

ACSR 가공지선의 부식 검출에 관한 연구

姜地原, 鄭才基, 姜鍊旭, 金正夫
한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실

ACSR Inner Corrosion Detection by Eddy Current Test Method

Ji-Won Kang, Jae-Kee Jeong, Yeon-Woog Kang, Jeong-Boo Kim
KEPRI

Abstract

This paper deals with ACSR(Aluminum Conductor Steel Reinforced) inner corrosion detection using a detector which automatically runs on an ACSR transmission line and inspects the inner corrosion of the conductor by utilization of the nondestructive eddy current test. And the relationship between the corrosion grades and the tensile strength can be estimated by means of this 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 transmission line would be expected by this nondestructive test method.

KEYWORDS ; Eddy Current Test, ACSR Inner Corrosion.

1. 서론

일반적으로 대전력수송에 쓰이는 가장 많이 사용되고 있는 전선인 ACSR (Aluminum Conductors Steel Reinforced)은 현재 운전중인 송전선의 상당부분을 점유하고 있다. 이 ACSR의 외곽은 알루미늄 연선으로 도체역할을 담당하고 있고 내부층은 아연도금된 7개의 강심연선으로 주로 인장강도를 담당하고 있다.

이러한 독특한 구조를 갖는 ACSR은 크게 여러조건에 의해 부식될 수 있다.

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

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

2. 와류센서의 특성

2.1 와류와 자속분포

그림2.1과 같은 솔레노이드 코일(solenoid coil)이 있다. 이 센서에 교번입력을 인가하면 주파수에 비례하는 공심 자속이 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.

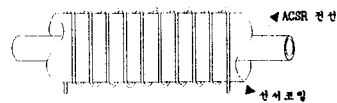


그림2.1 솔레노이드 코일센서와 시료

해석을 위하여 솔레노이드 보빈의 길이를 l [m], 보빈의 평균반경을 r_0 [m], 코일권수를 N [회]라 하고 시료의 반경을 b [m]라 하자. 또한, 시료의 비투자율은 μ_r , 도전율은 σ [S/m]이다.

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

$$\text{curl } H = J \quad (2.1)$$

$$\nabla^2 b(t) = \mu \sigma \frac{db(t)}{dt} \quad (2.2)$$

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

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

여기서 $B = \mu_r B_0$ 이고

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

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

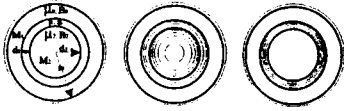
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (2.5)$$

결국 시료의 비투자율, 도전율 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. 또한 식(2.3)에서부터 B 는 표면자속밀도에 대하여 $-z/\delta$ 만큼 위상이 지연된다. 이와같은 결과로부터 시료의 전기적 특성과 전원 주파수에 의해 시료내부 와류발생 정도가 다르며 센서의 총자속도 변화한다. 따라서 센서의 임피던스가 변동된다.

이제 그림2.2와 같이 공심내에 비투자율이 μ_1 , μ_2 이고 도전율이 각각 σ_1 , σ_2 인 시료 M_1 및 M_2 를 삽입한 경우를 보자. 공극 내에서의 자속밀도는 B_0 이므로 M_1 의 표면 자속밀도는 $B_{10} = \mu_1 B_0$ 이다. M_1 표면에 침투된 자속은 식(2.3)~(2.5)에 의하여 감쇠되고 M_2 표면에 이르면 자속밀도는

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

여기서 δ_1 은 도체 M_1 에 대한 표준침투깊이를 표시한다.



(a)시료단면 (b)자속분포(저주파) (c)자속분포(고주파)
그림 2.2 아연도금강선의 추정 자속분포

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

$$B_{2a} = B_{2a} e^{-\alpha_1 r} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \right) = \mu_1 \mu_2 B_0 e^{-\alpha_1 r} \quad (2.7)$$

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

2.2 센서의 임피던스 해석

도체를 그림 2.1과 같이 삽입한 경우의 총자속을 Φ_T 라 하면

$$\Phi_T = \Phi_C + \Phi_R \quad (2.8)$$

여기서 Φ_C 는 공극에서의 자속 Φ_R 은 도체내의 자속이다. 공극의 자속은

$$\Phi_C = (1 - \eta) B_0 A_0 = (1 - \eta) \Phi_0 \quad (2.9)$$

여기서, η 는 공심단면적에 대한 도체단면적의 비로 $\eta = (b/r)^2$ 이다.

도체를 삽입한 경우의 임피던스를

$$\hat{Z} = R + j\omega L \quad (2.10)$$

이라 하면, 자속의 변화는 임피던스 변화와 같으므로 공심 임피던스 $j\omega L_0$ 과 (2.10) 및 (2.9)로부터

$$\mu = \frac{\Phi_T}{\Phi_0} = \frac{\hat{Z}}{Z_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} - j \frac{R}{\omega L_0} \quad (2.11)$$

$$\frac{\omega L}{\omega L_0} = 1 + (\mu_1 \alpha_1 - 1) \eta \quad (2.12)$$

$$\frac{R}{\omega L_0} = \mu_1 \alpha_2 \eta \quad (2.13)$$

식(2.11)과 식(2.12)는 공심임피던스에 대한 도체삽입시의 임피던스 사이의 비를 나타낸다. 일반적으로 코일내의 시료특성에 따라 센서의 임피던스와 위상이 변화된다. 식(2.11) 및 (2.12)의 α_1 및 α_2 는, 주파수, 도전을 및 비투자율 등에 관계되므로 시료의 특성을 임피던스의 크기나 위상변화로 정당화하는 것은 간단하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 아연도금 부착량이나 도금상태를 검출하기 위하여 임피던스 크기만을 고려한다. 식(2.14)로 부터 도체에 의한 임피던스 변동을 ΔZ 라 하면

$$\Delta Z = (\alpha_2 + j(\alpha_2 - 1)) \eta \omega L_0 \quad (2.14)$$

주파수가 $f=0 > 0$ 이면 임피던스계측은 $1 + (\mu_r - 1) \eta$ 에서 출발하여 주파수가 증가하면 $1 - \eta$ 로 수렴한다. 따라서, 제한된 조건하에서 투자율이나 충진율, 즉 시료 단면적을 구할 수 있다. 일반적으로 수십 kHz에서 아연도금에 의한 임피던스 변동은 현저하게 나타난다. 따라서, 도금층의 변화를 검출하기 위하여 식(2.6) 및 (2.7)의 주파수 특성과 식(2.14)의 결과를 이용한다.

3. 부식검출장치 사양 및 동작특성

그림 3.1에서는 제작한 부식감지장치를 나타내고 있고 이 장치에 대한 설명이 이 절에서 행해진다.

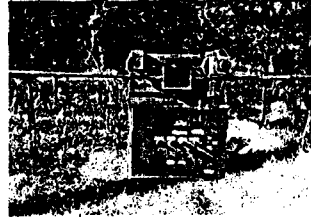


그림 3.1 감지장치 주행모습

3.1 개발목표

가공송전선을 주행하면서 부식을 감지하는 장치를 개발하면서 다음과 같은 점을 목표로 정하였다.

- 와전류센서의 설계 및 해석
- 와전류센서에 의한 비파괴검사에 의한 부식검출
- 전선을 주행함과 동시에 주행거리와 부식데이터를 수록
- 센서에 공급되는 주파수, 전원원의 크기 그리고 주행속도를 가변가능
- 휴대용 컴퓨터와의 통신으로 초기치설정 및 검사후 취득한 데이터를 전송가능

3.2 기본사양

3.2.1 대상

가공송전선중 가공전선을 주대상으로 한다.

3.2.2 공법

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.

3.2.3 장치의 사양

1	크기	400×550×190mm
2	무게	26kg
3	코일	맞물림 판통형
4	주행속도	0~13m/분
5	제어전원	축전지
6	코일전원	가변주파수 전류원
7	취득 DATA	임피던스(크기, 위상), 주행거리
8	취득 DATA 수	3만개 이상
9	컴퓨터와의 통신	RS-232C통신
10	제어동작	유선제어(주행, 후진, 정지등)
11	우천시 기기작동	불가능
12	각종 안전장치	없음

4. 시험 및 시험 결과

4.1 시험설비

그림 4.1은 건설한 시험장을 나타내고 있고 기본적인 사양은 다음과 같다.

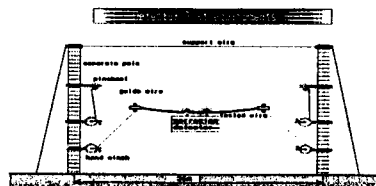


그림 4.1 시험장

4.2 장치의 불특성도

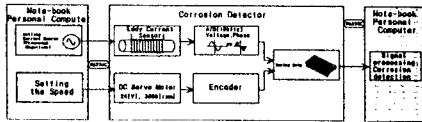
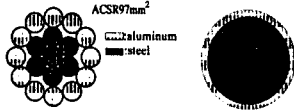


그림4.2 장치설명을 위한 블록선도

4.3 시험대상

가공송전선중 ACSR97mm²를 대상으로 시험한다.



(a) ACSR 단면도 (b) 등가단면
그림4.3 시험대상 전선

4.4 결과분석 알고리즘

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

●: response
○: non-response

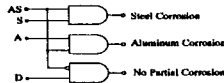


그림4.4 각주파수대역별 임피던스 출력

4.5 시험결과

여기서는 ACSR97[□]에 대해서 실험한 결과에 대해서 설명하고 있다.

비교적 새 것에 가까운 97[□]를 대상으로 2가지의 인공부식을 가하여 시험하였다.

(1) 알루미늄과 강심을 동시에 부식 처리하고 이를 대상으로 시험하였다.

(2) 알루미늄만을 대상으로 기계적으로 인공홈집을 만들고 이를 대상으로 시험하였다.

그림5.1에서는 (1)의 경우에 대한 시험결과를 나타내고 있다. 그림5.1(a)는 비교적 저주파수입력에 대한 임피던스의 값을 나타내고 있다.

그림5.1(b)는 60kHz대의 출력을 나타내었다. 이 주파수 영역에서는 내부의 강심과 외부의 알루미늄의 반응이 함께 작용하는 영역으로 쉽게 어느 부분의 부식인지를 판정하기 곤란하다.

그림5.1(c) 비교적 높은 주파수인 70kHz와 71kHz의 출력을 나타내고 있고 이 영역에서는 외부의 자계가 알루미늄층을 관통하지 못하고 알루미늄의 표면에만 작용하는 것으로 추정된다.

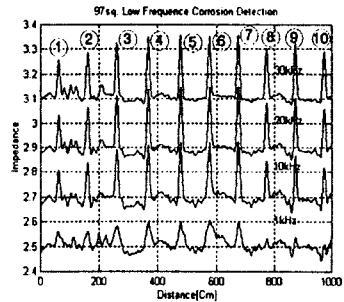
그림5.2는 (2)의 경우의 시험으로 알루미늄만을 대상으로 시험한 결과이다. 대체적으로 양호한 반응을 보이고 있고 출력파형이 선명하지 못한 점은 추후의 개선점으로 남는다. 아래로 뾰족한 부분이 인공홈집을 가한 부분의 출력이다.

5 결론

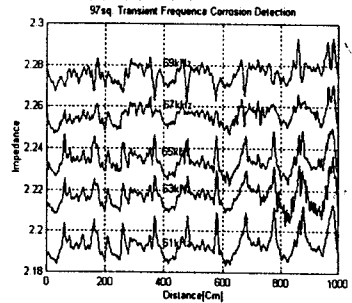
본 연구에서는 자주적으로 이동하면서 전선의 부식정도를 나타내는 부식감지장치를 설계제작하고 전선을 시험할 수 있도록 시험장을 설계·건설하여 여러형태의 시험이 가능하도록 하였다.

또한 ACSR97[□]를 대상으로한 시험에서도 강심의 부식과 알루미늄의 부식을 판정할 수 있었다.

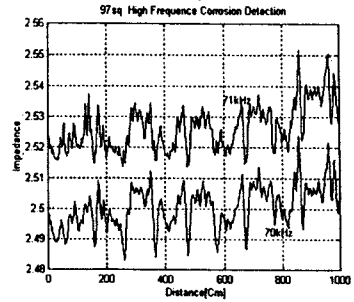
이러한 결론을 통해 다른 규격의 ACSR전선의 송전선과 배전선의 적용가능성을 확인할 수 있었다.



(a) 저주파수 대역



(b) 천이주파수 대역



(c) 고주파 대역특성

그림5.1 ACSR97[□]의 각 주파수대역별 부식특성

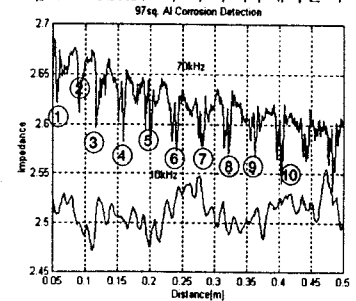


그림5.2 알루미늄 특성시험 결과

참고문헌

[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, "Numerical 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. Moltl, "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.