

이층 자성막에서 여기되는 강자성 공명신호의 모의실험

Simulations of Ferromagnetic Resonance Spectra Excited in Magnetic Bilayers

김약연*, 한기평*, 유성초**

(Yark-Yeon Kim*, Gee-Pyeong Han*, and Seong-Cho Yu**)

Abstract

We have performed the simulation of ferromagnetic resonance spectra on the exchange coupled bilayer thin films at perpendicular configuration. Variables considered in spectrum calculation were the interfacial exchange constants per unit area, the layer thickness, and the surface anisotropy constants. In case of antiferromagnetic coupling, variation of exchange constant gave a great effect to the absorption spectra of the low and the high magnetization layer. Variation of thickness in low magnetization layer did not nearly influenced the resonance field of the high magnetization layer. Also, the increase of negative surface anisotropy increased the resonance field of the low and the high magnetization layer.

Key Words : Magnetic bilayer; Magnetic surface anisotropy; Interface exchange constant

1. 서 론

최근 초박막에 대한 연구와 더불어 서로 다른 자기적 특성을 보이는 자성박막을 주기적으로 쌓아가는 자성 다층박막(multilayer)에 대한 연구에 많은 관심이 집중되고 있다[1-5]. 다층박막은 단층(single layer)으로 형성된 박막에서는 볼 수 없는 자기적 특성을 나타내므로, 새로운 자성재료를 설계하는 수단으로서 뿐만 아니라 자성체의 경계면 상호작용(interfacial interaction)에 대한 기초연구에서도 매우 중요한 분야이다. 다층박막에 대한 초기의 연구는 자성체의 경계면 상호작용에 대한 현상보다는 서로 다른 자성층을 형성시킴에 따라 단

층박막에서 실현할 수 없는 복합적인 자기적 특성을 개발하는데 집중되었다. 특히 마이크로파소자(microwave device)에 응용되는 정자파 여기에 대한 분산특성의 향상은 주목할만한 분야이다. 최근의 다층박막에 대한 연구관점은 가장 기본적인 핵심적인 현상인 자성체 사이의 직접적인 접촉이나 비자성층을 통한 상호작용에 대한 것이며, 이러한 상호작용은 자기쌍극자력(magnetic dipole force)과 교환상호력(exchange interaction force)에 기인한다. 자기쌍극자에 의한 상호작용은 장거리에 걸쳐 작용하며, 경자성과 연자성 박막으로 이루어진 다층박막 구조에서 경자성에 의한 인가 자기장 효과에 따른 연자성체의 자기특성 변화나 포화자화가 매우 큰 연자성체를 경자성체에 결합하여 보다 높은 인가 자기장을 형성시키는 분야에서 연구되고 있다. 일반적으로 교환상호작용은 단거리 상호작용이기 때문에 원자사이의 거리가 2~3 nm 이상일 때에는 사라지게 된다고 알려져 있으나, 반강자성 상호작용으로 설명되는 Fe/Cr 다층막의 거대자기저항(GMR : giant magnetoresistance) 효과

* : 한국전자통신연구원 신기능정보소자팀

(대전시 유성구 가동동 161번지)

Fax : 042-860-5202

Corresponding Author: yykim3@etri.re.kr)

** : 충북대학교 물리학과

2002년 10월28일 접수, 2003년 12월6일 1차 심사완료,

2003년 1월 9일 최종 심사완료.

에 대한 실험적 결과가 1988년 M. N. Baibich 등에 의해 보고된 후[6], 자성박막 경계면에서의 교환상호작용은 자성체 사이에 놓인 비자성체를 매개로 이루어진 결합과 서로 다른 특성의 자성박막이 직접적으로 결합하는 경우로 분류되어 많은 연구가 진행중이다. 전자의 경우는 Fe/Cu, Fe/Au, Co/Cu, Co/Cu, Ni/Ag/NiFe 등에 대해 많은 연구가 진행되었으며, 후자의 경우는 강자성체에 반강자성체를 형성시켜서 반강자성체의 교환자기이방성(exchange magnetic anisotropy)에 의한 스핀밸브(spin valve) 효과를 이용하여 강자성체의 자기이력 특성을 변화시키는 것으로 교환자기이방성을 인가하는 반강자성체로서 상자성체로의 전이온도인 Neel 온도가 상온보다 높은 NiO, CoO, CrO 등을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 자성박막의 경계면 상호작용에 대한 응용적 연구는 자기저항의 측정으로부터 이루어지고 있으나, 보다 기본적인 경계면에서의 상호작용에 대한 연구는 초전도양자간섭계(SQUID : Superconducting Quantum Interference Device)[10], Brillouin Light Scattering[8,9], 강자성공명(FMR : Ferromagnetic Resonance), 자기광 커효과(MOKE : Magneto-Optic Kerr Effect) 장치 등에 의해 수행되고 있다. 특히, 강자성 공명실험에 의한 연구는 경계면에서의 교환력에 대한 정량적 정보를 제공하는 매우 유용한 실험방법으로, 교환력의 세기와 박막의 두께에 따른 공명 신호의 위치와 세기를 통해 분석된다. 다층박막에 대한 강자성 공명실험에서 관측된 신호에 대한 분석이론은 J. Barnas, H. Bosse, A. Layadi, J. F. Cochran 등에 수행된 많은 연구가 보고되었다[11-13].

본 연구에서는 서로 다른 자기적 특성을 갖는 이층 박막의 경계면에서 발생하는 교환력에 따른 강자성 공명신호의 변화를 F. Hoffmann에 의해 보고된[14,15] 자성박막 경계면에서의 자화의 경계조건을 고려한 자화의 운동방정식과 Maxwell 방정식을 이용해 조사하였다. 이론적 분석은 정자기장이 박막에 수직인 경우의 공명자기장과 공명흡수선의 세기 변화에 주목하여 고찰하였다.

2. 이론적 배경

그림 1과 같이 각각 자화가 M_1, M_2 인 자성층으로 이루어진 이층막에 정자기장 \vec{H}_{ext} 을 박막면에 수직인 y-축 방향으로 인가하고, 마이크로파를 y

축 방향으로 입사시켰을 때 이층막이 흡수하는 마이크로파 에너지는 단층막의 경우와 마찬가지로 경계조건을 고려한 Maxwell 방정식과 자화의 운동방정식을 이용함으로써 얻어질 수 있으나, 이층막의 경우는 층막에서와는 달리 두 자성층사이의 경계면에서 형성되는 교환력을 고려한 자화의 경계조건이 포함되어야 할 것이다.

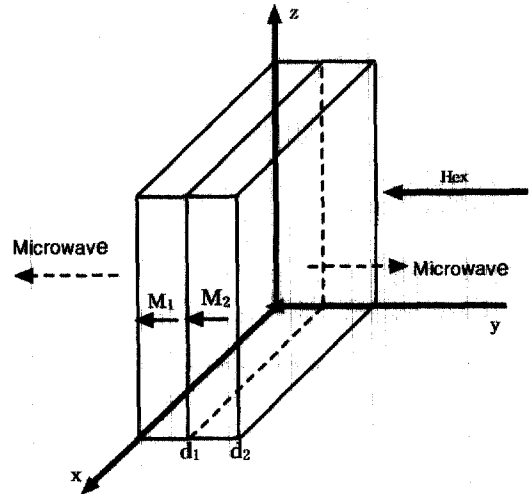


그림 1. 계산에 사용된 좌표계.

Fig. 1. The coordinate configuration used in this calculation.

2.1 Maxwell 방정식과 자화의 운동방정식

강자성체에 전자기파가 입사되었을 때, 시료내부에서 형성되는 전자기장과 동적자화의 관계는 다음과 같은 Maxwell 방정식에 의해 결정된다.

$$\nabla \times \vec{h} = \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{e}}{\partial t} + \frac{4\pi\sigma}{c} \vec{e} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{e} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{h}}{\partial t} - 4\pi \frac{\partial \vec{m}}{\partial t} \quad (2)$$

여기서 \vec{h} 와 \vec{e} 는 각각 전자기파의 자기장과 전기장, \vec{m} 은 전자기파 자기장에 의해 발생한 자화이며, ϵ 과 σ 는 각각 시료의 유전율과 전기 전도도이다.

강자성체에 외부 자기장을 가했을 때, 실제 박막이 받는 자기장은 유효자기장 \vec{H}_{eff} 와 교환 자기장 \vec{H}_{ex} 를 고려하여 자화의 운동방정식을 표현하

면 다음과 같다.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma \vec{M} \times (\vec{H}_{eff} + \frac{2A}{M_0} \nabla^2 \vec{M} + \frac{\alpha}{\gamma M_0} \frac{d\vec{M}}{dt}) \quad (3)$$

여기서 우변 마지막항의 α 는 Gilbert 감쇠상수이고, M 은 정자기장에 의한 자화의 크기이다. 박막이 x - z 평면에 놓여 있고, 정자기장이 y 축을 향하는 경우, 박막 내부의 자기장인 유효자기장 \vec{H}_{eff} 와 자화 \vec{M} 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\vec{H}_{eff} = (H_0 - 4\pi M_0) \hat{i}_y + \vec{h} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (4)$$

$$\vec{M} = M_0 \hat{i}_y + \vec{m} e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (5)$$

여기서 H_0 와 M_0 는 정자기장과 정자기장에 의한 자화, \vec{h} 와 \vec{m} 은 마이크로파에 의한 자기장과 자화이며, \hat{i}_y 는 y 축 방향의 단위 벡터이다.

따라서 Maxwell 방정식과 자화의 운동방정식을 동시에 만족하는 동적자화에 대한 해가 존재하기 위한 스핀파의 파수에 대한 표현을 얻을 수 있으며, 이중막의 경우 공명현상에 기여하는 파수는 총 8개이다. 이러한 파수를 가진 스핀파는 8개의 미지수로 표현되며. 이러한 미지수는 이중막 경계면에서 주어지는 경계조건으로부터 얻어진다.

2.2 경계조건(boundary condition)

마이크로파가 자성체에 입사할 때 만족해야 할 경계조건은 마이크로파의 전기장과 자기장에 대한 연속조건과 유도된 동적자화로 나눌 수 있으며 각각의 4개의 표현식이 주어진다.

2.2.1 전자기장의 경계조건

M_1 층의 경계면 $y=0$, d_1 에서의 전기장과 자기장을 각각 $e_{1,0}$, $e_{1,d1}$, $h_{1,0}$, $h_{1,d1}$ 라 하고 M_2 층의 경계면 $y=d_1$, d_2 에서의 전기장과 자기장을 각각 $e_{2,d1}$, $e_{2,d2}$, $h_{2,d1}$, $h_{2,d2}$ 라고 했을 때 연속조건은 다음과 같다.

- M_1 층에서의 전자기장 경계조건

• $y=0$

$$h_{1,0} = \sum_{i=1}^2 [A_{1i} + B_{1i}] \quad (6)$$

$$e_{1,0} = \sum_{i=1}^2 [-\frac{jc}{4\pi\sigma} k_{1i} A_{1i} + \frac{jc}{4\pi\sigma} k_{1i} B_{1i}] \quad (7)$$

• $y=d_1$

$$h_{1,d_1} = \sum_{i=1}^2 [A_{1i} \text{Exp}(-jk_{1i}d_1) + B_{1i} \text{Exp}(jk_{1i}d_1)] \quad (8)$$

$$e_{1,d_1} = \sum_{i=1}^2 [-\frac{jc}{4\pi\sigma} k_{1i} A_{1i} \text{Exp}(-jk_{1i}d_1) + \frac{jc}{4\pi\sigma} k_{1i} B_{1i} \text{Exp}(jk_{1i}d_1)] \quad (9)$$

- M_2 층에서의 전자기장 경계조건

• $y=d_1$

$$h_{2,d_1} = \sum_{i=1}^2 [A_{2i} \text{Exp}(-jk_{2i}d_1) + B_{2i} \text{Exp}(jk_{2i}d_1)] \quad (10)$$

$$e_{2,d_1} = \sum_{i=1}^2 [-\frac{jc}{4\pi\sigma} k_{2i} A_{2i} \text{Exp}(-jk_{2i}d_1) + \frac{jc}{4\pi\sigma} k_{2i} B_{2i} \text{Exp}(jk_{2i}d_1)] \quad (11)$$

• $y=d_2$

$$h_{2,d_2} = \sum_{i=1}^2 [A_{2i} \text{Exp}(-jk_{2i}d_2) + B_{2i} \text{Exp}(jk_{2i}d_2)] \quad (12)$$

$$e_{2,d_2} = \sum_{i=1}^2 [-\frac{jc}{4\pi\sigma} k_{2i} A_{2i} \text{Exp}(-jk_{2i}d_2) + \frac{jc}{4\pi\sigma} k_{2i} B_{2i} \text{Exp}(jk_{2i}d_2)] \quad (13)$$

여기서 k_1 , k_2 는 각 층에서의 파수이며, 이중막 바깥 경계면의 자기장이 마이크로파 자기장과 같으므로 $y=0$, d_2 에서의 임피던스 Z_0 , Z_{d2} 는 정의에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Z_0 = \frac{jc}{4\pi\sigma h_0} \sum_{i=1}^2 (A_{1i} - B_{2i}) k_{1i} \quad (14)$$

$$Z_{d2} = \frac{-jc}{4\pi\sigma h_d} \sum_{i=1}^2 (A_{2i} e^{-jk_{2i}d} - B_{2i} e^{jk_{2i}d}) k_{2i} \quad (15)$$

2.2.2 동적 자화의 경계조건

서로 다른 자기적특성을 갖는 자성체 경계면에서 작용하는 교환력에 의한 자화의 경계조건에 대한 거시적 표현은 F. Hoffmann 등에 의해 보고되었으며[12], 이중막의 경우 자화가 각각 M_1 과 M_2 이고 같은 구조를 갖는 M_1 과 M_2 층의 경계에서 작

용하는 교환력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_s' = -2J \vec{S}_1 \cdot \vec{S}_2 \quad (16)$$

여기서 \vec{S}_1 과 \vec{S}_2 는 M_1 과 M_2 층의 스핀이고, J 는 최인접 원자사이에 작용하는 교환 적분상수이다. 위 식을 거시적인 물리량인 자화 M_1, M_2 에 대해 표현하면 다음과 같으며,

$$E_s = -\frac{2A_{12}}{M_1 M_2} \vec{M}_1 \cdot \vec{M}_2 \quad (17)$$

여기서 두 층사이의 교환력 크기를 결정하는 단위 면적당의 교환상수 A_{12} 는 a 를 두층에서 의 격자상수라 했을 때 각 층의 스핀 자기모멘트 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$A_{12} = \frac{J}{a^2} \langle \vec{S}_1 \rangle \cdot \langle \vec{S}_2 \rangle \quad (18)$$

각 층에서의 자화가 y 축 방향으로 인가된 정자기장에 포화되었다고 가정하면 각층에서의 총 자화는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{M}_{1,2} = M_{10,20} \hat{j} + m_{1x,2x} \hat{i} + m_{1z,2z} \hat{k} \quad (19)$$

여기서 M_{10}, M_{20} 은 각층에서의 정적인 자화이다.

- M_1 층에서의 자화 경계조건

• $y=0$

$$A \frac{\partial m_{x,z}}{\partial y} - K_{S_1} m_{x,z} = 0 \quad (20)$$

• $y=d_1$

$$A_1 \frac{\partial \vec{m}_1}{\partial y} - A_{12} \left(\frac{M_1}{M_2} \vec{m}_2 - \vec{m}_1 \right) = 0 \quad (21)$$

- M_2 층에서의 자화의 경계조건

• $y=d_1$

$$A_2 \frac{\partial \vec{m}_2}{\partial y} + A_{12} \left(\frac{M_2}{M_1} \vec{m}_1 - \vec{m}_2 \right) = 0 \quad (22)$$

• $y=d_2$

$$A \frac{\partial m_{x,z}}{\partial y} - K_{S_2} m_{x,z} = 0 \quad (23)$$

따라서 앞절에서 얻어진 자기장에 대한 경계조건과 위의 자화경계조건을 이용하여 8개의 미지수에 대한 표현을 얻을 수 있다.

한편 강자성 공명실험에서 얻어지는 흡수곡선은 마이크로파가 박막면의 단위면적당 흡수되는 에너지를 나타내는 Poynting 벡터의 평균값 S_{av} 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$S_{av} = \frac{1}{2} \left(\frac{c\hbar}{4\pi} \right)^2 \text{Re}(Z_0 + Z_d) \quad (24)$$

여기서 임피던스 Z_0, Z_d 는 자성체 경계면에서의 교환상수, 이층막 각각의 교환상수, 박막 표면에 존재하는 표면 자기이방성, 박막의 두께, 포화자화, 비저항, 감쇠상수 등의 함수이다.

3. 모의 실험 결과 및 토의

Maxwell 방정식과 자화의 운동방정식을 만족하는 해에 전자기장과 자화의 경계조건을 적용하여 얻어진 식(20)에 포함된 자성박막의 물리량은 박막 두께 (d_1, d_2-d_1), 표면 자기이방성상수($K_{S1} : M_1$ 층이 자유공간과 접하는 면의 표면 자기이방성상수, $K_{S2} : M_2$ 층이 자유공간과 접하는 면의 표면 자기

표 1. 강자성공명신호의 계산에 사용된 변수들.
Table 1. Parameters used for the calculation of the ferromagnetic resonance curves.

Parameters	M_1 -layer	M_2 -layer
Layer thickness (d_1, d_2-d_1)	300 Å	300 Å
Resistivity (ρ_1, ρ_2)	$0.3 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$	$0.3 \times 10^{-6} \Omega\text{m}$
Damping factor (α_1, α_2)	0.005	0.005
Spectroscopic splitting factor (g_1, g_2)	2.19	2.19
Surface magnetic anisotropy (K_1, K_2)	0 erg/cm ²	0 erg/cm ²
Exchange stiffness constant (A_1, A_2)	1.2×10^{-6} erg/cm	1.0×10^{-6} erg/cm
Effective magnetization ($4\pi M_1, 4\pi M_2$)	10 kG	9 kG
Interfacial exchange stiffness constant (A_{12})	± 0.5 erg/cm ²	± 0.5 erg/cm ²

이방성상수), 교환강성상수(A_1 : M_1 층의 교환강성상수, A_2 : M_2 층의 교환강성상수, A_{12} : M_1 층과 M_2 층이 상호작용하는 교환강성상수), 비저항(ρ), Gilbert 감쇠상수(α), 유효자화($4\pi M$), 분광학적 분리인자(g) 등이며 이러한 7종류의 물리량들이 공명흡수선에 영향을 주게 된다.

실제 강자성 공명실험을 통한 정보는 주로 공명 자기장, 선폭, 공명 흡수에너지 세기 등의 관측을 통해 얻어지며, 이층막의 경우 서로 다른 자기적 특성을 갖는 자성층 사이의 교환력 A_{12} 에 따른 공명흡수선의 변화가 주된 관심사이다. 그러나 각 자성층의 두께 d_1 , d_2 - d_1 및 표면 자기이방성 K_{S1} , K_{S2} 에 따른 공명흡수선의 변화도 교환력과 마찬가지로 매우 중요한 변수이다. 모의실험은 외부에서 인가되는 정자기장이 이층막 표면에 수직하게 인가된 경우를 고려했으며, 정자기장 세기는 10 ~ 16 kOe의 범위에서 1 Oe 간격으로 계산되었다. 또한 공명흡수선에 영향을 미치는 물리량은 기본적으로 Table 1과 같이 가정했으며, 위에서 언급된 3가지 물리량을 변수로 9 GHz의 마이크로파 진동수에서 강자성 공명흡수선을 계산하였다.

3.1 M_1 층과 M_2 층 사이의 교환강성상수 A_{12} 세기에 따른 공명흡수선의 변화

그림 2는 이층막 사이의 단위면적당 교환력의 세기인 교환강성상수가 각각 양수와 음수인, 즉 강자성 결합과 반강자성 결합의 세기가 0.1에서 -0.1 erg/cm^2 로 변화함에 따른 강자성 공명흡수선의 변화이다. 교환강성상수의 세기에 무관하게 2개의 공명흡수선이 나타난다. 이것은 M_1 층과 M_2 층에 있는 자기모멘트의 세차진동수가 외부 정자기장이 변화함에 따라 마이크로파 진동수 9 GHz와 같이 짐에 따라 발생하는 균일 모드이다. 이러한 균일 모드는 정자기장이 막마면에 수직하게 인가되었을 때 자화값이 증가함에 따라 보다 높은 자기장에서 발생한다. 따라서 낮은 자기장에서 여기되는 공명 흡수선은 M_2 층에서 발생하는 모드이고, 높은 자기장에서 여기되는 공명흡수선은 M_1 층에서 발생하는 모드이다. 이러한 각각의 모드를 본 논문에서는 자기장이 높은 쪽의 경우를 mode 1, 낮은 쪽의 경우를 mode 2로 기술하고자 한다. 그림 3은 교환강성상수의 변화에 따른 mode 1과 mode 2의 공명 자기장, 공명선폭 및 공명자기장에서의 마이크로파 흡수에너지의 변화를 나타내고 있다. 교환강성상수가 0인, 즉 M_1 층과 M_2 층이 아무런 자기적 상호작용을 하지 않을 경우 여기되는 mode 1과 mode 2

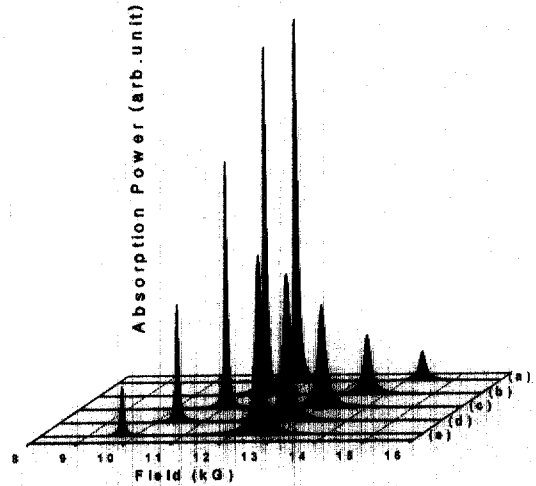


그림 2. M_1 층과 M_2 층 계면의 교환강성상수 세기에 따른 강자성 공명신호 : (a) $A_{12}=-0.1$ erg/cm^2 , (b) -0.05, (c) 0, (d) 0.05, (e) 0.1.

Fig. 2. The microwave absorption spectra as a function of the exchange stiffness constant at the interface between M_1 and M_2 layers : (a) $A_{12}=-0.1$ erg/cm^2 , (b) -0.05, (c) 0, (d) 0.05, and (e) 0.1, respectively.

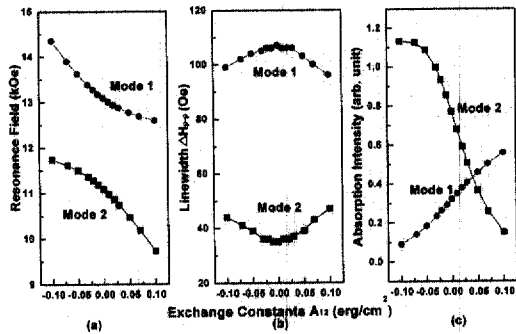


그림 3. M_1 층과 M_2 층 계면의 교환강성상수 세기에 따른 (a) 공명자기장, (b) 선폭, (c) 공명 선폭의 세기변화.

Fig. 3. Variation of (a) resonance field, (b) peak to peak linewidth, and (c) peak intensity as a function of the exchange stiffness constant at the interface between M_1 and M_2 layers.

는 마치 M_1 층과 M_2 층이 독립적으로 강자성 공명 실험을 했을 때 관측되는 공명자기장과 같은 위치에서 여기된다. 교환강성상수가 음으로 증가하는 경우 mode 1과 mode 2의 공명자기장은 모두 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 M_1 층과 M_2 층이 반강자성 결합을 함에 따라 외부에서 인가되는 외부 정자기장의 세기가 증가해야만 공명조건이 만족되기 때문이다. 또한 교환강성상수가 양으로 증가하는 경우는 M_1 층과 M_2 층이 강자성결합을 함에 따라 서로의 자기장이 외부 자기장과 합해져서 외부에서 인가되는 정자기장의 세기가 감소해야 공명조건을 만족하게 되기 때문에 mode 1과 mode 2의 공명자기장이 감소하게 된다. 이러한 교환강성상수에 따른 변화는 공명선폭의 경우에도 발생된다. 두 층사이의 상호작용이 증가함에 따라 그림 3(b)와 같이 공명선폭이 큰 mode 1의 선폭은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 공명선폭이 작은 mode 2의 경우는 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 각 층의 공명선폭과 관계된 Gilbert 감쇠상수 α_1, α_2 가 교환결합력의 세기가 증가함에 따라 유효 감쇠상수 $\alpha_{eff1}, \alpha_{eff2}$ 로 변화함을 의미한다. 공명흡수선의 세기 변화는 강자성 결합력이 강해짐에 따라 결합력이 없을 때 공명흡수에너지의 세기가 약한 mode 1은 증가하고, 세기가 강한 mode 2는 약해지는 반면, 반강자성 결합력이 증가할 경우는 반대의 경향을 보이고 있다. 따라서 서로 다른 자기적 특성을 갖는 이층막에서 공명자기장과 흡수에너지의 세기는 강자성 결합의 경우 자화값이 낮은 자성층에 매우 큰 영향을 미치는 반면, 반강자성 결합의 경우는 자화값이 상대적으로 높은 자성층에 큰 영향을 준다고 할 수 있다.

이러한 경향은 단층막에 대한 자화의 경계조건 변화에 따른 결과와 유사하다. 즉 서로 자기적 특성이 다른 자성층 사이의 교환력은 결국 박막의 경계조건을 변화시켜 주는 역할을 하게 된다. 따라서 단층막의 경계조건인 표면 자기이방성이 uni-axial이 아닌 uni-directional인 경우와 일치하며, 주목할 만한 사실은 교환력의 형태인 강자성 결합과 반강자성 결합상태의 구별은 공명자기장의 변화보다는 오히려 흡수에너지의 세기변화를 관측함으로써 보다 쉽게 판단할 수 있다는 것이다.

그림 4.는 mode 1과 mode 2가 공명자기장 조건에서 마이크로파 자기장 h 에 의해 이층막에서 여기되는 동적자화 m_2 의 허수성분이 두께방향에 따

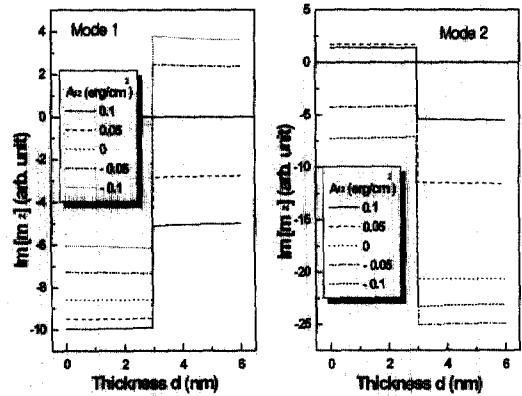


그림 4. M_1 층과 M_2 층 계면의 교환강성상수 세기에 따른 박막두께 방향으로의 동적자화 m_2 의 허수부 여기형태.

Fig. 4. The thickness profile of the imaginary part of the dynamic magnetization m_2 as a function of the exchange stiffness constant at the interface between M_1 and M_2 layers.

라 변화하는 그림이다. M_1 층과 M_2 층 사이의 교환력이 0인 경우 mode 1의 m_2 는 0~30 nm 두께에서만 유한한 값을 갖고, 31~60 nm 두께영역에서는 0의 값을 갖는다. 반면 mode 2의 경우 두께가 0~30 nm 영역에서 m_2 가 0이며, 31~60 nm 두께영역에서 유한한 값을 갖는데, 이러한 결과는 mode 1과 mode 2가 각각 M_1 층과 M_2 층에서 여기된 것이라는 것을 나타내며, 앞에서 설명한 바와 같이 두 층사이의 교환력이 0인 경우에 여기되는 mode는 각 층이 독립적으로 강자성 공명실험을 했을 때 여기되는 단일모드의 공명자기장과 같은 위치에서 여기된다는 것이다. 또한 동적자화의 허수성분 $Im[m_2]$ 의 제곱은 이층막이 흡수하는 마이크로파 에너지에 비례하므로, 앞에서 언급한 것과 마찬가지로 강자성 결합력이 증가하는 mode 1의 공명흡수선의 세기를 증가시키나, mode 2의 공명흡수선의 세기를 급격하게 감소시킨다.

3.2 두께에 따른 공명흡수선의 변화

유효자화가 각각 10 kG, 9 kG인 M_1 과 M_2 두 층에서 M_1 또는 M_2 층의 두께를 20 nm로 고정하고 다른 층의 두께를 변화시켰을 때 이에 따른 공명흡수선의 영향을 조사하였다. 그림 5는 M_1 층의 두께를 1 ~ 20 nm으로 증가시켰을 경우 M_1 층과

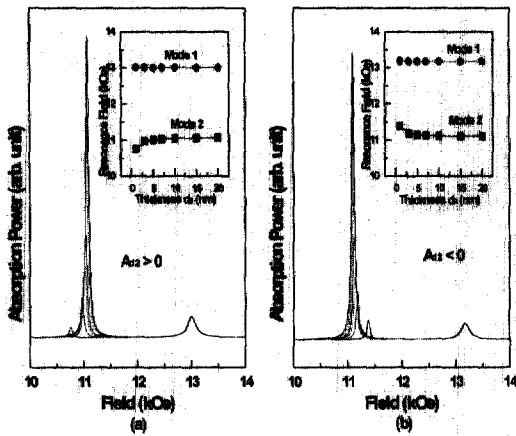


그림 5. M_1 층의 두께에 따른 공명자기장의 변화 : (a) 강자성결합, (b) 반강자성결합.

Fig. 5. Variation of the resonance field as a function of the M_1 layer thickness : (a) ferromagnetic coupling and (b) antiferromagnetic coupling.

M_2 층의 공명자기장의 변화이다. 두 자성층 사이에 강자성결합이 존재하는 그림 5(a)의 경우, 유효자화가 큰 M_1 층의 두께가 증가함에 따라 mode 1의 공명자기장은 전반적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나, 두께가 5 nm 이상일 때에는 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 반면 mode 2의 공명자기장은

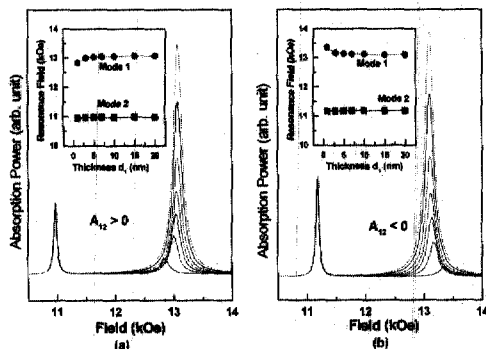


그림 6. M_2 층의 두께에 따른 공명자기장의 변화 : (a) 강자성결합, (b) 반강자성결합.

Fig. 6. Variation of the resonance field as a function of the M_2 layer thickness : (a) ferromagnetic coupling and (b) antiferromagnetic coupling.

사이에 반강자성결합을 할 경우는 두께가 증가 거의 변화가 없이 일정한 값을 유지한다. 두 층사이에 반강자성결합을 할 경우는 두께가 증가할수록 mode 1의 공명자기장은 오히려 감소하는 경향층을 보이고 있다. 이러한 경향은 M_2 층의 두께를 변화시키며 계산한 그림 6의 mode 2에 똑같이 적용된다. 또한 두께 증가에 따른 공명흡수선의 세기 증가는 당연히 박막의 제적이 증가함에 따라 흡수 에너지의 양이 증가하기 때문이다. 따라서 이층막에서 각 층의 두께가 5 nm 이상이 될 경우 다른 층의 두께변화에 따른 공명자기장의 변화는 거의 무시할 수 있다고 할 수 있다. 그러나 5 nm 이하의 초박막으로 구성된 이층막의 경우는 임의의 층의 두께변화를 통해 다른 층의 공명자기장을 변화시킬 수 있다. 또한 공명자기장의 변화는 한편으로 자기적특성이 변화된다는 의미이다. 즉 유효자화값이 결합특성에 따라 감소하거나 증가된다는 의미를 담고 있다.

3.3 표면 자기이방성에 따른 공명흡수선 변화

표면 자기이방성은 이층막의 양쪽 표면, 즉 자유공간과 만나는 경계면에서의 자기적 특성인 표면

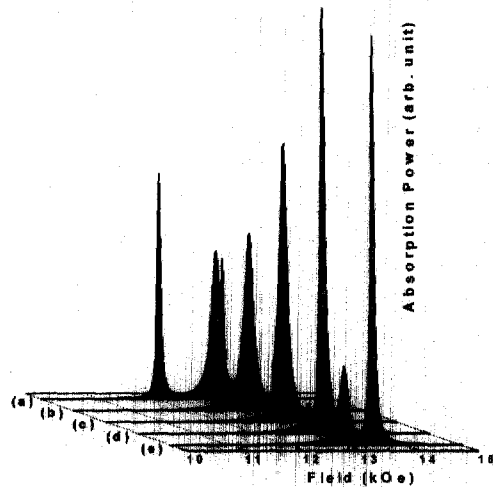


그림 7. 계면 교환강성상수 K_{S2} 의 세기에 따른 강자성 공명신호 : (a) $K_{S2} = -0.1$ erg/cm², (b) -0.15, (c) -0.18, (d) -0.20, (e) -0.23.

Fig. 7. The microwave absorption spectra as a function of the surface anisotropy constants K_{S2} : (a) $K_{S2} = -0.1$ erg/cm², (b) -0.15, (c) -0.18, (d) -0.20, and (e) -0.23, respectively.

자기모멘트의 고착 정도를 나타내는 물리량으로, 공명흡수선의 계산에서는 동적자화의 경계조건으로 표현된다. 본 연구에서는 이층막 표면에 수직인 방향으로의 자화용이축을 갖는 일축 이방성 모델을 사용했다. 따라서 표면 자기이방성 상수가 양수인 경우는 박막면에 수직인 방향으로 자화용이축이 존재한다는 의미이고, 반대로 음수인 경우는 박막 면내에 자화 용이면이 형성된다는 의미이다. 그림 7은 M_1 층의 표면자기이방성은 0이고, M_2 층의 표면자기이방성이 $-0.1 \sim -0.23 \text{ erg/cm}^2$ 로 변화하는 경우, 즉 M_1 층의 표면 자기모멘트는 모든 방향에 대해 자유롭게 움직일 수 있으나, M_2 층의 자기모멘트는 박막면내에 구속되어 있는 경우의 강자성 공명흡수선의 변화를 보이고 있다. 표면 자기이방성의 세기가 음으로 증가함에 따라 비교적 급격하게 변화함을 볼 수 있다. 이러한 급격한 변화는 앞서 논의한 계면 사이의 교환강성상수의 변화에 따른 공명흡수선의 변화와 비슷하다고 할 수 있다. 그러나 그림 8(a)에서 알 수 있는 바와 같이 M_2 층의 표면 자기이방성의 변화는 M_1 층에서 여기되는 mode 1의 공명자기장에는 거의 영향을 주지 않고, M_2 층에서 여기되는 mode 2의 공명자기장을 급격하게 감소시킨다. 이것은 표면 자기이방성이 증가함에 따라 M_2 층 표면에 존재하는 자기모멘트들이 면내로 존재하려는 경향이 강해짐에 따라 마이크로파 진동수와와의 공명조건을 만족하기 위해서는 외부에서 인가되는 정자기장의 세기가 증가되어야 하기 때문이다. 또한 그림 8(b)에서의 공명선평 변화는 mode 1과 2의 공명자기장이 교차됨에 따라 발생하는 영향일 것으로 생각된다. 따라서 표면 자기이방성의 변화는 각 mode의 공명선평에는 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다. 한편 공명흡수선 세기변화는 그림 8(c)에서 알 수 있는 바와 같이 공명자기장이 교차하는 영역을 고려한다고 해도 비교적 변화가 심하다고 할 수 있다. 즉 mode 1의 경우는 표면 자기이방성상수가 음으로 증가함에 따라 완만하게 증가하다가 교차점에서 급격한 감소를 보이고 있으며, 두 mode가 완전히 교차한 후에는 다시 급격하게 증가함을 보이고 있다. Mode 2의 경우는 mode 1과 반대의 경향을 보이고 있다. 이러한 공명흡수선의 세기 변화가 의미하는 것은 표면 자기이방성이 박막에 수직인 방향에서 면내로 변화함에 따라 박막에서 여기되는 동적자화의 허수부인 $\text{Im}[m_z]$ 가 박막 전체에 대해 일정한 크기를 갖는 균일 mode 또는 박막표면에서 최소값을 갖는 형태에서 박막표면에서 최대값을

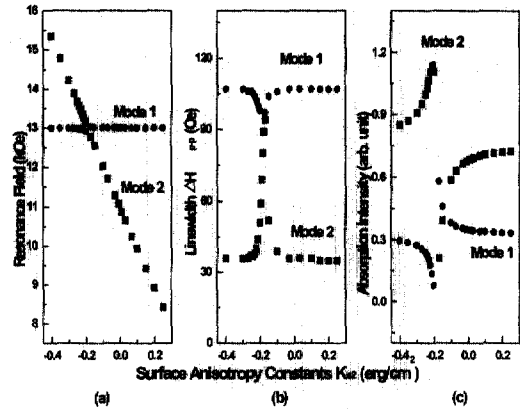


그림 8. M_2 면의 표면자기이방성 크기에 따른 (a) 공명자기장, (b)선평, (c)선평의 세기 변화.
 Fig. 8. Variation of (a) resonance field, (b) peak to peak linewidth, and (c) peak intensity as a function of the surface anisotropy constant in the M_2 layer.

갖는 표면 mode로 변화되는 것으로 생각된다. 이러한 결과는 단층막 표면에서 여기되는 표면 mode의 경우와 유사하다. 그러나 mode 1의 경우도 표면 mode인지는 좀 더 조사해 보아야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

정자기장이 박막면에 수직하게 인가되는 경우에 이층막에서 여기되는 강자성 공명신호에 대한 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 서로 다른 자기적 특성을 갖는 이층막의 결합상태를 나타내는 단위 면적당의 교환강성상수 A_{12} , 각층의 두께, 박막 양면에서의 표면 자기이방성 상수를 고려하여 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교환강성상수가 양으로 증가하는 경우에는 M_1 층과 M_2 층이 강자성결합을 함에 따라 서로의 자기장이 외부 자기장과 합해져서 공명자기장이 낮아지게되며, 음인 경우는 반대로 공명자기장이 높아지는 경향을 보인다.
2. 이층막이 5 nm 이하의 초박막으로 구성된 경우, 임의의 층의 두께변화를 통해 다른층의 유효자화값을 결합특성에 따라 감소 또는 증가시킬 수 있다.

3. 표면 자기이방성이 박막면에 수직인 방향에서 면내로 변화함에 따라 동적자화의 허수부인 $\text{Im}[m_z]$ 가 박막면에서 최대값을 갖는 표면 mode를 여기하여 공명신호의 증폭이 발생한다.

감사의 글

본 논문은 학술진흥재단의 박사후 연수지원 사업(KRF-1996-037-D00616)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] G. M. Genkin, M. V. Sapozhnikov, and I. D. Tokman, "Frequencies of ferromagnetic resonance of ferromagnet - antiferromagnet - ferromagnet(FM/AFM/FM) trilayers", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 131, p. 369, 1994.

[2] H. Yamazaki, "Ferromagnetic resonance of evaporated Fe/Cu/Fe trilayers", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 125, p. 272, 1994.

[3] 현준원, "[CoO/NiO]/NiFe/Cu/NiFe Spin - Valve 박막에서의 자기저항효과와 자기적 특성에 대한 연구", 전기전자재료학회논문지, 9권, 10호, p. 1060, 1996.

[4] 김재욱, "NiO / NiFe / Cu / NiFe 스핀 - 밸브 샌드위치의 자기저항 특성", 전기전자재료학회논문지, 10권, 10호, p. 1016, 1997.

[5] 김명한, 문정탁, 신웅식, 임기조, "Al / Tb - Fe - Co 다층박막의 자기적 이방특성", 전기전자재료학회논문지, 5권, 1호, p. 8, 1992.

[6] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friegrich, and J. Chazelas, "Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 61, p. 2472, 1988.

[7] R. J. Hicken, G. T. Rado, Gang Xiao, and C. L. Chien, "Observation of thickness dependence of magnetic surface anisotropy in ultrathin amorphous films", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 64, No. 15, p. 1820, 1990.

[8] J. F. Cochran, J. Rudd, W. B. Muir, and Z. Celinski, "Brillouin light-scattering experiments on exchange-coupled ultrathin

bilayers of iron separated by epitaxial copper(001)", *Phys. Rev. B.*, Vol. 42, p. 508, 1990.

- [9] D. S. Schmool, J. S. S. Whiting, A. Chambers, and E. A. Wilinska, "Structural and spin wave resonance studies of polycrystalline and epitaxial permalloy-chromium layered structures", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 131, p. 385, 1994.
- [10] J. Barnas and P. Grunberg, "Spin waves in exchange-coupled epitaxial double layers", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 82, p. 186, 1989.
- [11] H. Bosse and H. Gartner, "Spin wave resonance study of exchange coupled Ni₈₀Fe₂₀ double layers separated by thin interlayers of Cu, Cr and Pd", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 80, p. 339, 1989.
- [12] A. Layadi and J. O. Artman, "Ferromagnetic resonance in a coupled two-layer system", *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 92, p. 143, 1990.
- [13] J. F. Cochran, B. Heinrich, and A. S. Arrot, "Ferromagnetic resonance in a system composed of a ferromagnetic substrate and an exchange-coupled thin ferromagnetic overlayer", *Phys. Rev. B.*, Vol. 34, p. 7788, 1986.
- [14] F. Hoffmann, "Evidence for an exchange coupling at the interface between two ferromagnetic films", A. Stankoff, and H. Pascard, *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, p. 1022, 1970.
- [15] F. Hoffmann, "Dynamic pinning induced by nickel layers on permalloy films", *Phys. Stat. Sol.*, Vol. 41, p. 807, 1970.