

## Effect of Magnetic Material on Electric Motors

Younghoon Jung and Jung-Pyo Hong\*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 4 June 2018, Received in final form 27 August 2018, Accepted 27 August 2018)

Development trends of electric motors including automotive applications are focusing at high-precision, high-efficiency, high-performance, small size, and light weight. In all electric machines, temperature rise has a main role in limitation of size and performance. The temperature rise changes the material characteristics used in the electric machines to deteriorate the performance and affect machine size. High performance, high-efficiency, and size reduction of the electric machines can be achieved by reduction of heat source. High-grade permanent magnet, rare-earth permanent magnet, and low-loss electric steel is able to reduce the heat source. This paper shows the influence of magnetic materials on the electric motors and the characteristics of the magnetic material required in electric motors.

**Keywords** : electric motors, heat source, magnetic material, permanent magnet, electric steel

### 전동기에 미치는 자성재료의 영향

정영훈 · 홍정표\*

한양대학교 자동차공학부, 서울시 성동구 왕십리로 222, 04763

(2018년 6월 4일 받음, 2018년 8월 27일 최종수정본 받음, 2018년 8월 27일 게재확정)

자동차용 전동기를 포함한 전동기의 최근 개발 동향은 고정밀, 고효율, 고성능, 경박단소화를 목표로 하고 있다. 모든 전기기기의 크기와 성능을 제한하는 주 요인이 온도상승이다. 온도상승이 전기기기의 성능을 저하시키고 크기에 영향을 준다. 전기기기에 열원을 줄일 수 있다면 고성능화, 고효율화, 사이즈 저감이 가능하다. 희토류 영구자석과 같은 고성능 영구자석과 저손실 전기강판을 사용하면 손실을 줄여 전기기기의 발열량을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 전동기에 미치는 자성재료의 영향과 전동기에서 요구하는 자성재료의 특성이 무엇인지를 보여준다.

**주제어** : 전동기, 열원, 자성재료, 영구자석, 전기강판

### I. 서 론

현재 전동기의 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 교통 및 수송, 국방, 건축, 항공 산업, 신재생 에너지, 일반 산업 등 우리 주변의 모든 움직임이 필요한 부분에 적용되고 있다.

차량용 어플리케이션의 경우, 기존에 유/공압 액츄에이터를 이용하던 시스템을 전동기를 이용한 시스템으로 바꾸면 차량 충돌 시에 발생하게 되는 오일 리크와 같은 환경오염으로부터 자유롭고, 시스템의 효율이 향상되어 연비향상이 가능하기 때문에 전동기를 이용하는 전장화가 자동차 개발의 큰 흐름

으로 자리잡고 있다[1,2].

차량용 전동기를 포함한 전동기의 최근 개발 동향은 고정밀, 고효율, 고성능, 경박단소화 되어가고 있으며, 이러한 목표를 달성하기 위한 가장 큰 장애물은 전동기의 열원으로 작용하는 손실이다. 전동기의 손실은 전동기의 열원으로 작용하기 때문에, 손실이 증가할수록 효율이 떨어지고 전동기의 온도가 상승하게 되어 전동기의 성능과 사이즈에 영향을 미친다. 모든 전기기기의 사이즈를 결정하는 가장 중요한 인자가 온도특성이라고 해도 과언이 아니다. 전동기에서 발생하는 손실은 권선에 전류가 흐를 때에 권선 저항에 비례하고 전류의 제곱에 비례하는 저항손실, 회전속도의 제곱에 비례하여 영구자석에서 발생하는 와전류손실 및 전기강판에서 발생하는 철손이 대표적이다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

\*Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0455,

Fax: +82-2-2220-4465, e-mail: hongjp@hanyang.ac.kr



Fig. 1. (Color online) Motor applications.

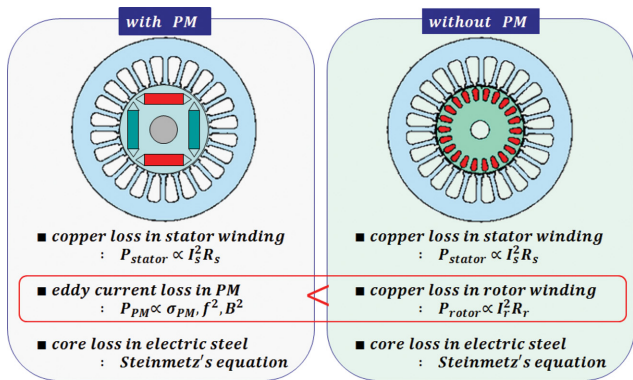


Fig. 2. (Color online) Heat source in electric motors.

고출력 강판을 사용함으로써 고속화, 소형화가 가능하다. 즉, 자성 재료가 전동기의 출력밀도, 효율 향상에 상당한 영향을 미치게 된다[3,4].

근래 많은 전동기들이 영구자석을 이용하고 있는 것은 Fig. 2에서 보는 것과 같이 권선에 전류를 흘려 자계를 만드는 것보다 영구자석을 이용하면 발열량을 줄일 수 있어 고효율, 소형화가 가능하기 때문이다.

본 논문에서는 자성 재료가 전동기의 성능에 미치는 영향과 전동기에서 요구하는 자성재료의 특성에 대해서 살펴볼 것이며, 이를 위해 전동기 성능과 온도의 관계, 자성재료와 전동기 성능의 관계에 대해 알아본다.

전동기의 손실을 저감하기 위해서는 저 손실 강판, 고성능 영구자석 등과 같은 자성 재료를 사용함으로써 해결할 수 있으며, 동시에 고효율화도 달성할 수 있다. 또한, 고포화 강판,

## II. 온도와 전동기 성능 간의 관계

에너지 변환기인 전동기와 발전기는 에너지변환 과정 중

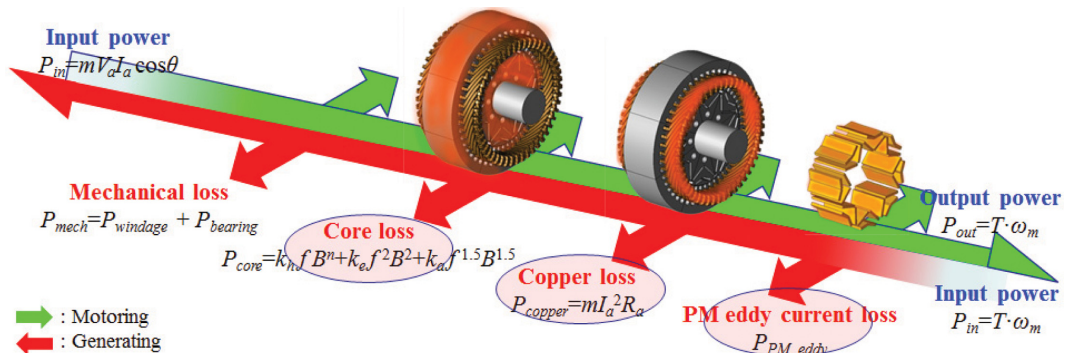


Fig. 3. (Color online) Loss in electric motor and generator.

에 다양한 손실이 발생한다[5]. Fig. 3은 전동기와 발전기의 에너지 변환 시에 발생하는 손실을 보여준다. 전동기와 발전기에서 발생하는 손실은 기계손, 철손, 동손이며 영구자석 기기의 경우에는 영구자석 와전류손이 추가된다. 이러한 손실들은 전동기의 열원으로 작용하여 전동기의 온도를 증가시킨다. 이러한 온도의 증가는 전동기의 성능에 영향을 미친다.

동손은 저항에 비례하며 저항은 도전율에 비례한다. 도체의 도전율은 온도가 증가함에 따라 감소하기 때문에 저항은 식(1)에서 볼 수 있듯이 온도가 증가함에 따라 증가한다.

$$R_{T_2} = R_{T_1} \times \{1 + c(T_2 - T_1)/100\} \quad (1)$$

즉, 온도가 상승하면 동일한 전류가 흐를 때에 권선저항이 증가하여 손실이 증가하게 되며 결과적으로 부가적인 온도상승의 요인으로 작용하게 된다.

또한 전동기의 중요한 기능부품인 영구자석의 잔류자속밀도( $B_r$ )와 보자력( $H_c$ )도 온도에 따라 변화한다. 식(2)에 온도에 따른 영구자석 잔류자속밀도를 나타내었다.

$$B_{r(T_2)} = B_{r(T_1)} \times [1 + \alpha(T_2 - T_1)/100] \quad (2)$$

온도계수( $\alpha$ )는 Nd계 희토류자석의 경우 약  $-0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 이며, 페라이트자석은  $-0.2\%/^{\circ}\text{C}$ 의 값을 갖고 있어 온도가 상승하면 잔류자속밀도가 떨어진다.

Fig. 4에 온도를 고려한 영구자석 전동기의 개략적인 속도-토크 특성곡선을 나타내었다. Fig. 4(a)는 온도가 증가해서 저항이 증가했을 때의 특성곡선으로 그림에서 볼 수 있듯이, 저항의 증가로 인해 전동기의 최대 토크가 감소하고, 동일한 부하( $T_1$ )에 대응하는 회전속도가  $\omega_1$ 에서  $\omega_2$ 로 감소하여 출력이 저하하게 된다.

Fig. 4(b)는 영구자석 잔류자속밀도가 감소했을 때의 전동기의 성능으로서, 동일한 부하에서 입력 전류가  $I_1$ 에서  $I_2$  증가하게 되며, 최대 토크가 감소한다. 이와 같이 온도에 의한 전동기의 성능변화를 줄이고 특성향상을 위해서는 저손실 강

판, 고성능 영구자석 등의 자성재료를 사용함으로써 전동기의 손실을 줄여야 한다.

### III. 전동기 성능과 자성재료의 관계

앞서 말했듯이, 최근 전동기의 개발 동향은 고정밀, 고효율, 고성능, 경박단소화를 목표로 하고 있으며, 이를 위해서는 자기회로 설계 기술, 전력전자, 도전, 절연, 자성 재료, 제조기술을 필요로 한다. 여기서, 전기기기를 구성하고 있는 재료는 도전재료와 자성재료 및 절연재료로 나눌 수 있다.

도전재료는 전기기기에 전류를 전달하는 경로 역할을 하며, 전기기기의 저항을 결정한다. 또한, 자성재료는 전기기기의 자기회로를 구성하여, 자기에너지의 전달 경로 역할을 수행하며, 이를 통해 전기기기의 대표 성능인 역기전력( $E$ )이 결정된다. 역기전력이란 자계 내에 놓인 도체가 어느 속도( $v$ )로 움직이면 속도와 자속밀도( $B$ )의 곱에 비례하여 도선에 유도되는 전압으로서 역기전력과 입력전류의 곱이 전기기기의 출력( $P_{elec} = E \times I$ )이기 때문에 손실을 줄이면서 높은출력을 얻기 위해서는 고성능 자성재료의 이용이 필수적이다.

전기기기의 개발 동향과 관련된 자성 재료 관련 기술을 Fig. 5에 나타내었다. 고효율을 위한 영구자석 및 저 손실 강판의 활용, 소형화/경량화를 위한 고성능 영구자석 및 고 포화 강판의 활용, 고속 어플리케이션을 위한 저 손실 강판 및 고 장력 강판의 활용이 그 예이다[6,7].

앞서 설명한 바와 같이, 전기기기의 성능은 전류와 유기전압의 곱으로 결정되며, 각 요소들의 비율은 기기의 성능, 구조, 가격에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나, 전기강판과 같은 강자성체는 비선형 자기포화특성을 갖고 있다[8]. 따라서, 이러한 한계를 극복하기 위해 자성재료의 손실을 최소화 하는 초전도 전력기기가 연구 및 활용되고 있다. 초전도 기술은 고속제어성, 소형화, 고효율성 등 전력계통에 이바지하는 기술로 각광을 받고 있어 국내외에서 활발하게 연구개발이 진행되고 있다[9].

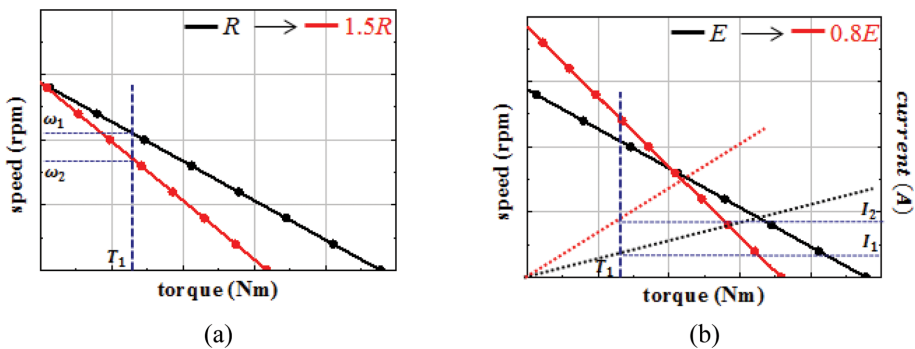


Fig. 4. (Color online) (a) Speed-Torque curve according to resistance. (b) Speed-Torque curve according to residual induction.

Trend	재료 관련 기술	효과	Remarks
고전압	- 절연재료	- 권선 절적을 향상	- 스위칭 소자 전류용량 저감 - 인버터 손실 저감 - booster 필요
고효율	- 도전재료 - 절연재료 - 자성재료 영구자석 저 손실 강판	- 동손 저감 - 권선 절적을 향상 - 동손 저감 - 철손 저감	- 동 다이캐스팅 (IM) - Nd 마그네트 대체 안 - 생산성 / 작업성
소형화 / 경량화	- 자성재료 고성능 영구자석 고 포화 강판 - 경량 소재	- TRV 증가 - 공극자속밀도 향상 - 출력밀도 향상...	- 저 철손 요구 - 마그네슘...
고속	- 자성재료 저 손실 강판 고장력 강판	- 철손 저감 - 누설자속 감소	- 온도상승 억제 - 효율 / 역률 향상

Fig. 5. (Color online) Relationship between motor development trend and magnetic material.

1. 영구자석 잔류자속밀도와 전동기 체적의 관계

영구자석은 자계를 발생시키는 자성재료로 크게 희토류 계열의 영구자석과 산화철을 이용한 페라이트 계열의 영구자석으로 나눌 수가 있다. 희토류 계열의 영구자석은 잔류 자속 밀도와 보자력이 높아 자석의 성능이 뛰어나지만 재료의 공급이 국한되어 있고, 가격이 비싸다는 단점이 있다. 반면 비희토류 계열의 영구자석은 희토류 계열의 자석보다 자석의 성능이 낮지만 재료가 구하기 쉽고 가격 경쟁력이 우수하다.

희토류 계열의 영구자석은 비희토류 계열의 영구자석보다 잔류 자속 밀도가 높기 때문에 적은 자석사용량으로 동일한 자속을 발생시킬 수 있다. 따라서, 희토류 계열의 영구자석을 전동기에 적용함으로써 전동기의 소형화와 고출력화를 달성할 수 있다. Fig. 6은 전동기의 전기장하와 출력이 동일할 때, 잔류자속밀도에 따른 영구자석의 부피와 전동기의 부피를 보여준다.

Fig. 7은 희토류 재료 생산 국가와 년도에 따른 희토류 재료의 가격 변동 추이를 정리한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯

이, 희토류 재료의 대부분이 중국에서 생산하고 있으며 희토류 재료의 가격은 2011년 7월에 급격히 상승하고 그 이후 안정세로 돌아왔으나 현재도 공급 불안정으로 인해 높은 가격을 유지하고 있다. 이러한 희토류 재료의 공급 불안정으로 인해 희토류를 쓰지 않는 탈희토류 전동기에 대한 연구가 매우 중요한 이슈가 되고 있다[10-14]. 대표적인 비희토류 영구자석인 페라이트 영구자석의 경우, 잔류자속밀도가 희토류 영구자석에 비해 1/3 수준으로, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 잔류자속밀도가 작을수록 동일한 출력을 내기 위해서 전동기의 부피가 증가하기 때문에 소형 경량화에 한계가 있다.

2. 전기강판과 전동기 체적의 관계

전기강판은 전동기에서 자기회로를 구성하는 자성재료로 규소 함유량에 따라 전기 강판의 특성이 결정 된다. 전기강판은 비투자율이 클수록 동일 기자력에서 큰 자속을 발생시키기 때문에 전기장하와 출력이 동일하다면 전기강판의 비투자율이 클수록 전동기 체적이 감소한다. Fig. 8은 전동기의 출

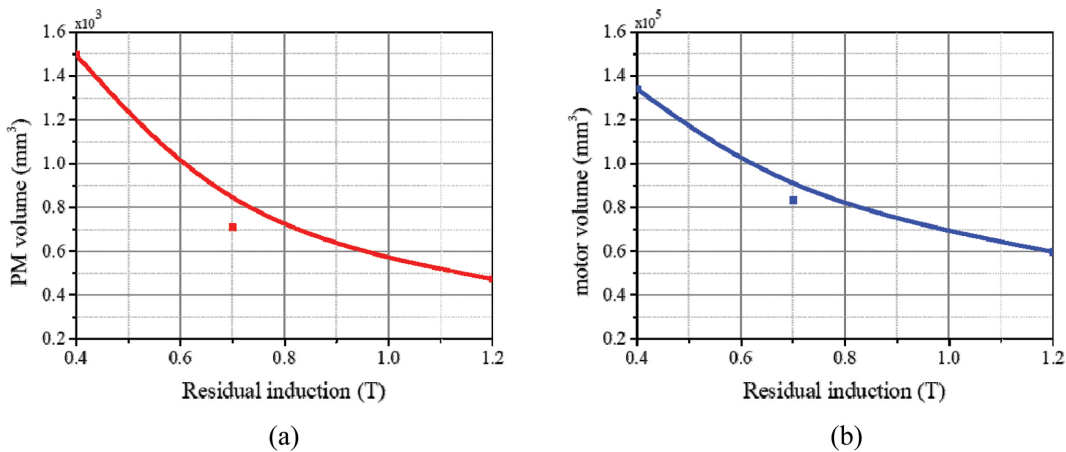


Fig. 6. (Color online) (a) PM volume according to residual induction. (b) Motor volume according to residual induction.

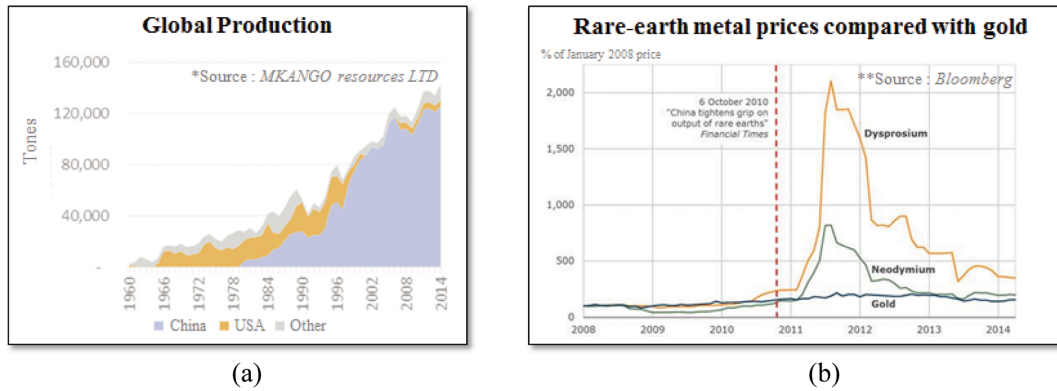


Fig. 7. (Color online) (a) Global production of rare-earth metal. (b) Rare-earth metal price.

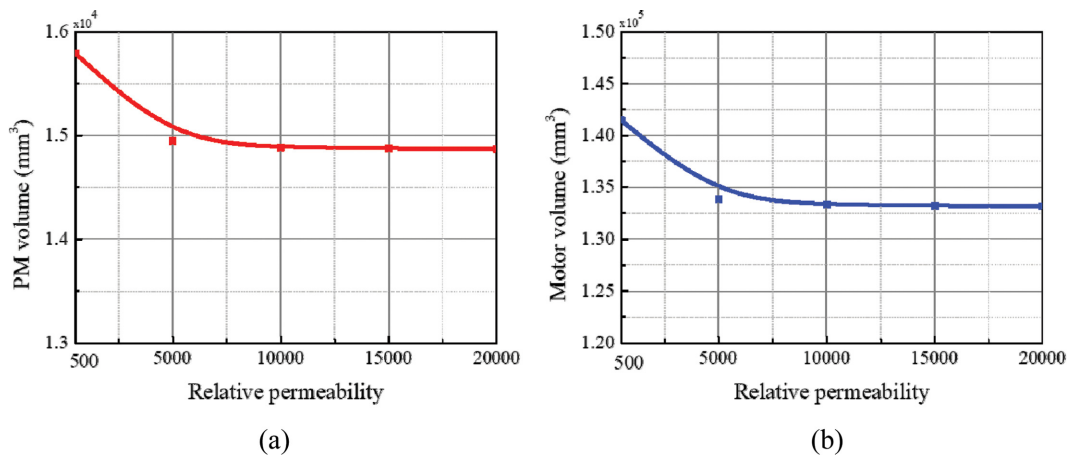


Fig. 8. (Color online) (a) PM volume according to relative permeability. (b) Motor volume according to relative permeability.

력이 동일할 때, 전기강판의 비투자율에 따른 영구자석과 전동기의 부피를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 전기강판의 투자율이 작으면 철심에서의 기자력 손실이 증가하기 때문에, 동일한 성능을 만족하기 위한 전동기의 체적이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 소형화를 위해서 비투자율이 큰 전기강판이 필요하다[15-17].

#### IV. 결 론

본 논문에서는 전동기 성능에 자성재료가 미치는 영향과 전동기에서 필요로 하는 자성재료의 특성에 대해서 살펴보았다. 이를 위해 온도와 전동기 성능의 관계와 자성재료와 전동기 성능의 관계에 대해 서술했다. 자성재료와 도전 재료의 특성 향상은 전동기의 성능 향상과 소형화에 필수적이다.

결론적으로, 최근 전동기의 개발 동향인 고효율, 고품질, 소형화를 만족하기 위해서는 저손실 전기강판의 개발과 고성능 영구자석의 개발이 필요하며 신재료의 개발에 맞추어 그 특성에 맞는 적용분야를 선택해야 한다.

#### References

- [1] B. Lequesne, IEEE Trans. Transp. Electrification **1**, 40 (2015).
- [2] D. Tan, IEEE Power Electron. Mag. **3**, 50 (2016).
- [3] D. Y. Kim, M. R. Park, J. H. Sim, and J. P. Hong, IEEE/ASME Trans. Mechatron. **47**, 1554 (2017).
- [4] M. R. Park, H. J. Kim, Y. Y. Choi, J. J. Lee, and J. P. Hong, IEEE Trans. Magn. **52**, 1 (2016).
- [5] B. H. Lee, K. S. Kim, J. W. Jung, J. P. Hong, and Y. K. Kim, IEEE Trans. Magn. **48**, 2949 (2012).
- [6] M. S. Lim, S. H. Chai, J. S. Yang, and J. P. Hong, IEEE Trans. Ind. Electron. **62**, 7827 (2015).
- [7] S. H. Lee, Y. J. Kim, K. S. Lee, and S. J. Kim, J. Magn. **20**, 444 (2015).
- [8] S. H. Chai, J. H. Kim, S. I. Kim, and J. P. Hong, J. Magn. **20**, 258 (2015).
- [9] J. S. Jeong, D. K. An, and J. P. Hong, IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 1 (2017).
- [10] M. H. Yoon, D. Y. Kim, S. I. Kim, and J. P. Hong, J. Magn. **20**, 387 (2015).
- [11] C. S. Lee, J. H. Kim, and J. P. Hong, J. Magn. **20**, 148 (2015).

- [12] K. W. Jeon, Y. J. Kim, and S. Y. Jung, *J. Magn.* **18**, 212 (2013).
- [13] C. López-Torres, A. Garcia Espinosa, J. Riba, and L. Romeral, *IEEE Trans. Veh. Technol.* **67**, 196 (2018).
- [14] S. S. R. Bonthu, A. Arafat, and S. Choi, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **64**, 9729 (2017).
- [15] C. Liu, H. Chung, and S. Lin, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **53**, 2569 (2017).
- [16] S. Ueno, M. Enokizono, Y. Mori, and K. Yamazaki, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 1 (2017).
- [17] H. Toda, Y. Oda, M. Kohno, M. Ishida, and Y. Zaizen, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 3060 (2012).