

Study on Eddy Current Signals Measured Using Coil Sensor and PHR Sensors

Dong Young Kim* and Seok Soo Yoon

Department of Physics, Andong National University, Andong 36729, Korea

Cheong Worl Kim

Department of Electronic Engineering Education, Andong National University, Andong 36729, Korea

(Received 30 July 2020, Received in final form 24 August 2020, Accepted 24 August 2020)

We used coil sensor and PHR sensor in order to measure the amplitude and phase of eddy current signals induced by flaws. The amplitude and phase of eddy current signals were propositional to depth of flaws in both sensor. The phase of eddy current signals measured by PHR sensor were more larger than that measured by coil sensor. The benefits of tiny PHR sensor compared with coil sensor were high spatial resolution as well as very high flaw detection capability at low frequency.

Keywords : eddy current, flaw, skin depth, coil sensor, planar Hall resistance sensor

코일 센서와 평면홀 저항 센서로 측정된 와전류 신호 연구

김동영* · 윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

김청월

안동대학교 전자공학교육과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2020년 7월 30일 받음, 2020년 8월 24일 최종수정본 받음, 2020년 8월 24일 게재확정)

코일 센서와 평면홀 저항 센서를 사용하여 결함에 의해 유도된 와전류 신호의 크기와 위상을 측정하였다. 와전류 신호의 크기와 위상은 두 센서 모두 결함의 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다. 결함에 의한 와전류 신호의 위상은 코일 센서보다 평면홀 저항 센서에서 크게 나타났다. 초소형으로 제작한 평면홀 저항 센서는 결함을 검출하는 공간 분해능이 우수할 뿐만 아니라 저주파수에서 결함 검출 성능이 코일 센서보다 매우 우수하였다.

주제어 : 와전류, 결함, 투과 깊이, 코일 센서, 평면홀 저항 센서

I. 서 론

와전류를 이용한 와전류 비파괴 검사장치(eddy current testing, ECT)는 금속 재료의 표면에 존재하는 결함을 검출하기 위하여 널리 활용되고 있는 방법의 하나이다[1,2]. 전자기 유도 법칙을 이용하는 와전류(eddy current) 검사는 금속 표면이나 내부의 결함 검사, 금속의 두께 측정, 전기전도도 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[3]. 금속 재료에 교류 자기장

을 인가하면 금속 재료 내부에서 와전류가 생기며, 재료 내부의 결함은 와전류의 흐름을 방해하여 와전류를 왜곡시킨다. 왜곡된 와전류가 생성한 왜곡 자기장을 측정하여 결함을 탐지한다. 코일을 사용하는 와전류 검사장치는 교류 자기장을 발생시키는 여기 코일(excitation coil)과 결함으로부터 발생하는 와전류의 왜곡에 의한 자기장 신호를 탐지하는 센서 코일(sensing coil)로 구성된다.

금속 재료에서 와전류의 침투 깊이(skin depth, δ)는 다음과 같이 표현된다[3].

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \mu \sigma f}} \quad (1)$$

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-54-820-5445,

Fax: +82-54-823-1628, e-mail: dykim@andong.ac.kr

여기서 σ 는 재료의 전기전도도이고, f 는 교류 자기장의 주파수이며, μ 는 투자율이다. 식(1)로부터 와전류의 침투 깊이는 주파수뿐만 아니라 재료의 투자율과 전기전도도에 반비례한다. 주파수가 높을수록 침투 깊이가 얇고 주파수가 낮을수록 침투 깊이가 깊어진다. 따라서 두꺼운 금속 또는 투자율이 높은 재료의 내부 결함을 검출하기 위하여 저주파수 사용이 요구된다. 그러나 전자기 유도 법칙을 이용하는 코일 센서의 출력은 주파수에 비례하므로 저주파수로 갈수록 출력 신호가 작아지는 단점이 있다. 따라서 와전류 검사장치는 1 kHz~3 MHz의 주파수를 사용하여 시편의 표면 결함이나 표면 근처의 내부 결함 검출에 이용되고 있다.

자기저항(magnetoresistance, MR) 센서는 코일 센서의 저주파수 단점을 보완할 수 있는 자기장 센서이다. 자기저항 센서의 출력은 주파수 의존성이 없으므로 저주파수 사용이 가능하며[4-10], 마이크로 크기로 제조할 수 있으므로 결함의 공간 분해능을 향상할 수 있는 장점이 있다[11]. 자기저항 센서를 와전류 검사장치에 응용하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 자기저항 센서를 비파괴 검사에 적용하기 위한 연구가 미진하다.

본 연구에서는 코일 센서와 평면홀 저항(Planar Hall Resistance, PHR) 센서를 사용하여 결함에 의해 유도된 와전류 신호의 크기와 위상을 측정하였으며, 이들 두 센서의 결함 검출 성능을 비교 분석하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 결함을 가공한 시험 시편을 사용하여 결함에 의해 유도된 와전류 신호의 크기와 위상을 측정하였다. Fig. 1에서 보인 것과 같이 결함을 가공한 시험 시편은 길이가 30 cm, 폭이 5 cm, 두께가 7 mm인 기계구조용 탄소강(SM20C)에 폭이 0.25 mm이고 깊이가 서로 다른 다섯 가지의 직선결함을 가공하였다. 직선결함 #1, #2, #3, #4, #5의 깊이는 각각 1.25, 1.00, 0.75, 0.50, 0.25 mm로 가공하였다. 교류 자기장을 발생시키는 여기 코일과 와전류 신호를 측정

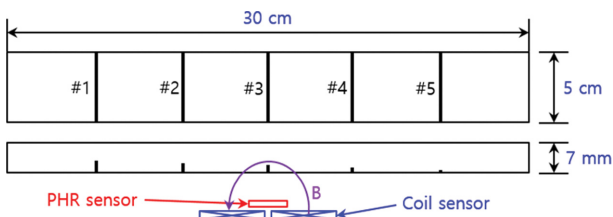


Fig. 1. (Color online) Test specimen with line flaws #1, #2, #3, #4 and #5, which were 0.25 mm width and 1.25, 1, 0.75, 0.5, 0.25 mm depth, respectively. The coil sensor and PHR sensor were located under the test specimen.

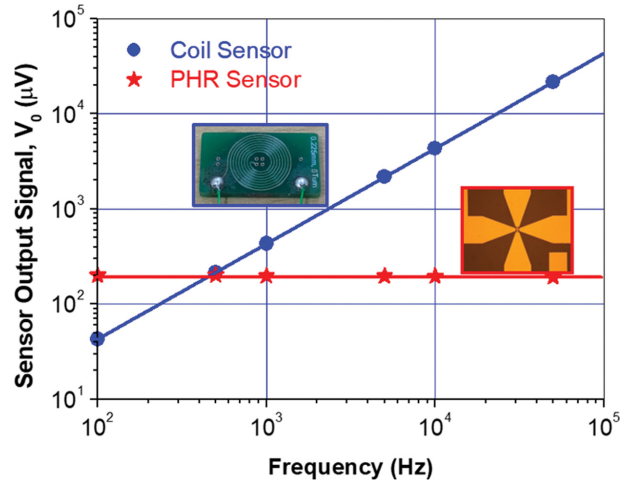


Fig. 2. (Color online) Sensor output signals V_0 measured by coil sensor and PHR sensor, respectively. The inset photographs showed the shape of coil sensor and PHR sensor, respectively.

하는 코일 센서와 PHR 센서는 Fig. 1과 같이 시험 시편의 중앙에서 1 mm 아래에 고정하였다. 이때 여기 코일과 코일 센서는 서로 나란하게 배치하였으며, PHR 센서는 여기 코일과 센서 코일 위에 배치하였다. 여기 코일은 코일 표면에서 약 20 Oe의 교류 자기장을 발생하였다.

여기 코일과 코일 센서는 Fig. 2에 삽입한 사진과 같이 크기가 1 cm이고 감은 수가 80인 같은 모양의 코일을 사용하였다. PHR 센서는 Fig. 2에 삽입한 현미경 사진과 같이 광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 $20 \times 100 \mu\text{m}^2$ 의 크기로 제작하였다. 코일 센서와 PHR 센서의 교류 자기장에 대한 출력 신호 V_0 (시험 시편이 없는 경우)와 와전류 신호의 크기 V_{EC} (시험 시편이 있고, 오프셋 신호를 제거한 경우) 및 위상 θ_{EC} 는 Lock-in amplifier(SR830)를 사용하여 100 Hz~50 kHz의 주파수 범위에서 측정하였다.

교류 자기장 B 에 의하여 코일에 유도되는 출력 신호 V_0^{Coil} 은 다음과 같다[5].

$$V_0^{Coil} = 2\pi N A f B \tag{2}$$

여기서 N 은 코일의 감은 수, A 는 코일의 단면적, f 는 주파수이다. 여기 코일로 교류 자기장을 인가하고, 코일 센서로 측정된 출력 신호 V_0^{Coil} 은 Fig. 2에서 보인 것과 같이 주파수에 비례하는 특성을 보였으며, 측정 범위 50 kHz까지 식(2)을 만족하였다.

교류 자기장 B 에 의한 PHR 센서의 출력 신호 V_0^{PHR} 은 다음과 같다[12].

$$V_0^{PHR} = S B \tag{3}$$

여기서 S 는 PHR 센서의 자기장 민감도이다. 여기 코일로 교

류 자기장을 인가하고, PHR 센서로 측정된 출력 신호 V_0^{PHR} 은 Fig. 2에서 보인 것과 같이 주파수에 따라 일정한 특성을 보였으며, 측정 범위 50 kHz까지 식(3)을 만족하였다. 측정 범위 50 kHz까지 선형성을 만족하는 코일 센서와 PHR 센서를 사용하여 결함에 의하여 유도된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 와 위상 θ_{EC} 를 동시에 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

코일 센서와 PHR 센서의 결함 검출 성능을 비교하기 위하여 깊이가 다른 결함 #n (#1, #2, #3, #4, #5)에 대하여 와전류 신호의 크기 V_{EC} 와 위상 θ_{EC} 를 1 kHz의 주파수에서 각각 측정하였다.

Fig. 3(a)는 코일 센서로 측정된 결함의 #n(결함의 깊이)에 따른 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{Coil} 와 위상 θ_{EC}^{Coil} 를 각각 나타낸 것이다. Fig. 3(b)는 PHR 센서로 측정된 결함의 #n에 따른 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{PHR} 와 위상 θ_{EC}^{PHR} 를 각각 나타낸 것이다. 두 센서 모두 결함 #n에 의한 와전류 신호의 검출이 가능하였으며, 와전류 신호의 크기와 위상은 결함의 깊이에 비례하는 특성을 보였다. 결함에 의한 와전류 신호의 위상 변화는 PHR 센서로 측정된 경우가 코일 센서로 측정된 경우보다 크게 나타났다($\theta_{EC}^{PHR} > \theta_{EC}^{Coil}$). 또한, PHR 센서로 측정할 경우 결함 #n에 대한 와전류 신호의 위상 θ_{EC}^{PHR} 는 크기 V_{EC}^{PHR} 보다 뚜렷이 구분되어 나타났다.

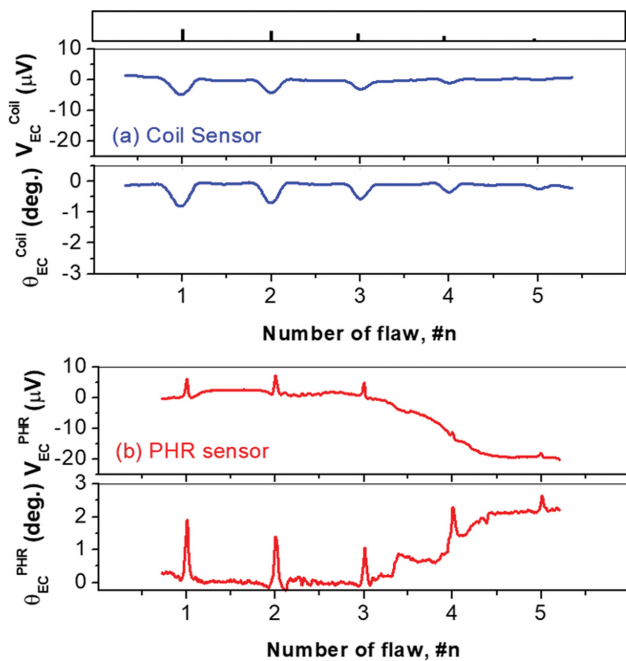


Fig. 3. (Color online) Eddy current signals amplitude V_{EC} and phase θ_{EC} detected by coil sensor and PHR sensor, respectively.

코일 센서로 측정된 와전류 신호는 시험 시편의 위치에 따라 배경 신호의 크기와 위상이 거의 일정한 상태를 보였으며, 결함 #1~5의 위치에서 두드러지게 나타났다. 그러나 PHR 센서로 측정된 와전류 신호는 시험 시편의 위치에 따라 배경 신호의 크기와 위상이 크게 변하는 특성을 보였다. 이는 시험 시편으로 사용한 기계구조용 탄소강(SM20C)이 강자성체이므로 시편의 위치에 따른 자화 특성 변화 때문으로 해석된다. 시험 시편의 위치에 따른 자화 변화는 직류 자기장을 형성하므로 코일 센서로는 측정할 수 없으나 PHR 센서는 측정할 수 있다. 따라서 PHR 센서로 측정된 와전류 신호는 시험 시편의 위치에 따른 자화 특성과 결함에 의한 신호가 함께 측정되었음을 알 수 있다. 이렇듯 PHR 센서는 교류 자기장에 의한 와전류 신호의 검출뿐만 아니라 시험 시편에 분포하는 불균일한 자화 특성을 함께 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 Fig. 3(b)에서 보인 것과 같이 불균일한 자화 변화는 결함 신호보다 크게 나타났으며, 불균일한 자화 변화에 의한 신호를 상쇄하고 결함 신호만 검출하기 위해서는 이중 PHR 센서가 필요하다.

Fig. 4는 코일 센서와 PHR 센서의 공간 분해능을 비교하기 위하여 결함 #2 부근에서 $f=1$ kHz 주파수의 와전류 신호를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 와전류 신호로 측정된 결함 신호의 공간 분해능은 PHR 센서가 코일 센서보다 약 3 배 우수함을 알 수 있었다. 이러한 차이는 센서의 크기에 기인하며[11], 초소형 제작이 가능한 PHR 센서가 갖는 장점으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 코일 센서와 PHR 센서의 주파수 의존성을 비교하기 위하여 Fig. 4에서 보인 결함 #2에 의한 와전류 신호의 크기를 주파수에 따라 측정된 결과를 나타낸 것이다. 코일 센

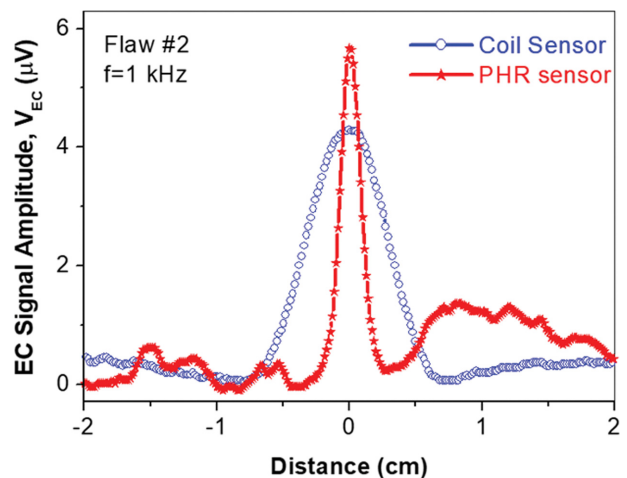


Fig. 4. (Color online) Eddy current signals amplitude V_{EC} of flaw #2 detected by coil sensor and PHR sensor at 1 kHz exciting frequency, respectively.

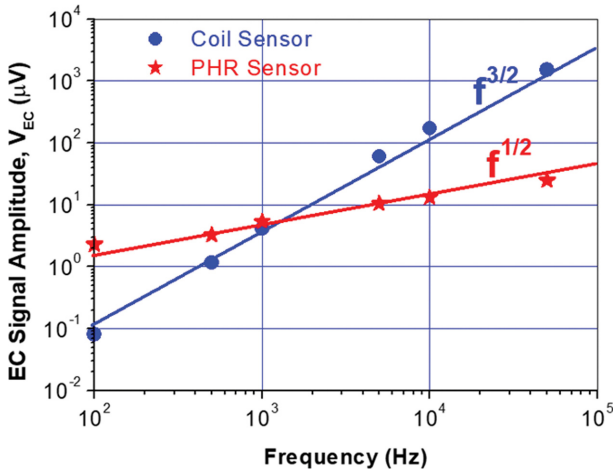


Fig. 5. (Color online) Frequency dependence of eddy current signals amplitude V_{EC} of flaw #2 detected by coil sensor and PHR sensor, respectively.

서로 측정된 결함 신호의 크기는 주파수에 따라서 $f^{3/2}$ 에 비례하였으며, PHR 센서로 측정된 결함 신호의 크기는 주파수에 따라서 $f^{1/2}$ 에 비례하는 특성을 보였다. 이러한 결함 신호의 크기에 대한 주파수 의존성은 와전류의 투과 깊이를 나타내는 식(1)과 센서의 자기장 측정 성능을 나타내는 식(2)와 (3)을 이용하여 비교 분석하였다.

금속 시편의 표면에 인가한 교류 자기장은 시편 표면에 와전류를 형성하며, 와전류에 의한 자기장은 자기장 센서로 검출된다. 센서로 측정된 와전류 신호는 주파수가 증가함에 따라 증가한다. 시편 표면에 존재하는 결함은 금속 재료 표면에 형성된 와전류를 왜곡하고, 와전류 왜곡에 의한 자기장을 자기장 센서를 사용하여 측정함으로써 시편 표면에 존재하는 결함을 검출하며, 결함에 의한 와전류 신호는 주파수가 증가함에 따라 증가한다. 이때 주파수가 감소하면 반대로 재료의 투과 깊이가 증가하여 와전류 신호는 감소하며, 와전류의 왜곡에 의한 결함 신호도 감소한다. 따라서 결함에 의해 왜곡된 와전류가 만드는 자기장 B_{flaw} 역시 투과 깊이에 반비례한다[3].

$$B_{flaw} \propto 1/\delta = \sqrt{\pi\sigma\mu f} \tag{4}$$

자기장을 측정하는 코일 센서와 PHR 센서는 식(4)의 결함에 의해 왜곡된 와전류가 만드는 자기장 B_{flaw} 를 측정하여 금속 시편에 존재하는 결함을 탐지한다. 그러므로 자기장 센서를 이용하여 B_{flaw} 를 측정하는 경우 와전류 신호는 센서의 출력 신호 특성에 의존한다.

자기장 센서로 코일 센서를 사용하는 경우 코일 센서의 출력 신호는 식(2)에 나타난 것과 같다. 그러므로 결함에 의한 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{Coil} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{EC}^{Coil} \propto 2\pi NfAB_{flaw} \tag{5}$$

$$\propto f^{3/2}$$

식(5)로부터 코일 센서를 이용하여 측정된 결함에 의한 와전류 신호는 코일 센서의 주파수 의존성과 결함에 의한 자기장 신호 B_{flaw} 의 주파수 의존성의 곱에 비례한다. 코일 센서의 주파수 의존성인 f 와 결함에 의한 자기장 신호 B_{flaw} 의 주파수 의존성인 $f^{1/2}$ 의 곱인 $f^{3/2}$ 에 비례하는 특성을 갖는다. 이러한 특성은 Fig. 5에서 보인 것과 같이 코일 센서로 측정된 결함에 의한 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{Coil} 는 식(5)의 주파수 의존성과 일치하였다.

한편, 자기장 센서로 PHR 센서를 사용하는 경우 PHR 센서의 출력 신호는 식(3)에 나타난 것과 같다. 그러므로 결함에 의한 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{PHR} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{EC}^{PHR} \propto SB_{flaw} \tag{6}$$

$$\propto f^{1/2}$$

PHR 센서는 주파수 의존성이 없으므로 결함에 의한 자기장 신호 B_{flaw} 의 주파수 의존성인 $f^{1/2}$ 에 비례하는 특성을 갖는다. 이러한 특성은 Fig. 5에서 보인 것과 같이 PHR 센서로 측정된 결함에 의한 와전류 신호의 크기 V_{EC}^{PHR} 는 식(6)의 주파수 의존성과 일치하였다.

코일 센서와 PHR 센서 모두 주파수가 증가함에 따라 결함에 의한 와전류 신호는 증가하였다. 그러나 센서의 자기장 측정 원리에 따라 결함에 의한 와전류 신호의 주파수 의존성이 달라졌다. Fig. 5에서 보인 것과 같이 고주파수에서는 코일 센서가 결함을 탐지하는 성능이 우수하였다. 한편, 저주파수에서는 PHR 센서가 결함을 탐지하는 성능이 우수함을 알 수 있었다. 따라서 금속 시편의 표면 근처에 존재하는 결함 검출은 코일 센서가 유리하였다. 하지만, 금속 표면 내부에 존재하는 결함 검출은 PHR 센서가 유리하므로 금속 시편 내부의 결함 검출을 위하여 PHR 센서가 유용하게 활용될 수 있기를 기대한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 센서의 종류에 따른 결함 검출 성능 비교하기 위하여 코일 센서와 PHR 센서를 사용하였으며, 결함을 가공한 시험 시편에서 결함에 의해 유도된 와전류 신호의 크기와 위상을 각각 측정하였다. 결함에 의한 와전류 신호의 크기와 위상은 두 센서 모두 결함의 깊이에 따라 증가하는 경향을 보였다. 특히, PHR 센서는 재료의 불균일한 자화 특성 측정 능력, 와전류 신호의 위상 검출 성능 및 결함의 공간

분해능 등이 코일 센서보다 우수한 특성을 보였다.

와전류 신호의 크기에 대한 주파수 의존성은 코일 센서와 PHR 센서 각각 $f^{3/2}$ 과 $f^{1/2}$ 에 비례하는 특성을 보였다. 이로부터 고주파수에서는 코일 센서가 결함 탐지 성능이 우수하지만, 저주파수에서는 PHR 센서가 결함 탐지 성능이 우수함을 알 수 있었다. 따라서 금속 표면 내부에 존재하는 결함 검출은 PHR 센서가 유리하므로 금속 내부에 존재하는 결함 검출 성능을 향상하기 위하여 PHR 센서가 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2018학년도 안동대학교 학술연구조성비(연구교수)에 의하여 연구되었습니다. PHR 센서를 제작해 주신 DGIST 김철기 교수님과 이재훈 학생에게 감사드립니다.

References

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy-current_testing.
 [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Nondestructive_testing.

[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current.
 [4] J. W. Park, J. H. Park, S. J. Song, M. B. Kishore, S. G. Kwon, and H. J. Kim, *J. Magn.* **22**, 531 (2017).
 [5] G. M. Javier, G. G. Jaime, and V. S. Ernesto, *Sensors* **11**, 2525 (2011).
 [6] H. G. Ramos and A. L. Ribeiro, *Procedia Engineering* **86**, 406 (2014).
 [7] T. Dogaru and S. T. Smith, *IEEE Tran. Magn.* **37**, 2790 (2001).
 [8] C. Fermon, M. Pannetier-Lecoecur, N. Biziere, and B. Cousin, *Sens. Actuators A: Phys.* **129**, 203 (2006).
 [9] B. Wincheski and M. Namkung, *QNDE 1999*, AIP Conf. Proc. **509**, 465 (2000).
 [10] T. Dogaru and S. T. Smith, *Nondestructive Testing and Evaluation* **16**, 53 (2000).
 [11] M. Pelkner¹, R. Stegemann, N. Sonntag, R. Pohl, and M. Kreuzbruck, *AIP Conf. Proc.* **1949**, 040001 (2018).
 [12] S. S. Yoon, D. Y. Kim, J. H. Lee, S. J. Kim, and C. G. Kim, *J. Korean. Magn. Soc.* **29**, 166 (2019).