

## 와전류 센서를 이용한 금속 모재 선별에 관한 연구

이길승\*(부산대학교 지능기계공학과), 김태욱(금오기전 주식회사),  
김화영(부산대학교 기계공학부), 안중환(부산대학교 기계공학부)

A Study on sorting out base metal using eddy current sensor

G.S. Lee(Graduate School, Pusan Nat Univ), T.O. Kim(R&D Center, KOMECO CO., LTD.)  
H.Y. Kim(Pusan Nat Univ), J.H. Ahn(Pusan Nat Univ)

### ABSTRACT

Eddy current sensor is representative instrument measuring gap to base metal and sensing trouble in base metal. The existing eddy current sensor works as measuring variance of sensor coil inductance. But, sensor coil have phenomenon that not only inductance but also real resistance varies in real action. Conductivity and Permeability are main variable in sensor coil varying impedance(inductance, real resistance). By searching relationship between conductivity-permeability and sensor coil impedance, eddy current sensor gain advantage of elevation of accuracy, removal of alignment to each base metal, and continuous sensing to varying base metal.

**Key Words** : Eddy current(와전류), Conductivity (전도도), Permeability (투자율), Sorting out base metal(모재선별), Alignment(조정), Impedance(임피던스), Magnetic flux(자속밀도), Frequency(주파수), Phase(위상)

### 1. 서론

와전류 센서는 금속 모재까지의 정밀 변위 측정 및 모재 내부의 이상을 감지하는 탐상에 쓰이는 대표적 센서이다. 와전류 센서의 기본적 원리는 센서의 코일부에 인가되는 전류의 세기 및 주파수에 비례하여 자기장이 형성되고 그 자기장에 의해 금속 모재의 표면에 와전류가 발생하는데 발생한 와전류에 의해 센서의 코일부에서 발생한 자기장의 방향에 반대 방향의 자기장이 형성되고 결국 센서 코일부의 인피던스의 변화를 초래하고 그 인피던스 변화의 측정으로 센싱하게 된다. 그러나, 와전류 센서 코일부의 인피던스 변화는 금속 모재까지의 거리뿐만 아니라 금속 모재의 물성(전기전도도, 투자율)에도 관계되는 함수로써, 모재의 물성별 측정오차를 보정하기 위한 와전류 센서의 모재별 초기 세팅작업(Alignment)을 요하고 더욱이 서로 다른 모재의 연속 측정을 불가능하게 하였다.

본 연구는 와전류 센서가 금속모재를 선별가능토록하여 와전류 센서의 모재별 세팅작업의 불편을

없애고 센서 측정치의 모재별 오차보정 자료로써의 피드백 정보로써의 활용 및 나아가 연속적으로 변하는 모재의 실시간 측정을 가능케하기 위한 것이다.

### 2. 계측 원리

#### 2.1 일반 와전류 센서

##### 2.1.1 와전류 변위 센서

와전류 변위 센서는 센서와 금속모재 사이의 미소 변위를 측정하는데 쓰이는 대표적 갭센서(Gap Sensor)중의 하나이다. 계측원리는 센싱대상인 금속 모재와의 거리에 따른 와전류센서 코일부의 인덕턴스( $X_L$ )의 변화를 추출(acquisition)→필터링(filtering)→증폭(amplify)→선형화(linearization)→디스플레이(display)등의 과정을 거쳐 계측하게 된다.

##### 2.1.2 와전류 탐상 센서

와전류 탐상 센서는 금속모재 내부의 이상(crack 등)을 감지하는 탐상에 쓰이는 센서로써 계측원리는 센싱대상인 금속모재내의 이상으로 인한 일정한

리에 떨어져 있는 와전류 센서 코일부의 인덕턴스 ( $X_L$ )의 변화를 추출(acquisition)→필터링(filtering)

→증폭(amplify)→선형화(linearization)→디스플레이(display)등의 과정을 거쳐 계측하게 된다

### 2.1.3 문제점

이상과 같이 일반 와전류 센서는 금속모재와의 변위나 금속모재내의 이상에 따른 와전류 센서 코일부의 인덕턴스( $X_L$ )변화량을 추출하여 계측을 수행하였다. 그러나 실제 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화는 인덕턴스( $X_L$ )뿐만 아니라 실저항( $R$ )의 변화도 초래된다. 더욱이 그 변화량( $\Delta X_L, \Delta R$ )은 금속 모재별로 각기 다르다.

따라서, 기존 와전류 센서는 초기 사용시 모재별 초기 세팅작업((Alignment)을 필요로 하였으며 모재별 측정치의 선형구간 상이에 따른 측정치 정도하향 및 각각의 센서별 센싱대상의 제한을 초래하였으며 더욱이 서로다른 모재의 연속 측정을 불가능하게 하였다.

## 2.2 금속 모재 선별 배경이론

본 연구는 상기의 와전류 센서의 문제점을 해결하기 위함이며 그 해결 수단으로써 금속 모재의 특정 물성치와 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화와의 상관관계를 유도하고자 한다. 주요변수로 선정된 금속모재의 물성치는 전기전도도(Electrical Conductivity) 및 투자율(Permeability)이다.

### 2.2.1 전기 전도도(Electrical Conductivity)

와전류 센서는 전자유도의 원리를 이용하므로 전기 전도도의 영향을 많이 받는다. 즉, 전기 전도도가 높을수록 와전류의 생성이 용이해지므로 전기 전도도는 와전류 센서의 중요한 변수가 되며 이 값에 따라 측정치가 달라지게 된다

이때 사용하는 전기전도도의 값은 통상 IACS(International Annealed Copper Standard) 단위를 사용한다. IACS란 단면적 1mm<sup>2</sup>, 길이 1m의 풀립 처리된 순 동(Pure copper)을 20℃에서 측정한 비저항이 0.17241옴(ohm)을 나타낼때의 전도도를 100%로 기준한 것을 말한다. 일반적으로 전도도는  $\sigma$ (sigma)로 표시하고 단위는 % IACS로 나타낸다.

전기 전도도와 저항은 반비례 관계를 갖는다. 즉, 금속모재 성분의 저항값이 클수록 전도도는 감소하게 된다.

비저항과 전도도의 관계를 나타내면 다음 식과 같이 표시할수 있다.

$$\%IACS = 172.41 / \text{비저항}(\text{ohm-cm} \times 10^{-6})$$

### 2.2.2 투자율(Permeability)

와전류 센서에 의해 생성된 금속모재상의 와전류는 센서 코일부에서 생성된 자기장과 반대방향의 자장(Magnetic field)을 생성하는데 이는 금속모재의 투자율(Permeability)에 비례한 자속밀도(Magnetic flux)로 변하여 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화에 영향을 끼친다. 따라서 생성된 와전류량이 동일하더라도 금속모재의 투자율에 따라 와전류 센서의 측정치가 달라지게 된다.

투자율이란 물질이 자화되기 쉬운 정도로 정의될수 있다. 일반적으로 재료의 투자율은  $\mu$ 로 표시하며 자장의 강도 H와 자속밀도 B의 비율로 나타낼수 있다. 즉,

$$\mu = \frac{B}{H}$$

공기의 투자율은 1이며 Cu, Al 등과 같은 비자성체(Non-magnetic)의 투자율은 1,에 가깝지만 Fe, Co, Ni 등과 같은 강자성(Ferromagnetic) 금속에서는 1에 비해 큰 값을 갖는다.

강자성체의 경우 그림(Fig. 1)와 같이 자속밀도가 급증하다가 어느 지점에 이르면 완만해진다. 이를 자기포화(Magnetic saturation)라 한다. 즉 자장의 세기가 증가하여도 자기 포화점 이후 자속밀도는 일정해지며 또한 이때 투자율 역시 일정해진다.

따라서, 와전류 변위 센서의 경우 센서 코일부에서 금속모재가 강자성체이더라도 자기포화가 일어나지 않을 정도의 자장이 생성되도록 설계하여야 하며, 반대로 와전류 탐상 센서의 경우에는 금속모재가 자기포화되어 투자율이 일정해지도록 센서 코일부를 설계한다. 이는 자기포화가 이루어지지 않은 상태에서는 투자율이 변화하기 때문에 이로 인해 와전류 탐상시 각종 결함에 의한 물성의 변화에 따른 전도도의 변화에 의한 신호와 구별하기 곤란하기 때문이다.

반면 비자성체의 경우는 자장의 세기에 따라 자속밀도의 변화는 매우 적으며 포화현상은 볼수 없다.

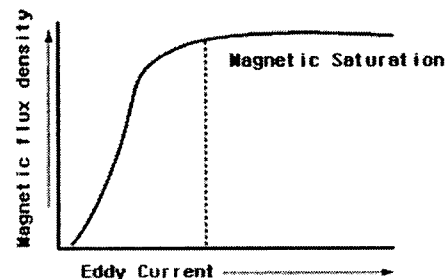


Fig. 1 Variation of magnetic flux density relative to eddy current on ferromagnetic base metal

### 3. 실험

#### 3.1 실험의 목적

본 실험은 금속 소재의 물성치 중 전기전도도(Electrical Conductivity) 및 투자율(Permeability)을 와전류 센서 측정목표인 변위나 금속소재 내부의 결함 외에 코일부의 임피던스 변화와에 영향을 주는 주요변수로 선정, 전도도 및 투자율을 아는 여러 금속소재에 대한 각각의 와전류 센서의 코일부 임피던스 변화량( $\Delta X_L$ ,  $\Delta R$ )을 측정하여 금속소재별 임피던스 변화량의 차이를 밝힘은 물론 현재 연구중인 임피던스 변화와 금속소재의 전도도 및 투자율과의 관계를 밝히는 정보로서 활용하고자 한다.

#### 3.2 실험 방법

임의의 금속소재에 대한 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화량( $\Delta X_L$ ,  $\Delta R$ )을 구하기 위해 공기중(금속소재와의 거리  $\infty$ ) 와전류 센서 코일부의 임피던스를 구하여 초기값으로 삼고, 센서가 임의의 금속소재에 접촉했을 때의 센서 코일부의 임피던스를 구하여 전후값의 비교로 코일부의 인덕턴스 변화량( $\Delta X_L$ )과 실저항( $\Delta R$ )의 변화량을 구하게 된다.

##### 3.1.1 임피던스 크기( $Z$ ) 측정

와전류 센서 코일부의 양단 전압( $v$ )의 측정 및 코일 가진전류 크기( $i$ )에 의해 센서 코일부의 임피던스 크기( $Z$ )는 다음과 같이 간단히 구하여 진다.

$$v = \frac{Z}{i}$$

##### 3.1.2 위상차( $\theta$ ) 측정

센서 코일부에 입력되는 가진전류( $i$ )와 코일부 양단의 전압( $v$ )의 위상차( $\theta$ )를 추출하여 코일부의 임피던스 중 인덕턴스( $X_L$ )와 실저항( $R$ )의 비(ratio)를 구할 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$$

##### 3.1.2 임피던스 변화량 ( $\Delta X_L$ , $\Delta R$ ) 계산

와전류 센서가 공기중(금속소재와의 거리  $\infty$ )일 때의 측정값( $Z_{air}, \theta_{air}$ )과 임의의 금속소재에 접촉했을 때의 측정값( $Z_{metal}, \theta_{metal}$ )의 비교로 센서 코일부의 임피던스 변화량( $\Delta X_L$ ,  $\Delta R$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}$$

$$\Delta R = R_{metal} - R_{air} = Z_{metal} \cdot \cos \theta_{metal} - Z_{air} \cdot \cos \theta_{air}$$

$$\Delta X_L = X_{L,metal} - X_{L,air} = Z_{metal} \cdot \sin \theta_{metal} - Z_{air} \cdot \sin \theta_{air}$$

### 3.3 실험 장치 구성

#### 3.1 와전류 센서

##### 3.1.1 가진주파수( $f$ ) 선정

금속소재의 내부의 이상(crack, heterogenous, etc) 등으로 인한 외란의 영향을 줄이기 위해서 금속소재에 생성되는 와전류의 침투깊이( $\delta$ )가 깊지 않아야 한다. 와전류 침투깊이는 다음식과 같고 주파수별 침투깊이를 표현하면 그림(Fig. 2)과 같다. 따라서 본 실험에서는 적정 침투깊이 및 신호처리의 용이를 고려하여 센서 코일부에의 가진 주파수를 300 KHz 로 선정하였다.

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

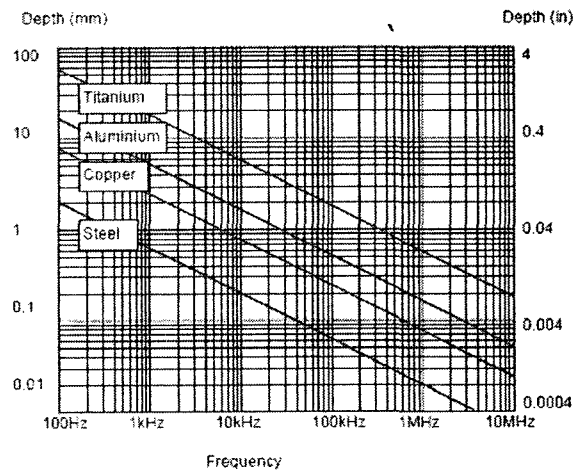


Fig. 2 Depth of eddy current relative to frequency

##### 3.1.2 센서 코일부 용량( $L$ ) 선정

센서 코일부 용량( $L$ )은 인가전류의 가진 주파수( $f = 300\text{KHz}$ ) 및 실험장치의 신호처리의 용이( $A=3V$ ,  $B=10\text{mA}$ )를 고려하여 다음식에 의해  $160\mu H$  로 선정하였다.

$$E = -L \times \frac{di}{dt}$$

$$E = A \cdot \sin \omega t$$

$$i = B \cdot \cos \omega t$$

$$\frac{di}{dt} = -B \cdot \omega \cdot \sin \omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

### 3.2 계측 및 신호처리

센서 코일부의 임피던스 크기( $Z$ ) 및 위상차( $\theta$ ) 측정에 사용되는 신호처리 개요는 다음 그림(Fig. 3)과 같다.



Fig. 3 Diagram of signal process

계측 및 신호처리를 수행하기 위한 개략적인 회로의 구성은 다음 그림(Fig. 4)과 같다.



Fig. 4 Circuit of signal data acquisition

### 3.3 실험 결과

#### 3.3.1 전도도와 임피던스

금속모재의 전도도에 따른 센서 코일부의 임피던스 변화를 보면 0%의 전도도 즉, 와전류 센서 코일부 근처에 금속모재가 없는 공심코일 상태에서부터 100% IACS 전도도까지 임피던스의 변화를 측정하여 각 점을 연결하면 다음 그림(Fig. 5)과 같은 궤적이 얻어지는데 전도도가 증가 할 수록 궤적의 아래쪽을 향함( $\Delta X_L$  증가)을 알 수 있다.

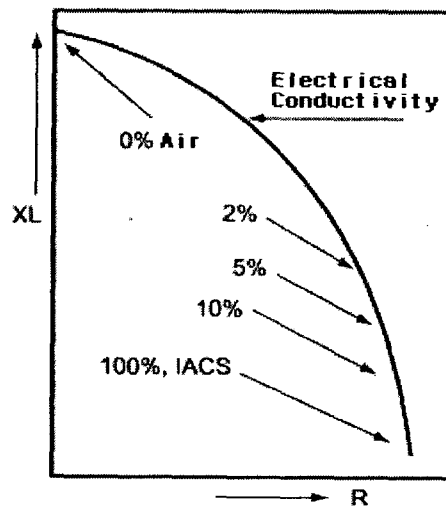


Fig. 5 Variation of prove coil Impedance relative to base metal material Electrical Conductivity

#### 3.3.2 투자율과 임피던스

금속모재의 투자율에 따른 센서 코일부의 임피던스 변화를 보면 금속모재가 자성체인 경우와 비자성체인 경우의 인덕턴스 변화( $\Delta X_L$ )는 서로 상반된다. 즉, 투자율이 큰 자성체에 와전류 센서를 가까이 했을 경우 센서 코일부의 인덕턴스는 증가(+), 반대로 비자성체에 와전류 센서를 가까이 했을 경우 센서 코일부의 인덕턴스는 감소(-)한다.

#### 3.3.2 금속모재별 임피던스 변화량

와전류 센서 코일부의 금속모재별 임피던스 변화( $\Delta X_L, \Delta R$ )를 표현하면 다음 그림(Fig. 6)과 같다. 비자성체 금속모재의 투자율은 공기(1.0)와 비슷한 값으로 비자성체에 대한 센서 코일부의 임피던스 변화는 전도도만이 주요변수로서 전도도가 증가 할 수록 인덕턴스의 감소(-)량이 커짐을 알 수 있다.

반면, 자성체 금속소재의 투자율은 공기(1.0)와 큰 격차를 보이며 특히 페라이트(1000)의 경우가 가장 큰 인덕턴스의 증가(+)를 보였다. 따라서 자성체에 대한 센서 코일부의 임피던스 변화는 투자율이 주요변수이며 투자율이 증가 할 수록 인덕턴스의 증가(+)량이 커짐을 알 수 있다.

실저항의 변화( $\Delta R$ )는 자성체, 비자성체의 구분 없이 일률적으로 증가(+)한다.

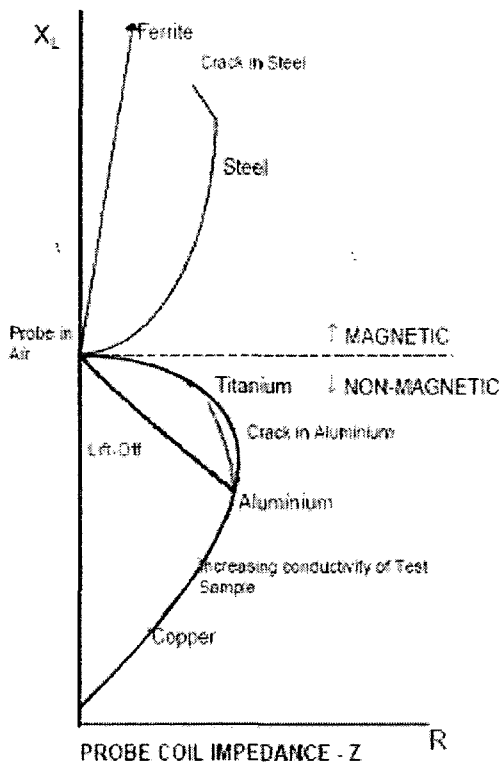


Fig. 6 Variation of probe coil Impedance relative to base metal material

#### 4. 결론 및 고찰

실험결과에서 보이 듯 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화는 인덕턴스( $X_L$ )뿐만 아니라 실저항( $R$ )의 변화도 존재하며 더욱이 그 변화정도는 금속소재에 따라 다른데 그 주요변수는 금속소재의 물성치 중 전도도( $\sigma$ ) 및 투자율( $\mu$ ) 이었다.

따라서 금속소재의 전도도와 투자율에 의한 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화 관계를 실험을 통한 DATA-Table 화 및 신호해석이나 모델링을 통한 수학적 관계식을 구하면 와전류 센서가 금속소재의 전도도 및 투자율을 유추할 수 있으며 금속소재를 선별가능 하도록 할 수 있다. 또한 와전류 센서의 모재별 세팅작업의 불편을 없애고 센서 측정치의 모재별 오차보정 자료로써의 피드백 정보로써의 활용에 의한 측정정도의 향상 및 나아가 연속적으로 변하는 모재의 실시간 측정이 가능함을 알 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 현재 금속소재의 전도도와 투자율에 의한 와전류 센서 코일부의 임피던스 변화 관계를 수학적 모델링 중이며 그의 영향을 미치는 요인으로 온도, 열처리정도, 화학 조성, 결정립의 크기, 정도 및 잔류응력등에 관한 내용은 본 연구의 추후 과정에서 또한 다루고자 한다.

#### 참고문헌

1. 김철웅, 송삼홍, 밑 FRP 튜브의 결함 검출을 위한 와전류 탐상기법 개발? ,한국 정밀공학회 추계학술대회는문집, pp. 595-599, 2003
2. 정용무, 와전류 탐상법? 비파괴검사학회지, 제 13 권, 제 3 호, pp. 39-45, 1993
3. 이계완, 한승룡, 와전류법을 이용한 강의 표면경화층 깊이의 비파괴적 측정? 비파괴검사학회지, 제 11 권, 제 1 호, pp. 38-43, 1991
4. 성제중, 신용훈, 자기포화를 이용한 강자성체의 와전류검사장비 개발? 비파괴검사학회지, 제 23 권, 제 4 호, pp. 356-363, 2003
5. 성제중, 서동만, 헬름홀츠 코일을 이용한 강자성체의 와전류검사? 한국비파괴검사학회 추계학술대회는문집, pp. 11-17, 2003