

Analysis of Ferromagnetic Resonance Signals in Ni Nanotubes Fabricated by Electrodeposition

Dong Young Kim and Seok Soo Yoon*

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

(Received 5 November 2019, Received in final form 15 December 2019, Accepted 16 December 2019)

The Ni nanotubes with 400 nm of diameter, 2.4 μm of length and 60 nm of thickness were fabricated by electrodeposition using porous polycarbonate template. The ferromagnetic resonance (FMR) signals were measured in parallel (H_z) and perpendicular (H_x) direction to length of Ni nanotubes, respectively. These two FMR signals showed totally different behaviors. The FMR signals measured in H_z showed single resonance behavior and it was explained by bar shape. While, the FMR signals measured in H_x showed double resonance behavior, which was due to the shape anisotropy of ring type.

Keywords : electrodeposition, magnetic nanotubes, magnetic nanowires, ferromagnetic resonance, nano-composites

전기도금으로 제작한 니켈 나노튜브의 강자성 공명 신호 분석

김동영 · 윤석수*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2019년 11월 5일 받음, 2019년 12월 15일 최종수정본 받음, 2019년 12월 16일 게재확정)

본 연구에서는 직경이 400 nm, 길이가 2.4 μm 이고 두께 60 nm인 니켈 나노튜브를 기공이 있는 폴리카보네이트 형판을 사용하여 전기도금으로 제작하였다. 나노튜브의 길이에 평행한 방향(H_z)과 수직인 방향(H_x)에서 강자성 공명 신호를 각각 측정하였다. 이들 두 방향에서 측정한 강자성 공명 신호는 서로 상이한 특성을 보였다. H_z 에서 측정한 강자성 공명 신호는 단일 공명 특성을 보였으며, 이는 평면의 막대 형상으로 해석하였다. 한편, H_x 에서 측정한 강자성 공명 신호는 두 개의 공명 특성을 보였으며, 이는 링 모양의 형상 이방성 특성에 기인함을 알 수 있었다.

주제어 : 전기도금, 자성 나노튜브, 자성 나노와이어, 강자성 공명, 나노-복합재료

I. 서 론

최근 들어 규칙적으로 배열된 자성 나노와이어 및 나노튜브는 고밀도 자기기록 장치[1], 스핀트로닉스 디바이스[2], 바이오메디컬 진단[3] 등 정보통신 및 의료 분야에서 응용 가능성이 높아 지속적인 연구가 진행되고 있다. 나노와이어 및 나노튜브를 만드는 여러 가지 방법들 중에서 전기도금은 저렴하고 쉽게 나노 구조를 제작할 수 있는 장점이 있다. 전기도금으로 만들어진 나노와이어나 나노튜브는 수십에서 수백 나노미터 크기의 기공이 배열된 양극산화 알루미늄(Anodized Aluminum Oxide)이나 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC)

형판을 사용한다. 이들 형판의 기공에 전기도금으로 자성 재료를 채워 넣는 방법이 주로 사용되고 있으며, 도금 공정 조건에 따라 와이어 또는 튜브 등 다양한 모양의 나노 구조체가 형성된다[4,5]. 나노와이어 또는 나노튜브의 직경은 형판의 기공 크기인 수십에서 수백 나노미터 크기를 가지게 된다. 한편 나노와이어 또는 나노튜브의 길이는 형판의 두께에 의존하며, 이 또한 수십 나노미터에서 수 마이크로미터까지의 두께가 보고되고 있다.

나노 구조를 갖는 자성 재료는 길이나 직경, 두께 등 모양에 기인한 형상 이방성 특성이 두드러지게 나타나며, 모양에 의한 특이한 지구 특성을 이론적으로 해석하고자 하는 연구들이 최근에 활발하게 진행되고 있다. 이러한 이론들은 교환 에너지와 형상 이방성 에너지 간의 상호작용으로 인해 다양한 자화 반전 모드가 가능하기 때문으로 알려지고 있다[6-9].

특히 자성 나노튜브는 길이나 직경, 두께 등을 조절한 재료의 제조가 어려워 이론적인 해석 결과들만 보고되고 있다.

나노튜브의 자성 특성은 주로 자화 곡선 측정을 통하여 이루어지고 있다[10]. 자화 곡선은 자기장에 따른 자화 변화를 나타내고 있으나, 나노 구조에 기인한 자성 특성 변화를 판별하기는 어렵다. 따라서 자화의 작은 변화에도 민감한 신호 특성을 갖는 강자성 공명(ferromagnetic resonance, FMR) 실험이 수행되고 있다. 나노튜브는 제조가 어려워 나노튜브 자체에 대한 강자성 공명 신호 측정 결과는 보고되지 않고 있다. 한편 나노 두께를 갖는 박막을 말아서 만든 마이크로 크기의 튜브 재료에 대한 강자성 공명 신호가 보고되고 있다[11]. 마이크로 크기의 튜브 재료에 대한 강자성 공명 신호는 튜브의 길이 방향과 길이에 수직인 방향에 따른 형상에 기인한 매우 특이한 신호 특성을 보였다. 그러나 이들 특이한 신호에 대한 체계적인 분석은 아직 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 전기도금으로 직경이 400 nm이고, 길이가 2.4 μm , 두께가 60 nm인 니켈(Ni) 나노튜브 시편을 제작하였다. 제작한 니켈 나노튜브의 길이 방향과 길이에 수직인 방향 각각에 대하여 강자성 공명 신호를 측정하였다. 두 방향에 대한 공명 신호의 특성을 나노튜브의 형상 이방성 관계에서 분석하였다.

II. 실험

본 실험에서는 전기도금으로 규칙적으로 배열된 니켈(Ni) 나노튜브를 제작하기 위하여 두께가 2.4 μm 이고 직경이 400 nm인 기공이 배열된 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 형판을 사용하였다. 니켈 전기도금에 필요한 작용 전극을 형성하기 위하여 PC 형판의 한쪽 면에 DC 스퍼터링으로 금(Au)을 증착하였다. 전기도금을 위한 3 전극 도금셀은 상용의 Ag/AgCl 기준 전극, 원반형 백금의 상대 전극 및 전기도금이 일어나는 작용 전극으로 구성하였다. 나노튜브는 PC 형판에서 Au가 증착된 면이 도금용액과 바로 접촉하는 Face up 도금방법을 사용하였다[12]. 도금하는 동안 기준 전극과 작용 전극 사이의 전위차는 정전압 도금 방법을 사용하여 일정하게 유지하였다. 전기도금에서 사용한 Ni 전해액은 순수한 물 1 L에 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 15.48 g, H_3BO_3 12.37 g을 용해 시켜 제조하였다. 도금하는 동안 기준 전극에 대한 작용 전극의 전위차는 -1.0 V로 유지하였다. 제작된 나노튜브의 구조는 도금된 PC 형판을 40 $^\circ\text{C}$ 의 다이클로로메탄(CH_2Cl_2) 용액 속에서 48시간 동안 PC를 용해시킨 뒤 에탄올로 세척하여 전계 방출형 주사 전자 현미경(FE-SEM, JSM-6700F)으로 관찰하였다. Fig. 1과 같이 Au 기판 위에 직경이 400 nm, 길이가 4.5 μm 의 니켈 나노튜브가 서 있는 나노튜브 배열 구조를 얻

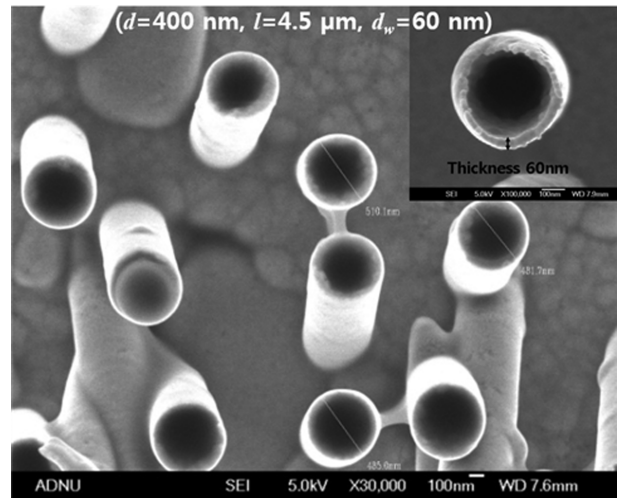


Fig. 1. FE-SEM image of Ni nanotubes fabricated by electrodeposition.

었으며, Fig. 1에 삽입한 사진과 같이 니켈 나노튜브의 두께는 60 nm임을 확인하였다. Fig. 1에서 니켈 나노튜브가 기울어진 원인은 PC를 용해시킨 재료에서 나노튜브와 Au 기판 사이의 지지력 감소에 의한 영향으로 보인다.

니켈 나노튜브의 자화 곡선은 진동 시료형 자력계(VSM, Lake Shore 7400)를 사용하여 측정하였다. 강자성 공명 신호는 9.89 GHz의 주파수에서 운용되는 Bruker사의 Xepr 장치를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 편리를 위하여 나노튜브의 길이 방향과 평행하게 인가한 자기장을 H_x 로, 나노튜브의 길이 방향에 수직으로 인가한 자기장을 H_z 로 표시하였다. 강자성 공명 신호는 H_x 와 H_z 각각의 방향에서 측정하였으며, 두 경우 모두에서 측정된 공명 신호로부터 분석에 필요한 강자성 공명 자기장 H_{res} 및 공명 선평 ΔH_{pp} 를 도출하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 니켈 나노튜브의 H_x 와 H_z 방향에서 측정된 자화 곡선과 비교를 위하여 두께가 240 nm인 니켈 박막의 수직면에서 측정된 자화 곡선을 보인 것이다. 전기도금으로 제작한 니켈 박막의 $4\pi M_s = 5.7 \text{ kOe}$ 로 측정되었으며, 이로부터 전기도금으로 제작한 니켈의 포화 자화는 $M_s = 454 \text{ emu/cc}$ 임을 알 수 있었다. 니켈(Ni bulk)의 포화 자화는 $M_s = 484 \text{ emu/cc}$ 로 알려져 있으며, 이는 전기도금으로 제작한 니켈 박막의 포화 자화와 유사한 값이다. 따라서 본 연구에서 전기도금으로 제작한 니켈 박막 및 나노튜브는 전기도금 과정에서 니켈이 원활하게 도금되었음을 알 수 있었다.

Fig. 2에서 보인 것과 같이 H_x 와 H_z 방향에서 측정된 니켈 나노튜브의 자화 곡선은 낮은 자기장 영역에서 자화 반전이

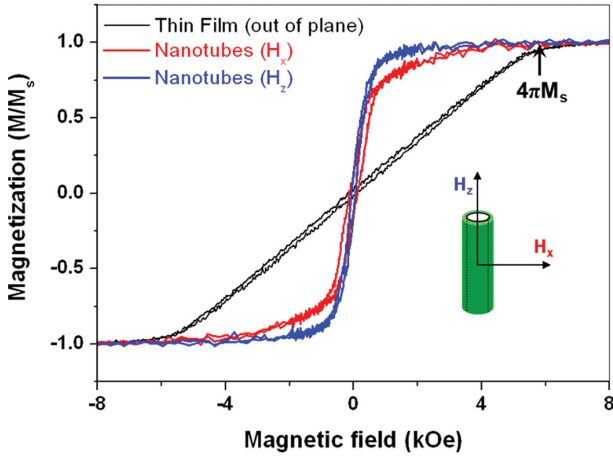


Fig. 2. (Color online) Hysteresis loop with magnetic field of Ni thin film for out of plane (black line), Ni nanotubes for H_x (red line) and H_z (blue line) direction indicated in the insert figure, respectively.

일어나고 있음을 나타내고 있다. 따라서 니켈 나노튜브에서 대부분의 자구는 자기장에 따라 쉽게 회전하여 형상 이방성 에너지가 작은 방향으로 정렬되어 있음을 알 수 있다. 그러나 H_x 방향과 H_z 방향에서 측정된 자화 곡선에서 보인 약간의 차이는 방향에 따른 튜브의 형상 이방성에 기인한다. 자화가 포화되기 위한 자기장인 포화 자기장은 H_x 방향이 H_z 방향보다 크게 나타났다. 따라서 H_x 방향의 자화 곡선에서 높은 자기장 영역의 작은 자화 변화는 나노튜브의 형상에 기인하는 것으로 보이나, 자화 곡선으로부터 형상에 의한 자구의 변화 특성을 해석하기는 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 나노 튜브의 형상에 의한 자화 특성을 분석하기 위하여, 자구의 상태에 따라 공명 신호 특성이 민감하게 변하는 강자성 공명 측정 방법을 이용하였다. 강자성 공명 장치인 Bruker사의 Xepr는 미소 자기장 dH 에 의한 미소 마이크로파 흡수 전력 dP 를 측정하므로 강자성 공명 신호는 dP/dH 로 표현하였다.

Fig. 3(a)와 (b)는 각각 니켈 나노튜브의 H_x 와 H_z 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 나타낸 것이다. H_x 와 H_z 방향에서 측정된 강자성 공명 신호는 확연하게 서로 다른 신호 특성을 보였으며, 이는 자기장에 따른 자구 변화가 방향에 따라 다른 형태로 진행되고 있음을 나타내고 있었다. H_x 와 H_z 의 방향에 따른 자화 곡선은 서로의 특성 차이를 구별하기 곤란하였으나, 방향에 따른 강자성 공명 신호는 서로의 신호 차이를 확연하게 구분할 수 있었다. Fig. 3(a)에서 보인 것과 같이 H_x 방향에서 측정된 강자성 공명 신호는 낮은 자기장 영역($H_L = 1660$ Oe)과 높은 자기장 영역($H_H = 6850$ Oe)에서 두 개의 서로 다른 강자성 공명 특성을 나타냈다. 반면에 Fig. 3(b)에서 보인 것과 같이 H_z 방향에서 측정된 강자성 공명 신호는 낮은 자기장 영역에서 하나의 강자성

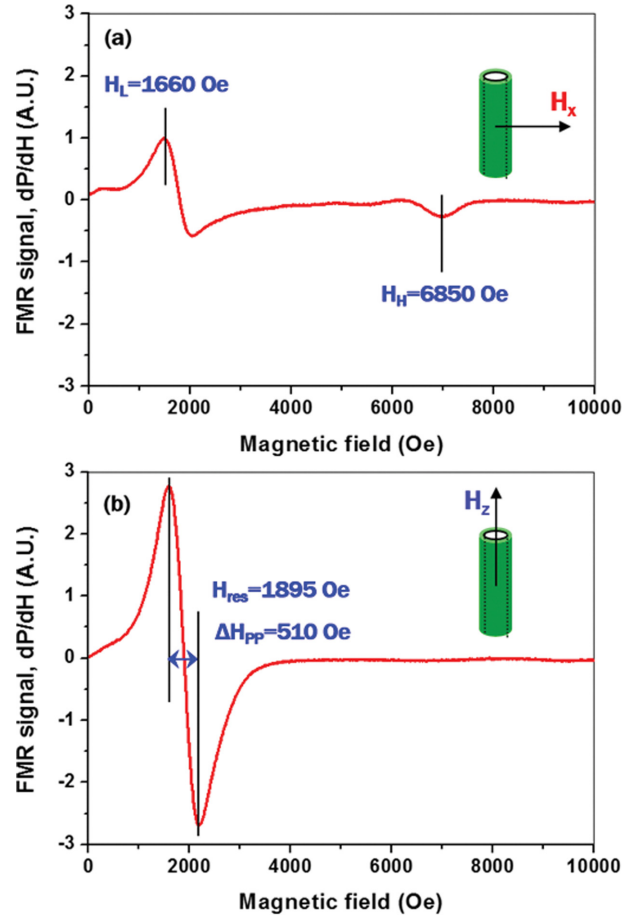


Fig. 3. (Color online) Measured ferromagnetic resonance signals with magnetic field of Ni nanotubes at (a) H_x and (b) H_z direction, respectively.

공명 특성을 나타냈으며, 강자성 공명 자기장 $H_{res} = 1895$ Oe와 선폭 $\Delta H_{PP} = 510$ Oe를 갖는 전형적인 강자성 공명 특성을 보였다.

자기장에 따른 강자성 공명 신호는 강자성 공명 자기장 H_{res} 에서 마이크로파 전력의 흡수가 최대가 되며, 자기장에 따른 흡수 전력 P 는 로렌츠 함수(Lorentzian function)를 따른다. 따라서 자기장에 따른 강자성 공명 신호 dP/dH 는 로렌츠 함수의 미분 형태로 표현된다[13].

$$\frac{dP}{dH} = \frac{2u}{\pi \Delta H_{PP}^2 (1 + u^2)^2} \quad (1)$$

여기서 ΔH_{PP} 는 강자성 공명 신호의 선폭이며, u 는 다음과 같이 표현된다.

$$u = \frac{H_{res} - H}{\Delta H_{PP}} \quad (2)$$

Fig. 3(b)에서 도출한 강자성 공명 자기장 $H_{res} = 1895$ Oe와

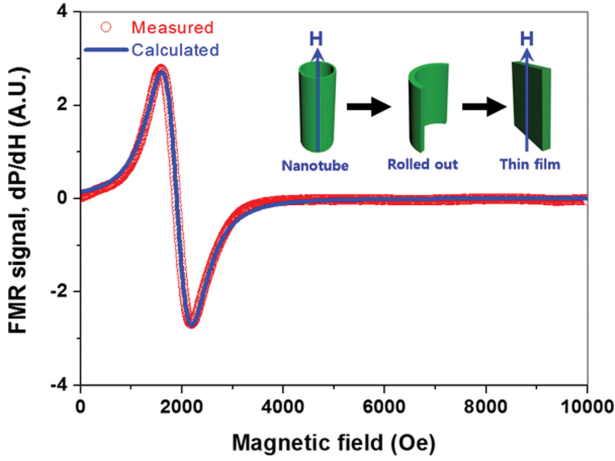


Fig. 4. (Color online) Measured (red circle) and calculated (blue line) ferromagnetic resonance signals with magnetic field of Ni nanotubes at H_z direction.

선폭 $\Delta H_{PP} = 510$ Oe를 식(1)과 (2)에 적용하여 Fig. 3(b)에서 보인 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 계산하였다.

Fig. 4는 니켈 나노튜브의 H_z 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호(붉은색 원형 표식)와 식(1)과 (2)를 사용하여 계산한 결과(청색 실선)를 보인 것이다. 측정 결과와 계산 결과는 일치하였으며, H_z 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호는 로렌츠 함수의 미분으로 표현되는 전형적인 강자성 공명 신호임을 알 수 있었다. 니켈 나노튜브는 중심축이 z 방향인 원통형 실린더이므로 중심축을 기준으로 나노튜브를 펼친 경우 박막 형태의 재료가 된다. 따라서 니켈 나노튜브의 강자성 공명 신호는 박막 재료에서 평면에 평행한(in-plane) 강자성 공명 신호와 유사한 특성으로 해석할 수 있다. 따라서 나노튜브에서 z 방향의 모든 면은 자기장 H_z 방향과 평행하며, 낮은 자기장 영역에서 측정되는 평면에 평행한(in-plane) 강자성 공명 신호임을 알 수 있었다.

H_x 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 나노튜브의 단면 구조를 고려하였다. 제작한 니켈 나노튜브의 단면은 중심축으로부터 반경이 200 nm이고 두께가 60 nm인 원형의 링(ring) 구조이며, H_x 는 이러한 링 구조의 단면과 평행한 방향이다. 나노튜브의 z 방향의 면은 원형의 링 구조를 형성하며, z 방향의 면은 H_x 와 0~360°까지의 각도가 균일하게 분포된 구조로 볼 수 있다. 이때 나노튜브의 중심축을 기준으로 나노튜브를 펼친 경우 z 방향의 면은 박막이 되며, 박막의 평면에 수직인 자기장이 평면과 이루는 방위각(azimuth angle)이 $\theta_H = 0\sim 360^\circ$ 까지 균일하게 분포한 구성으로 볼 수 있다. 이러한 구성은 박막에서 평면에 수직(out-of-plane) 강자성 공명 신호 측정 구성과 동일하다.

따라서 니켈 나노튜브의 H_x 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 박막의 평면에 수직인 강자성 공명 신호 해석 방법을 활용하였다. 본 연구에서는 H_x 방향에서 측정된 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 자기장 각도 θ_H 에 의존하는 강자성 공명 자기장 $H_{res}(\theta_H)$ 및 선폭 $\Delta H_{PP}(\theta_H)$ 을 분석하였다.

강자성 공명 특성은 자성 재료의 자기 에너지에 의존하며, 자기장 각도 θ_H 에 의존하는 자성 박막의 자기 에너지는 다음과 같다.

$$E = -HM_{eff}\cos(\theta_M - \theta_H) + 2\pi M_{eff}^2\cos^2\theta_M \quad (3)$$

여기서 θ_M 은 박막 재료의 수직면으로부터 측정된 자화 방향의 각도이며, $2\pi M_{eff}^2$ 는 유효 형상 이방성 에너지이다. 이때 강자성 공명 조건은 다음과 같이 표현된다[14,15].

$$\omega = \gamma\sqrt{H_1 \times H_2} \quad (4)$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$ 는 자기 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, g , μ_B 및 \hbar 는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. ω 는 마이크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이다. 식(4)의 H_1 과 H_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$H_1 = H_{res}\cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff}\cos^2\theta_M \quad (5)$$

$$H_2 = H_{res}\cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff}\cos 2\theta_M \quad (6)$$

식(4)에서 $\theta_H = 0^\circ$ 과 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 평형 조건인 $\theta_H = \theta_M$ 을 대입하여 다음의 결과를 얻는다.

$$\omega = \gamma(H_{res} - 4\pi M_{eff}) \quad \text{at } \theta_M = 0^\circ \quad (7)$$

$$\omega = \gamma\sqrt{H_{res}(H_{res} - 4\pi M_{eff})} \quad \text{at } \theta_M = 90^\circ \quad (8)$$

Fig. 3(a)에서 보인 것과 같이 낮은 자기장 영역에서 측정된 $H_L = 1660$ Oe는 식(8)에서 나타낸 $\theta_H = 0^\circ$ 일 때의 강자성 공명 자기장으로 대입하고, 높은 자기장 영역에서 측정된 $H_H = 6850$ Oe는 식(7)에서 나타낸 $\theta_H = 90^\circ$ 일 때의 강자성 공명 자기장으로 대입하여, H_x 방향에 대한 니켈 나노튜브의 유효 자화 M_{eff} 및 g-factor를 구하였다. 식(7)과 (8)으로부터 H_x 방향에 대한 니켈 나노튜브의 $M_{eff} = 305$ emu/cc 및 g-factor = 2.34를 얻었다. 이들 값을 식(3)과 (4)에 적용하여 니켈 나노튜브의 자기장 각도 θ_H 에 따른 강자성 공명 자기장 $H_{res}(\theta_H)$ 를 계산하였으며, 계산 결과는 Fig. 5(a)에 보인 것과 같다.

균질한 자성 재료에서 θ_H 에 따른 강자성 공명 신호의 선폭 $\Delta H_{PP}(\theta_H)$ 는 유효 감쇠(damping) 상수 α_{eff} 와 각도 의존성을 갖는 지연 함수(dragging function) $F(\theta_H)$ 를 포함하여 다음과 같이 표현된다[15].

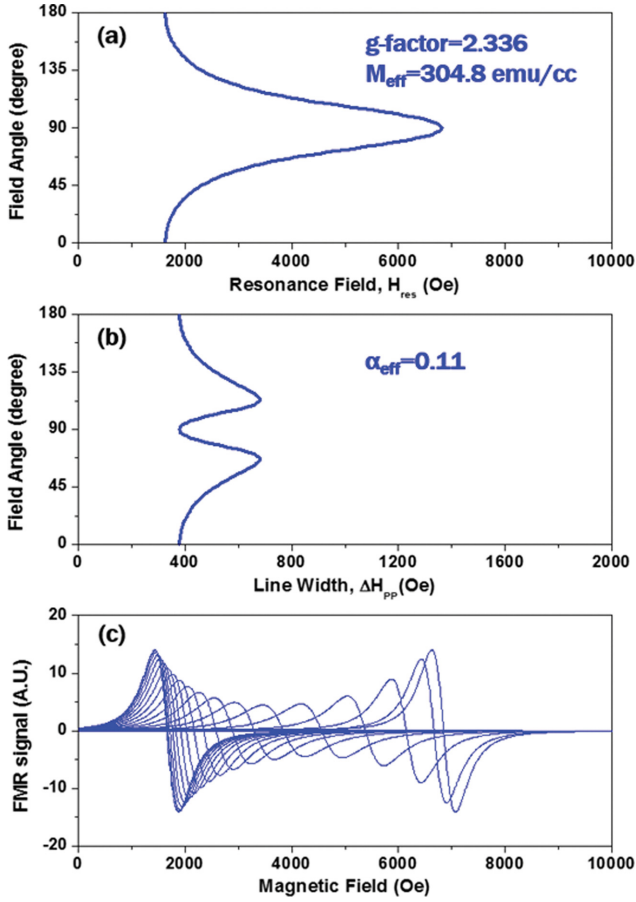


Fig. 5. (Color online) (a) Calculated H_{res} with magnetic field angle, (b) calculated ΔH_{PP} with magnetic field angle, and (c) calculated ferromagnetic resonance signals with magnetic field using $M_{eff} = 305$ emu/cc, g -factor = 2.34 and $\alpha_{eff} = 0.11$.

$$\Delta H_{PP} = \frac{2\omega\alpha}{\sqrt{3}\gamma F(\theta_H)} \quad (9)$$

여기서 지연함수 $F(\theta_H)$ 는 다음과 같이 표현된다[14].

$$F(\theta_H) = \cos(\theta_M - \theta_H) - \frac{(3H_1 + H_2)H_{res}\sin^2(\theta_M - \theta_H)}{H_2(H_1 + H_2)} \quad (10)$$

식(10)을 사용하여 니켈 나노튜브의 자기장 각도 θ_H 에 따른 강자성 공명 선폭 $\Delta H_{PP}(\theta_H)$ 를 계산하였으며, 계산 결과는 Fig. 5(b)에 보인 것과 같다. Fig. 5(b)의 계산에서 니켈 나노튜브의 유효 감쇠(damping) 상수 $\alpha_{eff} = 0.11$ 을 적용하였다.

Fig. 5(a)에서 보인 강자성 공명 자기장 $H_{res}(\theta_H)$ 와 Fig. 5(b)에서 보인 선폭 $\Delta H_{PP}(\theta_H)$ 를 식(1)에 대입하여 자기장 각도 θ_H 에 따른 강자성 공명 신호 $dP(\theta_H)/dH$ 를 계산하였다. Fig. 5(c)는 θ_H 를 5° 간격으로 변화시키면서 계산한 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 보인 것이다. H_x 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 Fig. 5(c)에 나타난 강자성 공명 신호를 각도 θ_H 에 따라 적분하였다.

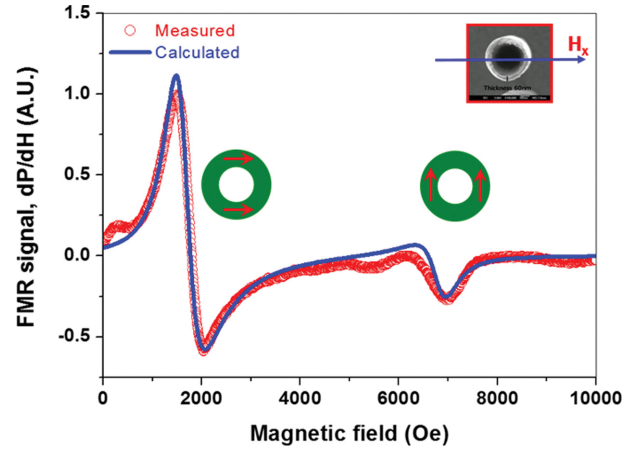


Fig. 6. (Color online) Measured (red circle) and calculated (blue line) ferromagnetic resonance signals with magnetic field of Ni nanotubes at H_x direction.

Fig. 6은 니켈 나노튜브의 H_x 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호(붉은색 원형 표식)와 Fig. 5(c)에 나타난 강자성 공명 신호를 각도 θ_H 에 따라 적분 결과(청색 실선)를 보인 것이다. 측정 결과와 계산 결과는 거의 일치하였으며, H_x 방향에서 측정된 강자성 공명 신호는 나노튜브 단면의 모양인 링 구조에 의한 영향을 반영하고 있음을 알 수 있었다. 링 구조는 모양이 원형 형태이므로 나노튜브에 있는 니켈 자성체가 H_x 방향과 이루는 각도인 θ_H 가 $0\sim 360^\circ$ 까지 고르게 분포되어 있는 구조임을 계산을 통하여 확인하였다.

이들 결과로부터 Fig. 3(a)에서 낮은 자기장 영역($H_L = 1660$ Oe)에서 보인 강자성 공명 신호는 H_x 방향과 나란한 방향의 니켈 자성체에 의한 강자성 공명 신호임을 알 수 있었다. 한편 높은 자기장 영역($H_H = 6850$ Oe)에서 보인 강자성 공명 신호는 H_x 방향과 수직 방향의 니켈 자성체에 의한 강자성 공명 신호임을 알 수 있었다. 이때 낮은 자기장 영역에서 보인 강자성 공명 신호가 높은 자기장 영역에서 보인 강자성 공명 신호보다 크게 나타난 원인은 Fig. 5(c)에서 보인 것과 같이 H_x 방향과 나란한 방향의 니켈 자성체에 의한 강자성 공명 신호의 분포가 H_x 방향과 수직한 방향의 니켈 자성체에 의한 강자성 공명 신호의 분포보다 월등히 많이 존재하기 때문이었다. 또한, 중간 자기장 영역에서는 낮은 분포 및 높은 선폭으로 인하여 상대적인 신호가 무시될 정도로 작게 나타난 것으로 해석할 수 있었다. 그리고 Fig. 3(a)의 강자성 공명 신호가 Fig. 3(b)의 강자성 공명 신호보다 작게 나타난 이유는 Fig. 5(c)에서 보인 것과 같이 니켈 자성체에 의한 강자성 공명 신호가 $0\sim 360^\circ$ 까지 분포된 θ_H 의 영향으로 넓은 자기장 영역에 걸쳐 퍼져있기 때문임을 알 수 있었다.

니켈 나노튜브의 H_x 와 H_z 방향에서 측정된 자기장에 따른 강자성 공명 신호는 확연히 서로 다른 신호 특성을 보였으며,

이는 방향에 따른 나노튜브의 형상 이방성 특성에 기인함을 분석 결과를 통하여 알 수 있었다. 이러한 분석 방법은 형상 이방성 및 포화 자화가 다른 다양한 종류의 자성 나노튜브 및 나노튜브를 응용한 나노-복합재료의 특성 분석에 활용될 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 직경이 400 nm, 길이가 2.4 μm , 두께가 60 nm인 니켈 나노튜브를 기공이 있는 폴리카보네이트 형판을 사용하여 전기도금으로 제작하였다. 제작한 니켈 나노튜브의 길이와 평행한 방향(H_z)과 수직인 방향(H_x)에서 강자성 공명 신호를 각각 측정하였다. H_z 방향과 H_x 방향에서 측정한 강자성 공명 신호는 서로 상이한 특성을 보였다.

H_z 에서 측정한 강자성 공명 신호는 1895 Oe의 자기장 부근에서 단일 공명 신호 특성을 보였으며, 이들 신호는 강자성 공명 자기장 $H_{res} = 1895$ Oe와 선폭 $\Delta H_{PP} = 510$ Oe를 로렌츠 함수의 미분 함수에 대입하여 계산한 결과와 일치하였다. 이러한 단일 공명 신호 특성은 나노 튜브를 펼친 평면의 막대 구조와 동일한 형상에 의한 효과로 해석하였다.

한편 H_x 방향에서 측정한 강자성 공명 신호는 $H_L = 1660$ Oe과 $H_H = 6850$ Oe에서 두 개의 서로 다른 공명 특성을 나타냈다. H_x 에서 측정한 강자성 공명 신호를 분석하기 위하여 유효 자화 $M_{eff} = 305$ emu/cc, g-factor = 2.34 및 유효 감쇠 상수 $\alpha_{eff} = 0.11$ 값을 사용하여 방위각 θ_H 에 따른 수직면(out-of-plane) 강자성 공명 신호를 계산하였다. 이들 계산 결과를 방위각에 따라 적분하여 얻은 신호는 H_x 에서 측정한 강자성 공명 신호와 일치하였다. 이러한 분석 결과로부터 H_x 에서 측정한 강자성 공명 신호에서 보인 두 개의 서로 다른 공명 특성은 링 모양의 형상 이방성 특성에 기인함을 알 수 있었다.

본 연구에서 사용한 니켈 나노튜브의 강자성 공명 신호 분석 방법은 형상 이방성 및 포화 자화가 다른 다양한 종류의 자성 나노튜브 및 나노튜브를 응용한 나노-복합재료의 특성 분석에 활용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

References

- [1] T. Thurn-Albrecht, J. Schotter, G. A. Kästle, N. Emley, T. Shi-bauchi, L. Krusin-Elbaum, K. Guarini, C. T. Black, M. T. Tuominen, and T. P. Russell, *Science* **290**, 2126 (2000).
- [2] K. Y. Kok, C. M. Hangarter, B. Goldsmith, I. K. Ng, N. B. Saidin, and N. V. Myung, *J. Magn. Magn. Mater.* **322**, 3876 (2010).
- [3] T. S. Ramulu, R. Venu, B. Sinha, B. H. Lim, S. J. Jeon, S. S. Yoon, and C. G. Kim, *Biosens. Bioelectron.* **40**, 258 (2013).
- [4] D. M. Davis and E. J. Podlaha, *Electrochem. Solid-State Lett.* **8**, D1 (2005).
- [5] C. Huang and Y. Hao, *Nanotechnology* **20**, 445607 (2009).
- [6] J. Escrig, J. Bachmann, J. Jing, M. Daub, D. Altbir, and K. Nielsch, *Phys. Rev. B* **77**, 214421 (2008).
- [7] P. Landeros, S. Allende, J. Escrig, E. Salcedo, D. Altbir, and E. E. Vogel, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 102501 (2007).
- [8] S. Pal, S. Saha, D. Polley, and A. Barman, *Solid State Commun.* **151**, 1994 (2011).
- [9] A. P. Chen, J. M. Gonzalez, and K. Y. Guslienko, *J. Appl. Phys.* **109**, 073923 (2011).
- [10] J. Dubowik, I. Goscianska, and Y. Kudryavtsev, *Eur. Phys. J. Special Topics* **158**, 113 (2008).
- [11] J. Curiale, R. D. Sánchez, H. E. Troiani, C. A. Ramos, H. Pastoriza, A. G. Leyva, and P. Levy, *Phys. Rev. B* **75**, 224410 (2007).
- [12] S. J. Jeon, D. Y. Kim, and S. S. Yoon, *New Physics: Sae Mulli*, **63**, 183 (2013).
- [13] P. Landeros, R. E. Arias, and D. L. Mills, *Phys. Rev. B* **77**, 214405 (2008).
- [14] M. Oogane, T. Wakitani, S. Yakata, R. Yilgin, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 3889, (2006).
- [15] J. Linder, I. Barsukov, C. Raeder, C. Hassel, O. Posth, R. Meckenstock, P. Landeros, and D. L. Mills, *Phys. Rev. B* **80**, 224421 (2009).