

열교환기 전열관의 결함에 대한 와전류 탐상 수치해석방법

김창욱*, 서장원, 김신, 이항범
 송실대학교 전기공학과

Numerical Analysis Methods for Eddy Current Testing for Heat Exchanger Tube with Axi-symmetric Defects.

Chang-wook Kim*, Jang-won Seo, Shin Kim, Hyang-beom Lee
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - In this paper, a numerical analysis algorithm of eddy current testing(ECT) for heat exchanger tube with axi-symmetric defects using finite element method(FEM) is presented. In the ECT FEM analysis, we used triangular and rectangular elements for exact signal of ECT for variable shape of defects. This paper presents a systematic and efficient numerical analysis algorithm for ECT. We employ the LU decomposition and Cholesky method for solving the system matrix. This numerical analysis algorithm is effectively applied to heat exchanger tube with defects.

1. 서 론

비파괴검사방법 중 하나인 와전류 탐상법은 각종 도체 구조물의 결함유무를 검사하는 방법으로서 원자력 발전 설비, 항공기, 선박, 철도, 송유관, 엔진실린더, 군용장비 등에 이용되고 있다. 특히 원자력발전소 증기발생기 전열관 검사분야에서는 세계적으로 공인되어 사용되고 있으며 본 논문에서는 다양한 모양의 축대칭결함을 갖는 열교환기전열관에 대하여 수치해석방법을 이용한 와전류 탐상신호회득에 있어서 보다 효율적인 방법을 제안하였다.

와전류 탐상법에 있어서 수치해석방법은 준비절차가 번거롭고 재현성이 부족할 수도 있는 실험을 거치지 않고도 여러 가지 결함 신호들을 양산해 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 와전류 탐상 수치해석시 임의의 결함형상에 대하여 모델링이 힘들었으며, 특히 사각형 요소만을 이용하는 경우 임의의 형상을 가지는 결함에 대한 모델링이 쉽지 않기 때문에 비교적 정확한 결함신호를 얻기에는 어려운 부분이 있다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 수치해석을 위한 요소분할시 자동요소분할 프로그램을 이용하여 사각형 요소와 삼각형 요소를 혼합하여 다양한 형상의 열교환기 전열관의 결함을 모델링을 하였다[3]. 삼각형 요소망은 결함이 존재하는 영역과 결함근처의 영역에 대하여 이용되었으며 기타 영역에서는 사각형 요소망을 이용하였다. 또한 본 논문에서는 프로브 이동에 따른 계행렬식의 반복계산에 소요되는 엄청난 계산시간문제를 해결하기 위하여 LU분해법에 의한 Cholesky법을 이용하여 시스템행렬의 계산을 단 한번만 수행하는 방법에 대하여 제안하였다[4][5].

본 논문에서 와전류 탐상 유한요소 수치해석을 위하여 사용한 해석대상은 INCONEL 600 도체관이다. 실험에 의하여 얻어진 결함신호와 비교하여 수치해석기법의 타당성을 검증하였으며 본 논문에서 제안된 방법의 유용성을 검증하기 위하여 여러 가지 결함형상에 대하여 수치해석을 수행하였다. 차동코일에 인가된 전류원의 주파수는 400kHz이며, 수치해석에 사용된 도체관 결함의 모양은 I-Type, V-Type 이며 각각 내·외부 결함에 대

하여 결함 신호를 생성하였다.

2. 유한요소 정식화 및 임피던스 계산

2.1 유한요소 정식화

와전류 문제 및 거의 모든 전자기적인 현상을 표현할 수 있는 맥스웰 방정식중에서 와전류문제와 관련된 방정식들은 다음의 식으로 구성된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \tag{2}$$

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

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E}, \vec{B} = \mu \vec{H} \tag{4}$$

위 식에서 \vec{E} 는 전기장의 세기, \vec{H} 는 자기장의 세기, \vec{B} 는 자속밀도, \vec{J}_s 는 전원전류밀도, \vec{J}_e 는 와전류밀도, μ 는 자기투자율, σ 는 도전율을 나타낸다. 위 식(3)으로부터 자기벡터포텐셜을 유도하여 정현적인 입력만을 고려하는 경우의 와전류문제의 지배방정식을 구성하면

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} - \sigma(j\omega \vec{A}) + \vec{J}_s = 0 \tag{5}$$

여기서 ω 는 전류원의 주파수이다.

축대칭 문제를 2차원 (r, z) 평면에서 해석하는 경우 자기벡터포텐셜과 전류밀도는 θ 방향성분만을 고려하므로 식(5)은 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial z^2} - \frac{\vec{A}}{r^2} \right) = -J_s + j\omega \sigma \vec{A} \tag{6}$$

본 논문에서는 유한요소 방정식을 구성하기 위한 정식화 방법으로 갤러킨법을 이용하였으며 정식화를 수행한 후의 시스템행렬식은 다음과 같다.

$$[K][A] = [Q] \tag{7}$$

위 시스템행렬식에 재차자연경계조건과 고정경계조건을 적용한 후 행렬식을 계산하면 미지의 자기벡터포텐셜이 구해진다.

2.2 임피던스 계산

와전류 탐상법에서 최종적으로 계산하는 양은 탐상코일의 임피던스이며 이 임피던스는 주어진 전류에 대하여 코일에 유기되는 기전력을 계산하므로써 구해진다. 본 논문에서 해석대상으로 사용한 프로브는 차동프로브인

보빈프로브로서 일정한 간격을 두고 있는 두 개의 코일에 각기 서로 다른 방향의 전류가 흐르는 프로브이다. 그리고 차동코일에 인가된 전류에 의한 역기전력을 계산하여 각 코일에서 바라보는 임피던스를 구할 수 있게 된다. 만일 차동코일의 각각의 전류원이 바라본 시편의 형상이 동일한 경우 각 코일에서 구한 임피던스의 경우 크기는 동일하고 부호만 반대이나, 결합이 존재하는 영역을 지날 경우 각각의 코일에서 계산한 임피던스에는 차이가 생기므로 이를 추출하여 결합신호로서 사용하게 된다. 이때 임피던스는 다음 식(8)과 같이 표현되며 차동 임피던스는 식(9)으로 계산된다.

$$Z_i = \frac{V}{I} = \frac{j\omega\Phi_m}{I} = \frac{j\omega \int \vec{B} \cdot d\vec{S}}{\int J_s dS} = \frac{j\omega \oint \vec{A} \cdot d\vec{l}}{\int J_s dS} \quad (8)$$

$$Z_{diff} = Z_1 - Z_2 \quad (9)$$

3. 와전류 탐상 유한요소행렬식 계산

대부분의 와전류 탐상 수치해석에서는 코일의 위치 이동을 고려해 주기 위하여 코일의 위치가 변경될 때마다 계행렬식의 우변인 구동항을 재계산하여 계행렬식을 재구성하며, 이 계행렬식에 경계조건을 적용한 후 계행렬식을 계산하여 미지수를 구하게 되므로 상당히 많은 계산시간이 소모된다. 그러나 본 논문에서는 유한요소법의 원리에 기초하여 단 한번만 시스템 행렬을 LU분해한 후 각각 코일이 이동함에 따라서 변경되는 구동항만 재계산하여 LU로 분해된 시스템 행렬과 결합하여 계행렬식을 구성하여 Cholesky법을 이용하여 미지수(자기벡터 포텐셜)을 계산하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 와전류 탐상 유한요소 수치해석 방법을 그림 1에서 나타내었으며 이 방법을 이용하는 경우 단 한번의 계행렬식 계산만으로 와전류 탐상 수치해석을 수행할 수 있으므로 기존의 유한요소 수치해석과정과 비교하여 불 때 획기적으로 계산시간을 단축시킬 수 있다.

4. 사례연구

본 논문에서 연구한 와전류 탐상 유한요소 수치해석을 위해 이용한 프로브에 인가된 전류원의 주파수는 400kHz이며, 도체관 결합의 형상은 I-Type, V-Type을 이용하였다. 각각 내·외부 결합에 대하여 와전류 탐상 수치해석을 수행하여 결합 신호를 계산하였으며, 또한 각 결합 형상에 대하여 결합의 깊이를 도체관 두께의 38%, 58%, 75%로 변화시켜가면서 결합신호를 계산하였다.

그림 2에서는 도체관과 프로브의 단면과 본 논문에서 제안한 삼각형 요소망이 사용되는 영역을 나타내었으며, 그림 3에서는 수치해석 대상으로 이용한 결합모델을 나타내었다. 그림 4에서는 V-Type 내부결합에 대한 요소분할도를 도시하였다.

그림 5과 그림 6에서는 각 결합에 대한 신호를 생성하여 나타내었다. 그림들에서 (a)는 내부 결합에 대한 신호들로서 결합의 깊이가 깊어짐에 따라 임피던스 스케치의 축이 시계방향으로 회전하는 것을 살펴볼 수 있다. 또한 결합의 깊이가 깊어짐에 따라 신호의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 그림들에서 (b)는 외부 결합에 대한 신호들로서 결합의 깊이가 깊어짐에 따라 임피던스 스케치의 축이 반시계방향으로 회전하는 것을 살펴볼 수 있다. 또한 결합의 깊이가 깊어짐에 따라 신호의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. I-Type 및 V-Type의 경우 결합의 형상이 좌우 대칭적이다. 따라서 프로브가 결합의 위치를 기준으로 진입할 때 및 빠져나갈 때의 신호의 크기 및 형상이 대칭적으로 나타나고 있다.

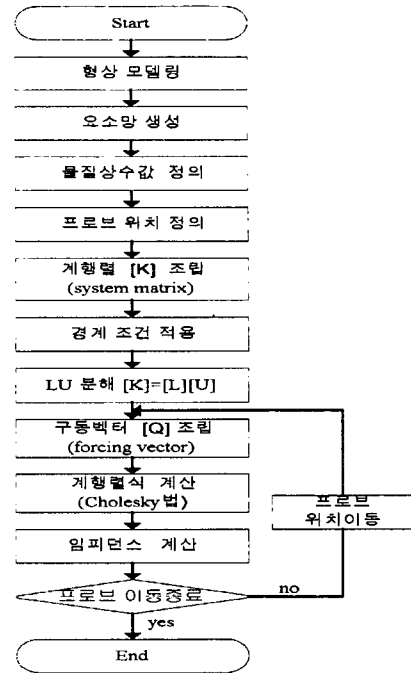


그림 1 와전류 탐상 유한요소 해석과정
표 1 도체관의 크기 및 결합의 크기 단위 : mm

항목	값	항목	값
관 외경	19.05	관 내경	16.47
관 두께	1.29	관 재질	INCONEL 600
프로브 외경	15.45	프로브 내경	12.45
프로브 두께	1.52	프로브 간격	1.52
프로브 폭	1.52	결합 폭	0.38

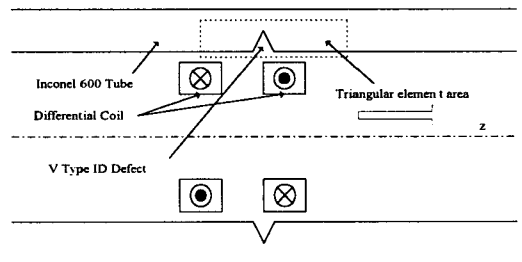


그림 2 해석모델

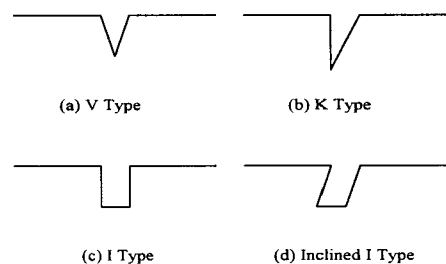


그림 3 결합 종류

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 모양의 축대칭 결함을 갖는 도체관에 대하여도 모델링이 가능한 와전류 탐상 유한요소 수치해석에 대하여 제안하였다. 자동요소분할 프로그램을 이용하여 삼각형 요소망과 사각형 요소망을 혼합하여 해석대상을 요소분할하여 임의의 결함형상에 대한 수치해석 모델링을 가능하게 하였다. 또한 유한요소 해석과정에서 경계조건 및 계행렬식 조립과정에서 단 한번만의 계행렬식 계산을 수행하면서도 프로브의 이동에 따른 전체적인 와전류탐상 수치해석이 가능한 방법을 제안하였다. 그리고 계행렬식 계산과정에서 ND법(Nested dissection method)을 사용한 절점번호 재배치 방법을 이용하여 계산시간의 향상 및 사용메모리 용량을 줄였다. 본 논문에서 제안된 방법을 사용하여 다양한 모양의 결함에 대한 와전류 탐상 유한요소 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 실제 실험에 의하여 얻어진 결과와 비교하여 본 논문에서 제안한 방법의 타당성을 검증하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 다양한 형태의 결함에 대하여 보다 효율적으로 와전류탐상 신호를 생성할 수 있으리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1]이항범 외, "원통형결함에 대한 와전류탐상의 수치해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp127-129, 1997
- [2]Nannapaneni Narayana Rao, *Elements of Engineering Electromagnetics*, Prentice Hall, 1997.
- [3]Gouri Dhatt, Gilbert Touzot and Gilles Cantin, *The Finite Element Method Displayed*, John Wiley & Sons, 1984.
- [4]Alan George and Joseph W-H Liu, *Computer Solution of Large Sparse Positive Definite Systems*, Prentice-Hall, 1981.
- [5]Richard Barrett, Michael berry, and etc., *Templates for the Solution of Linear Systems: Building Blocks for Iterative Methods*, from netlib.ornl.gov.

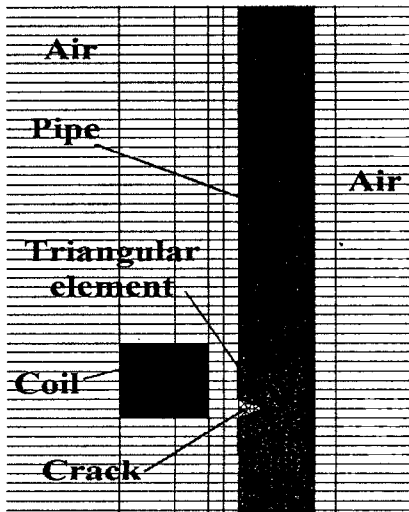
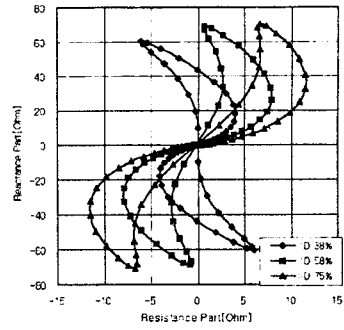
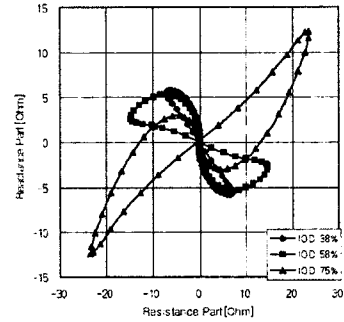


그림 4 요소분할도

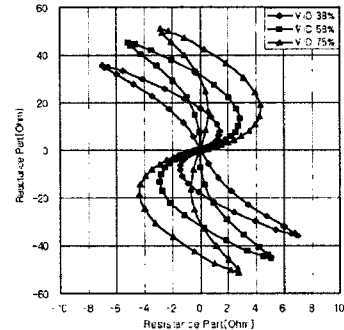


(a) 내부결함

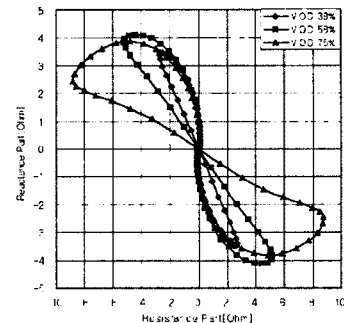


(b) 외부결함

그림 5 I Type 결함에 대한 탐상신호



(a) 내부결함



(b) 외부결함

그림 6 V Type 결함에 대한 탐상신호