

Magnetic Properties Analysis of Ferromagnetic Materials using Cavity-FMR Devices

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

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

(Received 22 April 2021, Received in final form 28 April 2021, Accepted 28 April 2021)

We introduce the Cavity-FMR devices measuring the ferromagnetic resonance (FMR) signals, and phenomenological description of FMR signals measured in ferromagnetic thin films. The effective magnetization and g-factor can be obtained from the FMR field (H_{res}) measured at out-of-plane angle of ferromagnetic thin films and the anisotropy fields can be obtained from the H_{res} measurement at in-plane angle. We also present the analysis method of FMR linewidth (ΔH_{pp}) due to the Gilbert damping factor, inhomogeneous magnetic properties and spin wave scattering, respectively.

Keywords : ferromagnetic resonance, linewidth, precession, damping, microwave

Cavity-FMR 장치를 이용한 강자성 재료의 물성 분석

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2021년 4월 22일 받음, 2021년 4월 28일 최종수정본 받음, 2021년 4월 28일 게재확정)

본 논문에서는 강자성 공명(FMR) 신호를 측정하는 장치의 하나인 Cavity-FMR 장치의 소개 및 강자성 박막에서 측정된 공명 신호의 현상학적 분석 방법을 소개하였다. 강자성 박막의 수직면(out-of-plane) 각도에서 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 을 이용하여 재료의 유효 자화량 및 g-factor를 구하였으며, 수평면(in-plane) 각도에서 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 을 이용하여 재료의 이방성 자기장을 도출하였다. 또한, 강자성 공명 선폭 ΔH_{pp} 는 재료의 균질성, 비균질성 및 스핀파의 산란 등을 반영하고 있으며, 이들 특성을 분석하는 방법을 제시하였다.

주제어 : 강자성 공명, 선폭, 세차운동, 감쇠, 마이크로파

I. 서 론

강자성 공명(FMR, ferromagnetic resonance) 신호는 강자성 재료의 이방성 에너지, 유효 자화량, g-factor, 재료의 불균일성 등 자성 재료의 물성 측정에 널리 이용되고 있다[1-8]. 강자성 공명은 낮은 에너지(E_L) 상태에서 자기장을 중심으로 Larmor 주파수 f 로 세차운동 하던 자기모멘트가 세차운동 주파수와 동일한 마이크로파 에너지 hf 를 흡수하여 높은 에너지(E_H) 상태로 전이하는 현상이다. 스핀들로 이루어진 강자성체의 자화는 공명 조건($h_f = E_H - E_L$)에서 결맞음 세차운동(coherent precession)을 통하여 균일한 모드(uniform mode)로 자화 반전을 일으킨다. 한편, 낮은 에너지 상태의 스핀이

공명 조건에서 높은 에너지 상태로 전이하는 과정에서 마이크로파 에너지를 흡수하는 현상을 전자스핀 공명(ESR, electron spin resonance)이라한다. FMR과 ESR은 낮은 에너지 상태의 자화 또는 스핀이 공명 조건에서 높은 에너지 상태로 전이하는 과정이 서로 같다. 즉, 상자성 재료의 스핀 공명을 측정하는 경우 전자스핀 공명이라 하며, 강자성 재료의 자화공명을 측정하는 경우 강자성 공명이라 부른다. Fig. 1은 마이크로파 에너지를 흡수하여 자기모멘트(또는 스핀)가 전이하는 강자성 공명 현상을 개략적으로 나타낸 것이다.

강자성 공명 신호를 측정하는 방법은 자기장을 고정하고 마이크로파 주파수에 따른 복소 투자율 측정하여 허수부 투자율이 최대가 되는 공명 주파수 f_{res} 를 측정하는 방법이 있다. 또한, 마이크로파 주파수를 고정하고 자기장에 따른 흡수 에너지 P 를 측정하여 흡수 에너지가 최대가 되는 자기장 H_{res} 를 측정하는 방법이 있다. H_{res} 를 측정하는 후자의 방법은 측

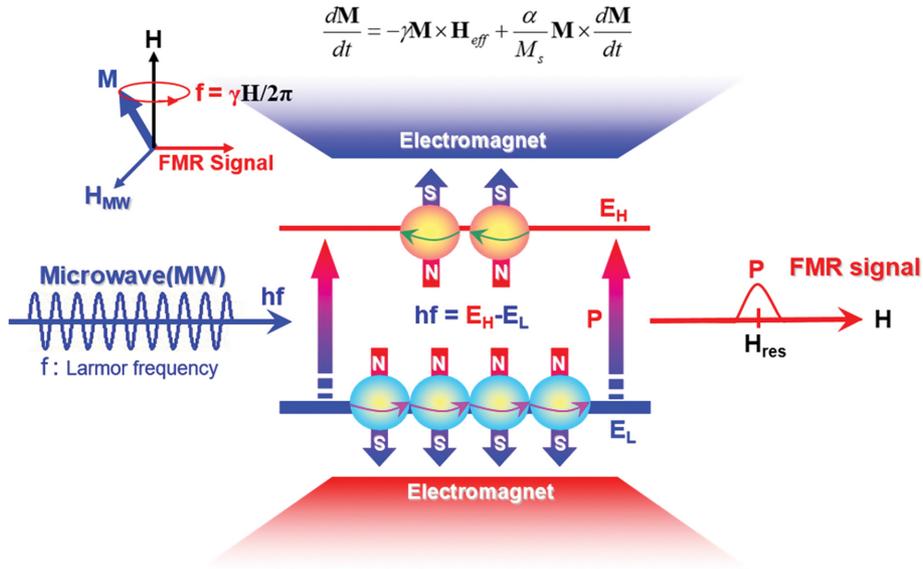


Fig. 1. (Color online) Schematic diagram for ferromagnetic resonance.

정 재료에 인가하는 마이크로파 자기장의 균일한 자기장 영역을 최적화하고 신호의 감도를 향상하기 위하여 마이크로파 Cavity를 사용한다. 이러한 강자성 공명 장치를 Cavity-FMR 장치라고 한다.

본 논문에서는 Cavity-FMR 장치의 설명, Bruker사의 X-band용 Xepr[9] 장비로 측정된 강자성 공명 신호의 특징, 그리고 강자성 공명 신호를 이용한 강자성 박막 재료의 자기 물성 분석 방법을 소개한다.

II. Cavity-FMR 장치

강자성 공명 신호는 강자성 재료의 자구를 형성하는 자기 모멘트의 세차운동 주파수와 마이크로파 주파수가 일치하는 공명 조건이 되었을 때, 마이크로파 에너지를 흡수하는 특성을 이용하여 측정된다. 특정 주파수의 마이크로파를 사용하는 Cavity-FMR 장치는 마이크로파와 공명 조건을 형성하기 위하여 직류 자기장 H 를 인가하는 전자석과, 흡수되는 마이크로파 에너지를 측정하기 위하여 자기장 방향과 동일한 방향의 미소 교류 자기장 dH 을 인가하는 코일이 사용된다. 따라서 Cavity-FMR 장치로 측정된 강자성 공명 신호는 직류 자기장 H 를 인가하고, 미소 교류 자기장 dH 에 따라 흡수되는 미소 마이크로파 전력 dP 를 Lock-in Amplifier을 사용하여 측정한다. 따라서 강자성 공명 신호는 흡수되는 마이크로파 전력의 미분인 dP/dH 이다. 흡수되는 마이크로파 전력 P 는 H_{res} 를 중심으로 로렌츠 함수(Lorentzian function)를 따르므로 Cavity-FMR 장치로 측정된 강자성 공명 신호는 로렌츠 함수를 미분한 형태로 측정된다[10].

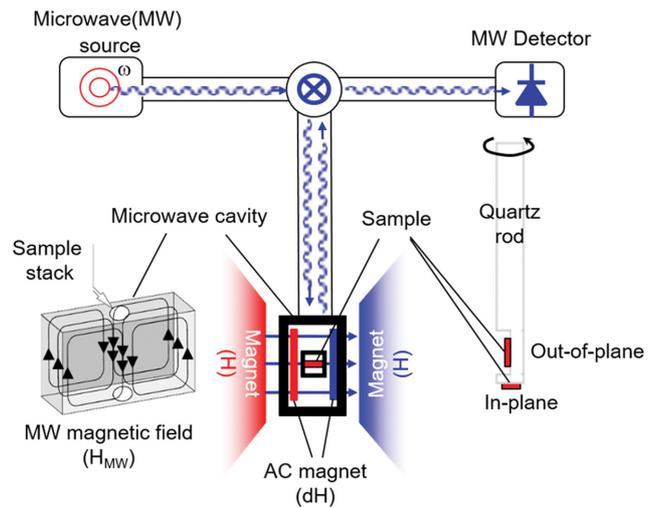


Fig. 2. (Color online) Block diagram of an Cavity-FMR apparatus.

Fig. 2에 보인 것과 같이 Cavity-FMR 장치는 특정 주파수의 마이크로파를 발생시키는 마이크로파 발생기, 마이크로파를 전달하는 도파관, 균일한 마이크로파 자기장을 재료에 인가하는 마이크로파 Cavity, 자기장을 발생시키는 전자석, 미소 교류 자기장을 발생시키는 솔레노이드 코일, 흡수된 마이크로파 에너지를 측정하는 마이크로파 측정기로 구성된다[9].

특정 주파수의 마이크로파를 사용하는 Cavity-FMR 장치는 사용하는 마이크로파 주파수가 높을수록 측정 범위 및 정밀도가 증가한다. 그러나 여러 대역의 강자성 공명 신호를 측정하고자 하는 경우 측정 대역에 따라 마이크로파 Cavity를 포함하여 마이크로파 관련 부품을 모두 교체하여야 한다. Cavity-FMR 장치의 마이크로파 주파수에 따른 전자스핀 공

Table I. Resonance field H_{res} for $g = 2$ signal at selected microwave frequency.

Microwave band	Frequency (GHz)	H_{res} (Oe)
L (0.5~1.5 GHz)	1.1	390
S (2~4 GHz)	4.0	1430
X (8~10 GHz)	9.75	3480
Ka (26~40 GHz)	34.0	12100
W (75~111 GHz)	94.0	33500

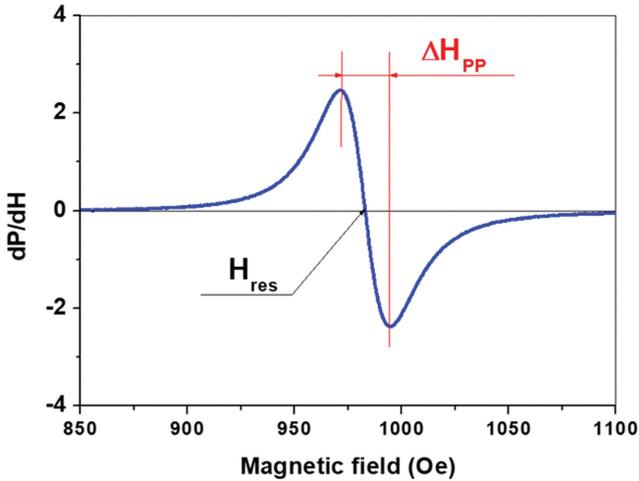


Fig. 3. (Color online) Typical FMR signal (X-band).

명 자기장은 Table I에서 보인 것과 같다. FMR 장치는 마이크로파 주파수가 높을수록 공명 자기장이 증가하므로 고자기장 전자석이 필요하며, FMR 장비의 비용이 기하급수적으로 증가한다.

Fig. 3은 Cavity-FMR 장치의 하나인 Bruker사의 X-band 용 Xepr 장비로 측정된 전형적인 강자성 공명 신호를 보인 것이다. 강자성 공명 신호는 마이크로파 흡수 파워 P 의 미분 형태인 dP/dH 로 측정되며, 강자성 공명 신호는 H_{res} 를 중심으로 로렌츠 함수를 미분한 형태를 보인다. 강자성 공명 신호에서 H_{res} 는 마이크로파 흡수 파워 P 가 최대가 되는 자기장이다. 또한 ΔH_{PP} 는 강자성 공명 신호의 선폭으로 세차운동을 하는 자기모멘트의 감쇠와 관련된다.

Fig. 4는 Cavity-FMR 장치로 측정된 다양한 자성재료 (DPPH, 산화철 나노입자, NiFe 박막)의 ESR 및 FMR 신호를 보인 것이다. DPPH(Diphenyl-Picryl-Hydrazyl)는 단일 스핀을 갖는 상자성 재료로 낮은 에너지 상태의 스핀이 높은 에너지 상태로 전이하는 ESR 신호로 구분되며, 선폭 ΔH_{PP} 가 매우 작은 단일 전이 특성을 보유하고 있어 Cavity-FMR 장치의 보정에 사용된다. 강자성 특성을 갖는 산화철 나노입자 (NP, nano particles)는 형상 이방성 특성이 없으므로 ESR 신호의 공명 자기장 근처에서 강자성 공명 신호가 나타난다. 그러나 나노입자의 크기 증가($D = 4.67$ nm에서 $D = 6.34$ nm

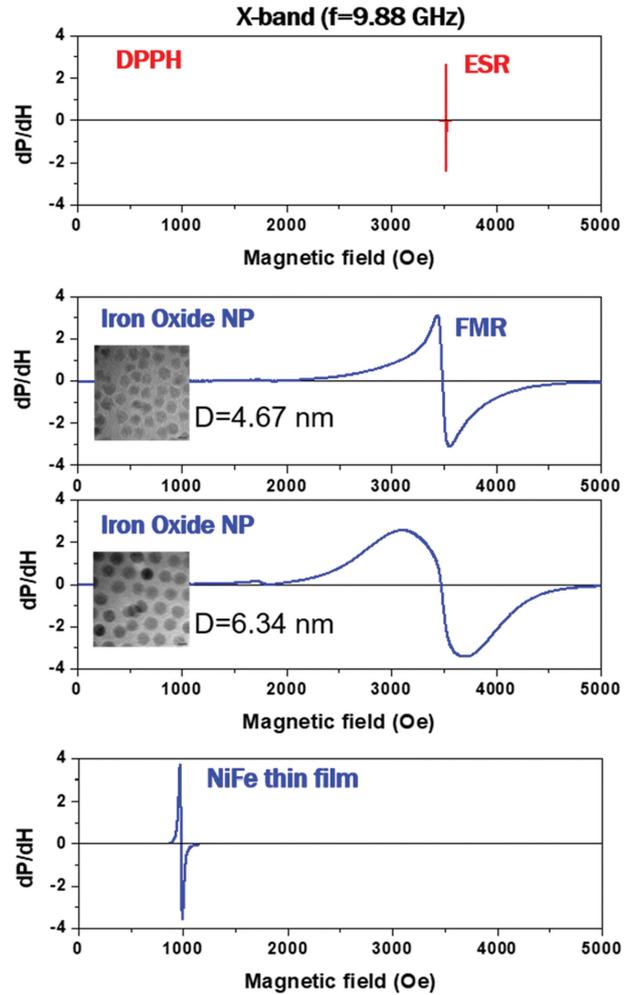


Fig. 4. (Color online) ESR and FMR signals for various magnetic samples.

로 증가)에 따른 이방성 에너지 증가는 선폭을 두드러지게 증가시킨다[10]. 한편, NiFe 박막은 나노입자와 달리 형상 이방성이 증가하여 공명 자기장 H_{res} 가 ESR 신호에 비하여 낮은 자기장에서 나타나고 있으며, 선폭 ΔH_{PP} 는 산화철 나노입자에 비하여 좁게 나타나고 있다. 이렇듯 강자성 공명 신호의 H_{res} 및 ΔH_{PP} 는 강자성 재료의 모양과 재료의 물성에 따라서 변하므로 자성 물성 분석에 널리 이용되고 있다.

III. 강자성 박막의 FMR 신호 분석

1. 강자성 박막의 FMR 조건

강자성 공명 신호의 공명 조건은 재료의 자기 에너지로부터 해석된다. 두께가 면적에 비하여 매우 작은 강자성 박막 재료는 수평면 방향의 형상 이방성 에너지는 무시되고, 수직면 방향의 형상 이방성 에너지가 최대가 된다. 따라서 박막의 자기 에너지는 수평면(in-plane)과 수직면(out-of-plane) 방

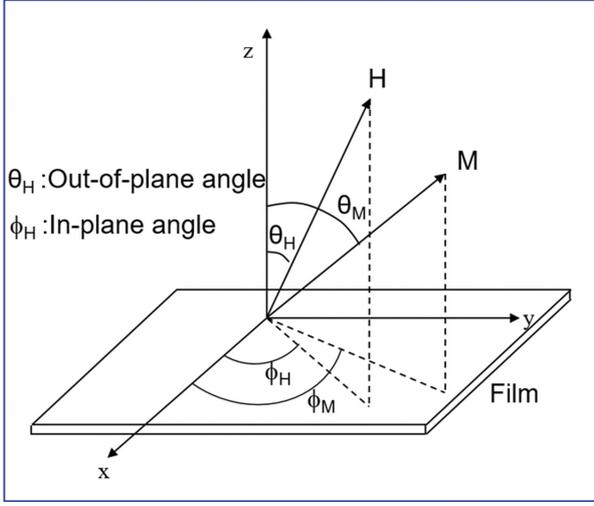


Fig. 5. (Color online) Coordination system for FMR analysis of ferromagnetic thin film.

향에 의존하며, 박막에 대한 자기 에너지 계산을 위한 좌표는 Fig. 5를 기준으로 하였다.

수평면에서 일축 이방성 에너지 K_u 를 갖는 강자성 박막의 자기 에너지(E_T)는 다음과 같이 표현된다[7].

$$E_T = -HM_s[\sin\theta_M\sin\theta_M\cos(\phi_M - \phi_H) - \cos\theta_M\cos\theta_H] + 2\pi M_s^2\cos^2\theta_M + K_u\cos^2\theta_M\sin\phi_M \quad (1)$$

여기서 H 는 인가 자기장이며, M_s 는 강자성 재료의 포화 자화량이다. ϕ_M 및 ϕ_H 는 수평면에서 자화 용이축으로부터 측정된 자화 및 자기장 각도이며, θ_M 및 θ_H 는 수직면에서 수평면으로 측정된 자화 및 자기장 각도이다. 강자성 재료의 공명 조건은 자기 에너지로부터 다음과 같이 구해진다[1-3,7].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = \frac{1}{M^2\sin^2\theta_M} \left[\left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial\theta_M^2}\right)\left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial\phi_M^2}\right) - \left(\frac{\partial^2 E_T}{\partial\theta_M\partial\phi_M}\right)^2 \right] \quad (2)$$

여기서 $\gamma = g\mu_B/\hbar$ 는 스핀의 자이로 계수(gyromagnetic factor)이며, g , μ_B , 및 \hbar 는 각각 g-factor, 보아 마그네톤 상수 및 플랑크 상수이다. 또한 ω 는 인가한 마이크로파의 각주파수($\omega = 2\pi f$)이다. 강자성 박막의 수직면(out-of-plane) 각도 θ_H 및 수평면(in-plane) 각도 ϕ_H 에 따른 강자성 공명 신호를 측정하여 박막 재료의 강자성 공명 자기장 H_{res} 및 선폭 ΔH_{PP} 를 도출한다. 강자성 박막의 g-factor 및 유효 자화량은 수직면과 수평면에서 측정된 H_{res} 로부터 얻을 수 있다. 각도에 따른 H_{res} 분석 방법은 강자성 공명 신호의 선폭 ΔH_{PP} 의 분석에 활용된다.

2. H_{res} 의 수직면 각도 의존성 분석

먼저, 수직면(out-of-plane)의 각도에 따른 강자성 공명 특

성을 분석한다. 수직면 각도 θ_H 에 따른 강자성 공명 조건은 식(1)~(2)로부터 다음과 같이 표현된다[4,11].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = H_1 \times H_2 \quad (3)$$

식(3)의 H_1 과 H_2 는 각각 다음과 같이 표현된다.

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

$$H_2 = H_{res}\cos(\theta_H - \theta_M) - 4\pi M_{eff}\cos 2\theta_M \quad (5)$$

식(3)~(5)에서 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 자구의 평형 조건인 $\theta_H = \theta_M$ 을 대입하여 다음의 결과를 얻는다.

$$\omega = \gamma(H_{res} - 4\pi M_{eff}) \text{ at } \theta_H = 0^\circ \quad (6)$$

$$\omega = \gamma\sqrt{H_{res}(H_{res} + 4\pi M_{eff})} \text{ at } \theta_H = 90^\circ \quad (7)$$

강자성 박막의 유효 자화량 $4\pi M_{eff}$ 및 g-factor는 $\theta_H = 0^\circ$ 및 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 측정된 H_{res} 를 식(6)과 (7)에 대입하여 구한다.

3. ΔH_{PP} 의 수직면 각도 의존성 분석

강자성 공명 신호의 선폭 ΔH_{PP} 는 균질한 재료에서 고유하게 나타나는 ΔH_{homo} , 비균질한 재료에서 나타나는 ΔH_{inhomo} 및 스핀파의 산란에 의한 즉, FMR과 스핀파 두 개의 마그논 산란인 two magnon scattering(TMS)라 부르는 ΔH_{TMS} 의 합으로 표현된다[1-6,11].

$$\Delta H_{PP} = \Delta H_{homo} + \Delta H_{inhomo} + \Delta H_{TMS} \quad (8)$$

ΔH_{homo} 는 Gilbert 감쇠(damping)상수 α 를 포함하는 Landau-Lifshitz 방정식의 공명 조건을 만족한 해로부터 다음과 같이 표현된다[4].

$$\Delta H_{homo} = \frac{\alpha}{\sqrt{3}}(H_1 + H_2) \left| \frac{d(\omega/\gamma)}{dH_{res}} \right|^{-1} \quad (9)$$

식(9)으로부터 ΔH_{homo} 는 감쇠상수 α 에 비례하고, 재료의 고유 물성인 g-factor의 분산 특성에 기인하며 간단하게 다음과 같이 표현된다[11].

$$\Delta H_{homo} = \frac{2\alpha\omega}{\sqrt{3}\gamma F} \quad (10)$$

여기서 F 는 지연 함수(dragging function)라고 하며 다음과 같이 표현된다.

$$F = \cos(\theta_M - \theta_H) - \frac{3H_1 + H_2}{H_2(H_1 + H_2)} H_{res} \sin^2(\theta_M - \theta_H) \quad (11)$$

식(11)으로부터 ΔH_{homo} 는 주로 $\theta_M - \theta_H$ 에 의존한다. 자기장

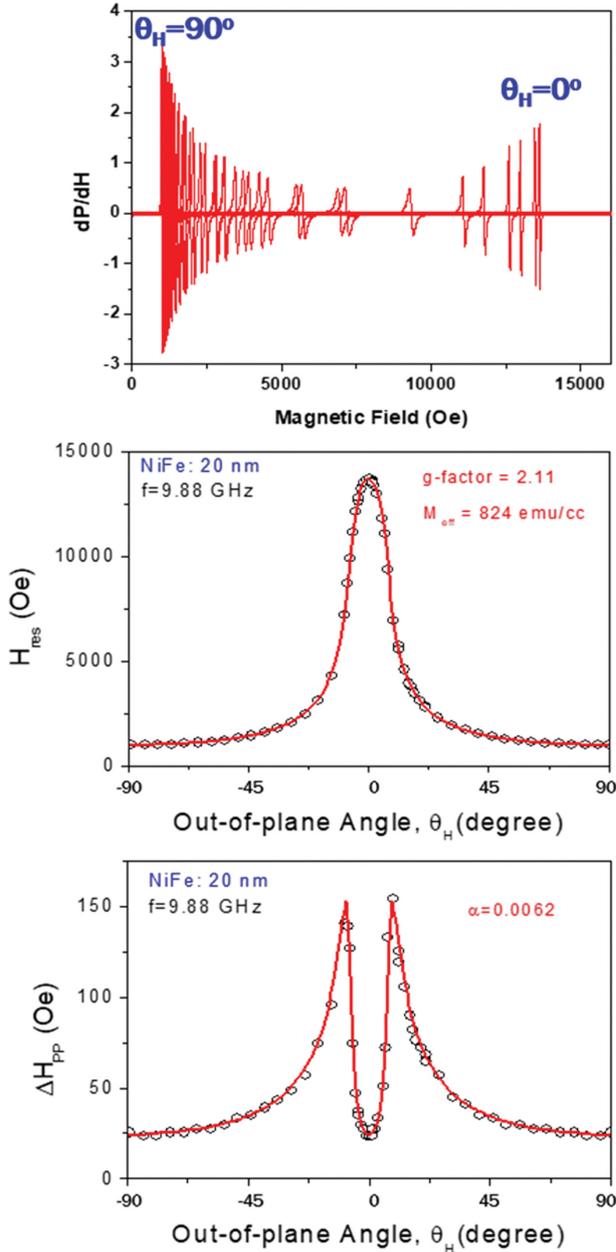


Fig. 6. (Color online) Angular dependence of FMR signals, H_{res} and ΔH_{PP} in NiFe(20 nm) thin film.

각도 θ_H 에서 자기장을 증가시켜 공명 자기장이 된 경우, 자화 각도 θ_M 은 자기장 각도 θ_H 를 따라가지 못하는 자화 각도의 지연 현상이 나타나며, 이러한 지연 현상이 수직면 각도에 따른 ΔH_{homo} 의 원인으로 해석된다.

Fig. 6은 NiFe(20 nm) 박막을 사용하여 $-90^\circ < \theta_H < 90^\circ$ 의 수직면 각도에서 측정된 FMR 신호, FMR 신호로부터 도출한 H_{res} 및 ΔH_{PP} 의 수직면 각도 의존성을 각각 나타낸 것이다. FMR 신호는 수직면의 형성 이방성 자기장 영향으로 $\theta_H = 90^\circ$ 에서는 1 kOe 근처의 저자기장 영역에서 측정되었으

나, $\theta_H = 0^\circ$ 에서는 13.6 kOe 근처의 고자기장 영역에서 측정되었다. 따라서 수직면인 $\theta_H = 0^\circ$ 에서 측정이 요구되는 FMR 신호 측정은 고자기장 전자석이 요구된다.

NiFe(20 nm) 박막의 $\theta_H = 0^\circ$ 와 $\theta_H = 90^\circ$ 에서 측정된 H_{res} 값을 식(6)과 (7)에 대입하여 NiFe(20 nm) 박막의 유효 자화량 $M_{eff} = 824$ emu/cc 및 $g = 2.11$ 를 얻었다. 이들 두 값을 식(3)-(5)에 대입하여 계산한 H_{res} 의 수직면 각도 의존성은 측정 결과와 일치하였다. H_{res} 계산에 사용한 H_1 과 H_2 는 선폭 ΔH_{PP} 를 분석하는 데 활용한다. NiFe(20 nm) 박막의 선폭 ΔH_{PP} 의 측정 결과는 식(9)-(11)로 계산한 ΔH_{homo} 와 일치하였으며, NiFe(20 nm) 박막은 감쇠상수 $\alpha = 0.0062$ 를 갖는 고유한 선폭 특성인 ΔH_{homo} 의 영향만 있는 균질한 재료임을 알 수 있다.

한편, ΔH_{inhomo} 는 유효 자화량 및 자화 용이축의 분산 특성인 $\Delta 4\pi M_{eff}$ 및 $\Delta \theta_H$ 에 의존하며 다음과 같이 표현된다[3-4,7].

$$\Delta H_{inhomo} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{\partial H_{res}}{\partial 4\pi M_{eff}} \right| \Delta 4\pi M_{eff} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{\partial H_{res}}{\partial \theta_H} \right| \Delta \theta_H \quad (12)$$

ΔH_{inhomo} 는 H_{res} 의 $4\pi M_{eff}$ 및 θ_H 에 대한 미분의 절댓값으로 계산된다.

강자성 박막에서 스핀파 산란에 의한 선폭 변화 ΔH_{TMS} 는 다음과 같이 TMS(two magnon scattering) 해석법을 사용한다[11].

$$\Delta H_{TMS} = \frac{3}{\sqrt{3}} \Gamma(H_{res}, \theta_H) \sin^{-1} \sqrt{\frac{-H_1 \cos 2\theta_M}{(H_1 + 4\pi M_{eff}) \sin^2 \theta_M}} \quad (13)$$

여기서 $\Gamma(H_{res}, \theta_H)$ 는 다음과 같다.

$$\Gamma(H_{res}, \theta_H) = \Gamma_0 \frac{H_1 \cos 2\theta_M - H_2 \sin^2 \theta_M}{(H_1 + H_2)^2 F} \quad (14)$$

여기서 Γ_0 는 ΔH_{TMS} 의 크기를 결정하는 상수이다.

Fig. 7은 측정된 ΔH_{PP} 의 효과를 분석하기 위하여 식(10), (12) 및 (13)을 이용하여 ΔH_{homo} , ΔH_{inhomo} 및 ΔH_{TMS} 의 수직면 각도 의존성을 각각 계산한 결과이다. ΔH_{homo} 는 균일한 특성을 보인 NiFe(20 nm) 재료의 계산 결과이며, ΔH_{inhomo} 와 ΔH_{TMS} 의 계산을 위한 기준이다. 먼저 ΔH_{inhomo} 의 $\Delta 4\pi M_{eff}$ 에 의한 효과는 $\theta_H = 0^\circ$ 근처에서 두드러진 선폭 증가 특성으로 나타나며, $\Delta 4\pi M_{eff} = 100$ Oe인 경우 $\theta_H = 0^\circ$ 근처에서 약 60 Oe의 선폭을 증가 효과를 초래한다. 한편, $\Delta \theta_H$ 에 의한 효과는 H_{res} 의 기울기가 최대인 각도에서 최대의 선폭 증가 특성을 보이며, $\Delta \theta_H = 0.05^\circ$ 일 때 약 40 Oe의 최대 선폭 증가 특성을 보인다. 마지막으로 ΔH_{TMS} 는 $\theta_H = 0^\circ$ 부근에서는 영향이 없다. 그러나 ΔH_{homo} 가 최대인 각도에서 근처에서 보이는 최대 선폭 증가 특성뿐만 아니라 $\theta_H = \pm 90^\circ$ 에서도 선폭을

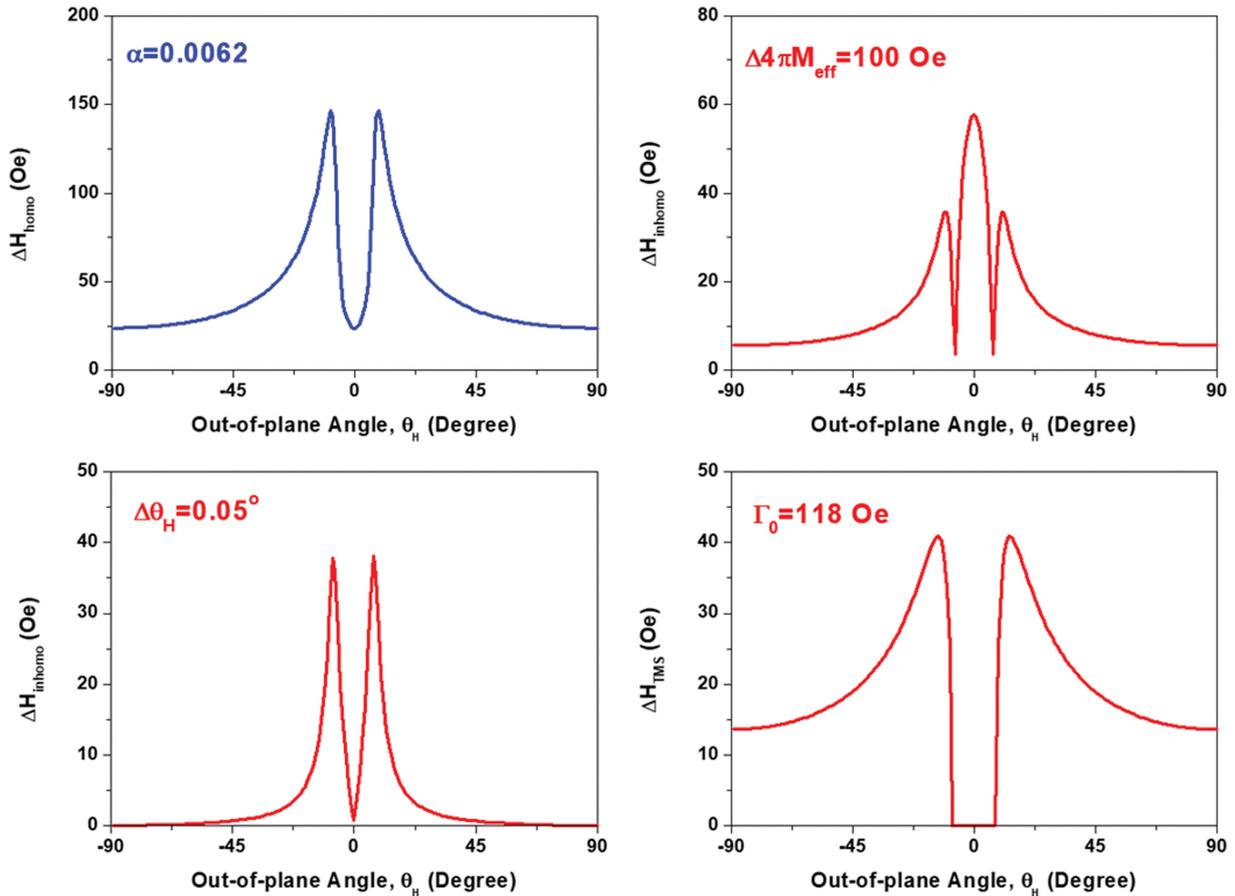


Fig. 7. (Color online) Angular dependence of calculated ΔH_{PP} for ΔH_{homo} and ΔH_{inhomo} . The ΔH_{homo} was intrinsic linewidth only due to Gilbert damping factor α in NiFe(20 nm) thin film as shown in Fig.6. The ΔH_{inhomo} was extrinsic linewidth due to the $\Delta 4\pi M_{eff}$ and $\Delta\theta_H$ effect. The ΔH_{TMS} was due to the two magnon scattering effect.

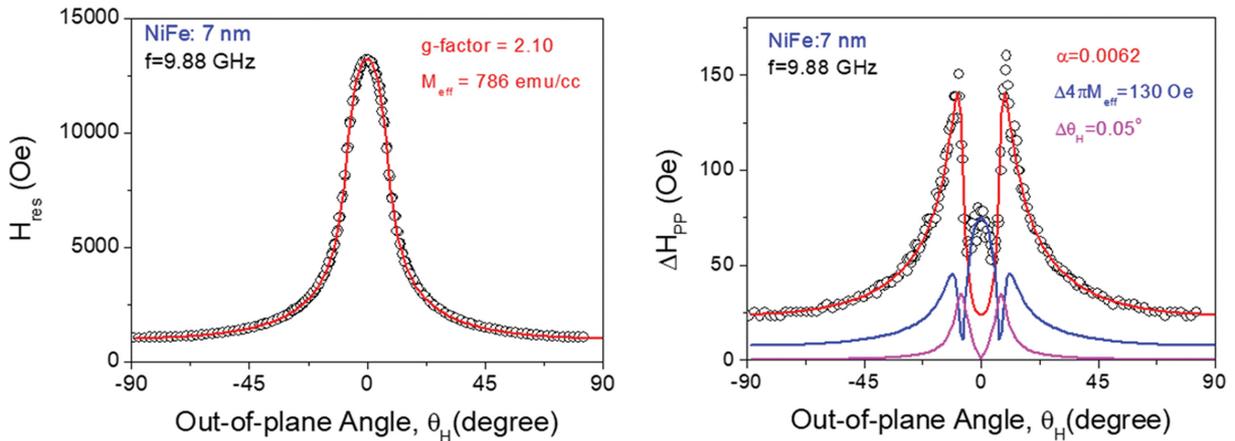


Fig. 8. (Color online) Angular dependence of H_{res} and ΔH_{PP} in NiFe(7 nm) thin film.

증가시키는 특성을 보인다. $\Gamma_0 = 118$ Oe인 경우 최대 약 40 Oe의 선폭 증가 특성을 보이며, $\theta_H = \pm 90^\circ$ 에서도 약 14 Oe의 선폭을 증가시키는 특성을 보인다.

Fig. 8은 NiFe(7 nm) 박막을 사용하여 $-90^\circ < \theta_H < 90^\circ$ 의

수직면에서 측정된 H_{res} 및 ΔH_{PP} 의 각도 의존성을 각각 보인 것이다. NiFe(7 nm) 박막의 g-factor는 NiFe(20 nm) 박막과 유사한 $g = 2.10$ 을 얻었다. 그러나 유효 자화량 M_{eff} 는 NiFe(20 nm) 박막보다 5% 감소한 786 emu/cc를 얻었다. NiFe의

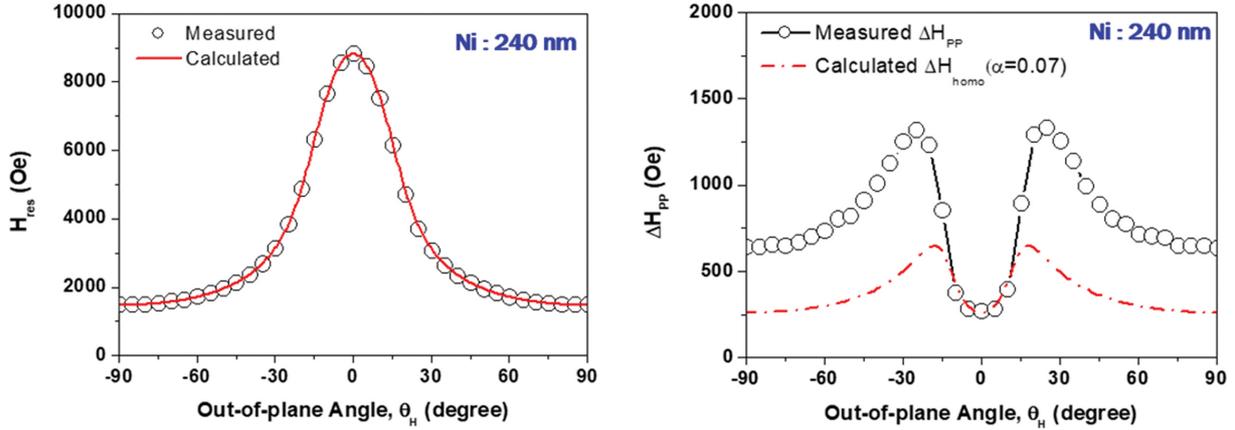


Fig. 9. (Color online) Angular dependence of H_{res} and ΔH_{PP} in Ni(240 nm) thin film [19].

두께 감소에 따른 유효 자화량 감소는 박막 표면의 수직 이방성 상수 증가에 기인하며[18], 표면의 수직 이방성 상수 증가는 $\Delta 4\pi M_{eff}$ 의 효과와 관련된다. $\Delta 4\pi M_{eff}$ 의 효과는 NiFe (7 nm) 박막의 선폭 ΔH_{PP} 측정 결과에서 나타났다. NiFe (7 nm) 박막의 선폭 ΔH_{PP} 는 $\theta_H = 0^\circ$ 근처에서 NiFe(20 nm) 박막의 선폭보다 크게 증가된 결과를 보였다. 이는 ΔH_{inhomo} 의 $\Delta 4\pi M_{eff}$ 효과와 같으며, $\Delta 4\pi M_{eff} = 130$ Oe에 해당하는 선폭 증가로 해석된다. 한편, H_{res} 의 기울기가 최대인 수직면 각도에서 증가된 선폭은 $\Delta\theta_H = 0.05^\circ$ 의 효과로 해석된다. 이들 결과로부터 NiFe(7 nm) 박막은 $\Delta 4\pi M_{eff} = 130$ Oe과 $\Delta\theta_H = 0.05^\circ$ 인 비균질 재료임을 알 수 있다.

Fig. 9는 Ni(240 nm) 박막을 사용하여 $-90^\circ < \theta_H < 90^\circ$ 에서 측정된 H_{res} 및 ΔH_{PP} 의 각도 의존성을 각각 보인 것이다. H_{res} 로부터 Ni 박막의 유효 자화량 $M_{eff} = 445$ emu/cc 및 $g = 2.18$ 을 얻었다. Ni(240 nm) 박막에서 측정된 선폭 ΔH_{PP} 의

수직면 각도 의존성은 $\theta_H = \pm 90^\circ$ 에서 측정된 선폭이 $\theta_H = 0^\circ$ 에서 측정된 선폭보다 매우 크게 나타났다. 이러한 선폭 변화는 Fig. 7에서 보인 것과 같이 ΔH_{TMS} 의 영향임을 알 수 있다. 감쇠상수 $\alpha = 0.07$ 인 경우에 대하여 계산한 균일한 선폭 ΔH_{homo} 와 측정된 ΔH_{PP} 의 차이를 ΔH_{TMS} 의 효과로 볼 수 있다.

Ni(240 nm) 박막의 ΔH_{TMS} 특성을 분석하기 위하여, 측정된 ΔH_{PP} 에서 균일한 선폭 특성인 ΔH_{homo} 를 제거하여 ΔH_{TMS} 를 도출하였다. Fig. 10에서 보인 것과 같이 $\Gamma_0 = 1062$ Oe인 경우, 식(13)~(14)로 계산한 결과는 측정 결과와 일치하였으며, Ni(240 nm) 박막의 선폭 ΔH_{PP} 는 $\theta_H = \pm 90^\circ$ 로 갈수록 스핀과 산란에 의한 ΔH_{TMS} 의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

4. H_{res} 의 수평면 각도 의존성 분석

수평면 각도 ϕ_H 에 따른 강자성 공명 조건은 식(1)~(2)로부터 다음과 같이 표현된다[5].

$$\left(\frac{\omega}{\gamma}\right)^2 = (2\pi M_{eff} + H_{res} \cos(\phi_H - \phi_M) + H_K \cos^2 \phi_M) \times (H_{res} \cos(\phi_H - \phi_M) + H_K \cos 2\phi_M) \quad (15)$$

강자성 박막의 수평면 각도에 따른 H_{res} 를 측정하여, 수평면에서의 일축 이방성 자기장(H_K)을 구할 수 있다.

5. ΔH_{PP} 의 수평면 각도 의존성 분석

강자성 박막에서 수평면 ΔH_{inhomo} 는 수평면 자화 용이축의 분포 특성인 $\Delta\phi_H$ 에 의존하며 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta H_{inhomo} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{\partial H_{res}}{\partial \phi_H} \right| \Delta \phi_H \quad (16)$$

식(16)의 ΔH_{inhomo} 는 H_{res} 의 ϕ_H 에 대한 미분의 절댓값으로

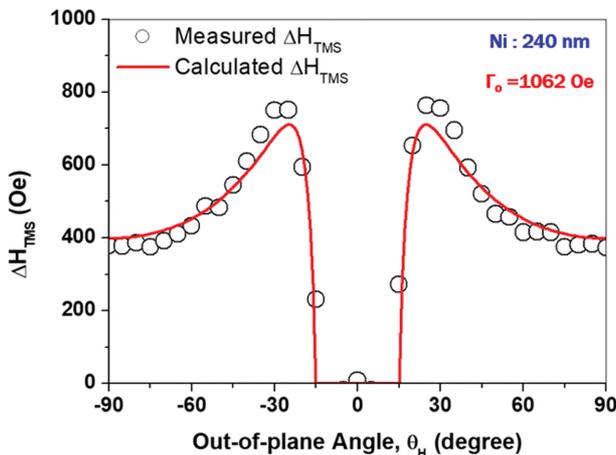


Fig. 10. (Color online) Angular dependence of ΔH_{TMS} in Ni(240 nm) thin film [19].

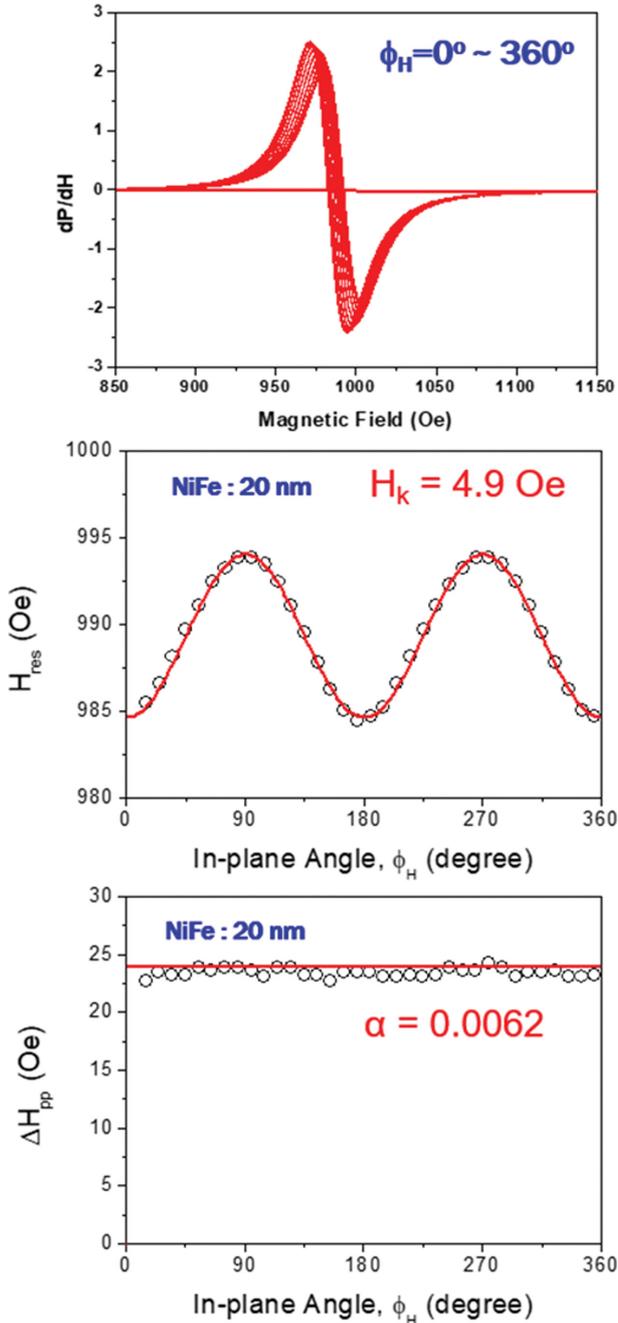


Fig. 11. (Color online) Angular dependence of FMR signals, H_{res} and ΔH_{PP} in NiFe(20 nm) thin film.

계산된다.

Fig. 11은 NiFe(20 nm) 박막을 사용하여 $0^\circ < \phi_H < 360^\circ$ 에서 측정된 FMR 신호 및 FMR 신호로부터 도출한 H_{res} 및 ΔH_{PP} 의 각도 의존성을 각각 보인 것이다. 수평면 각도에 따라 NiFe(20 nm) 박막의 FMR 신호는 수평면의 일축 이방성 자기장에 의한 H_{res} 의 변화를 반영하고 있으며, 식(15)로부터 일축 이방성 자기장 $H_K = 4.9$ Oe를 얻었다. 한편, NiFe(20

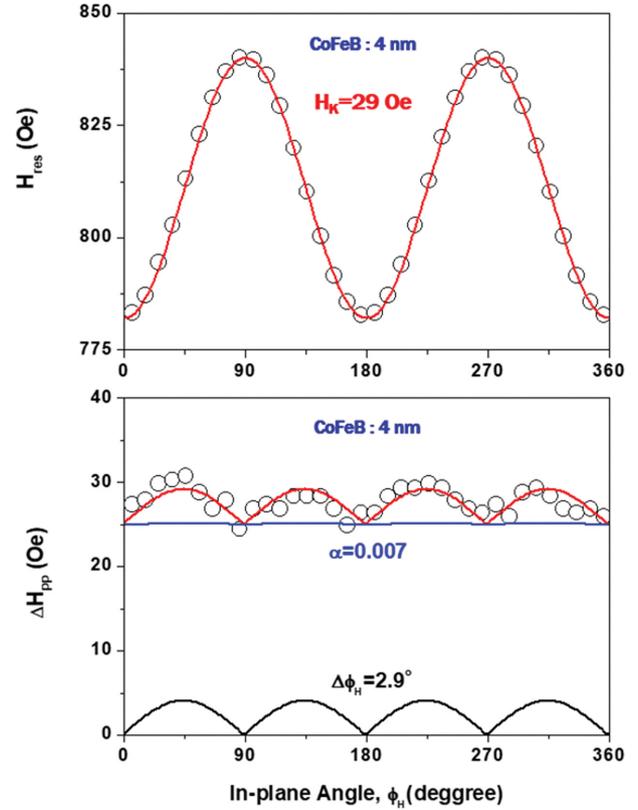


Fig. 12. (Color online) Angular dependence of H_{res} and ΔH_{PP} in amorphous CoFeB(4 nm) thin film [20].

nm) 박막의 선폭 ΔH_{PP} 는 수평면 각도에 따라 일정한 값을 보였으며, 이는 NiFe(20 nm) 박막의 감쇠상수 $\alpha = 0.0062$ 에 의한 ΔH_{inomo} 와 일치하였다.

Fig. 12는 비정질 CoFeB(4 nm) 박막 재료의 H_{res} 와 ΔH_{PP} 의 수평면 각도 의존성을 보인 것이다. 식(15)를 이용하여 계산한 결과 유효 자화량 $M_{eff} = 980$ emu/cc과 일축 이방성 자기장 $H_K = 29$ Oe를 얻었다[20]. 또한 식(16)을 이용하여 $\Delta\phi_H$ 에 의한 ΔH_{inomo} 를 계산하였으며, 감쇠상수 $\alpha = 0.007$ 에 의한 ΔH_{inomo} 와 비교하여 $\Delta\phi_H = 2.9^\circ$ 를 얻었다. 일축 이방성 특성을 갖는 비정질 CoFeB 박막은 수평면에서 자화 용이축 분포가 약 2.9° 로 불균질한 특성을 갖는 재료임을 알 수 있다.

Cavity-FMR 장비는 강자성 공명 신호뿐만 아니라 박막을 진행하는 스핀파 공명 신호 측정에도 이용된다. 스핀파 공명 신호는 강자성 재료의 교환 뻗뻗함(exchange stiffness) 상수 측정에 이용되고 있다[21-23]. 또한, 저자기장에서 측정되는 마이크로파 흡수(LFMA, low field microwave absorption) 신호는 강자성 재료의 자화 반전 연구에 이용할 수 있다[24-26]. 이러한 Cavity-FMR 장비는 자성 재료의 다양한 물성 분석이 가능하므로 자성 재료 연구에서 많이 활용되고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 강자성 공명(FMR) 신호를 측정하는 장치의 하나로 특정한 마이크로파 주파수를 사용하여 신호의 감도를 향상한 Cavity-FMR 장치를 소개하였다. 또한, 다양한 자성 재료의 FMR 신호를 비교하여, FMR 신호의 자기 물성 의존성을 제시하였다. Cavity-FMR 장치를 사용하여 측정한 강자성 공명 신호의 현상학적인 묘사 방법을 제시하였다.

강자성 박막의 수직면 각도에서 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 을 이용하여 재료의 유효 자화량인 M_{eff} 및 자화의 세차운동을 결정하는 g-factor를 구하였다. 또한 수평면 각도에서 측정된 강자성 공명 자기장 H_{res} 을 이용하여 박막의 수평면 이방성 자기장을 도출하였다. 재료의 균질성, 비균질성 및 스핀파의 산란 등을 반영하는 강자성 공명 선폭 ΔH_{pp} 를 현상학적으로 분석하는 방법을 제시하였다.

Cavity-FMR 장비는 강자성 공명 신호뿐만 아니라 박막을 진행하는 스핀파 공명 신호 측정도 가능하여 강자성 재료의 교환 뻗뻗함(exchange stiffness) 상수의 분석에 이용되고 있다. 또한, 저자기장에서 측정되는 마이크로파 흡수(LFMA, low field microwave absorption) 신호는 강자성 재료의 자화 반전 특성 연구에 이용할 수 있다. 이러한 Cavity-FMR 장비는 자성 재료의 다양한 물성 분석이 가능하므로 자성 재료 연구에서 많이 활용되고 있다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다. 산화철 나노입자 및 자성 박막 재료의 제작과 FMR 신호 측정에 도움을 주신 일본 도호쿠 대학의(고) Takahashi 교수님께 진심으로 감사드립니다.

References

[1] W. Platow, A. N. Anisimov, G. L. Dunifer, M. Farle, and K. Baberschke, Phys. Rev. B **58**, 5611 (1998).

[2] S. J. Yuan, L. Sun, H. Sang, J. Du, and S. M. Zhou, Phys. Rev. B **68**, 134443 (2003).

[3] S. Misukami, Y. Ando, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 580 (2001).

[4] M. Oogane, T. Wakitani, S. Yakata, R. Yilgin, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. **45**, 3889 (2006).

[5] S. Yuan, K. Yu, L. M. Yu, S. X. Cao, C. Jing, and J. C. Zhang, J. Appl. Phys. **101**, 113915 (2007).

[6] S. Yuan, B. Kang, L. Yu, S. Cao, and X. Zhao, J. Appl. Phys. **105**, 063902 (2009).

[7] S. Yuan, L. Wang, R. Shan, and S. M. Zhou, Appl. Phys. A **79**, 701 (2004).

[8] J. P. Nibarger, R. Lopusnik, Z. Celinsk, and T. J. Silva, Appl. Phys. Lett. **83**, 93 (2003).

[9] <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/mr/epr-instruments.html>.

[10] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean. Magn. Soc. **24**, 11 (2014).

[11] J. Linder, I. Barsukov, C. Raeder, C. Hassel, O. Posth, R. Meckenstock, P. Landeros, and D. L. Mills, Phys. Rev. B **80**, 224421 (2009).

[12] P. Landeros, R. E. Arias, and D. L. Mills, Phys. Rev. B **77**, 214405 (2008).

[13] P. K. Krivosik, N. Mo, S. Kalarickal, and C. E. Patton, J. Appl. Phys. **101**, 083901 (2007).

[14] K. Lenz, H. Wende, W. Kuch, K. Baberschke, K. Nagy, and A. Janossy, Phys. Rev. B **73**, 144424 (2006).

[15] M. J. Hurben and C. E. Patton, J. Appl. Phys. **83**, 4344 (1998).

[16] C. E. Patton, C. H. Wilts, and F. Humphrey, J. Appl. Phys. **38**, 1358 (1967).

[17] C. Nistor, K. Sun, Z. Wang, M. Wu, C. Mathieu, and M. Hadley, Appl. Phys. Lett. **95**, 012504 (2009).

[18] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean. Magn. Soc. **22**, 37 (2013).

[19] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean. Magn. Soc. **24**, 60 (2014).

[20] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean. Magn. Soc. **21**, 10 (2011).

[21] S. S. Yoon and D. Y. Kim, J. Korean. Magn. Soc. **27**, 175 (2017).

[22] M. Belmeguenai, D. Apalkov, Y. Roussigné, M. Chérif, A. Stashkevich, G. Feng, and X. Tang, J. Phys. D: Appl. Phys. **50**, 415003 (2017).

[23] C. Y. You, Appl. Phys. Exp. **5**, 103001 (2012).

[24] D. Y. Kim and S. S. Yoon, J. Korean. Magn. Soc. **25**, 74 (2015).

[25] H. Gavi, B. D. Ngomb, A. C. Beye, A. M. Strydom, V. V. Srinivasun, M. Chaker, and N. Manyala, J. Magn. Mater. **324**, 1172 (2012).

[26] J. Lee, J. Kim, and K. H. Kim, Phys. Status Solidi A **211**, 1900 (2014).