이종접합구조에서 나타나는 스커미온

DOI: 10.3938/PhiT.29.021

최석봉 · 최준우 · 장서형

Skymions in Heterostructures

Sug-Bong CHOE, Jun Woo CHOI and Seo Hyoung CHANG

Skymions are topological spin textures in chiral magnetic materials and can provide new possibilities for next-generation devices. Real-space Berry curvature can play an important role in controlling the motion of skymions. Here, we introduce ways to measure Dzyaloshinskii-Moriya interaction, which is closely related to the formation of skymions, and to determine atomic positions by using X-ray scattering. We also review brief studies on skymions in two-dimensional (2D) magnetic heterostructures and the Moiré of van der Waals 2D magnets.

들어가며

스커미온(skymions)은 나선형(chiral) 자성 소재에서 나타나는 위상학적으로 안정된 초소형 스핀 구조이다. 스커미온은 60년대 입자 물리에서 처음 제안되었으며, 본 글에서는 자성 스

저자약력

최석봉 교수는 1999년 KAIST에서 물리학 박사학위를 취득하였고 박사 후 연구원으로 재직하였다. 그 후, 미국 Lawrence Berkeley 국립연구소에서 2004년까지 박사 후 연구원으로 일하였고 2004년부터 서울대학교 물리천문학부 교수로 재직 중이다. 스핀-궤도 결합 현상과 이에 따른 자구벽 운동 측정 및 분석 분야의 전문가이다. (sugbong@snu.ac.kr)

최준우 박사는 2008년 University of California, Berkeley에서 물리학 박사학위를 취득하였다. 2008년부터 한국과학기술연구원(KIST) 차세대 반도체연구소 스핀융합연구단에서 선임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 분야는 자성 박막 및 스핀트로닉스이다. (junwoo@kist.re.kr)

장서형 교수는 2011년 서울대학교에서 물리학 박사학위를 취득한 후 Argonne 국립연구소에서 박사 후 연구원, 부경대학교 물리학과에서 조교수로 일하였다. 2017년부터 중앙대학교 물리학과에서 조교수로 재직 중이다. 방사광 가속기 기반 COBRA와 Resonant Inelastic X-ray Scattering (RIXS) 방법을 이용하여 이종접합 구조를 연구하고 있다. (cshyoung@cau.ac.kr)

커미온을 위주로 논의하고자 한다. 자유전자가 스커미온과 같이 자화 방향이 연속적으로 변화하는 구조를 지나게 될 때, 전자의 자기 모멘트는 자화와 정렬을 하여 연속적으로 변하게 된다. 이에 따라 전자는 베리 위상(Berry phase)을 가지게 되며, 실질적으로는 유효자기장(effective magnetic field)과 같은 역할을 하는 실공간 베리 곡률(Berry curvature)의 영향을 받게 된다.^[1-6] 따라서, 자성 스커미온이 가지는 많은 전기역학(electrodynamics)적 특성은 실공간 베리 곡률에 기인한다. 예를 들어, 스커미온이 존재하는 상태에서 홀 효과(Hall effect)를 측정하게 되면, 실공간 베리 곡률이 주는 효과인 유효 자기장의 효과로 인해 위상 홀 효과(topological Hall effect)라고 불리는 추가적인 흥미로운 홀 효과가 나타나게 된다.^[7] 위상 홀 효과는 스커미온의 존재여부와 위상학적 특성을 증명하는 대표적인 실험 분석 방법이다.

MnSi와 같은 B20구조에서 나타나는 정렬된 스커미온 격자에서는 베리 곡률 자기 flux가 양자화되고, 위상 홀 효과가 명확히 보이는 경우가 많다.^[7,8] 하지만 B20구조 스커미온은 단결정, 극저온, 고자기장 등 전자소자 응용에 불리한 조건에서 대부분 나타난다. 또한 이러한 소재에서는 스커미온의 여러 특성을 결정하는 물질 파라미터들을 제어하기 힘들다. 반면, 자성 다층박막에서 나타나는 스커미온은 상온에서 전류인가 동역학을 보이는 등의 장점이 있지만, 다소 작은 잘로신스카-모리야 상호작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction)으로 인해 위상학적 불안정성이 크다. 따라서, 위상 스핀구조 신물질의 발견, 동역학의 체계적인 이해, 스핀소자의 구현 등을 위해서는 새로운 스커미온 소재가 요구되고 있다.

REFERENCES

- [1] M. V. Berry, Proc. R. Soc. London, Ser. A **392**, 45 (1984).
- [2] J. Ye *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 3737 (1999).
- [3] Y. Taguchi *et al.*, Science **291**, 2573 (2001).
- [4] P. Bruno *et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 096806 (2004).
- [5] M. Onoda *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2624 (2004).
- [6] B. Binz *et al.*, Phys. B **403**, 1336 (2008).
- [7] M. Lee *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 186601 (2009).
- [8] A. Neubauer *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 186602 (2009).

최근 산화물 초박막, 초격자(oxide superlattice), 이차원 이종접합구조(2D heterostructure) 등에서 스커미온이 실험적으로 발견되고, 이종접합구조 무아레(Moiré)에서 스커미온이 이론적으로 예측되는 등 기존과는 다른 자성 소재에서 스커미온을 발견하기 위한 노력들이 진행되고 있다.^[9-12] 이러한 초격자들과 이종접합구조들은 격자성이 뛰어나고 계면이 잘 정의된다. 따라서, 소재의 결함과 불균일성, 계면에서의 스핀 정보 파괴 문제들이 해결되어 스커미온에 대한 체계적인 물리적 이해와 효율적 소자 구현이 가능하다. 특히 이차원 자성체의 경우, 다양한 성질의 이차원 물질들과 이종접합구조를 형성하면 근접효과(proximity effect), 계면 혼성화(interfacial hybridization), 전하 전이(charge transfer) 등을 통해 스핀 구조 형성에 큰 영향을 미치는 물성인 교환 결합(exchange interaction), 잘로신스카-모리야 상호작용, 자기이방성(magnetic anisotropy) 등이 바뀌게 되어 계면 엔지니어링으로 스커미온과 같은 위상 스핀구조를 제어할 수 있는 자유도도 생긴다.

본 글에서는 스커미온 제어에 큰 영향을 미치는 잘로신스카-모리야 상호작용을 측정 방법을 논의하고, 이차원 이종접합구조, 이종접합구조 무아레에서 나타나는 스커미온을 소개한다. 또한, 베리곡률을 엔지니어링하기 위해 알아야 하는 구조 정보를 원자 단위 수준에서 얻는 x-선 산란 실험 방법에 대해 소개한다.

잘로신스카-모리야 상호작용 측정

교환 상호작용(exchange interaction)은 인접한 스핀과 스핀 사이에서 상호작용이 발생하는 가장 기본적인 물리현상이다. 이러한 교환 상호작용으로서 하이젠베르크(Heisenberg) 교환 상호작용이 가장 오래전부터 잘 알려져 있다. 하이젠베르크 교환 상호작용의 크기와 부호에 따라 강자성, 반강자성, 상자성 등 자성체의 기본적인 특성이 결정된다. 하이젠베르크 상호작용의 대칭적 특성과는 상호보완적으로, 최근에는 비대칭적 특성의 상호작용 또한 존재할 수 있음이 새롭게 밝혀졌다. 이를 통하여, 교환 상호작용에 대한 모든 대칭 특성의 이해가 완성되어 많은 연구가 수행되고 있다. 이러한 비대칭적 상호작용의 대표적인 현상이 아래 식에서 D_{12} 로 표현되는 잘로신스카-모리야 상호작용이다. $s_{1,2}$ 는 스핀이다.

$$H = -D_{12} \cdot (s_1 \times s_2)$$

비대칭 잘로신스카-모리야 상호작용은 이종접합 계면으로부터 베리 곡률의 대칭성이 깨어지는 현상으로부터도 발생할 수 있음이 발견되었다. 따라서, 베리 곡률 연구에 있어서 이론과 실험과 직접 비교할 수 있는 주요한 현상으로 이종접합 계면

이 주목받고 있다. 특히, 이종접합 물질의 조합에 따라 계면 잘로신스카-모리야 상호작용이 매우 크게 발생할 수 있음이 보고되기도 하였다. 충분한 크기의 계면 잘로신스카-모리야 상호작용은 스커미온 등의 새로운 자기 구조 발생의 직접적인 원인이 되기 때문에, 이러한 자기 구조를 기반으로 하는 스핀트로닉스(spintronic) 응용 기술 개발의 기술적 관심 또한 불러모으고 있다.

베리 곡률의 특성을 분석하고 학문적으로 이해하려면, 비대칭 이종접합 계면에서 베리 곡률의 이론적 예측과 이에 따른 계면 잘로신스카-모리야 상호작용 크기의 실험적 검증이 필수적이다. 이를 위하여 잘로신스카-모리야 상호작용 크기의 정확한 정량적인 측정이 요구된다. 또한, 잘로신스카-모리야 상호작용 크기에 대한 정량적인 이해는 스커미온 등의 새로운 자기 구조의 발생 및 동역학적 특성과 안정성 확보를 위한 연구에도 필요하다. 따라서, 이제까지 다수의 잘로신스카-모리야 상호작용 측정법이 다양한 방법으로 개발되었다. 여기서는 각 측정법의 장단점, 특히 각 측정법에 필요한 시료의 특성과 측정에 필요한 시간을 중심으로 비교하였다.

잘로신스카-모리야 상호작용의 측정 원리를 제공하는 첫 번째 물리현상은 자기 구역 벽(magnetic domain wall)을 기반으로 한다. 충분한 크기의 잘로신스카-모리야 상호작용이 있는 경우, 자성체에 존재하는 자기 구역 벽 내부에는 잘로신스카-모리야 상호작용에 의한 유효자기장이 발생하게 된다. 이 유효자기장의 크기가 충분히 큰 경우, 자기 구역 벽 내부 스핀을 나선형(chiral)으로 배열시키게 된다. 이러한 과정으로 만들어진 자기 구역 벽을 나선형 자기 구역 벽이라고 부르며, 나선형이 아닌 자기 구역 벽과는 다른 특성을 보이게 된다. 이러한 나선형 자기 구역 벽에 외부자기장을 걸어주어 유효자기장을 상쇄시키면 나선형 스핀 배열이 깨지게 되는데, 이때 필요한 외부자기장의 세기로부터 유효자기장의 크기를 측정하고, 이로부터 잘로신스카-모리야 상호작용의 크기를 정량화할 수 있다.

이러한 측정 원리를 바탕으로 나선형 자기 구역 벽의 속도를 수직과 수평 외부자기장의 세기에 따라 측정하여 이론적인 모델과 비교하면, 에너지 수식에 등장하는 모든 자기 매개변수 즉, 자기 구역 벽의 두께, 에너지 밀도, 비등방성(anisotropy) 상수와 더불어 유효자기장의 크기를 구할 수 있다.^[13] 이러한 측정법의 특성을 그림 1의 항목 A에 도식하였다. 이 방법을

REFERENCES

- [9] J. Matsuno *et al.*, *Sci. Adv.* **2**, e1600304 (2016).
- [10] L. Wang *et al.*, *Nat. Mater.* **17**, 1087 (2018).
- [11] Y. Wu *et al.*, *arXiv*: 1907.11349v2 (2019).
- [12] Q. Tong *et al.*, *Nano Lett.* **18**, 7194 (2018).
- [13] S.-G. Je *et al.*, *Phys. Rev. B* **88**, 214401 (2013).

Fig. 1. Detailed methods and conditions to measure Dzyaloshinskii-Moriya interaction. Time scale and relevant physical quantities are mentioned.

간소화하여 일정한 수직 외부자기장을 유지하면서, 수평 외부 자기장에 대한 나선형 자기 구역 벽 속도를 측정하면 유효자기장의 크기만을 빠르게 정량화할 수 있다. 첫 번째 방법에 비해 빠르고 간단한 방법으로 폭넓게 사용되는 방법으로 많은 연구에 활용되고 있다. 그림 1의 항목 B에 이 측정법의 특성을 도식하였다. 또한, 같은 원리를 바탕으로 단일 나선형 자기 구역 벽 현미경 영상을 분석하면, 잘로신스키-모리야 상호작용의 부호와 대략적인 크기 정보를 얻어낼 수 있다.^[14] 이 측정법은 박막의 제작 직후에 개략적인 특성 정보로서 수직 자기 비등방성과 깔끔한 자기 구역 벽의 존재 여부를 빠르게 측정할 수 있는 장점이 있다. 그림 1의 항목 C에 측정법의 특성을 도식하였다. 이러한 측정법들은 외부자기장과 유효자기장의 세기를 직접 비교하므로, 측정 장비의 최대 외부자기장보다 유효자기장의 세기가 큰 경우에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여, 외부자기장의 각도를 조절함으로써 유효자기장의 측정범위를 넓힐 수 있는 측정법도 개발되었다.^[15]

이러한 측정법들은 증착된 자성 박막 자체에 직접 적용할 수 있어서, 쉽고 간단하며 빠르게 측정할 수 있다. 따라서, 최초 제안된 이후 다양한 후속 연구가 진행되었다. 다양한 시료의 측정결과가 취합되면서, 시료의 특성에 따라 나선형 감쇄(chiral damping),^[16] 본질적 비대칭성(intrinsic asymmetry)^[17] 등 다수의 부수효과(artifact)가 발견되었다. 이러한 부수효과에 의해서 나선형 자기 구역 벽의 속도는 외부자기장에 대해서 비대칭적으로 발생하게 된다. 부수효과를 제거하기 위하여, 나

선형 자기 구역 벽의 속도를 서로 다른 수직 외부자기장에 대해 두 차례 측정하고, 속도 비율로부터 유효자기장을 정량화하는 측정법이 개발되었다.^[18] 이 측정법의 특성을 그림 1의 항목 D에 도식하였다. 또한, 이러한 부수효과는 나선형 자기 구역 벽의 홀러가기 영역(flow regime)에서는 사라지는 것으로 확인이 되어,^[18] 홀러가기 영역 측정을 통해 부수효과가 없는 측정이 가능하다. 그러나 홀러가기 영역의 측정을 위해서는 강한 자기장을 짧은 시간 동안 걸어주어야 하므로, 전자석의 사용이 어렵고 작은 코일을 제작하여 박막에 가까이 위치해야 하는 어려움이 있다. 또한, 자기 구역 벽의 전파(propagation) 자기장이 작은 박막에만 적용할 수 있다. 홀러가기 영역 측정법의 특성을 그림 1의 항목 E에 도식하였다. 이러한 부수효과의 근본 원인을 탐색하여 나선형 스핀 배열에 기인하고 있음을 확인하였고, 부수효과가 측정결과에 미치는 영향을 분석하여 측정오차 수준으로 바로잡는 방법이 제시되었다.^[19] 이 측정법의 특성을 그림 1의 항목 F에 도식하였다.

나선형 자기 구역 벽에서 발생하는 스핀-궤도 토크(spin-orbit torque)의 크기 또한 나선형 스핀 배열 여부에 따른 의존성을 보이기 때문에, 잘로신스키-모리야 상호작용의 유효자기장 측정에 활용될 수 있다.^[20,21] 이 측정법은 나선형 자기 구역 벽의 속도에서 발생하는 다양한 부수효과로부터 자유로운 장점이 있는 반면에, 증착된 박막에 직접 적용이 불가능하여, 스핀-궤도 토크 측정을 위한 소자 구조를 제작해야 하는 추가적인 과정이 필요하다. 이 측정법의 특성을 그림 1의 항목 G에 도식하였다. 이러한 측정법을 바탕으로 거대 스핀-전달 토크(spin-transfer torque)가 매우 얇은 코발트(cobalt) 박막에서 발생함을 발견하기도 하였다.^[22] 또한, 이종접합 물질에 따른 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기가 물질의 일 함수에 의존함을 발견하였고,^[23] 잘로신스키-모리야 상호작용 발생에 필요한 최소 박막 두께가 존재함을 발견하였다.^[24]

잘로신스키-모리야 상호작용의 측정 원리를 제공하는 두 번째 물리현상은 스핀파(spin wave)를 기반으로 한다. 박막의 면 방향으로 정렬된 스핀에서 스핀파가 발생하는 경우, 스핀파 내

REFERENCES

- [14] D.-Y. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 262403 (2015).
- [15] D.-H. Kim *et al.*, Sci. Rep. **7**, 45498 (2017).
- [16] E. Jué *et al.*, Nat. Mater. **15**, 272 (2016).
- [17] D.-Y. Kim *et al.*, Appl. Phys. Exp. **9**, 053001 (2016).
- [18] D.-H. Kim *et al.*, Phys. Rev. B **99**, 134401 (2019).
- [19] D.-Y. Kim *et al.*, NPG Asia Mater. **10**, e464 (2018).
- [20] J. H. Franken *et al.*, Sci. Rep. **4**, 5248 (2014).
- [21] S. Emori *et al.*, Phys. Rev. B **90**, 184427 (2014).
- [22] S.-G. Je *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 167205 (2017).
- [23] Y.-K. Park *et al.*, NPG Asia Mater. **10**, 995 (2018).
- [24] Y.-K. Park *et al.*, NPG Asia Mater. **12**, 38 (2020).

부의 스핀은 모두 시간상으로 같은 방향의 회전을 하게 된다. 이때 전파 방향이 서로 반대인 두 스핀파를 비교하면, 두 스핀파는 서로 반대 방향으로 공간적 배열을 하게 된다. 이러한 반대 방향의 공간적 스핀 배열은 반대 부호의 잘로신스키-모리야 상호작용 에너지를 발생시키므로, 이 두 스핀파는 서로 다른 에너지를 갖는다. 이러한 스핀파의 에너지는 브릴루앙 빛 산란(Brillouin light scattering)^[25] 또는 미앤더-선 안테나(meander-line antennae)^[26] 측정법을 통해 측정할 수 있으며, 측정된 스핀파의 에너지 차이를 통하여 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기를 구할 수 있다. 브릴루앙 빛 산란 측정법의 특성을 그림 1의 항목 H에 도식하였다. 이러한 스핀파-기반의 측정법은 나선형 자기 구역 벽 기반의 측정법에 비해, 비교적 두꺼운 박막과 비교적 큰 잘로신스키-모리야 상호작용의 측정에 적합한 것으로 확인되었다.^[27]

또한, 소자 구조의 경계면 형태에 따른 자기이력곡선의 중심 이동을 통한 잘로신스키-모리야 상호작용 측정법도 개발되었다.^[28] 이 측정법은 소자 구조를 정밀하게 제작하고 나면, 자기이력곡선은 다양한 기존의 측정법을 활용할 수 있는 장점이 있다. 마지막으로, 잘로신스키-모리야 상호작용에 의한 나선형 자기 구역 벽의 회전 현상을 바탕으로 잘로신스키-모리야 상호작용 측정법도 제안되었고,^[29] 소자의 경계면에서 발생하는 부수효과에 관한 결과도 보고되었다.^[30]

그림 1은 자성 박막이 제작된 이후, 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기를 측정하는 측정법 사이의 순서도와 측정에 걸리는 시간을 정리하였다. 제작된 박막 시료는 일단 단일 영상 측정법(C)을 통하여 수직 자기 비등방성과 깨끗한 자기 구역 벽의 생성 여부를 관측한다. 이러한 첫 번째 측정법을 통해 나선형 자기 구역 벽의 존재가 확인된 박막은, 나선형 자기 구역 벽의 속도 측정법(B)을 통하여 잘로신스키-모리야 상호작용에 의한 유효자기장의 정량화가 가능하다. 이 측정법을 통하여, 속도에 대한 부수효과의 존재 여부를 확인할 수 있다. 부수효과가 무시할 수 있을 만큼 작은 경우에는 자기 구역 벽의 속도가 수평 외부자기장에 대해 대칭적인 형태를 보이게 된다. 이 경우, 측정된 유효자기장을 부수효과에 의한 오류 없이 확정할 수 있으며, 필요에 따라서 자기 구역 벽 속도의 2차원 측정(A)을 통해 에너지 수식에 존재하는 모든 매개변수의 값을 얻을 수 있다.

부수효과가 무시할 수 없을 만큼 크다면, 박막의 특성과 제작 조건에 따라서 아래 4가지 측정법 중에서 하나를 선택할 수 있다. 즉, 자기 구역 벽의 전파에 필요한 자기장의 세기가 충분히 작은 경우에는 자기 구역 벽의 흘러가기 운동 영역 측정법(D)으로부터 유효자기장의 세기를 측정할 수 있다. 또는, 자기 구역 벽의 에너지 수식에 존재하는 매개변수의 값을 모

Fig. 2. (a) Structure of Fe_3GeTe_2 . (b) Bloch-type skyrmions in bulk Fe_3GeTe_2 measured by Lorentz transmission electron microscopy (LTEM). [Adapted with permission from Ref. 35. Copyright 2020 American Chemistry Society] (c) Schematic diagram and LTEM image of Bloch-type skyrmions in bulk $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$. [Reprinted with permission from Ref. 36. Copyright 2019 American Chemistry Society]

두 알고 있는 경우에는, 별도의 측정 없이 부수효과 보정법(F)을 통해, 유효자기장의 세기를 측정 오차 범위에서 확정할 수 있다. 혹시, 스핀-궤도 토크 측정을 위한 선형(linear) 소자 구조를 제작한 경우에는, 스핀-궤도 토크 측정법(G)으로부터 유효자기장과 더불어 스핀-궤도 토크 효율을 측정할 수 있다. 마지막으로, 자기 구역 벽 속도의 산포(dispersion)가 작은 경우에는 속도-비 측정법(D)을 활용하여 유효자기장의 세기를 정량화할 수 있다.

REFERENCES

- [25] J. Cho *et al.*, Nat. Commun. **6**, 7635 (2015).
- [26] J. M. Lee *et al.*, Nano Lett. **16**, 62 (2016).
- [27] D.-Y. Kim *et al.*, Phys. Rev. B **100**, 224419 (2019).
- [28] D.-S. Han *et al.*, Nano Lett. **16**, 4438 (2016).
- [29] O. Boulle *et al.*, Phys. Rev. Lett. **111**, 217203 (2013).
- [30] D.-Y. Kim *et al.*, Phys. Rev. B **97**, 134407 (2018).

이러한 일련의 측정법을 통하여 대부분의 박막에서 발생하는 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기를 측정할 수 있다. 혹시, 단일 영상 측정법(C)을 통해 깨끗한 자기 구역 벽이 존재하지 않음이 관찰되었다면, 브릴루앙 빛 산란 측정법(H)을 통해 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기를 직접 측정할 수 있다. 각 측정법은 각각 적합한 측정 조건의 범위를 가지고 있으며, 각 조건에 맞게 서로 상호보완적으로 활용함으로써 모든 박막에서의 잘로신스키-모리야 상호작용의 크기를 정량화할 수 있다. 이러한 다양한 측정법 중에서 자기 구역 벽의 속도 측정법(B), 스핀-궤도 토크 측정법(G)과 브릴루앙-산란 측정법(H)이 가장 많이 활용되는 대표적인 측정법으로 자리매김하고 있으며, 각각 측정된 값 사이의 호환성도 확인되었다.^[27]

이차원 자성체 및 그 이종접합구조에서의 스커미온

Fe_3GeTe_2 는 대표적인 층상(layered) 구조 자성체로서 이차원으로 박리(exfoliate)되었을 때, 강자성 성질을 유지한다.^[31-33] 비교적 높은 퀴리(Curie) 온도(약 220 K)와 공기 중에서의 안정성, 강한 수직 자기이방성을 갖고 있어 스핀 소자 응용에 적합한 이차원 자성체로 각광을 받고 있다. 벌크 상태 혹은 두꺼운 Fe_3GeTe_2 에서는 큰 자기 쌍극자(magnetic dipole) 상호작용으로 인해 줄무늬 자구(magnetic stripe domain)가 나타나는 것이 관측되었다.^[34,35] 이 상태에서 수직 방향의 자기장을 인가하게 되면, 줄무늬 모양의 자구 구조가 끊어지면서 버블 형태의 스커미온이 형성된다(그림 2b). Fe_3GeTe_2 격자는 공간 대칭성이 깨져 있지 않고(그림 2a), 두꺼울 때는 계면 효과도 거의 없기 때문에 이 시스템은 나선형 자성을 갖게 하는 잘로신스키-모리야 상호작용이 없다. 따라서 두꺼운 Fe_3GeTe_2 에서 나타나는 스커미온은 나선형의 성질(chirality)이 없는, 자기 쌍극자 상호작용에 의해 형성되는 Bloch 자구벽(magnetic domain wall) 스커미온이며(그림 2b), field cooling을 하게 되면 무자기장 상태에서도 이 스커미온 스핀 구조가 유지된다.^[35] Bloch-type 스커미온은 또 다른 층상구조 자성체인 $\text{Cr}_2\text{Ge}_2\text{Te}_6$ 에서도 보고되었다(그림 2c).^[36]

두께가 얇은 층상구조 자성체가 다른 물질들과 이종접합을 형성하면 다양한 계면 효과가 나타나서 그 자기적 특성이 변화할 수 있다.^[37,38] WTe_2 는 스핀-궤도 결합(spin-orbit coupling)이 상당히 큰 층상구조 transition metal dichalcogenide(TMD) 물질이다.^[39] $\text{WTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 에서 스커미온의 존재를 증명해주는 위상 홀 효과가 관측되었고, 로렌츠 전자현미경 측정으로부터 이 구조에서의 스커미온은 Néel 자구벽을 갖고 있음이 밝혀졌다.^[11] 두꺼운 Fe_3GeTe_2 에서 나타나는 Bloch-type 스커미온과 달리, 이종접합계면에서 생기는 잘로신스키-모리야 상

Fig. 3. Skyrmions in the Moiré of van der Waals 2D magnets. [Reprinted with permission from Ref. 12. Copyright 2018 American Chemistry Society]

호작용으로 인해 $\text{WTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 이종접합구조에서는 나선형의 성질을 갖는 Néel-type 스커미온이 생기는 것이다. 이는 이종접합구조를 제작함으로써 자성 물질 파라미터들을 변화시킬 수 있고, 이에 따라 위상 스핀 구조를 효과적으로 제어할 수 있음을 시사한다. $\text{WTe}_2/\text{Fe}_3\text{GeTe}_2$ 에서는 계면 잘로신스키-모리야 상호작용이 1.0 mJ/m^2 로 다소 작지만, 적절한 이차원 물질의 조합으로 보다 위상학적 안정성이 뛰어나고 전류 구동 효율성이 큰 스커미온이 형성되는 이종접합구조를 발견할 수 있을 것으로 기대한다. 예를 들어, 그래핀-강자성체 계면에서 라쉬바(Rashba) 효과로 큰 잘로신스키-모리야 상호작용이 생길 수 있음이 밝혀진 바 있다.^[40]

이차원 회전 초격자에서의 스커미온

한편, 이차원 물질에서는 층간 작은 비틀림 각도(twist angle)를 준 회전초격자의 제작이 가능하다. 그래핀 회전초격자에서 초전도성과 자성이 보고되는 등 회전초격자에서 나타나는 새로운 물리현상에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다.^[41,42] 회전초격자에서는 long-range 간섭무늬인 무아레 패턴이 생기는데, 이차원 물질 이종접합구조에서 무아레는 층간 비틀림뿐만 아니라 이종 물질의 lattice mismatch에 의해서도 만들어질 수 있다. 최근 층상구조 자성체 이종접합구조 무아레에서 자성

REFERENCES

- [31] Y. Deng *et al.*, *Nature* **563**, 94 (2018).
- [32] K. Kim *et al.*, *Nat. Mater.* **17**, 794 (2018).
- [33] S. Park *et al.*, *Nano Lett.* **20**, 95 (2020).
- [34] Q. Li *et al.*, *Nano Lett.* **18**, 5974 (2018).
- [35] B. Ding *et al.*, *Nano Lett.* **20**, 868 (2020).
- [36] M. G. Han *et al.*, *Nano Lett.* **19**, 7859 (2019).
- [37] C. Gong and X. Zhang, *Science* **36**, 706 (2019).
- [38] M. Gibertini *et al.*, *Nat. Nanotechnol.* **14**, 408 (2019).
- [39] G.-B. Liu *et al.*, *Phys. Rev. B* **88**, 085433 (2013).
- [40] H. Yang *et al.*, *Nat. Mater.* **17**, 605 (2018).
- [41] Y. Cao *et al.*, *Nature* **556**, 43 (2018).
- [42] A. L. Sharpe *et al.*, *Science* **365**, 605 (2019).

스커미온이 형성될 수 있다는 이론적인 연구 결과가 있다.^[12] 층상구조 반강자성체 기판 위에 이차원(한 층) 층상구조 강자성체가 있는 이종접합구조에서 lattice mismatch이나 층간 비틀림에 의해 atomic registry가 위치에 따라 주기적으로 바뀌게 된다. 이에 따라, 층간 자기 상호작용도 위치에 따른 주기성을 갖게 되고, 주기적인 스핀 구조인 스커미온 격자가 만들어질 수 있는 것이 이론적으로 예측되고 있다(그림 3). 특히 무아레에서 만들어지는 스커미온 격자는 스트레인, interlayer translation 등으로 인한 무아레의 변화에 따라 위상 스핀구조도 바뀌게 된다. 따라서, 무아레 스커미온은 위상 스핀구조를 제어할 수 있는 효과적인 방법을 제시하고 있다.

베리곡률 엔지니어링을 위한 원자단위 구조 분석

앞에서 잘로신스키-모리야 상호작용을 실험적으로 측정하는 방법에 대해 논의하였고, 이종접합 구조 및 이차원 회전초격자에서 나타나는 스커미온에 대해 살펴보았다. 위상 홀 효과를 보이는 또 하나의 시스템으로 산화물 초박막이나 이종접합 구조가 있다. 2016년 $\text{SrIrO}_3/\text{SrRuO}_3$ 박막에서 흥미로운 위상 홀 효과가 관측되었다.^[43] 스핀-궤도 결합 효과가 큰 5d 원소인 Ir을 강자성 물질인 SrRuO_3 박막에 근접시킬 때 계면 잘로신스키-모리야 상호작용을 조절할 수 있다는 주장이었다. 하지만, 이후 최근 많은 연구를 통해 SrRuO_3 단일 박막에서도 두께를 수 층(unit cells) 이하로 줄이거나 계면에 ionic gating 또는 강유전체인 BaTiO_3 로 유도되는 강한 전기장을 걸어주면 SrRuO_3 박막에서 위상 홀 효과를 유도할 수 있음을 알게 되었다.^[44-47] 산화물 초박막 또는 이종접합 구조에서 보이는 위상 홀 효과를 이해하기 위해, 잘로신스키-모리야 상호작용의 변화, 스커미온의 존재 여부 등과 관계에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

모델 시스템에서 보이는 위상 홀 효과와 잘로신스키-모리야 상호작용, 스커미온의 관계에 대해 더 깊게 이해하기 시도할 때, 이를 하나로 이어줄 수 있는 베리곡률 개념까지 도달하게 된다. 조금 바꾸어 말하면, 모델 시스템의 베리곡률을 엔지니어링할 수 있다면, 스커미온의 특성, 움직임 등을 제어할 수 있지 않을까 하는 생각으로 자연스럽게 연결된다. 베리곡률은 전자구조처럼 물질 정보가 있으면 실제 계산할 수 있는 물리량이다. 따라서, 이종접합 구조나 이차원 회전초격자의 베리곡률을 알아내기 위해서, 물질의 구체적인 정보, 모델 시스템의 원자 단위까지 얻을 수 있는 구조 분석이 필요하다.

전자빔을 이용하는 방법도 있지만 본 글에서는 x-선을 이용한 산란(scattering) 방법 중 하나인 coherent Bragg rod analysis(COBRA) 방법을 소개하고자 한다.^[48-50] 그림 4와 같

Fig. 4. Two-dimensional electron density maps obtained by COBRA. (a) (200) plane and (b) (001) plane of $\text{SrRuO}_3/\text{BaTiO}_3/\text{SrRuO}_3$ heterostructure. [Adapted with permission from Ref. 50. Copyright 2020 Elsevier]

이, COBRA 방법은 이종접합구조의 격자 정보를 평균적으로 나타내는 것이 아니라 각 층별로 구할 수 있는 방법이다. 보다 구체적으로 x-선 산란을 통해 역격자 공간에서 여러 CTR (crystal truncation rods)들을 측정한다. 이 데이터를 역푸리에 변환(inverse Fourier transformation)을 하면 3차원 전자 밀도 함수를 구하고 제한 조건 내에서 다시 푸리에 변환을 하여 실제 CTR 데이터와 비교를 한다. 이 과정을 반복하면 전자 밀도 함수가 수렴하게 된다. 이를 기반으로 이종 접합구조 내 격자와 이온의 위치 정보를 원자 단위 수준으로 얻을 수 있다. COBRA 방법은 Yacoby에 의해 제안된 direct determination method이며 투과현미경과 달리 시료를 비파괴로 관측할 수 있다.^[48] 또한, CTR 측정 데이터를 얻으면, 3차원 구조 정보를 한 번에 얻기 때문에 그림 4에서와 같이, 우리가 원하는 여러 단면(in-plane과 out-of-plane)을 동시에 분석할 수 있다.

주로 lab-source 기반 x-선 회절 실험에서는 박막 전체의 평균 구조를 얻게 된다. 하지만 COBRA 방법은 박막의 각 층

REFERENCES

- [43] J. Matsuno *et al.*, *Sci. Adv.* **2**, e1600304 (2016).
- [44] B. Sohn *et al.*, *arXiv*: 1810.01615 (2018).
- [45] L. Wang *et al.*, *Nat. Mater.* **17**, 1087 (2018).
- [46] Z. Li *et al.*, *Nat. Commun.* **11**, 184 (2020).
- [47] Q. Qin *et al.*, *Adv. Mater.* **31**, 1807008 (2019).
- [48] Y. Yacoby *et al.*, *Nat. Mater.* **1**, 99 (2001).
- [49] Y. J. Shin *et al.*, *Adv. Mater.* **29**, 1602795 (2017).
- [50] K. J. Lee *et al.*, *Curr. Appl. Phys.* **20**, 505 (2020).

Fig. 5. COBRA-calculated electron density profiles of the heterostructure at three sites in ABO_3 perovskite structure along the z direction. [Adapted with permission from Ref. 50. Copyright 2020 Elsevier]

별로 원자 단위 수준의 격자 정보를 얻을 수 있다. 그림 5는 $SrRuO_3/BaTiO_3/SrRuO_3$ 초박막 샘플을 COBRA 방법을 이용하여 원자 단위 수준의 격자 구조를 얻었고, 이를 전자 밀도 함수로 표현하였다. A cation(Sr, Ba), B cation(Ru, Ti) 위치 혹은 O(산소)의 3차원 위치 정보뿐만 아니라, 각층 별 원자의

상대 위치 등을 기반으로 전기적 분극도 직접적으로 구할 수 있다. 실제 $SrRuO_3$ 초박막에서 COBRA 방법을 적용하여 구한 원자수준 단위의 격자 정보를 구하여 잘로신스키-모리야 상호작용을 제일원리 계산으로 계산하여 추정해 볼 수 있다.^[44]

마치며

본 원고에서는 차세대 스핀트로닉스 응용 가능성으로 관심을 받고 있는 저차원 구조 및 이종접합 구조에서 나타나는 스커미온(skymions)에 대해 간단히 살펴보았다. 특히 스커미온이 생성 조건인 잘로신스키-모리야(Dzyaloshinskii-Moriya) 상호작용을 측정할 수 있는 실험적 방법에 대해 고찰하였다. 또한, 산화물 및 전이금속 칼코젠 화합물 기반 이종접합구조, 무아레(Moiré) 구조에서 나타나는 스커미온 연구도 소개하였다. 또한, 베리곡률을 계산하기 위해 3차원 구조 정보를 원자 단위 수준에서 얻는 실험적 방법에 대해 다루었다. 이를 통해, 베리곡률 이해를 바탕으로 스커미온 연구가 보다 활발해지길 기대해 본다. 이러한 기초연구를 통해 축적되는 스커미온의 이해와 측정-제어 기술이 현재 돌파구가 절실히 필요한 차세대 초고속 저전력 정보저장 소자 구현을 이루는 디딤돌로 되는 희망을 가져 본다.