자성 나노구조체의 스핀파

DOI: 10.3938/PhiT.19.034

김상국·한동수

Spin Waves in Nanoscale Magnetic Elements

Sang-Koog KIM and Dong-Soo HAN

Current needs for further advances in the nanotechnologies of information-storage and -processing devices have attracted a great deal of interest in spin (magnetization) dynamics in nanometer-scale patterned magnetic elements. In particular, spin waves have attracted lots of attention due to their potential application for information carrier. Thus, here we introduce numerical simulation studies of spin waves regarding the excitation and wave-like behaviors of spin waves in restricted geometries of nanometer scale, and implementations in potential spin wave (or magnonic) devices.

들어가는 글

현재 반도체 소자의 정보처리기술은 음전하를 지니는 전자의 흐름을 제어하는 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)에 근간을 두고 있다. 최근 보다 빠르고 더 작은 소자를 제작하기 위해 전자가 흐르는 나노 구조체의 집적도를 높이고 있다. 반면에 이로 인한 전자의 누수, 열 발생 등은 해결해야 할 과제이다. 따라서 기존의 정보 처리 방식에서 벗어난 신개념의 정보처리기술 및 소자 제작에 많은 관심이 쏠리고 있다. 그 중에 전자가 지니고 있는 양자물리량인 스핀의 빠른 동적거동, 특히 스핀파(spin wave)를 이용한 정보 처리 기술이 새롭

저자약력

김상국 교수는 포항공과대학교에서 공학박사 학위를 취득(1996)하고 미국 로렌스버클리 국립연구소에서 박사후 연구원(1996-2000), 한국과학기술원에서 연구 조교수(2000-2001)로 활동하였으며, 2002년부터 서울대학교 재료공학부 교수로 재직 중이다. 2006년 4월부터 창의적 연구진흥사업의 일환인 스핀파 동역학-소자 연구단으로 선정되어 현재 스핀파 및 자기소용돌이 동역학 연구에 전념하고 있다. (sangkoog@snu.ac.kr)

한동수 연구원은 서울대학교 재료공학부에서 학사 학위를 취득하고 현재 스핀파 동역학-소자 연구단의 일원으로 스핀파 연구를 수행하고 있다. (dshan@snu.ac.kr)

Fig. 1. Collective dynamic behavior of individual spins coupled with each other, representing wave form.

게 대두되고 있다. 스핀파란 스핀의 파동형태의 집단적 거동을 일컫는데(Fig. 1), 특히 강자성 나노구조체에서 구조체의 모양, 크기, 외부자기장에 따라 다양한 모드의 동적 거동을 보여준다. 이는 개별 스핀들의 세차 운동이 서로간의 쌍극자-쌍극자 상호작용(dipole-dipole interaction), 교환 상호작용(exchange interaction), 혹은 외부 자기장에 의해 유효 자기장이 국부적으로 다르게 인가되어 다양한 형태의 파동 모드를 형성하기 때문이다. 스핀파는 지배적인 상호작용에 따라 세 부분으로 구분할 수 있다. 첫째, 쌍극자-쌍극자 상호작용이 지배적이고 수십 μm 에서 수 cm의 파장을 가지는 정자파(magnetostatic spin wave)와 교환 상호작용이 지배적으로 작용하여 수 nm 이하의 파장을 가지는 교환 스핀파(exchange spin wave)가 있다. 그리고 두 상호작용이 경쟁적으로 작용하여 생성되는 수 nm에서 수 μm 의 파장을 가지는 쌍극자-교환 스핀파(dipolar-exchange spin wave)가 있다. 이러한 스핀파를 양자화된 준입자(quasiparticle)로 기술하여 마그논(magnon)이라 칭하기도 한다. 스핀파 연구는 20세기 중반 이후 꾸준히 진행되어 왔으나 지난 과거에는 이론에 기반을 둔 계산 연구가 주를 이루었다. 최근 나노자성체 제작기술, 스핀 동역학 측정기술의 발달로 나노미터 크기의 자성박막의 스핀 동적 거동을 실험으로 측정 가능하게 되었다. 뿐만 아니라 실험으로 관측이 불가능한 경우, 수 nm 공간 및 수 ps 시간 분해능을 가지는 미소자기 컴퓨터 전산모사를 통해 다양한 구조체의 스핀파 동역학을 연구할 수 있다.^[1] 현재, 과거의 스핀파 기본 현상에 대한 기초 및 이론 연구에서 탈피하여 소자에 응용하기 위한 기반기술 연구가 점차

REFERENCES

- [1] S.-K. Kim, J. Phys. D: Appl. Phys. **43**, 264004 (2010).

Fig. 2. (a) Model geometry composed of circular disk of diameter $2R = 300$ nm, thickness $t = 10$ nm and attached nanostrip waveguide of 30 nm width and 700 nm length. The colors represent the in-plane local magnetizations, as indicated by the color-coded wheel. The applied magnetic field pulse is shown in the inset. (b) Perspective-view images of spatial distributions of local values of out-of-plane magnetization component normalized by its saturation value, M_z/M_s at the indicated times. Reproduced from [3] copyright 2007, American Physical Society.

진행되고 있음을 알 수 있다.^[1]

본 창의단은 다양한 자성 나노구조체를 대상으로 미소자기 전산모사를 통해 스핀동역학 연구를 지난 수년간 수행해왔다. 본 원고에서는 본 연구단에서 수행한 전산모사 결과를 바탕으로 스핀파 파동특성과 이를 응용한 스핀파 제어기술 및 논리연산소자의 개념을 소개한다.

스핀파의 파동 특성

1. 방사와 전파

나노구조체에 스핀파를 발생하여 전파시키기 위해 다양한 형태의 외부 에너지를 통해 기저상태의 자화배열을 국소적으로 여기시켜야 한다. 전에는 자성체에 자기장, 열 등을 인가하여 개별 스핀간의 자기적 상호작용을 유발하여 스핀파를 발생시켰다. 하지만 이와 같은 방식으로 형성된 스핀파는 그 세기가 작다는 단점을 지니고 있어 보다 더 강력한 스핀파를 발생시킬 필요가 있다. 따라서 본 연구단에서는 강력한 스핀파를 형성하는 새로운 스핀파 발생방법을 구현하기 위해, 다음과 같은 전산모사를 수행하였다. Fig. 2(a)는 전산모사를 위한 단일 자기 물질인 페랄로이(Py: $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) 자기박막으로 이루어진 모델이다. 전체 구성은 원통형 자성박막인 스핀파 발생부분과 도선형태의 도파도로 이루어졌다. 이때 원통형 자성박막은 자기소용돌이(magnetic vortex)라 불리는 특이한 스핀구조를 가진다. 자기소용돌이란 특정 박막 두께 및 크기 영역에서 에너지적으로 매우 안정된 자화방향 배열로서 그 중심에 직경 10 – 20 nm 크기의 핵이 형성되어 있으며 그 자

Fig. 3. (a) Spatial distribution of local magnetizations for spin waves propagating along nanostrip waveguide, taken at given times noted. (b) Frequency power spectra along the x -axis (longitudinal axis of the nanostrip) at $y=0$ pass (center), obtained from fast Fourier transforms of M_z/M_s oscillations. (c) Dispersion curves of propagating spin waves in region ($150 < x < 850$ nm) of nanostrip waveguide. The first, second, and third rows correspond to applied field strength $H_a = 100, 300$, and 500 Oe, respectively. The black-, red-, and purple closed lines display the three different modes. Reproduced from [3] copyright 2007, American Physical Society.

화 방향은 위(Up) 혹은 아래(Down)를 가리킨다. 또한 중심부 주변에는 박막면에 평행한 소용돌이 자화배열을 지니고 있다. 이러한 원통형 자성박막에 사인곡선 형태의 단일주기 펄스 자기장을 박막면에 평행하게 인가하면 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 자기소용돌이 핵의 자화방향이 반전된다. 이때 자기소용돌이-반자기소용돌이 생성 및 소멸과정을 거치면서 스핀파를 방사한다.^[2] 이 경우 다양한 주파수 영역대의 스핀파가 한꺼번에 방사되며 스핀파의 세기는 인가해주는 자기장의 세기에 따라 증가하는 경향이 있다(Fig. 3(b)). 이러한 자기소용돌이 반전은 외부 자기장 및 전류의 형태, 크기 및 주파수를

REFERENCES

- [2] K.-S. Lee *et al.*, Appl. Phys. Lett. **87**, 192502 (2005).

Fig. 4. (a) Model geometry, 5 nm thick, composed of different magnetic elements Ni ($y < 0$ nm) and Py ($y > 0$ nm). The magnetizations in the two media are saturated in the $+y$ direction, as noted, by 1 T magnetic field. (b) Spatial distribution of local M_z/M_s components, taken at $t=4$ ns. (c) FFT power distribution on k_x - k_y plane, obtained from M_z/M_s distribution on x - y plane, along with frequency contours of spin-wave modes existing in Ni (purple) and Py (apricot) media. Reproduced from [4] copyright 2008, American Institute of Physics.

조절하여 제어 가능하다. 따라서 이러한 강력한 스핀파 발생 방법을 소자에 응용 가능하리라 본다.

Fig. 3(a)는 자기소용돌이 자화반전에 의해 유발된 스핀파를 도파로에 주입하고 도파로 구성 물질의 자기적 특성과 구조 요인(너비, 두께 등)에 의해 변하는 특정 분산관계(dispersion relation)이다^[3](Fig. 3(c)). 이와 같은 전산모사 결과를 바탕으로 도파로에서 진행되는 스핀파의 분산관계를 이론적으로 계산할 수 있으며 이를 통해 스핀파의 특성을 살펴볼 수 있다.^[3]

2. 반사와 굴절

자연계의 모든 파동은 서로 다른 매질의 경계를 통과할 때 경계면에서 반사 및 굴절을 경험한다. 따라서 스핀파가 서로 다른 자성체 경계면을 통과할 때 반사 및 굴절현상이 어떻게 일어나는지 살펴보기 위해 다음과 같은 전산모사를 수행하였다. Fig. 4(a)에 보여진 바와 같이 서로 다른 자성체, 퍼말로이와 니켈(Ni: Nickel)로 이루어진 경계면을 향해 니켈 박막쪽에서 스핀파를 발생시켜 45각도로 입사하였다. 그 결과 입사된 스핀파가 경계면에 도달하여 일부는 -45도 방향으로 반사되고 나머지는 경계면에서 굴절되어 퍼말로이 박막 영역으로 진행하였다(Fig. 4(b)). 이러한 스핀파의 반사, 굴절 현상을 정량적으로 분

석하기 위해 각 자성박막에서 진행되는 스핀파의 파동벡터(k_x , k_y) 값을 푸리에 변환(Fourier transformation)을 통해 계산하였다. 그 결과 입사파, 반사파, 굴절파의 경우 각각 (0.09 nm^{-1} , 0.09 nm^{-1}), (0.09 nm^{-1} , -0.09 nm^{-1}), (0.09 nm^{-1} , 0.06 nm^{-1}) 값을 보였으며 이를 통해 입사, 반사, 굴절된 스핀파가 모두 동일한 k_x 값을 가진다는 사실을 알 수 있었다(Fig. 4(c)). 이러한 결과는 동일한 주파수를 가진 파동이 서로 다른 매질의 경계면을 통과할 때 $k_1 \cdot n = k_1' \cdot n = k_2'' \cdot n$ 의 계면 경계조건을 만족한다는 사실과 일치하며, 이를 통해 전자기파의 스넬 법칙(Snell's Law)이 스핀파에도 적용됨을 알 수 있다. 또한 스핀파의 입사 조건 및 각 매질을 달리 했을 때 전반사 및 복굴절 현상이 일어남을 관측할 수 있었다.^[4,5] 이와 같이 전산모사를 이용한 스핀파의 반사, 굴절, 전반사, 복굴절 현상 관찰은 스핀파의 이론적 연구에도 상호보완적이다. 특히 스핀파의 굴절률을 매질의 물질상수(자기 포화 상수, 교환 상수, 교환 결합 길이, 격자 상수, 자기소거 상수)와 스핀파의 주파수, 진행각도의 함수로 표현할 수 있다.^[5]

3. 간섭 현상

파동은 서로 다른 경로를 진행하다가 동시각에 한 지점에 도달하면 각 진행파의 위상차에 따라 진폭의 증첩에 의해 상쇄 혹은 보강 간섭이 일어난다. 이러한 파동의 간섭현상을 스핀파에서 직접 관찰하기 위해 영의 간섭실험과 유사한 모델 자성구조체를 구성하여 전산모사를 수행하였다.^[6] Fig. 5(a)와 같이 나노 크기의 자기디스크 박막에 Y 형태의 두 부분으로 갈라지는 도파로를 두면 원통형 자성박막으로부터 발생한 스핀파가 두 갈래길로 나뉘어 진행한다. Y 형태의 도파로에 의해 나뉘어 진행한 스핀파는 서로 다른 두 지점(P1, P2)에서 회절되어 π 형태의 자성박막 영역에서 위치에 따라 다른 위상을 가지므로 상쇄 혹은 보강간섭을 보인다(Fig. 5(b)). 스핀파의 간섭 현상은 스핀파 기반의 정보논리연산을 작동하기 위해 매우 중요한 특성이다.

파동인자 제어

앞에서 살펴본 바와 같이 스핀파 역시 일반적 파동 특성인 전파, 반사, 굴절, 회절, 간섭 현상이 잘 일어남을 알 수 있

REFERENCES

- [3] S. Choi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 087205 (2007).
- [4] S.-K. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 212501 (2008).
- [5] D.-E. Jeong *et al.*, arXiv:physics/0901.1700 (2009).
- [6] S. Choi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **89**, 062501 (2006).

Fig. 5. (a) Py thin-film model geometry and lateral dimensions for micromagnetic simulation study of spin-wave interference. The colors represent the in-plane orientations of the local magnetizations at equilibrium in the given geometry under zero magnetic field, as indicated by the colored wheel in the top left-hand corner. (b) Local M_z/M_s snapshot image taken at $t = 0.67$ ns, illustrating interference pattern of spin waves diffracted from two openings marked by P_2 . Reproduced from [6] copyright 2006, American Institute of Physics.

다. 이러한 스핀파의 파동 거동을 이해하고 진폭, 위상, 진행 방향, 파장 등 파동 인자를 제어할 수 있다면 스핀파 기반의 차세대 연산소자 개념을 개발할 수 있을 것이다. 일례로 최근 광소자 분야에서는 굴절률이 다른 유전체를 마이크론 크기의 규칙적 배열을 통해 광자의 진행방향 및 밴드갭(band gap)을 변화시킬 수 있는 광결정(photonic crystal) 제작에 많은 관심이 쏠리고 있다.^[7] 스핀파 분야에서도 스핀파의 파동인자 제어기술 개발에 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[8,9] 특히 스핀파의 주파수, 파장 등 파동인자를 제어하기 위해 자성 물질의 구조를 주기적으로 배열함으로써 스핀파의 분산 관계 변화 및 밴드갭을 제어하는 마그논 결정에 큰 관심을 보이고 있다. 이러한 마그논 결정의 대부분은 자성체로 이루어진 주기적(matrix)에 이종의 자성물질을 주기적으로 도핑(doping)하는 방식으로 도핑 물질의 종류 및 배열을 바꿈으로써 스핀파의 밴드갭을 제어한다. 하지만 이와 같은 방법은 이종의 자성 물질들을 주기적으로 배열하기 때문에 패터닝 공정상 제조가 쉽지 않다. 또한 이종 물질이 이루는 계면은 원자스케일에서 매우 거칠어 파동인자제어에 걸림돌이 되고 있다.

뿐만 아니라 형성되는 밴드갭 폭이 매우 좁아 다양한 주파수대 제어에 제한이 있다. 따라서 공정상 제작이 간단하고 한 물질의 자성 나노 구조체로 구성된 마그논 결정 제작에 관심

Fig. 6. (a) Geometry and dimensions of proposed nanostrip magnonic crystals with periodic modulation of different strip widths. The initial magnetizations point in the $-x$ direction, as indicated by the black arrow. The inset indicates the unit period of $P = P_1 + P_2$, where P_1 and P_2 are the segment lengths of 24 and 30 nm widths, respectively. (b) Planar structures of serially connected width-modulated nanostrips and frequency spectra of propagating spin waves along x axis at $y = 15$ nm path in corresponding magnonic crystal waveguides, and FFT power profiles versus x for indicated frequencies. Reproduced from [10,11] copyright 2009, American Physical Society and American Institute of Physics.

이 집중되고 있다. 한 예로 본 연구단은 단일 퍼말로이 자성체로 이루어진 도파로에 너비를 주기적으로 변화시켜 마그논 결정을 구성하여^[10] 전산모사를 통해 너비 주기 및 너비 차이에 따른 밴드갭의 변화를 관찰하였다. 그 결과 일정한 도파로 너비에서 진행되는 스핀파와 달리 너비가 다른 도파로를 진행하는 스핀파는 그 분산관계가 확연한 차이를 보였고, 특정 주파수 영역대의 넓은 밴드갭이 형성됨을 알 수 있었다. 또한 밴드갭 폭 및 위치가 도파로의 주기적 구조에 따라 변화하여 이를 통해 밴드갭 주파수대를 수월하게 조절 가능하다. 이런 다양한 밴드갭의 형성은 너비에 따른 스핀파 모드간의 상호작용에 기인하며, 서로 다른 주파수대의 밴드갭은 특정 모드간의 간섭 현상에 의한 것이다.^[10] Fig. 6(b)는 다양한 너비변화를 가진 마그논 결정에 스핀파를 주입하여 진행되는 스핀

REFERENCES

- [7] J. D. Joannopoulos *et al.*, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, 2nd ed. (Princeton, Princeton University, 2008).
- [8] R. Hertel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 257202 (2004).
- [9] M. Krawczyk *et al.*, *Phys. Rev. B* **77**, 054437 (2008).
- [10] K.-S. Lee *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 127202 (2009).

Fig. 7. (a) Perspective- and in-plane-view illustrations of spin-wave interferometer, composed of Py bifurcated nanowire waveguide of 30 nm width and 10 nm thickness and conducting wire of 270 nm diameter. The left and right ends of the waveguide indicate the source and detector functions of spin waves, respectively. The colors in the plane view indicate the local in-plane magnetization orientations. (b) NOT logical operation based on spin wave interferometer. The snapshot in-plane images display the out-of-plane magnetizations for $f = 18$ GHz at time $t = 1.5$ ns for the two different cases $J = 0$ and 2.0×10^{11} A/m², which correspond to the "0" and "1" input signals, respectively. The in-phase constructive and out-of-phase destructive spin-wave interferences correspond to the "1" and "0" logical outputs, respectively. Reproduced from [12] copyright 2008, American Institute of Physics.

파를 관찰한 결과이다. 각 마그논 결정 구조에 따라 다른 주파수 영역대의 스핀파가 필터링되어 도파로 끝단에서 특정 주파수대(26 ~ 32 GHz)만 존재함을 알 수 있다. 이러한 결과는 다양한 너비 및 주기를 가진 마그논 결정을 조합하면 특정 주파수대의 스핀파를 필터링할 수 있는 구조체를 쉽게 제작 가능함을 보여준다.^[11]

논리연산 소자 개념

스핀파의 간섭현상 등 파동특성을 이용하여 신개념의 간섭계를 구성하고 이를 이용한 논리연산이 가능하다.^[12] 그 예로 기본적인 스핀파 간섭계를 소개하고자 한다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 나노자성체 도파로가 두 경로로 갈라지면서 스핀파는 서로 다른 경로를 동일한 위상, 진폭, 경로차를 가지며 진행한다. 이때 두 경로 사이에 도선을 두어 외부 전류를 흘려주면, 유도 자기장이 발생하고 스핀파가 지나가는 서로 다른 경로에 반대방향의 자기장이 형성된다.^[12] 이때 외부자기

장의 영향으로 주파수(f)-파동벡터(k) 간의 분산관계가 자기장의 방향 세기에 따라 수직 이동을 한다. 즉 주어진 주파수에 대한 파동벡터가 변하여 두 경로를 따라 진행되는 스핀파는 다른 위상을 가지게 된다. 두 경로가 다시 합쳐지는 지점에서 스핀파의 위상차에 의해 보강 및 소멸 간섭이 일어나고 스핀파의 진폭이 결정된다. 적절한 세기의 전류를 인가할 때 두 경로를 통과하는 스핀파의 위상차가 180도이면 출력단자(A)에서 중첩되는 스핀파는 소멸간섭을, 전류가 흐르지 않는 경우 위상차는 0도이므로 출력단자에서는 보강간섭을 보인다. 이와 같이 수직 도선에 흘려주는 전류를 입력신호로 출력단자의 스핀파 진폭을 출력신호로 이용하여, 도선에 전류가 흐르는 경우, 입력신호를 "1", 출력단자는 "0"을 출력하게 되고, 반대로 도선에 전류가 흐르지 않는 경우 (입력신호 "0") 출력단자는 "1"을 출력하게 되어 그림에서 보는 바와 같이 "NOT" 게이트 동작을 구현할 수 있다. 또한 전산모사를 통해 전류의 세기와 소멸간섭이 잘 나타나는 주파수 영역대를 계산할 수 있다. 주어진 구조체에서 18 GHz의 주파수를 지닌 스핀파가 전류를 흘리지 않을 때 보강간섭, 전류가 2×10^{11} A/m²일 때 소멸간섭을 나타냄을 알 수 있었다.^[12] 이러한 기본 NOT 게이트를 이용하여 다양한 조합을 하면 AND, NOR, NAND 게이트를 동작할 수 있으며 스핀파 기반의 다양한 논리연산이 가능해진다.^[12]

나오는 글

스핀파 기반의 새로운 정보처리기술을 개발하기 위해서 스핀파의 본질을 이해하고 나노자성구조체에서 스핀파의 특징적 거동을 이해해야 한다. 뿐만 아니라 이를 바탕으로 스핀파의 파장, 위상, 속도 등의 파동인자 제어기술이 개발되어야 한다. 이를 위해 최근에는 기존의 이론적 기초 연구를 탈피하여 전산모사 및 실험을 이용한 연구가 한창 진행 중이다. 특히 높은 시간 및 공간 분해능을 지닌 전산모사를 통해 기존의 실험으로 관찰할 수 없었던 물리 현상을 보다 쉽고 빠르게 연구할 수 있게 되었다. 본 원고에서는 전산모사를 통해 얻은 결과인 스핀파의 방사, 전파, 반사, 굴절, 간섭 등 파동의 기본 현상을 소개하였다. 또한 이를 바탕으로 스핀파 제어 기술 및 논리연산소자 구성 및 개념을 살펴보았다. 이를 바탕으로 더욱 많은 연구가 진행되어 스핀파 기반의 차세대 정보처리소자 개발을 기대해 본다.

REFERENCES

- [11] S.-K. Kim *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 082507 (2009).
- [12] K.-S. Lee *et al.*, J. Appl. Phys. **104**, 053909 (2008).