

피복전선의 내부 열화 검출용 센서 개발

김기준^{1,a}

¹ 인천대학교 메카트로닉스공학전공

The Development of Diagnostic Sensor for Inner Deterioration of Covered Electric Wire

Ki-Joon Kim^{1,a}

¹ Department of Mechatronics Engineering, Incheon National University, Incheon 406-772, Korea

(Received March 10, 2014; Revised March 13, 2014; Accepted March 17, 2014)

Abstract: In this research, it have developed a sensor that could diagnose inner deterioration of covered wires. With this sensor it observed results from simulation, and the attribute required for realization. For simulation it have used FLUX, it have considered all of geometric and electromagnetic information from coil and base metal that influences eddy current sensor's property in order to predict the final result. It assumed there is no mutual inductance in the coil with N number of turns, because equivalent current flows in coil that is continuously connected in eddy current sensor. It assumed circular coil loop draws a circle, always have self inductance, and they are connected in series and overlapped according number of turns (N) in coil, and bobbin configuration. Actual sensor was produced with consideration of inductance and number of turns (N). In conclusion, it were able to test the dependency through results from simulation, actual measurement, and modeling of simulation. It is considered that attributes of respective base metal and structure can be predicted by simulating in advance.

Keywords: Diagnostic sensor, Simulation, Modeling, Eddy current, Electric wire

1. 서 론

배전 선로에서 사용되는 전력케이블의 열화는 전선의 재질, 제조 방법뿐만 아니라 선로의 환경, 부하의 종류 등에 따라 다양한 열화가 발생한다. 전선 열화가 가중된 지역에서는 전선의 단선 사고가 빈번하게

발생할 수 있으며, 이로 인해 막대한 재산적 피해와 소중한 인명 사고로 이어질 수 있다.

일반적으로 케이블 열화는 내부 수분 침투로 인한 수트리, 전기적인 stress가 재료의 표면에 집중되어 절연과괴에 이르는 트래킹, 전계 집중에 의한 절연층 열화와 관련하여 전선 표면과 관련한 연구 및 장비의 개발이 되어왔다. 반면 도선의 내부 상태 결함(녹, 단선)은 선로의 전류밀도 증가를 초래하고 국부적인 열 특성 변화와 과전류 생성 등과 같은 문제점을 만들어 절연층을 파괴시키고 전선 단선의 원인이 되었음에도 불구하고 연구가 미진하였다.

Corresponding author: kijoon@incheon.ac.kr

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

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. 이러한 방법은 경험이 많은 전문가를 필요로 하고, 일괄 교체는 환경에 대한 고려가 없으므로 사고에 대해서 안전하다고 할 수 없는 방식이며, 육안 검사로 표면에 대한 진단만 하기 때문에 피복전선 내부의 문제점에 대한 대책은 전무하다고 할 수 있다.

와전류 탐상기법은 비파괴검사 (nondestructive testing, NDT) 방법 중의 한 가지 방법으로 전도체인 금속에만 반응하여 기름, 먼지 등 오염으로 인한 사용 환경의 제한이 적고, 고주파 전류의 운용에 따른 고응답 속도로 금속 모재의 변위 및 진동 측정, 모재 내의 이상 탐상 등 여러 분야에 활용되고 있다 [1].

와전류 센서의 장점에 따른 여러 활용에 불구하고 와전류 센서의 출력은 센서 코일과 측정 대상의 기하학적 형상 및 물성치의 변화에 대한 비선형적 특성이란 단점으로 그 정확도 (accuracy)의 한계를 가지며 사용 전 측정 대상별 사전 보정 (calibration)을 해야 하는 불편이 따른다 [1-5].

본 연구는 ACSR 전선의 내부 Al도체 물성 변화를 감지하는 센서 개발을 위해 시뮬레이션 툴을 이용하여 모델링하였다. 출력값에 영향을 끼치는 요소인 센서 코일의 턴 수 공급전류 특성, 이격거리 등의 변화와 모재의 기하학적 정보 및 전자기적 정보 (geometric & electromagnetic data)를 모두 고려하여 와전류 센서의 초기치 및 최종 출력치 예측을 통해 개발에 대한 기초 정보를 확보하고자 하는 것이다.

2. 실험 방법

2.1 모델링

와류 센서의 모델링을 위하여 유한 요소법을 이용한 FULX 12 프로그램을 이용하였으며, 유한요소법은 다른 수치해석 방법들에 비하여 해석영역의 분할이 용이하고 풀어야 할 행렬의 성김도가 높다는 장점을 가지고 있다. 모델링의 변수로는 공급전류, 코일 턴 수 및 모재의 이격거리 변화를 두어 모재 표면 자장 분포 및 이격거리에 따른 자장의 침투 깊이에 대한 값을 조사하였다 [1].

그림 1은 모델링 형상에 대한 구조를 나타낸 것이며,

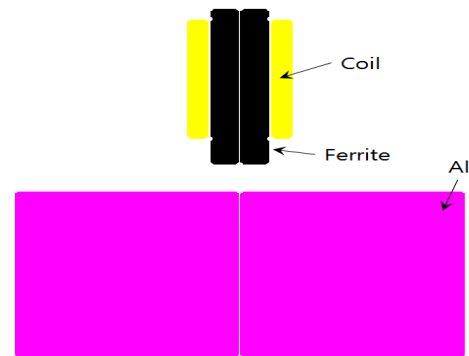


Fig. 1. Modeling of shape.

Table 1. Modeling condition.

| Classification | Current [A] | Coil Turns [turn] | Distance [mm] |
|----------------|-------------|-------------------|---------------|
| s1 | 0.3 | 300 | 5 |
| s2 | 0.4 | | |
| s3 | 0.5 | | |
| s4 | 0.7 | | |
| d1 | 0.7 | 300 | 3 |
| d2 | | | 4 |
| d3 | | | 5 |
| t1 | | | 300 |
| t2 | 350 | 5 | |
| t3 | 400 | | |
| t4 | 450 | | |

표 1에서는 모델링 조건을 나타내었다. 페라이트의 비투자율은 300으로 고정하였으며, 내부 코일 턴 수만 변화시켰다. 모재의 크기는 실제 배전선로의 두께를 고려하여 지름을 30[mm]로 설정하였으며, 센서에 의해 발생된 자장이 모재의 결합에 어떻게 반응하는지도 시뮬레이션하였다.

연속적으로 이어져 있는 와전류 센서의 코일부는 모든 부분에서 동일한 전류가 흐르므로 동일한 전류가 흐르는 N턴의 코일 즉, 스스로는 상호 인덕턴스를 갖지 않으며 자기인덕턴스만을 갖는 최소 단위인 원형 루프가 동심을 이루며 전체 코일 턴 수만큼 보빈 형상에 따라 중첩되어 직렬 연결되어 있다고 근사할 수 있다 [6-9].

여기서 코일 루프의 두께는 코일에서 전도체인 구리만의 두께와 같다. 또한, 센서 코일부로부터 유도되는 측정 대상 금속 표면상의 기전력은 센서 코일부의

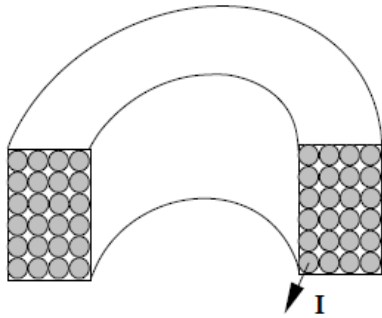


Fig. 2. Coil structure.

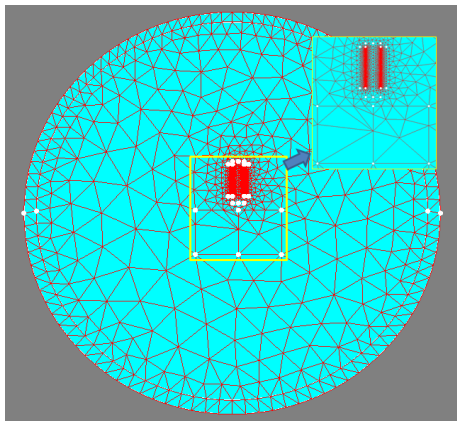


Fig. 3. Mesh structure.

형상이 원통형이고 금속표면에 수직하므로 센서 코일 중심축을 기준으로 반경이 같으면 등전위를 갖는다. 따라서 생성된 와전류는 원형궤도를 갖는다. 즉, 와전류는 등전위에 대한 법선 방향의 흐름은 없고 접선방향의 흐름만이 존재하므로 반경이 다른 원형루프가 동심을 이루며 동일 평면상에 위치해 있고 위치별로 센서 코일부로부터의 유도전압 및 임피던스에 의해 결정되는 전류가 각각의 루프에 독립적으로 흐르고 있다고 근사할 수 있다고 할 수 있다 [1,10].

코일의 선전류 값은 코일에 연결된 연선의 수에 의해 변화되도록 되었으며, 그림 2에서 나타낸 바와 같이 코일에 단면을 통과하는 전류의 값 (I_B)은 직렬로 연결시켜 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_B = n \times I \tag{1}$$

메쉬는 코일에 의해 자장이 형성되므로 코일 주변

을 세밀하게 분할하였으며, 전체 객체 수는 7,142개로 분할하였으며, 메쉬 구조는 그림 3과 같다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자장 분포 및 등자위선

그림 4는 s-1모델의 자장분포를 나타낸 것으로 센서를 중심으로 좌우가 균일하게 분포됨을 확인할 수 있으며, A점에서의 자속밀도는 $11.204E-3[T]$ 의 값을 나타내고 있다.

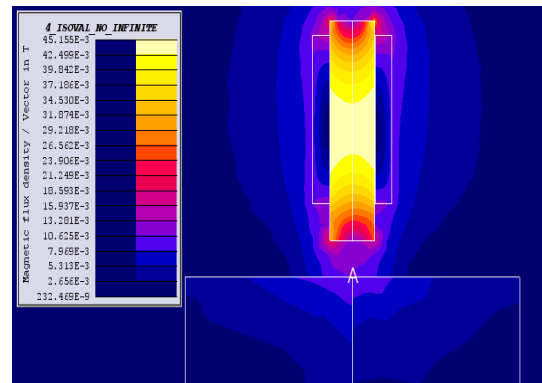


Fig. 4. Flux density of s-1 model.

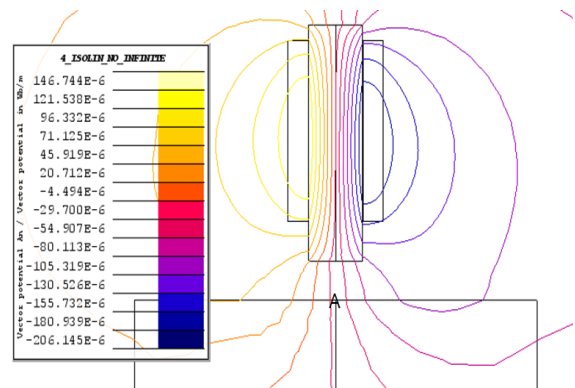


Fig. 5. Magnetic potential of s-1 model.

그림 5는 s-1모델의 등자위선을 나타낸 것이다. 모델링 구조가 대칭적이므로 등자위선도 대칭적으로 분포하며, A점에서 $-35.485E-6$ Wb/m의 전위를 나타내고 있다.

3.2 인가전류에 따른 와류센서 특성

코일의 인가전류를 0.3, 0.4, 0.5, 0.7[A]로 변화시키면서 각 모델의 모체 표면과 모체 내부에서 자속밀도 변화를 조사하였으며, 그림 6은 시뮬레이션 검출위치를 나타내고 있다. 검출 위치는 100개로 설정하여 검출하였다.

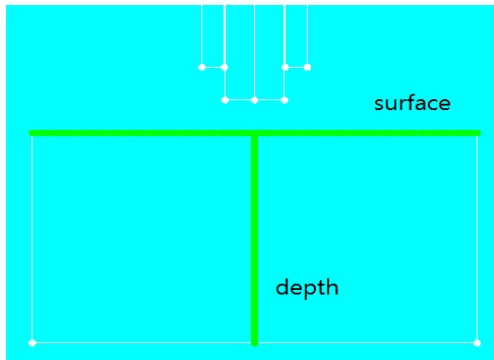


Fig. 6. Measurement location.

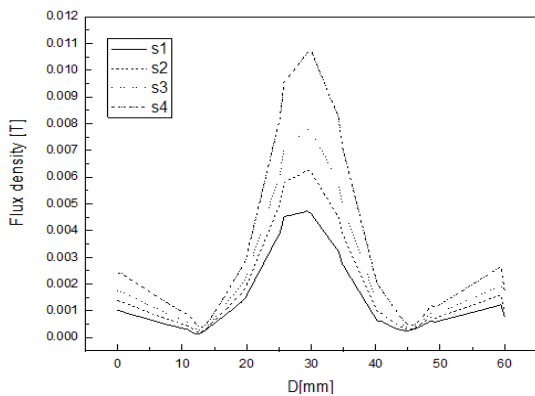


Fig. 7. Flux density at surface by the current.

그림 7은 인가전류 변화에 따른 모체 (Al 판) 표면에서의 자속 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 센서 아래 부분에서 자속의 집중이 형성되었으며, 모체의 끝부분에서 자속 밀도가 증가됨을 확인할 수 있다. 또한 중심에서부터 좌우로 18[mm]까지 자속은 급속히 감소함을 확인할 수 있었다. 페라이트의 지름이 8[mm]인 것을 감안하면 대부분의 발생 자속은 페라이트 크기와 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다. 이를 통해 검출 표면적과 와류 센서의 페라이트와 밀접한 관련이 있음을 예측할 수 있었다.

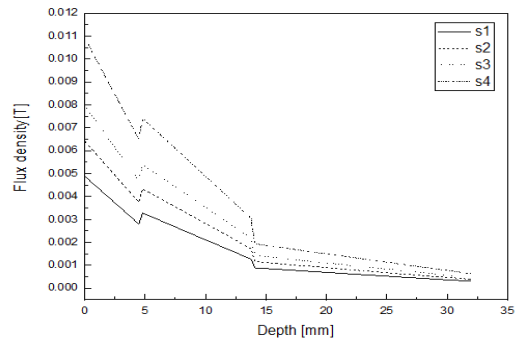


Fig. 8. Flux density at depth by the current.

그림 8은 모체 내부 특성을 보기 위해 Al판의 중심에서 깊이 방향으로 모델링한 결과이다. 깊이의 증가에 따라 지수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 5[mm]이격시 그 세기는 미약하지만 14[mm]까지 자속의 영향이 미치는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 배전선로의 피복이 1~2[mm]의 두께를 가지기 때문에 침투 깊이가 2[mm]이상이면 충분히 내부 전선의 결함을 발견할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 턴 수 변화에 따른 와류센서 특성

그림 9는 코일 턴 수 변화에 따른 표면에서의 자속 밀도 분포를 나타낸 것이다. 턴 수의 증가는 자속의 증가로 모체 표면에 더 강한 자속의 영향을 미치므로 급속 표면에서 와전류 값이 커질 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 실제 제작 시 턴 수의 증가는 센서의 부피를 증가시키는 문제가 발생할 수 있으므로 실제 배전선로의 지름인 32[mm] 이내의 크기에서 최대 턴 수를 형성해야 될 것으로 생각된다.

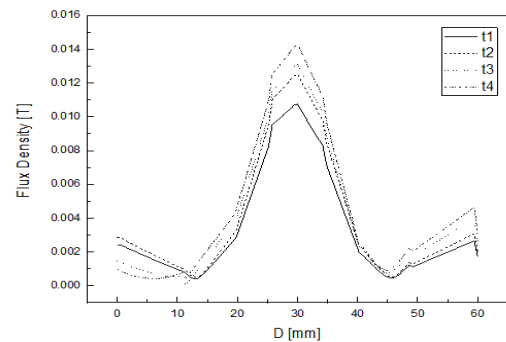


Fig. 9. Flux density at surface by turn number.

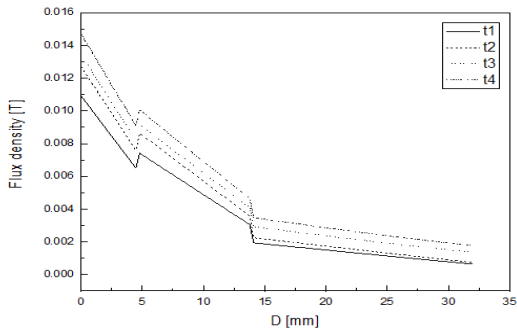


Fig. 10. Flux density at surface by turn number.

그림 10은 코일 턴 수 변화에 따른 모체 내부에서의 자속 분포를 나타낸 것이다. 전류 변화와 동일하게 분포하고 있으며, 자속밀도도 14[mm] 깊이까지 침투됨을 확인할 수 있었다.

3.4 모체 이격거리 변화에 따른 내부 자속 변화

그림 11은 센서와 모체와의 거리 변화에 따른 모체 내부의 자속 분포를 조사하기 위해 와류 센서의 위치를 변화시키면서 모체 내부 자속 분포를 조사하였다. 검출위치는 와류 센서와 거리가 일정한 위치를 설정하였으며, 이격 거리만 변화시켰다.

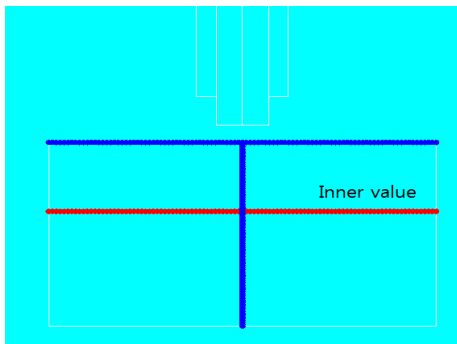


Fig. 11. Measurement location by distance.

그림 12는 그림 11의 'Inner value' 위치에서의 자속밀도를 나타낸 것이다. 와류 센서와 모체와의 거리는 내부 자속의 감소를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있었다. 앞에서 언급한 바와 같이 배전선로의 피복 두께는 1~2[mm]이고, 와류 센서의 외함을 1[mm]로

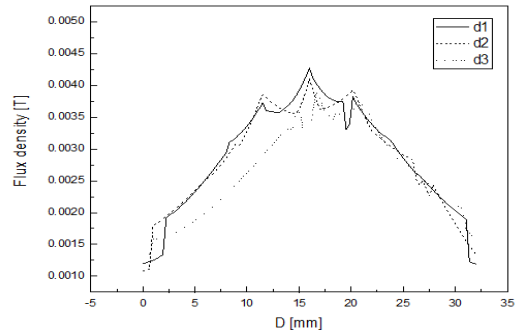


Fig. 12. Flux density at inner by distance.

간주하면 3[mm]이상의 이격 거리를 고려해야만 하므로 시뮬레이션 결과 5[mm]까지 이격시켜도 내부에서의 자속밀도는 크게 손상되지 않음을 알 수 있었다.

3.5 내부 보이드에 의한 자속분포

그림 13은 내부 결함의 유무에 따른 자장분포를 나타낸 것이다. 보이드로 인해 와류 센서에서 발생된 자장을 보이드 방향으로 집중되는 현상을 볼 수 있었으며, 모체 내부에서도 보이드 주변에서 자장이 집중되는 것을 확인할 수 있다. 이는 와전류 탐상시 자장의 변형을 유도하여 검출값이 변화될 것으로 예측할 수 있다.

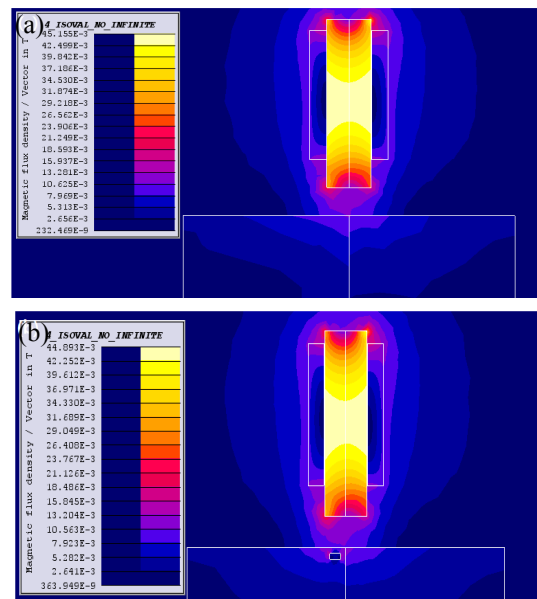


Fig. 13. Flux density according to no-void and void.

4. 결 론

ACSR-OW 전선 내부 도체 열화 검출용 와류센서 모델링을 통한 시뮬레이션 연구를 통해 실제 배전선로의 피복과 와류센서 외함을 고려할 때 5[mm] 이격에서도 와류 탐상이 가능할 것으로 확인되었으며, 전선의 전체를 검출하기 위해서는 침투 깊이로 인해 양쪽에서 검출을 해야 됨을 확인할 수 있었다. 또한 내부 보이드에 대한 자속 변화 감지를 통해 와류 센서에 의한 ACSR-OW 배전선로의 내부 결함에 대한 진단이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2013년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] G. S. Lee, *Master Thesis*, p.1-10, Busan University, Busan (2006).
- [2] *Eddy Current Characterization of Materials and Structures* (ASME Special Technical Publication, American Society for Testing and Materials, 1981)
- [3] P. L. Dowell, *Proc. IEEE*, 113 (1966).
- [4] C. C. Cheng, C. V. Dodd, and W. E. Deeds, *Int. J. Nondestruct. Test.*, **3**, 109 (1971).
- [5] S. D. Kim and J. M. Shim, *J. 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 Electromagnetics, McGraw-Hill, 1981)
- [10] Y. J. Wang, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC*, **23**, 419 (1999).