C-4

일축 비등방성 자성체의 마이크로웨이브 자화율의 닫힌형태 양함수 표현

한국표준과학연구원 허 진 , 김 윤배, 김 창석

Explicit and closed-form expressions for the microwave susceptibility tensor of uniaxial magnetic material

KRISS Jeen Hur , Y. B. Kim, C. S. Kim

1. 서 론

본 논문에서는 일축 비등방성 자성체의 마이크로웨이브 자화율을 실험적으로 구할 수 있는 양들의 닫힌형태(closed-form)의 양함수(explicit function)로 구하였다. 기존에는 마이크로웨이브 자화율을 나타내는 닫힌형태(closed-form)의 양함수(explicit function)가 알려지지 않았기 때문에, 용이축과 자기마당의 방향이 수직 또는 수평한 경우에도 측정된 마이크로웨이브 자화율 곡선을 이론과 맞추는 작업은 많은 시간과 노력이 필요한 시행착오에 주로 의존하였다. 한편,용이축과 자기마당의 방향이 수직 또는 수평한 경우가 아니면, 측정된 자화율 곡선을 해석하기가 더욱 어려웠다. 따라서, 본 논문에서는 용이축에 대해 임의의 각도를 지니는 자기장에 대해, 상호작용 효과를 고려한 자화율을 자기마당 벡터의 닫힌형태(closed-form) 양함수(explicit function)로 구하는 방법에 대해 발표한다.

2. 본 론

실제계의 손실(loss)을 고려한 2개의 운동방정식들로는 다음 2개식을 들 수 있다.

$$\frac{1}{\gamma}\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\alpha}{\gamma M}\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{1}{\gamma}\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\lambda}{\gamma M^2}\vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}) \tag{2}$$

여기서, t는 시간, $\vec{M}$은 자화 벡터, $\gamma(= ge/(2mc))$는 자기회전율, α는 Gilbert 감쇄상수이고, λ는 Landau-Liftshitz 감쇄상수이다. 이들 감쇄상수가 작은 경우에는 $\alpha = \frac{\lambda}{M\gamma}$의 관계가 있고, 식 (1)및 (2)은 다음식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\gamma}\frac{d\vec{M}}{dt} = \vec{M} \times \vec{H} - \frac{\alpha}{M}\left((\vec{M} \cdot \vec{H})\vec{M} - M^2\vec{H}\right) \tag{3}$$

자화 벡터 및 자기마당 벡터를 $\vec{M} = \vec{M_0} + \vec{m}$, $\vec{H} = \vec{H_0} + \vec{H_\omega}$와 같이 시간에 대해 변하지 않는 벡터량과 시간에 대해 변하는 벡터량으로 나누어 생각하면, 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$j\frac{\omega}{\gamma}\vec{m} = \vec{M_0} \times \vec{H_\omega} - \vec{m} \times \left(H_0 + j\alpha\frac{\omega}{\gamma}\right)\frac{\vec{H_0}}{H_0} \tag{4}$$

여기서, 인가한 TEM 마이크로웨이브 $\vec{h_a}$는 $\vec{h_a} = \vec{h_{a0}}e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$이고, 다이나믹 자기화 벡터 $\vec{m}$은 $\vec{m} = \vec{m_0}e^{j(\omega t - \vec{k}\cdot\vec{r})}$를 만족하고, $\frac{d\vec{M_0}}{dt} = 0$, $|\vec{M_0}| >> |\vec{m}|$, $|\vec{H_0}| >> |\vec{H_\omega}|$라 가정하였다. 한편, 시간에 의존하는 시료 내부의 자기마당($\vec{H_\omega}$)은 인가한 자기마당외에도 상호교환 작용에 의한 자기마당 $\vec{h_{ex}}$의 합($\vec{H_\omega} = \vec{h_a} + \vec{h_{ex}}$)으로 표현될 수 있다. 여기서, $\vec{h_{ex}} = -\frac{2A}{M}k^2\vec{m} - 4\pi\vec{k}(\vec{m}\cdot\vec{k})/k^2$인데, 상호교환 작용에 의한 자기마당의 첫번째 항은 스핀웨이브에 의한 효과이고, 두번째 항은 국부적인 반자장 효과이다. 이제, 식 (4)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$jH_\gamma\vec{m_0} = \vec{M_0} \times \left(\vec{h_{a0}} - \frac{2A}{M}k^2\vec{m_0} - 4\pi\vec{k}(\vec{m_0}\cdot\vec{k})/k^2\right) - \vec{m_0} \times (H_0 + j\alpha H_\gamma)\frac{\vec{H_0}}{H_0} \tag{5}$$

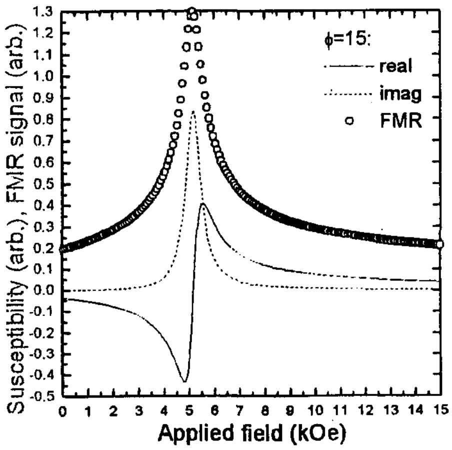
여기서, $H_\gamma = \frac{\omega}{\gamma}$이다. 일반적으로, 일축비등방성 자성체에 대해 자기화의 방향벡터 M_0은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{M}_0 = \frac{1}{1-\left(\hat{K}\cdot\hat{H}_0\right)^2}\left[\left(\hat{K}\cdot\hat{M}_0-(\hat{K}\cdot\hat{H}_0)(\hat{M}_0\cdot\hat{H}_0)\right)\hat{K}+\left(\hat{M}_0\cdot\hat{H}_0-(\hat{K}\cdot\hat{H}_0)(\hat{K}\cdot\hat{M}_0)\right)\hat{H}_0\right] \tag{6}$$

여기서, $\hat{K}$은 용이축의 방향을 나타내는 단위 벡터이고, $\hat{H}_0$은 직류 자기마당방향을 나타내는 단위 벡터이다. 한편, 자기마당의 방향이 용이축과 ϕ 각도를 이룰 때 자기화가 용이축과 이루는 각도를 θ라 하면, 일축 비등방성 자성체의 자기화의 방향을 나타내는 닫힌형태 양함수를 이용하여, θ를 닫힌형태 양함수로 구할 수 있다[1].

$$\theta(\phi,h;h_0) = \begin{cases} \phi-\sin^{-1}\left(\frac{t(\phi,h;h_0)}{2h}\right) , & \text{for } h \geq h_0 , \\ \frac{1}{2}\sin^{-1}(t(\phi,h;h_0)) , & \text{for } h < h_0 . \end{cases} \tag{7}$$

이제, $\hat{K}\cdot\hat{M}_0 = \cos\theta$, $\hat{M}_0\cdot\hat{H}_0 = \cos(\phi-\theta)$, $\hat{K}\cdot\hat{H}_0 = \cos\phi$라 하면, $\vec{M}_0$를 자기마당의 세기 및 방향의 양함수로 나타낼 수 있다. 따라서, 자기마당 벡터의 함수로 $\vec{M}_0$를 나타내고 식(5)로 부터, $\vec{m}$ 와 $\vec{h_{a0}}$의 관계를 구하여 마이크로웨이브 자화율 텐서를 얻었다. 마이크로웨이브 자화율 텐서의 닫힌형태 양함수적 표현을 시험하기 위해 자화율 및 자기공명 신호를 이론적으로 구하였다. 예로서, M_0, H_A, H_γ, h_{ex}를 600, 10000, 9000, 0 (Oe)으로 하고 $\alpha = 0.1$일 때, 용이축과 자기마당이 이루는 각도 ϕ가 각각 15 및 60°에서의 자화율 및 자기공명 신호의 자기마당 세기 의존성을 도 1과 2에 각각 도식하였다. 도 1과 2은 로렌찌안 곡선과 그 개형이 다르므로, 자화율 및 자기공명 신호를 로렌찌안 곡선으로 fitting 해서는 안됨을 보여준다. 한편, 주어진 감쇠상수에 대해 용이축과 자기마당이 이루는 각도가 증가하면 반치폭이 점차 증가함을 알 수 있었다.



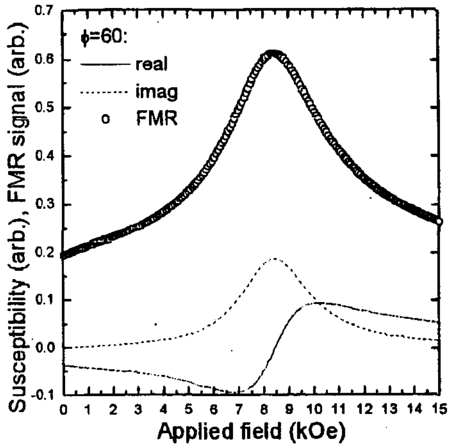


그림 1. $\phi = 15°$에서 얻어지는 자화율 및 강자성공명 곡선. 그림 2. $\phi = 60°$에서 얻어지는 자화율 및 강자성공명 곡선.

3. 결 론

본 논문에서 제시한 마이크로웨이브 자화율 텐서의 닫힌형태 양함수적 표현은 비선형 최소제곱맞춤(least square fitting method) 방법을 제공하고, 마이크로웨이브 자화율 텐서의 선형결합은 상호작용이 없는 자성체들로 이루어진 자성집합체의 마이크로웨이브 자화율을 기술할 수 있다.

4. 참 고 문 헌

[1] 허진, 신성철, "1차 비등방성 단자구 자성체의 자기행동을 기술하는 닫힌 형태의 양 함수들," 한국자기학회지 8(2), 49 (1998).