

논문 97-6-2-02

## 비자성 연선도체의 단면적을 검출하기 위한 솔레노이드 와전류 센서의 임피던스 해석 및 실험적 연구

金成德\*, 沈在明\*\*

### Impedance Analysis and Experimental Study of a Solenoid Eddy Current Sensor to Detect the Cross-sectional Area of Non-ferromagnetic Stranded Conductors

S. D. Kim\*, J. M. Shim\*\*

#### 요 약

이 논문에서는 비자성 연선도체의 단면적을 검출하는 솔레노이드 센서의 임피던스 해석이 다루워졌다. 도전체의 전기·자기적 특성들을 검출하기 위하여, 관통형 코일로 비파괴검사 와전류 센서를 선택하였다. Maxwell 방정식을 풀어서 도체봉을 가진 센서의 규격화 임피던스 응답이 모델링되고 그 결과들이 연선에 확장되었다. 연선구조에 미치는 기하학적 성질이 검토되고 수치 해석과 실험결과 또한 주어진다.

#### Abstract

Impedance analysis of a Solenoid sensor to detect the cross-sectional area of non-ferromagnetic stranded conductors is described in this paper. To inspect electromagnetic characteristics of conductive materials, a nondestructive test eddy current sensor with an encircling coil is chosen. As solving Maxwell equation, normalized impedance response of the sensor within a conducting rod is modeled and the results are expanded to the stranded wires. Geometrical property affecting on stranded structure is considered and a numerical and experimental study is also presented.

#### I. 서론

각종 산업구조물, 설비 및 기기가 장기간 사용되어 노후화되거나 대기오염 등 공해에 의해 부식되므로 이들에 대한 지속적인 안전진단이 중요하게 되었다. 특

히, 와이어로프를 사용하는 승강기, 리프트, 하역장비 등은 물론, 산업설비에 시설되어 있는 각종 배관과 강선재, 전력선 등 수많은 시설재들에 대한 검사 및 보수가 요구되고 있다.

프로브 코일(probe coil)이나 관통형 코일(encircling coil)을 사용하는 와전류법(eddy current method)은 도전성 금속의 비파괴 검사(nondestructive testing)에 광범위하게 이용되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 실제로, 코일의 구조나 전원주파수는 검사할 도체의 전기·자기적 성질과 단면적, 도전율, 투자율 또는 결합 등의 측정대상에 따라 실험

\* 대전산업대학교 전자공학과  
(Dept. of Electronic Engineering, Tae-jon National University of Technology)

\*\* 대전산업대학교 전기공학과  
(Dept. of Electric Engineering, Tae-jon National University of Technology)

<접수일자 : 1997년 2월 3일>

적인 방법으로 선정하였다. 검사도체에 발생하는 와전류 분포는 센서와 시료의 여러 가지 물리적 특성에 의해 영향을 받으므로 시료의 자기적 성질의 변화를 센서의 전기적 파라미터로 해석하기 쉽지 않다. 무한장 솔레노이드 코일(Solenoid coil)과 무한장의 원형도체봉의 전기적인 해석과 실험결과는 여러 학자들에 의해 연구되고 실용화되어 왔다<sup>[3-5]</sup>. 송강기나 하역장비에 사용하는 와이어로프의 단면적이나 결함은 저주파에서 포화자계에 의해 측정할 수 있으나<sup>[6,7]</sup> 연선의 와전류 효과가 해석되지 않았고 시료를 포화시키기 위한 전원장치, 탈자장치 등의 설계가 간단하지 않다. 또한, 송·배전선 등과 같은 연선구조의 도체들의 단면적 변화 등에 대한 해석과 실험적인 연구는 미미한 실정이다<sup>[8,9]</sup>. 그 이유는 연선들을 구성하고 있는 각 소선들의 기계적인 접촉에 의한 와전류 분포를 해석하기 쉽지 않기 때문이다.

도체의 기계적인 마모나 단선 그리고 환경적인 요인에 의한 부식과 열화 등에 의한 단면적의 변화는 솔레노이드 센서의 임피던스 변화로 판독할 수 있다. 본 연구에서는 와전류법을 이용하여 비자성 연선도체(non-ferromagnetic stranded conductors)의 단면적을 측정하는 센서의 임피던스를 해석하고 이에 대한 수치해석과 실험적 연구를 수행하였다. 무한장 솔레노이드 센서의 규격화 임피던스(normalized impedance)를 도입하고 이에 대한 성질들을 기술한다. 이 결과를 토대로 연선체의 임피던스 특성을 비교하고 소선의 단면적을 측정하기 위한 솔레노이드 센서의 전기·자기적 특성이 검토된다. 센서를 제작하여 실험하고 제시된 결과들의 타당성을 입증한다. 또한, 이 결과들이 배전선과 같은 비자성 연선도체의 단면적을 측정하는데 유용함을 밝혔다.

## II. 솔레노이드 센서의 전기·자기적 해석

### 2.1 센서구조와 자속분포

그림 2.1과 같이 솔레노이드 센서를 구성하여 코일 내에 연선 금속도체(metallic conductor)를 삽입하고 주파수가  $f$ 인 교번자속을 인가한다. 솔레노이드의 임피던스 특성을 검토하기 위하여 측정하는 대상금속은 전기적인 도체로 비자성체(non-ferromagnetic rod)이다. 연선 중 1개 소선의 반경은  $b$ 이고, 이 때 이 도체의 도전율을  $\sigma$ , 비투자율은  $\mu_r=1$ 이다. 또한, 센서의 평균반경을  $a$ 라 하고 보빈의 길이를  $l$ 이라 한다.

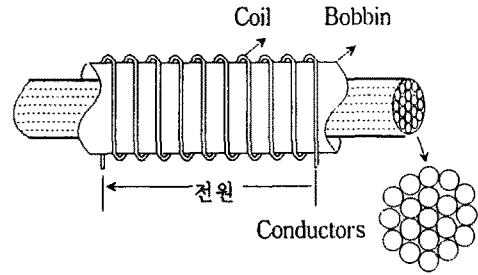


그림 2.1 솔레노이드 와전류센서의 구조  
Fig. 2.1 Schematic diagram of a Solenoid eddy current sensor

우선, 시험도체를 1개의 소선으로 가정하여 센서의 임피던스를 해석해 보자. 실효치가  $I$ 인 교류전류를 코일에 흘리면 중심에서는 평등자계  $H=nI$ 가 형성된다. 이 때, 내부의 중심자속밀도는  $B_0=\mu_0 H$ 이다. 여기서  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율로  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ 이다.

한편, 센서내에 금속도체를 삽입하면 내부자속밀도는 다음식으로 주어진다<sup>[3]</sup>.

$$\nabla^2 B = \mu\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$

이 때  $\mu=\mu_0\mu_r$ 이고 총코일수를  $N$ 이라 할 때,  $n$ 은 단위길이당 코일수로  $n=N/l$ 이며 도체 내부의 자속밀도  $B=\mu H$ 이다. 교번전류를 인가하는 경우에  $\partial B/\partial t=j\omega B$ 의 관계가 성립하므로 식 (2.1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 B = -k^2 B \quad (2.2)$$

여기서  $k^2=-j\omega\mu\sigma$ ,  $|k|=\sqrt{\omega\mu\sigma}=\delta/\sqrt{2}$ 이다. 이 때  $\delta$ 는 교번자속의 표준침투깊이(standard penetration depth)으로 다음과 같이 정의된다<sup>[10]</sup>.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

표준침투깊이는 자속이 도체 표면에서  $1/e$ , 즉, 37[%] 감쇠되는 깊이로 자기표피효과(magnetic skin effect)를 나타내는 척도이다.

그림 2.2와 같이 도체와 센서축을  $z$ 라 하고 도체의 중심에서  $r$ 점의 자속밀도에 대한 Maxwell 방정식은 식 (2.2)에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} + k^2 B = 0 \quad (2.4)$$

이 식은 0차의 Bessel 방정식(Bessel equation of the zero order)의 변형형태로 일반해는 다음과 같은 형태로 구해진다<sup>[3]</sup>.

$$B = K_1 J_0(kr) \quad (2.5)$$

여기서  $K_1$ 은 임의의 상수이고  $J_0$ 는 0차 제1종 Bessel 함수(1st kind Bessel function with zero order)이다.  $r$ 이 도체의 반경과 같은 경우에  $B = \mu_r B_0$ 이므로, 경계 조건  $\mu_r B_0 = K_1 J_0(kb)$ 을 사용하여  $K_1$ 을 소거하면 식 (2.5)는

$$B = \mu_r B_0 \frac{J_0(kr)}{J_0(kb)} \quad (2.6)$$

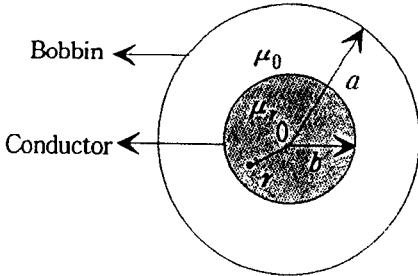


그림 2.2 솔레노이드 센서의 단면  
Fig. 2.2 Cross sectional area of a Solenoid sensor.

한편, 소선 1개를 지나는 총자속은 도체의 평균자속을  $\bar{B}$ 라 할 때

$$\Phi = 2\pi \int_0^b B r dr = \pi b^2 \bar{B} \quad (2.7)$$

식 (2.6)과 (2.7)로부터 평균자속밀도는 다음과 같이 구해진다.

$$\bar{B} = \frac{2\mu_r B_0}{kb} \frac{J_1(kb)}{J_0(kb)} \quad (2.8)$$

여기서  $J_1$ 은 1차 제1종 Bessel 함수를 나타낸다.

## 2.2 도체의 규격화 임피던스 해석

공기 중에서 자속은 감소되지 않기 때문에 공심코일인 경우에 와전류는 발생하지 않고 센서의 임피던스는 다음과 같이 기술된다.

$$\dot{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (2.9)$$

여기서 저항  $R_0$ 은 동선으로 구성된 코일의 고유성분으로 비교적 적은 값이다. 일반적으로 공심저항은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_0 &= R_{dc}(1+k_r) \\ &= \rho_c \frac{\ell_c}{\pi a^2} (1+k_r) \end{aligned} \quad (2.10)$$

여기서  $\rho_c$ ,  $\ell_c$ ,  $a$ 는 각각 코일의 고유저항, 길이 및 반경을 나타내고  $k_r$ 은 코일의 표피효과에 의한 계수를 나타낸다. 일반적으로 주파수가 높으면 이 값은 증가된다<sup>[11]</sup>.

공심에서의 인덕턴스는

$$L_0 = k_n \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (2.11)$$

여기서  $A = \pi a^2$ , 및  $\ell$ 은 각각 센서의 평균단면적과 길이를 나타낸다. 이 때  $k_n$ ( $k_n \leq 1$ )은 센서길이와 직경에 의해 주어지는 계수로  $\ell/a > 10$ 이면 대략 1이다.

한편, 코일내에 도체를 삽입하면 도체표면에 와전류가 발생하고 이 전류에 의한 자속은 주자속을 방해하는 방향으로 발생한다. 도체는 솔레노이드 센서를 1차로 가정한 경우에 변압기의 2차측처럼 작용하여 센서의 임피던스를 변화시킨다. 이 변화된 임피던스를 다음과 같이 가정하자.

$$\dot{Z} = R + j\omega L \quad (2.12)$$

이 때 저항은 코일저항을 포함하여 전류손실(current loss), 히스테리시스 손실(hysteresis loss) 등에 의해 결정되며 인덕턴스도 도체의 상대적 위치나 성질 등에 의한 자기표피효과에 따라 변화된다. 여기서 도체와 센서의 단면적 비, 즉, 충전율(fill factor)을 다음과 같이 정의한다.

$$\eta = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \quad (2.13)$$

그림 2.2에서 공극(air gap)의 자속을  $\Phi_G$ 라 하면 센서의 단면에서 발생하는 총자속  $\Phi_T$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}\Phi_T &= \Phi + \Phi_G \\ &= \pi b^2 \bar{B} + \pi(a^2 - b^2)B_0 \\ &\equiv \pi a^2 \bar{B}_T\end{aligned}\quad (2.14)$$

여기서  $\bar{B}_T$ 는 총자속  $\Phi_T$ 에 대응하는 평균자속밀도이다. 결국, 식 (2.14)의 양변을 공심자속밀도  $B_0$ 로 나누어  $\bar{B}_T/B_0 \equiv \hat{\mu}_T$ 에 대해 정리하면

$$\hat{\mu}_T = \eta \hat{\mu} + 1 - \eta \quad (2.15)$$

이 식에서  $\hat{\mu} = \hat{B}/B_0$ 는 공심코일의 자속밀도와 도체 내부의 평균자속밀도 사이의 비이므로 의사유효비투자율(pseudo effective relative permeability)로 정의할 수 있다. 이 값은 식 (2.8)로부터

$$\hat{\mu} = \frac{2\mu_r}{kb} \frac{J_1(kb)}{J_0(kb)} \quad (2.16)$$

여기서  $kb$ 는 복소변수이므로  $\hat{\mu} \equiv \hat{\mu}_R - j\hat{\mu}_I$ 이라 가정하여 식 (2.15)에 대입하면

$$\hat{\mu}_T = \eta \hat{\mu}_R + 1 - \eta - j\eta \hat{\mu}_I \quad (2.17)$$

한편, 슬레노이드 코일의 임피던스는 자속쇄교수에 비례하므로 공심 임피던스와 도체를 삽입한 경우에 임피던스의 비는 공심에서의 코일저항을 작다고 가정하면<sup>[1,3,10]</sup>

$$\begin{aligned}\hat{\mu}_T &= \frac{\hat{Z}}{\hat{Z}_0} \\ &\equiv \frac{\omega L}{\omega L_0} - j \frac{R - R_0}{\omega L_0}\end{aligned}\quad (2.18)$$

이 식은 센서의 규격화 임피던스(normalized impedance)이며 무차원으로 주어진다. 따라서 식 (2.17)과 (2.18)의 관계로부터

$$\omega L/\omega L_0 = \eta \hat{\mu}_R + 1 - \eta \quad (2.19)$$

$$(R - R_0)/\omega L_0 = \eta \hat{\mu}_I \quad (2.20)$$

결국, 원형도체를 시료로 사용하였을 경우에 시료의 단면적, 도전율이나 투자율, 결합등은 식 (2.19)와

(2.20)에 의한 규격화 임피던스로부터 추정할 수 있다. 일반적으로 금속도체의 성질을 슬레노이드 센서의 비파괴 검사법으로 측정하는 장치들은 기본적으로 이 식들을 이용한다<sup>[2,3]</sup>. 센서의 임피던스가 규격화되어 있으므로 규격화 리액턴스, 식 (2.19)와 규격화 저항, 식 (2.20)은 보빈의 반경과 같은 구조에 무관하다.

### 2.3 연선의 규격화 임피던스 해석

만약, 소선  $m$ 개를 센서에 삽입하는 경우에는 도체를 제외한 공극단면적은

$$A_G = \pi(a^2 - mb^2) \quad (2.21)$$

이다. 소선간에 발생하는 와전류가 서로 영향이 없다고 가정하면 소선 1개당 자속은 식 (2.7)로 주어지므로 연선인 경우에 총자속은

$$\begin{aligned}\Phi_T &= m\Phi + \Phi_G \\ &= m\pi b^2 \bar{B} + \pi(a^2 - mb^2)B_0 \\ &= \pi a^2 \bar{B}_T\end{aligned}\quad (2.22)$$

따라서 식 (2.22)에서 유효비투자율  $\hat{\mu}_T = \bar{B}_T/B_0$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\mu}_T = m\eta \hat{\mu} + 1 - m\eta \quad (2.23)$$

여기서 식 (2.16)~(2.18)의 관계를 이용하면

$$\omega L/\omega L_0 = m\eta \hat{\mu}_R + 1 - m\eta \quad (2.24)$$

$$(R - R_0)/\omega L_0 = m\eta \hat{\mu}_I \quad (2.25)$$

식 (2.24)와 (2.25)를 식 (2.19)와 (2.20)과 비교해보면 규격화 저항 및 리액턴스는 소선수에 비례하는 것을 알 수 있다. 이 식의 결과는 연선의 총전율을 소선수  $m$ 배로 취한 것과 같다. 따라서 연선의 경우는 총 소선수의 등가단면적에 대응하는 평균직경을 가진 단일 도체로 시험하는 것처럼 보인다. 그러나  $m\hat{\mu} = m(\hat{\mu}_R - j\hat{\mu}_I)$ 의 관계를 식 (2.16)에 적용하면

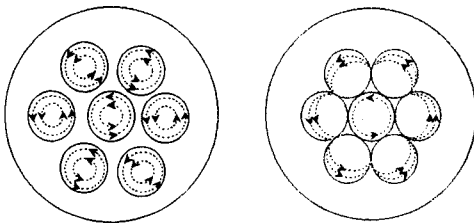
$$m \frac{J_1(kb)}{J_0(kb)} \neq \frac{J_1(kb_e)}{J_0(kb_e)} \quad (2.26)$$

여기서  $b_e$ 는 연선 전체단면적에  $m\pi b^2 = \pi b_e^2$ 에 의한 등가반경(equivalent radius)를 나타낸다.

2.4 연선효과

2.3절의 해석은 소선과 소선 사이가 전기적으로 절연되어 있어서 전원자속에 의하여 유기되는 와전류가 각 소선내에서만 흐르는 경우에만 적용할 수 있다. 이와 같은 예는 그림 2.3(a)에서처럼 각 소선이 공기 중에서 접촉되지 않는 경우나 소선도체가 절연피복에 의하여 단절된 경우이다.

전력계통의 전선도체는 소선 자체가 전도성이 높은 동이나 알루미늄 연선이 사용된다. 또한, 와이어로프는 내식성을 강화하기 위하여 표면에 아연을 도금하고 이 금속은 양호한 전기 전도도를 갖는다. 이러한 종류의 연선재의 특성을 측정하기 위하여 솔레노이드 와전류센서를 사용하는 경우에는 구조 상 소선들이 밀착되어 있으므로 금속도체 각 소선들 사이의 와전류는 독립적으로 발생되지 않는다. 따라서, 소선 내에서 발생하는 와전류는 그림 2.3(b)와 같이 도체 표면의 환류를 이루게 된다. 이러한 현상은 내부소선의 와전류를 감소시킬 뿐만 아니라 소선의 내표면의 와전류도 역시 줄어든다. 따라서, 2.3절에서와 같이 각 소선의 효과를  $m$ 배한 결과는 그대로 유지되지 않는다.



(a) 단절된 전류분포 (b) 내선전류분포

그림 2.3 소선에서 발생된 와전류의 특성  
Fig. 2.3 Characteristics of eddy current generated in strands.

물론, 인장하중을 높이기 위하여 연선재는 꼬임구조로 제조하는 경우가 많다. 그러나, 연선의 접촉면이 경우에 따라 표면에 나타난 와전류가 외표면에만 흐르지 않고 내부에 자속이 어느 정도 침투하게 된다. 따라서, 제조방법에 의해 연선재의 접촉에 의한 와전류 감소를 예측하는 것은 쉽지 않다. 그러나, 전기적인 절연체의 구성은 용이하지만 완전하게 자속이 차폐 되지 않기 때문에 실험에 의하여 접촉에 의한 임피던스 변화율을 추정할 수 있다.

III. 연선과 단일도체의 수치해석과 실험

3.1 규격화 임피던스의 수치해석

2.2절에서 구한 수치해석 결과를 검토하기 위하여 경알루미늄 소선 1개의 직경을  $b=2.6[\text{mm}]$ 이라 하고  $\sigma=35[\text{MS/m}]$ 이라 가정하였다, 보빈의 평균반경을  $a=13.25[\text{mm}]$ 이라 하고 길이는 무한장이라 가정한다. 소선은 7개를 사용하고 이 경우에 소선의 접촉에 의한 와전류분포의 변화는 고려하지 않았다.

소선 7개를 삽입한 경우의 충전율은  $\eta=6.74[\%]$ 로 이 단면적에 대응하는 단일봉 전체단면적에 대한 반경은  $b_e=3.44[\text{mm}]$ 이다. 그림 3.1은 소선 1~7개를 삽입한 경우와 대응 충전율을 가진 도체봉에 대한 정규화 와 임피던스를 나타낸다.

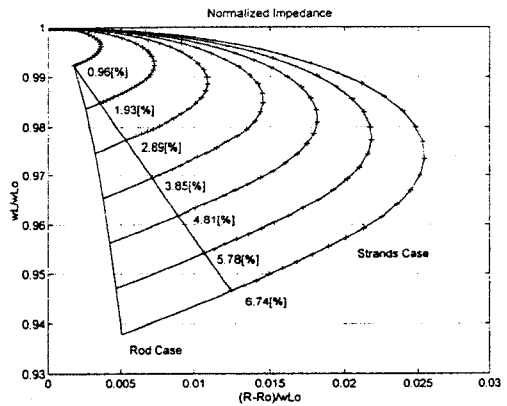


그림 3.1 연선과 단일봉인 경우의 규격화 임피던스  
Fig. 3.1 Normalized impedance for stranded conductors and a single rod.

일반적으로 자기피포효과에 의하여 도체의 자속은 표면적에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 연선인 경우는 등가단면적의 단일도체를 사용하는 경우보다 임피던스 변화가 작다. 그러나 주파수를 증가시켜 자속이 도체의 표면에서 전혀 침투하지 못하면 연선과 등가단면적인 도체에 관계없이 내부는 동공상태가되어 공극에 의한 규격화 임피던스만이 존재한다. 이 때 특성은 2가지 경우가 완전히 일치한다. 그러나, 저주파로 갈수록 연선과 단일도체 사이의 임피던스 특성은 현저하게 달라진다.

한편, 고주파( $f=\infty$ )에서는 소선 1개의 충전율을  $\eta$ 라

가정할 경우에 규격화 저항과 리액턴스는  $(0,1-m\eta)$ 에 수렴한다. 따라서, 고주파수를 이용하면 소선의 단면적의 변화를 검출할 수 있다.

3.2 수치해석과 연선의 실험

II장의 임피던스 해석과 3.1절의 수치결과의 타당성을 검토하기 위하여 3.1절에서 가정한 알루미늄 소선을 사용하고 보빈의 길이가 97[mm]인 센서를 구성하였다. 이 때 소선을 증가시켜 가면서 임피던스 분석기 HP4194A로 저항 및 리액턴스를 측정하였다. 전원 주파수는 250[Hz]에서 100[kHz]까지 스위프하여 규격화 임피던스를 구한 결과가 그림 3.2이다. 이 그림에서 점선은 각 경우의 수치해석 결과로 이론치와 측정치가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 이 경우에 오차는 식 (2.11)에서와 같은 계수  $k_n$ 에 의해 초래되는 현상으로 실험치는 0.922이다. 그러나 이러한 오차도 주파수가 증가할수록 감소된다.

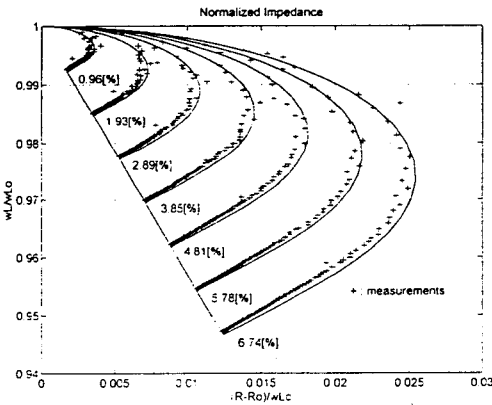


그림 3.2 수치해석 및 실험결과  
Fig. 3.2 Numerical and experimental results.

그림 3.2에서 보면 저주파에서는 측정잡음이 증가되지만 비자성체의 단면적을 측정하는 경우에는 고주파 전원이 사용되므로 잡음에 대한 측정감도는 문제되지 않는다. 또한, 고주파에서 충전율에 거의 비례하는 규격화 임피던스 특성을 확인할 수 있다.

3.3 단면적의 추정방법

그림 3.3(a)는 그림 3.2에 있어서 주파수 100[kHz]에서의 측정값으로부터 계산된 각 소선의 규격화 임피

던스 값에서 좌표 (0,1)까지의 거리  $p$ 와 충전율  $\eta$ [%]의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 2 변수 사이의 상관 계수(correlation coefficient)는 정확히 1이 된다. 이 때 충전율의 추정함수는 다음과 같다.

$$\hat{\eta}_p = 123.2217p + 0.0353 \quad (3.1)$$

여기서  $\hat{\eta}_p$ [%]는 추정 충전율이다. 따라서 소선을 삽입한 경우에 센서의 저항 및 리액턴스(또는 임피던스와 위상)를 측정하여 이에 대응하는 크기  $p$ 를 계산하면 식 (3.1)을 사용하여 소선의 충전율을 구할 수 있다.

일반적으로 소선의 단면적을 추정하기 위해서는 주파수를 가능한 한 높여서 리액턴스 성분을 측정하거나(그림 3.1 참조) 또는 식 (3.1)을 이용한다. 그렇지만, 고주파 전원을 사용하는 경우에 회로소자의 설계상 한계가 있고 식 (3.1)을 이용하려면 저항 및 리액턴스를 동시에 측정하여야 하므로 회로설계가 복잡해진다. 그렇지만, 그림 3.1의 특성을 자세히 관찰하면 임피던스(이에 대응하는 센서의 단자전압)에 의해 충전율을 추정할 수 있다. 그림 3.3(b)는 100[kHz]에서의 임피던스와 충전율 사이의 관계를 보여 준다. 이 결과에서 보면 임피던스와 충전율 사이에는 부의 상관계수 -1로 나타나고 추정 충전율은

$$\hat{\eta}_z = -2.3901Z + 127.5445 \quad (3.2)$$

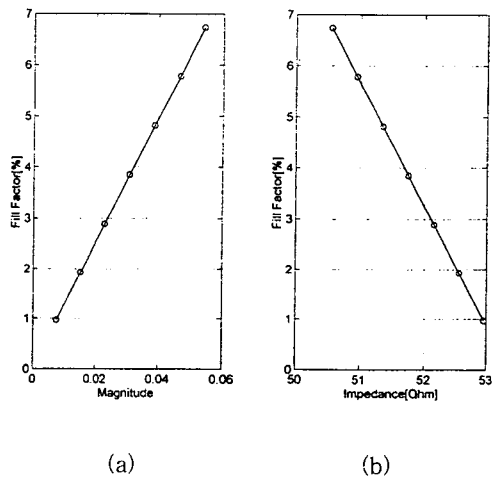


그림 3.3 단면적과 규격화 임피던스  
Fig. 3.3 Cross-sectional area of conductor and normalized impedance of a sensor.

만약, 정전류원의 전류가 주어진 주파수에 있어서  $I$  라 하면, 센서의 측정단자전압은  $V=ZI$ 이므로 식 (3.2)의  $Z$  대신에  $V/I$ 를 사용하면 된다. 따라서, 센서의 임피던스나 단자전압을 측정하면 단면적이나 소선의 직경을 추정할 수 있다.

### 3.4 연선효과

3.1~3.3절에서는 단일소선과 이 소선의 개수를 증가시킨 경우의 특성을 검토하였다. 이 경우 연선은 그림 2.3(a)에서와 같이 소선들이 서로 접촉하지 않거나 전기적으로 절연되어 있다고 가정하였다. 원자로의 연료봉(fuel element)와 같은 도체봉은 서로 접촉하지 않은 경우이며 통신케이블과 같은 경우는 소선들이 절연되어 있으므로 이 결과들을 그대로 적용할 수 있다. 그렇지만, 고압 배전선과 같은 예는 연선이 꼬여 있는 구조로 II장의 해석결과에 편차가 나타난다. 이 경우는 기준시료(reference sample)과 대상시료의 특성 사이의 관계로부터 보정계수(calibration constant)를 구하여 적용할 수 있다.

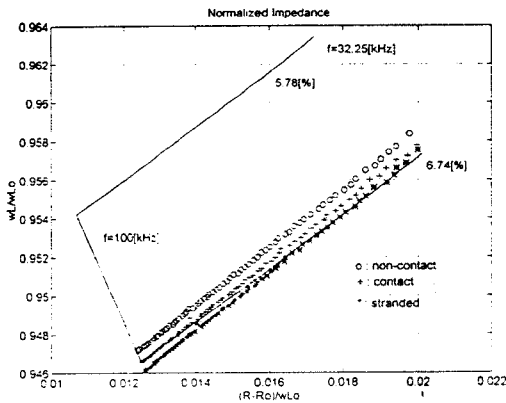


그림 3.4 연선의 구조상 특성  
Fig. 3.4 Structured characteristics for stranded wires.

그림 3.4는 그 예로서 동일 경알루미늄 소선 7개를 'o'은 그림 2.3(a)와 같이 분리구조, '+'는 그림 2.3(b)와 같은 접촉구조인 경우이고 '\*'은 꼬임구조에 대해 측정된 결과이다. 2.4절에서 설명한 바와 같이 와전류의 발생은 분리구조, 접촉구조와 꼬임구조에 따라 약간의 편차가 나타난다. 그러나 이러한 편차는 소선 1개

의 충전율에 비교하여 매우 적으며 따라서, 측정 도체의 기준값들로부터 정확한 보정계수를 구한 경우에는 단면적 측정값도가 저하되지 않을 것이라 추측된다.

## IV. 결론

솔레노이드 코일은 도전성 금속의 전기·자기적 성질에 따라 임피던스가 변화된다. 이러한 변화를 이용하면 도체의 단면적, 도전율과 투자율 등이 정량화될 수 있다. 이 연구는 연선도체의 단면적 변화를 검출하기 위한 솔레노이드 센서의 임피던스 해석과 실험이다. 와전류에 의한 자속분포를 Maxwell 방정식을 이용하여 유도하고 이 결과를 연선구조로 확장하였다. 제시된 결과들의 타당성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 실제 경알루미늄 연선을 사용하여 저항과 리액턴스를 측정된 규격화 임피던스가 비교되었다. 그 결과 규격화 임피던스 해석결과가 연선도체의 단면적을 추정하는데 이용될 수 있음을 확인하였다. 또한, 실험을 통하여 임피던스에 미치는 기하학적 성질과 꼬인 연선의 임피던스 특성도 검토되었다.

## 참고문헌

- [1] Eddy Current Characterization of Materials and Structures, ASTM Special Technical Publication, American Society For Testing and Materials, 1981.
- [2] Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed., Vol. 4, Electromagnetic Testing, American Society For Testing and Materials, 1981.
- [3] J. Blitz, Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, Adam Hilger, 1991.
- [4] J. Blitz, "Prediction of impedance components of eddy current coils using PC", NDT International, Vol. 22, No. 1, pp.3~6, 1990.
- [5] F. Thollon, B. Lebrun, N. Burais and Y. Jayet, "Numerical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws", NDT International, Vol. 28, No. 2, pp. 92~102, 1995.
- [6] H.R. Weischdel, "The inspection of wire ropes in service : A critical review", Material

- Evaluation, Vol. 43, No. 13, pp.1592~1605, 1985.
- [7] K. Tsukuda, K. Hanasaki and Y. Fujinaka, "腐蝕 한 鋼線 및 와이어로프의 長斷面積 變化의 磁氣的 連續測定", 日本 非破壞檢査, 제41권, 제1호, pp.18~26, 1991.
- [8] J. Sutton and K.G. Lewis, "The detection of internal corrosion in steel reinforced aluminum overhead power line conductors", U.K. Corrosion, pp.343~359, 1986.
- [9] 島田健夫三, 佐藤勇輔, "硬알루미늄燃線 腐蝕劣化 判定裝置의 開發", 日本 非破壞檢査, 제39권, 제9호, pp.807~808, 1990.
- [10] Z. Molttl, "The quantitative relation between true and standard depth of penetration of air-cored probe coils in eddy current testing", NDT Internation, Vol. 23, No.1, pp.11~18, 1990.
- [11] 非破壞檢査便覽[新版], 日本非破壞檢査協會編, 日刊工業新聞社

---

 著 者 紹 介
 

---


**金 成 德**

1951년 10월 1일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년~1991년 호주국립대학(ANU)

객원교수. 1980년~현재 대전산업대학교 전자공학과 교수.


**沈 在 明**

1951년 11월 13일생. 1976년 명지대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1979년 명지대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 명지대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1979년~현재 대전산업대학교 전기공

학과 교수.