인가한 전류의 비로 정의되는 임피던스가 외부자기장에 민감하게 변하는 현상이며, 고감도 자기센서, 스트레스 센서 등에 응용 가능성이 높아 많은 연구가 진행되고 있는 연구분야이다[1-5]. 초기에 MI 효과는 연자성 비정질 와이어 또는 리본에서 많이 연구되었으나 최근 들어 고전도성 비자성 금속 코어에 연자성 셸을 형성한 코어/셸 구조의 와이어 또는 연자성 박막 사이에 고전도성 비자성 금속 박막을 형성한 다층박막에서의 MI 효과에 대한 연구결과들이 많이 발표되고 있다[6-11].

본 연구팀은 이전 연구에서 약 200 μm 직경의 Cu 와이어에 Ni₈₀Fe₂₀를 전기도금하여 코어/셸 구조의 복합와이어 시편을 제작하고, 원통 좌표계에서 자기임피던스 텐서의 대각 성분들(Z_{zz} 와 $Z_{\theta\theta}$)의 자기장 및 주파수 특성을 연구한 결과를 발표하였다[12]. 이 연구를 통해 전기도금으로 만들어진 Cu 코어/Ni₈₀Fe₂₀ 셸 복합 와이어의 대각 자기임피던스 텐서는 모두 민감한 MI 효과를 보이며 Ni₈₀Fe₂₀ 자성 셸의 자화용이 축은 와이어의 길이방향에 가깝다는 것을 알 수 있었다.

이번 연구는 일반적인 전기도금법으로 만들어진 Cu 코어/Ni₈₀Fe₂₀ 셸 복합 와이어의 비대각 MI 효과는 대각 MI 효과에 비해 미약하나 전기도금하는 동안 비틀림 스트레인(torsional strain)을 인가하여 만든 경우 비대각 MI 효과가 증대된다는 것을 보이교자 한다.

II. 금속 코어/자성 셸 복합 와이어의 자기 임피던스 텐서

금속 코어/자성 셸 복합 와이어(이하 복합와이어)에 Fig. 1

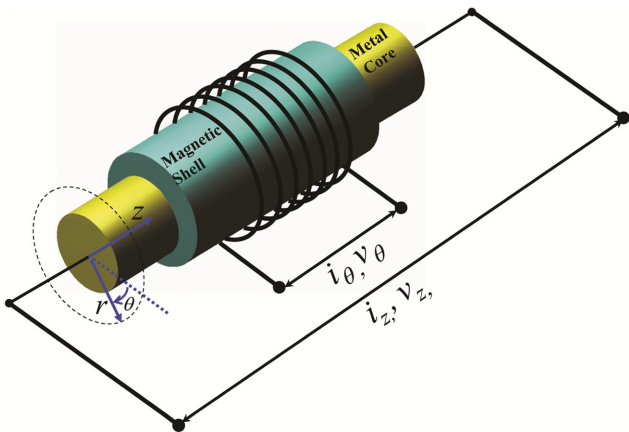


Fig. 1. (Color online) Electrode configuration to measure impedance tensor of metal core/magnetic shell composite wire.

과 같이 전극을 형성하고 원통좌표계를 도입하면 임피던스 텐스 Z_{ij} 는 다음의 행렬식으로 정의된다[12].

$$\begin{pmatrix} v_\theta \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{\theta\theta} & Z_{\theta z} \\ Z_{z\theta} & Z_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\theta \\ i_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 i_z 는 금속코어 양끝에 연결된 전극을 통해 z축 방향으로 인가한 교류전류이며 i_θ 는 와이어를 감고 있는 솔레노이드 코일을 통해 방향으로 인가한 교류를 전류이다. 그리고 v_θ 는 솔레노이드 코일 양단간에 유도된 교류 전위차이며 v_z 는 금속 코어에 연결된 전극 양단간에 유도된 교류 전위차이다.

식(1)로부터 임피던스 텐서의 대각 및 비대각 성분은 다음과 같이 교류전위차와 전류의 비로부터 구할 수 있다.

$$Z_{\theta\theta} = \frac{v_\theta}{i_\theta|_{i_z=0}}, Z_{\theta z} = \frac{v_\theta}{i_z|_{i_\theta=0}}, Z_{z\theta} = \frac{v_z}{i_\theta|_{i_z=0}}, Z_{zz} = \frac{v_z}{i_z|_{i_\theta=0}} \quad (2)$$

복합와이어의 임피던스 텐서는 금속 코어의 컨덕턴스가 자성 셸의 컨덕턴스보다 매우 크기 때문에 인가 전류가 금속 코어로만 흐르며 자성 셸의 두께가 침투깊이(skin depth)보다 작아서 자성 셸 내부의 전자기장이 깊이(r 좌표)에 관계없이 균일하다는 가정하에서 다음과 같이 복소 상대 투자율 (complex relative permeability) 텐서의 성분 μ_{ij}^* 와 연관된다는 것을 맥스웰 방정식으로부터 구할 수 있다[12, 13].

$$Z_{ij} = j2\pi f \{ k_{ji} \mu_o (\mu_{ji}^* - 1) \} + Z_{ij}^c, i, j = \theta, z \quad (3)$$

여기서 $j = \sqrt{-1}$, f 는 교류 전류의 주파수, k_{ji} 는 와이어와 코일의 기하학적 상수, μ_o 는 진공의 투자율이며 Z_{ij}^c 은 자성 셸이 없이 금속 코어만 있을 때(즉 $\mu_{ji}^* = 1$ 경우)의 임피던스로 자기장에 무관한 잔류 또는 배경 임피던스라 할 수 있다. 식(3)에서 알수 있듯이 복합와이어의 임피던스 텐서가 외부 자기장에 민감하게 변하는 MI 효과는 자성 셸의 투자율 텐서의 자기장 의존성에 기인하며, 임피던스 텐서 행렬과 투자율 텐서 행렬은 서로 치환 대응관계를 가진다. 자성 셸의 투자율 텐서는 교류자기장 h_θ 와 h_z 에 의해 자성 셸이 자화되어 발생하는 교류 자속밀도 b_θ 와 b_z 를 결정하며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} b_\theta \\ b_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mu_{\theta\theta}^* & \mu_{\theta z}^* \\ \mu_{z\theta}^* & \mu_{zz}^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_\theta \\ h_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 h_θ 와 h_z 는 각각 금속 코어를 통해 흐르는 교류전류 i_z 와 코일을 통해 흐르는 교류전류 i_θ 가 만드는 교류자기장이다. 식(2), (3), (4)를 종합하면 비대각 임피던스 $Z_{\theta z}$ 의 MI 효과는 (1) 교류 전류 i_z 가 인가될 때 이 전류에 의해 교류자기장 h_θ 가 발생하며 (2) 이 자기장이 자성 셸을 자화시켜 z 방향의 교류자속 밀도 $b_z = \mu_o \mu_{z\theta}^* h_\theta$ 를 유도하며 (3) 이 자속

밀도가 솔레노이드 코일의 단면을 통해 자속의 시간에 따른 변화 $d\phi_z/dt = j2\pi f k_z \mu_0 \mu_z^* i_z$ 를 일으켜 페러데이의 유도법칙에 의해 v_θ 가 발생하는 방식으로 μ_z^* 의 자기장 의존성에 기인하게 된다. 임피던스 텐서의 다른 성분들의 MI 효과도 같은 방식으로 대응하는 투자를 텐서 성분들의 자기장 의존성에 기인하게 된다.

III. 실험

Cu 코어/NiFe 셸 복합와이어는 상업적으로 판매되고 있는 약 190 μm 직경의 Cu 와이어에 NiFe를 전기도금하여 제작하였다. 자성 셸의 조성을 $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ 로 만들기 위해 탈이온수에 NiSO_4 31 g/l, FeSO_4 3.8 g/l, H_3BO_4 24.6 g/l를 용해시킨 도금용액을 사용하였다. 전기도금 셀은 도금용액을 담은 원통형 유리용기의 중심에 Cu 와이어를 워킹전극으로 설치하고 유리원통 내벽을 원통형으로 감싼 백금시트를 카운터전극으로, 워킹전극과 카운터전극 사이에 Ag/AgCl 기준전극을 위치하였다. Cu 와이어의 한쪽 끝은 고정하고 나머지 한쪽 끝은 원하는 각도로 회전하여 고정시킬 수 있는 장치를 도금 셀에 설치하여 비틀림 스트레인을 가한 상태에서 도금이 일어날 수 있도록 하였다. 전기도금은 Potentiostat 장치를 이용하여 Ag/AgCl 기준전극에 대한 Cu 워킹전극의 전위차를 -1.0 V로 일정하게 유지하는 방식으로 진행하였으며 도금된 셸의 두께는 도금시간을 조절하여 약 20 μm 가 되도록 하였다. 도금된 NiFe 셸의 길이는 도금용액의 높이를 조절하여 5 cm가 되게 하였다.

임피던스 텐서의 대각 및 비대각 성분을 측정하기 위해 복합와이어 시편 양쪽 끝의 Cu 부분에 4단자 전극을 은(Silver) 페이스트로 부착하였으며 NiFe 셸이 있는 가운데 부분에 횡수 60 길이 1.6 cm의 솔레노이드 코일을 감았다. 임피던스의 대각 성분 Z_{zz} 는 Cu 코어 양단에 교류전류를 인가하고 이때 Cu 코어 양단에 발생한 전위차 신호를 HP4192A Impedance Analyzer에 연결하여 측정하였으며 $Z_{\theta\theta}$ 는 와이어를 감고 있는 솔레노이드 코일 양단에 교류전류를 인가하고 이때 솔레노이드 코일 양단에 발생한 전위차 신호를 HP4192A Impedance Analyzer에 연결하여 측정하였다. 비대각성분 $Z_{z\theta}$ 는 Cu 코어 양단에 교류전류를 인가하고 이때 솔레노이드 코일 양단에 발생한 전위차를 SR530 Lock-In Amplifier에 연결하여 측정하였다(대각 및 비대각 임피던스에 대한 자세한 측정 방법은 참고문헌[13]에 소개되어 있음). 인가한 교류전류의 주파수는 100 kHz에서 2 MHz 범위 내에서 다양하게 하였으나 진폭은 5 mA로 일정하게 유지하였다. 헬름홀츠 코일을 이용하여 와이어의 길이방향(z축)으로 -200 Oe에서 200 Oe 범위의 외부 자기장(H_z)를 선형왕복으로 변화시키면서 임피던스 텐서의 대

각 및 비대각 성분을 측정하였다. 대칭성에 의해 임피던스 텐서의 두 비대각 성분 $Z_{z\theta}$ 와 $Z_{\theta z}$ 는 같은 자기장 의존성을 가지기 때문에 두 성분 중에서 $Z_{z\theta}$ 만 측정하였다. 자기임피던스 프로파일은 외부자기장 H_z 의 함수로 복소수인 임피던스 텐서의 실수부 Z'_{ij} 및 허수부 Z''_{ij} 를 각각 측정한 후 절대값 $|Z_{ij}| = \sqrt{(Z'_{ij})^2 + (Z''_{ij})^2}$ 을 구하여 $|Z_{ij}|$ vs H_z 그래프로 나타내었다. 도금된 시편의 조성 및 구조는 이전 논문[12]에서 측정된 것과 동일하기에 본 논문에서는 생략한다.

IV. 결과 및 논의

Fig. 2(a)와 (b)와 (c)는 각각 비틀림 스트레인을 가하지 않은 상태에서 전기도금으로 만들어진 Cu 코어/NiFe 셸 복합와이어의 대각 및 비대각 자기임피던스 프로파일을 보여준다. 이 결과를 보면 두 대각 임피던스 $|Z_{\theta\theta}|$ 와 $|Z_{zz}|$ 는 전형적으로 민감한 MI 효과를 나타내지만 비대각 임피던스 $|Z_{z\theta}|$ 는 모든 주파수에서 상대적으로 약한 MI 효과를 보여준다. MI 효과의 크기를 평가하는 잣대로 사용되는 최대 MI비(임피던스 프로파일에서 최대값과 최소값의 차를 $H_z = 200$ Oe 즉 자화가 z 방향으로 포화되었을 때의 임피던스 값으로 나눈 비, $\Delta|Z|_{max}/Z$)로 비교하면 1 MHz 주파수를 기준으로 Fig. 1에 표시된 것과 같이 $|Z_{zz}|$ 의 경우 31% $|Z_{\theta\theta}|$ 의 경우 63%의 최대 MI비를 보였으나 $|Z_{z\theta}|$ 는 약 7%로 MI 효과가 상대적으로 매우 약하게 나타났다. 식(3)에 따라 비대각 임피던스 $Z_{z\theta}$ 의 MI 효과는 μ_z^* 의 자기장 의존성에 기인한다. 따라서 $Z_{z\theta}$ 의 MI 효과가 크지 않다는 것은 본 와이어의 투자율 텐서 $\mu_{z\theta}$ 성분이 외부 자기장에 관계없이 1에 가깝다는 것을 의미하며, 이는 z 방향으로 인가된 교류전류 i_z 가 교류자기장 h_θ 를 발생시켜 자극을 주더라도 z 방향 자화에는 큰 변화를 주지 못한다는 것을 의미한다. 이전 논문에서 본 와이어의 투자율 스펙트럼을 분석하여 자화용이축이 와이어의 길이방향(z 축 방향)에 가깝다는 것을 밝혔다[12]. 자화용이축이 와이어의 길이방향에 가깝다면 h_θ 를 발생시켜 자극을 주더라도 z 방향 자화에는 거의 변화를 주지 못하게 되어 $\mu_{z\theta}$ 값이 1에 가깝게 되며 $Z_{z\theta}$ 의 MI 효과는 크게 나타나지 않게 된다.

본 코어셸 와이어에서 비대각 자기 임피던스 효과가 약한 것은 자기 센서소재로 사용하는데 단점이 될 수 있다. 왜냐하면 MI 효과를 이용한 자기센서의 경우 대각 보다는 비대각 임피던스를 이용하는 것이 노이즈 측면에서 유리하기 때문이다. 현재 스마트폰 용으로 개발되어 시판되고 있는 MI 자기센서도 교류전류는 와이어의 길이방향으로 인가하며 유도된 전압신호는 코일로 측정하는 방식 즉 $Z_{z\theta}$ 의 MI 효과를 적용하고 있다[1, 2]. 따라서 본 복합 와이어를 센서소재로 응용하기 위해서는 비대각 임피던스 효과를 증가시킬 필요가

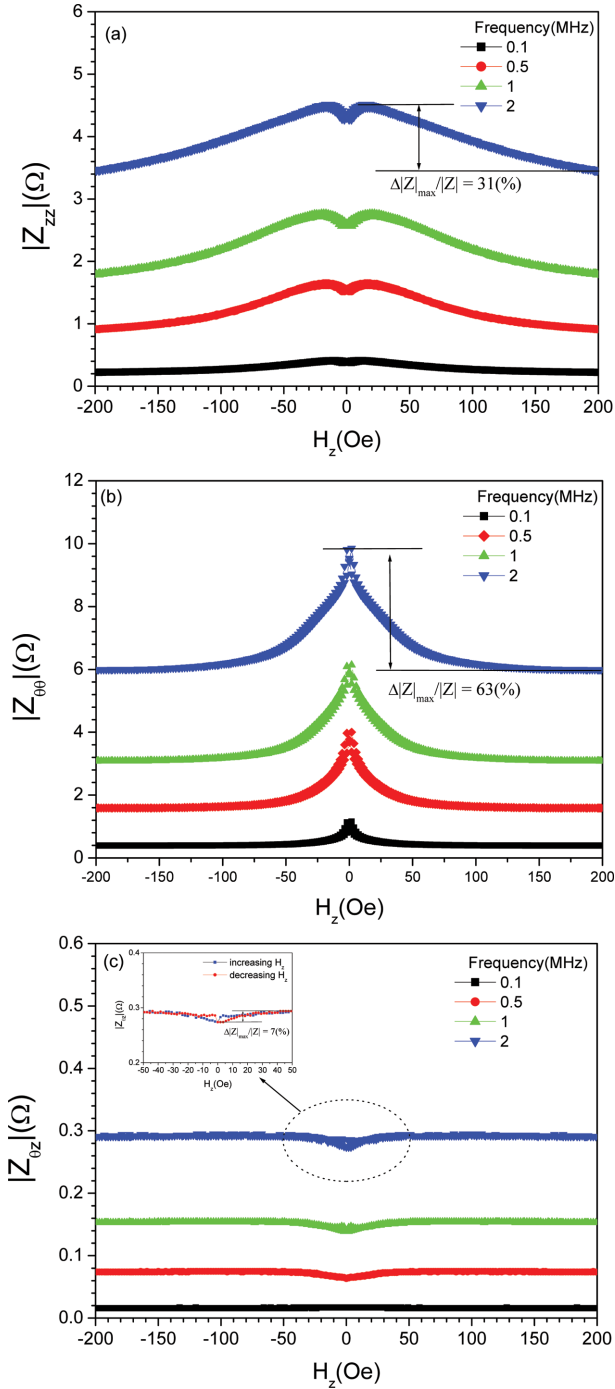


Fig. 2. (Color online) MI profiles (a) $|Z_{\theta\theta}|$ vs H_z , (b) $|Z_{zz}|$ vs H_z and (c) $|Z_{0z}|$ vs H_z of Cu core/Ni₈₀Fe₂₀ shell composite wire electrodeposited without torsional strain.

있다. 본 연구에서는 길이방향에 가까운 자화용이축을 나선형 방향으로 유도하여 Z_{0z} 의 MI 효과를 증가시키고자 하였다. 전기도금하는 동안 와이어에 비틀림 스트레인을 가하면 도금이 끝난 후 이 스트레인을 제거하여도 나선형 방향의 잔류 스트레스가 발생하여 나선형 방향의 자기이방성을 유도할 수 있

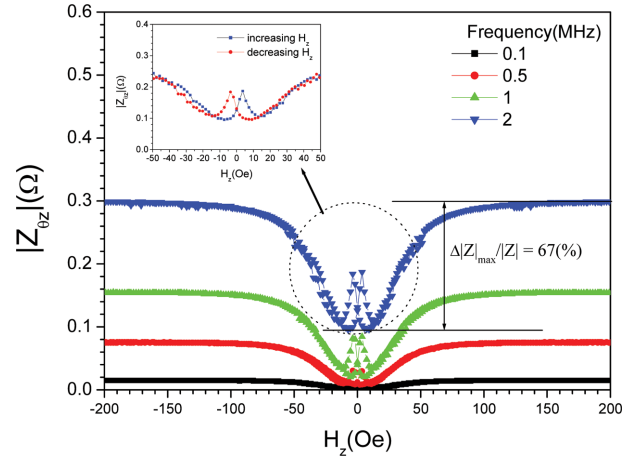


Fig. 3. (Color online) MI profile $|Z_{0z}|$ vs H_z of Cu core/Ni₈₀Fe₂₀ shell composite wire electrodeposited under torsional angle of $\alpha = 360^\circ$.

을 것이라는 착안을 하게 되었다. 실험방법에서 설명했듯이 Cu 와이어의 한쪽 끝을 다양한 각도(비틀림 각도, α)로 회전시켜 비틀림 스트레인을 가한 상태에서 NiFe를 도금한 시편들을 제작하여 자기임피던스 효과를 측정하였다. Fig. 3은 비틀림 각도 $\alpha = 360^\circ$ 하에서 도금된 복합와이어의 $|Z_{0z}|$ MI 프로파일을 보여준다. 이 프로파일을 Fig. 1(c)와 비교하면 $\alpha = 360^\circ$ 비틀림 각도 하에서 도금된 복합 와이어에서 비대각 MI 효과가 매우 크게 증대되었다는 것을 알 수 있다. 1 MHz를 기준으로 $\alpha = 360^\circ$ 시편의 $\Delta|Z|_{max}/|Z|$ 값이 67%로 $\alpha = 0^\circ$ 시편의 7%에 비해 약 60% 증가하였다. 한편 Fig. 3의 비대각 MI 프로파일을 Fig. 2(a)와 (b)의 대각 MI 프로파일과 모양을 비교해 보면 비대각 MI 프로파일의 모양이 대각 프로파일의 모양을 수평축에 대해 뒤집은 형태와 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이는 대각 임피던스 Z_{zz} 와 $Z_{\theta\theta}$ 의 경우 대응되는 투자율 $\mu_{\theta\theta}$ 와 μ_{zz} 가 모두 양의 부호를 가져 z 방향으로 포화되었을 때의 임피던스 값에 더해지는 반면, 비대각 임피던스에 대응되는 투자율 μ_{0z} 값은 음의 부호를 가져 포화되었을 때의 임피던스 값에서 감해지는 방식으로 MI 효과가 나타나기 때문이다(투자율 텐서에 관한 자세한 사항은 참고문헌[13]에 소개되어 있음).

Fig. 4는 도금하는 동안 가한 비틀림 스트레인이 비대각 임피던스 $|Z_{0z}|$ 의 MI 효과에 주는 영향을 자세히 살펴보기 위해 다양한 비틀림 각도 하에서 도금된 시편들의 최대 MI 비를 측정하여 그래프로 그린 것이다. 이 결과를 보면 주파수에 관계없이 $\alpha = 180^\circ$ 까지는 비대각 MI 효과가 크게 증가하지 않으나 270° 이상의 경우 비대각 MI 효과가 뚜렷하게 증가하며 $\alpha = 360^\circ$ 에서 증가효과가 최대가 되며 $\alpha = 450^\circ$ 에서는 다시 감소한다는 것을 알 수 있다. 비대각 MI 효과가 가장 크게 나타난 경우는 $\alpha = 360^\circ$ 시편으로 최대 MI 비가 100

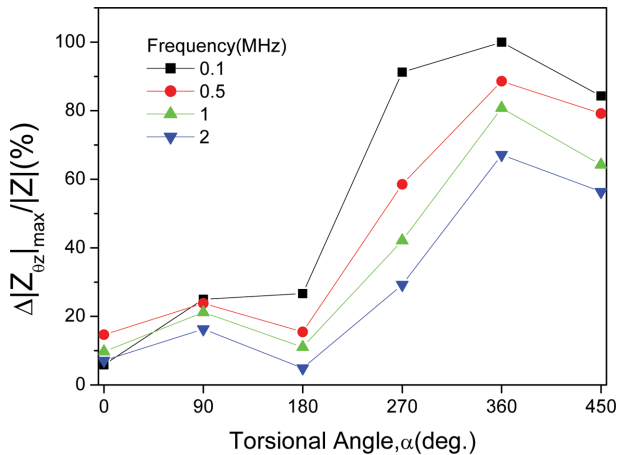


Fig. 4. (Color online) Variation of maximum MI ratio of $|Z_{\theta z}|$ with torsional angle α .

kHz 주파수에서 약 100%, 1 MHz 주파수에서는 67%에 도달하였다.

V. 결 론

진기도금 방법으로 만들어진 Cu 코어/NiFe 셸 복합 와이어의 대각 및 비대각 임피던스 프로파일을 측정된 결과 비대각 임피던스는 대각 임피던스에 비해 매우 약한 MI 효과를 보였다. 나선형 방향으로 자기이방성을 유도하여 비대각 MI 효과가 큰 와이어를 만들기 위해 도금하는 동안 비틀림 스트레인을 가하는 방법을 시도하였다. 이 결과 비틀림 각도를 270° 이상으로 하여 만든 시편에서 비대각 MI 효과가 뚜렷이 증대 되었으며 비틀림 각도가 360°인 시편에서 비대각 임피던스의 최대 MI 비가 100 kHz 주파수에서 약 100% 1 MHz에서 약 67%로 가장 큰 비대각 MI 효과를 얻을 수 있었다. 비틀림 스트레인을 가하여 비대각 MI 효과를 증가시킨 연구

결과는 본 복합 와이어의 자기센서 소재로의 응용가능성을 높일 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2016학년도 안동대학교 연구비와 2016학년도 가야대학교 학술연구비의 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn. **48**, 3833 (2012).
- [2] <http://www.aichi-mi.com>.
- [3] http://www.rohm.co.kr/web/korea/news-detail?news-title=2015-07-02_ad_mi&defaultGroupId.
- [4] P. Kollu, S. S. Yoon, G. W. Kim, C. S. Angani, and C. G. Kim, J. Magn. **15**, 194 (2010).
- [5] A. F. Cobeno, A. Zhukov, J. M. Blanco, V. Larin, and J. Gonzalez, Sens. Act. A **91**, 95 (2001).
- [6] M. H. Phan, H. X. Peng, M. T. Tung, N. V. Dung, and N. H. Nghi, J. Magn. Mater. **316**, 244 (2007).
- [7] M. H. Phan and H. X. Peng, Prog. Mater. Sci. **53**, 323 (2008).
- [8] L. Chen, Y. Zhou, C. Lei, and Z. M. Zhou, Mater. Sci. Eng. B **172**, 101 (2010).
- [9] M. A. Corrêa, F. Bohn, V. M. Escobar, M. S. Marques, A. D. C. Viegas, L. F. Schelp, and R. L. Sommer, J. Appl. Phys. **110**, 093914 (2011).
- [10] A. C. Mishra, T. Sahoo, V. Srinivas, and A. K. Thakur, Physica B: Condens. Matter. **406**, 645 (2011).
- [11] D. L. Chen, X. Li, H. L. Pan, H. Y. Luan, and Z. J. Zhao, Nano-Micro Lett. **6**, 227 (2014).
- [12] S. E. Cho, T. J. Goo, D. Y. Kim, S. S. Yoon, and S. H. Lee, J. Korean Magn. Soc. **25**, 129 (2015).
- [13] S. E. Cho, Ph.D thesis, Andong National University, Korea (2015).