

원통형결함에 대한 와전류탐상의 수치해석

이향범¹, 신영길¹, 임성기², 정현교², 한송엽²

¹군산대학교 전기공학과 ²서울대학교 전기공학부

Numerical Analysis of ECT with Axisymmetric Crack

H. B. Lee¹, Y. K. Shin¹, S. K. Lim², H. K. Jung² and S. Y. Hahn²

¹Kunsan National University ²Seoul National University

Abstract - In this paper a numerical analysis method for eddy current testing (ECT) with axisymmetric crack is studied. The finite element method(FEM) is used for electromagnetic solution. In this paper the outer diameter crack of INCONEL 600 tube is modelled and the impedance signal is obtained using the differential probe. The characteristics of the crack depth variation in the signal are analyzed.

1. 서 론

비파괴검사법중 와전류탐상법은 도체 검사에 적용되는 기법으로 원자력발전설비, 항공기, 선박, 철도, 송유관, 군용장비등 각종 도체 구조물에 폭넓게 사용되고 있다. 와전류탐상법은 코일에 교류전류를 흘려 결함이 있는 부분에서의 와전류분포변화를 코일의 임피던스를 통해 살펴봄으로써 결함의 존재나 형태를 인식하는 방법이다. 이 탐상법은 특히 원자력발전소 안전을 위한 증기발생기검사에서 그 중요성이 인정되어 전세계적으로 공통적으로 사용되고 있다. 와전류탐상에서 나오는 임피던스신호는 결함의 모양 및 위치에 따라 바뀌게 된다. 즉, 신호의 모양이나 크기에 따라 결함의 위험정도를 판단할 수 있게 되는데 이를 위해서는 먼저 결함에 의한 와전류탐상신호를 정확히 예측할 수 있어야 한다. 따라서, 본 논문에서는 원통형결함이 있는 경우에 대하여 결함의 깊이에 따른 와전류탐상신호를 수치해석하였다. 수치해석방법으로는 유한요소법을 사용하였으며, 결함은 전열관의 바깥쪽에 있는 것을 사용하였다. 원통형결함은 축대칭 문제로 해석하여도 되므로 본 논문에서는 축대칭문제로 모델링하였다.

2. 본 론

원통형 결함에 대한 와전류탐상의 유한요소법을

이용한 정식화 및 임피던스계산은 다음과 같다.

2.1 유한요소정식화

원통형결함에 대한 와전류탐상의 수치해석은 축대칭문제로 모델링할수 있다. 이 문제에 대한 지배방정식은 맥스웰방정식(Maxwell's Equations)과 관계방정식(Constitutive Relations)들로부터 구할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

여기서, \vec{E} 는 전계의 세기[V/m], \vec{B} 는 자속밀도[T], \vec{H} 는 자계의 세기[A/m], \vec{J}_s 는 인가되는 전류밀도[A/m²], \vec{J}_e 는 유기되는 와전류밀도[A/m²]. μ 는 자기투자율, σ 는 전기전도도이다. 식 (3)으로부터 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 식 (6)과 같이 도입하여 시변장에 대한 지배방정식을 구하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - j\omega\sigma\vec{A} \quad (7)$$

해석하고자 하는 모델이 축대칭문제이므로, 자기벡터포텐셜 및 전류는 $\hat{\varphi}$ 방향의 성분만 존재하게 된다. 따라서, 식 (7)에 벡터항등식과 쿠올롱게이지조건을 고려하여 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right) = -J_s + j\omega\sigma A \quad (8)$$

위식에 유한요소법을 적용하면 다음과 같은 행렬방정식을 얻을 수 있다.

$$[K][A] = [Q] \quad (9)$$

위식에서 한 요소에서의 요소행렬, 요소벡터포텐셜 및 요소구동항 $[K]^e$, $[A]^e$, $[Q]^e$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_{ij} &= \int_{\Omega^e} \left\{ \frac{1}{\mu} \left(\frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \left(\frac{N_j}{r} + \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\mu} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} 2\pi r dr dz \\ &\quad + \int_{\Omega^e} j\omega \sigma N_i N_j 2\pi r dr dz \end{aligned} \quad (10)$$

$$A = \sum_{i=1}^{n_e} A_i^e N_i(r, z) \quad (11)$$

$$Q_i^e = \int_{\Omega^e} J_s N_i 2\pi r dr dz \quad (12)$$

여기서, n_e 는 한 요소에 정의된 절점수, A_i^e 는 i번째 절점에서의 자기벡터포텐셜, N_i 는 i번째 절점에서 정의된 형상함수이다. 유한요소망에서 식 (9)를 구하여 행렬방정식을 계산하면 각 절점에서의 자기벡터포텐셜을 구할 수 있다.

2.2 임피던스 계산

와전류탐상에서 최종적으로 구하는 랑은 탐상코일의 임피던스이다. 이 임피던스는 주어진 전류에 대하여 역기전력을 계산하여 두 량사이의 관계로부터 구할 수 있다. 본 논문에서는 차동푸로브(differential probe)를 사용하였다. 차동푸로브의 각각의 전류원이 바라본 시편의 형상이 동일한 경우는 각각에서 구한 임피던스가 동일하므로 그 차이는 영(Zero)이 된다. 하지만 결합을 지나는 경우에는 각각에서 구한 임피던스의 차이가 생기게되고, 이를 외부에서 추출하여 결합을 인식하게 된다. 외부에서 인식하게 되는 임피던스는 다음 식으로 정의된다.

$$Z = R + j\omega L = \frac{E}{I} \quad (13)$$

여기서,

$$I = \int_{\Omega} J_s d\Omega \quad (14)$$

$$E = \frac{d\phi}{dt} = j\omega \phi \quad (15)$$

전류는 주어진 전류밀도로부터 구하고, 유기기전력은 다음 식으로부터 구하게 된다.

$$\phi = \int B \cdot dS = \oint A \cdot dl \quad (16)$$

따라서, 다음 식을 계산하게 되면 임피던스를 구하게 된다.

$$Z = \frac{j\omega \oint A \cdot dl}{\int_{\Omega} J_s d\Omega} \quad (17)$$

3. 사례연구

본 논문에서 제안한 방법을 원통형결합이 있는 문제에 적용하여 계산하였다. 결합은 원통의 외부에 존재하며 판의 두께(1.29[mm])에 비하여 17%, 38%, 75%의 깊이를 가지는 경우에 대하여 계산을 하였다. 인가되는 전류의 주파수는 100 [kHz]이며, 해석하고자 하는 문제의 크기 및 재질은 표 1에 나타내었다. 그림 1.부터 그림 3.에서는 푸로브가 결합부위를 지날 때 발생되는 차동임피던스의 크기를 저항 및 리액턴스성분으로 나타내었다. 그림 4.부터 그림 6.에서는 X축에 저항성분, Y축에 리액턴스성분을 나타낸 임피던스평면궤적(Impedance Plane Trajectory)을 나타내었다. 결합의 크기가 커짐에 따라 와전류신호의 크기가 커짐을 확인할 수 있다. 또한 결합이 외부에 존재하고, 표피효과는 코일에 가까운 판내부에서 발생하므로 리액턴스성분의 증가에 비하여 저항성분의 증가가 둔한 것을 알 수 있다. 그림 4.부터 그림 6.에서도 파형의 전반적인 기울기가 결합의 깊이가 증가함에 따라 Y축에 점점 다가가는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 원통형결합에 대한 와전류탐상의 수치해석을 연구하였다. 먼저 원통형결합의 와전류탐상에 대한 수치해석이론을 확립하였다. 수치해석 기법으로는 유한요소법을 사용하였으며, 축대칭문제로 모델링하였다. 본 논문에서 확립한 이론의 타당성을 검증하기 위하여 원자력발전소 증기발생기판으로 많이 사용되는 INCONEL 600 재질에 대하여 결합의 크기에 따른 와전류탐상결과를 수치해석하였다. 차동푸로브를 사용하였으며 결합은 축대칭 외부결합이 있는 것으로 가정하였다. 수치해석 결과 본 논문에서 제안한 수치해석이론이 타당한 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국전력공사지원 전력기술 기초연구비지원 및 기초전력공학공동연구소의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

표 1. 해석모델의 크기 및 재질

항목	값	항목	값
판 외 경	19.05[mm]	판 내 경	16.47[mm]
판 두께	1.29[mm]	판 재질	Inconel 600
코일외경	15.45[mm]	코일내경	12.45[mm]
코일두께	1.50[mm]	코일간격	1.50[mm]
코일 폭	1.50[mm]	결합 폭	0.38[mm]

(참 고 문 헌)

- [1] Y. K. Shin, H. B. Lee, S. Y. Hahn and W. Lord, "Velocity Effects and Low Level Fields in Axisymmetric Geometries (Problem 9)", Proc. of Asian TEAM Workshop, pp. 1-7, 1994

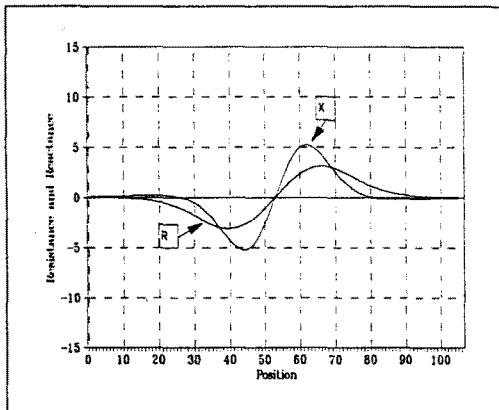


그림 1. 결합의 깊이가 17%(0.48(mm))인 경우

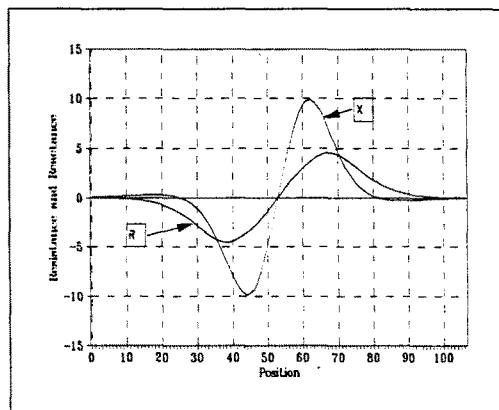


그림 2. 결합의 깊이가 38%(0.74(mm))인 경우

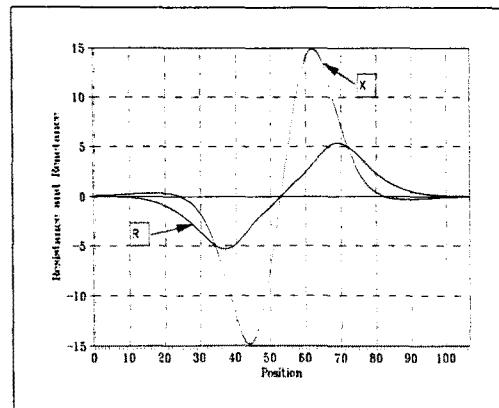


그림 3. 결합의 깊이가 75%(0.95(mm))인 경우

- [2] N. Ida, Numerical Modeling for Electro magnetic Non-Destructive Evaluation, Chapman & Hall, 1995
 [3] J. Jin, The Finite Element Method in Electromagnetics, John Wiley & Sons, Inc., 1993

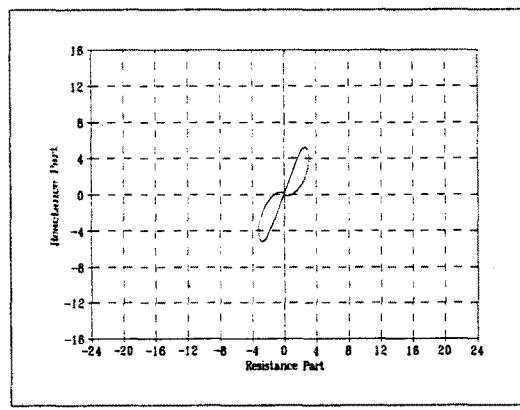


그림 4. 결합의 깊이가 17%(0.48(mm))인 경우

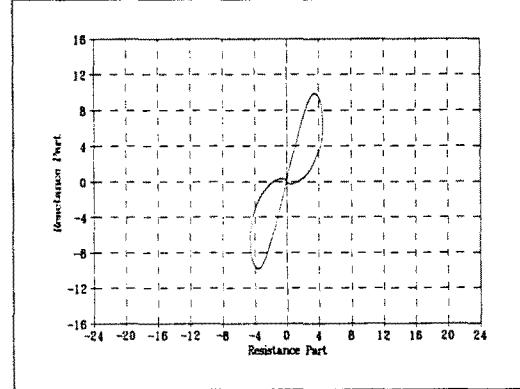


그림 5. 결합의 깊이가 38%(0.74(mm))인 경우

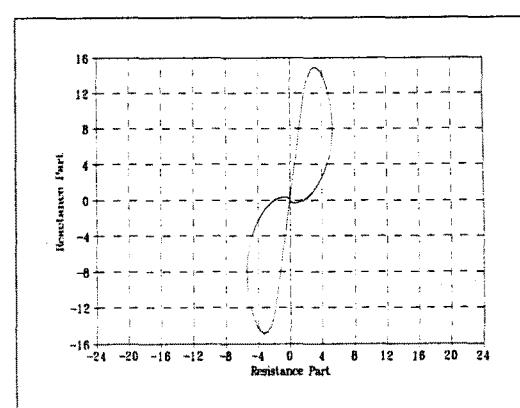


그림 6. 결합의 깊이가 75%(0.95(mm))인 경우