



# 자기공명 힘 현미경 기술

원순호 | 한국기계연구원

## 1. 서론

전자 상자성 공명(Electron Paramagnetic Resonance: EPR), 핵자기 공명(Nuclear Magnetic Resonance: NMR), 강자성공명(Ferromagnetic Resonance: FMR)현상의 발견 이후 자기공명 기술은 의학 및 생물학 분야에 서부터 화학 및 물리학에 이르기까지 다양한 연구분야에서 매우 강력한 수단임을 입증하였다. 자기공명 기술의 강점은 다양한데 원자 주위의 국부지역에 대한 연구, 분자의 결합특성, 물질에서의 전기장과 결정장의 결정, spin-orbit coupling, 강자성체에서 anisotropy 등을 측정할 수 있다. 더구나 이 방법은 비파괴적이고 자연 상태에서 그 시스템을 연구하는 것이 가능하다. 그러나 자기공명 기술은 낮은 감도로 인해 연구되는 소재가 너무 작거나 단결정인 경우 분말상태로 만들어야 하므로 얻을 수 있는 정보에 한계가 있게 된다. 따라서 NMR 분야에서 또 다른 수단들이 감도를 향상시키기 위해서 시도되었다. 한 예로서 초전도 양자 간섭소자(Superconducting QUantum Interference Devices: SQUID)를 사용한 것인데, 이 방법은 외부 자기장  $B_0 < 0.6T$ 인 경우에만 상용 NMR의 감도를 능가한다. 감도를 향상시키기 위한 또 다른 방법으로 thermal spin-polarization을 증가시키는 것으로, 이것은 hyperpolarized  $^{129}\text{Xe}$ 에서 비정질 표면 연구로서 발표되었다. 그러나 이러한 접근 방법이 특별한 응용에는 매우 매력적이지만 내부 경계면과 같은 표면하의 연구에는 사용될 수 없는 단점이 있다.

1991년 Washington 대학의 Sidles는 자기공명 신호를 측정하는 방법으로 유도코일형 방법이 아닌 기계적 방식(mechanical resonator: cantilever: 외팔보)에 의해 힘을 측정하는 새로운 방법을 제안하였다<sup>[1-3]</sup>. 이것은 나중에 자기공명 힘 현미경(Magnetic Resonance Force Microscopy: MRFM)으로 명명되었는데<sup>[4-5]</sup>, 1980년 후반 개발된 주사형 현미경(Scanning Probe Microscope: SPM) 기술의 높은 감도와 자기공명영상(Magnetic Resonance Imaging) 기술을 결합시킨 것으로 이해될 수 있다. 특히 원천기술로 AFM 기술을 들 수 있는데 이 방법에서 통상  $10^{-14} - 10^{-15}\text{N}$ 과 같은 작은 힘을 측정할 수 있는 외팔보가 힘 센서로 사용된다. Sidles는 다음 식에서 이 장치가 단일 스핀 측정 감도를 갖는다는 것을 보여주었다.

$$\vec{F}(\vec{r}, t) = -\vec{\nabla} \epsilon = \vec{\nabla} [\vec{M}(\vec{r}, t) \cdot \vec{B}] = [\vec{M}(\vec{r}, t) \cdot \vec{\nabla}] \vec{B}(\vec{r}) \quad (1)$$

여기서  $\vec{M}(r, t)$  는 resonant magnetization,  $\vec{B}(r, t)$  는 외팔보위에 올려진 자석팁에서의 자기장이다.

전형적인 구성은 그림 1에 보여진다. 외팔보에 올려져 있는 자석팁은 극히 불균일한 자기장을 생성하는데 두 가지 목적으로 사용된다: (i) 시료에 있는 자기 모멘트를 외팔보에 coupling 시키고, (ii) 시료에서 자기공명 조건이 만족되는 공간적 지역을 정의한다. 그러므로 MRFM이 이미징 도구로써 사용될 수 있다는것은 명백해진다.

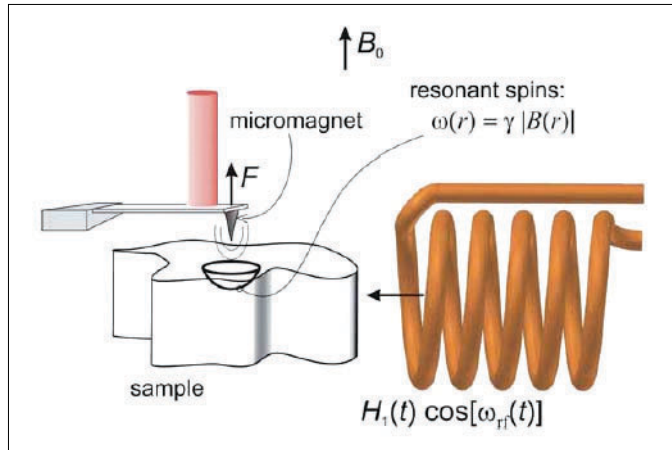


그림 1. MRFM의 원리

여기서 소개하는 MRFM의 관심은 원자 분해능을 갖는 SPM으로서의 역할이다. 따라서 이용 가능한 다른 방법들의 장·단점을 MRFM과 비교해서 함께 고찰하는 것은 의미가 있다. 대표적인 STM(scanning tunnelling microscopy)<sup>[6]</sup>, AFM(atomic force microscopy)<sup>[7]</sup> 및 MFM(magnetic force microscopy)<sup>[8-9]</sup>을 논의해 보면 MRFM의 잠재적인 가치를 이해하는데 도움이 될 것이다.

## 2. Scanning Probe Microscope

SPM은 1982년 스위스 IBM 연구소 물리학자 거드 비닝(G. Binnig)과 하이니 로러(H. Rohrer) 등이 STM을 개발한 이후 시작되었고, 불과 4년뒤인 1986년 노벨상을 받은 기술이다. 원자는 너무 작아서(0.1-0.5nm) 아무리 좋은 현미경으로도 볼 수 없다는 기존의 통념을 깨뜨린 SPM은 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경(SEM)의 배율이 최고 수십 만 배인데 비해 최고 수천만 배로 개개의 원자를 관찰할 수 있다. 투과식 전자현미경인 TEM도 수평방향의 분해능은 원자단위이나 수직 방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수는 없다. SPM 기술은 STM과 같은 초기의 방법으로부터 수 많은 분야로 파생, 발전되고 각 연구 분야의 요구에 부합될 수 있도록 최적화 되었다. 따라서 오늘날에는 수 많은 방법들이 폭넓게 사용되고 있다<sup>[10]</sup>. 대표적으로 우리에게 AFM과 MFM이 잘 알려져 있다.

### 2.1 원자 힘 현미경-AFM

AFM 측정의 기본 개념은 그림 2로 설명된다. 힘 센서인 외팔보에 작용하는 힘은 Hook의 법칙인 식 (2)를 만족

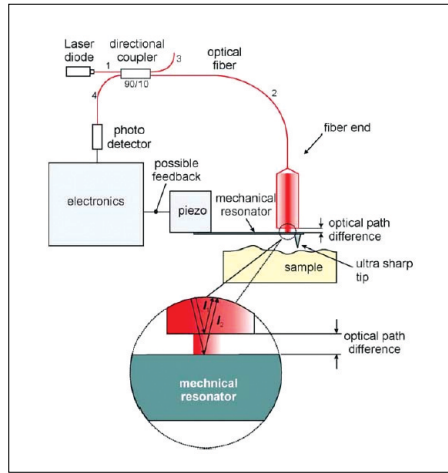


그림 2. AFM 측정 개념 및 광섬유 간섭계

하는 범위내에서 변위  $\delta$  를 만들어 낼 것이다.

$$F = \kappa \delta \tag{2}$$

여기서  $\kappa$  는 다음 식 (3)과 같이 탄성계수  $Y$ 와 형상인자로부터 결정되는 유효 힘 상수이다. 마찬가지로 공진 주파수는 다음 식 (4)와 같이 주어진다.

$$\kappa = 0.2575Y\omega \left(\frac{t}{L}\right)^3 \tag{3}$$

$$\nu_{mr} = 0.1640 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{Y}{\rho_m}} \tag{4}$$

여기서  $\rho_m$ 은 질량밀도이다. 오늘날 외팔보는 매우 넓은 범위의 주파수와 힘 상수를 갖도록 제작될 수 있다.

외팔보의 실 변위  $\delta$  를 측정하는데는 여러 방법들이 있다. 가장 인기 있는 방법중의 하나는 그림 2에 도시되어 있다<sup>[11]</sup>. 단일 모드 광섬유는 외팔보에 매우 근접 ( $\leq 5\mu\text{m}$ )되어 있고, 레이저 다이오드로부터 발진한 광은 광섬유를 통해 coupler에 입사되어 2와 3으로 분기한다. 2번 단지는 외팔보로 광을 전달하는데, 광섬유-공기층간에서 근사적으로 4%가 반사된다( $I_1$ ). 나머지 96%는 투과되어 spot size  $\leq 1\mu\text{m}$ 로 외팔보에 입사되던 후 산란, 반사된다. 이 빛의 일부는 다시 광섬유에 입사( $I_2$ )되어  $I_1$ 과 간섭하게 된다. 이렇게 간섭, 반사되는 optical power는 광섬유 끝단과 외팔보 사이의 광 경로차에 의존하게 된다. 이 방식으로 변위  $\delta$ 에 대해 sub Å의 감도를 얻을 수 있다. 종종 반사율을 높이기 위해서 금속으로 외팔보를 코팅하는 경우도 있지만 이것은 상온에서만 가능하다. 저온에서는 외팔보와 코팅 사이의 열 수축 차이로 큰 strain이 발생되기 때문이다. 그리고 진공과 저온에서  $10^6$ 에 쉽게 도달할 수 있는 높은 품질인자 Q를 갖는 것도 외팔보에서 요구되는 하나의 특성이다.

표면과 팁간의 상호작용은 인력 또는 척력이다. 이 상호작용은 팁과 시료의 재료, 팁-시료간의 거리에 의존될

수 있다. 이 상호작용의 논의에 대해서는 두 개의 주요 영역이 존재한다. 상호작용이 순수하게 고전역학적으로 고려될 수 있는 원거리 영역( $\geq 10\text{\AA}$ )과 양자역학의 출발점이 있는 근거리 영역이다. AFM에서 요구되는 힘 감도가 어느정도인지 알기 위해서  $U(\gamma) \approx 10eV$ 는 이온결합으로,  $1meV$ 이하는 반데르발스 결합으로 고려해 보자. 포텐셜을  $U(\gamma) \approx U_0 \gamma^{-2}$ 로 가정하면  $0.2\text{\AA}$ 의 거리에서  $10^{-7} - 10^{-12}N$ 의 힘 감도를 얻을 수 있으므로 back action process를 고려해 이보다 one order 정도 높은 힘 감도를 가지면 될 것이다. 탐상방법으로는 외팔보를 표면에 접촉시켜 측정하는 “접촉 방식”과 표면에서 일정거리만큼 떨어져 측정하는 “비접촉 방식”이 있다.

## 2.2 자기 힘 현미경-MFM

MFM은 팁이 자성재료로 코팅된 일종의 AFM이다. 이 현미경은 1987년 Martin<sup>[8]</sup>, Wickranasinghe와 Sáenz<sup>[9]</sup> 등에 의해서 독립적으로 발표되었다. MFM에서 외팔보의 자석 팁은 시료로부터의 자기장(magnetic stray field)을 측정하는데 원거리 point-dipole 상호작용에 의한 수평 분해능은  $10-100nm$  정도로 AFM과 비교할때 대략 3 order 정도 분해능이 떨어진다. 일반적으로 팁-시료간 강한 인력으로 인해 비접촉 방식으로 사용한다. MFM을 적용하기 위해서는 우선적으로 개개 grain 사이의 상호작용과 온도 안정성 등을 이해하는 것이 중요한데, 새로운 자기저장 매체의 개발이나 특성평가와 같은 분야에서 폭 넓게 사용된다. 고밀도 시스템에서 단일 자구벽 사이의 쌍극자 상호작용에 의한 magnetic vortex의 형성, 초 자기박막에서 잔류자기의 감소, 초전도체에서 single 또는 cooperative bundle vortex, grain boundary vortex, pinning center 간의 상호작용 연구에 적용된 예가 있다.

## 2.3 자기공명 힘 현미경-MRFM

자기공명 현상은 다음과 같이 설명된다. 정자기장 B하에서 자기모멘트를 지닌 원자핵 또는 전자는 자기장의 방향을 축으로하여 주파수  $\omega$  로 회전운동을 시작한다 (Larmor 세차운동). 여기서  $\omega$  를 Larmor 주파수라 하는데,  $\omega$  와 B사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\omega(\vec{r}) = \gamma B(\vec{r}) \quad (4)$$

이 식을 자기공명의 조건식이라 한다. 여기서  $\gamma$  는 자기회전비로 물질의 자기모멘트에 의해 정해지는 상수이다. 이 식에 따라 Larmor 세차운동을 하는 입자에 자기장 B의 방향과 직각인 방향으로 같은 주파수  $\omega$  를 갖는 고주파 자기장을 걸면, 입자는 이 고주파 자기장의 에너지를 흡수하여 공명흡수를 일으키는데, 이것이 자기공명이다. 이 현상을 이용하면 각종 원자핵의 자기모멘트의 크기를 정밀히 측정할 수 있다. 또 자기모멘트의 크기를 알고 있는 원자핵을 써서 고체·액체·기체에 대해 자기공명을 관측하면 이들 물질 내부의 미시적인 성질을 정밀하게 알 수 있다. 전자의 자기공명을 이용했을 경우에도 마찬가지이다. 하지만 그 감도는 다른 분광학적 방법에 비해 상대적으로 낮은 편이어서 핵 자기 공명의 경우에는 박막형 등 적은 시료로는 충분한 관측이 어렵다. 이러한 어려움은 MRFM에 의해서 해결될 수 있다. 앞서 설명한 AFM과 MFM이 오늘날 매우 유용하고 폭 넓게 사용된다는 것은 잘 알고 있는 사실이다. 그러나 이 방법들은 원리적으로 해결해야 할 몇몇 중요한 제한점을 가지고 있다. 이상적 상황에서 AFM은 단지 시료의 표면층에 대해서만 적용 가능하다. 즉 인공적인 복합구조의 숨겨진 계면은 측정할 수 없다. 이런면에서는 MFM이 자기장을 측정할 수 있고 따라서 내면층을 조사할 수 있다는 측면에서 좀더 실질적이다.

그러나 실제 깊이 정보는 얻을 수 없고 단지 domain wall에 대한 정보를 대비 형태(contrast mechanism)로 얻을 수 있다. 따라서 균일하게 자화된 자기 박막의 경우는 stray field가 없기 때문에 MFM 연구로는 적당하지 않다. 즉 두 방법은 topology 연구에는 적당하지만 분광학이나 화학조성 정보에 대한 연구에는 적용될 수 없다. 반면에 3차원적 원자구조의 비파괴적 영상화 가능성을 제시한 MRFM 기술은 최근 단일 전자스핀의 검출까지 보고되었다<sup>[12]</sup>.

MRFM에서 시료의 공명된 스핀의 자화정도는 힘 센서인 외팔보로의 coupling에 의해 식 (1)로 측정된다. 지금까지 그림 3에 보여지는 “micromagnet on resonator” 방식과 “sample on resonator” 방식의 두 가지 실험구성이 제시되었다. 두 방법에서 스핀의 공명자화는 자기공명 기술로 발생되는데, NMR의 경우 rf-field, EPR/FMR의 경우 microwave가 사용된다. EPR/FMR의 경우 electro-magnetic radiation을 coupling시키기 위해서 rf-coil을 사용하는 대신에 micro-strip resonator를 사용한 경우도 있다<sup>[13]</sup>.

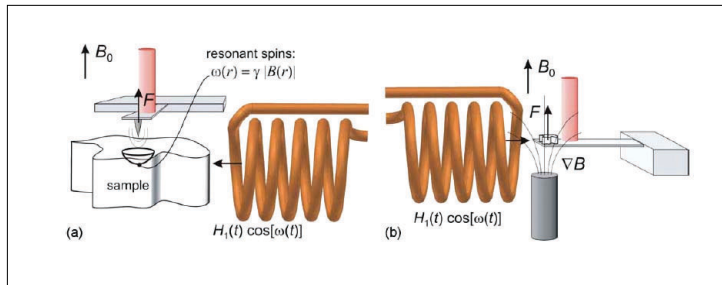


그림 3. MRFM 측정을 위해 제시된 두 가지 방법

Excitation 방법에 있어서는 MRFM의 경우 기본적인 NMR, EPR, FMR과 다르다. 대부분의 연구 그룹이 선택했던 그림 3(b) 방법의 경우 기술적인 면에서 요구사항이 훨씬 적다. 그러나 예측되는 바와 같이 이 방법으로는 SPM을 구현할 수 없다. 그럼에도 MRFM의 기본적 특성을 고찰할 목적으로는 매우 유용하다. 이 구조에서 측정된 힘 신호에 대한 이해는 직관적인데, 다음과 같은 두 가지 단점이 제기된다: (i) 자기장 기술기 세기와 감도의 제한 (ii) 시료가 외팔보에 올려져야 하므로 연구될 수 있는 시료의 크기가 제한되고, 검출감도를 저하시키는 품질인자 Q의 감소. 그림 3(a)의 구성은 명백히 유용한 SPM으로서 적절하다. 그러나 scanning과 spectroscopy를 동시에 수행할 수 있기 위한 기술적 요구를 해결해야 한다. 여기서 제기되는 첫번째 문제는 단일 스핀을 측정하기 위해서 요구되는 힘 감도이다. 외팔보에 작용하는 단일 스핀에 의한 힘  $F_{ss}$ 을 대략 계산하면 다음과 같다.

$$F_{ss} \approx \hbar \gamma \nabla B \tag{6}$$

여기서  $2\pi \hbar$ 는 플랑크 상수,  $\gamma$ 는 자기회전비,  $\nabla B$ 는 외팔보 위에 올려진 자석팁의 자기장 기울기이다. 전자의 자기회전비  $\gamma_e = 2\pi \times 28.025 \text{GHz/T}$ 와  $\nabla B \approx 10^6 \text{T/m}$ 로 긍정적으로 계산해 보면  $F_{ss} \approx 10^{-17} - 10^{-18} \text{N}$ 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 핵에 대해서는 3 order 더 작다. 현실적인 힘 상수  $\kappa \approx 10^{-2} \text{N/m}$ 로 고려해 보면, 변위  $\delta = F_{ss}/\kappa \leq 10^{-15} \text{m}$ 로 응용 가능한 기술로 측정하기에는 너무 작다. 이것으로부터 공진 주파수  $\nu_m$ 에서 높은 품질인자 Q를 갖는 외팔보를 공명 시켜야하는 필요성이 증명된다. 현재 쉽게 활용할 수 있는 외팔보에서 얻어지는  $Q \approx 10^5$ 를

가정하면,

$$\delta_{ss, res} \simeq Q \frac{F_{ss}}{\kappa} \lesssim 10^{-10} \text{m} = 1 \text{\AA} \quad (4)$$

외팔보의  $\nu_{mr}$ 은 전형적으로  $10^3-10^5 \text{Hz}$ 이므로 더 큰 자기장  $B_0$ 로 Larmor 주파수에 직접적으로 coupling 시키는 것은 불가능하다. 따라서 외팔보와 스핀 자화 사이의 적절한 coupling을 얻기 위한 longitudinal spin manipulation 기법을 이용하는 것이 필요하다.

이상에서 보면 MRFM의 단일 스핀 측정능이 명확하게 증명되고 또한 기술적으로 해결해야할 문제가 무엇인지도 분명히 제시된다. 기본적인 분석만으로도 MRFM에 적절한 외팔보와 자석팁의 개발이 제안될 수 있음을 알 수 있다.

### 3. MRFM의 연구방향

MRFM은 원자 분해능으로 분자의 구성과 구조, 나노 구조를 매핑할 수 있는 새로운 역량을 제공할 수 있음을 상술하였다. 기초 연구로서 반도체 장치에서 개개의 불순물과 결함의 특성평가, 나노 과학, 단일 분자 연구, 생명과학, 전염병 연구, 고체/양자 물리 연구에 중대한 영향을 줄 것이다. 또한 MRFM은 스핀 상태를 조작할 수 있고 이것은 궁극적으로 스핀에 기초한 양자 컴퓨터나 자기 메모리, 스핀트로닉스 분야에 새로운 약진을 이끌 수 있다.

이를 위해 매진해야할 중점 연구 분야는 단일 핵 스핀 검출 감도까지 MRFM 기술이 향상될 혁신적인 방법을 정의하는 것과 이러한 목표를 달성하는데 필요한 관련된 기본적인 물리를 연구하는 것이다. 여기서는 큰 경사 자기장하에서 스핀-외팔보간 상호작용, 스핀-상태 조작, 스핀 decoherence 구조를 포함하는 스핀 거동에 관한 관련 물리학과 양자역학의 폭 넓은 이해가 필요할 것이다. 공학적 측면에서는 시료-프로브간 상호작용의 이해와 조작에 대한 연구 개발이 요구되는데, 이것은 아토뉴톤(aN) 힘 측정이 가능한 외팔보와 외팔보 상의 자기장 기술기소스 제작 등이 포함될 것이다. 이 기술들은 SNR 향상에 적절한 실험적 프로토콜, 신호처리, 데이터 수집기술들을 순차적으로 발전시키는데 기여할 것이다. 결론적으로 다음과 같은 연구 단계가 제시될 수 있다. 1단계로 단일 스핀을 근본적으로 영상화할 수 있는 충분한 감도의 prototype MRFM을 설계, 개발하는 것이다. 이 목표 달성 시점에서 세부적으로 부딪혔던 기술적 장벽들을 정의하고 이론적, 실험적으로 평가하여 가능하다면 그것들을 극복하는 연구를 수행한다. 다음 연구 단계에서는 개발된 장비를 가지고 아토뉴톤 힘 신호를 측정할 수 있다는 것을 증명하는 것이다. 이 힘의 크기는 전형적인 힘 현미경에서 측정되는 나노뉴톤(nN)보다  $10^{-9}$  정도 작은 값으로 단일 전자 스핀을 이미징하는데 충분하다. 이로부터 MRFM 환경에서 스핀 완화에 대한 명확한 이해를 위한 연구를 수행할 수 있을 것이다.

본 고에서 보고하는 기술은 「A. Suter, Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy, 45, 239」에서 리뷰된 “The magnetic resonance force microscope”의 내용을 주로 참조하였고, 저자의 동의를 얻었음을 밝힙니다.

## ❖ 참고 문헌

- [1] J. A. Sidles, Appl. Phys. Lett. 58, 2854 (1991).
- [2] J. A. Sidles, Phys. Rev. Lett. 68, 1124 (1992).
- [3] J. A. Sidles, J. L. Garbini and G. P. Drobny, Rev. Sci. Instrum. 63, 3881 (1992).
- [4] O. Züger and D. Rugar, Appl. Phys. Lett. 63, 2496 (1993).
- [5] O. Züger and D. Rugar, J. Appl. Phys. 75, 6211 (1994).
- [6] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel, Phys. Rev. Lett. 49, 57 (1982).
- [7] G. Binnig, C. F. Quate, and Ch. Gerber, Phys. Rev. Lett. 56, 930 (1986).
- [8] Y. Martin and H. K. Wickranasinghe, , Appl. Phys. Lett. 50, 1455 (1997).
- [9] J. J. Sáenz N. García P. Grütter, E. Meyer, H. Heinzelmann, R. Wiesendanger, L. Rosenthaler, H. R. Hidber and H. J. Güntherodt, J. Appl. Phys. 62, 4293 (1987).
- [10] <http://www.psia.co.kr/SPM/Basic.asp>.
- [11] D. Rugar, H. J. Mamin, and P. Guethner, Appl. Phys. Lett. 55, 2588 (1989).
- [12] D. Rugar, R. Budakian, H. J. Mamin, B. W. Chui, Nature 430, 329 (2004).
- [13] H. J. Mamin, R. Budakian and D. Rugar, Rev. Sci. Instrum. 74, 2749 (2003).



원 순 호

- 한국기계연구원 재료안전연구센터 선임연구원
- 관심분야 : 소재특성평가 기술 및 시스템
- E-mail : wsh@kmail.kimm.re.kr