경계요소해석을 이용한 와전류 센서의 특성 해석

윤만식[1], 최덕수[1], 양규창[1], 이향범[1], 박승한[2]
[1] 숭실대학교 전기공학과, [2] (주)비전로직텍

Analyse of characteristic of Eddy current sensor using Boundary Element Method

Man-sik Yoon[1], Duck-su Choi[1], Gyu-chang Yang[1], Hyang-beom Lee[1], and Seung-han Park[2]
[1] Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ., [2] Vision Logictec Inc.

Abstract - In this paper, the characteristics analysis of the eddy current sensor by using boundary element method package is presented. For the boundary element analysis, Faraday, which is the commercial package of the integrated engineering software, is used. To observe the impedance characteristic of the eddy current senor with the sensor position and lift-off, the eddy current testing analysis is performed on the ferromagnetic plate with defect. Considering the skin depth of the ferromagnetic specimen, the 800[Hz] driving source is chosen. The result shows that electro motive force is reduced as the probe moves to near the defect and the lift-off of the probe increases.

1. 서 론

현대 사회에 접어들어서 건축물이나 공장의 생산 설비 등에 안전성과 신뢰성이 많이 요구되고 있다. 이러한 설비의 안전성과 신뢰성을 파악하는 데는 여러 가지 방법이 있으나 제품의 원형과 기능을 전혀 변환시키지 않고 성질, 상태 내부 구조 등을 알아낼 수 있는 비파괴검사(Non-Destructive Testing, NDT)[1]방법이 최근 들어서 많이 쓰인다. 이 방법을 통하여 산업현장 에서 제품의 결함 유. 무를 파악하여 신뢰성을 높이고, 제조기술의 개량시험 결과를 분석 검토하여 제조 조건을 수정. 보완함으로써 제조기술 발전 및 개량을 할 수 있다. 또한 적절한 시기에 불량을 조기 발견하여 원가 절감뿐만 아니라 안전성을 확보할 수 있다. 특히 비파괴검사방법 중 와전류 탐상법은 도체의 표면이나 근처의 결함에 효과적이며 검사시간도 짧아 생산라인에서 제품의 품질관리에 활용할 수 있고 철강, 비철의 관이나 봉, 선 등에 대하여 고속으로 자동화하여 온라인 생산의 전수 검사에 유용하다. 또한 발전소와 석유 플랜트의 열교환기의 전열관이나 항공기 부품의 정기적 검사 등의 보수, 보전에 용이하다. 비파괴검사를 수행하기 위해서는 센서의 특성이 상당히 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 강자성체에 결함이 있는 경우, 이 결함을 탐지하기 위한 와전류센서의 특성을 살펴보았다. 모든 경우에 대하여 센서를 제작하여 시험하는 방법이 가장 좋으나, 경제적인 면 및 시간적인 면에서 바람직한 선택은 되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 수치해석방법을 통하여 센서의 특성을 살펴보았다. 센서의 특성을 보기 위하여 전자기 수치해석을 수행하였으며, 전자기수치해석방법으로는 경계요소법을 사용하였다. 경계요소법은 유한요소법에 비하여 상용소프트웨어의 수도 적을뿐더러, 수학적인 어려움 때문에 많이 사용하지 않고 있다. 하지만, 1차원 낮은 모델링을 사용하기 때문에 미지수의 개수가 현저히 줄어들 수 있어 계산 시간면에서 장점이 있다. 또한 공기부분에 대한 요소망을 생성하지 않기 때문에 모델링에 있어서도 좋다. 특히 경계가 큰 무한경계(open boundary)문제의 경우 경계요소법이 좋다. 와전류문제와 같이 표피효과를 가지는 문제에 대해서는 유한요소법의 경우 표피효과에 대응하여 요소망을 구성하여야 하지만, 경계요소법의 경우 매질의 경계만을 모델링하기 때문에 표피효과와 상관없이 요소망을 구성하게 되고, 침투깊이가 얇은 경우 아주 효과적이다. 본 연구에서는 이러한 경계요소법을 이용하여 강자성체평판에 결함이 존재하는 경우에 대하여 센서를 이동시키면서 센서에 유기되는 유기기전력을 살펴보았다. 또한, 센서의 리프트오프를 변화시켜가면서 신호의 변화를 살펴보았다.

2. 경계요소법

와전류문제를 해석하기 위한 맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{4}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{5}$$

여기서 $\vec{B}$, $\vec{H}$, $\vec{E}$, $\vec{J}$, $\vec{J}_e$는 각각 자속밀도(magnetic flux density), 자계의 세기(magnetic field intensity), 전계의 세기(electric field intensity), 전류밀도(current density), 와전류밀도(eddy current density)를 의미한다. 또한 μ 및 σ는 자기투자율(magnetic permeability) 및 전기전도도(electrical conductivity)를 의미한다.

본 논문에서는 와전류문제의 3차원해석을 위하여 등가전류 및 등가전하를 변수로 사용하여 경계요소해석을 사용하였다. 본 논문에서 사용된 경계요소방정식은 다음과 같다[2].

(B^i, E^i)는 외부에서 주어진 장(field)이다. 다음의 수식에서 첨자 1은 도체가 아닌 부분이며, 첨자 2는 도체영역에서의 값이다.

먼저 도체가 아닌 부분에서의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c\vec{B}_1(\vec{r}) &= \vec{B}^i(\vec{r}) + \int_s \hat{n} \times \vec{B}_1(\vec{r}) \times \nabla' G_1 ds' \\ &\quad + \int_s \hat{n} \cdot \vec{B}_1(\vec{r}) \nabla' G_1 ds' \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} c\vec{E}_1(\vec{r}) &= \vec{E}^i(\vec{r}) - j\omega \int_s \hat{n} \times \vec{B}_1(\vec{r}) G_1 ds' \\ &\quad + \int_s \hat{n} \times \vec{E}_1(\vec{r}) \times \nabla' G_1 ds' \\ &\quad + \int_s \hat{n} \cdot \vec{E}_1(\vec{r}) \nabla' G_1 ds' \end{aligned} \tag{7}$$

도체내부에서의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c\vec{B_2}(\vec{r}) &= -\int_s \hat{n}\times\vec{B_2}(\vec{r})\times\nabla' G_2 ds' \\ &\quad -\int_s \hat{n}\cdot\vec{B_2}(\vec{r})\nabla' G_2 ds' \\ &\quad -\mu\sigma\int_s \vec{n}\times\vec{E_2}(\vec{r})G_2 ds' \end{aligned} \tag{8}$$

$$\begin{aligned} c\vec{E_2}(\vec{r}) &= j\omega\int_s \hat{n}\times\vec{B_2}(\vec{r})G_2 ds' \\ &\quad -\int_s \hat{n}\times\vec{E_2}(\vec{r})\times\nabla' G_2 ds' \\ &\quad -\int_s \hat{n}\cdot\vec{E_2}(\vec{r})\nabla' G_2 ds' \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 G_1 및 G_2는 비도체 및 도체에서의 그린함수로 다음과 같다.

$$G_1 = \frac{1}{4\pi r} \tag{10}$$

$$G_2 = \frac{1}{4\pi r} e^{-jkr} \tag{11}$$

$$k^2 = -j\omega\mu\sigma \tag{12}$$

여기서 ω는 각속도를 의미한다. 사용되는 변수로 등가전기표면전류(equivalent electric surface current), 등가자기표면전류(equivalent magnetic surface current) 및 등가전기전하(equivalent electric charge)는 다음과 같다.

$$\vec{J_s}(\vec{r}) = \hat{n}\times\vec{H_1}(\vec{r}) \tag{13}$$

$$\vec{M_s}(\vec{r}) = -\hat{n}\times\vec{E_1}(\vec{r}) \tag{14}$$

$$q_e = \hat{n}\cdot\vec{E_1}(\vec{r})\varepsilon_0 \tag{15}$$

위식에 대하여 매질경계조건을 적용하여 경계요소정식화를 거치게 되면 대형행렬방정식이 구해진다. 이 대형행렬방정식을 계산하고, 구해진 변수로부터 물리적인 제량들을 구하게 되면 경계요소해석과정은 끝나게 된다.

3. 사 례 연 구

결함을 가지는 강자성체 도체 평판에 대하여 와전류 탐상 경계요소 수치해석을 수행하기 위해 IES 사의 BEM 패키지인 Faraday를 사용하였다[3]. 수치해석을 위해 사용된 평판의 사양은 표 1과 같으며, 그림 1에 도식적으로 나타내었다. 평판의 중앙에 면적 17x17[mm^2], 깊이 3.5[mm]의 결함이 있다. 사용된 푸르브의 외경은 10.5[mm]이며, 결함의 중앙을 기준으로 센서의 중심부를 0[mm], 8.5[mm], 17[mm] 거리에서 센서를 이동시키면서 유기기전력을 계산하였다. 0[mm]는 결함의 중심이며, 8.5[mm]는 결함의 끝부분이 된다. 리프트오프(lift-off)효과를 보기 위하여 1[mm], 3[mm], 5[mm]의 리프트오프를 가진 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

그림 2, 그림 3 및 그림 4에 리프트오프가 1[mm], 3[mm], 5[mm]일 때의 유기기전력의 크기를 나타내었다. 각 그림에서 결함의 중심부로 갈수록 유기기전력의 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 리프트오프가 1[mm]인 경우(그림 2) 중심부에서의 유기기전력은 10.3[V]이며, 리프트오프가 3[mm]인 경우(그림 3)는 9.35[V], 리프트오프가 5[mm]인 경우(그림 4)는 9.08[V]로 리프트오프가 증가함에 따라 유기기전력의 크기가 줄어듦을 알 수 있다.

표 1. 해석모델 사양

평판도체		결함		프로브	
항목	값	항목	값	항목	값
가로	200[mm]	가로	17[mm]	내경	5.5[mm]
세로	100[mm]	세로	17[mm]	외경	10.5[mm]
두께	6[mm]	깊이	3[mm]	높이	6.5[mm]

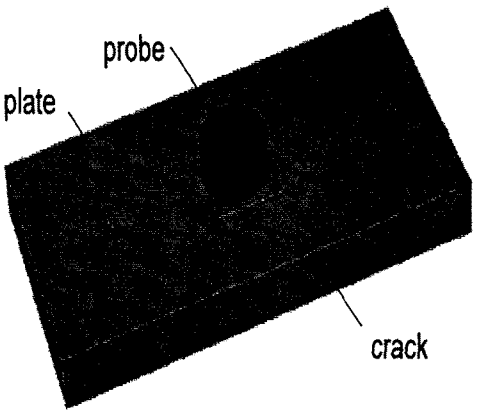
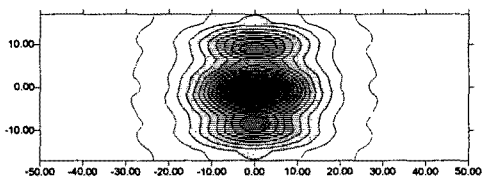
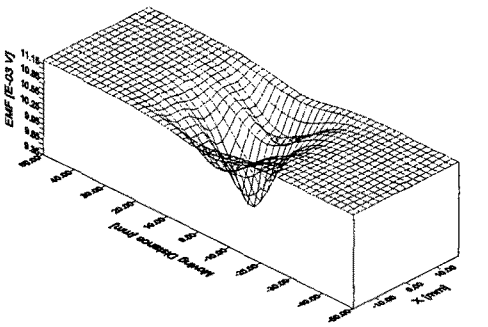


그림 1. 해석모델

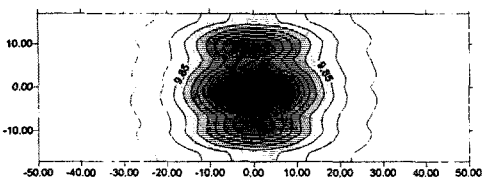


(a)

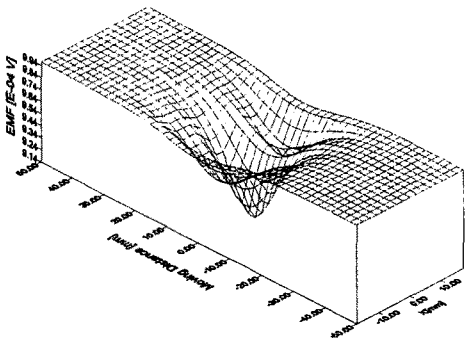


(b)

그림 2. 리프트오프가 1[mm]인 경우의 유기기전력

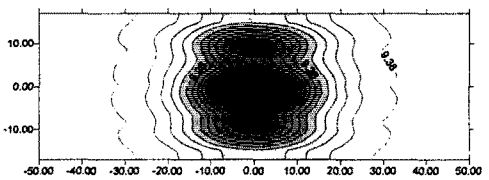


(a)

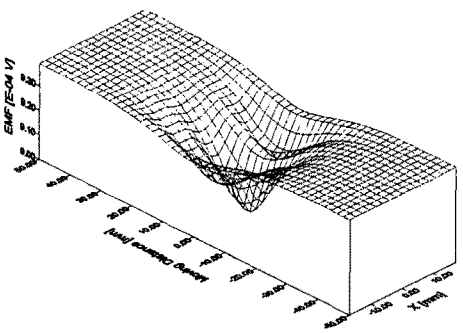


(b)

그림 3. 리프트오프가 3[mm]인 경우의 유기기전력



(a)



(b)

그림 4. 리프트오프가 5[mm]인 경우의 유기기전력

4. 결 론

본 논문에서는 경계요소해석을 이용하여 와전류센서의 특성을 살펴보았다. IES사의 상용프로그램인 Faraday를 이용하여 경계요소해석을 수행하였다. 강자성체 평판에 결함을 있을 때, 센서를 이용하여 결함을 감지 할 수 있는 지에 대한 수치해석을 수행하였다. 강자성체의 경우 표피효과에 의한 침투깊이가 얇기 때문에 주파수는 800[Hz]를 사용하였다. 센서를 결함의 중심으로부터 이동시키면서 유기기전력의 변화를 살펴보았다. 또한, 리프트오프를 변화시켜가면서 센서의 특성을 살펴보았다. 해석결과 센서가 결함의 중심에 다가감에 따라, 리프트오프가 증가함에 따라 유기기전력의 크기가 줄어듦을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] R. C. McMaster, P. McIntir, and M. L. Mester, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 4, ASNT, 1986.

[2] D. Zheng, "Three-Dimensional Eddy Current Analysis by the Boundary Element Method," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1354-1357, march 1997.

[3] FARADAY, Three-dimensional Time Harmonic Eddy Current Solver, Users and Technical Manual, Integrated Engineering Software.