

# 와전류센서를 이용한 ACSR 전선의 내부부식 검출

(ACSR Inner Corrosion Detection by Eddy Current Sensor)

강연욱\*\* · 강지원\* · 양병모\*\* · 정재기\*

(Jae-Kee Jeong, Ji-Won Kang, Yeon-Woog Kang, Byeong-Mo Yang)

## 요 약

본 논문에서는 와전류센서를 장착하고 전선위를 자동으로 주행하도록 설계된 부식 검출장치를 이용하여 ACSR의 내부부식 검출에 대해서 다룬다. 또한 내부부식의 검출은 비파괴검사로 행해진다.

독특한 ACSR의 구조에 의한 부식현상을 와전류센서를 이용하여 검출하는 경우, 부식은 센서의 임피던스변화로 검출되고 이 현상을 이론적으로 증명한다. 또한 설계된 부식검출장치의 사양과 성능 그리고 실험방법에 대해 논하고, 현장에 적용 가능한 실험결과를 얻었다.

이 부식검출장치는 ACSR의 내부부식을 비파괴로 검출할 수 있고 현실적이라는 결론을 얻었다. 피시험체인 도체의 피복여부에 관계없이 이장치는 이용가능하고, 이 장치의 실용화에 의해 선로의 유지보수의 효율을 증대시키고 선로의 신뢰성 향상이 기대된다.

## Abstract

This paper deals with ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced) inner corrosion detection using a detector which automatically runs on an ACSR distribution line and inspects the inner corrosion of the conductor by utilization of the nondestructive eddy current test.

According to corrosion appearance and development of ACSR, the impedance change of the eddy current coils is theoretically verified. And then specifications and performances of the detector are described. Experimental procedures and desirable test results are reported.

In conclusion, this detector can realize the nondestructive detecting of an ACSR inner corrosion. Upgrading the maintenance efficiency and improving the reliability of distribution line, whether is covered with insulating materials or not, would be expected by this nondestructive test method.

KEYWORDS; Eddy Current Test, ACSR Inner Corrosion.

\*정회원 : 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원

접수일자 : 1997. 2. 14

\*\*정회원 : 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원

### 1. 서 론

일반적으로 전력수송에 이용되는 가공배전선 중 가장 많이 사용되고 있는 전선인 ACSR (Aluminum Conductors Steel Reinforced)는 현재 운전중인 배전선의 상당부분을 점유하고 있다. 이 ACSR의 외곽은 알루미늄 연선으로 도체역할을 담당하고 있고 내부층은 아연 도금된 강심연선으로 주로 인장강도를 담당하고 있다.

이러한 독특한 구조를 갖는 ACSR은 크게 두 가지 부식현상을 갖게 된다. 이를 구분하면 해안가의 염분에 의해 알루미늄에 부식되는 현상으로 도전율을 저하시켜 전송능력을 저감시키게 된다. 또 다른 한가지는 알루미늄과 아연이 접촉되어 있는 부분의 금속전위차에 의한 전위부식에 의해 아연이 1차적으로 손실되고 알루미늄과 강심이 접촉되면 알루미늄이 손실되고 강심도 대기에 노출되는 형태가 되어 지수 함수적인 부식현상을 나타내게 된다.

결국 어떠한 형태의 부식에 의해 전도율이 저하되고 인장강도도 저하되어 단선에 의한 사고의 유발가능성이 높아지게 된다.

ACSR 전선이 여러 가지의 원인에 의해 국부적인 손상이나 전면적인 부식에 의해 단선되면 정전을 초래하는 원인이 된다. 특히 한 가닥으로 구성되는 단선선로, 주로 배전선의 경우는 이러한 위험성에 노출되게 된다. 따라서, 대부분의 피복선으로 구성되는 배전선의 경우 육안으로 구별하기 어려운 점을 극복하면서 전선내부의 결함을 탐상하는 장치와 검사의 필요성이 대두되고 있다.

여기서는 와전류를 이용하여 ACSR 전선내부의 비파괴로 검사하고자한다. 이 방법은 일반적으로 비금속의 절연체로 피복된 피복ACSR의 배전선의 경우에도 잘 적용될 수 있다.

본 논문에서는 ACSR을 주행하면서 내부강심의 부식정도를 측정하는 부식측정장치를 설계 · 제작하고 이 장치에 의한 전선의 내부강심 부식검출에 대해 논하고자 한다.

### 2. 와류센서의 자속분포 특성

그림 2.1과 같은 솔레노이드 코일(solenoid coil)이 있다. 이 센서에 교번입력을 인가하면 주파수에 비례하는 공심자속이 발생하고, 도체인 측정시료를 센서내에 삽입하면 시료의 전기 · 자기적 성질과 구조에 의해 센서의 자속이 변화된다[1-3]. 전원에 의한 주자속으로 인하여 시료에서 발생하는 와류는 센서의 임피던스를 변화시키며, 이 변화량을 검출하므로써 시료의 기계적 · 전기적 특성을 정량화할 수 있다.

해석을 위하여 솔레노이드 보빈의 길이를  $l$  [m], 보빈의 평균반경을  $m$ , 코일권수를  $N$  [회]라 하고 시료의 반경을  $b$  [m]라 하자. 또한, 시료의 비투자율은  $\mu_r$ , 도전율은  $\sigma$  [S/m]이다.

간단한 전기 · 자기적 성질을 이용하여 시료의 자속밀도  $b(t)$ 를 구하면 식(2.1)에서 시작하여

$$\text{curl } H = J \tag{2.1}$$

$$\nabla^2 b(t) = \mu_0 \frac{db(t)}{dt} \tag{2.2}$$

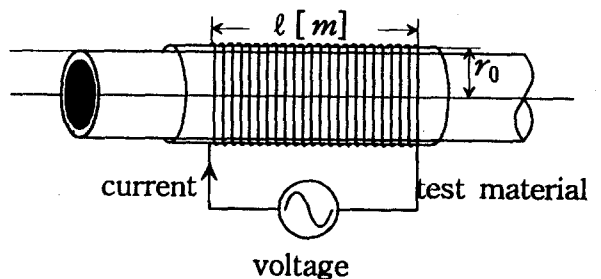


그림 2.1 솔레노이드 코일센서와 시료  
Fig. 2.1 Solenoid coil sensor and specimen

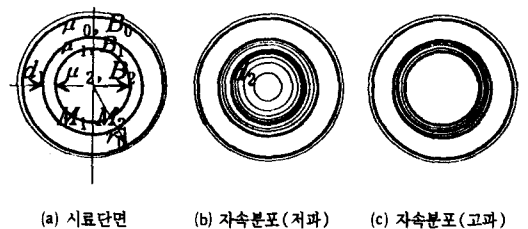


그림 2.2 아연도금강선의 추정 자속분포  
Fig. 2.2 Flux distributions of zinc clad steel wire

도체내 자속은 축방향(z-축)으로만 발생되므로 이 방향의 자속밀도를 식(2.2)에 의해 구하면 다음과 같다[1].

$$b(t) = kBe^{i(\omega t + \theta)} \quad (2.3)$$

여기서 이고  $B = \mu_1 B_0$ 이고

$$k = e^{-\alpha}, \theta = -\alpha \quad (2.4)$$

이다.  $\alpha = z/\delta$ 진폭감쇠비를 나타내고  $\delta$ 는 표준침투깊이(standard penetration depth)로 다음과 같이 정의된다[4].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_0 \sigma}} \quad (2.5)$$

결국 시료의 비투자율, 도전을 및 전원주파수에 따라 자속의 침투량이 변화되며 자속은 표면으로부터 도체 중심으로 갈수록 지수적 감쇠특성을 보인다. 특히, 표준침투깊이는 식(2.4)로부터  $z = \delta$ 인 경우, 즉  $1/e$ 로 자계, 자속 또는 자속밀도가 37[%] 감쇠되는 깊이를 나타낸다[3]. 또한 식(2.3)에서부터  $B$ 는 표면자속밀도에 대하여  $-z/\delta$ 만큼 위상이 지연된다. 이와 같은 결과로부터 시료의 전기적 특성과 전원 주파수에 의해 시료내부의 와류발생 정도가 다르며 센서의 총자속도 변화된다. 따라서 센서의 임피던스가 변동된다.

이제 그림 2.2와 같이 공심내에 비투자율이  $\mu_1, \mu_2$  이고 도전율이 각각  $\sigma_1, \sigma_2$  시료  $M_1$  및  $M_2$ 를 삽입한 경우를 보자. 공극 내에서의 자속밀도는  $B_0$ 이므로  $M_1$ 의 표면 자속밀도는  $B_{1s} = \mu_1 B_0$ 이다.  $M_1$  표면에 침투된 자속은 식(2.3)~(2.5)에 의하여 감쇠되고  $M_2$  표면에 이르면 자속밀도는

$$B_{1\beta} = \mu_1 B_0 e^{-d_1/\delta_1} \quad (2.6)$$

여기서  $\delta_1$ 은 도체  $M_1$ 에 대한 표준침투깊이를 표시한다.

한편, 도체  $M_2$ 의 표면에서는  $B_{2s} = \mu_2 B_{1\beta}$ 가 되고 자속은  $M_2$ 의 재질에 따라 변화된다. 이 경우에 자속은 내부로 갈수록 점점 감소되어  $M_2$  도체 중심점에서 자속은 다음과 같이 된다.

$$B_{2s} = B_{2s} e^{-d_2/\delta_2} \\ = \mu_1 \mu_2 B_0 e^{-\left(\frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2}\right)}$$

아연도금강선을 가정하여 자속밀도 분포도를 그리면 그림 2.2(b) 및 (c)와 같이 추정된다.

일반적으로 주파수가 낮으면 자속은 아연층과 강선에 골고루 분포되어, 이 변화가 임피던스로 나타난다. 그러나, 고주파 영역으로 갈수록 표준침투깊이는 짧아지므로 대부분의 자속은 아연도금층 표면을 통과하지 못한다. 만약, 도금층이 얇아지거나 또는 국부결함이 존재하면 자속은 비투자율이 큰 강선에 작용하여 센서의 총자속은 급격한 증가특성을 나타낸다. 따라서 이와 같은 특성을 이용하면 강선표면의 아연부착량을 측정할 수 있다.

도체에 의한 임피던스 변동을  $\Delta Z$ 는 다음과 같이 표현된다[5].

$$\Delta Z = \{a_1 + j(a_2 - 1)\} \eta \omega L_0$$

여기서  $a_1, a_2$ 는 주파수, 도전을 및 비투자율에 관계되는 상수이다[5]. 실험에 의해 주파수를 가변하면서 임피던스의 변화를 주목하면 부식의 부위와 정도를 알 수 있다.

### 3. 부식검출장치 및 동작특성

제작한 부식감지장치는 가선된 ACSR을 주행하면서 부식을 검사하는 목적으로 설계되었다. 그림 3의 시스템은 가공선로 위에 설치되어 운행하는 것이므로 직류 서보전동기(DC servo motor)의 구동장치가 필요하다. 서보전동기는 DC 24[V]용으로 정격출력이 23[W], 정격속도가 3000[rpm]이고 치차비 60:1을 사용하였다. 구동부의 전원은 축전지에서 공급하고 전선 상의 주행거리를 광엔코더(photo encoder)에 의하여 자동적으로 계측하여 마이크로 프로세서에 저장하도록 하였다. 이 경우에 시스템 전체 무게는 26[kg]으로 자체중량을 싣고 수 100[m]를 주행하도록 무게가 적은 소형 축전지를 사용하였다. 이때 서보전동기는 유선제어 방식으로 전진, 후진 및 운전 정지 동작이 가능하도록 설계, 제작하였다.



그림 3.1 ACSR을 검사하는 감지장치  
Fig. 3.1 Running equipment for inspecting ACSR wire

한편, 센서의 임피던스 변화를 검출하기 위하여 가변주파수(variable frequency), AC 정전류원(AC constant current source)을 제작하였다. 이 경우에 측정된 임피던스는 16[bit] A/D 컨버터를 사용하여 측정감도를 증가시켰다. 와류센서의 임피던스와 주행거리의 측정 데이터는 c8751H 마이크로 프로세서 시스템으로 저장하여 분석하였다.

전력을 공급하는 ACSR 전선중 주로 한 가닥으로 구성되는 선로를 대상으로 한다. 여기서는 ACSR97 [mm<sup>2</sup>]를 일례로 실험하여 검출가능성을 확인하고자 한다.

작업자가 휴대용 컴퓨터를 이용하여 미리 준비한 초기값을 RS232C 통신에 의해 장치에 설정한 다음 통신 케이블을 제거하고 주행 스위치에 의해 검사를 시작하고 설정거리만큼의 주행이 끝나면 재통신에 의해 부식데이터와 주행거리데이터를 휴대용 컴퓨터에 수록한 후 이를 분석프로그램에 의해 분석한다.

#### 4. 시험 및 시험 결과

이 절에서는 이 장치를 이용한 시험과 시험 결과에 대해 설명한다. 우선 시험은 장치의 시험이 가능하도록 시험장을 건설하여 운영하였고, 이 시험결과를 전선의 기계적인 강도와와의 관계를 통해 추후의 비파괴에 의한 부식정도와 강도측정에 활용할 수 있도록 하였다.

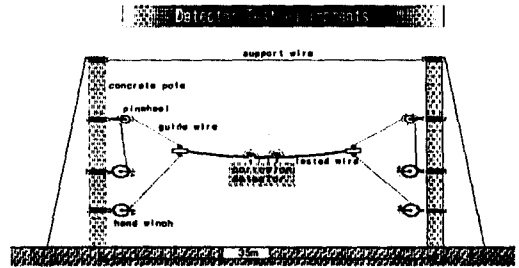


그림 4.1 시험장  
Fig. 4.1 Test yard designed

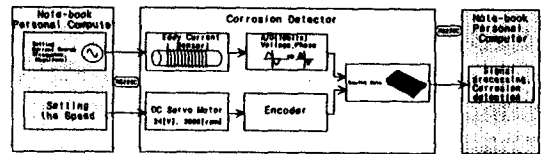


그림 4.2 장치설명을 위한 블록선도  
Fig. 4.2 Block diagrams for illustrating equipment

#### 4.1 시험설비

그림4.1은 건설한 시험장을 나타내고 있고 기본적인 사양은 다음과 같다.

- 전체길이 : 35m
- 장력에 견딜 수 있도록 지선의 설치
- 권취기와 도르레를 이용하여 이도 및 경사를 모의할 수 있다
- 전선을 절단하여 시험이 필요한 경우를 대비하여 전선의 착탈이 편리하도록 하기 위해 압축크램프를 사용하지 않고 볼트와 너트를 사용하여 전선의 착탈이 편리하도록 설계했다

#### 4.2 시험대상

본 논문에서 시험대상으로 한 ACSR 97mm<sup>2</sup>의 단면을 그림 4.3에 나타냈다. 외층은 직경 3.2[mm]의 경알루미늄선 12개를 연선으로 구성되어 뇌전류나 사고전류를 대지로 흐르게 하기 위한 도체로 이용되며, 내층은 직경 3.2[mm] 7개의 용융아연도금 강선으로 구성되고 주로 기계적인 인장력을 담당한다. 이 경우의 강선은 도체로 사용하는 다른 규격의 ACSR 내부강성보다 높은 인장강도를 갖도록 규정되어 있다. 강선은 내식성을 높이기 위하여 아연 도

금되어 있으며 도금층에는 철-아연 합금층이 형성된다. 이때, 아연도금 및 합금층의 두께는 대략 30~40( $\mu\text{m}$ ) 정도이다.

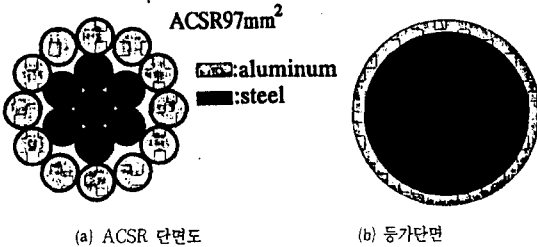


그림 4.3 시험대상 전선  
Fig. 4.3 ACSR wires tested

### 4.3 결과분석 알고리즘

내부강심의 아연층과 알루미늄층이 부식되는 경우는 두 가지의 반응 형태를 나타낸다. 입력 주파수가 저주파수(본 실험에서는 30[kHz])의 경우에는 코일센서에서 발생한 자계가 아연층을 투과하여 내부의 강심이 반응하여 마치 강자성체의 반응을 나타낸다. 그러나 입력 주파수를 자계가 알루미늄층을 투과하지 못하는 고주파수(본실험에서는 70[kHz])가 되면 상자성체와 같은 현상을 보이게 된다. 이 경우는 표 4.1의 'AS'반응에 해당되고, 강심, 아연층, 알루미늄층의 손상이 예견된다. 본논문에서의 실험은 주로 이 반응에 대해 다루었다.

표 4.1에서 'S'반응은 저주파수 입력이 인가되면 강심층만이 반응하는 경우로 아연층과 강심의 부식이 예견된다.

표 4.1 결과 분석 알고리즘  
Table 4.1. Result analysis algorithm

low frequencies	high frequencies	decisions
●	●	AS
●	○	S
○	●	A
○	○	D

● : response  
○ : non-response

표 4.1에서 'A'반응은 고주파수 입력이 인가되면

알루미늄층만이 반응하는 경우로 알루미늄층의 부식이 예견된다. 또한 'D'는 부식이 발견되지 않는 경우에 해당한다.

## 5. 시험결과

시험에 사용된 시료는 출고되어 사용되지 않은 건전전선 97( $\text{mm}^2$ )를 준비하고 다음과 같이 인공적으로 부식시켜 강심을 대상으로 한 시험과 알루미늄을 대상으로 나누어 시험했다.

40[m] 길이의 ACSR 전선을 준비하고 1[m] 간격마다 10[m]를 인공 부식 처리했다. 인공부식 방법은 염화 안티몬 용액을 사용하여 아연도금 강선을 약 5[cm]씩 가공하였다.

본 시험은 두 가지의 목적을 가지고 수행했다. 첫째 설계한 솔레노이드 와류센서를 사용한 경우 임피던스 출력에 노이즈가 없으면서 내부강심층까지 자속이 작용하는 주파수 대역을 확인하고, 둘째 설계된 부식검출장치를 이용하여 강심과 알루미늄의 국부부식을 검출하는 성능을 확인하기 위함이다.

이를 위해 입력으로 인가되는 전류원의 입력주파수를 1[kHz]에서 71[kHz]까지 가변시키면서 시험하였다. 이 중에서 그림 5.1은 주파수가 1, 30, 65 및 70[kHz]인 경우의 임피던스 측정결과를 나타낸

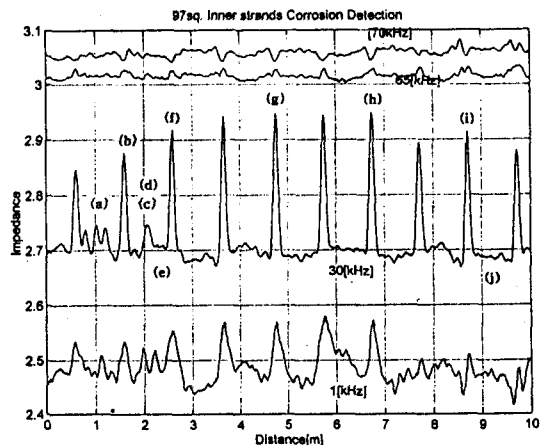
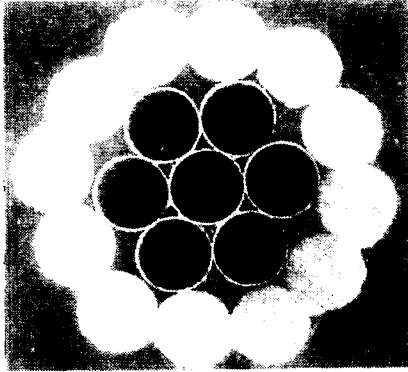


그림 5.1 강심층 대상으로 한 시료의 센서출력  
Fig. 5.1 Sensor outputs for the sample in steel layers

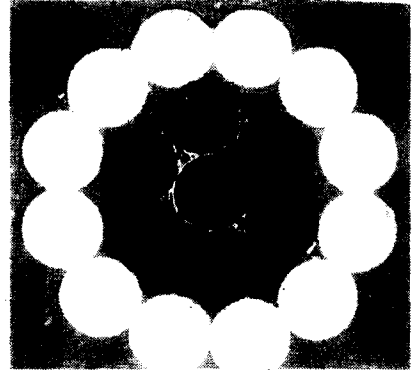
다. 이 범위의 주파수 중에서도 30[kHz]가 노이즈와 임피던스 출력의 크기측면에서 가장 유리함을 알 수 있었다. 그러나, 65[kHz]에서는 알루미늄, 아연 및 강선의 부식 특성이 분명하게 구별되지 않았다.

한편, 그림 5.1에서 비교적 높은 주파수인 70

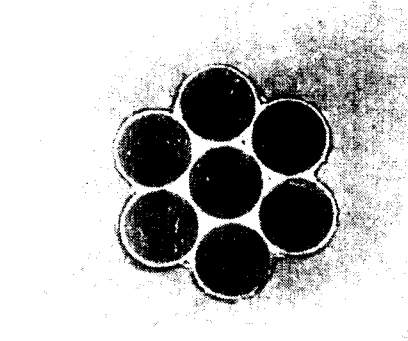
[kHz]에서는 임피던스의 변화폭이 적은 것이 자체가 알루미늄층을 관통하지 못하고 알루미늄의 표면에만 작용하기 때문이다. 이 검출과형에서 아래로 볼록한 부분이 알루미늄의 부식부분이고, 이와 같은 현상은 경우 (1)에서 시료를 부식시킬 때 알루미늄



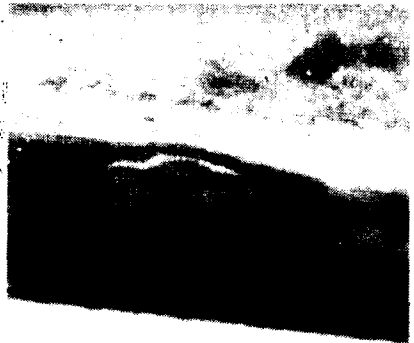
(a)



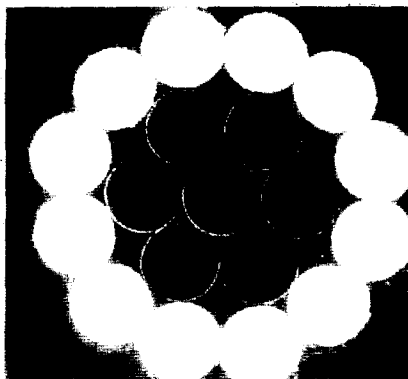
(b)



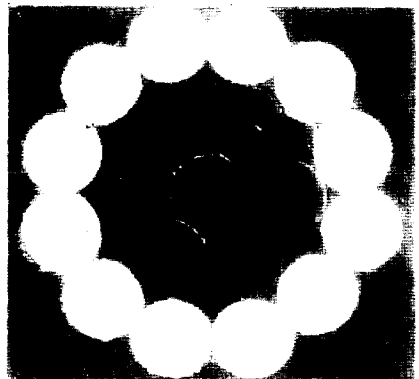
(c)



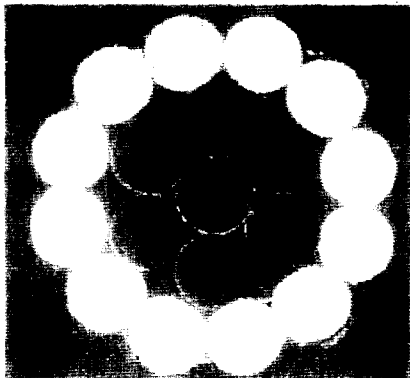
(d)



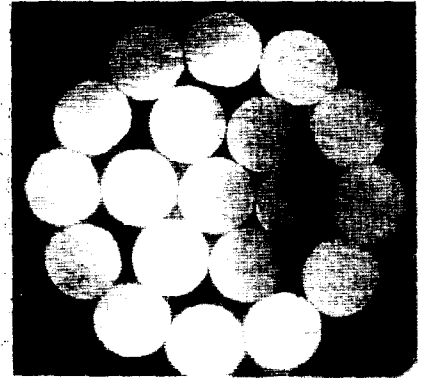
(e)



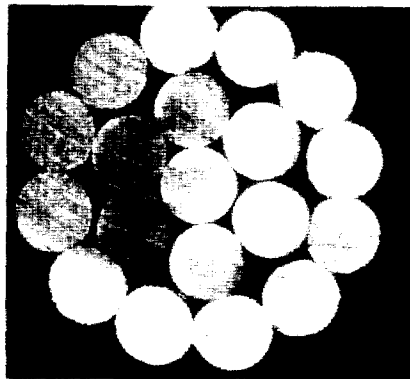
(f)



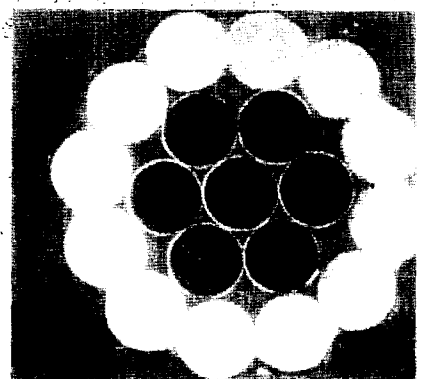
(g)



(b)



(i)



(j)

사진 5.1 인공부식 시료의 단면

Photo 5.1 Cross-sectional area of artificial corrosion samples.

연선층 일부가 부식되었음을 나타낸다. 시험에 의한 측정이 끝난 후 전선을 해체하여 인공 부식시킨 위치와 부식검출장치가 저장한 거리를 비교한 결과에 의하면 35(m)를 주행시킨 후에도 1(cm)이하의 오차를 확인할 수 있었다.

사진 5.1은 9개의 인공 부식시킨 ACSR 단면사진과 한 개의 강심소선의 측면을 50배정도의 저배율로 촬영한 10개의 사진으로 구성되어 있고 사진의 밑에 표기된 문자는 그림 5.1의 출력임피던스 그래프에 표기된 같은 문자와 대응된다. 즉, 사진 5.1(a)는 그림 5.1(a)에 대응하는 부분이다.

사진 5.1(a)를 인공부식을 가하지 않은 사진 5.1(j)와 비교하면 부식된 정도를 사진으로 구분하기는 어렵지만 그림 5.1(a) 지점과 그림 5.1(j) 지점의 임피

던스 값은 차이가 나타난다. 결국, 육안으로 구분하기 어려운 국부부식도 이 장치에 의해서 검출되었다.

사진 5.1(b)는 강심부분중 흰선으로 나타나는 아연도금층이 상당부분 부식되었음을 육안으로도 확인할 수 있고 이와 대응되는 그림 5.1(b) 지점의 임피던스 값에서도 뚜렷한 차이를 볼 수 있다.

그림 5.1(c)와 (d)는 동일한 지점을 나타내고 있지만 이 부분이 부식된 정도를 확인하기 위해서 알루미늄층을 해체한 후 강심의 상태를 조사하였다. 조사결과, 7개의 강선 중 1개의 표면에 3(mm) 정도로 아연이 부분부식된 것[사진 5.1(d)]로 밝혀졌다. 같은 지점을 단면 촬영한 사진 5.1(c)에서 부식된 부분을 식별하기는 어렵다. 따라서, 전선의 작은 결함도

임피던스의 크기로 나타나는 출력신호에 민감하게 작용함을 알 수 있다.

사진 5.1(e)는 그림 5.1(e) 지점에 해당하는 부분으로 육안으로 아연층이 대부분 소실되지 않은 상태를 알 수 있다.

그렇지만 사진 5.1의 (h)와 (i)는 사진 5.1(f)와 (g)에 비하여 아연도금층이 거의 부식되어 있으나 신호의 진폭으로 부식의 정도를 판정할 수 없었다. 그렇지만, ACSR의 알루미늄 및 아연도금 강선의 국부적인 부식은 건전전선에 비교하는 방법으로 측정할 수 있다. 다만, 부식의 상태나 형상변화에 대한 응답특성은 좀더 연구되어야 한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 자주적으로 이동하면서 전선의 부식정도를 나타내는 부식감지장치를 설계제작하고 전선을 시험할 수 있도록 시험장을 설계·건설하여 여러형태의 시험이 가능하도록 하였다.

또한 ACSR97<sup>□</sup>를 대상으로 한 시험에서도 강심의 부식을 판정할 수 있었다. 또한 육안으로는 불가능한 결함도 비교적 잘 감지함을 확인하고 다양한 주파수를 갖는 입력을 인가함으로써 ACSR97<sup>□</sup>의 강심을 대상으로 한 시험에서 10[kHz]에서 30[kHz]사이에서 양호한 반응을 나타냄을 확인하였고, 그중 30[kHz]의 결과만을 실험결과로 예시하였다.

이러한 결론을 통해 다른 규격의 ACSR전선의 배전선은 물론 송전선의 경우에도 적용가능성을 입증할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] J. Blitz, Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, Adam Hilger, 1991.
- [2] J. Blitz, "Prediction of impedance components of eddy current coil using a PC", NDT International, Vol. 22, No.1, pp.3~6, 1990.
- [3] F. Thollon, B. Lebrun, N. Burais and Y. Jayet, "Nu-

merical and experimental study of eddy current probes in NDT of structures with deep flaws", NDT International, Vol.28, No.2, pp.97~102, 1995.

- [4] Z. Molit, "The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing", NDT International, Vol.23, No.1, pp.11~18, 1990.
- [5] 정재기, 양해원, "아연도금강선의 아연손실을 검출하기 위한 와전류센서", 전기학회논문집, 제45권 제7호, pp. 1033~1038, 1996.

## ◇ 著 者 紹 介 ◇



강 연 옥(姜鍊旭)

1966년 10월 5일생. 1988년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원.



강 지 원(姜地原)

1965년 1월 6일생. 1987년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.



양 병 모(梁炳模)

1969년 4월 24일생. 1995년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원.



정 재 기(鄭才基)

1961년 5월 3일생. 1985년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1989년 한국전력공사 입사. 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.