

Thickness Dependence of Low Frequency Eddy Current Signals in Carbon Steel Plate

Seok Soo Yoon and Dong Young Kim*

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

(Received 3 December 2020, Received in final form 9 December 2020, Accepted 10 December 2020)

We analyzed the thickness dependence of eddy current (EC) signals measured using a AMR based EC sensor in ferromagnetic SM20C carbon steel plate. The high frequency EC signals showed nearly constant value with thickness. While in the low frequency EC signals, the amplitude was exponentially decreased and the phase was linearly increased, respectively. The phase of EC signals was more sensitive than the amplitude of EC signals with thickness of carbon steel plate. Thus the phase of low frequency EC signals can be applied for the thickness measurement of ferromagnetic carbon steel plate.

Key words : eddy current, thickness, skin depth, magnetic sensor application

탄소강 강판에 대한 저주파수 와전류 신호의 두께 의존성 연구

윤석수 · 김동영*

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 경동로 1375, 36729

(2020년 12월 3일 받음, 2020년 12월 9일 최종수정본 받음, 2020년 12월 10일 게재확정)

본 연구에서는 AMR 기반 와전류 센서를 사용하여 SM20C 탄소강 시험 시편에 대한 와전류 신호의 두께 의존성을 분석하였다. 고주파수 와전류 신호는 두께에 무관하게 일정한 신호 특성을 보였다. 그러나 저주파수 와전류 신호의 크기는 지수 함수적으로 감소하였고, 위상은 선형적으로 증가하는 특성을 보였으며 시험 시편의 두께에 따른 민감도는 와전류 신호의 크기보다 위상이 우수한 특성을 보였다. 따라서 저주파수 와전류 신호의 위상은 탄소강 강판의 두께 측정에 유용하게 적용될 수 있다.

주제어 : 와전류, 두께, 투과 깊이, 비등방성, 자기센서 응용

I. 서 론

와전류(eddy current) 신호는 금속의 비파괴 결함 검사, 두께 측정, 전기 전도도 측정 등 다양한 분야에 활용되고 있으며, 와전류 신호 측정에 자기센서가 응용되고 있다[1,2]. 금속에 인가된 교류 자기장은 전자기 유도에 의하여 와전류를 유도하며, 이러한 와전류의 침투 깊이(skin depth)는 $\delta = \sqrt{1/\pi\mu\sigma f}$ 이고, 여기서 σ 는 재료의 전기전도도이고, f 는 교류 자기장의 주파수이며, μ 는 투자율이다[2].

두꺼운 금속 또는 투자율이 높은 강자성 재료의 내부 결함 검출은 침투 깊이가 깊은 저주파수 교류 자기장이 요구된다. 그러나 강자성 재료를 사용하는 가스관의 두께 감소를 측정하는 감육 검사에서는 저주파수 출력 특성이 열악한 코일 센

서가 주로 이용되고 있다[3-5]. 이러한 코일 센서의 저주파수 단점을 보완하기 위하여, 저주파수 출력 성능이 우수한 자기 저항(magnetoresistance, MR) 기반의 와전류 센서에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6-12].

본 연구에서는 비등방성 자기저항(Anisotropic magnetoresistance, AMR) 기반의 와전류 센서를 사용하여 두께가 다른 SM20C 탄소강 시험 시편에서 와전류 신호의 주파수 의존성을 측정하였으며, 강자성 강판의 두께 측정을 위한 최적화 조건을 분석하였다.

II. 실험 방법

본 연구에서는 두께가 다른 기계구조용 탄소강(SM20C)을 시험 시편으로 제작하여 와전류 신호의 크기와 위상에 대한 주파수 의존성을 각각 측정하였다. Fig. 1에서 보인 것과 같이 시험 시편은 길이가 22.5 cm, 폭이 4.5 cm인 SM20C 재료에

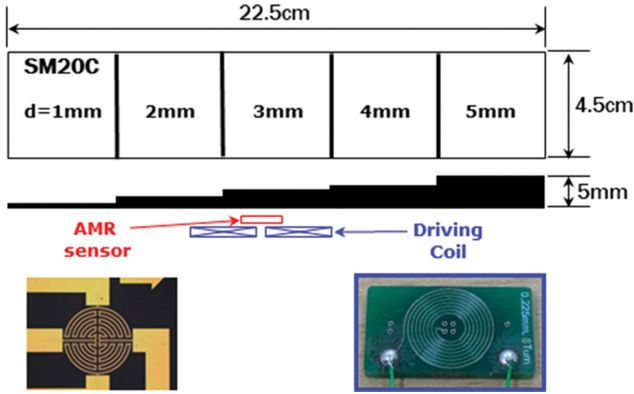


Fig. 1. (Color online) Test specimen with thickness of 1, 2, 3, 4 and 5 mm, respectively. The AMR based EC sensor consist of driving coil and ring-type AMR sensor were located under the test specimen. The inset photographs showed the driving coil and AMR sensor, respectively.

두께가 $d=1, 2, 3, 4, 5$ mm인 계단 모양으로 가공하였다. AMR 기반 와전류 센서는 교류 자기장을 발생시키는 여기 코일(driving coil)과 와전류 신호를 측정하는 AMR 센서로 구성되며, Fig. 1과 같이 시험 시편의 중앙에서 1 mm 아래에 배치하였다.

AMR 센서는 Fig. 1에 보인 현미경 사진과 같이 광식각 및 건식 에칭 공정을 통하여 직경 2 mm 크기의 다중 링 구조로 제작하였다. 여기 코일은 크기가 1 cm이고 감은 수가 80인 같은 모양의 코일 2개를 사용하였다. 여기 코일은 코일 표면에서 약 20 Oe의 교류 자기장을 발생하였다. 와전류 신호의 크기 V_{EC} 및 위상 θ_{EC} 는 시험 시편의 두께가 다른 부분의 중심부에 AMR 기반 와전류 센서를 배치한 상태에서 Lock-in amplifier(SR830)를 사용하여 10 Hz-10 kHz의 주파수 범위에서 각각 측정하였다.

III. 실험 결과 및 고찰

전자기 유도 법칙을 이용하는 코일 센서는 자기 선속의 시간 변화를 측정하므로 출력 신호는 교류 자기장의 주파수에 비례한다. 따라서 코일 센서는 저주파수로 갈수록 출력 신호가 작아진다. 이러한 특성은 저주파수 교류 자기장을 요구하는 두꺼운 금속 또는 투자율이 높은 강자성 재료의 내부 결함 검출에서 단점으로 작용한다. 한편 자기저항 센서는 자기장을 측정하므로 코일 센서와 달리 주파수에 의존하지 않는 출력 신호 특성을 갖는다. 따라서 자기저항 센서는 저주파수 출력 특성이 우수하므로 저주파수 와전류 신호 분석에 유리한 장점이 있다. 본 연구에서는 저주파수 출력 신호 특성이 우수한 AMR 기반 와전류 센서를 이용하여 와전류 신호를 측정하였다.

교류 자기장을 금속 시험 시편에 인가한 경우, 시험 시편에 유도된 와전류 J 는 깊이 d 에 따라 다음과 같이 변화한다 [3].

$$J_{EC} = J_0 e^{-d/\delta} \sin\left(\omega t + \frac{d}{\delta}\right) \quad (1)$$

여기서 J_0 은 금속 표면에 형성된 최대 와전류이고, ω 는 교류 자기장의 각진동수이다. 식(1)에서 와전류의 세기는 깊이 d 에 따라 $e^{-d/\delta}$ 와 같이 지수 함수적으로 감소하며, 와전류의 위상은 $\sin(\omega t + d/\delta)$ 에서 보인 것과 같이 깊이 d 에 비례하여 증가한다.

교류 자기장을 두께가 d 인 시험 시편에 인가한 경우, AMR 기반 와전류 센서의 출력은 와전류가 만든 자기장 ($B_{EC} \propto J_{EC}$)에 비례하는 특성이 있으며, AMR 기반 와전류 센서의 출력 신호는 전압으로 측정된다. 이러한 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 다음과 같다.

$$V_{EC} \propto S J_{EC} \quad (2)$$

여기서 S 는 AMR 기반 와전류 센서의 자기장 민감도이다. 따라서 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 식(1)에서 보인 것과 같이 재료의 두께 d 에 따라서 지수 함수적으로 감소하게 된다.

$$V_{EC} \propto e^{-d/\delta} \quad (3)$$

한편, 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 는 식(1)에서 보인 것과 같이 재료의 두께 d 에 비례하여 증가하게 된다.

$$\theta_{EC} \propto \frac{d}{\delta} \quad (4)$$

본 연구에서는 와전류 신호의 두께 의존성을 검증하기 위하여 AMR 기반의 와전류 센서를 이용하여 0 Hz-10 kHz의 주파수 범위에서 와전류 신호의 크기 V_{EC} 와 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 를 각각 측정하였다.

Fig. 2는 AMR 기반 와전류 센서로 측정된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 의 주파수 의존성을 시험 시편의 두께에 따라 측정된 결과이다. $d=0$ 은 시험 시편이 없는 경우에 측정된 결과이며, 와전류 신호를 측정하는 AMR 센서의 주파수 의존성을 나타낸다. 즉, AMR 센서의 출력은 10 Hz-10 kHz의 주파수 범위에서 일정한 출력 특성을 갖고 있음을 알 수 있으며, 시험 시편의 두께에 따른 출력 신호의 차이는 와전류 신호이다.

Fig. 2에서 주파수가 400 Hz 이하에서 측정된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 주파수가 감소할수록 시험 시편의 두께에 따른 변화가 뚜렷이 나타났다. 그러나 주파수가 400 Hz 이상에서 측정된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 시험 시편의 두께에 따라 차이가 거의 없을 정도로 일정한 신호 특성을 보였다. 이

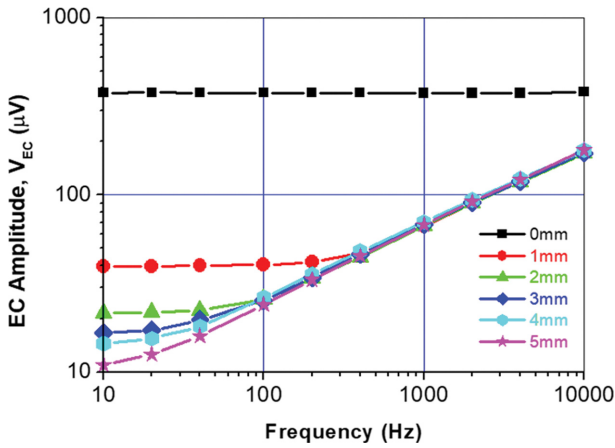


Fig. 2. (Color online) Frequency dependence on amplitude of eddy current signals V_{EC} at different thickness of test specimen, respectively.

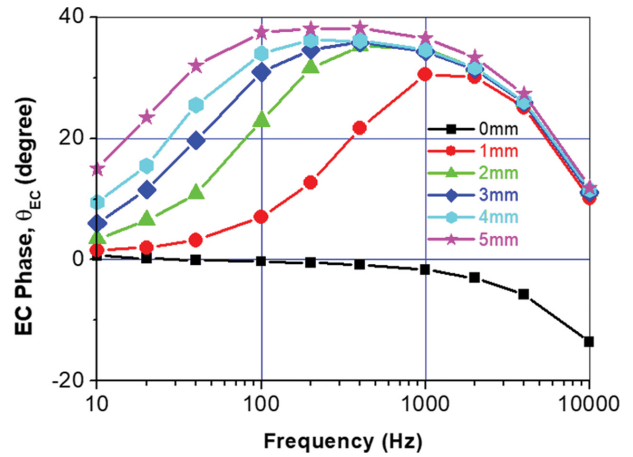


Fig. 4. (Color online) Frequency dependence on phase of eddy current signals θ_{EC} at different thickness of test specimen, respectively.

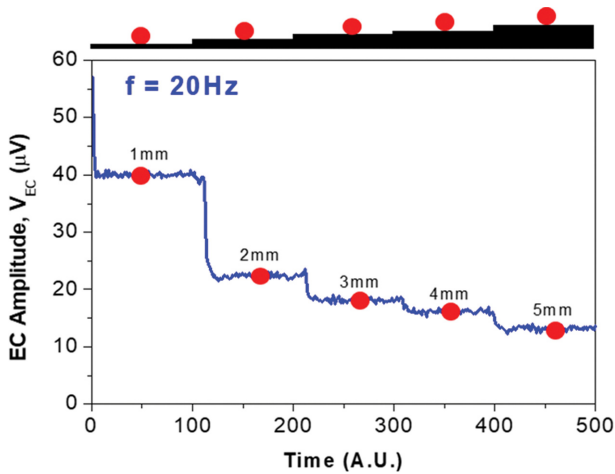


Fig. 3. (Color online) Amplitude of 40 Hz eddy current signals V_{EC} with time at different thickness of test specimen, respectively.

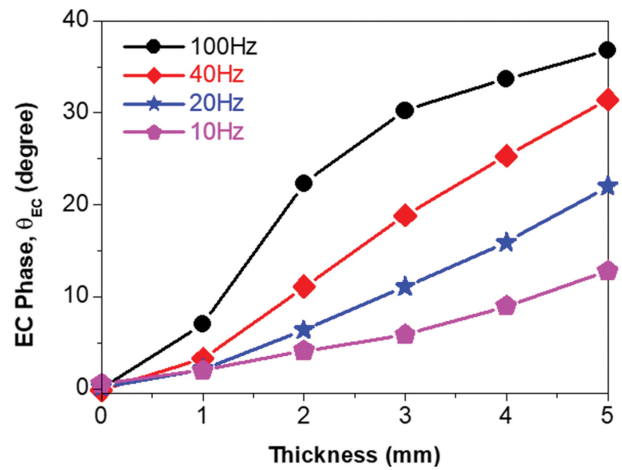


Fig. 5. (Color online) Thickness dependence on phase of eddy current signals θ_{EC} for 10, 20, 40, 100 Hz driving, respectively.

들 결과로부터 와전류 신호의 크기 V_{EC} 를 이용하여 강자성 재료(SM20C)의 두께를 측정할 경우, 낮은 주파수를 갖는 교류 자기장을 사용하여야함을 알 수 있었다.

Fig. 3은 시험 시편의 두께 $d=1, 2, 3, 4, 5$ mm인 부분의 중앙에 AMR 기반 와전류 센서를 위치한 후, 20 Hz의 주파수에서 약 100초 동안 각각의 위치에서 측정된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 를 시간에 따라 나타낸 것이다. 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 시험 시편의 두께에 따라 지수 함수적으로 감소하는 특성을 나타냈으며, 이들 결과로부터 와전류 신호의 크기 V_{EC} 를 이용하여 강자성 재료(SM20C)의 두께를 측정할 경우, 재료의 두께에 따라 지수 함수적으로 감소하는 출력 신호 특성을 이용할 수 있다.

일정한 두께에서 100초 동안 측정된 V_{EC} 의 시간에 따른 미소 변화는 측정 노이즈를 의미하며, 20 Hz의 주파수에서 측정된 노이즈는 SM20C 재료의 1 mm 두께 변화를 충분히 측

정할 수 있을 정도로 작은 특성을 보였다.

Fig. 4는 AMR 기반 와전류 센서로 측정된 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 의 주파수 의존성을 시험 시편의 두께에 따라 나타낸 것이다. $d=0$ 은 시험 시편이 없는 경우에 측정된 θ_{EC} 이며, 와전류 신호의 위상 변화에 대한 기준이다. 즉, AMR 기반 와전류 센서로 측정된 와전류 신호의 위상은 10 Hz-10 kHz의 주파수 범위에서 주파수에 따라서 감소하는 경향이 있으나 $d=0$ 인 시험 시편의 위상과 시험 시편의 두께에 따른 위상의 차이는 시험 시편의 두께에 의존하는 와전류 신호의 위상 변화이다.

주파수가 2 kHz 이하에서 θ_{EC} 는 시험 시편의 두께에 따라서 증가하는 특성이 나타났으며, 저주파수로 갈수록 시험 시편의 두께에 따른 비례 특성이 뚜렷이 나타났다. 그러나 주파수가 2 kHz 이상에서 θ_{EC} 는 시험 시편의 두께에 따라 차이가 거의 없을 정도로 일정한 특성을 보였다. 이들 결과로부터

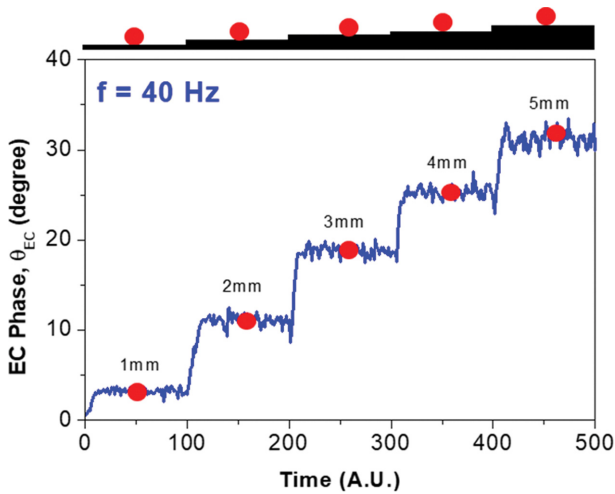


Fig. 6. (Color online) Phase of 20 Hz eddy current signals θ_{EC} with time at different thickness of test specimen, respectively.

터 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 를 이용하여 강자성 재료(SM20C)의 두께를 측정할 경우에도 낮은 주파수를 갖는 교류 자기장을 사용하여야함을 알 수 있었다.

Fig. 5는 저주파수 10, 20, 40, 100 Hz 각각에 대하여 시험 시편의 두께에 따른 θ_{EC} 의 변화를 나타낸 것이다. 10, 20, 40 Hz의 위상은 5 mm의 두께까지 선형적인 위상 변화를 보였다. 그러나 100 Hz에서는 약 2 mm의 두께까지 선형적인 위상 변화를 유지하였다. 따라서 식(4)에서 보인 두께에 따른 선형적인 θ_{EC} 변화는 저주파수 특성임을 알 수 있었다. 이들 결과로부터 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 를 이용하여 강자성 재료(SM20C)의 두께를 측정할 경우, 재료의 두께에 따라 선형적으로 증가하는 위상 특성을 이용할 수 있다.

Fig. 6은 시험 시편의 두께 $d=1, 2, 3, 4, 5$ mm인 부분의 중앙에 AMR 기반 와전류 센서를 위치한 후, 5 mm의 두께까지 선형성이 우수한 40 Hz의 주파수에서 약 100초 동안 각각의 위치에서 측정된 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 를 시간에 따라 나타낸 것이다. 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 는 시험 시편의 두께에 따라 선형적으로 증가하는 특성으로 나타났으며, 이들 결과로부터 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 를 이용하여 강자성 재료(SM20C)의 두께 측정이 가능함을 알 수 있었다.

일정한 두께에서 100초 동안 측정된 θ_{EC} 의 시간에 따른 미소 변화는 위상 노이즈를 의미하며, 40 Hz의 주파수에서 측정된 위상 노이즈는 SM20C 재료의 1 mm 두께 변화를 충분히 측정할 수 있을 정도로 작은 특성을 보였다.

IV. 결 론

본 연구에서는 AMR 기반 와전류 센서를 사용하여 1~5 mm의 두께를 갖는 SM20C 탄소강 시험 시편에 대한 와전류 신호의 두께 의존성을 분석하였다. 고주파수에서 측정된 와전류 신호는 SM20C 재료의 두께에 무관하게 일정한 신호 특성을 보였으며, 강자성 재료의 두께 측정에 고주파수를 사용할 수 없음을 알 수 있었다. 한편, 저주파수에서 측정된 와전류 신호의 크기 V_{EC} 는 두께에 따라 지수 함수적으로 감소하였으며, 와전류 신호의 위상 θ_{EC} 는 두께에 따라 선형적으로 증가하는 특성을 보였다. 따라서 강자성 재료의 두께를 정밀하게 측정하기 위하여 저주파수 와전류 신호를 이용하는 것이 유리하며, 저주파수 특성이 우수한 AMR 기반의 와전류 센서가 유용하게 활용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

이 논문은 안동대학교 기본 연구 지원 사업에 의하여 연구되었습니다. AMR 센서를 제작해 주신 DGIST의 김철기 교수님께 감사드립니다.

References

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy-current_testing.
- [2] https://en.wikipedia.org/wiki/Eddy_current.
- [3] G. M. Javier, G. G. Jaime, and V. S. Ernesto, *Sensors* **11**, 2525 (2011).
- [4] M. Fan, B. Cao, A. I. Sunny, W. Li, G. Tian, and B. Ye, *NDT&E International* **86**, 123 (2017).
- [5] D. G. Park, *J. Korean. Magn. Soc.* **28**, 39 (2018).
- [6] J. H. E. Hernandez, E. R. Pacheco, F. Caleyo, J. A. P. Benitez, and J. M. Hallen, *NDT&E International* **51**, 94 (2012).
- [7] J. W. Park, J. H. Park, S. J. Song, M. B. Kishore, S. G. Kwon, and H. J. Kim, *J. Magn.* **22**, 531 (2017).
- [8] D. Y. Kim, S. S. Yoon, and C. W. Kim, *J. Korean. Magn. Soc.* **30**, 129 (2020).
- [9] A. L. Ribeiro, H. G. Ramos, and J. C. Arez, *Measurement* **45**, 2246 (2012).
- [10] X. Yuan, W. Li, G. Chen, X. Yin, J. Ge, W. Yang, J. Liu, and W. Ma, *Measurement* **122**, 232 (2018).
- [11] B. Sasi, V. Arjun, C. K. Mukhopadhyay, and B. P. C. Rao, *Sensors and Actuators A* **275**, 44 (2018).
- [12] A. N. AbdAlla, M. A. Faraj, F. Samsuri, D. Rifai, K. Ali, and Y. A. Douri, *Measurement and Control* **52**, 46 (2019).