

## 와전류 기법을 이용한 가공전력선 열화 진단

김충혁<sup>1</sup>, 김탁용<sup>2,a</sup>, 오용철<sup>2</sup>, 최운식<sup>3</sup>, 조춘남<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 광운대학교 교양학부

<sup>2</sup> (주)주암전기통신 탐지기술연구소

<sup>3</sup> 세한대학교 기술교육학과

<sup>4</sup> 대조건설주식회사 기술부

## Degradation Diagnosis of Overhead Power Lines Using Eddy Current Technology

Chng-Hyeok Kim<sup>1</sup>, Tag-Yong Kim<sup>2,a</sup>, Yong-Cheul Oh<sup>2</sup>, Woon-Sik Choi<sup>3</sup>, and Choon-nam Jo<sup>4</sup>

<sup>1</sup> General Science Education Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea

<sup>2</sup> R&D Center in Juam Electric & Communication Co., Ltd., Seoul 136-820, Korea

<sup>3</sup> Department of Technology Education, Sehan University, Youngam 526-702, Korea

<sup>4</sup> Department of Technology, Daejo Electrical Construction Co., Seoul 572-125, Korea

(Received April 8, 2014; Revised April 10, 2014; Accepted April 18, 2014)

**Abstract:** Internal corrosion of the distribution line can be detected in order to develop techniques of non-destructive inspection methods that operate only on the metal track eddy current diagnosis is possible by applying the technique investigated. Sensor for the production of a finite element method modeled by using an eddy current sensor, a distribution line by using an accelerated aging samples of sodium hydroxide was prepared. Sheathed cables for internal corrosion studies detected using an eddy current sensor is considered to be possible.

**Keywords:** Overhead power lines, Eddy current technology, Internal corrosion, Degradation, Diagnosis

### 1. 서론

산업의 발달과 더불어 클린에너지 사용의 증가는 전기사용량의 증가를 초래하였으며, 이는 송배전선로 증가와 더불어 유지관리에 대한 많은 방법이 시도되고 있다. 특히 배전선로에서 사용되는 전력케이블의

열화는 전선의 재질, 제조 방법뿐만 아니라 선로의 환경, 부하의 종류 등에 따라 다양한 열화가 발생한다. 전선 열화가 가중된 지역에서는 전선 단선사고가 빈번하게 발생할 수 있으며, 이로 인해 막대한 재산적 피해와 소중한 인명 사고로 이어질 수 있으며, 특히 일반 시민과 매우 근접하게 설치되어 있으므로 안전관리는 매우 중요한 사항이다 [1].

표 1은 2006년 배전선로 고장사고에 대한 현황을 나타낸 것으로 기자재 열화에 의한 사고가 30건으로 전체 사고의 11%를 차지하고 있다 [2]. 특히 기자재 열화의 대부분은 트래킹 또는 수분 침투에 의한 전선

a. Corresponding author; [ty9096@elecna.co.kr](mailto:ty9096@elecna.co.kr)

**Table 1.** 22.9 kV distribution line fault status in 2006.

Classification	Accident contact	Natural phenomena	Error of public	Degradation of equipment	Etc.	Sum	Share (%)
AL-OC	71	90	56	30	17	264	65.0
AL	18	16	6	5	2	47	11.6
CU	2	1	0	0	0	3	0.7

○ 관련근거 : 2006년도 배전설비 정전분석 및 예방대책, 배전운영처, 2007. 4

단선으로 추정하고 있으며 실제 운용 실적에 따르면 해안지역, 극심한 공업오존 지역 등에서 바인드선을 따라 전선의 피복이 침식하는 트래킹 현상이 다수 관측되고 있으며, 이 현상은 봄철에 비교적 진행이 빠르게 나타나는 것으로 알려져 있다. 특히, 새벽이나 밤 시간에 바인드선 주변에서 불규칙한 소리를 동반한 방전현상이 자주 관측되는 것으로 보고되고 있는데 이러한 여건들은 트래킹 현상으로 규명되고 있다. 트래킹에 의해 일단 피복에 손상이 생기면 도체가 노출되고, 트래킹의 진진 또는 부식 등에 의해 피복뿐만 아니라 도체도 손상되어 결국은 단선의 가능성도 있다. 트래킹에 의해 지지부 주변의 도체 일부가 노출되면 서지 침입 시 섬락의 가능성이 높아지고, 아크로 진전되어 이 점에서 아크 용단의 가능성도 높아진다.

배전선로는 도체 소선 간 및 도체와 절연체간의 가는 틈새에 빗물이 침입하면 국부적인 부식에 의한 孔蝕(핏트)이 생긴다. 이와 같이 생긴 공식부에 응력이 집중하면 산화피막에 분열이 발생하며 분열의 선단에 노출된 도체는 바로 부식이 진행된다. 새로 생성된 산화피막은 재도 응력에 의해 같은 장소에 집중되고 결국 분열과 부식의 반복에 의해 도체는 과단에 이르게 된다. 그러나 현재 배전선로 진단 방법으로 사용하는 초음파 및 열화상 카메라는 금구류 열화에 대한 검출만이 가능하며, 배전선로에 대한 진단은 현재 배전선로 상에서 전선열화로 인한 사고를 대비하기 위해 사용하는 방법은 1) 현장에서 피복이 불량한 전선을 외관 점검하여 사진을 찍어 확인한 후 교체하는 방식과 2)전선 이력을 데이터 베이스화하여 내용 연한에 맞춰 일괄 교체하는 방식이 있다 [1,2]. 이러한 방법은 경험에 많은 전문가를 필요로 하고, 일괄교체는 환경에 대한 고려가 없으므로 사고에 대해서 안전하다고 할 수 없는 방식이며, 육안 검사로 표면에 대

한 진단만 하기 때문에 피복전선 내부의 문제점에 대한 대책은 전무하다고 할 수 있다. 와전류 탐상기법은 비파괴 검사 (nondestructive testing, NDT) 방법 중의 한 가지 방법으로 전도체인 금속에만 반응하여 기름, 먼지 등, 오염으로 인한 사용 환경의 제한이 적고 고주파 가진 전류의 운용에 따른 고응답 속도로 금속소재의 변위 및 진동 측정, 모재 내의 이상 탐상 등 여러 분야에 활용되고 있다 [3].

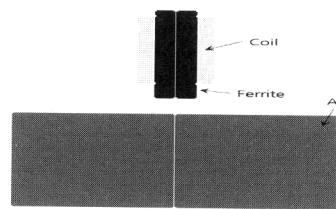
본 연구는 ACSR 전선의 내부 Al도체 특성을 변화를 확인하기 위한 장치로 와전류 센서를 이용한 배전선로의 내부 열화를 검출하는 시스템 개발을 목표로 유한요소기법을 이용하여 와류센서 모델링을 기초로 실제 와류센서를 제작하여 가속열화에 의한 센서 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시뮬레이션

와류 센서의 모델링을 위해 유한요소법을 이용한 FULX 12 프로그램을 이용하였으며, 유한요소법은 다른 수치해석 방법들에 비하여 해석 영역의 분할이 용이하고, 풀어야 할 행렬의 성감도가 높다는 장점을 가지고 있다.

그림 1은 모델링 형상에 대한 구조를 나타낸 것이다. 실제 제작할 것을 기준으로 페라이트 비투자율은 300, 코일 턴수는 300턴으로 설정하였다 [3-5]. 연속적으로 이어져 있는 와전류 센서의 코일부는 모든 부분에서 동일한 전류가 흐르므로 동일한 전류가 흐르는 N턴의 코일 즉, 스스로는 상호 인덕턴스를 갖지 않으며 자기 인덕턴스만을 갖는 최소 단위인 원형 루프가 동심을 이루며 전체 코일턴 수만큼 보빈형상에 따라 중첩되어 직렬 연결되어 있다고 근사할 수 있으며 [6-10], 코일 루프의 두께는 코일에서 전도체인 구리만의 두께와 같게 하였다.



**Fig. 1.** Modeling of shape.

센서와 모재와의 이격 거리는 5 mm로 피복 두께와 센서지그에 의한 이격을 고려한 거리이다. 마지막으로 모재 내부에 결함을 주었을 때 자장분포 변화를 조사하였다.

### 2.2 가속열화

배전선로의 열화 현상은 산화피막에 분열이 발생하며 분열의 선단에 노출된 도체는 바로 부식이 진행되어 백화현상이 발생하게 된다.

그림 2는 실제 부식전선의 단면을 촬영한 것으로 내부에 하얗게 산화된 모습을 볼 수 있다.



Fig. 2. Photo of depleted cable.

본 실험에서도 알루미늄 전선을 수산화나트륨에 침적시킨 후 18, 24, 27시간을 부식시켰으며, 부식 후 선로의 두께 변화를 측정하여 원시료에서 굵기 변화량을 측정하여 부식진행 정도를 정의하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 시뮬레이션에 의한 자속분포

그림 3은 자장분포를 나타낸 것으로 센서를 중심으로 좌우가 균일하게 분포됨을 확인할 수 있으며, A점에서의 자속밀도는  $11.204E-3$  T의 값을 나타내고 있다.

그림 4는 등자위선을 나타낸 것이다. 모델링 구조가 대칭적이므로 등자위선도 대칭적으로 분포하며, A점에서  $-35.485E-6$  Wb/m의 전위를 나타내고 있다.

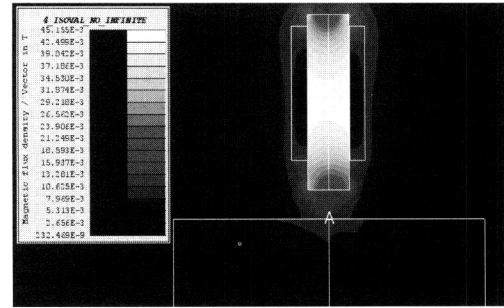


Fig. 3. Flux density of s-1 model.

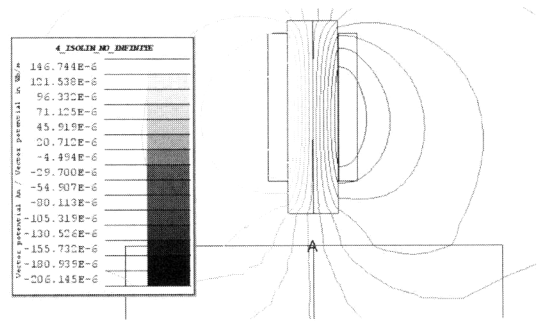


Fig. 4. Magnetic potential of s-1 model.

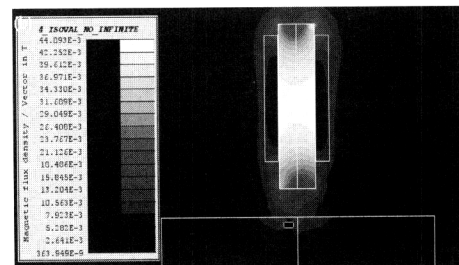
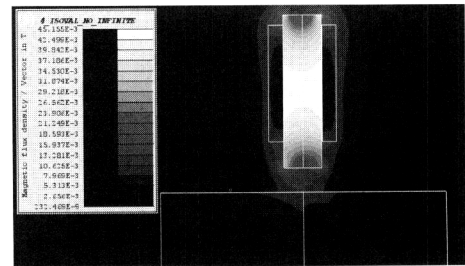


Fig. 5. Flux density. (a) no-void and (b) void.

내부 결함에 의해 와류 특성의 변화를 보기 위해 모재 내부에 사각형 보이드를 임의 삽입한 후 자장

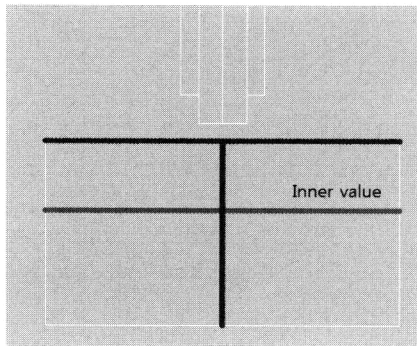


Fig. 6. Measurement location by distance.

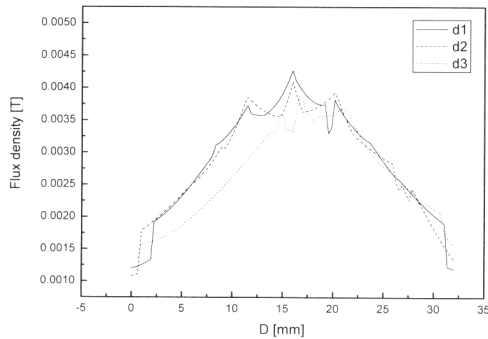


Fig. 7. Flux density according to the distance. (d1: 3 mm, d2:4 mm, d3:5 mm).

분포를 조사하였다.

그림 5는 결함유무에 따른 자장 분포를 나타낸 것으로 보이므로 인해 와류센서에서 발생한 자장을 보이드 방향으로 집중되는 현상을 볼 수 있었으며, 모체 내부에서도 보이드 주변에서 자장이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이는 와전류 탐상 시 자장의 변형을 유도하여 검출값이 변화될 것으로 예측할 수 있다. 센서와 모체와의 거리 변화에 따른 모체 내부의 자속분포를 조사하기 위해 와류센서의 위치를 변화시키면서 모체 내부 자속 분포를 조사하였다. 검출 위치는 와류센서와 거리가 일정한 위치를 설정하였으며, 이격 거리만 변화시켰다.

그림 7은 그림 6의 'Inner value' 위치에서의 자속 밀도를 나타낸 것이다. 와류센서와 모체와의 거리는 내부 자속의 감소를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. 앞에서 언급한 바와 같이 배전선로의 피복두께는 1~2 mm이고, 와류센서 외함을 1 mm로 간주하면 3 mm 이상의 이격 거리를 고려해야만 하므로 시

물레이션 결과 5 mm 이격까지도 이격시켜도 내부에서의 자속 밀도는 크게 손상되지 않음을 알 수 있었다.

### 3.2 인공열화에 의한 부식

전선의 열화는 피복을 제거하고 수산화나트륨에 전선을 18, 24, 27시간 동안 침식한 후 꺼낸 후 부식 부분을 제거하고 부피 변화를 조사하였다.

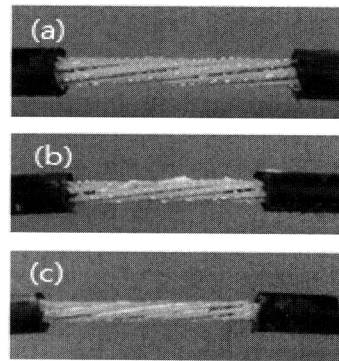


Fig. 8. Depleted cable by corrosion time. (a) 18 hour, (b) 24 hour, and (c) 27 hour.

표 2는 산화에 의한 부피 변화를 조사한 것으로 18시간 이상이면 부식이 10% 이상 진행되었으며, 초기 부식은 0.5%/시간으로 진행되다가 부식이 진행되기 시작하면 가속 반응이 일어나 1.3%/시간으로 부식정도가 배 이상 증가됨을 확인할 수 있었다.

Table 2. Rate of the specimen by artificial degradation

Classification	Measurement point				Corrosion rate(%)			
	Front	Middle	Rear	Average	Front	Middle	Rear	Average
No corrosion	12	12	12	12	0	0	0	0
18	11	10.4	11	10.8	8.3	13.3	8.3	10.0
24	9.9	9.2	10	9.7	17.5	23.3	16.7	19.2
27	9.4	8.8	9.7	9.3	21.7	26.7	19.2	22.5

그림 9는 부식에 의한 물성을 보기위해 EF-SEM을 촬영한 사진으로 원시료의 표면은 매끄러웠으며, 18시간 침식시료는 크랙이 많이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 시간이 24시간 이후에는 다시

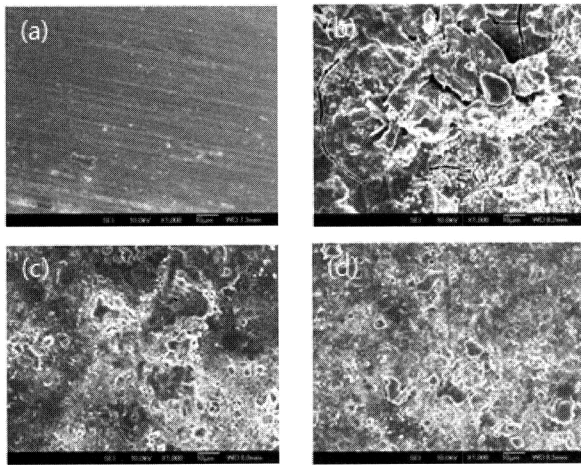


Fig. 9. EF-SEM photo by corrosion time. (a) no corrosion, (b) 18 hour, (c) 24 hour, and (d) 27 hour.

매끄러운 상태로 변화되는 것을 확인할 수 있었는데 이는 초기 가속에서는 금속 표면을 분해하다가 일정 시간이 지나면 표면에 산화층이 형성되는 것으로 사료된다.

**3.3 와류센서에 의한 측정 결과**

와전류센서 성능을 측정하기 위해 모의 환경에 인공열화 시료를 연결한 후 500 cm/s로 정속도 주행하면서 신호를 검출하였다. 검출 횟수는 100회 이상 실시하였으며, 그림 10은 160 sq 배전선로의 검출 데이터를 평균값으로 처리한 후 표현한 것이다.

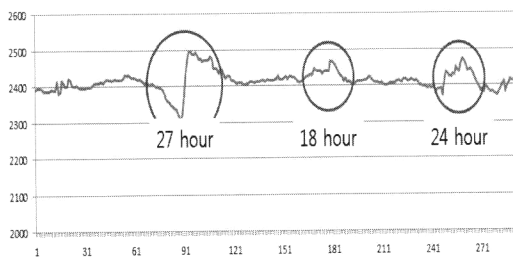


Fig. 10. Output waveform by artificial degradation at 160 sq cable.

인공 열화시료에 대한 와전류 센서의 측정값을 비교해 보면 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, 측정거리는 시뮬레이션과 동일하게 센서와 모제 간의 간격을 5 mm로 이격한 후 측정하였다.

Table 3. Detection value of eddy current sensor by artificial degradation.

Value	No corrosion	Corrosion time		
		18	24	27
Average	2,341	2,421	2,441	2,479
Maximum	2,375	2,451	2,480	2,510
Minimum	2,355	2,383	2,401	2,373
Deviation	24.2	35.6	28.2	31.2

표 3에서 보는 바와 같이 부식 시간이 길어질수록 와전류센서의 검출값은 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 증가폭은 4.74 step/hour가 되었다.

**4. 결론**

와전류 기법을 이용한 가공전력선 열화진단 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시뮬레이션을 통해 5 mm 이격 시 와전류 센서의 자장이 금속 내부로 15 mm까지 침투하는 것을 확인할 수 있었다.
2. 내부 보이드에 의해 와전류 센서에 의한 자장이 변화되는 것을 확인할 수 있었다.
3. 전선 부식이 증가하면, 와전류센서 측정값도 같이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.
4. 주행으로 인한 진동이 있었음에도 불구하고 부식에 의한 영역에서 검출값이 변화됨을 알 수 있었으며, 이를 통해 부식률이 10% (18시간 부식) 이상에서 전선 내부의 부식을 검출할 수 있을 것으로 사료된다.
5. 모의한 형상 설계에 기초하여 제품제작 시 특성의 차이는 있지만 전체적인 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

**감사의 글**

이 논문은 2012년도 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

**REFERENCES**

[1] H. S. Jung, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 11, 101 (2011).

- [2] Y. C. Oh, H. S. Jeong, J. B. Lee, J. H. Yim, K. J. Son, J. S. Kim, and C. H. Kim, *Proc. of the KIEEME Annual Summer Conference*, 11, 77 (2010).
- [3] G. S. Lee, *Master's Thesis*, p. 1-10, Busan University, Busan (2006).
- [4] *Eddy Current Characterization of Materials and Structures*, ASME Special Technical Publication (American Society for Testing and Materials, 1981)
- [5] S. D. Kim and J. M. Shim, *Journal of Korea Sensor Society*, 6, 87 (1997).
- [6] S. Leonard and D. L. Atheron, *IEEE Trans. on Mag.*, 32, 1905 (1996).
- [7] S. J. Norton and J. R. Bowler, *J. Appl. Phys.*, 73, 501 (1993).
- [8] S. D. Kim, *J. of Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Eng.*, 13, 77 (1999).
- [9] W. H. Hayt, *Engineering Electromagnetic* (McGraw-Hill, 1981).
- [10] Y. J. Wang, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC*, 23, 419 (1999).