쓸모없음의 재발견: 준강자성체에서의 자성 스커미온 운동

DOI: 10.3938/PhiT.28.037

김 덕 호

Rediscovery of Uselessness: Dynamics of the Magnetic Skyrmion in Ferrimagnetic Materials

Duck-Ho KIM

Louis Néel won the Nobel Prize in Physics in 1970 for his work on the magnetic force of a solid. Around 1930, he proposed a new property of the magnetic field, called antiferromagnetism, which is a concept opposite that of ferromagnetism, and found that the antiferromagnetic property disappeared when the material goes above the Néel state. At this time, we should recall his famous words about antiferromagnets. “They are extremely interesting from the theoretical standpoint but do not appear to have any practical applications.” In summary, they are “interesting but useless”. A possible reason for such a statement lies in the fact that antiferromagnetic materials, when viewed from the outside, seem to have zero magnetization, to be difficult to measure, and even impossible to control arbitrarily. What has now happened to what seemed so impossible? Only a century ago, antiferromagnetic materials were said to be useless, but now they are being examined again as potential materials that can be used to solve various industrial problems that occur with ferromagnetic materials. In this issue of Science and Technology, I will talk about some interesting discoveries using antiferromagnets.

저자약력

김덕호 박사는 2016년 2월 서울대학교 물리학과에서 강자성 물질의 스핀 동역학에 대한 연구로 박사학위(지도교수: 최석봉)를 받았다. 2016년 9월까지 동대학교 BK21플러스 프런티어물리인력양성사업단 및 응용물리연구소에서 박사 후 연구원으로 재직 한 뒤, 2016년 9월부터 2019년 8월까지 교토대학교 화학연구소(테루오 오노 교수 연구실) 박사 후 연구원으로 재직하였고, 2019년 9월부터 현재까지 한국과학기술연구원(KIST)에서 박사 후 연구원으로 재직 중이다. 준강자성 물질의 스핀 동역학에 대한 연구로 2019년 4월 한국물리학회에서 김덕주 신진과학자상을 수상하였다. (uzes.physics@gmail.com)

들어가는 말

2018년 연말에 퍼스트맨(First Man)이라는 영화를 흥미롭게 관람했다. 미항공우주국(NASA)의 우주비행사인 닐 암스트롱(Neil Alden Armstrong)의 인류 최초의 달 탐사에 대한 이야기이다. 달 착륙한 시기가 1969년 7월 21일 원고를 작성하는 시기는 약 50주년이 되는 해이다. 50년 전이라는 비교적 가까운 시기에 인류는 달이라는 새로운 탐험을 개척했는데, 불과 100년 전까지는 불가능해 보이는 일이었다.

고체의 자기력에 대한 연구로 1970년 노벨 물리학상을 받은 루이 네엘(Louis Néel)이라는 물리학자가 있었다.^[1] 1930년경에 그는 강자성체의 반대 개념으로, 자기장의 새로운 성질인 반강자성체(antiferromagnet)를 제안했고, 네엘 상태가 되면 반강자성이 사라진다는 것도 밝혀냈다.^[2] 이때 반강자성체에 대해 그가 남긴 유명한 말이 있다. “They are extremely interesting from the theoretical standpoint but do not appear to have any practical applications” 요약하면 “이론적으로는 흥미롭지만 쓸모는 없다”이다. 이런 말을 하게 된 이유 중 하나는 반강자성체는 외부에서 보았을 때는 마치 자성이 없는 것

REFERENCES

- [1] L. Néel, *Magnetism and the local molecular field. Nobel Lectures, Physics 1963-1970* (1970); *The Nobel Prize in Physics 1970* (The Nobel Foundation, 2012).
- [2] L. Néel, *Science* **174**, 985 (1971).
- [3] T. Jungwirth, X. Marti, P. Wadley and J. Wunderlich, *Nat. Nanotechnol.* **11**, 231 (2016).
- [4] L. Šmejkal, Y. Mokrousov, B. Yan and A. H. MacDonald, *Nat. Phys.* **14**, 242 (2018).
- [5] P. Němec, M. Fiebig, T. Kampfrath and A. V. Kimel, *Nat. Phys.* **14**, 229 (2018).
- [6] J. Železný, P. Wadley, K. Olejník, A. Hoffmann and H. Ohno, *Nat. Phys.* **14**, 220 (2018).
- [7] V. Baltz, A. Manchon, M. Tsoi, T. Moriyama, T. Ono and Y. Tserkovnyak, *Rev. Mod. Phys.* **90**, 015005 (2018).
- [8] R. A. Duine, K.-J. Lee, S. S. P. Parkin and M. D. Stiles, *Nat. Phys.* **14**, 217 (2018).
- [9] O. Gomonay, V. Baltz, A. Brataas and Y. Tserkovnyak, *Nat. Phys.* **14**, 213 (2018).

처럼 보이고, 이러한 성질로 측정하기도 어렵고, 그 성질을 임의로 조절하는 것도 불가능해 보였기 때문일 것이다.

이렇게 불가능해 보였던 것이 지금은 어떻게 되었을까? 불과 1세기 전에는 쓸모는 없다고 이야기되었지만, 현재에는 반강자성체는 매우 유용한 물질로 재조명받고 있다.^[3-9] 반강자성체를 이용한 메모리는 매우 빠른 동작이 기대되며, 강자성체를 이용한 메모리에서 발생했던 여러 가지 문제점들을 해결할 수 있는 물질로 거듭났다. 마치 인류가 불가능해 보이는 달을 탐험한 것처럼, 과학자들은 비견 불가능해 보이는 것을 꾸준한 연구를 통해 해결해 나갔다. 이번 호의 “물리학과 첨단기술의 세계”에서는 반강자성 물질의 스핀 동역학에 대한 몇 가지 발견을 이야기하고자 한다. 가급적 수식을 제외하고 독자분들이 쉽게 접근할 수 있도록 노력을 하였다. 모쪼록 독자분들이 재미있게 읽으셨으면 좋겠다.

홀 효과(Hall effect)와 스커미온 홀 효과(Skyrmion Hall effect)

1879년 24살의 젊은 대학원생인 에드윈 홀(Edwin Herbert Hall)은 한 가지 흥미로운 발견을 했다.^[10] 도체에 전류를 흘리고, 동시에 전류에 수직방향으로 자기장을 걸어주었을 때, 전류와 자기장의 방향에 수직하게 걸리는 전압 차를 발견한 것이다(그림 1(a)). 이 전압 차는 발견한 사람의 이름을 빌려 홀 전압이라고 부르고, 이 현상을 홀 효과(Hall effect)라 한다. 더 자세한 이야기가 궁금하신 독자분들은 다음 논문을 참고하라.^[11] 우리는 이 현상을 전자기장(Electromagnetic field)이 주어졌을 때, 전자의 운동을 일반물리학에서 배운 로런츠 힘(Lorentz force) 개념을 통해 배웠다.^[12] 이후에 홀 효과와 비슷한 현상들이 발견되어, 홀 효과를 물리적인 메커니즘이 다른 홀 효과와 구별하기 위해 “보통 홀 효과(ordinary Hall effect)”라 부른다.

비슷한 현상은 자성 스커미온(Magnetic skyrmion)이라는 상태에서 발생한다. 자성 스커미온은 자성체 내부에서 형성되는 소용돌이 모양의 스핀 구조체를 말한다.^[13,14] 스커미온 구조는 1950년대 영국의 물리학자인 토니 스컬(Tony Skyrme)이 제안한 핵자 이론의 수학적 모델인데,^[15] 이 모델을 이용해 한번 만들어진 양성자가 계속 양성자로 유지하는 현상을 수없이

Fig. 1. (a) Schematic of the ordinary Hall effect. (b) Schematic of the skyrmion Hall effect of the ferromagnet. (c)-(d) Experimental demonstration of the skyrmion Hall effect. Adapted from Refs. 21 and 22.

많은 고리들이 서로 얽힌 위상학적 구조를 통해 이해하려고 하였다. 자연 법칙의 흥미로운 점은 입자물리학에서 제안된 스커미온이 자성체에서 발견되었다는 것이다. 더 자세한 내용이 궁금하신 독자분들은 한정훈 교수님의 기사를 읽어 보길 바란다.^[16] 스커미온은 위상학적 구조로 위상학적인 성질로, 모양이 변형될 수 있지만 스커미온의 “비틀림”은 먼저 그것을 지탱하는 특이성이 제거되지 않으면 위상적인 형태가 깨지지 않는다. 스커미온은 위상학적 구조 때문에 위상학적 전하를 가지고 있다.^[17,18] 그리고 전류가 스커미온을 통과하여 흐를 때, 스커미온은 전류 스핀(spin)과의 상호작용으로 유효 자기장(스핀 자체의 Berry phase라는 특성으로 스커미온은 유효 자기장을 느

REFERENCES

- [10] E. H. Hall, Am. J. Math. **2**, 287 (1879).
- [11] G. S. Leadstone, Phys. Educ. **14**, 374 (1979).
- [12] J. Walker and D. Halliday, *Fundamentals of physics*, 10th edition (John Wiley & Sons, 2014), p. 811.
- [13] A. N. Bogdanov and U. K. Rossler, Phys. Rev. Lett. **87**, 037203 (2001).
- [14] J. Iwasaki, M. Mochizuki and N. Nagaosa, Nat. Nanotechnol. **8**, 742 (2013).
- [15] T. Skyrme, Nucl. Phys. **31**, 556 (1962).
- [16] J.-H. Han, History of quantum materials [2]: from twisted atoms to topological magnets, HORIZON (2019).
- [17] N. Nagaosa and Y. Tokura, Nat. Nanotechnol. **8**, 899 (2013).
- [18] A. Soumyanarayanan, N. Reyren, A. Fert and C. Panagopoulos, Nature **539**, 509 (2016).

Fig. 2. (a)-(b) Illustration of the Racetrack memory. Adapted from Ref. 26. (c) Schematic illustration of the magnetic skyrmion. Adapted from Refs. 47. (d) Illustration of the skyrmion racetrack memory.

깍)을 느끼게 된다. 이런 특성으로 인해 자성 스커미온이 있을 때 전류를 가하면 전자기장에 존재하는 전자의 운동(즉, 홀 현상)과 유사한 상황이 되어, 스커미온은 힘의 방향으로 움직이지 않고 힘의 방향과 빗겨서 움직이게 된다(그림 1(b)). 이를 스커미온 홀 현상(Skyrmion Hall effect)이라고 불린다.^[19,20]

이론적으로 알려진 스커미온 홀 현상은 미국 아르곤 연구소의 연구팀(Wanjuan Jiang과 그 동료들)과 미국 MIT 독일&마인츠 대학교 연구팀(Kai Litzius과 그 동료들)에 의해 관찰되어, 2016년 12월 Nature Physics 보고되었다^[21,22](그림 1(c), 그림 1(d)). 재밌는 점은 두 그룹에서는 독립적으로 이 프로젝트를 수행하고 있었는데, 한 잡지의 같은 호에 실린 것이다. 물리학자들 입장에서 이론적으로 예측된 스커미온 홀 현상의 실험적 관측은 매우 의미있는 발견이라고 볼 수 있다. 하지만 아이러니하게도 스커미온이라는 것이 학계에 흥미를 끌게 된 주된 요인 중 하나는 스커미온이 차세대 메모리 소자의 “정보”로서 이용 가능성에 있었다.^[23,24]

자구벽 레이스트랙 메모리 & 스커미온 레이스트랙 메모리

2008년 IBM 연구소의 스튜어트 파킨(Stuart Parkin) 박사과 그 동료들은 자구벽 레이스트랙(Racetrack, 경주로)이라는

새로운 메모리를 제안해 차세대 메모리 개발에 대한 가능성을 제시하였다^[25,26](그림 2(a)). 자구벽 레이스트랙 메모리의 핵심 기술은 도선 형태의 트랙에 만들어진 자화를 전류를 이용해 한쪽으로 이동시키는 것이다(그림 2(a)). 이 메모리는 데이터를 나노 크기의 금속선에 저장하며 비트 규모의 정보는 그 금속선에 새겨진 자구(magnetic domain)가 된다(그림 2(b)). 데이터 입력은 나노선에 전류를 보내 새로운 자구를 삽입하는 방식으로 이뤄지며 데이터를 읽는 것은 자구를 나노 금속선에서 옮기는 방식으로 이뤄진다. 그러나 이런 선 구조를 사용한 메모리 소자에서 메모리 형태는 비트의 1차원적인 배열만이 가능

REFERENCES

- [19] J. Zang, M. Mostovoy, J. H. Han and N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **107**, 136804 (2011).
- [20] G. Chen, Nat. Phys. **13**, 112 (2017).
- [21] W. Jiang *et al.*, Nat. Phys. **13**, 162 (2016).
- [22] K. Litzius *et al.*, Nat. Phys. **13**, 170 (2016).
- [23] A. Fert, V. Cros and J. Sampaio, Nat. Nanotechnol. **8**, 152 (2013).
- [24] J. Sampaio, V. Cros, S. Rohart, A. Thiaville and A. Fert, Nat. Nanotechnol. **8**, 839 (2013).
- [25] S. S. P. Parkin, M. Hayashi and L. Thomas, Science **320**, 190 (2008).
- [26] S. P. Parkin, Sci. Am. **300**, 76 (2009).

Fig. 3. (a) Schematic illustration of the magnetic skyrmion with two different topological charges. (b) Schematic of the skyrmion Hall effect of the antiferromagnet. (c) Illustration of the different magnets, such as ferromagnet, antiferromagnet, and ferrimagnet.

하고 처리 방식 역시 1차원적인 이동에 의해서만 가능하다.

2009년 Science에 보고된 소용돌이 모양의 스핀 구조체인 자성 스커미온은 안정성, 작은 크기, 효율적인 움직임 등의 특성으로 차세대 메모리 소자로 주목받았다.^[27] 나노선 너비 전체를 정보로 사용하는 자구벽을 자성 스커미온으로 대체하면 2차원 형태의 배열이 가능하다. 특히 자성 스커미온은 위상(topology) 불변량에 의해 안정된 상태로서(그림 2(c)), 안정된 정보 저장뿐 아니라 매우 빠른 동작속도가 기대된다.^[23] 따라서 자성 스커미온을 이용한 스커미온-레이스트랙 메모리(그림 2(d))가 차세대 메모리로서 큰 관심을 받고 있다.^[23,24,28]

스커미온이 정보라는 단위라면 그 정보는 안정되게 저장하고 읽을 수 있어야 한다. 스커미온 레이스트랙 메모리에서 데이터를 읽는 것은 스커미온을 나노 금속선에서 옮기는 방식으로 이뤄지는데, 스커미온 홀 효과가 존재하면 정보를 금속선을 따라서 안정되게 옮길 수 없게 된다(그림 1(b)). 즉, 전류에 의해

움직이는 스커미온이 금속선을 따라서 움직이는 것이 아니라 금속선의 경계방향으로 움직이면서 사라질 수 있다. 물리적으로 흥미로운 스커미온 홀 현상의 관측은 좋았지만, 이는 한편으로 많은 연구자들에게 숙제를 준 셈이다.

반강자성체에서의 스커미온 운동

자연스럽게 연구자들에게 다음의 질문이 따라왔다. “어떻게 스커미온 홀 현상을 없앨 수 있을까?” 답은 문제 속에 있었다. 스커미온 홀 현상은 위상전하 $Q(+1$ 또는 $-1)$ 를 가진 스커미온이 유효 자기장을 느끼며 발생하므로, 위상전하의 부호에 따라 스커미온 홀 현상의 방향이 달라진다(그림 3(a)). 만약 스커미온이 유효자기장을 느끼지 않는 상황이 되면 스커미온 홀 현상은 사라질 것이다. 그렇다면 어떻게 스커미온이 유효 자기장을 느끼지 못하는 상황을 만들 수 있을까? 이때 해답을 준 물질이 반강자성체였다. 반강자성체에 존재하는 스커미온은 서로 반대 위상 전하를 갖는 두 내부 스커미온이 겹쳐진 것으로 볼 수 있다(그림 3(b)). 따라서 반강자성체의 스커미온에 대해서는 $Q = +1$ 그리고 $Q = -1$ 인 두 내부 스커미온의 유효 자기장이 (B_+ , B_-) 서로 상쇄가 되어, 총 유효 자기장(B_{net})은 사라지게 된다(그림 3(b)). 따라서 반강자성체에서 스커미온 홀 효과를 없앨 수 있을 것이고, 이 예측은 시뮬레이션을 통해 가능성이 확인이 되었다.^[29] 굉장히 쉬운 아이디어임에도 불구하고, 실험으로는 오랫동안 관찰되지 못했다. 왜냐하면 반강자성체는 외부에서 준 힘에 쉽게 반응하지 않아 연구를 하기에 제한적 물질이었다. 그림 3(c)를 보면 강자성체는 이웃한 스핀들이 평행하게 정렬된 물질이라 한쪽 방향으로 정렬된 자화를 측정할 수 있지만, 반강자성체는 이웃한 스핀들이 반평행하게 정렬되어 있는 물질로 되어 있어 외부에서 보기에는 자화가 0인 상태와 같아 자화의 특성을 관측하기가 어렵다. 가까스로 발견한 방법에서 여전히 해결해야 할 숙제는 있었다. 이때 새롭게 조명된 물질인 준강자성체(ferrimagnet)였다. 준강자성체는 두 개의 “다른 크기”를 가진 자화가 “반평행하게 정렬”된 구조이다. 준강자성체의 특징을 조금 더 살펴보자.

준강자성체, 자화 보상점, 각운동량 보상점

준강자성체의 대표적인 예로는 전이 금속과 희토류 금속의

REFERENCES

- [27] S. Mühlbauer *et al.*, Science **323**, 915 (2009).
- [28] X. Zhang *et al.*, Sci. Rep. **5**, 7643 (2015).
- [29] Xichao Zhang *et al.*, Nat. Commun. **7**, 10293 (2016).

Fig. 4. (a) The temperature T dependent submagnetic moment M_i of one sublattice, respectively. (b) The T -dependent net magnetic moment M_{net} . (c) The T -dependent spin angular momentum moment L_i of one sublattice, respectively. (d) The T -dependent net spin angular momentum L_{net} . The spin angular momentum densities are given by $L_i = -M_i/\gamma_i$, where $\gamma_i = g_i \mu_B/\hbar$ is the gyromagnetic ratio of lattice i , g_i is the Landé g factor of lattice i , μ_B is the Bohr magneton, and $\hbar$ is the reduced Planck's constant.

합금으로 만들어진 물질이다. 두 물질을 혼합하게 되면 각각의 자화는 반대방향으로 향하게 되고, 두 자화의 크기가 다르다. 반강자성체와의 차이점으로 반강자성체는 두 개의 같은 크기의 자화가 반평행하게 정렬되어 알짜 자화(net magnetic moment)의 크기는 0이 되는 반면, 준 강자성체는 알짜 자화의 크기가 0이 아니다. 준강자성체에 대한 앞의 설명은 사실 반쯤 맞는 설명이다. 그림 4(a)를 살펴보자. 블로흐 법칙(Bloch's law)에 의해 각각의 자화는 온도에 따라 멱법칙을 따르며 변화하는데,^[30] 특정 온도에서는 강자성 성질의 사라지는 큐리온도(Curie temperature) T_C 가 존재한다. 준강자성체는 두 개의 자화 M_1 , M_2 가 반평행하게 정렬되어(1, 2는 각각 다른 물질) 각각의 온도변화는 그림 4(a)에 표현되어 있다. 자 그림 세 가지의 온도(T_1 , T_2 , T_3) 지점에서 알짜 자화에 대해 살펴보자. T_1 에서는 M_1 의 크기가 M_2 의 크기보다 커서 알짜 자화 $M_{\text{net}} = M_2 - M_1$ 는 음수가 된다. 같은 논리로 T_3 에서는 M_{net} 은 양수가 된다. 여기까지는 우리가 알고 있는 준 강자성체의 정의와 같다. 그러나 T_2 에서는 M_1 와 M_2 가 같아 $M_{\text{net}}=0$ 이 된다(그림 4(b)). 이것은 마치 반강자성체와 같은 상태인 것이다. 결론을 내리기 전에 한 가지 더 중요한 물리량에 대해 살펴보자.

일반물리학에서 배운 지식을 활용하면, 자화 M 은 각운동량 L 과 다음의 선형관계 $M = -\gamma L$ 를 가진다.^[31] 여기에서 γ 는 자기회전비율(gyromagnetic ratio)을 의미한다. 하나의 성분으

로 구성된 물질에서는 g -상수(g -factor)가 결정되어 있어(즉 γ 값도 결정), 외부 변화에 따른 M 과 L 이 동일한 변화를 보인다. 예를 들어, 강자성체와 반강자성체에서는 M 과 L 이 동일한 변화를 보인다. 하지만 준강자성체의 경우에는 각각 성분 물질의 g -상수가 달라 외부 변화(온도 변화)에 따른 M 과 L 이 동일하지 않다^[32] (그림 4(c)). 자 아래의 식을 살펴보자. 알짜 자화는 $M_{\text{net}} = M_2 - M_1$ 으로 생각할 수 있다. 이때 알짜 각운동량은 $L_{\text{net}} = L_2 - L_1$ 으로 생각할 수 있고, 이때

$$L_{\text{net}} = M_1/\gamma_1 - M_2/\gamma_2$$

가 된다.

만약 γ_1 과 γ_2 가 같으면($\gamma_1 = \gamma_2$), L_{net} 이 0이 되는 상황이 M_{net} 이 0이 되는 상황이 된다. 그러나 γ_1 과 γ_2 가 다르기 때문에(각각의 물질의 g -상수가 달라) $L_{\text{net}} = 0$ 인 상황이 $M_{\text{net}} = 0$ 인 상황과 달라진다. 특별히 M_{net} 가 0이 되는 온도를 자화 보상점(Magnetization compensation temperature) T_M 이라 명명하고(그림 4(b)), L_{net} 이 0이 되는 온도를 각운동량 보상점(Angular momentum compensation temperature) T_A 라 명명한다(그림 4(d)). 이런 두 가지 특별한 보상점은 준강자성체의 흥미로운 성질이다. 일반적으로 반강자성체는 $M_{\text{net}} = 0$ 이 $L_{\text{net}} = 0$ 을 의미한다. 그래서 특별히 이 두 개를 구분해서 이야기하지 않고 알짜 자화가 0이 반강자성체의 대표적인 성질이다. 여기서 질문이 하나 생긴다. 그렇다면 준강자성체에서는 $M_{\text{net}} = 0$ 인 상황과 $L_{\text{net}} = 0$ 중 어떤 것이 반강자성체를 나타낼까? 자화의 시간에 따른 상태 변화는 자기 모멘트가 아닌 각운동량과의 상호작용으로 발생하기 때문에, 각운동량이 스핀 동역학에 영향을 준다. 따라서 준강자성체에서는 알짜 각운동량이 0인 상황($L_{\text{net}} = 0$)에서 반강자성체 스핀 동역학 특성을 보일 것으로 기대된다. 흥미로운 점은 준강자성체에서 총 각운동량이 0인 경우에도 불구하고 유한한

REFERENCES

- [30] N. Ashcroft and N. Mermin, *Solid State Physics* (Rinehart and Winston, 1976), p. 708.
- [31] J. Walker and D. Halliday, *Fundamentals of physics*, 10th edition (John Wiley & Sons, 2014), p. 953.
- [32] J. Jensen and A. R. Mackintosh, *Rare Earth Magnetism* (Clarendon, Oxford, UK, 1991).

Fig. 5. (a) Schematic illustration of the magnetic domain and magnetic domain-wall (DW). (b) Schematics of the field-driven DW motion in flow regimes. (c) Illustration of the translational and rotational motions. (d) Field-driven DW motion as a function of the temperature T in the vicinity of the angular momentum compensation temperature T_A . Adapted from Ref. 34.

알짜 자화값을 가지고 있어, 외부자기장에 의해 제어도 되고 관찰할 수도 있다는 점이다. 각운동량 보상점에서의 준강자성체는 반강자성체의 특징을 가지고 있을 뿐 아니라, 외부에서 보기에는 알짜 자화도 존재하여 실험 물리학자들에게 반강자성 스핀 동역학 측정에 대한 가능성을 열어주었다.

각운동량 보상점에서 반강자성체 스핀 동역학 관측 및 초고속 자구벽 이동 관찰

준강자성체 각운동량 보상점에서 스핀 동역학을 이해하기 위해, 강자성체의 스핀 동역학에 대한 이해가 필요하다. 강자성체에서 자구는 같은 방향으로 정렬된 자화의 영역이고, 자구와 자구의 경계를 자구벽(Magnetic domain wall)이라고 한다(그림 5(a)). 자구벽이 존재할 때 한쪽 방향의 자기장을 걸어주게 되면, 자기장과 나란한 방향의 자구의 에너지가 낮아지게 되고, 이 시스템은 전체 에너지를 낮게 만들기 위해 자구는 확장하게 된다. 즉, 자구벽은 자기장에 의해 움직일 수 있다. 자기장이 작을 때 자구벽의 자화는 고정되어 자구벽이 움직이고(steady motion), 특정 임계자기장(Walker field)보다 커지면 자구벽 내부의 자화가 세차 운동(precessional motion)을 하며 자구벽이 이동을 하게 된다^[33](그림 5(b)). 자기장이 작을 때는 병진 운동만 하고, 자기장이 큰 경우에는 병진 운동과 회전 운동을 동시에 하게 된다. 직관적으로 생각하면, 에너지를 주어

졌을 때 병진 운동과 회전 운동을 동시에 하게 되면 병진 운동에 필요한 에너지는 줄어들게 되고, 그만큼 느린 속력으로 운동을 하게 된다(그림 5(c)).

그렇다면 반강자성체에서는 어떻게 될까? 반강자성체에서는 각운동량이 0이기 때문에 회전운동과 병진 운동이 분리가 되어, Walker 자기장 이상에서도 외부에서 준 힘은 온전히 병진 운동에만 작용하게 된다.^[34] 따라서 각운동량 보상점에서는 회전운동에 해당하는 에너지가 병진 운동에 사용되어 각운동량 보상점이 아닌 점보다 자구벽 속도가 증가하게 될 것이 예측되었다.

한국과학기술원(김갑진 교수), 고려대학교(이경진 교수), 교토대학교(김덕호 박사, 테루오 오노 교수), 미주리대학교(김세권 교수) 공동 연구팀은

GdFeCo 준강자성체에서 온도에 따른 자구벽 이동을 조사하였다.^[34] 자기장에 의한 자구벽의 이동 속도가 각운동량 보상점에서 급격히 증가하는 것을 관찰하였다(그림 5(d)). 그 결과 각운동량 보상점에서 자구벽이 완벽한 반강자성체 운동을 해, 최대 속도는 약 2 km/s로 기존의 강자성체에서의 최대 속도의 몇 배가되는 것을 알 수 있었다. 자 앞선 질문에 대한 답은 실험적인 증명으로 입증되었다. 즉, 준강자성체는 각운동량 보상점에서 반강자성체처럼 운동한다는 사실이다.

준강자성체에서의 스커미온 홀 효과

앞서 설명한 것처럼 스커미온 홀 효과를 없애는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 반강자성체를 이용해 전류에 따른 스커미온 운동을 관찰하는 것이다. 두 번째는 준강자성체의 각운동량 보상점에서 전류에 따른 스커미온 운동을 관찰하는 방법이다. 반강자성체 경우, 알짜 자화가 0이 되어서 외부에서 측정이 불가능하기 때문에, 연구자들은 준강자성체를 이용해 반강자성체 스커미온 운동 관찰을 시도하였다. 즉, 각운동량 보상점에서 스커미온 홀이 사라지는 것을 관찰할 수 있을 것

REFERENCES

- [33] A. Thiele, Phys. Rev. Lett. **30**, 230 (1973).
- [34] K.-J. Kim *et al.*, Nat. Mater. **16**, 1187 (2017).

Fig. 6. (a)-(c) Illustration of the current-driven elongation of magnetic skyrmion for various temperatures T . (d)-(f) Current-driven elongation of magnetic bubble as a function of T . Adapted from Ref. 35. (g) Illustration of the current-driven elongation of a magnetic bubble. (h) skyrmion Hall angle θ as a function of T for each magnetization state. Adapted from Ref. 35.

이다(그림 6(a-c)).

교토대학교(김덕호 박사, 테루오 오노 교수), 고려대학교(이경진 교수), 미주리대학교(김세권 교수), 서울대학교(최석봉 교수) 공동 연구팀은 비정질 GdFeCo 준강자성체에서 온도에 따른 스커미온 홀 효과를 조사하였다.^[35] (그림 6(d-f)). 스커미온 홀 효과는 전류 방향과 스커미온이 늘어지며 확장하는 각도로부터 얻었다(그림 6(d-f)). 이것은 길게 늘어진 자구 확장은 반스커미온(half-skyrmion)이 움직이는 것으로 이해가 가능하다(그림 6(g)). 그 결과 각운동량 보상점에서 완벽한 반강자성체 운동을 보여 스커미온 홀 효과가 사라지는 것을 실험과 이론을 통해 입증하였다(그림 6(h)).

준강자성체에서 최근 발견된 현상들

마지막으로 준강자성체 물질에서 최근 보고된 몇 가지 재미있는 현상들을 간단히 언급하고 본 기사를 마무리하려 한다. 하이젠베르크(Heisenberg) 교환 상호 작용과 더불어 DM 상호 작용(Dzyaloshinskii-Moriya interaction, DMI)은 인접한 자기 모멘트 사이에 작용하는 근본적인 교환 상호 작용 중 하나이다.^[36,37] 이러한 DM 상호 작용은 안정된 자성 스커미온 구조를 형성하는데 중요한 역할을 한다.^[23] 교토대학교(김덕호 박사,

Fig. 7. (a) Thickness dependence of DMI in ferrimagnet. Adapted from Ref. 38. (b) The laterally averaged line profiles of Gd/Fe with respect to the z axis (thickness) position through scanning transmission electron microscopy (STEM) and electron energy-loss spectroscopy (EELS). The inset is the image elemental map of Gd divided by that of Fe. Adapted from Ref. 38.

테루오 오노 교수) 연구팀은 비정질 준강자성체에서 원소 조성의 연속적인 변화가 공간 반전 대칭성의 깨짐을 유도하여 DM 상호 작용이 발현할 수 있음을 보고하였다^[38] (그림 7(a), 그림 7(b)). 이 결과는 새로운 물질을 이용하여 DM 상호 작용 크기를 조절하는 새로운 방법론을 제시하고, 안정된 자성 스커미온을 만드는데 중요한 물리량인 DM 상호 작용을 발견해 새로운 연구 가능성을 열어주었다.

준강자성체에서 자기장에 의한 자구벽 운동은 각운동량 보상점에서 빠른 속도로 움직이는 현상이 관찰되었다.^[34] 이후, 사람들의 관심은 자연스럽게 각운동량 보상점에서 전류에 의한

REFERENCES

- [35] Y. Hirata *et al.*, Nat. Nanotechnol. **14**, 232 (2019).
- [36] I. Dzyaloshinsky, J. Phys. Chem. Solids **4**, 241 (1958).
- [37] T. Moriya, Phys. Rev. **120**, 91 (1960).
- [38] D.-H. Kim *et al.*, Nat. Mater. **18**, 685 (2019).

Fig. 8. (a) Schematics of the spin-transfer torque (STT). (b) Schematics of the spin-orbit torque (SOT) on DW. (c) STT effect on DW speed ($\Delta V/V$) as a function of temperature under the various current density $|J|$. The index indicates the non-adiabatic STT component $\Delta V_{N,STT}/J$ (red line) and the adiabatic STT component $\Delta V_{A,STT}/J$ (blue line). Adapted from Ref. 42. (d) DW speed as a function of temperature for various current densities (spin-orbit torque). Adapted from Ref. 44.

자구벽 운동으로 옮겨갔다. 전류에 의한 자구벽 운동의 매커니즘은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 스핀전달토크(spin transfer torque) 현상이다. 그림 8(a)는 자성체에서 스핀전달토크가 구현되는 과정을 개략적으로 설명하고 있다. 자화의 방향과 다른 방향의 스핀 자기모멘트를 가진 전자가 자성체를 통과할 때 전자들의 스핀각운동량(spin angular momentum)이 자화의 스핀 방향으로 향하고, 그 반작용으로 자성체의 스핀이 돌아가는 현상을 나타낸다. 자세한 내용이 궁금한 독자들은 이현우 교수님이 작성하신 기사를 읽어보길 권한다.^[39,40] 두 번째는 스핀궤도토크(spin orbit torque) 현상이다. 그림 8(b)는 자성체에서 스핀궤도토크가 구현되는 과정을 개략적으로 설명하고 있다. 비자성/강자성 이종구조(heterostructure)에서 면에 수평방향으로 전류를 흘릴 때 수직방향으로 스핀전류(spin current)가 발생되고 이로 인해 강자성체에 미치는 토크(torque)이다.^[40,41]

고토대학교(김덕호 박사, 테루오 오노 교수), 고려대학교(이경진 교수), 미주리 대학교(김세권 교수) 공동 연구팀은 각운동량 보상점에서 스핀전달토크에 대한 매커니즘을 밝혔다^[42](그림 8(c)). 점진적인 스핀전달토크(adiabatic spin-transfer torque)는 스핀과 자화의 모멘트의 작용-반작용 관계, 그래서 각운동량 보상점에서 사라지고, 그 주변으로 부호가 역전되었다(그림 8(c) index). 그리고 비점진적인 스핀전달토크(non-adiabatic

spin-transfer torque)는 자기장과 유사한 역할을 함을 실험적으로 확인 이론적으로 규명하였다(그림 8(c) index). 스핀궤도토크에 의한 자구벽 운동은 각운동량 보상점에서 최대가 됨을 고려대학교 이경진 교수 연구팀에서 이론적으로 예측하였고,^[43] 매사추세츠 공과대학교(MIT) 제프리 비치 교수 연구팀에 실험적으로 보고되었다^[44](그림 8(d)).

맺는 말

이번 물리학과 첨단기술의 세계에서 반강자성체와 특성이 비슷한 준강자성체의 특성 및 스커미온 운동과 몇 가지 발견에 대해 이야기했다. 그 과정을 보면, 새로운 아이디어는 항상 해결해야 하는 숙제를 가지고 있었고, 그것을 심도 있게 연구하여 해결하는 과학자들의 노력이 있었다. 그리고 어떤 저명한 과학자는 쓸모없다고 이야기했고, 혹은 많은 과학자들이 연구가치가 없다고 이야기하더라도(연구장비와 기술적인 축적 정도에 따라 그 당시 상황에는 그렇게 생각할 수 있다고 본다), 그런 것들을 주의 깊게 살펴보고, 그것의 새로운 가치를 발견하는 과학자들이 많이 나왔으면 좋겠다. 준강자성 물질에 대해 짧은 기사가 현업에서 열심히 연구에 매진하고 있는 연구자들 뿐 아니라, 젊은 과학자분들에게 조금이나마 도움이 되길 바란다.

마지막으로 원고를 작성할 기회를 주신 한국과학기술연구원(KIST) 류혜진 박사님 및 한국물리학회 편집위원님들께 감사드리고, 고 김덕주 교수님^[45,46]의 명예에 누가 되지 않게 노력하는 과학자가 되겠다는 다짐과 함께 글을 마무리한다.

REFERENCES

- [39] Hyun-Woo Lee, Phys. High Technol. **20**(1/2), 24 (2011).
- [40] Jisu Ryu, Kyoung-Whan Kim and Hyun-Woo Lee, Phys. High Technol. **20**(10), 27 (2011).
- [41] S. Lee *et al.*, J. Korean Mag. Soc. **29**, 108 (2019).
- [42] T. Okuno *et al.*, Nat. Electron. **2**, 389 (2019).
- [43] S.-H. Oh and K.-J. Lee, J. Mag. **23**, 196 (2018).
- [44] L. Caretta *et al.*, Nat. Nanotechnol. **13**, 1154 (2018).
- [45] Byung Il Min, Keum Hwi Lee, Jae Il Lee and Yoon Hee Jeong, Phys. High Technol. **9**(5), 39 (2000).
- [46] Byung Il Min, Phys. High Technol. **27**(1/2), 44 (2018).
- [47] <https://phys.org/news/2017-05-synchronized-skyrmion.html>.