

착탈형 구조를 갖는 와류센서를 이용한 ACSR전선 부식검출기 개발

강지원\*, 조성배\*, 정재기\*, 양병모\*, 민병욱\*\*  
 한전 전력연구원\*, 한국전력공사\*\*

The development of the ACSR corrosion detector using eddy current sensor with removable type

J.W.Kang\*, S.B.Cho\*, J.K.Jeong\*, B.M.Yang\*, B.Y.Min\*\*  
 KEPRI\*, KEPCO\*\*

**Abstract** - This paper deals with the development, reliability, specification and performances of the ACSR inner corrosion detector system. It is designed to run on ACSR automatically and to inspect the corrosion of the line with on-line continuously. And it comprises a sensor, a constant current source, a signal processing unit, a RF transmitter and receiver unit. Also separable encircling coil sensor is proposed in order to detect inner corrosion of the overhead ground wires. In conclusion, this detector can realize the nondestructive detecting of an ACSR inner corrosion.

1. 서 론

ACSR전선은 나선으로 대기중에 노출되어 있기 때문에 대기부식이나 전해부식이 모든 구간에서 유사하게 나타난다. 한편, 국부결함은 전면부식과 밀접한 상관성이 있다고 추정되지만 전선의 단선사고를 유발하는 직접적인 원인이므로 이 결함을 사전에 검사하여 선로를 보수, 교체하는 것이 필요하다. 영국의 경우 아연층의 손실이 전선수명에 가장 큰 영향을 미치는 인자라고 판단하여 이를 검출하는 검출기를 개발하였으며[1,2], 일본은 동북전력과 후지쿠라 전선이 공동으로 알루미늄 표면을 검사하는 검출기를 개발하였으나[3,4] 무게가 무겁고 정밀도 측면에서 실용화에 문제가 있다. 현재 국내에서는 전력선의 보수나 교체시기는 대체적으로 육안검사법으로 판단하고 있으나 가공지선은 상도체와 같이 일정전류를 공급하는 것이 아니기 때문에 부식에 의한 발열 및 아크 등의 현상을 발견하기 곤란하며, 와류탐상법은 이와 같은 국부부식, 균열 및 결함 등을 측정하는데 유용하게 이용된다. 따라서 전선로를 합리적으로 운용하기 위해서는 경년변화, 환경요인들 뿐만아니라 선로의 국부부식과 같은 물리적 상태를 검출하는 방법이 요구된다. 그러나 이전의 관통형 솔레노이드 센서형태는 전선과 같이 가설되어 있는 선로의 결함을 비파괴적으로 측정하기는 곤란하다.

따라서 본 논문에서는 전선의 부식정도를 측정하기 위하여 2개의 컨넥터를 클립 형태로 구성하여 가설된 전선에서 사용하기 편리하도록 탈착이 용이한 구조의 분할 관통형 코일센서의 제작 및 실험결과에 대해서 다루었으며, 또한 이러한 센서와 안정된 정전류원을 이용한 무선에 의해 동작되는 ACSR 전선 결함감지장치의 제작과 그 실용성에 대해서 논하고자 한다. 제작된 결함감지장치는 공중기와 지상기로 구성되었으며 공중기에는 센서 헤드와 3개의 전압을 처리하는 신호처리회로, 주 프로세서, 모터와 제어회로 그리고 송·수신장치로 구성되며 지상기는 송·수신장치와 노트북으로 구성되었다.

2. 본 론

2.1 부식검출센서의 해석

2.1.1 솔레노이드 코일 센서의 탐상원리

일반적으로 공심코일의 임피던스는

$$\dot{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad (2.1)$$

만약, 코일 속에 피 측정체를 넣으면 임피던스는 동일 전원 주파수에 대하여 다음과 같이 변화된다. 즉,

$$\dot{Z} = R + j\omega L \quad (2.2)$$

이 때 임피던스 중, 저항은 항상 증가하고 인덕턴스는 시료의 재질에 의하여 달라진다[5]. 먼저 솔레노이드 원통코일의 특성을 알아보기 위하여 아래 그림과 같이 10 [mA]의 전류를 공급하는 HP 4194A 임피던스/위상 분석기를 이용하여 2종류의 코일권수의 측정체를 삽입한 경우의 임피던스의 특성을 측정하였다.

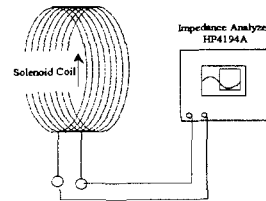
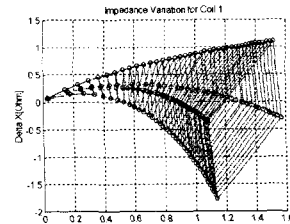


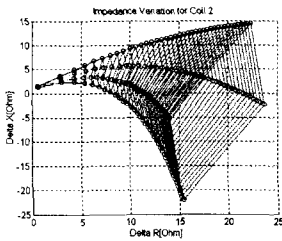
그림 2.1 솔레노이드 코일의 특성

즉, 주파수를 0~200[kHz]까지 가변시켰을 경우의 임피던스 변화를 그림 2.2에 나타내었다. 이 때, 코일의 직경은 1.0[mm]이고 보빈의 직경은 27[mm]이며 길이는 각각 20[mm](coil 1) 및 120[mm](coil 2)이었다. 이 때, 시료는 97[mm] ACSR의 건전전선(S1), 건전전선에서 외층 알루미늄 소선을 제거한 아연도금 강선(S2), 이 아연도금 강선을 염화안티몬 용액으로 부식시킨 부식강선(S3)과 이 부식 강선에 알루미늄 소선을 조립한 시료(S4)를 사용하였다.

센서는 각 시료에 대하여 주파수가 변함에 따라 다른 특성을 나타내지만 아래 그림 2.2와 같이 마름모꼴(◇)을 유지한다. 만약, 건전전선에서 알루미늄 소선의 단면적만 감소되면 주로 리액턴스 성분이 증가되는 반면에 아연도금이 부식되면 저항과 리액턴스 성분이 증가된다.



(a) coil 1



(b) coil 2

그림 2.2 코일 1, 2의 임피던스 변동 특성

실험 결과인 그림 2.2를 근거로 주파수 100(kHz)에서의 특성을 나타내면 그림 2.3과 같은 형태가 된다. 동일한 주파수에서  $\diamond$  형태는 유사하게 나타난다.

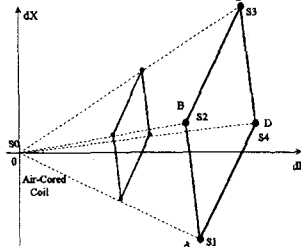


그림 2.3 보빈 길이에 대한 임피던스 변화

일반적으로 관통형 코일은 층수나 길이에 관계없이 그림 2.3과 거의 유사한 형태의 임피던스 변화를 나타내고 있다.

### 2.1.2 컨넥터를 이용한 분할관통형 코일

부식상태를 검출하는 시스템에서 탐상기의 헤드는 가설된 전선에서 사용하기 편리한 구조이어야 한다. 따라서, 센서의 설계 시 탈·착 가능한 헤드 구조가 되도록 해야 한다. 그림 2.4는 컨넥터 문제를 해결하기 위하여 2개의 컨넥터를 클립 형태로 구성한 분할 관통형 코일 (separable encircling coil)로서 구조가 비교적 간편한 장점이 있다. 컨넥터는 원형 여자코일을 지지하는 원통형 플라스틱의 원주 부분에서 코일을 수직으로 빼내어 연결부를 외부로 구성하는 방법이다. 이러한 구조는 제작이 용이하며 시료 결합에 대한 자속 변화가 그림 2.1의 관통형 코일과 유사한 특성을 나타낸다.

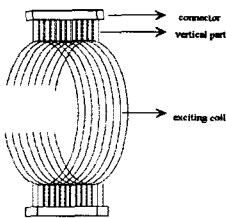
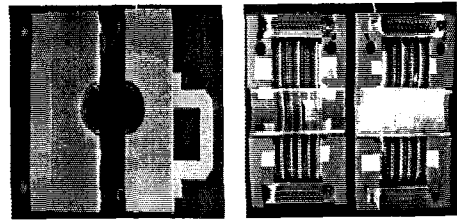


그림 2.4 분할 관통형 코일 구조

센서 헤드는 그림 2.5과 같이 설계, 제작되었다. 물론, 보빈의 길이를 크게 하면 평균부식을 검출하고 2.1.1절의 수치해석 결과를 적용할 수 있으나 국부결합을 정확하게 검출하기 곤란하다. 따라서, 부식탐상부는 그림 2.5에서와 같이 95(mm) 및 97(mm)용으로 코일 폭은 25(mm)이고, 내경은 26(mm)으로 제작하였다. 그림 2.5(a)는 컨넥터 접속 시 사진으로 그림 2.4와 같은 형태의 코일이 사용되었다. 그림 2.5(b)는 열려진 상태를 나타내며 홀더를 사용하여 여단을 수 있도록 구성하였다.



(a) 닫혀진 상태 (b) 열려진 상태  
그림 2.5 제작된 부식판정부의 구조

센서(coil 3)를 이용하여 실제 ACSR 전선의 임피던스를 측정된 결과, 그림 2.6과 같이  $\diamond$ 형의 모습을 나타냈다. 이는 실험치로써 실제 전선의 부식 상태를 나타내는 지표가 되며 관통형 솔레노이드 코일 센서에 대해서 측정된 그림 2.2와 유사한 경향을 나타내므로 실용 가능성을 확인할 수 있었다.

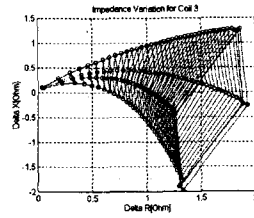


그림 2.6 전선시료의 임피던스 변화

## 2.2 ACSR전선 결합감지장치의 구성

송전선의 가공지선에 주로 사용되는 ACSR전선 결합 검출기의 전체적인 구성도는 다음과 같다.

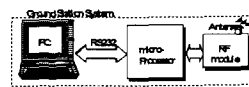
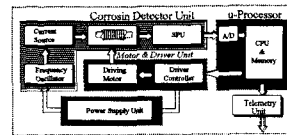


그림 2.7 제작된 결합감지장치의 구성도

그림 2.7은 제작된 공중기를 보여준다. 공중기에는 센서 및 신호처리부 이외에 프로세서, 무선 송수신기 및 모터 제어기로 구성, 제작되었다. 엔코더가 부착된 DC 서보모터가 사용되고 타이밍 벨트에 의해 휠에 동력이 전달되도록 설계되었다. 전원은 12(V), 7.0(Ah)의 배터리가 2개 내장되었다.

### 2.2.1 신호처리부 설계

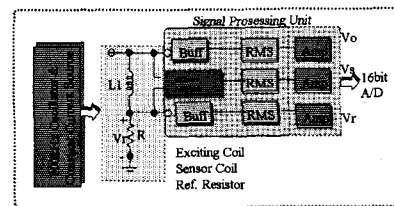


그림 2.8 센서와 SPU

그림 2.8은 설계된 센서와 신호처리부를 나타낸다. 검출부는 100(kHz)의 고주파 정현파 신호를 발생하는 정

밀급 발전기와 센서에 정전류를 공급하는 정전류원 회로로 구성된다. 이 때, 부식관정부는 분할 관통형 솔레노이드 코일 구조로 그림 2.5와 같은 형태를 사용하였다. 그림 2.8에서 R은 정전류에 의해 기준전압을 유지하는 정밀저항이다. 여기서 RMS/DC는 고주파 정현파 입력을 실효치로 변환하는 소자이며 센서의 출력신호가 작기 때문에 증폭기가 사용되었다. 이 때, 센서의 단자전압은

$$\dot{V}_s = \dot{V}_o - \dot{V}_r \quad (2.3)$$

이다. 여기서  $V_r$ 는 기준전압,  $V_o$ 는 출력전압 및  $V_s$ 는 코일의 단자전압으로 센서전압을 나타낸다. 3개의 출력전압이 신호처리 회로에서 프로세서의 16(bit) AD 컨버터로 순차적으로 읽어들인다.

### 2.2.2 코일 출력의 실수부, 허수부로 분리하는 방법

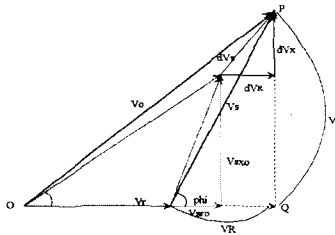


그림 2.9 센서전압의 실수부와 허수부의 산출

그림 2.9는 센서의 임피던스에 대응하는 전압  $V_s$ 의 실수부( $V_R$ )와 허수부( $V_X$ )를 분리하는 방법을 나타낸다. 계산된  $V_R$ 과  $V_X$ 를 복소평면이나 x-y 평면에 도시하면 그림 2.6과 같은 특성을 얻을 수 있다. 이러한 결과로부터 ACSR 전선의 결함을 추정할 수 있는 것이다. 다음은 측정된 3-벡터 전압으로 센서 단자전압의 실수부와 허수부를 계산하는 절차를 나타낸다.

- ① 시료 삽입시  $V_o$ ,  $V_r$  및  $V_s$ 를 측정
- ②  $V_r$ 와  $V_s$ 를 이용하여  $\cos \phi$ 를 계산

$$\cos \phi = \frac{1}{2V_r V_s} (V_o^2 - V_r^2 - V_s^2) \quad (2.4)$$

- ③  $V_s$ 의 실수분 계산 :  $V_R = V_s \cos \phi$  (2.5)

- ④  $V_s$ 의 허수분 계산 :  $V_X = \sqrt{V_s^2 - V_R^2}$  (2.6)

- ⑤  $V_R$ ,  $V_X$ 를 x-y평면에 작성하여 결함 등급을 평가

### 2.2.3 무선용 프로세서의 구성

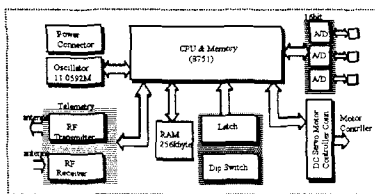


그림 2.10 주 프로세서의 설계

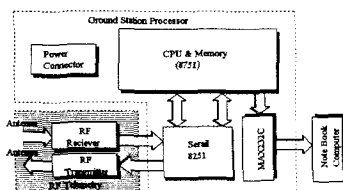


그림 2.11 지상기 프로세서

### 2.2.4 결함감지장치의 특성

표 2.1은 제작 탐상기의 특징을 나타낸다.

표 2.1 제작 탐상기의 특징

번호	항목	규격	특징
1	크기	400×210×550	안테나 165(mm)
2	중량	18(kg)	
3	센서형태	와류 센서	분할 관통형
3	모터	DC24[V], 23[W]	엔코더 부착
4	주행속도	0~10[m/min]	가변
5	구동전원	12[V], 7[Ah], 2개	재충전용
6	측정 데이터	$V_r$ , $V_s$ , $V_o$	
7	통신 속도	1,200[bps]	
8	무선 통신	통신 방법	반 이중통신
9		통신 거리	100[m] 이내
10	변조 방법	FSK 변조	

## 3. 결 론

ACSR전선의 국부결함을 검출하기 위하여 분할관통형 센서를 이용한 전선 결함검출기의 제작에 대해서 살펴 보았다. 또한 제작된 결함검출기는 무선에 의해 지상에서 제어가능하도록 함으로써 실용성을 더하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 전선의 부식정도를 측정하기 위하여 분할 관통형 센서를 제작하여 실용 가능성을 확인하였다.
2. 센서의 출력 신호를 실수부와 허수부로 분리 가능하도록 신호처리부를 설계함으로써 전선의 알루미늄 또는 아연도금강선의 부식정도를 판단가능하게 하며, 전선부식결함에 따른 정량화 가능성을 확인하였다.
3. 결함감지장치는 측정 데이터를 지상기에 전송하거나 지상에서 공중기의 동작을 조절가능하도록 제어용 무선시스템을 설계하였으며, 지상에서 노트북으로 무선 제어가 가능하도록 제작함으로써 실용성을 더하였다.
4. 실선로에서의 문제점을 검토하기 위하여 현장 실증 시험을 계획하고 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] P.H. Schwabe, and D. Pike., "The measurement of corrosion in overhead power lines", Anti-corrosion Methods Materials, Vol.35, No.7, pp.4~5, July 1988.
- [3] J. Iinuma, J. Endo, etc., "Corrosion detector robot for overhead transmission lines", Fujikura Tech. Rev., No.21, pp.74~83, 1992.
- [4] 遠藤 誠, 飯沼順二, "電線腐食檢出裝置の開發・實用化について", 日本 東北電氣 研究報告 No. 66, pp.6~11, 1992.
- [5] J. Blitz, Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing, Adam Hilger, 1991.
- [6] 강창연, 전자통신, 북두출판사, 1996