

강자성체 구조물의 표면결함검출을 위한 와전류탐상 비파괴검사

이항범
 송실대학교 전기공학과

Eddy Current NDT for Detection of Defect on Ferromagnetic Material

Hyang-beom Lee
 Dept. of Electrical Eng., Soongsil University

Abstract - 본 논문에서는 강자성체 물질을 사용하는 구조물들에 발생하는 결함을 와전류탐상을 이용하여 검출하기 위한 비파괴검사방법에 대하여 제시하였다. 와전류탐상은 전자기비파괴검사방법으로 초음파탐상법과 같은 방법에 비교하여 비접촉식이며 고속으로 검사가 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서 사용되는 매질인 강자성체의 경우 비자성체에 비하여 표피효과에 의한 침투깊이가 얇기 때문에 강자성체를 위한 주파수를 별도로 선정하여야 한다. 또한 고속으로 움직이는 경우 속도기전력에 의한 효과를 고려하여야 한다. 본 연구에서는 와전류센서를 제작하여 실제 강자성체에 적용하는 경우 어떠한 특성을 나타내는데에 대하여 고찰하였다.

1. 서 론

산업화가 진행됨에 따라 많은 산업설비들이 만들어져 사용되고 있으며, 시간이 갈수록 노후화가 진행되고 있다. 이에 따라 각종 설비와 구조물에 대한 안전성과 제품에 대한 신뢰성은 항상 요구되어 왔으며 이러한 안전성과 신뢰성은 그 상태를 진단하고 수명을 파악함으로써 평가된다. 여기서 안정성에 대한 진단과 수명을 파악하는데 있어서 가장 효율적인 방법은 비파괴 검사이다. 비파괴 검사는 검사 대상에 손상을 가하거나 파괴하지 않고 대상의 내부와 외부에 존재하는 불연속 혹은 결함을 탐지하거나 검사 대상의 물질을 판단하는 기술이다. 특히 금속과 같이 도전체로 된 제품이나 부품의 표면 상태를 조사하는데 와전류 탐상 방법이 가장 효과적이다. 철강, 비철의 관이나 봉, 선 등에 대하여 고속으로 자동화 하여 생산라인의 전수검사에 유용하다. 또 발전소와 석유 플랜트의 열교환기의 전열관이나 항공기 부품의 정기검사 등의 보수, 보전에 용이하다. 이러한 와전류 탐상방법에 사용되는 와전류 센서는 시간의 변화에 따라 변화하는 자속을 도체에 가하면 전자기유도현상에 의해 유기기전력이 발생하고 이 유기기전력은 렌츠의 법칙에 따라 시간에 따라 변화하는 자장을 방해하는 방향으로 와전류가 흐르게 된다. 도체안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 하며 표피효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의할 수 있다. 침투깊이는 도체의 투자율, 도전율, 주파수에 관계되고 투자율과 도전율은 검사대상이 정해지면 그 값이 결정되어 버린다. 따라서 침투깊이에 영향을 줄 수 있는 것은 주파수라고 할 수 있다.

본 논문에서는 시험체의 속도 변화에 의한 와전류 센서의 결함 검출 능력을 고찰하기 위해 와전류 센서를 개발하여 시험을 수행하였다. 와전류 센서는 1차코일, 2차코일, 페라이트로 구성되어 있으며 3종류의 와전류 센서를 제작하여 실험하였다. 결함은 회전원판에 가공하였으며 회전원판의 재질은 강자성체인 저탄소강 45C를 사

용하였다. 사용된 주파수는 500[Hz]이며, 함수 발생기(Function Generator)를 사용하여 신호를 생성하여 센서를 구동시켰다. 속도 변화를 위해 회전원판을 제작하여 회전시키면서 속도에 의한 와전류 센서의 결함 검출 능력을 살펴 보았다.

2. 와전류 탐상원리

물체에 시변자장(time-varying field)을 가하게 되면 자속의 변화를 막는 방향으로 도체내부에 역기전력이 유기된다. 만약 그 물체가 도전체의 성질을 띠고 있다면 역기전력에 의하여 전류가 흐르게 되며 이 전류를 와전류라 한다. 이는 그림 1의 (a)와 같이 표현될 수 있다. 이 와전류는 표면에서부터 도체 내부로 들어 갈수록 그 크기가 약해지며, 표면에서의 물리량의 크기에 비하여 1/e 정도가 되는 깊이를 침투깊이(skin depth)라 한다. 이 침투깊이는 식 (1)과 같이 표현되며, 사용하는 주파수, 도체의 도전율, 물체의 투자율에 관계된다. 따라서 비자성체 도체에 비하여 자성체 도체의 경우 침투깊이가 줄어드는 것을 알 수 있으며, 일반적으로 비자성체의 경우에 와전류를 이용한 검사방법을 많이 사용한다.

와전류가 흐르고 이에 대한 효과를 등가회로로 그림 1(b)에 표현하였다. 구동코일에 의하여 공간에 시변자장이 형성되고 이 자장에 의하여 시험체 도체내에 전류가 흐르게 되면 이 와전류에 의하여 새로운 자장이 형성된다. 이 새로운 자장은 원래의 자장을 변화시키게 되고, 이 변화된 자장에 의하여 구동코일양단에 유기되는 역기전력이 달라지게 된다. 이 역기전력의 크기는 결함의 유무, 사용되는 시험편의 물질상수, 센서와 시험편사이의 거리에 의하여 달라지게 된다. 구동전류와 역기전력의 비는 임피던스(impedance)로 표현되며, 이 임피던스 변화를 살펴서 결함의 유무 등을 판단하게 된다.

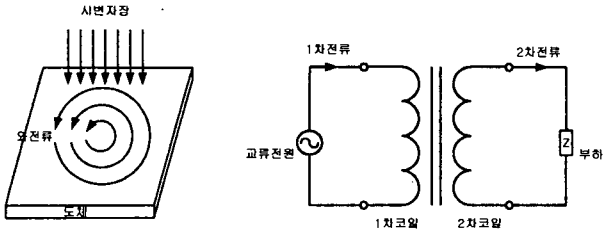
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m] \quad (4)$$

여기서 ω 는 각주파수(angular frequency, [rad/s]), f 는 주파수(frequency, [Hz]), σ 는 도전율(conductivity, [S/m]), μ 는 투자율(permeability, [H/m]), μ_r 는 비투자율(relative permeability), μ_0 는 진공중의 투자율(permeability of vacuum, [H/m])을 의미한다.



(a)와전류 분포 (b)등가회로
그림 1. 와전류 탐상원리

와전류탐상은 공기를 매체로 센서와 시험편사이의 에너지를 전달한다. 따라서 센서와 시험편사이에 약간의 거리를 둘수 있으며, 이는 시험편에 접촉을 하지 않고도 비파괴검사가 가능하다는 것을 의미한다. 또한 사용되는 주파수가 충분하다면 고속으로 시험이 가능하기 때문에 자동화 등이 용이하다는 장점이 있다.

3. 와전류 센서 제작과 실험

와전류 센서는 표 1과 같이 3종류를 제작하였다. 와전류 센서는 1차코일, 2차코일, 페라이트로 구성되어 있다. 3종류 모두 같은 페라이트를 사용하여 페라이트 내부에 1차, 2차코일을 감았으며 1차코일의 길이는 같게 하고 2차코일의 길이는 다르게 하였다.

표 1. 와전류 센서의 사양

와전류 센서	1차코일		2차코일	
	직경[mm]	길이[m]	직경[mm]	길이[m]
A	0.1	4.5	0.08	50
B	0.1	4.5	0.08	38
C	0.1	4.5	0.08	25

센서를 구동하고 센서의 출력을 얻기 위하여 그림 2와 같은 회로를 구성하였다. 발전부에서는 와전류센서의 1차코일을 여자시키는 역할을 한다. 사용주파수는 500[Hz]이며 함수발생기를 이용하여 정현파를 발생하여 전력증폭회로를 통한 후 센서를 구동시켰다. 센서를 통하여 에너지를 최대한으로 전달하기 위하여 센서의 임피던스에 맞추어 전력증폭부를 구성하였다. 1차 코일에 흐르는 전류 및 시험편에 발생된 와전류에 의한 자장에 의하여 2차코일에 교류전압이 유기된다. 이 교류전압을 직류로 바꾼후 신호를 컴퓨터로 저장하였다. 사용된 장비는 National Instruments사의 GPIB Card이며, 오실로스코프의 화면을 컴퓨터로 이동시켰다.

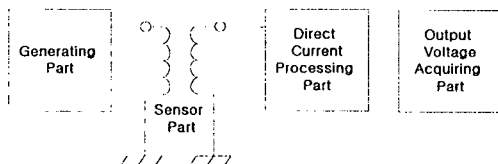


그림 2. 와전류센서시스템의 블록도

시험편의 속도변화를 고려하기 위하여 실험장치를 그림 3과 같이 구성하였다. 회전원판의 재질은 강자성체인 저탄소강 45C이며, 이 시험편의 B-H곡선은 그림 4에 나타내었다. 센서의 성능을 검사하기 위하여 결함을 가공하였으며, 결함의 크기는 17[mm]×17[mm]×3.4[mm]이

다. 회전원판과 와전류 센서 사이의 lift off를 3[mm] 하고 회전원판을 회전시켜 결함을 검출하였다. 회전원판의 회전수는 0[rpm]부터 150[rpm]까지 회전시켰다. 와전류 센서의 결함의 검출 능력은 결함이 없는 부분에서의 직류출력전압과 결함이 있는 부분의 직류출력전압의 차이값(Vpp)으로 나타냈다. 실험결과는 그림 5부터 그림 7에 나타내었다. 이 실험결과를 정리하여 그림 8에 나타내었다. 결과로부터 속도가 증가함에 따라 와전류센서의 출력값이 줄어들고 있음을 알수 있다. 이는 와전류센서의 유기기전력이 변압기 기전력 외에 속도기전력이 있다는 것을 의미하며, 특히 시험체의 움직임이 커짐에 따라 속도기전력의 효과가 점점 커진다는 것을 의미한다. 이로부터 와전류센서를 사용하는 환경, 특히 시험체의 이동 속도를 고려하여 와전류센서를 설계하고 제작하여야 한다는 것을 알 수 있다.

다음 식은 유기기전력을 나타내고 있으며, λ는 총 쇠교자속, \vec{v} 는 시험체의 속도, $\frac{\partial \lambda}{\partial t}$ 는 변압기 기전력, $\vec{v} \cdot \nabla \lambda$ 는 속도기전력을 의미한다.

$$EMF = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \lambda \quad (5)$$

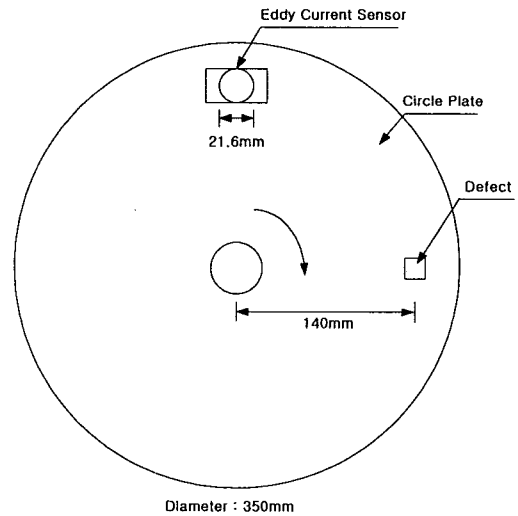


그림 3. 와전류센서 시험을 하기 위한 회전원판

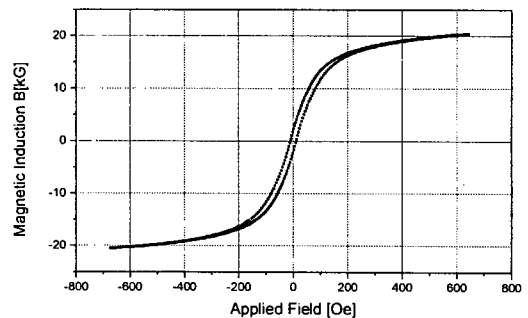
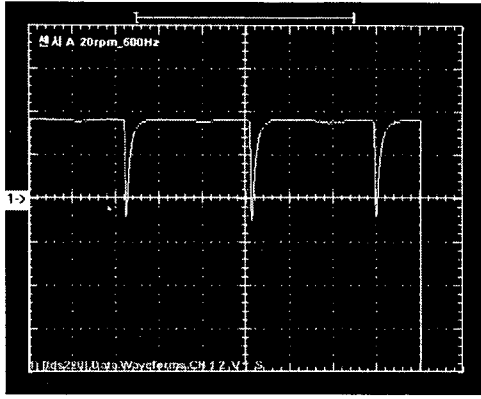
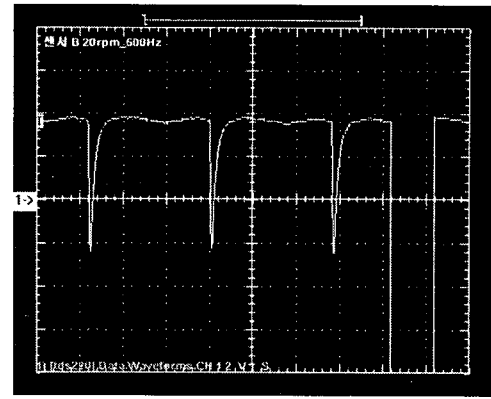


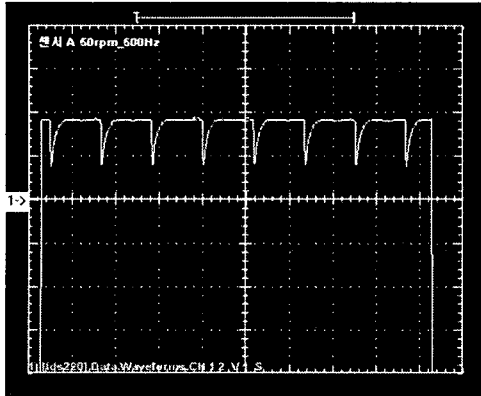
그림 4. 회전원판(SM-45C)의 B-H곡선



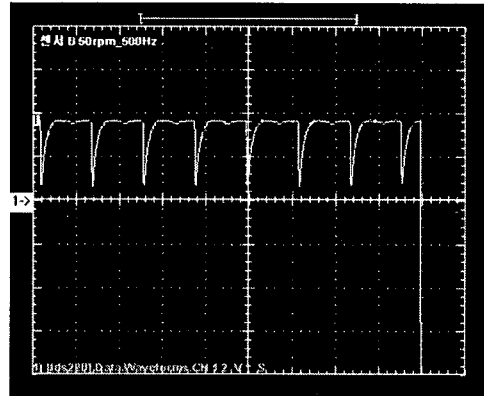
(a) 속도 : 20[rpm]



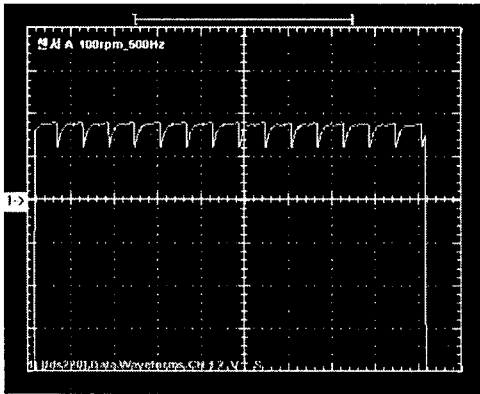
(a) 속도 : 20[rpm]



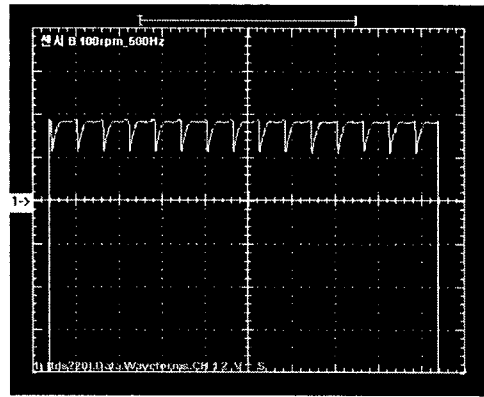
(b) 속도 : 50[rpm]



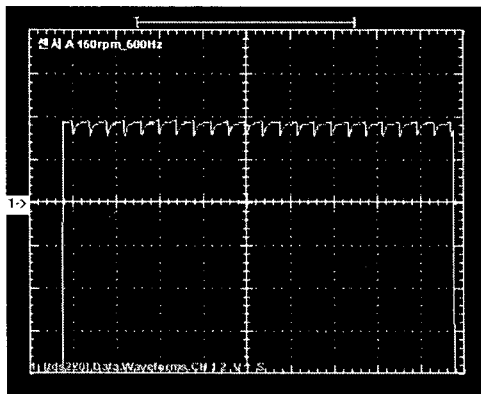
(b) 속도 : 50[rpm]



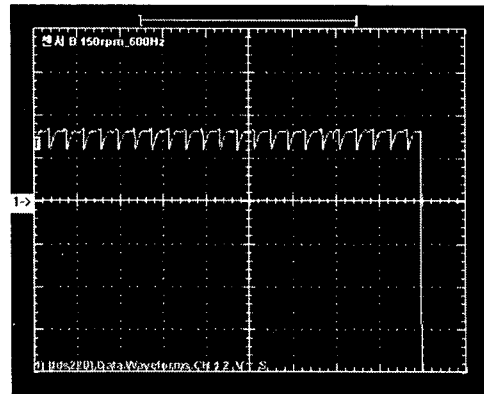
(c) 속도 : 100[rpm]



(c) 속도 : 100[rpm]



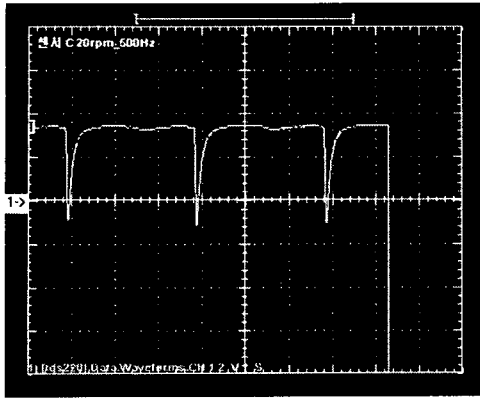
(d) 속도 : 150[rpm]



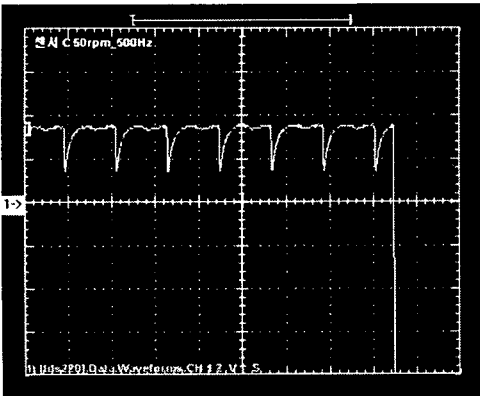
(d) 속도 : 150[rpm]

그림 5. 센서 A의 특성 (2[V/div], 1[s/div])

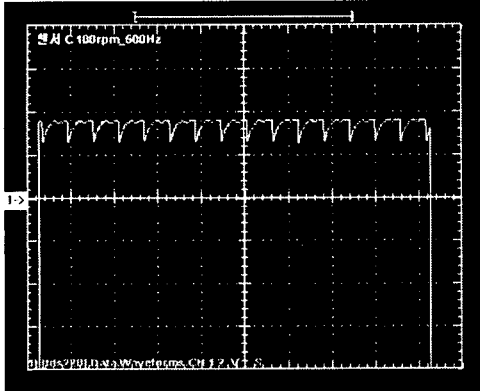
그림 6. 센서 B의 특성 (2[V/div], 1[s/div])



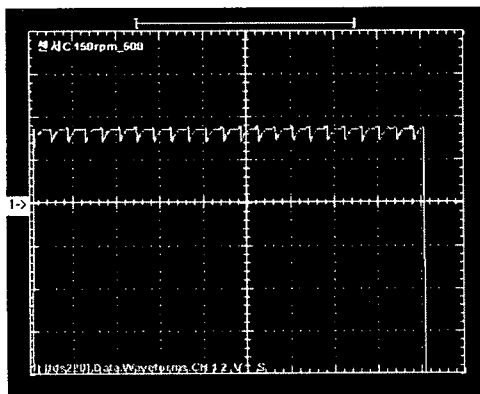
(a) 속도 : 20[rpm]



(b) 속도 : 50[rpm]



(c) 속도 : 100[rpm]



(d) 속도 : 150[rpm]

그림 7. 센서 C의 특성 (2[V/div], 1[s/div])

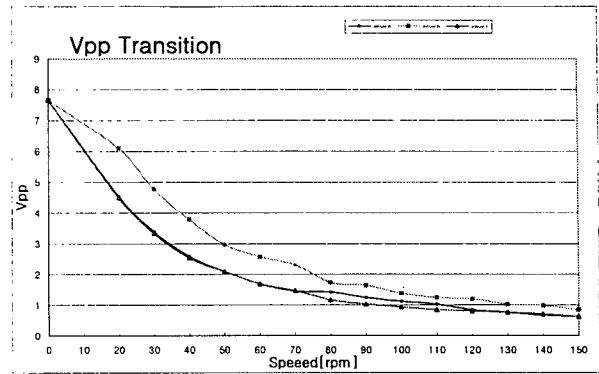


그림 8. 와전류 센서의 특성

4. 결 론

강자성체 물질을 사용하는 구조물들에 발생하는 결함 검출에 대하여 와전류탐상을 이용하는 비파괴검사방법에 대하여 살펴보았다. 강자성체의 결함검출에 적합한 주파수로 500[Hz]를 사용하였으며, 센서, 구동부, 자료취득부 등을 구성하여 센서시스템을 제작하였다. 속도에 대한 효과를 살펴보기 위하여 회전원판을 이용한 실험세트를 제작하여 회전속도를 가변시키면서 실험을 수행하였다. 결함의 검출 능력은 결함이 없는 부분에서의 직류출력전압과 결함이 있는 부분의 직류출력전압의 차이 값(Vpp)으로 나타났다. 속도가 증가할수록 변압기 기전력보다 속도 기전력 효과가 커져서 센서의 결함 검출 능력이 감소함을 보이고 있다. 따라서 와전류 센서의 결함 검출에 있어서 사용 속도를 고려하여 와전류 센서를 개발해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Steven D. Roach, "Designing and Building an Eddy Current Position Sensor", *Sensors Articles*, January 27, 2001.
- [2] Andrea Bernieri, Giovanni Betta, Guglielmo Rubinacci, and Fabio Villone, "A Measurement System Based on Magnetic Sensors for Nondestructive Testing", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 49, No. 2, April 2000.
- [3] H. Kim, and T. Shoji, "Nondestructive Evaluation of Surface Defect Shape and Size by the Induced Current Focusing Potential Drop", *The 71st JSME Spring Annual Meeting Proceeding*, pp. 586-588, 1994.
- [4] V. S. Cecco, "Design and Specifications of a High Saturation Absolute Eddy Current Probe with Internal Reference", *Mat. Eval.* 1994.
- [5] Jack Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing*, Adam Hilger, 1991.
- [6] 이세경 외, *와전류 탐상용 탐촉자 개발*, 과학기술처, 1986.