

강자성 배관의 원격장 와전류 결함 신호 검출에 GMR Sensor의 적용성 연구

GMR Sensor Applicability to Remote Field Eddy Current Defect Signal Detection in a Ferromagnetic Pipe

박정원*, 박재하*, 송성진*, 김학준*[†], 권세곤***

Jeong Won Park*, Jae Ha Park*, Sung Jin Song*, Hak Joon Kim*[†] and Se Gon Kwon***

초 록 강자성 배관의 대표적인 비파괴검사 방법으로 접촉방식인 초음파탐상(UT)과 비접촉식 검사인 누설자속탐상(MFL), 전자기초음파탐상(EMAT), 원격장 와전류탐상(RFECT) 기법 등이 있다. 특히 원격장 와전류(RFECT) 기법은 배관의 직경보다 작은 시스템 구축 등의 장점이 있다. 이런 장점에도 불구하고 array system을 구성할 경우 coil sensor 각각의 민감도 차이와 유지 보수 등의 문제가 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 크기가 작고 교체성이 우수하며 같은 민감도를 갖는 GMR sensor(giant magneto-resistance)를 적용하였다. 본 연구는 강자성 배관에 GMR sensor의 축 및 반경 방향의 원격장 및 깊이 변화를 가진 표준결함 실험을 통해 원격장 및 결함신호 특성을 확인하였고 강자성 배관에 원격장 와전류를 이용한 GMR sensor의 적용 가능성을 확인하였다.

주요용어: 원격장 와전류, 강자성 배관, GMR Sensor, 결함 탐상

Abstract The typical methods used for inspecting ferromagnetic pipes include the ultrasonic testing (UT) contact method and the following non-contact methods: magnetic flux leakage (MFL), electromagnetic acoustic transducers (EMAT), and remote field eddy current testing (RFECT). Among these methods, the RFECT method has the advantage of being able to establish a system smaller than the diameter of a pipe. However, the method has several disadvantages as well, including different sensitivities and difficult-to-repair coil sensors which comprise its array system. Therefore, a giant magneto-resistance (GMR) sensor was applied to address these issues. The GMR sensor is small, easy to replace, and has uniform sensitivity. In this experiment, the GMR sensor was used to measure remote field and defect signal characteristics (in the axial and radial directions) in a ferromagnetic pipe. These characteristics were measured in an effort to investigate standard defects at changing depths within a pipe. The results show that the experiment successfully demonstrated the applicability of the GMR sensor to RFECT signal detection in ferromagnetic pipe.

Keywords: RFECT, Ferromagnetic Pipe, GMR Sensor, Defect Detection

1. 서 론

국내 산업에서 전반적으로 넓게 분포되어 에너지 수송을 담당하고 있는 배관은 중요한 산업설비 중 하나이며 특히 강자성 배관은 가스 수송 및 기타 에너지 수송으로 많이 사용되고 있다. 매설된 강자성체 배관인 경우 오랜 시간에 걸친

노후화 및 외부 환경적 요인으로 인한 내·외부로부터 부식, 감육, 균열이 발생하며 이로 인해 인명 및 경제적 손실을 유발한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 비파괴 방법들이 연구 및 수행되고 있다. 이 중 원격장 와전류 기법은 배관의 직경보다 작게 시스템 구성을 할 수 있고 exciter coil의 tilting에 대하여 신호의 영향이 거의

[Received: November 10, 2016, Revised: December 8, 2016, Accepted: December 12, 2016] *성균관대학교 기계공학과, **한국철도공사 기술연구처, †Corresponding Author: SAFE Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea (E-mail: hjkim21c@skku.edu)

없다. 또한, 배관 내에 sensor가 위치해도 내부와 외부의 같은 민감도로 인해 결함 검사에 매우 효율적인 장점을 가지고 있다. 이런 장점에도 불구하고 단일 receiving sensor가 아닌 배관 내·외벽 전체를 검사하기 위한 array receiving sensor system을 구축할 경우 receiving sensor인 solenoid coil sensor는 수작업으로 제작되며 sensor 각각의 임피던스 차이가 발생하게 된다. 그 결과 서로 다른 민감도를 가지게 되며 결함 판단에 직접적 영향을 준다. 또한, sensor 유지 및 문제 발생 시 교체가 용이하지 않으며 결함의 유무를 판단할 수 있는 sensor의 최소 크기로 인해 배관의 직경이 감소할수록 array system을 구축하여 검사하기 어렵다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위해 receiver sensor로 종래의 solenoid coil sensor 대신 크기가 매우 작고 교체가 용이하고 외부 자장의 변화에 민감도가 뛰어나며 array system을 구축할 경우 같은 민감도를 가지는 GMR(giant magneto-resistance) sensor를 사용하여 배관검사를 위한 원격장 와전류 기법에 적용하였다.

본 연구는 소구경 강자성 배관 내에서 GMR sensor를 적용한 원격장 와전류 기법을 통하여 GMR sensor의 축 및 반경 방향에 대하여 원격장 신호 및 깊이 변화에 따른 신호 특성을 평가하였으며, 강자성 배관 결함 탐상에 GMR sensor의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 이론

2.1. 원격장 와전류 이론

1951년 Maclean에 의해 발견되어 약 33년 후 T. R Schmidt에 의해 oil 배관 내외의 두께 및 결함의 형태에 관한 배관 scanning을 통해 신호 분석 연구논문이 발표되면서 원격장 와전류에 대한 연구가 시작되었다[1,2]. 원격장 와전류는 배관 내부에서 exciter coil로부터 발생한 자장으로부터 원격장 영역(remote field zone), 직접장 영역(direct field zone)으로 전파되며 두 자장 사이에 상쇄 현상이 일어나는 천이 영역(transition zone)이 발생한다. 천이 영역은 exciter coil로부터 배관 직경의 약 1.5배 떨어진 위치에서 발생하며 배관 직경의 약 2~3배 떨어진 위치에서는 원격장 영역이 발생한다[2]. 원격장 와전류 기법은 배관 외벽으

로부터 관통하여 배관 내부로 들어오는 원격장 영역을 이용하여 결함을 탐상한다. 결함 신호는 receiver sensor로 측정된 자장의 변화의 동상(X : in-phase), 이상(Y : quadrature) 성분으로 출력하여 두 성분을 이용해 amplitude, Lissajous plane 그래프를 이용해 결함의 형태 및 크기 등을 유추한다[3]. Receiving sensor로부터 출력된 값은 매우 작기 때문에 lock-in amplifier를 이용하여 출력 값을 증폭한다. Lock-in amplifier의 특징은 노이즈로 인해 가려진 신호를 감지하고 증폭함으로써 receiving sensor로부터 배관으로 들어오는 원격장 와전류의 매우 작은 출력 값을 취득하여 배관의 정보를 나타낼 수 있다[4].

2.2. GMR Sensor 이론

GMR sensor는 1988년 Baibich에 처음 발견되어 현재 의료, 계측 등 많은 분야에서 연구 및 사용되고 있다[5]. GMR 소자는 스핀 의존성 산란에 기인하여 강자성체 층과 비강자성체 층의 자화 방향에 따라 저항의 변화가 생기는 현상이다[6,7]. 현재 가장 많이 사용되는 GMR 소자의 방식은 anti-ferromagnetically pinned spin valve 방식으로 두 강자성체 층 중 하나의 강자성체 층 위에 반강자성체 층을 증착하여 강자성체 층 자화 방향을 고정한 후 나머지 하나의 강자성체 층을 외부 자장으로 변화시키는 방식이다[6-7]. GMR sensor는 anti-ferromagnetically pinned spin valve 형태로 된 4개의 GMR 저항 소자가 연결되어 있는 wheatstone bridge로 구성되어 있으며 permalloy 재질로 감싸진 2개의 GMR 저항 소자가 외부로부터 자기장을 집중시켜 나머지 2개의 GMR 저항 소자로 자기장을 전달하는 구조이다. 외부 자기장의 세기 변화에 따라 이력현상곡선에 기인하여 GMR sensor의 출력 값의 변화를 가져온다. 따라서 외부 자기장의 변화에 GMR sensor의 민감도는 달라진다[8].

3. 실험 구성 및 방법

3.1. 시험편 및 센서

시험편은 외경 $\phi 114.3$ mm, 내경 $\phi 105.3$ mm, 길이 1000 mm를 가진 4 inch 강자성 배관을 사용하

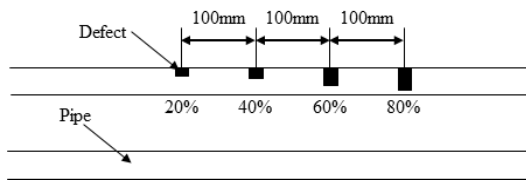


Fig. 1 Specification of defects

Table 1 Size of defects

	20%	40%	60%	80%
Defect	0.9 mm	1.8 mm	2.7 mm	3.6 mm

였으며 결함이 없는 배관과 Fig. 1와 같이 배관 두께 대비 깊이 20%, 40%, 60%, 80%, 크기 $\phi 9$ mm, 평저공 형태의 표준인공결함을 100 mm 간격으로 가공하여 시험편을 제작하였다. Exciter coil은 외경 $\phi 100$ mm, 내경 $\phi 26.33$ mm 크기의 bobbin을 제작한 후 선경 $\phi 0.75$ mm로 2000 turn을 권선하였으며 인가전류는 1A이다. Receiving sensor는 NVE사의 AA002-02 GMR sensor를 사용하였다.

3.2. 실험 구성

Fig. 2과 같이 exciter coil에 40 Hz 사인파를 인가하기 위해 100 MHz 대역의 함수발생기 (Tektronix사)를 사용하였으며 인가된 사인파의 전압 증폭을 위해 bipolar (Kepco사)를 사용하였다. Receiving sensor인 GMR sensor (NVE사 AA002-02)로부터 측정된 신호의 필터링 및 증폭을 위해 lock-in amplifier (Stanford사)를 사용하였으며 측정된 신호인 동상(X: in-phase), 이상(Y: quadrature) 성분은 DAQ (NI사 USB-6002)를 거쳐 PC의 LabView program을 통해 실시간 모니터링 및 신호 수집을 하였다.

Fig. 3와 같이 4 inch 배관에서 원격장 신호 수집을 위해서 motor와 ball screw를 사용하여 exciter coil 및 GMR sensor를 정속 주행할 수 있도록 장치를 설계 제작하였다. Receiver, exciter coil의 정확한 이동 거리를 측정하기 위해 분해능 100 pulse encoder를 통해 motor가 한 바퀴 회전할 시 5 mm를 이동할 수 있도록 설계하였다. 결함이 없는 배관에서는 400 mm, 결함이 있는 배관에서는 500 mm를 주행하도록 설정하여 신호를 수집하였으며 GMR sensor의 lift-off 증가에 따른

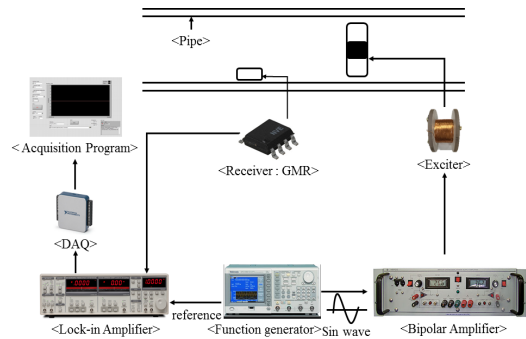


Fig. 2 Configuration of experimental setup

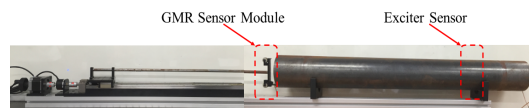


Fig. 3 GMR-based RFECT experimental system

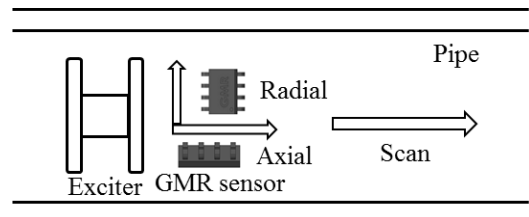


Fig. 4 Scanning direction of a GMR sensor

신호 변화를 확인하기 위해 GMR sensor module에 LM guide를 설치하여 lift-off 5 mm 간격으로 조절하며 실험을 하였다. Fig. 4에서 보인 바와 같이 결함이 없는 배관을 사용하여 exciter coil 선단에서부터 GMR sensor 축 및 반경 방향으로부터 각각의 주행 실험을 통해 원격장 와전류 신호를 측정하였고 결함이 있는 배관에서는 exciter coil과 GMR sensor의 간격을 180 mm로 설정한 뒤 축 및 반경 각각의 방향으로 배관 결함 실험을 하였다.

4. 실험 결과

4.1. 축 및 반경 방향 원격장 와전류 신호 특성

Fig. 5(a), (b)에서 보인 바와 같이 GMR sensor의 축 방향과 반경 방향의 원격장 영역이 발생하는 거리가 다르게 나타나는 것을 진폭 및 위상 신호로써 확인할 수 있다. Fig. 5(a) GMR sensor

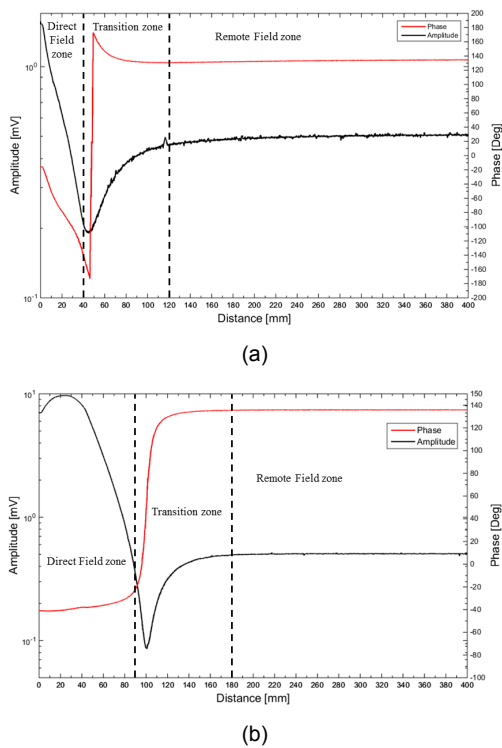


Fig. 5 Acquired RFECT signal by GMR sensor in (a) axial, and (b) radial direction of scanning on 4inch ferromagnetic pipe

의 축 방향 RFECT 신호에서는 직접장 영역의 급격한 감소로 인해 원격장 와전류와 상쇄되는 전이 영역이 반경 방향에 비해 가깝게 나타났으며 약 120 mm 이후부터 원격장 영역이 발생하였다. Fig. 5(b) 반경 방향에서는 exciter coil 선단에서부터 약 180 mm 떨어진 지점부터 원격장 영역이 발생하였다. 원격장 영역에서의 진폭의 크기 차이는 반경 방향이 축 방향보다 약 0.05 mV 크다. GMR sensor의 두 축 방향 모두 원격장 영역에서 거리 증가에 따른 감소 현상이 나타나지 않았다. 그 결과 exciter coil과 GMR sensor 사이의 거리는 반경 방향의 원격장 영역 시작을 기준으로 하여 180 mm로 정하였다.

4.2. 축, 반경 방향 결함 신호

4.2.1. 축 방향 결함 신호

위 Fig. 5의 결과로 exciter coil과 GMR sensor의 거리를 180 mm로 고정을 한 후 결함 탐상

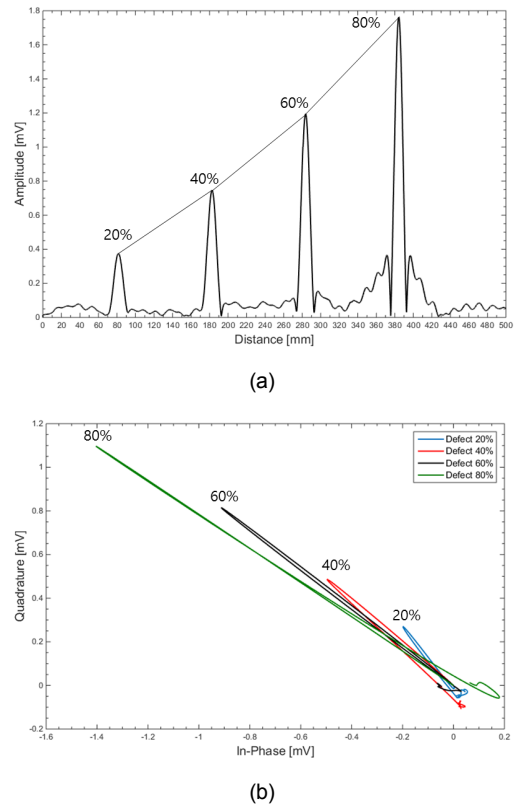
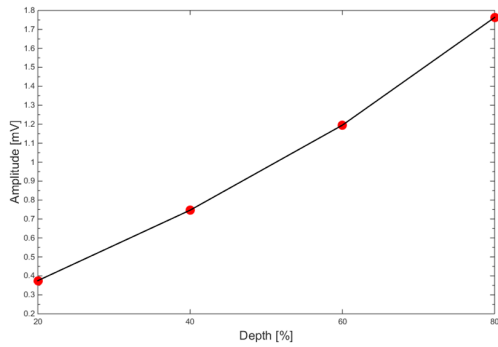
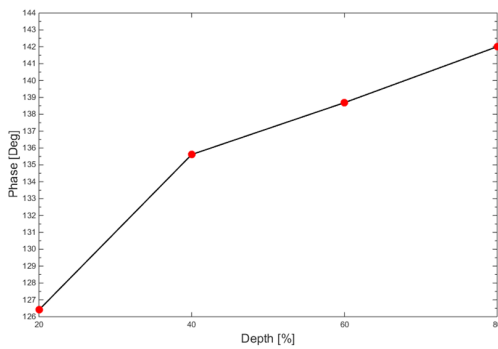


Fig. 6 RFECT defect signals: (a) amplitude and (b) Lissajous plane in axial direction of scanning

실험을 수행하였다. GMR sensor의 방향을 X축으로 한 뒤 edge effect를 피하기 위해 배관의 모서리부터 직경의 약 2배 거리를 시작점으로 주행하여 결함 신호를 취득하였다. Fig. 6(a), (b), Fig. 7(a), (b), Fig. 8은 GMR sensor의 축 방향의 실험 결과이다. Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 진폭 신호이며 결함의 깊이가 증가할수록 신호의 크기가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b) Lissajous plane의 경우 2사 분면에서 결함의 깊이가 증가할수록 반시계 방향으로 회전하며 궤적의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 7(a), (b)는 결함 깊이에 따른 진폭과 위상 변화를 나타내었다. Fig. 7(a) 진폭 변화는 결함 깊이가 증가에 따라 신호 크기가 평균적으로 약 0.4 mV씩 선형적으로 증가하였다. Fig. 7(b)의 위상 변화의 경우 20%와 40%의 결함 위상각의 차이가 약 9°로 가장 크게 나타났으며 다른 결함들의 위상각은 약 4° 차이를 나타내며 결함의 깊이 증가에 따라 선형적으로 증가하였다.



(a)



(b)

Fig. 7 Relation between (a) peak to peak amplitude and (b) phase angle and depth of defect in axial direction of scanning

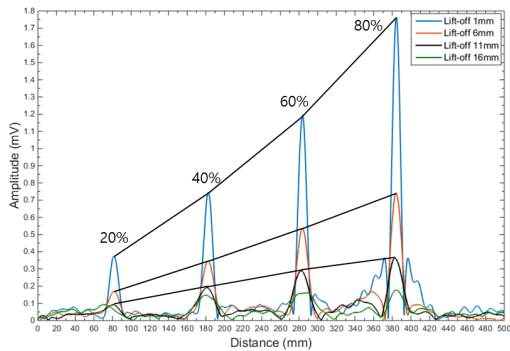
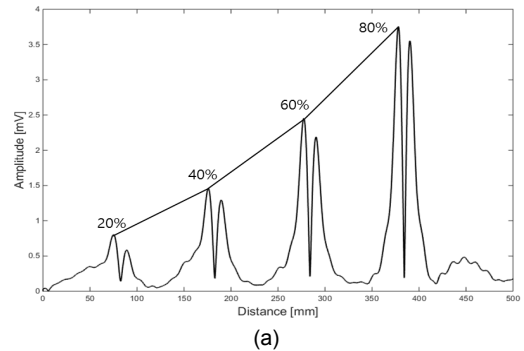
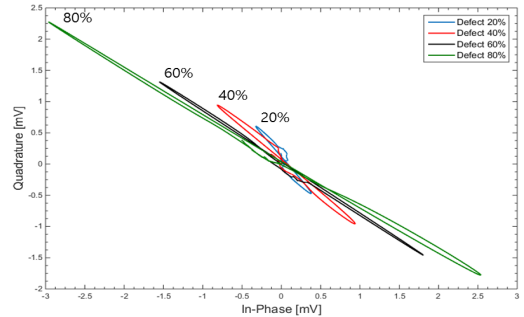


Fig. 8 Relation between lift-off and amplitude of defect signal in axial direction of scanning

Fig. 8은 lift-off를 5 mm 단위로 증가시키며 결함 측정이 가능한 lift-off의 거리를 나타내었다. Lift-off 11 mm까지 깊이 20%~80%까지 결함 측정이 가능하였으며 16 mm부터는 결함 측정을 할 수 없었다. 따라서 축 방향에서 결함을 측정할 수 있는 lift-off의 범위는 11 mm로 나타났다.

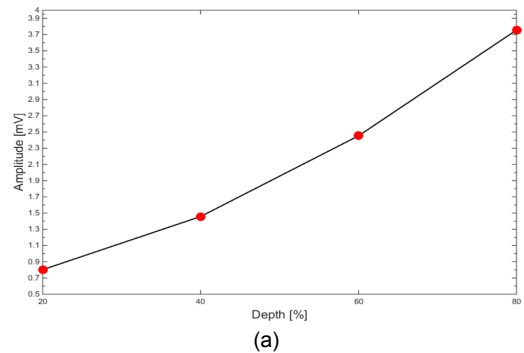


(a)

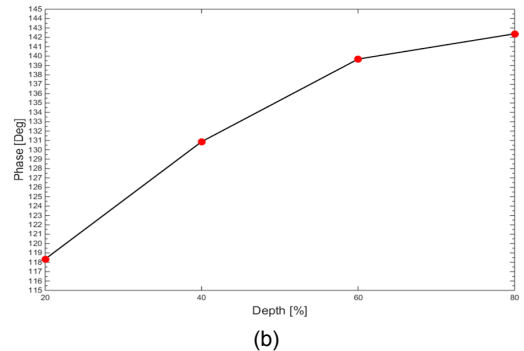


(b)

Fig. 9 Relation between (a) peak to peak amplitude and (b) phase angle and depth of defect in radial direction of scanning



(a)



(b)

Fig. 10 Relation between lift-off and amplitude of defect signal in radial direction of scanning

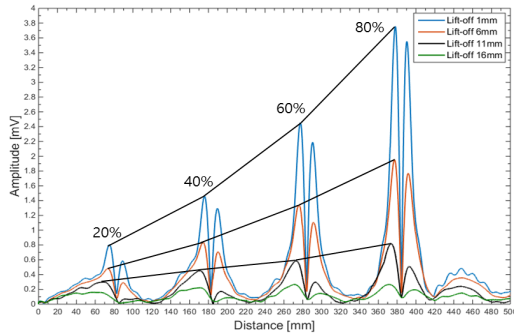


Fig. 11 Relation between lift-off and amplitude of defect signal in radial direction of scanning

4.2.2. 반경 방향 결함 신호

GMR sensor의 반경 방향의 실험 결과를 Fig. 9(a), (b), Fig. 10(a), (b), Fig. 11에 각각 나타내었다. Fig. 9(a)는 20%~80%의 결함 신호를 진폭으로 나타내었으며 결함의 깊이가 증가할수록 신호의 크기가 증가한다는 것을 알 수 있다. 하나의 결함에 두 개의 peak 점이 발생하는 이유는 GMR sensor가 결함을 지나갈 때 결함의 양 선단에서 peak 점이 발생한다. 결함 신호를 동상(X: in-phase)과 이상(Y: quadrature)로 성분으로 출력한 후 진폭으로 나타내면 하나의 결함에 두 개의 peak 점이 나타나는 것을 알 수 있다. 구체적으로 Fig. 10(a)의 진폭 변화 그래프를 통하여 증가한 진폭의 값을 확인하였을 때 평균적으로 약 0.7mV씩 선형적으로 증가하였다. Fig. 9(b)의 결함 깊이 증가에 따른 Lissajous plane은 2사 분면과 4사 분면에 궤적을 그리며 결함에 대한 그래프를 나타냈다. 결함의 깊이가 증가할수록 궤적은 반시계 방향으로 회전하였다. 또한, Fig. 9(b)의 결과로 위상의 값을 도출하여 Fig. 10(b)의 위상 변화 그래프로 나타낸 결과 20%와 40%의 결함 위상각의 차이는 약 12° 차이가 났으며 결함의 깊이가 증가할수록 위상각의 크기가 줄어들며 선형적으로 증가하였다.

Fig. 11은 lift-off 증가에 따른 결함을 측정할 수 있는 lift-off 거리를 나타냈으며 축 방향과 마찬가지로 16 mm부터는 결함을 측정할 수 없었다. 따라서 radial 방향 또한 결함을 측정할 수 있는 lift-off 거리는 11 mm라는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 4 inch 강자성 배관에 GMR sensor를 적용한 원격장 와전류 기법을 이용하여 GMR sensor의 축 및 반경 방향에 따라 원격장 신호 및 표준결함 깊이 변화에 따른 신호 특성을 평가하였다. GMR sensor의 축 방향과 반경 방향의 원격장 신호를 비교해본 결과 반경 방향의 원격장 영역이 축 방향보다 60 mm 더 떨어진 약 180 mm 이후부터 원격장 영역이 발생하였으며 축 방향, 반경 방향 모두 원격장 영역에서 신호의 감쇠 현상이 나타나지 않았다. 그 결과 exciter coil과 GMR sensor의 거리를 180 mm로 정할 수 있었다. 축 방향 및 반경 방향 배관 두께 대비 20%, 40%, 60%, 80%의 깊이를 가진 평저공 표준결함 실험 결과 진폭과 위상 변화 모두 선형적으로 값이 증가하였으며 Lissajous plane의 경우 결함의 깊이가 증가할수록 반시계 방향으로 곡물의 크기가 증가하였다. Lift-off의 실험 결과는 축 및 반경 방향 모두 결함을 측정할 수 있는 범위는 11 mm로 나타났으며 16 mm 이상은 결함을 측정할 수 없었다. 실험의 결과를 통하여 강자성 배관에 원격장 와전류 기법을 이용한 GMR sensor의 적용성을 확인하였고 원격장 와전류를 이용한 강자성 배관검사 발전 가능성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2016년도 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 철도기술 연구사업 중 ‘선제적 선로 장애 예방을 위한 레일결함 탐상 및 상태평가 기술 개발’ 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] D. L. Atherton, "Remote field eddy current inspection," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 4142-4147 (1995)
- [2] T. R. Schmidt, "The remote field eddy current inspection technique," *Materials Evaluation*, Vol. 42, pp. 225-230 (1984)

-
- [3] Y. K. Shin, Y. T. Lee, S. C. Song and H. S. Jung, "Characteristics of RFEC defect signals observed experimentally in the ferromagnetic pipes," *Proceedings of KSNT Fall Conference*, pp. 231-238 (2004)
- [4] R. J. Kilgore and S. Ramchandran, "Remote-field eddy current testing of small-diameter carbon steel tubes," *Materials Evaluation*, Vol. 47, pp. 32-36 (1989)
- [5] S. C. Jo, "Fabrication and characteristic measurements of spin valve type giant magnetoresistive elements," Korea Science and Engineering Foundation (1997)
- [6] P. P. Freitas, R. Ferreira, S. Cardoso and F. Cardoso, "Magnetoresistive sensors," *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 19, No. 16, 165221 (2007)
- [7] C. Reig, M. D. Cubells-Beltran and D. R. Munoz, "Magnetic field sensors based on magnetoresistance (GMR) technology: Applications in electrical current sensing," *Sensors*, Vol. 9, pp. 7919-7942 (2009)
- [8] A. Jander "Application notes for GMR sensors," *Proc. SPIE 5770 Advanced Sensor Technologies for Nondestructive Evaluation and Structural Health Monitoring*, Vol. 5770 (2005)