ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(1), 10-15 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.1.010

Magneto-impedance and Magnetic Relaxation in Electrodeposited $Cu/Ni_{80}Fe_{20}$ Core/Shell Composite Wire

Seok Soo Yoon, Seong Eon Cho, and Dong Young Kim*
Department of Physics, Andong National University, Andong 760-749, Korea

(Received 18 December 2014, Received in final form 9 February 2015, Accepted 16 February 2015)

The model for the magneto-impedance of composite wires composed of highly conductive nonmagnetic metal core and soft magnetic shell was derived based on the Maxwell's equations. The Cu(100 μm diameter)/$Ni_{80}Fe_{20}$(15 μm thickness) core/shell composite wire was fabricated by electrodeposition. The impedance spectra for the $Cu/Ni_{80}Fe_{20}$ core/shell composite wire were measured in the frequency range of 10 kHz~10 MHz under longitudinal dc magnetic field in 0 Oe~200 Oe. The spectra of complex permeability in circumferential direction were extracted from the impedance spectra by using the derived model. The extracted spectra of complex permeability showed relaxation-type dispersion which is well curve-fitted with Debye equation with single relaxation frequency. By analyzing the magnetic field dependence of the complex permeability spectra, it has been verified that the composite wire has magnetic anisotropy in longitudinal direction and the origin of the single relaxation process is the magnetization rotation in circumferential direction.

Keywords : magneto-impedance, core/shell composite wire, complex permeability spectrum, magnetic relaxation

전기도금 된 $Cu/Ni_{80}Fe_{20}$ 코어/쉘 복합 와이어에서 자기임피던스 및 자기완화

윤석수 · 조성언 · 김동영*
안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 760-749

(2014년 12월 18일 받음, 2015년 2월 9일 최종수정본 받음, 2015년 2월 16일 게재확정)

높은 전기전도도를 가진 비자성 금속 코어와 연자성 쉘을 가진 복합와이어의 자기임피던스를 원주방향 투자율로 표현하는 모델을 맥스웰 방정식으로부터 유도하였다. Cu(직경 100 μm)/$Ni_{80}Fe_{20}$(두께 15 μm) 코어/쉘 복합 와이어를 전기도금방법으로 제작하였다. 코어/쉘 복합 와이어의 길이방향으로 10 kHz에서 10 MHz 범위의 주파수를 가지는 교류전류와 0 Oe에서 200 Oe 범위의 직류 자기장을 가하여 임피던스 스펙트럼의 자기장 의존성을 측정하였다. 유도된 모델을 적용하여 측정된 임피던스 스펙트럼으로부터 원주방향 복소 투자율 스펙트럼을 뽑아내었다. 뽑아낸 원주방향 복소 투자율 스펙트럼은 단일 완화주파수의 Debye 식으로 매우 잘 곡선적합되는 완화형 분산을 보였다. 원주방향 복소 투자율 스펙트럼의 자기장 의존성을 분석하여, 본 코어/쉘 복합 와이어의 경우 길이 방향의 자기이방성을 가지며 원주방향으로의 자화회전이 완화형 복소 투자율 스펙트럼에 기여하는 단일 성분이라는 것을 규명하였다.

주제어 : 자기임피던스, 코어/쉘 복합와이어, 복소 투자율 스펙트럼, 자기 완화

I. 서 론

자기임피던스(magneto-impedance) 효과(MI 효과)는 연자성 재료 양쪽에 전극을 형성하고 교류전류를 가했을 때 전극양단간의 교류전위차와 전류의 비로 정의되는 임피던스가 외부 자기장에 민감하게 변하는 효과를 말하며, 고감도 자기센서로의 응용가능성으로 인해 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이다[1-4]. MI 효과는 초기에는 주로 Co 주성분의 비정질 와이어 또는 리본에서 연구가 이루어졌으며, 최근들어 Cu와 같은 높은 전기전도도의 비자성 금속 코어와 NiFe와 같은 연자성 쉘로 구성된 복합와이어 또는 다층박막에서의 MI 효과에 대한 연구결과들이 발표되고 있다[5-9]. 이와 같은 코어/쉘 복합구조에서 MI 효과는 코어를 통해 일어나는 전기저항과 쉘

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5445,
Fax: +82-54-823-1628, e-mail: dykim@anu.ac.kr

을 통해 일어나는 자기유도 성분이 분리되어 포함되기 때문에 두 성분이 복합적으로 존재하는 비정질 와이어 또는 리본에서와 같이 침투깊이(skin depth)를 고려하지 않아도 되며 효과의 크기도 커진다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Cu 와이어에 $Ni_{80}Fe_{20}$를 전기도금하여 코어/쉘 구조의 복합와이어 시편을 제작하고 이 시편에 대해 임피던스의 실수부와 허수부 스펙트럼의 자기장 의존성을 측정하였다. 측정된 임피던스 스펙트럼으로부터 원주방향의 복소투자율 스펙트럼을 뽑아내고 이 스펙트럼을 자기완화 현상으로 해석하여 전기도금으로 제작한 Cu/ $Ni_{80}Fe_{20}$ 코어/쉘 구조에서 MI 효과의 근원을 밝히고자 하였다.

II. 모 델

Fig. 1(a)에서 보여주는 것과 같은 Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어의 구조와 좌표계를 고려하였다. 이 와이어에 교류전류 $i = i_o e^{j2\pi ft}$를 가했을 때의 임피던스를 맥스웰 방정식들로부터 구하였다. Fig. 1(b)는 Cu/NiFe 와이어의 x-z 단면을 보여준다. 여기서 Cu 코어의 반경을 a, NiFe 쉘의 외경과 길이를 각각 b와 l이라고 하자. Fig. 1(b)에서 1로 표시 된 전류공급원의 오른쪽 단에서 출발하여 전류가 흐르는 중심경로를 지나 다시 1로 되돌아 오는 폐경로 c에 대한 전기장의 선적분은 맥스웰 방정식에 의해 다음 식을 만족한다.

$$\oint_c \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l} = -\frac{\partial}{\partial t}\int_s \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{a} \tag{1}$$

여기서 오른쪽 항은 폐경로 c에 의해 둘러쌓인 면적 S에 대한 자기선속의 시간변화율이다. Cu 코어의 전기전도도와 면적이 NiFe 보다 매우크기 때문에 교류 전류 i는 Cu 코어 내로 국한되어 흐른다고 가정할 수 있으며 이때 식(1)의 왼쪽 항의 전기장 선적분 값은 다음과 같이 된다.

$$\oint_c \boldsymbol{E}\cdot d\boldsymbol{l} = -v + iR_{cu} \tag{2}$$

여기서 v는 전류공급원 양단간의 전위차이며 R_{cu}는 Cu 코어만의 전기저항이다. 식(1)의 오른쪽 항의 면적분을 계산하기 위해 교류전류가 흐를 때 NiFe 쉘 내부에 발생하는 자기장 $\boldsymbol{H}$을 다음의 맥스웰 방정식을 적용하여 구할 수 있다.

$$\oint \boldsymbol{H}\cdot d\boldsymbol{l} = \int \boldsymbol{J}\cdot d\boldsymbol{a} \tag{3}$$

위 식의 왼쪽 항을 NiFe 쉘 내부를 지나는 중심축으로부터 반경 r을 가진 동심원 경로에 대해서 선적분하며, 오른쪽 항은 이 동심원에 둘러쌓인 원반에 대해 면적분하면 다음과 같이 된다.

$$H_\theta \pi r = i, \qquad a < r < b \tag{4}$$

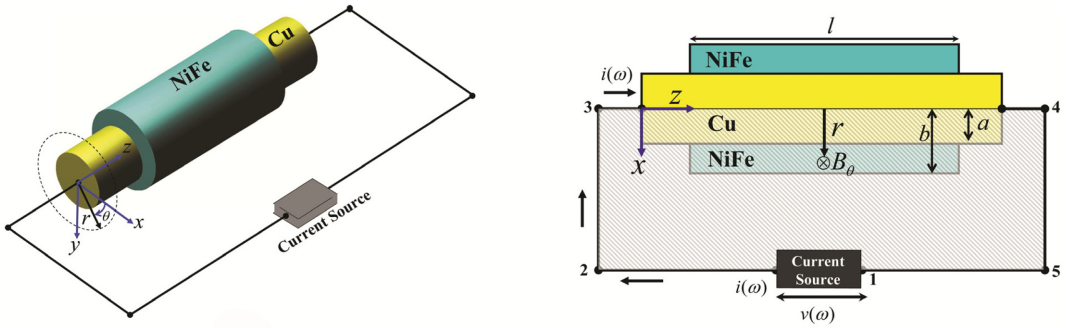
여기서 원통 대칭으로 인해 $\boldsymbol{H}$는 원주방향 성분 H_θ만 가지며 교류전류 i는 Cu 코어로만 흐른다는 가정이 사용되었다. 식(4)로부터 교류전류 i가 흐를 때 NiFe 쉘 내부에 발생하는 자속밀도를 구하면 아래 식과 같이 된다.

$$B_\theta = \mu_0 \mu_\theta^* H_\theta = \mu_0 \frac{\mu_\theta^* i}{2\pi r}, \qquad a < r < b \tag{5}$$

여기서 μ_θ는 진공에서의 투자율이며 μ_θ^*는 원주방향의 상대투자율로 교류에서는 B_θ와 H_θ가 위상차를 가지기 때문에 일반적으로 $\mu_\theta^* = \mu_\theta' - j\mu_\theta''$으로 복소수로 표현되며 주파수에 의존한다. 식(5)를 이용하여 식(1) 오른쪽 항에 있는 자속을 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\int_s \boldsymbol{B}\cdot d\boldsymbol{a} = \int_a^b B_\theta l dr + \int_{s'} B_\theta da = \int_a^b \frac{\mu_0 \mu_\theta^* i}{2\pi}\frac{1}{r} l dr + L_{cu} i = \mu_0 \frac{l}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right)\mu_\theta^* i + L_{cu} i \tag{6}$$

여기서 s'은 s에서 NiFe 면을 제외한 나머지 면적이며 L_{cu}는 $a = b$일 때 즉 NiFe 쉘이 없이 Cu 코어만 존재할 때의 자체 인덕턴스로 정의되었다. 식(2)와 식(6)을 식(1)에 대입한 후 교류전압을 구하면 다음 식을 얻을 수 있다.



(a) (b)

Fig. 1. (Color online) (a) Schematic diagram and (b) cross section of Cu/NiFe core/shell composite wire under applied ac current.

$$v = (R_{cu} + jk\mu_\theta^* 2\pi f + jL_{cu}2\pi f)i, \text{ 여기서 } k = \mu_0 \frac{1}{2\pi}\ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7)$$

임피던스는 v/i이므로 식(7)로부터 Cu/NiFe 복합와이어의 구하면 복소수 $Z = Z' + jZ''$가 되며 실수부와 허수부는 각각 다음과 같이 된다.

$$Z' = R_{cu} + 2\pi f k\mu_\theta'' \quad (8a)$$

$$Z'' = 2\pi f k\mu_\theta' + 2\pi f L_{cu} \quad (8b)$$

Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어의 임피던스에 대한 식(8a)와 (8b)를 보면 임피던스가 외부에서 가한 자기장에 의존하는 MI 효과는 원주방향 투자율 스펙트럼의 자기장 의존성에 기인한다는 것을 알 수 있다. 비정질 와이어 경우도 MI 효과의 근원이 원주방향 투자율의 자기장 의존성이라는 것은 같지만 이 경우 MI 효과는 침투깊이가 시편의 반경에 비해 짧아지는 임계주파수 이상의 주파수에서 두드러지게 나타나는 반면, Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어의 경우 침투깊이와 관계없다는 차이가 있다. 그리고 비정질 와이어의 경우 임계주파수 이상에서 임피던스는 원주방향 투자율의 제곱근에 비례하는 반면, Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어의 경우 원주방향 투자율에 비례하기 때문에 투자율의 자기장 의존성이 같은 재료일 경우 코어/쉘 복합와이어에서 MI 효과가 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있다.

III. 실　　험

Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어 시편은 상업적으로 판매되고 있는 약 100 μm 직경의 Cu 와이어에 NiFe를 전기도금으로 증착하는 방법으로 제작하였다. 도금용액은 $Ni_{80}Fe_{20}$ 조성으로 만들기 위해 탈이온 수에 $NiSO_4$ 31 g/*l*, $FeSO_4$ 3.8 g/*l*, H_3BO_4 24.6 g/*l*를 용해시켜 준비하였으며, 도금은 Cu 워킹전극에 Ag/AgCl의 기준전극에 대해 –1.0 V의 정전압을 가하는 방식으로 행하였으며 도금과정 동안 원통형 백금 카운터 전극과 워킹전극 사이에 흐르는 전류를 컴퓨터로 모니터링하였다. 도금된 NiFe 쉘의 두께는 도금시간으로 조절하였으며 길이 *l*은 5 cm가 되도록 하였다.

임피던스의 실수부와 허수부 측정은 Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어 시편 양쪽 끝에 있는 NiFe가 도금되지 않은 Cu 부분에 4단자 전극을 은(Silver) 페이스트로 부착한 후 HP4192A Impedance Analyzer 장치에 연결하여 이루어졌다. Impedance Analyzer를 이용하여 주파수 10 kHz부터 10 MHz 범위까지 $i_o = 5$ mA 진폭의 교류전류를 가하면서, 임피던스의 실수부 Z'와 허수부 Z'' 스펙트럼을 측정하였다. 실수부 Z'와 허수부 Z'' 스펙트럼의 자기장 의존성을 측정하기 위해 헬름홀츠 코일을 이용하여 와이어의 길이방향(z축)으로 0 Oe에서 +200 Oe 범위의 외부 자기장 H_e를 가하였다. 도금된 NiFe의 조성과 두께는 EDX(Energy Dispersive X-ray) 분광기가 장착된 FE-SEM(Field-Emission Scanning Electron Microscope) 장치를 이용하여 측정하였다.

IV. 결과 및 논의

Fig. 2는 제작된 Cu/NiFe 코어/쉘 복합와이어의 경계부분에 대한 광학현미경 사진과 NiFe와 Cu 부분의 FE-SEM 사진을 각각 보여준다. 이 결과를 보면 약 100 μm 직경의 Cu 와이어 위에 NiFe가 균일하게 잘 도금되었으며 도금된 층의 두께는 약 15 μm라는 것을 알 수 있다. 그리고 EDX 분광기로 측정한 도금된 층의 조성은 $Ni_{80}Fe_{20}$으로 확인되었다.

Fig. 3(a)와 (b)는 전기도금으로 제작된 Cu/$Ni_{80}Fe_{20}$ 코어/쉘 복합와이어에 대해 측정한 임피던스 실수부 $Z'(f)$와 허수부 $Z''(f)$ 스펙트럼의 자기장 H_e 의존성을 각각 보여준다. Fig. 3(a)와 (b)에서 비교를 위해 NiFe 쉘 층이 없는 Cu 와이어 만의 스펙트럼도 함께 나타내었다. 이 결과들을 보면 $Z'(f)$과 $Z''(f)$ 모두 1 MH부터 10 MHz 범위에서 H_e에 민감한 의존성을 보여주며 H_e가 커질수록 크기가 감소하여 Cu만 있을 때의 스펙트럼에 접근해 간다는 것을 알 수 있다. 식(8a)와 (b)에서 알 수 있듯이 $Z'(f)$와 $Z''(f)$의 주파수 및 자기장 의존성은 원주방향 복소 투자율의 주파수 및 자기장 의존성을 반영한다. 주어진 주파수와 자기장 하에서 원주방향 복소 투자율의 실수부 μ_θ'와 허수부 μ_θ''는 식(8a)와 (b)을 이용하면 다음과 같이 측정된 임피던스 값으로부터 뽑아낼 수 있다.

$$\mu_\theta'(f, H_e) = \{Z''(f, H_e) - 2\pi f L_{cu}\}/(2\pi f k) \quad (9a)$$

$$\mu_\theta''(f, H_e) = \{Z'(f, H_e) - R_{cu}\}/(2\pi f k) \quad (9b)$$

Fig. 4(a)와 (b)는 식 (9a)와 (9b)를 이용하여 Fig. 3(a)와 (b)

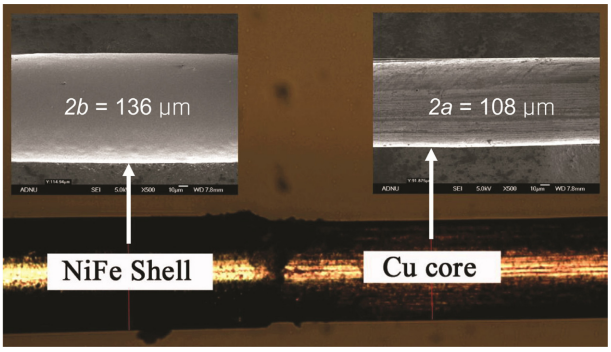


Fig. 2. (Color online) The structure of electrodeposited Cu/NiFe core/shell composite wire measured by optical microscope (background photo) and FE-SEM (inserted photos).

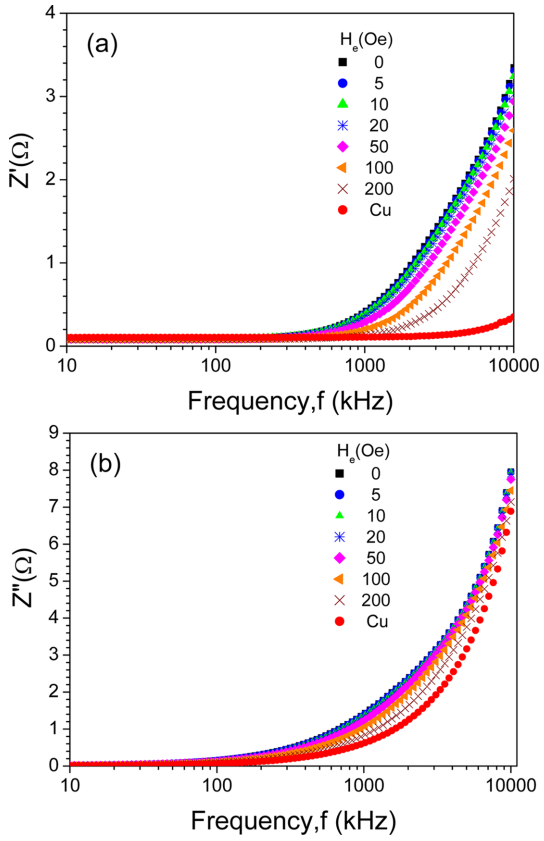


Fig. 3. (Color online) Magnetic field dependencies (a) real and (b) imaginary parts of impedance spectrum for the Cu(100 μm diameter)/ $Ni_{80}Fe_{20}$(15 μm thickness) core/shell composite wire.

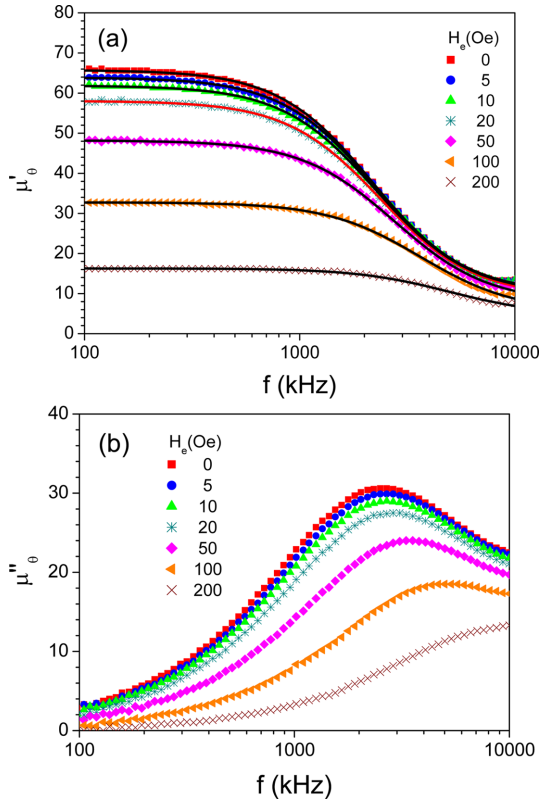


Fig. 4. (Color online) Magnetic field dependencies (a) real and (b) imaginary parts of circumferential complex permeability spectrum for the Cu(100 μm diameter)/$Ni_{80}Fe_{20}$(15 μm thickness) core/shell composite wire. The lines in (a) are the curves obtained by numerical nonlinear curve-fitting with Debye equation.

의 임피던스 스펙트럼으로부터 뽑아낸 $\mu_\theta'(f)$와 $\mu_\theta''(f)$의 자기장 의존성을 진공중에서의 투자율 μ_0에 대한 상대적인 값으로 보여준다. Fig. 4(a)의 $\mu_\theta'(f)$는 100 kHz 주파수 근처에서는 주파수가 증가해도 거의 일정한 값을 보이다가 1 MHz에 가까워지면 감소하기 시작하며, 주파수가 더 증가하면 급격한 감소를 보인 후 10 MHz 근처에서는 다시 일정한 값으로 접근함을 알 수 있다. Fig. 4(b)의 $\mu_\theta''(f)$는 주파수가 증가함에 따라 증가하다가 $\mu_\theta'(f)$가 급격한 감소를 보인 주파수 영역의 중심 주파수 부근에서 피크값을 보인 후 다시 감소하는 경향을 보여준다. 이와 같은 복소 투자율의 주파수 스펙트럼은 교류자기장의 주파수가 원주방향 투자율에 기여하는 자화의 고유 주파수(완화 주파수) 보다 클 경우 자기장의 변화를 따라가지 못하고 뒤쳐지게 되는 현상으로 인해 생기는 전형적인 완화형 분산(relaxation-type dispersion)이다. 단일 고유 주파수를 가지는 완화형 분산의 경우 복소투자율 스펙트럼은 다음의 Debye식으로 표현된다[10].

$$\mu_\theta' = \mu_l + \frac{\mu_l - \mu_h}{1 + (f/f_r)^2} \tag{10a}$$

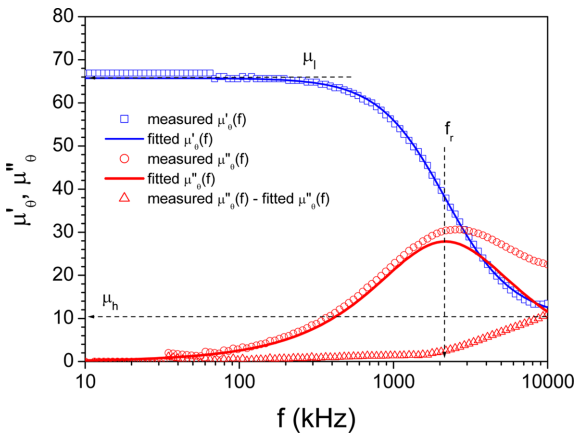


Fig. 5. (Color online) Numerical nonlinear curve-fitting with Debye equation for circumferential complex permeability spectra for the core/shell composite wire at H_e = 0 Oe.

$$\mu_\theta'' = \frac{(\mu_l - \mu_h)(f/f_r)}{1 + (f/f_r)^2} \tag{10b}$$

여기서 f_r은 완화주파수이며, μ_l과 μ_h는 각각 $f_r >> f$의 저주파수와 $f_r << f$ 고주파수에서 μ_θ'의 극한값이다.

Fig. 5는 Fig. 4(a)와 (b) 스펙트럼 중에서 대표적으로 $H_e = 0$ 경우의 스펙트럼을 식 (10a)와 (10b)를 가지고 수치적 비선형 곡선적합(numerical nonlinear curve fitting)을 수행한 결과를 보여준다. Fig. 5에서 $\mu_\theta'(f)$에 대한 곡선접합 결과를 보면 측정된 스펙트럼이 식(10a)의 Debye 식을 매우 잘 따른다는 것을 알 수 있다. $\mu_\theta''(f)$ 곡선의 경우 전반적으로 식 (10b)의 Debye 식을 따르는 성분이 지배적이며 여기에 고주파수 영역에서 나타나는 또 다른 기여가 약하게 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 4(a)에 있는 선으로 된 곡선들은 각 H_e에서 측정된 $\mu_\theta'(f)$ 스펙트럼에 대해 Debye 식을 가지고 수치적 비선형 곡선접합을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 이 결과를 보면 H_e 값에 관계없이 $\mu_\theta'(f)$는 식(10a)을 매우 잘 따른다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 임피던스 분석장치들로 측정이 가능한 주파수(10 MHz 이하)에서 자성 재료의 복소투자율 스펙트럼은 자화회전과 자벽이동의 2가지 성분을 가지며 것으로 알려져 있다[11-14]. 본 실험에서의 주파수 범위에서 Cu/$Ni_{80}Fe_{20}$ 와이어가 단일 성분의 완화형 복소투자율 스펙트럼을 보인 것은 자화회전과 자벽이동 2성분 중 하나만 원주방향 투자율에 기여하고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 원주방향 스펙트럼에서 단일 성분의 완화분산이 측정된 것은 $Ni_{80}Fe_{20}$ 쉘의 자기이방성이 원주방향이어서 자벽이동만이 원주방향 투자율에 기여하거나 길이방향이어서 자화회전만이 원주방향 투자율에 기여하고 있을 2가지 가능성을 제시한다. 그런데 투자율 스펙트럼의 자기장 H_e의 의존성을 보면 이 2가지 가능성 중에서 자기이방성 방향이 길이방향이어서 자화회전만이 원주방향 투자율에 기여하는 경우가 본 시편에 해당한다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면 자기이방성 방향이 원주방향인 경우 $H_e = 0$에서는 자벽이동 성분만이 기여할 수 있으나 자기장 H_e를 와이어의 길이방향으로 가하면 길이방향으로 포화되지 않은 자기장 크기에 대해서는 원주방향 투자율에 자벽이동과 함께 자화회전 성분도 나타나야하기 때문이다. 반면에 자기이방성 방향이 길이방향인 경우 모든 H_e에서 자벽의 방향이 원주방향과 수직으로 놓이기 때문에 H_e에 관계없이 자화회전 성분만이 단일 완화형 분산에 기여하게 된다[11, 14]. Fig. 6은 수치적 비선형 곡선접합으로부터 구한 식 (10a)에 있는 완화 파라메터 μ_l과 f_r의 H_e 의존성을 보여준다. Fig. 6에서 μ_l 값은 자기장 H_e가 증가함에 따라 거의 선형에 가까운 매우 급격하면서도 단순한 감소를 보여주고 있다. μ_l이 이와 같이 H_e에 따라 단순 감소한다는 것으로부터 본 시편의 경우 자기이방성 방향이 와이어의 길이방향으로 놓여있다는 것을 보다 명확하게 알 수 있다. 왜냐하면 자기이방성이 원주방향이라면 μ_l은 처음에는 H_e 값에 따라 증가하다가 H_e가 이방성 자기장 값보다 커지면 다시 감소하는 경향을 보이기 때문이다[15]. Fig. 6에서 완화주파수 f_r 값은 H_e가 증가함에 따라 약 2 MHz에서 5 MHz까지 거의 직선에 가깝게 증가한다는 것을 보여준다. 완화주파수 f_r이 H_e에 따라 증가하는 것으로부터 원주방향 투자율 스펙트럼에서 완화를 일으키는 자화가 자화회전 성분이라는 것을 보다 명확하게 알 수 있다. 왜냐하면 자벽이동 성분의 경우 완화주파수는 자벽의 유효질량과 감쇠계수(damping coefficient)에만 의존하여 H_e에 무관한 반면 자화회전의 경우 유효자기장에 비례하기 때문이다.

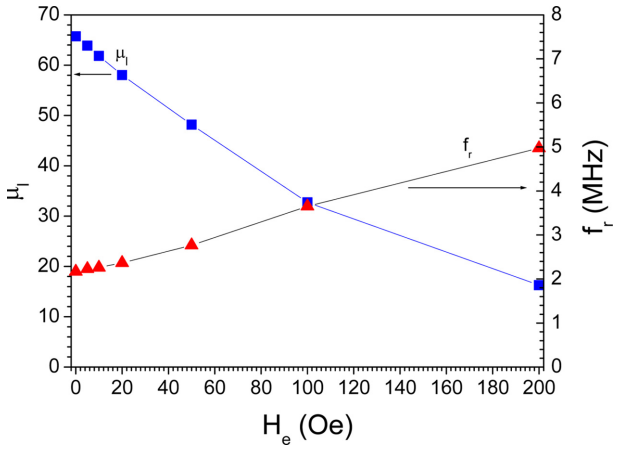


Fig. 6. (Color online) Magnetic field dependencies of relaxation parameters obtained by the numerical nonlinear curve-fitting for circumferential complex permeability spectra of the core/shell composite wire.

V. 결　　론

전기도금 방법으로 약 100 mm 직경의 Cu 와이어 위에 $Ni_{80}Fe_{20}$를 약 15 μm의 두께로 전기도금하여 전기전도도가 매우 높은 비자성 금속코어에 연자성 쉘이 형성된 구조의 복합 와이어 시편을 제작하였다. 제작한 시편에 대해 측정한 임피던스의 실수부와 허수부 스펙트럼은 1 MH부터 10 MHz까지의 주파수 범위에서 와이어의 길이방향으로 가한 자기장 H_e에 민감한 의존성을 보여주었다. 임피던스 스펙트럼으로부터 원주방향 복소 투자율 스펙트럼을 뽑아내었으며 이 스펙트럼은 100 kHz부터 10 MHz의 주파수 영역에서 완화형 분산을 보여주었다. 복소 투자율 스펙트럼을 단일 완화주파수의 Debye 식을 가지고 수치 곡선접합을 한 결과 매우 잘 일치하였다. 복소 투자율 스펙트럼의 H_e 의존성을 분석하여 $Ni_{80}Fe_{20}$ 쉘은 길이방향의 자기이방성을 가지며 원주방향 투자율 스펙트럼은 자화회전의 완화과정으로부터 기인한다는 것을 밝힐 수 있었다. 코어/쉘 복합구조에서 MI 효과의 근원에 대한 본 연구 결과를 토대로 높은 MI 효과를 보이는 재료를 개발하고 이를 자기센서에 응용하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

감사의 글

본 연구는 2012 학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

References

[1] K. Mohri, T. Kohsawa, K. Kawashima, H. Yoshida, and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn. **28**, 3150 (1992).
[2] M.-H. Phan, H.-X. Peng, Prog. Mater. Sci. **53**, 323 (2008).
[3] http://www.aichi-mi.com/.
[4] P. Kollu, S. S. Yoon, G. W. Kim, C. S. Angani, and C. G. Kim, J. Magn. **15**, 194 (2010).
[5] A. S. Antonov, A. L. Rakhmanov, N. A. Buznikov, A. F. Prokoshin, A. B. Granovsky, N. S. Perov, and N. A. Usov, IEEE Trans. Magn. **35**, 3640 (1999).
[6] M. H. Phan, H. X. Peng, M. T. Tung, N. V. Dung, and N. H. Nghi, J. Magn. Magn. Mater. **316**, 244 (2007).
[7] L. Chen, Y. Zhou, C. Lei, and Z. M. Zhou, Mater. Sci. Eng. B **172**, 101 (2010).
[8] A. C. Mishra, T. Sahoo, V. Srinivas, and A. K. Thakur, Physica B: Condensed Matter **406**, 645 (2011).
[9] D. L. Chen, X. Li, H. L. Pan, H. Y. Luan, and Z. J. Zhao, Nano-Micro Lett. **6**, 227 (2014).
[10] J. Ross Macdonald, Impedance Spectroscopy, Wiley, New York (1987) Chap. 2.
[11] P. T. Squire, J. Magn. Magn. Mater. **87**, 299 (1990).
[12] T. Nakamura, J. Magn. Magn. Mater. **168**, 299 (1997).
[13] C. G. Kim, S. S. Yoon, and S. C. Yu, Appl. Phys. Lett. **76**, 3463 (2000).
[14] S. S. Yoon and C. G. Kim, Appl. Phys. Lett. **78**, 3280 (2001).
[15] S. S. Yoon, S. C. Yu, G. H. Ryu, and C. G. Kim, J. Appl. Phys. **85**, 5432 (1999).