

## Magnetic Force Microscopy Studies of 2D Materials

Tae-Woo Kim<sup>†</sup>, Hyun-Woong Na<sup>†</sup>, Ho-Woong Lee<sup>†</sup>, and Youn Heo<sup>\*</sup>

*Department of Physics, College of Natural Sciences, Inha University, Incheon 22212, Republic of Korea*

Nyun-Jong Lee

*Department of Electronic Engineering, Sogang University, Seoul 04107, Republic of Korea*

Sang-Hoon Kim

*Department of Semiconductor Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Republic of Korea*

(Received 25 June 2025, Received in final form 1 July 2025, Accepted 1 July 2025)

Two-dimensional (2D) magnetic materials, such as transition metal dichalcogenides (TMDs) and van der Waals magnets, present unique quantum magnetic behaviors distinct from their bulk counterparts. These atomically thin systems have opened exciting avenues for developing spin-based technologies and topological magnetism. Magnetic force microscopy (MFM) has emerged as a pivotal tool for characterizing such materials at the nanoscale. This review explores the principles, operational modes, and advanced analytical approaches of MFM, emphasizing recent progress in imaging magnetic domains, skyrmions, and spin textures in 2D systems. We further highlight quantitative modeling strategies, artifact mitigation, and the integration of MFM with external stimuli. Finally, we offer perspectives on the challenges and future potential of MFM in spintronics, nanomagnetism, and quantum material research.

**Keywords :** Magnetic force microscopy, 2D materials, Magnetism, Magnetic domains, Topological structures, Skyrmions

## 2차원 물질의 자기력 현미경(MFM) 연구 동향

김태우<sup>†</sup> · 나현웅<sup>†</sup> · 이호웅<sup>†</sup> · 허윤<sup>\*</sup>

인하대학교 자연과학대학 물리학과, 인천광역시 인하로 100, 22212

이년종

서강대학교 전자공학과, 서울특별시 백범로 35, 04107

김상훈

울산대학교 반도체공학과, 울산광역시 대학로 93, 44610

(2025년 6월 25일 받음, 2025년 7월 1일 최종수정본 받음, 2025년 7월 1일 게재확정)

2차원 자성 물질은 전이 금속 칼코겐화합물 및 반데르발스 자성 결정과 같은 원자층 수준의 결정 구조를 가지며, 기존 벌크 물질에서는 관찰되지 않는 고유의 자기적 특성을 보인다. 이러한 시스템에서의 자기 상호작용과 위상학적 스핀 구조 연구는 차세대 스핀트로닉스 및 양자 정보 기술 응용을 위한 핵심 기술 기반을 제공한다. 본 리뷰에서는 이들 물질의 자기적 특성을 나노스케일에서 분석하기 위한 핵심 기법으로서의 자기력 현미경(MFM)에 대해 다룬다. 특히 MFM의 기본 원리, 측정 모드, 정량적 분석 기술뿐만 아니라, 최근 연구 동향을 종합적으로 정리하며, 자기 도메인 및 도메인 벽, 스커미온(skyrmions) 등 위상학적 스핀 구조, 외부 자극에 대한 자기적 응답, 정량적 모델링 기반 분석 기법까지 폭넓게 살펴본다. 마지막으로, MFM 기술의 한계점과 이를 극복하기 위한 미래 연구 방향성을 제시한다.

**주제어 :** 자기력 현미경, 2차원 물질, 자성, 자기 도메인, 위상학적 구조, 스커미온

## I. 서 론

2차원(two dimensional, 2D) 물질은 기존의 3차원 물질과 달리, 한 방향에서 수 원자층 수준의 매우 얇은 두께를 가지는 물질이다. 그래핀(Graphene), 전이 금속 칼코겐화합물(transition metal dichalcogenides, TMDs), 반데르발스(van der Waals, vdW) 결정 등이 대표적인 예에 해당한다[1]. 이러한 2D 물질은 차세대 나노전자소자, 광전자소자 및 스핀트로닉스(spintronics) 응용을 위한 핵심 연구 대상으로 주목받고 있다. 특히, 기존 3차원 물질에서는 관찰되지 않았던 새로운 자기적 현상이 2D 물질에서 발견되면서, 이들의 물리적 성질과 그 근본 원리에 대한 이해는 차세대 기능성 소재 개발을 위한 돌파구로 작용할 수 있다[2,3]. 2D 자성 물질에서는 강자성(ferromagnetism)과 반강자성(antiferromagnetism)이 원자층 수준에서도 구현될 수 있으며, 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling, SOC) 및 위상학적 특성과의 결합을 통해 새로운 양자 물리 현상이 발견된다[3-5]. 이러한 현상은 스핀트로닉스 및 양자 정보 기술(quantum information technology)의 발전에 있어 핵심적인 연구 주제로 부상하고 있다.

이러한 2D 자성 물질의 고유한 특성과 양자적 현상을 정밀하게 이해하기 위해서는 고해상도의 자기적 특성화 기법이 필수적이며, 이 중에서도 자기력 현미경(magnetic force microscopy, MFM)은 핵심 도구로 자리 잡아 왔다[4-6]. MFM은 1987년 처음 시연된 이후, 다양한 연구 및 산업 응용 분야에서 널리 활용되고 있는 기술로, 원자힘 현미경(atomic force microscopy, AFM)의 비접촉 모드를 기반으로 자기 탐침(magnetic tip)을 이용하여 시료 표면의 장거리 자기적 상호작용을 감지하는 방식으로 작동한다. 일반적으로 약 50 nm 수준의 높은 공간 분해능을 제공하며, 가변 온도 및 외부 자기장 환경에서도 측정이 가능하다. 또한 액체 시료에 대한 측정도 가능하고, 작동 방식이 비교적 단순하며 시료에 특별한 전처리를 필요로 하지 않는다는 장점으로 인해 다양한 연구 분야에 폭넓게 적용되고 있다.

그러나 기존의 상용 MFM 시스템은 대부분 정성적 분석에 국한되어 있으며, 사용 가능한 작동 모드 역시 제한적이어서 다양한 실험 조건과 정량적 분석의 요구를 충분히 충족시키지 못하는 한계가 존재한다. 또한 MFM을 활용한 기존 연구는 주로 강자성 벌크 물질, 얇은 박막, 패터화된 나노구조 시료에 집중되어 있었으며, 보다 복잡하고 다양한 자기 구조를 갖는 2D 자성 물질에 대한 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다[7-9].

최근 MFM 기술은 지속적인 발전을 거듭하며, 특히 2D 자성 물질과 위상 절연체(topological insulator) 연구에서 핵심적인 분석 도구로 활용되고 있다. 이는 2D 물질의 원자층

수준에서 자기적 상호작용을 정밀하게 측정할 수 있는 MFM의 우수한 공간 분해능이 기존의 벌크 물질계에서는 관찰하기 어려웠던 새로운 자기 현상들을 규명하는 데 중요한 역할을 하기 때문이다. 특히 정량적 MFM(quantitative MFM)과 위상학적 스핀 구조(예: 자기 스커미온, 자성 도메인 벽 등) 분석 등 다양한 나노스케일 접근 기법이 도입되면서, MFM 기반 연구의 정밀도와 활용성이 크게 향상되고 있다[10,11].

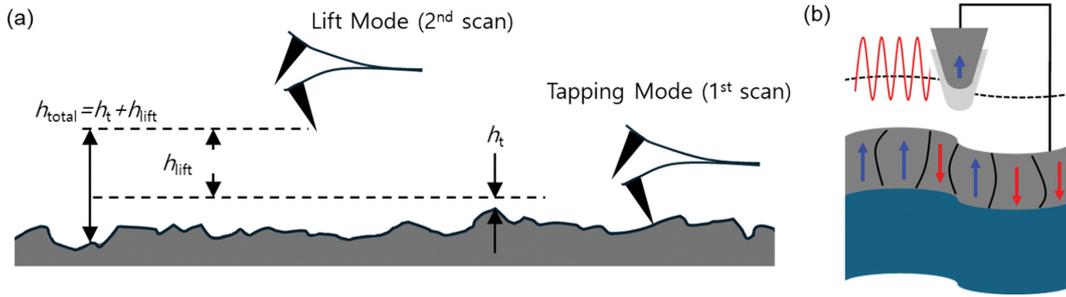
이러한 기술적 흐름은 고온 초전도체(high- $T_c$  superconductors), 강자성 반도체(ferromagnetic semiconductors), 스핀-궤도 결합을 포함한 복합 산화물(complex oxides) 등 복잡한 상호작용을 지닌 물질계로까지 확장되어, 국소 자기 특성의 규명에도 효과적으로 기여하고 있다[12-14]. 나아가, MFM의 나노스케일 정량 분석 역량의 향상은 AFM, X-ray magnetic scattering, Kerr microscopy 등 기존의 자기 특성 측정 기법과 상호보완적인 분석 수단으로서의 역할을 강화하고 있다[18,19].

MFM을 활용한 고해상도 자기적 특성 연구를 위해서는 탐침과 시료 간의 상호작용에 대한 정밀한 이해가 필수적이다. AFM 기반의 주사 탐침 현미경(scanning probe microscopy, SPM) 기법에서는 탐침과 시료 표면 간 작용하는 힘을 측정하여 이미지를 얻는데, 이 과정에서 다양한 힘(예: 화학적 결합력, 반데르발스 힘, 정전기력, 자기력 등)이 동시에 기여할 수 있다. 이러한 상호작용을 정확히 이해하고 분석해야만, MFM의 신뢰성을 높이고 실험적 아티팩트(artifact)를 최소화할 수 있다.

본 논문에서는 최근 MFM의 기술적 발전과 이를 활용한 2D 자성 물질 연구 동향을 종합적으로 검토하고자 한다. 특히, 정량적 MFM 및 새로운 계측 기법, 자기 스커미온 연구, 2D 자성 물질 및 위상 절연체에서의 응용을 중심으로 MFM 기술의 최신 진행 상황을 다루며, 향후 연구 방향과 응용 가능성에 대해 논의하고자 한다. 또한, MFM을 활용한 나노자성학(nanomagnetism) 및 차세대 자기적 소자(magnetic devices) 연구에서의 역할을 분석하고, 이를 바탕으로 향후 MFM 기반의 새로운 실험 기법 개발 가능성을 제시한다.

## II. 자기력 현미경의 기본적인 원리

MFM은 원자힘 현미경(AFM)의 한 기법으로, 자기 탐침과 시료 사이의 자기적 상호작용을 감지하여 자기 구조를 이미징하는 방식으로 작동한다. 이를 통해 수십 나노미터 수준에서 자기 도메인(domain) 및 도메인 벽(domain wall)을 관찰할 수 있으며, 기존의 광학적 또는 전자적 분석 방법보다 높은 해상도를 제공한다. MFM은 일반적으로 탐침과 시료 사이의 자기력에 의한 힘 또는 힘의 기울기를 측정하여 자기적



**Fig. 1.** (Color online) Principle of MFM operation. (a) In the first scan using tapping mode, the tip oscillates at a height  $h_t$  to measure the surface topography of the sample. In the second scan, the tip is lifted by a distance  $h_{lift}$ , and a total scanning height of  $h_{total} = h_t + h_{lift}$  is maintained along the surface. This configuration suppresses short-range van der Waals forces, enabling measurement of magnetic interactions between the tip and sample. (b) The tip senses long-range magnetic forces originating from magnetized regions of the sample.

정보를 얻는다. 이를 통해 자기 도메인 및 도메인 벽과 같은 자기 구조를 시각화할 수 있다. MFM 측정은 크게 정성적 모드와 정량적 모드로 나눌 수 있다. 정성적 MFM은 자기적 상호작용의 상대적인 강도를 측정하는 반면, 정량적 MFM은 자기력의 크기를 수치적으로 분석할 수 있는 능력을 제공한다. Fig. 1은 MFM의 기본적인 작동 원리와 대표적인 측정 방식들을 도식화한 것이다. 먼저, AFM 모드를 통해 시료의 표면 형상(topography)을 스캔한 후, 탐침을 일정 높이( $h_{lift}$ )로 띄워서 MFM 모드에서의 자기력 신호만을 감지한다. 이 때 전체 높이는  $h_{total} = h_t + h_{lift}$ 로 정의된다. 탐침은 누설 자기장(magnetic stray field)에 의해 진동 특성(진폭, 위상, 주파수 등)이 변화하며, 이를 기반으로 자기 신호를 측정한다. 예를 들어, MFM에서 관측되는 탐침의 위상 변화( $\Delta\phi$ )는 탐침-시료 간 자기력의 z 방향 구배에 비례하여 다음과 같은 수식으로 표현된다:

$$\Delta\phi \approx \frac{Q}{k} \cdot \frac{dF_{ts}}{dz} \quad (1)$$

여기서  $Q$ 는 캔틸레버의 품질 계수,  $k$ 는 유효 스프링 상수,  $F_{ts}$ 는 탐침-시료간의 자기력이다. 이와 같이 MFM은 힘 자체 보다는 힘의 공간적 변화(gradient)를 감지하는 장비로 분류된다. 또한 캔틸레버의 공진 주파수 변화( $\Delta\omega$ )는 다음과 같이 근사적으로 나타낼 수 있다:

$$\Delta\omega \approx \frac{\omega_0}{2k} \cdot \frac{dF_{ts}}{dz} \quad (2)$$

이러한 원리를 바탕으로 MFM은 힘의 절대값보다는 힘의 공간적 기울기(force gradient)에 민감하게 반응하며, 정성적뿐 아니라 정량적 자성 분석에도 적용 가능하다. MFM은 탐침의 진동 신호를 어떻게 감지하는지에 따라 측정 방식이 구분되며, 주로 아래 세가지 모드로 구분된다:

(1) 진폭 변조 모드(amplitude modulation mode): 자기력

에 의한 진폭 변화를 감지하며, 시스템 구성이 간단하나 감도가 상대적으로 낮다.

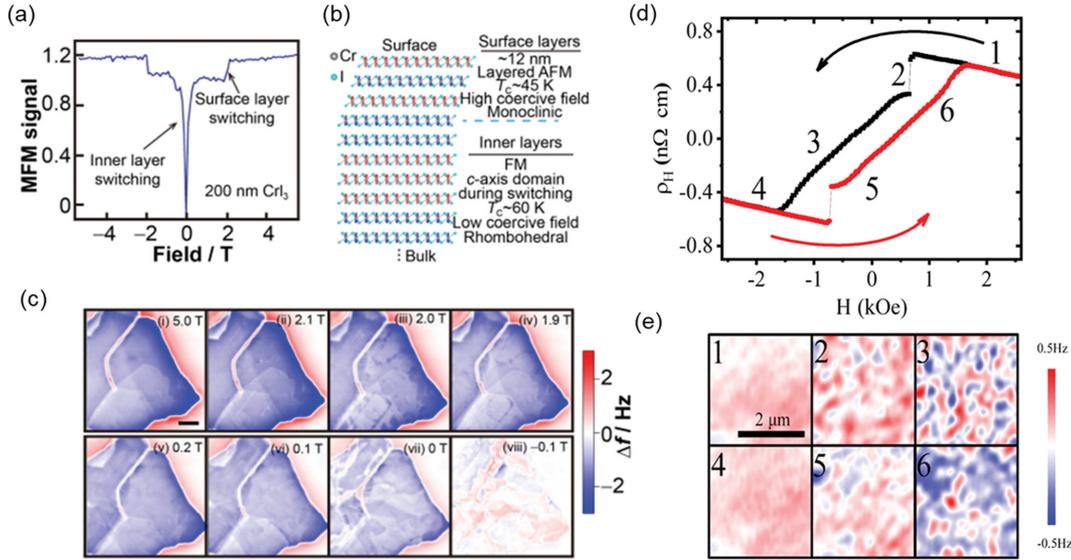
(2) 주파수 변조 모드(frequency modulation mode): 공진 주파수의 미세 변화를 실시간으로 추적하여, 높은 감도와 정량적 분석 능력을 제공한다.

(3) 위상 모드(phase mode): 자기력에 의한 위상 변화를 감지하는 간편한 방식으로, 빠른 분석에 유리하지만 외부 환경 변화에 취약하고 정량적인 분석은 제한된다.

MFM은 자기장 인가나 온도 변화 하에서도 안정적인 측정이 가능하나, 정전기력 간섭(electrostatic interaction), 탐침 오염, 그리고 파라메트릭 아티팩트(parametric artifact) 등으로 인해 신호 해석이 왜곡될 수 있다. 따라서 탐침의 자기적 특성(예: 자화 방향, 보자력 등)을 사전에 정확히 검증하고, 비자기력 신호의 영향을 최소화할 수 있는 조건을 확보하는 것이 중요하다.

### III. 2차원 물질에서의 MFM 분석을 활용한 연구 동향

2차원 자성 물질은 원자층 두께와 강한 이방성을 지닌 결합 구조로 인해, 3차원 자성체와는 전혀 다른 자기 상호작용과 스핀 구조를 형성한다. 특히 이러한 얇고 섬세한 환경에서는 불균일성, 결함 및 외부 자극에 민감하게 반응하며, 공간적으로 국지화된 자기 현상을 고해상도로 관찰하는 것이 중요하다. 자기력 현미경은 이러한 시스템의 자기 도메인, 도메인 벽, 그리고 위상학적 자기 구조를 비침습적으로 분석할 수 있는 핵심 도구로 자리잡고 있다. 따라서 MFM은 수십 나노미터 이하의 분해능으로 누설 자기장의 공간 분포를 이미지화함으로써, 도메인 구조 및 그 경계의 위치와 형태, 자성 변화의 공간적 확산 특성 등을 정밀하게 규명할 수 있다. 특히 최근에는 나노와이어 기반의 고감도 탐침이 개발되어, 기존 MFM 대비 더 약한 자기 신호 및 정밀한 자기 기울기에도



**Fig. 2.** (Color online) Magnetic structure analysis of two-dimensional magnetic materials using MFM. (a) MFM signals of a CrI<sub>3</sub> flake under varying external magnetic fields. (b) Schematic illustration of the spin alignment and stacking sequence in the surface and inner layers of a CrI<sub>3</sub> flake. (c) MFM imaging of domain formation and evolution under different magnetic fields in a CrI<sub>3</sub> flake with a thickness of approximately 200 nm. Figures reproduced from Ref. [6]. (d) Anomalous Hall resistance hysteresis curve measured at 4 K for a CGT/Pt heterostructure. (e) MFM frequency shift images of the CGT/Pt sample at low temperature, corresponding to specific magnetic field values indicated in (d), revealing magnetization transition characteristics. Figures reproduced from Ref. [12].

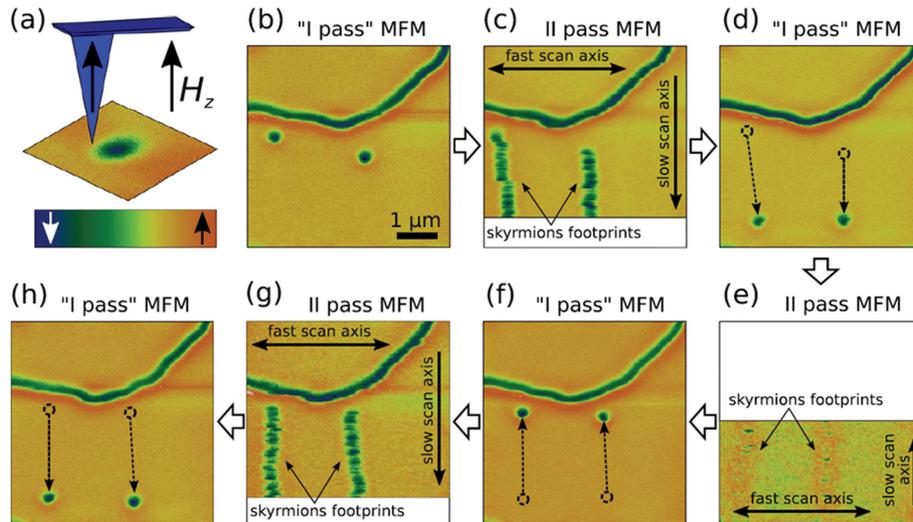
민감하게 반응할 수 있게 되었다. 이를 통해 2차원 자성 물질에서의 자기 질서, 영역 구조의 안정성, 외부 자극에 따른 반응성 등을 정량적으로 분석하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 나아가, MFM을 활용한 정밀 분석은 스커미온과 같은 위상학적 스핀 구조의 실시간 영상화뿐만 아니라, 차세대 스핀트로닉스 소자와 고밀도 자기 저장 기술 개발에 있어 필수적인 물리적 기반으로 작용할 것으로 전망된다.

최근 CrI<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>Ge<sub>2</sub>Te<sub>6</sub>(CGT)와 같은 반데르발스 자성체에서는 약한 층간 자기 결합과 강한 면내 자기 이방성이 복합적으로 작용하여, 전통적인 3차원 자성체와는 뚜렷하게 구분되는 자기 도메인 구조가 형성되는 것으로 알려져 있다[6]. 특히 CrI<sub>3</sub>의 경우, 물질의 두께와 적층 순서(stack ordering)에 따라 자성 위상이 극적으로 변화하며, 단층 및 소수층에서는 인접 층 간 반강자성적(antiferromagnetic, AFM) 상호작용이 우세한 반면, 벌크에서는 c축 방향의 이방성을 지닌 강자성적(ferromagnetic, FM) 상호작용이 지배적이다. 최근 MFM을 이용한 분석 결과에 따르면, 약 25~200 nm 두께의 CrI<sub>3</sub> 박막 내에서는 상이한 자기 위상이 동시에 공존하는 자기 이중상(magnetic phase coexistence)이 형성되며, 표면으로부터 약 13 nm 영역은 층간 반강자성적 성격을 유지하고 중심부는 강자성적 위상을 보유하는 것으로 확인되었다. 이러한 자기 구조의 분화는 층간 결합 세기 및 적층 순서 변화에 기인한 계층적 자기 위상의 결과로 이해되며, 이는 반데르발스 자성체에서 자연 발생적인 자기 이중 구조 형성 가능성을 제시한다.

Fig. 2는 이러한 현상을 시각적으로 잘 보여준다. (a)는 CrI<sub>3</sub> 박막에서 외부 자기장 변화에 따른 MFM 신호 변화를 나타내며, 특정 자기장 구간에서 내부층과 표면층의 자화 전이가 구분되어 나타나는 특징적인 이중 히스테리시스를 보여준다. (b)는 CrI<sub>3</sub>의 계층 구조에서 나타나는 스핀 정렬 및 적층 순서를 도식화한 개념도로, 각 층의 상호작용 형태를 나타낸다. (c)는 약 200 nm 두께의 CrI<sub>3</sub> 조각에서 다양한 외부 자기장 조건에서 측정된 MFM 이미지를 통해 도메인의 생성, 성장 및 재배열 과정을 시각화한 것이다.

또한, CGT처럼 전기 절연성을 가지는 2차원 자성체의 경우, Pt와의 이중 접합(heterostructure)을 통해 유도되는 비정상 홀 효과(anomalous Hall effect, AHE)를 측정함으로써 전기적으로 자성 특성을 분석하는 접근 방식이 제안되었다[12]. Fig. 2의 (d)는 CGT/Pt 이중구조에서 측정된 비정상 홀 효과에 따른 이력곡선을 보여주며, 명확한 도메인 형성과 자화 반전 과정이 반영되어 있음을 확인할 수 있다. (e)는 (d)의 루프 상 특정 자기장 값에 해당하는 시점에서 측정된 MFM 주파수 변화( $\Delta f$ ) 이미지를 나타내며, 외부 자기장에 따른 도메인 구조의 진화를 직접적으로 시각화하고 있다. 이와 같이, MFM 분석은 비정상 홀 효과 측정과 상호적으로 결합되어 반데르발스 자성체의 자기 위상 및 도메인 동역학에 대한 심층적인 이해를 가능하게 한다.

최근 스핀트로닉스 분야에서 큰 주목을 받고 있는 스커미온(skyrmion)은 수~수십 나노미터 크기의 위상학적 스핀 텍



**Fig. 3.** (Color online) Manipulation of individual skyrmions using MFM and demonstration of stray field-based controllability. Skyrmion motion was observed through a sequence of MFM images obtained under a perpendicular magnetic field ( $H_z = 71$  mT) applied to a Py/CoFeB/MgO multilayer structure. (b), (d), (f), and (h) show skyrmion images acquired in I-pass mode with a lift height of  $\Delta z = 145$  nm; the corresponding topography was measured separately at  $H_z = 50$  mT. (c), (e), and (g) display traces of skyrmion motion along the tip scan path induced by the tip's stray field in II-pass mode. Scanning was performed along the slow scan axis with a line spacing of approximately 20 nm. (a) presents a schematic of the experimental conditions. In all images, the magnetization direction of the tip is aligned with the external magnetic field and opposite to that of the skyrmion core. Figures reproduced from Ref. [17].

스처로서, 뛰어난 안정성과 응답 특성으로 인해 차세대 정보 저장 및 스핀 기반 소자 응용의 유력한 후보로 간주되고 있다[17,20]. MFM은 이러한 스커미온의 구조 및 동역학을 시각화하는 데 핵심적인 계측 도구로, 고해상도 비접촉 이미징을 통해 단일 스커미온의 형상, 배열, 밀도 및 이동성을 실시간으로 관찰할 수 있다.

일반적으로 스커미온은 외부 자기장, 전기장, 응력 또는 전류 인가 등을 통해 생성 및 제어가 가능하다. 그러나 최근 연구에서는 MFM의 탐침 자체에서 발생하는 누설 자기장을 능동적으로 활용하여 스커미온의 위치를 선택적으로 이동시키고 조작하는 방식이 제안되었다[17]. 이러한 접근은 외부 자극 없이도 고정밀·국소적 스커미온 제어가 가능하다는 점에서 큰 의미를 가진다.

Fig. 3은 MFM의 작동 방식에 따라 I-pass와 II-pass 모드에서 관측되는 스커미온 이미지를 비교한 것이다. I-pass 모드에서는 탐침이 시료를 단 한 번 스캔하며, 이 과정에서 스커미온의 구조를 방해하지 않고 안정된 상태에서의 선명한 이미징이 가능하다. 반면 II-pass 모드에서는 동일 경로를 반복 스캔하는 과정에서 탐침의 누설 자기장의 영향을 받아 스커미온이 이동하고 흔적을 남기는 현상이 관측된다. 이는 MFM이 단순한 이미지 센서를 넘어, 스커미온의 국소 위치를 능동적으로 제어 가능한 물리적 매개체로도 기능할 수 있음을 시사한다. 전류 기반 제어 방식에서는 복수의 스커미온이 동시에 이동하며 정밀 제어가 어려운 반면, MFM을 이용한 방

식은 단일 스커미온을 나노미터 수준에서 선택적으로 제어할 수 있다는 점에서 뛰어난 정밀도와 공간 선택성을 제공한다. 향후 이러한 MFM 기반 국소 제어 기술은 위상학적 스핀 구조를 이용한 논리 연산, 고밀도 메모리, 스핀파 소자 등의 실현을 위한 기반 기술로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

최근에는 정량적 MFM을 활용하여 2D 물질의 자기적 신호를 보다 정확히 분석하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 통해 탐침과 시료 간의 정밀한 상호작용 모델을 구축하고, 나노미터 수준에서 자기장의 분포를 계량적으로 평가하는 것이 가능해지고 있다. MFM 측정의 궁극적인 목표는 시료 표면에서 발생하는 누설 자기장에 대해 정량적 정보를 얻는 것이다. 하지만 MFM에서 측정되는 신호는 탐침의 자기 모멘트 분포와 시료의 누설 자기장이 컨볼루션(convolution)된 결과이므로, 이를 디컨볼루션(deconvolution)하여 시료의 정량적인 자기 특성을 추출하기 위해서는 탐침의 자기적 특성을 정확하게 교정하는 과정이 필수적이다. 이에 따라, 아래에서는 정량적 MFM에 적용되는 주요 분석 모델들을 간략히 정리하고자 한다.

점 탐침 근사(point probe approximation, PPA)는 복잡한 MFM 센서 탐침의 자기적/기하학적 구조를 단순화하여, 이를 자기 단극(monopole) 또는 자기 쌍극(dipole)으로 이상화하는 모델이다. 이 접근법은 MFM 탐침의 자화가 탐침 내부의 한 지점에 집중되어 있다고 가정한다. 이 개념을 수학적으로 표현하면, 탐침 부피  $V_{tip}$ 에 걸쳐 발생하는 전이 주파수  $\Delta\phi$ 는

다음과 같이 기술된다:

$$\Delta\phi \approx \frac{\partial F_z}{\partial z} = \iiint_{V_{tip}} \vec{M}_t(\vec{r}') \cdot \vec{H}_s(\vec{r} + \vec{r}') d\vec{r}'^3 \quad (3)$$

여기서  $\vec{M}_t(\vec{r}') = M_{z,t}$  와 같이 단순화된 자화 분포를 가정하면, 식은 다음과 같이 정리된다:

$$\Delta\phi \sim M_{z,t} \iiint_{V_{tip}} \frac{\partial^2}{\partial z^2} M_{z,s}(\vec{r} + \vec{r}') d\vec{r}'^3 \quad (4)$$

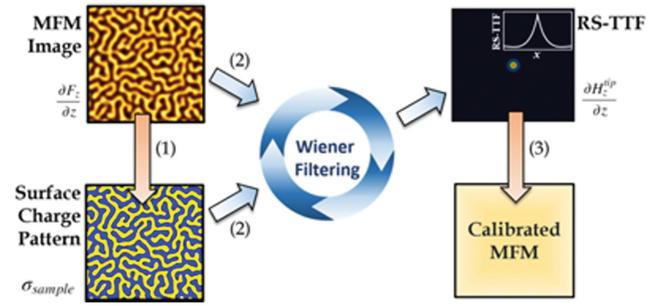
이 모델에서  $M_{z,t}$ 는 탐침 내의 단일 지점에 집중되어 있다고 간주하며, 특히, PPA를 적용하면 더욱 단순화된 형태로 표현된다:

$$\Delta\phi \sim m_z \cdot \frac{\partial^2 H_{z,s}(\vec{r} + \vec{\delta})}{\partial z^2} \quad (5)$$

여기서  $m_z$ 는 자기 쌍극자 모멘트이며,  $\vec{\delta}$ 는 해당 모멘트의 위치 벡터를 나타낸다. PPA는 자성 나노입자 등 비자기성 탐침에 자화된 입자를 결합시킨 경우에 특히 유효하며, 이와 같은 경우 팁의 점 근사 특성이 현실적인 모델로 정당화될 수 있다[13,14]. 한편, 이 모델은 구조적으로 단순하고 직관적인 해석이 가능하다는 장점이 있지만, MFM 팁의 비국소적 자화 분포를 반영하지 못하며, 시료의 자기 패턴 크기가 팁의 유효 크기와 유사할 경우에는 부정확한 해석을 초래할 수 있다. 따라서 PPA는 정규적이고 넓은 공간 주기를 가지는 누설 자기장 패턴을 나타내는 시료에 한해 적용되어야 한다[14].

(2) 팁 전달 함수(tip transfer function, TTF)는 MFM 팁의 이미징 특성을 규명하기 위한 모델 독립적인 분석 방법으로, 사전 매개변수 설정 없이 다양한 공간 파장을 갖는 누설 자기장에 대해 MFM 팁이 어떻게 반응하는지를 교정함으로써, 샘플 표면에서 방출되는 누설 자기장에 대한 정량적 정보를 획득할 수 있도록 한다. TTF는 MFM 팁의 자기 모멘트를 등가 표면 전하 분포(equivalent surface charge distribution)로 나타낸 뒤, 그 복소 켈레를 기반으로 측정된 전이 주파수와 시료의 누설 자기장의 미분 항 사이의 수학적 관계를 설정한다[15]. Fig. 4는 이러한 정량적 MFM 분석 절차를 시각적으로 설명한 도식으로, MFM 이미지의 이진화 처리부터 실험적 파라미터 기반 표면 전하 패턴 생성, 푸리에 공간에서의 위너 필터링을 거친 TTF 계산, 그리고 최종적으로 탐침 영향이 제거된 정량화된 MFM 이미지 획득까지의 흐름을 보여준다.

(3) 유사 극 모델(pseudo pole model)은 얇은 자성 재료로 코팅된 피라미드 형태의 MFM 탐침이 단순 자기 단극 또는 쌍극자로는 적절히 설명되지 않는다는 점에서, 기



**Fig. 4.** (Color online) Workflow for quantitative MFM measurements using the tip transfer function (TTF). The MFM image is first binarized, and experimental parameters—such as domain wall width, cantilever tilt, and saturation magnetization—are used to generate a surface charge pattern. Both the MFM image and the surface charge pattern are then deconvoluted in Fourier space using Wiener filtering, yielding the tip transfer function (TTF). The TTF represents a unique characteristic of the probe, independent of both the model and experimental conditions. Through this process, a quantitatively calibrated MFM image is obtained, with the influence of the probe effectively removed. Figures reproduced from Ref. [14].

존 PPA의 한계를 보완하기 위해 제안되었다. 이 모델은 탐침의 자기적 특성을 팁 끝을 향해 정렬된 원뿔형 자기 쌍극자들이 표면에 균일하게 분포된 형태로 이상화하여 설명한다. 해석 결과, 이와 같은 원뿔형 분포는 탐침과 시료 간 거리  $R$ 에 대해 자기장이  $1/R$ 로 감소하는 특이한 특성을 보이며, 이는 일반적인 자기 단극( $1/R^2$ ) 또는 쌍극자( $1/R^3$ )와는 구별되는 낮은 차수의 감쇠 특성으로 인해 “pseudo pole”이라는 명칭을 갖게 되었다. MFM에서 측정되는 캔틸레버의  $\Delta$ 는 팁과 시료의 상호작용 힘의  $z$ 축 2계 미분에 비례한다. 비록 자기장이  $1/R$ 로 감소하더라도,  $\Delta$ 는 이 자기장의 2차 미분에 의해 결정되므로 최종적으로는 팁과 시료 간 거리  $z$ 에 대해  $1/z^3$  관계를 따른다. 즉, 자기장의 감쇠율과 측정 신호의 거리 의존성은 다르지만, 이는 해당 모델 내에서 일관성 있게 설명될 수 있다. 이 모델은 탐침 자기 모멘트의 크기 및 위치가 시료의 자기 패턴 크기에 따라 달라지는 PPA의 한계점을 극복하며, 상용 MFM 탐침의 자기적 특성을 보다 현실적으로 반영하는 장점을 갖는다[16].

#### IV. 결론 및 향후 전망

자기력 현미경(MFM)은 2D 자성 물질의 자기 도메인 구조, 위상학적 스핀 텍스처, 동적 자기 상호작용 등 다양한 자기적 특성을 나노스케일 수준에서 정밀하게 시각화할 수 있는 핵심 도구로 자리잡고 있다. 본 리뷰에서는 MFM의 작동 원

리부터 탐침과 시료 간 상호작용의 모델링, 최신 응용 사례 그리고 정량 분석 기법에 이르기까지 전반적인 내용을 종합적으로 고찰하였다. 특히 최근에는 MFM의 누설 자기장을 활용하여 스커미온의 국소 제어까지 가능하다는 연구가 발표되며, 단순 관측 도구를 넘어 능동적 조작이 가능한 플랫폼으로의 확장 가능성을 보여주고 있다. 향후에는 고감도 탐침 개발, 정량 해석 정밀도 향상, 외부 자극과의 통합 측정 기술 등이 더해짐에 따라, MFM의 적용 범위가 더욱 넓어질 것으로 기대된다. 향후 MFM은 스핀트로닉스, 위상 정보 처리, 양자 소재와 같은 첨단 자기 기반 분야에서 정밀 계측 및 제어 도구로 핵심적인 역할을 수행할 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2024년도 인하대학교의 연구 지원을 받아 수행되었습니다.

### References

[1] D. Soriano, M. I. Katsnelson, and J. Fernández-Rossier, *Nano Lett.* **20**, 6225 (2020).  
 [2] T. Song, Q.-C. Sun, E. Anderson, C. Wang, J. Qian, T. Taniguchi, K. Watanabe, M. A. McGuire, R. Stöhr, D. Xiao, T. Cao, J. Wrachtrup, and X. Xu, *Science* **374**, 1140 (2021).  
 [3] K. S. Novoselov, A. Mishchenko, A. Carvalho, and A. H. Castro Neto, *Science* **353**, aac9439 (2016).  
 [4] E. Marchiori, L. Ceccarelli, N. Rossi, L. Lorenzelli, C. L. Degen, and M. Poggio, *Nat. Rev. Phys.* **4**, 49 (2022).  
 [5] J. Chen, K. Wu, W. Hu, and J. Yang, *Phys. Chem. Lett.* **12**, 12256 (2021).  
 [6] B. Niu, T. Su, B. A. Francisco, S. Ghosh, F. Kargar, X. Huang, M. Lohmann, J. Li, Y. Xu, T. Taniguchi, K. Watanabe, D. Wu, A. Balandin, J. Shi, and Y.-T. Cui, *Nano Lett.* **20**, 553 (2020).

[7] W. Wang, L. Li, J. Liu, B. Chen, Y. Ji, J. Wang, G. Cheng, Y. Lu, G. Rijnders, G. Koster, W. Wu, and Z. Liao, *npj Quantum Mater.* **5**, 73 (2020).  
 [8] S. R. Bakaul, W. Lin, and T. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **99**, 042503 (2011).  
 [9] T. T. Ly, J. Park, K. Kim, H. Ahn, N. Lee, K. Kim, T. Park, G. Duvjir, N. H. Lam, K. Jang, C. You, Y. Jo, S. Kim, C. Lee, S. Kim, and J. Kim, *Adv. Func. Mater.* **31**, 17 (2021).  
 [10] L. Wang, Q. Feng, Y. Kim, R. Kim, K. Lee, S. D. Pollard, Y. Shin, H. Zhou, W. Peng, D. Lee, W. Meng, H. Yang, J. Han, M. Kim, Q. Lu, and T. Noh, *Nat. Mater.* **17**, 1087 (2018).  
 [11] S. D. Seddon, D. E. Dogaru, S. J. R. Holt, D. Rusu, J. J. P. Peters, A. M. Sanchez, and M. Alexe, *Nat. Commun.* **12**, 2007 (2021).  
 [12] M. Lohmann, T. Su, B. Niu, Y. Hou, M. Alghamdi, M. Aldosary, W. Xing, J. Zhong, S. Jia, W. Han, R. Wu, Y.-T. Cui, and J. Shi, *Nano Lett.* **19**, 2397 (2019).  
 [13] S. Sievers, K.-F. Braun, D. Eberbeck, S. Gustafsson, E. Olsson, H. W. Schumacher, and U. Siegner, *Small* **8**, 2675 (2012).  
 [14] O. Kazakova, R. Puttock, C. Barton, H. Corte-León, M. Jaafar, V. Neu, and A. Asenjo, *J. Appl. Phys.* **125**, 060901 (2019).  
 [15] Y. Feng, A.-O. Mandru, O. Yildirim, and H. J. Hug, *Phys. Rev. Appl.* **18**, 024016 (2022).  
 [16] T. Häberle, F. Haering, H. Pfeifer, L. Han, B. Achinuq, U. Wiedwald, U. Herr, and B. Koslowski, *New J. Phys.* **14**, 043044 (2012).  
 [17] A. Casiraghi, H. Corte-León, M. Vafaei, F. Garcia-Sanchez, G. Durin, M. Pasquale, G. Jakob, M. Kläui, and O. Kazakova, *Commun. Phys.* **2**, 145 (2019).  
 [18] W. G. Stirling and M. J. Cooper, *J. Magn. Magn. Mater.* **200**, 755 (1999).  
 [19] J. Zázvorka, F. Dittrich, Y. Ge, N. Kerber, K. Raab, T. Winkler, K. Litzius, M. Veis, P. Virnau, and M. Kläui, *Adv. Func. Mater.* **30**, 46 (2020).  
 [20] C. Reichhardt, C. J. O. Reichhardt, and M. V. Milošević, *Rev. Mod. Phys.* **94**, 035005 (2022).