

# 가공 배전선의 열화를 검출하기 위한 솔레노이드 와전류 센서의 실험적 연구

(An Experimental Study on a Solenoid Eddy Current Sensor to Inspect Deteriorations in Overhead Distribution Lines)

김 성 덕\*

(Sung-Duck Kim)

## 요 약

이 논문은 가공 배전선에서 단선, 극심한 국부부식이나 아연손실과 같은 열화상태를 검사하기 위하여 솔레노이드 와전류 센서를 이용한 비파괴검사 시스템의 실험적인 연구에 대하여 다룬다. ACSR과 ACSR-OC에 대한 부식기구가 검토되고 코일과 시료의 구조적인 파라미터들을 검사하기 위하여, 솔레노이드 센서의 임피던스도 간단히 해석된다. 정전류원, 신호처리 장치 및 모터 구동장치로 구성된 측정시스템이 제작되었다. 이 장비는 연속적으로 센서 출력을 검출하고 검사 도체의 결함을 추정하는 성능이 있다. 그 결과, 관통형 코일의 와전류 센서가 가공 배전선의 열화에 의한 직경 변화를 효과적으로 추정할 수 있음을 밝혔다.

## Abstract

This paper deals with an experimental study of a nondestructive testing system using a solenoid eddy current sensor to inspect deteriorations in overhead distribution lines, such as broken wires, severe local corrosion or zinc loss. Corrosion mechanism for ACSR and ACSR-OC is discussed and characteristics for a solenoid sensor to inspect the geometrical parameters of the coil and testing materials impedance are briefly analyzed. A measurement system having a constant current source, a signal processing unit and a motor driver is implemented. This instrument has such capabilities as detecting the sensor output and estimating dimensions of the testing conductors, continuously. As a result, it was shown that the eddy current sensor with an encircling coil could effectively estimate the diameter change due to deteriorations in overhead distribution lines.

## 1. 서 론

가공전선(overhead power line)은 대기 중에서 장

기간 운용되기 때문에 열화(deterioration)되어 기계적 인장이 감소될 뿐 아니라 전력손실을 증가시킨다. 특히, 국부부식(local corrosion)에 의하여 도체의 직경이 감소되어 단선되므로써 정전이나 결상사고를 유발하여 전력공급의 지장을 초래한다. 선로의 고장은 주로 외물접촉이나 낙뢰와 같은 자연현상으로 발

\* 정회원 : 대전산업대학교 전자공학과 교수  
접수일자 : 1998. 9. 7.

생되는 경우가 많지만 선재의 열화도 중요한 원인 중 하나다. 도체나 절연피복은 재질, 구조와 설치환경 등에 따라 열화 특성이 다르게 나타난다. 가공전선은 염 화합물이나 질소 화합물 등의 부식성 물질에 의해 발생하는 대기부식(atmospheric corrosion), 이종금속간의 접촉에 의해 나타나는 전해부식(galvanized corrosion), 바람이나 빙설 등에 의한 피로부식(fatigue corrosion) 등이 발생된다[1,2].

전선의 내용수명은 30년으로 정하고 있으나 설치된 환경에 따라 급속하게 부식되는 경우가 있어 실제수명은 설계수명보다 현저하게 단축될 수도 있다. 특히, 고압 배전선로는 주로 대도시나 공업지역에 밀집되어 있기 때문에 대기 오염원에 의해 전선의 열화는 빠르게 진행된다. 따라서 전선로의 경제적인 운용을 도모하고 전력공급의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 가설되어 있는 선로의 부식이나 열화상태를 판단하여 전선로를 유지, 보수하거나 교체의 적정시기를 결정하는 것이 필요하다.

배전선로는 운용규정에 따라 주로 육안으로 검사된다. 육안검사(visual inspection)로는 나선의 단선과 같은 결함은 발견할 수 있으나 가공선로 전 구간을 검사할 수 없을 뿐만 아니라 강선의 녹, 응력부식(stress corrosion) 또는 내부부식(internal corrosion) 등을 검사할 수 없다. 또한, 고압 배전선로의 대부분인 절연전선의 결함을 탐지한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 소선의 내부부식, 단선이나 심하게 부식된 위치를 비파괴로 검출하는 방법이 요구된다.

본 논문은 고압 배전선의 열화상태를 진단하기 위한 비파괴 검사 장치의 기초적인 연구로서, 배전선의 구조, 고장상태와 열화 상태를 분석하고 결함의 진단 방법을 검토한다. 열화상태를 검출하기 위하여 비파괴 검사인 솔레노이드 와전류센서(solenoid eddy current sensor)를 도입한다. 이 센서를 사용하는 결함 탐상장치를 설계, 제작하여 배전선의 결함을 추정하는 방법을 제시하고 몇 가지 실험을 통하여 제안된 탐상방법의 효용성을 확인한다.

## 2. 배전선의 열화와 탐상

### 2.1 배전선로의 열화 상태와 진단

현재 국내에 설치된 고압 배전선로 중 90[%] 이상이 가공선로이다. 따라서 대부분의 고압 선로는 대기

부식원에 노출되어 있으며 낙뢰와 같은 자연현상에도 취약한 상태에 있다.

송전선과 고압 배전선용으로 주로 사용되는 대표적인 전선이 ACSR(Aluminum Stranded Conductors Steel Reinforced)이다. 이 전선은 대기부식 뿐 아니라 이종금속의 접촉에 의한 전해부식이 발생된다. 또한, 연선 사이에 습기의 견습에 의한 공식(pitting)이 알루미늄 소선에 발생하는 간극부식(crevice corrosion)도 문제가 된다. 나선은 이러한 요인들 이외에 피로부식, 응력부식 등 매우 복잡하고 다양한 원인들에 의해 열화된다[2].

ACSR의 대기부식이나 전해부식은 모든 구간에서 유사하게 나타나므로 비파괴 센서에 의해 부식결과를 검출할 수 있다. 이때, 부식상태를 정량화하는 방법으로는 알루미늄의 단면적 변화의 검출[3], 아연부착량 측정[4]이나 국부결함 검출방법이 있다. 적외선 카메라로 전선의 열화상태를 측정하는 방법은 비교적 큰 소선결합이나 아크 등을 측정할 수 있지만 작은 부식 결합에 대한 정보를 판정할 수 없다[5].

한편, 고압 배전선로는 절연전선인 ACSR-OC(ACSR Outdoor Cross-linked Polyethylene Insulated Wires)가 주로 사용되고 있다. 절연전선의 결함은 전선 접속을 분기 또는 연결하기 위하여 절연피복을 제거한 부분이나 직선선로의 애자에 지지하는 바인드 선 부분에서 발생된다. 또한, 절연피복의 균열, 열화나 터짐에 의해 내부도체가 외부 대기와 접촉하면 경간 중앙에도 부식 결합이 나타난다.

절연전선으로는 주로 SB(smooth body)형 ACSR-OC 전선을 사용하기 때문에 절연체가 벗겨진 부분 이외에서는 대기부식이나 전해부식이 거의 나타나지 않는다. 따라서, 절연피복이 균열되었거나 다른 원인에 의해 펑크난 경간 중앙부에서는 나선과 유사한 부식현상이 발생할 수 있다. 동 절연전선에서는 동고유의 응력부식이 발생하는데 응력부식을 검출하기 위해서 일본 관서전력에서는 와전류 탐상법을 사용한다[6]. 그러나, ACSR-OC에서는 알루미늄 연선을 사용하기 때문에 응력부식은 발생하지 않는다. 특히, 현재 사용되고 있는 절연전선이 SB형이므로 응력이나 피로부식에 강하고 수분이나 대기오염원이 침투하기 어려운 구조이므로 기존의 탐상방법을 직접 적용할 수 없다.

### 2.2 와전류 센서의 특성

솔레노이드 코일 내에 도전성 금속을 삽입하여 교번자속을 인가하면 금속에 와전류가 발생된다. 이 와전류는 주 자속을 감쇠시키는 방향으로 자속을 발생하므로 솔레노이드 코일의 총자속이 변화한다. 솔레노이드 센서는 금속체의 도전율이나 투자율과 같은 전기, 자기적인 특성과 직경이나 단면적 같은 시료의 구조를 검출하는데 이용한다[7~8].

일반적으로 와전류의 발생은 주 자속이 금속도체에 침투되는 효과로서 결정된다. 이 때, 자속의 침투 깊이의 기준치로서 다음과 같이 정의되는 표준 자속 침투깊이(standard flux penetration depth)를 사용한다[9].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_0\mu_r\sigma f}} \quad (1)$$

식 (1)에 따르면 금속도체의 자속침투는 금속체의 도전율  $\sigma$ , 투자율  $\mu = \mu_0\mu_r$  및 전원주파수  $f$  에 반비례한다. 전선 중 ACSR이나 ACSR-OC는 외층은 알루미늄, 내층은 아연도금 강소선으로 구성되어 있으므로 와전류가 매우 복잡한 형태로 발생된다.

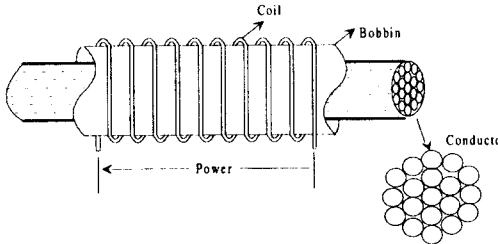


그림 1. 솔레노이드 와전류센서의 구조  
Fig. 1. Schematic diagram of a solenoid eddy current sensor.

그림 1과 같은 솔레노이드 코일을 가정해 보자. ACSR이나 ACSR-OC는 강선과 알루미늄 소선으로 구성되어 있으므로 전선을 시료로 사용하는 경우에는 비투자율과 도전율이 다른 2 종류의 금속에 의해 자속이 변화된다. 따라서 원통형 시료로  $n_1$ 개는 직경이  $b_1$ , 도전율 및 비투자율이 각각  $\sigma_1$  및  $\mu_{n1}$  이고,  $n_2$ 개는 직경이  $b_2$ , 도전율 및 비투자율이 각각  $\sigma_2$  및  $\mu_{n2}$  인  $n = n_1 + n_2$  개를 삽입한다고 한다. 이 때, 각각의 도체를  $S_1$  과  $S_2$  로 나타내고 솔레노이드 코일의 평균직경을  $a$ , 길이를  $l$  이라

한다.

솔레노이드 코일에 교류  $i(t) = i_0 e^{j\omega t}$  를 인가하면 코일 내부는 평등자계가 형성된다. 이 때, 공심코일의 임피던스는

$$\dot{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (2)$$

이 자계 내에 도체를 삽입하면 시료의 전기, 자기적 특성에 의하여 발생 와전류의 크기가 변화된다. 이러한 와전류는 금속도체 내부에서 주 자속을 방해하는 방향으로 발생되어 센서의 임피던스를 변화시킨다. 이 경우에 임피던스를 다음과 같이 놓자.

$$\dot{Z} = R + j\omega L \quad (3)$$

공극 및 도체의 총자속을  $\Phi_C$  및  $\Phi$  이라 하고 코일 전체의 총자속을  $\Phi_T$  라 하자. 이 때, 도체의 총자속은 다음과 같이 주어진다.

$$\Phi = n_1 \pi b_1^2 \overline{B}_1 / 4 + n_2 \pi b_2^2 \overline{B}_2 / 4 \quad (4)$$

여기서  $\overline{B}_1$  및  $\overline{B}_2$  는 도체  $S_1$  및  $S_2$  의 평균 자속밀도이다. 이 때,  $B_0$  및  $\overline{B}_T$  를 각각 공기 중 자속밀도 및 코일의 평균자속밀도라 하면 다음 관계를 얻을 수 있다.

$$\widehat{\mu}_T = \sum_{i=1}^2 n_i \eta_i (\widehat{\mu}_i - 1) + 1 \quad (5)$$

여기서  $\widehat{\mu}_T \equiv \overline{B}_T / B_0$  이고  $\widehat{\mu}_i \equiv \overline{B}_i / B_0$  ( $i=1, 2$ )이다. 이때,  $\eta_i$  ( $i=1, 2$ )는 도체  $S_1$  과  $S_2$  에 대한 1개 도체의 충전율(fill factor)로서 다음과 같다.

$$\eta_i = (b_i/a)^2 \quad (6)$$

식 (5)에서  $\widehat{\mu}_i$  ( $i=1, 2$ )는 자속의 침투효과에 의해 결정되는 복소변수이므로  $\widehat{\mu}_i \equiv \widehat{\mu}_i^R - j\widehat{\mu}_i^I$  라 하고 이 식을 식 (5)에 대입하여 정리하면

$$\widehat{\mu}_T = \sum_{i=1}^2 n_i \eta_i (\widehat{\mu}_i^R - 1) + 1 - j \sum_{i=1}^2 n_i \eta_i \widehat{\mu}_i^I \quad (7)$$

한편, 임피던스는 자속쇄교수에 비례하므로 공심코일의 저항  $R_0$  를 무시할 때, 식 (2)와 (3)의 관계로부터 임피던스 비는  $\widehat{\mu}_T$  와 등가로 주어진다. 따라서,

$$\omega L / \omega L_o = \sum_{i=1}^2 n_i \eta_i (\widehat{\mu}_i^R - 1) + 1 \quad (8)$$

$$R / \omega L_o = \sum_{i=1}^2 n_i \eta_i \widehat{\mu}_i \quad (9)$$

식(8) 및 (9)는 정규화 임피던스(normalized impedance)라 한다[8].

### 2.3 센서의 수치해석

고압 배전선의 ACSR이나 ACSR-OC는 알루미늄 연선을 도체로 하고 기계적 인장을 목적으로 아연도금 강심을 사용한다. 정규화 임피던스의 특성을 검토하기 위하여 시료는 ACSR 95[mm]를 가정하였다. 이 규격의 전선은 내부에 강소선 1개와 외층에 6개의 알루미늄 소선으로 구성되어 있다. 소선 직경은  $b = 4.5[\text{mm}]$ 이고 알루미늄 소선 및 강선의 도전율은 각각  $\sigma = 35[\text{MS/m}]$  및  $5[\text{MS/m}]$ , 강선의 비투자율은  $\mu_r = 30$ 으로 가정하였다. 또한, 슬레노이드 코일은 실험에 사용된 구조로 평균직경은  $a = 29[\text{mm}]$ 이고  $L_o = 271[\mu\text{H}]$ 이다.

일반적으로 ACSR과 ACSR-OC는 1개의 강선과 6개의 알루미늄 소선으로 구성되어 있다. 이 구조를 가정하여 알루미늄 및 강소선 직경을  $b = 4.5[\text{mm}]$ 라 할 때, 임피던스 특성을 구하면 그림 2와 같다. 이 때 주파수는  $f = 0 \sim 140[\text{kHz}]$ 로 가정하였다. 일반적으로 전선에 사용된 강선의 비투자율은 20~50 정도이나 여기에서는  $\mu_r = 30$ 으로 가정하였다. 특히, 강심이 사용되면 강자성체인 강심의 비투자율에 의하여 임피던스 변화가 크게 나타나고 있다. 이 때, 강심 표면에 아연도금 층의 영향은 고려하지 않았다.

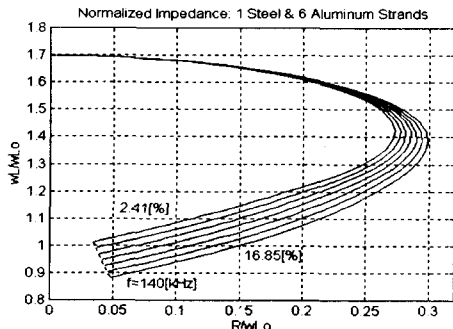


그림 2. 연선 도체의 정규화 임피던스  
Fig. 2. Normalized impedance for stranded conductors.

수치해석 결과를 전선의 단면적을 측정하는데 직접 이용될 수 있는가를 검토하기 위하여 100~140 [kHz] 사이의 임피던스 특성을 구한 것이 그림 3이다. 이 결과에서 알수 있듯이 강의 부식에 의한 단면적 변화를 무시한다면 알루미늄 소선의 단면적은 임피던스와 비례한다.

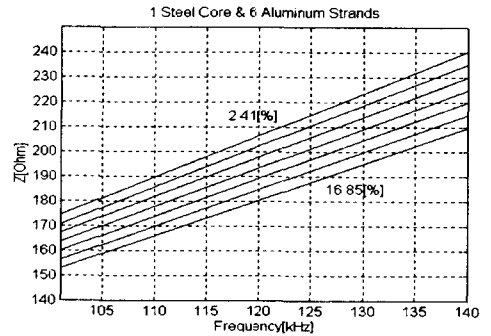


그림 3. 주파수 영역  $f = 100 \sim 140$  [kHz]에 대한 임피던스 특성  
Fig. 3. Impedance properties for a frequency band,  $f = 100 \sim 140$  [kHz].

2.2절의 해석은 소선과 소선 사이가 전기적으로 절연되어 있어서 전원자속에 의하여 유기되는 와전류가 각 소선 내에서만 흐르는 경우에만 적용할 수 있다. 실제로 강선과 도체들은 밀착구조이므로 와전류는 각 소선들에서 독립적으로 발생되지 않고 도체 접촉부와 표면에서 환류를 이루게 된다[4]. 따라서, 2.2절의 해석 결과는 실용상 약간의 편차를 초래할 수 있으므로, 실험에 의하여 접촉에 의한 임피던스 변화율을 보상해야 한다.

슬레노이드 코일에서 금속 단면적 변화에 대한 임피던스는 알루미늄인 경우에 주로 리액턴스 성분이 변화된다. 반면에 강선은 강자성체이기 때문에 저항 및 리액턴스가 동시에 변화된다. 특히, 특정 주파수에서 아연도금강선은 알루미늄과 강소선의 중간 성질을 나타낸다.

## 3. 결함 검출 실험 및 분석

### 3.1 탐상시스템의 설계

2장에서 설명한 슬레노이드 와전류 센서를 사용하여 그림 4와 같은 구조의 결함탐상 시스템을 설계하

였다. 시료가 솔레노이드 코일과 동축이고 코일 및 시료가 원형이므로 센서 내부에 놓인 시료는 센서의 중심축 단면에 비례하는 와전류를 발생한다. 따라서, 코일 센서는 국부적인 단면적을 측정할 수 있도록 길이를  $l=17[\text{mm}]$ 로 하고 직경이  $d=0.7[\text{mm}]$ 인 에나멜 코일을 22[회] 5층권으로 관통형으로 제작하여 사용하였다.

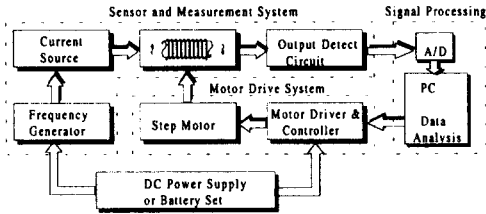


그림 4. 제작된 측정시스템  
Fig. 4. An implemented measurement system

알루미늄 도체에서는 대부분의 주파수에서 센서의 임피던스가 시료의 단면적에 반비례한다. 따라서, 공급 전류가 일정한 경우에 센서의 출력은 센서의 임피던스에 비례하므로 출력으로 시료의 단면적 변화를 측정할 수 있다. 이 때, 센서부에는  $f=140[\text{kHz}]$ 인 교번자속을 공급하는 정전류원(AC constant current source)을 설계하였다. 센서의 전원은 전압제어 발진기(voltage controlled oscillator)의 출력으로 고주파이며, 센서의 임피던스 변화를 나타내는 출력신호는 직류로 변환하여 RS232 통신에 의하여 컴퓨터로 읽어 들여 저장하도록 하였다. 연속 측정할 수 있도록 모터 구동방식을 이용하고 모터의 속도에 의한 거리를 산출할 수 있도록 제작하였다.

### 3.2 열화상태의 정량화 실험

#### 3.2.1 실험 조건

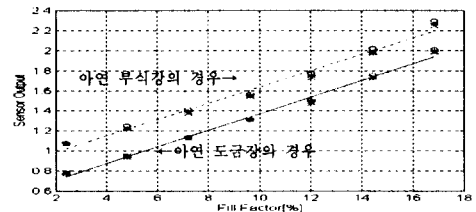
고압 배전선로에 사용되는 전선 중, 본 실험에서는 ACSR 95[mm]와 ACSR-OC 95[mm]를 실험 대상으로 선정하였다. ACSR 95[mm]는 직경이 4.5[mm]인 아연도금 강심과 동일 직경인 6개의 알루미늄 소선으로 구성된다. ACSR-OC 95[mm]는 강심의 직경이 3.5[mm]이다. 도체인 알루미늄 소선은 SB형으로 소선의 계산 단면적은 ACSR 95[mm]와 같다. 다만, 2.3절에서 기술한 바와 같이 소선의 밀착성이 ACSR 95[mm]보다 크기 때문에 도체 전체에서 발생하는 와전류 영

향은 감소된다.

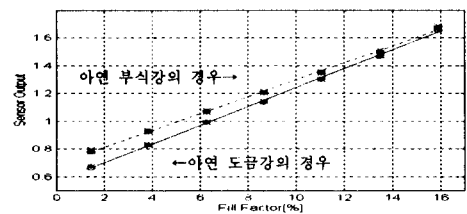
일반적으로 알루미늄 소선의 단면적이 감소되면 센서의 임피던스는 증가된다. 따라서 정전류원에 의한 센서의 출력도 증가된다. 본 실험에 사용되는 배전선들은 강심이 1개이므로 배전선 결합에 의한 센서의 출력은 알루미늄 소선의 단면적 변화에 의해 영향을 받는다. 따라서 본 실험에서는 출력전압을 반전시켜 알루미늄 소선의 단면적이 감소되면 출력도 감소되도록 신호를 처리하였다.

#### 3.2.2 열화상태의 정량화 실험

공심코일의 출력을 0으로 하고 ACSR 95[mm]인 건전전선을 센서에 삽입한 경우의 출력을 2[V] 정도로 조절하여 측정범위로 하였다. 3개의 건전전선을 준비하여 외층의 알루미늄 소선을 1개씩 제거하면서 출력을 측정하였다. 측정치의 신뢰도를 증가시키기 위하여 5회 측정하고 그 결과를 평균하여 사용하였다.



(a) ACSR



(b) ACSR-OC

그림 5. 충전율과 센서의 출력 특성  
Fig. 5. Properties of fill factor and sensor output

그림 5는 계산된 충전율과 측정 출력 사이의 관계를 보여준다. 이 결과 중 하나는 아연도금이 전혀 손실되지 않은 건전전선에 대한 것이며 다른 하나는 3염화 안티몬 용액으로 강심을 완전히 부식시킨 후에

강선을 건전한 알루미늄 연선 내에 삽입한 경우의 출력을 나타낸다. 시료의 재질이나 위치 또는 측정시스템의 감도에 의해 약간의 편차가 나타나지만 총전율과 출력 사이의 상관계수는 두 경우에 0.999 정도로서 매우 높은 상관성이 있음을 보였다.

ACSR에 대한 그림 5(a)에서 아연도금 강 및 부식강에 대한 소선의 총전율을 추정함수를 각각  $\hat{\eta}_a$  및  $\hat{\eta}_b$  [%]라 하고 센서의 출력을  $V_o$ 라 할 때 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\hat{\eta}_a = 11.93 V_o - 6.38 \quad (10)$$

$$\hat{\eta}_b = 12.15 V_o - 9.92 \quad (11)$$

식 (10) 및 (11)의 경우에 절편이 0이 아닌 것은 강선의 영향에 의한 것이다.

ACSR이 대기 중에 노출되면 먼저 아연도금층이 부식되며 이 후 알루미늄은 노출된 철에 의해 전해 부식되고 철은 대기 중 부식성 가스에 의해 부식이 촉진된다. 아연도금이 소실되면 내부 강선이 노출되므로써 와전류는 증가되어 센서의 임피던스는 감소된다. 이때, 아연도금 층에 대한 출력 변화는 대략 0.2[V]이다. 따라서, 가설 후 수년 동안, 열화에 의한 정도는 식 (10)과 (11)의 중간부분에서 나타나게 될 것이다. 이 때, 센서의 출력으로부터 아연도금 층, 강심 및 알루미늄 소선의 단면적 변화를 정확하게 추정하는 것은 곤란하다. 그러나, 강 부식을 무시하고 아연도금 층의 반응만 고려하면 알루미늄 소선의 단면적 변화에 대한 정량화가 가능하다.

한편, 건전도체인 ACSR-OC 95[mm] 3개를 준비하고 앞의 ACSR에서와 같은 방법으로 실험하였다. 그림 5(b)는 계산된 총전율과 측정출력 사이의 관계를 보여준다. ACSR-OC인 경우에 강심은  $d=3.5$ [mm]이므로 ACSR 95[mm]의 강심에 비하여 센서의 출력은 작으며 아연부착량도 작기 때문에 아연도금층에 의한 출력변화도 감소된다. 특히, 절연전선인 ACSR-OC는 수밀형 구조이므로 ACSR에 비해 도체 상호간에 접촉 비율이 크다. 따라서, 주 자속이 강심이나 도체 내부에 미치는 영향이 감소되므로 와전류 발생량도 적어진다. 따라서, 내부 강심의 아연도금 두께와 강선의 단면적 변화가 센서에 미치는 효과는 ACSR에 비해 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 5(b)에서 출력에 의한 소선의 총전율 추정함수를 구하면 다음과 같다.

$$\hat{\eta}_a = 14.73 V_o - 8.29 \quad (12)$$

$$\hat{\eta}_b = 16.40 V_o - 11.30 \quad (13)$$

이 때에도 ACSR과 유사한 특성이 나타난다.

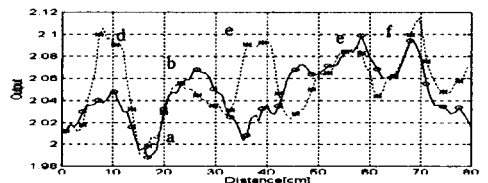
### 3.2.3 결함의 측정 실험

#### 가. 가공 시료의 특성

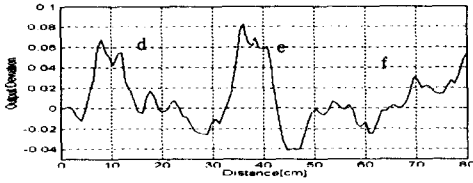
3.2.2절에서 얻은 결과를 구체적으로 확인하기 위하여, ACSR 및 ACSR-OC 시료를 인공적으로 부식시킨 후에 특성을 측정하였다. 각 시료(유효측정구간은 80[cm])에 대하여 센서를 이동시키면서 연속 측정을 하였다.

그림 6(a)는 ACSR 95[mm]의 건전전선을 측정된 결과(실선)와, 이 시료에서 강심을 3염화 안티몬 용액에서 부분 부식(위치 10(d), 40(e), 70(f)[cm])시킨 경우의 결과(점선)를 나타낸다. 실험에서는 각각 왕복 3번 측정하여 평균을 취했다. 위치 d에 대하여 위치 e 및 f는 부식시간을 2배 및 4배로 한 경우이다. 측정 결과, 위치 a에 비하여 위치 b나 c는 출력 차가 0.08~0.1[V] 정도로, 아연도금 두께가 균일하지 않음을 알 수 있다.

아연도금을 부식시킨 부분 중, d와 e는 아연도금 층의 손실 정도를 잘 나타내고 있고 f 부분은 일부 아연과 철 합금 층이 부식됨으로써 철 단면의 감소에 의해 출력이 감소된 결과를 그림 6(b)의 편차특성으로 확인할 수 있다. 이 결과에서 주목해야 할 것은 아연부식에 의한 출력변화가 건전전선의 위치에 따른 출력 변화에 비하여 크지 않다는 점이다. 따라서, 그림 5(a)과 같이 아연도금 층에 의한 출력은 전선의 국부결함을 나타내는 오차 범위 내에 있다. 결국, 센서에 의한 전선의 결함 추정은 출력의 정밀도보다는 국부결함의 정도를 진단하는데 이용될 수 있다.



(a) 아연도금 강심의 부식 특성

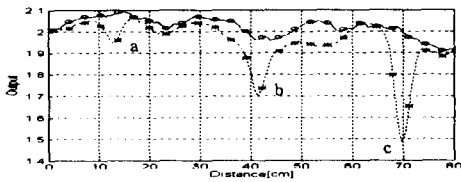


(b) 아연도금 층의 변화

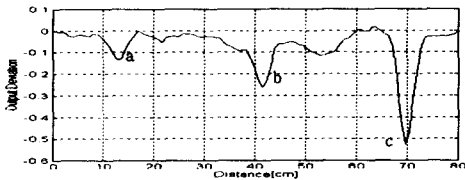
그림 6. ACSR의 아연도금 강심 특성  
Fig. 6. Properties of galvanized steel core of ACSR, 95 [mm]

아연도금 층은 주어진 전원 주파수  $f=140[\text{kHz}]$ 에서 비교적 작은 변화를 나타내지만 아연손실의 정도는 분명하게 나타나고 있다. 아연손실은 이 주파수에서 단순히 강심 시료의 표면효과의 변화만을 나타내고 있다. 아연과 철합금층의 부식은 단면적 감소로서 수치해석과 일치한다.

한편, 알루미늄 소선의 단면적 변화에 대한 센서의 출력 특성을 검토하기 위하여 ACSR 95[mm] 건전 전선에서 알루미늄 소선만 가성소다에 의해 부식시킨 결과를 그림 7에서 보여준다. 이 경우에는 위치 a에 대하여 부식시간을 2배 및 4배로 한 경우가 b 및 c이다. 특히, 그림 7(b)에서는 알루미늄 소선의 단면적 변화가 부식 정도에 따라 거의 비례하는 특성으로 나타나고 있다.



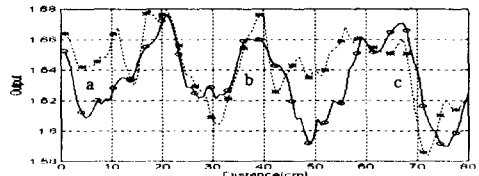
(a) 알루미늄 소선의 부식 특성



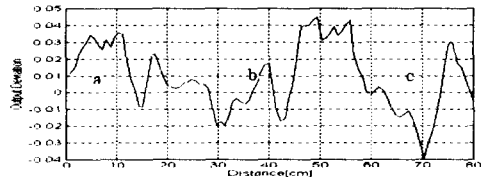
(b) 알루미늄 소선의 변화

그림 7. ACSR 95 [mm]의 알루미늄 소선 특성  
Fig. 7. Properties of aluminum strands of ACSR, 95 [mm]

주어진 주파수에서는 아연도금의 변화가  $+0.1[\text{V}]$ 인 반면에 알루미늄 소선의 단면적에 대한 특성 변화는  $-0.5\sim-0.1[\text{V}]$ 로 대단히 크게 나타난다. 일반적으로 전선은 가설 초기에 아연도금 층이 먼저 부식되고 이 후에 알루미늄이 부식되기 때문에 초기에는 센서의 출력이 서서히 증가하였다가 알루미늄 소선이 부식되므로써 감소되는 특성을 나타낼 것으로 추정된다.



(a) 아연도금 강심의 부식 특성



(b) 아연도금 층의 변화

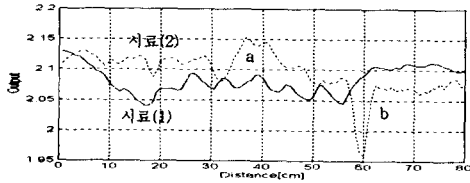
그림 8. ACSR-OC 95 [mm]의 아연도금 강심 특성  
Fig. 8. Properties of galvanized steel core of ACSR-OC, 95 [mm]

ACSR-OC 95[mm]에 대해서도 동일한 건전전선을 준비하여 측정 한 후, 내부 강심을 부식시킨 시료에 대한 측정결과를 그림 8에서 보여준다. 앞에서 언급 하였듯이, ACSR-OC의 알루미늄 연선은 수밀형으로 센서의 자속이 내부 강심에 미치는 효과가 적은 구조를 갖고 있다. 따라서, 내부 아연도금 층의 부식이나 강 소선의 단면적 변화에 대한 반응은 크지 못하다.

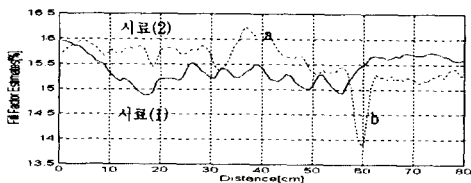
그림 8(b)에서 보면 아연 층을 부식시킨 강심의 시료와 건전전선의 출력 사이의 편차로서 아연도금 층의 부식정도를 판정하기 곤란하다. 특히, ACSR-OC는 제조시 알루미늄 연선이 밀착되어 있는 상태이며 실험에서 연선을 풀어 강선을 부식시키므로써 풀림 효과도 나타난다. 그렇지만, 알루미늄 소선의 부식 특성은 ACSR-OC 경우도 ACSR에서와 유사하였다.

나. 사용 전선의 특성

ACSR의 결함을 검출하기 위하여 사용 후 철거되었던 시료 2 종류를 준비하였다. 시료(1)은 알루미늄 소선과 내부 강심의 광택이 없었고 시료(2)는 내부 강심이 일부 녹이 나타났으며 외부 알루미늄 소선 일부도 심하게 부식된 것이 육안으로도 식별할 수 있었다.



(a) 센서 출력



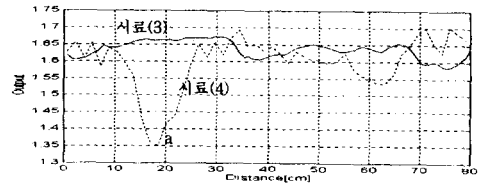
(b) 충전율 추정 특성

그림 9. 노화된 ACSR 도체에 대한 센서 출력과 충전율 추정

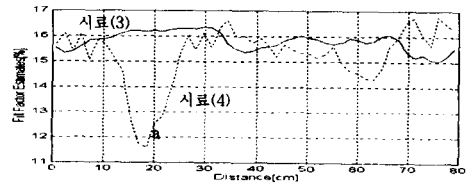
Fig. 9. Sensor output and fill factor estimates for aged ACSR conductors.

그림 9(a)에서는 시료(2)는 시료(1)에 비하여 아연 층의 부식이 비교적 크며 특히, b 부분에서는 심한 알루미늄 소선의 단면적 감소가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 결과에 의하면 두 시료는 아연 층이 어느 정도 소실되었다고 추정된다. 따라서, 이러한 가정 하에 식 (11)에 의해 충전율을 추정하면 그림 9(b)와 같다. 건전전선의 충전율이 16.85%이나 시료(1)은 대략 13%, 시료(2)는 1% 정도의 충전율이 감소되었다.

그림 10(a)와 (b)는 사용전선인 ACSR-OC의 센서 출력과 충전율 추정 특성을 나타낸다. 이 때, 시료(4)는 슬리브 접속부에서 절단한 것이다. 시료(3)은 거의 부식되지 않은 특성을 나타내지만 시료(4)는 20 [cm] 부근에 심한 결함이 발생되었음을 알 수 있다.



(a) 센서 출력



(b) 충전율 추정 특성

그림 10. 노화된 ACSR-OC 도체에 대한 센서 출력과 충전율 추정

Fig. 10. Sensor output and fill factor estimates for aged ACSR-OC conductors.

5. 결론

본 연구에서는 고압 배전선로 중 가공전선의 열화 상태를 진단하는 비파괴 검사장치의 설계와 실험적인 특성을 기술하였다. 배전선로에 사용되는 ACSR 과 ACSR-OC는 가설된 환경, 전선구조나 재질에 의해 부식 현상이나 열화 상태가 다르지만 전선의 열화에 의해 발생하는 대부분의 결함은 국부적인 단선이나 단면적의 변화로 나타났다. 전선의 단면적 변화를 비파괴적으로 검출하는 방법으로 슬레노이드 코일을 도입하였다. 제시된 방법을 토대로 결함 탐상 시스템을 설계·제작하여 배전선을 대상으로 결함 검출 시험을 수행하였다. 그 결과, 제시된 슬레노이드 와전류센서를 사용하면 전선의 국부결함은 물론 전면부식까지도 측정 가능하다는 것을 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음: 과제번호 97-019



참 고 문 헌

- (1) 배전관리과제 연구선집, 전력연구원, KRC-92D-001, 1992.
- (2) 대기오염이 전력설비에 미치는 영향 연구, 전력연구원, KRC-92C-S05, 1993.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) P.G. Buchan, "Locating corrosion on operating transmission lines with an infrared camera", Ontario Hydro Research Division Report, No. 90-64-K, 1990.
- (6) 設備診斷 오토메이션, 電氣書院, 1989.
- (7) Eddy current characterization of materials and structures, ASTM Special Technical Publication, American Society For Testing and Materials, 1981.
- (8) J. Blitz, Electrical and magnetic methods of nondestructive testing, Adam Hilger, 1991.
- (9) Z. Molttl, "The quantitative relation between true and standard depth of penetration of air-cored probe coils in eddy current testing", NDT International, Vol. 23, No.1, pp.11~18, 1990.

◇저자소개◇

김 성 덕(金成德)

1951년 10월 1일생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 1988년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1990년~1991년 Australian National University 객원교수. 현재 대전산업대학교 전자공학과 교수.