[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 20, No. 3 (2000. 6)

3차원 관결함에 대한 와전류탐상의 유한요소해석

Finite Element Analysis of Eddy Current Testing for Tubes with 3-Dimensional Defects

이향범*, 원성연*, 신영길**
Hyang-beom Lee*, Sung-yean Won* and Young-kil Shin**

초 록 본 논문에서는 3차원 형태의 결함을 가진 관에 대한 와전류탐상의 유한요소 수치해석에 대하여 연구하였다. 3차원 와전류탐상 문제를 기술할 수 있는 전자기 수치해석기법으로 3차원 유한요소법을 사용하였다. 맥스웰방정식으로부터 지배방정식을 구하고, 갤러킨 가중잔차법을 이용하여 유한요소정식화를 수행하였다. 해석대상으로는 INCONEL 600 증기발생기 전열관을 사용하였으며, 관의 내부 및 외부에 존재하는 결함을 모델링하여 수치해석을 수행하고, 임피던스로 표현되는 와전류탐상 신호를 계산하였다. 결함 시험편에 존재하는 결함에 대하여 본 논문에서 계산된 결과와 실험결과를 비교하였으며, 잘 일치하는 결과를 얻어 본 논문에서 제안된 수치해석 방법의 타당성을 검증하였다. 이를 바탕으로 결함의 깊이 변화(38%, 58%, 75%) 및 원주방향으로의 결함각도 변화(90° , 180° , 270° , 360°)에 따른 탐상신호를 계산하여 결함의 크기변화에 따른 신호의 변화특성을 살펴보았다.

주요용어 : 와전류탐상, 유한요소법, 관결함, 3차원 결함

Abstract In this paper, a numerical analysis using the finite element method (FEM) is presented which models the eddy current testing (ECT) of tubes with 3-dimensional defects. For the description of 3-dimensional eddy current problems, the governing equation is derived from the Maxwell's equations. The 3-dimensional FEM formulation with hexahedral elements is carried out using the Galerkin weighted residual method. The INCONEL 600 steam generator tube with inner and outer diameter defects is adopted for the numerical analysis, and the ECT signal, which is the trajectory of the probe impedance, is calculated. For the verification of the numerical analysis method, results of numerical calculations and experiments are compared and they show good agreements. Based on this verification, several defect signals are predicted and their characteristics are investigated with the variation in the defect depth and the circumferential angle of the defect.

Keywords: ECT, finite element method, tube, 3D defect

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기(SG; steam generator) 전열관에 존재하는 결함의 발견 및 결함정보를 판별하기 위한 방법으로 와전류탐상법이 많이 사용되고 있다[1]. 이 방법은 전자기적인 입장에서 보면 변압기의 원리를 이용한 검사방법으로 탐촉자 즉, 프로브가 1차권선의 역할을 하고, 검사하고자 하는 전열관이 2차권선의 역할을 한다고 볼 수 있다. 도체관에 교류전류가 인가된 프로브를 통과시키면서 전압과 전류를 측정하여, 이들 값의 비율인 임피던스를 측정하게 되면, 와전류탐상 신호를 얻게 된다. 이 신호로부터 결함의 유무, 위치, 크기 및 종류 등

(접수 : 1999. 12. 21) * 숭실대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743),
** 군산대학교 전기전자제어공학부

을 판단할 수 있다. 이러한 결함정보의 판별을 용이하게 하기 위해서는 결함의 종류 및 크기 등에 따른 많은 신호들을 확보하여야 한다. 확보된 신호와 미지의 탐상신호를 비교하여 결함정보를 판별할 수 있게 되기 때문이다. 많은 신호를 확보하기 위해서는 많은 종류의 결함을 가공한 시편을 만들어서 시험을 수행하여야 한다. 그러나, 이 방법은 많은 시간과 비용, 그리고 탐상조건에 따른 표준신호 획득에 많은 노력을 요구한다. 따라서, 본 연구에서는 신호의 확보를 컴퓨터를 이용하여 용이하게 할 수 있는 수치해석방법 중 유한요소법의 사용을 연구하였다[2].

실제 발생되는 결함을 해석하기 위해서는 3차원 해석을 하여야 한다. 하지만, 지금까지의 해석은 수치해석을 위한 모델링 및 컴퓨터의 성능의 제한 때문에 주로 축대칭문제로 해석을 하여왔다. 이 방법은 원주방향으로 같은 형태의 결함이 있는 경우에 대해서만 해석이 가능하지만, 여러 결함들에 대하여 비교적 빠른 시간 안에 신호획득이 가능하기 때문에 많이 사용되어 왔다. 또한, 결함의 형상변화에 대한 정보를 어느 정도는 충분히 전달하기 때문에 축대칭해석결과는 충분한 의미를 가진다고 할 수 있다. 하지만, 축대칭문제의 접근만으로는 실제 결함에 대한 분석이 어렵기 때문에 3차원 결함에 대한 해석이 가능한 연구를 하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 결함에 대한 신호를 확보할 수 있는 3차원 수치해석에 대하여 연구하였다. 와전류탐상 문제에 대한 수치해석을 수행하기 위하여, 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식으로부터 와전류탐상의 원리를 설명할 수 있는 지배방정식을 유도하였다. 사용된 미지변수로는 와전류 문제를 잘 표현할 수 있는 자기벡터포텐셜($\vec{A}$) 및 전기스칼라포텐셜(ϕ)을 사용하였다. 와전류가 유기 되는 도체영역에서는 $\vec{A}$와 ϕ를, 그 이외의 공간과 전류원이 존재하는 코일영역에서는 $\vec{A}$ 만을 사용하였다[3-7]. 이 지배방정식에 대하여 갤러킨 가중잔차법을 이용한 유한요소 정식화 과정을 수행하여 와전류문제를 해석할 수 있는 대형 행렬방정식을 계산할 수 있도록 하였다. 3차원 해석영역은 1차 육면체 요소[8]를 사용하여 분할되었다. 해석대상으로는 INCONEL 600 증기발생기 전열관을 사용하였으며, 관의 내부(ID: inner diameter)및 외부(OD: outer diameter)에 존재하는 결함에 대하여 수치해석을 수행하고, 임피던스로 표현되는 와전류 탐상신호를 계산하였다. 결함 시험편에 존재하는 결함에 대하여 본 논문에서 계산된 결과와 실험결과를 비교하였으며, 잘 일치하는 결과를 얻어 본 논문에서 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 이를 바탕으로 결함의 깊이 변화(38%, 58%, 75%) 및 원주방향으로의 결함각도 변화(90°, 180°, 270°, 360°)에 따른 탐상신호를 계산하여 결함의 크기변화에 따른 신호의 변화특성을 살펴보았다. 탐상신호를 구하기 위하여 에너지 방법 즉, 해석 공간에 저장된 자기에너지와 외부 도체에 유기 되는 와전류에 의한 열 손실을 계산함으로써 임피던스를 구하는 방법을 사용하였다.

2. 유한요소 해석기법

와전류탐상 문제는 전자기적으로는 와전류 문제(eddy current problem)이다. 즉, 외부에서 공급되는 시변전압원 또는 시변전류원에 의해서 도체에 와전류가 유도되고, 공급되는 전원에 의한 자장과 와전류에 의한 자장이 합성되어 공간상에 존재하는 자장은 복잡한 특성을 가지게 된다. 따라서, 해석하고자 하는 문제의 해석영역의 형상이 단순한 경우에는 해석적인 해로 해결이 가능하지만, 그렇지 않은 경우에는 수치적인 방법을 사용하여야 한다. 본 논문에서는 다른 수치해석 방법들에 비하여 해석영역의 분할이 용이하고, 풀어야 할 행렬의 성김도가 높다는 장점을 가진 유한요소법을 사용하였다. 유한요소법은 해석하고자 하는 형상을 유한개의 요소로 분할하여 요소망을 구성한 후 각 절점에 미지수를 할당하여 그 미지수를 수치해석법에 의하여 구하는 방법이다. 일반적으로 와전류 문제는 도체내부에서는 전장($\vec{E}$) 및 자장($\vec{B}$)에 대하여 해석하여야 하며, 그 외의 공간에 대해서는 자장만 해석하면 된다. 따라서, 본 논문에서는 와전류가 유도되는 도체영역에서는 자기벡터포텐셜($\vec{A}$) 와 전기스칼라포텐셜(ϕ)를, 그 이외의 공간과 전류원이 존재하는 코일영역에서는 자기벡터포텐셜($\vec{A}$)만을 사용하여 와전류탐상의 모델링을 수행하였다[6]. 와전류 문제의 해석을 위하여 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식 및 추가방정식들은 다음과 같다.

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

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

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

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

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{4}$$

여기서, $\vec{H}$ [A/m] 는 자기장의 세기(magnetic field intensity), $\vec{B}$ [Wb/m^2] 는 자속밀도(magnetic flux

density), $\vec{E}$ [V/m] 는 전기장의 세기(electric field intensity), $\vec{J}_s$ [A/m^2] 는 전원전류밀도(source current density), $\vec{J}_e$ [A/m^2] 는 와전류밀도(eddy current density)를 나타낸다. 또한, μ [H/m] 는 투자율(permeabilitv), σ [S/m] 는 도전율(conductivity)을 의미한다.

위 식들을 이용하여 지배방정식을 생성하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \nu \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi = \vec{J}_s \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \left(-\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \right) = 0 \quad (6)$$

식 (5)에 $\vec{A}$의 유일성을 보장하기 위해서 쿨롱게이지 조건인 $\nabla \cdot \vec{A}$를 더해주었다[6].

본 논문에서는 유한요소 방정식을 세우는 방법 중 가중잔차법의 일종인 갤러킨(Galerkin)법을 선택하여 식을 전개하였다. 전원전류를 인가한 후 충분한 시간이 흐른 후의 정상상태 시스템을 해석한다고 가정하면, 페이저를 사용하여 벡터포텐셜을 바꾸어서 정현적 정상상태(sinusoidal steady state)해석을 수행할 수 있다. 갤러킨 법을 적용하여 최종적으로 사용되는 식은 다음과 같다.

$$\int_{\Omega_1} (\nu \nabla \times \vec{N}_i \cdot \nabla \times \vec{A} + \nu \nabla \cdot \vec{N}_i \nabla \cdot \vec{A} + j\omega\sigma \vec{N}_i \cdot \vec{A} + \sigma \vec{N}_i \cdot \nabla \phi) d\Omega = \int_{\Omega_2} \vec{N}_i \cdot \vec{J}_s d\Omega \quad (7)$$

$$\int_{\Omega_1} (j\omega\sigma \nabla N_i \cdot \vec{A} + \sigma \nabla N_i \cdot \nabla \phi) d\Omega = 0 \quad (8)$$

여기서, N_i는 형상함수이다. 유한요소방정식을 모든 요소에 대하여 조립하게 되면 식 (9)과 같은 대형 행렬식이 만들어지게 되고, 이 대형 행렬식을 계산함으로써 모든 절점에서의 포텐셜값들을 구할 수 있다.

$$[K][X] = [F] \quad (9)$$

3. 임피던스 계산

본 논문에서 해석 대상으로 사용한 프로브는 차동형 보빈 프로브(differential bobbin probe)로, 일정한 간격을 두고 있는 두 개의 코일에 각기 서로 다른 방향의 전류가 흐르는 프로브이다. 인가된 전류에 의한 역기전력으로부터 각 코일에서 바라보는 임피던스를 구할 수 있으며, 각 코일에서의 전류의 방향이 서로 다르므로 각 코일에서의 임피던스로부터 차동 임피던스를 구할 수 있다. 하지만, 본 연구에서는 임피던스를 구하기 위하여 에너지 방법을 이용한 임피던스 계산을 수행하였으므로 한 개의 코일만을 이용하여 계산을 수행하였다. 즉, 절대 프로브(absolute probe)를 이용하여 계산을 수행하였으며, 이 코일에서의 임피던스인 절대임피던스를 구하였다. 그리고 나서 각 위치에서의 절대임피던스로부터 차동 프로브에서의 코일간격을 고려한 차동 임피던스를 계산하였다. 이는 해석하고자 하는 시스템이 비선형성이 존재하지 않는 선형 시스템이므로 가능하다. 에너지 방법을 이용한 임피던스를 계산하기 위해서는 각 요소에서의 자속밀도 및 도체 부분에서의 와전류 밀도를 먼저 계산하여야 한다. 자기벡터포텐셜 및 전기스칼라포텐셜을 사용하여 자속밀도 및 와전류를 표현하면 다음과 같다.

$$B = \nabla \times \vec{A} \quad (10)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} = \sigma \left(-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \right) = \sigma (-j\omega \vec{A} - \nabla \phi) \quad (11)$$

위에서 구한 자속밀도와 와전류 값을 이용하여 임피던스를 구하는 방법은 다음과 같다. 본 논문에서는 에너지 방법을 이용하여 임피던스를 계산하였다. 공간상에 저장된 자기에너지와 와전류가 흐르는 도체에서의 열 손실을 이용하여 리액턴스 및 저항을 구할 수 있다.

공간상에 축적된 에너지는 다음 식과 같이 계산되고

$$W_s = \int_V \int \vec{H} \cdot d\vec{B}\, dV = \int_V \frac{1}{2\mu} B^2\, dV \quad (12)$$

와전류에 의해 발생되는 도체에서의 열 손실은 다음 식과 같이 된다.

$$P_d = I^2 R = \int_V \frac{J_e^2}{\sigma} dV \quad (13)$$

여기서 V 는 공간의 부피이다. 공간에 저장된 에너지는 리액턴스 성분을 의미하고, 와전류에 의해서 발생되는 열 손실은 저항성분을 의미한다. 즉,

$$W_s = \frac{1}{2} LI^2 \quad (14)$$

$$P_d = RI^2 \quad (15)$$

위 두 에너지를 이용하면 다음과 같이 임피던스를 구할 수 있다.

$$Z = (R + j\omega L) = \frac{1}{I^2}(P_d + j\omega 2W_s) \quad (16)$$

4. 사례 연구

4.1. 해석 대상

해석 대상으로는 INCONEL 600 재질의 증기발생기 전열관을 사용하였다. 해석 및 실험에 사용된 프로브는 보빈 프로브를 사용하였다. 전열관 및 프로브의 크기에 대한 사양은 Table 1에 나타내었다. 사용된 주파수는 100[㎑]를 사용하였다. 이 주파수에서의 침투깊이(skin depth)는 관의 두께보다 크기 때문에 내부 및 외부결함을 모두 식별할 수 있는 탐상신호를 얻을 수 있다. 결함의 종류는 내부 및 외부 결함을 사용하였다. 결함의 깊이 변화(38%, 58%, 75%) 및 원주방향으로의 결함각도 변화(90° , 180° , 270° , 360°)에 따른 탐상신호 계산을 수치해석으로 수행하였다. Fig. 1은 전열관 및 프로브의 단면을 보여주고 있다. 프로브는 관의 중심축을 따라 움직이며, 관의 중심축을 z축으로 사용하였다. Fig. 2에서는 해석대상의 요소분할도 단면을 보였다. 요소 분할은 r, θ, z의 각 방향으로 구간을 나누었다. Fig. 2의 우측그림은 z평면상에서 본 단면 그림이다. 이 단면을 z축으로 움직이면서 육면체 요소를 구성하여 3차원 요소망을 완성하였다. Fig. 2의 좌측그림은 $r-z$ 평면상 즉, θ평면상에서의 단면을 보여주고 있다.

Table 1 The specification of SG tube model

항목	값	항목	값
관 외경	19.05[mm]	코일외경	15.45[mm]
관 내경	16.47[mm]	코일내경	12.45[mm]
관 두께	1.29[mm]	코일두께	1.52[mm]
결함 폭	0.38[mm]	코일 폭	1.52[mm]
관 재질	INCONEL600	코일 간격	1.52[mm]
관의 도전율(σ)	1.1×10^{6} [S/m]	투자율(μ)	$4\pi\times10^{-7}$ [H/m]
사용주파수	100[kHz]	Skin Depth	1.518[mm]

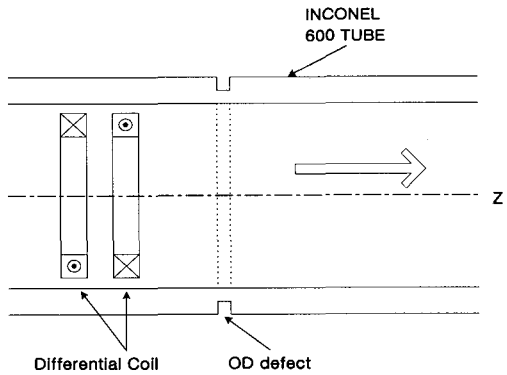


Fig. 1 Analysis model

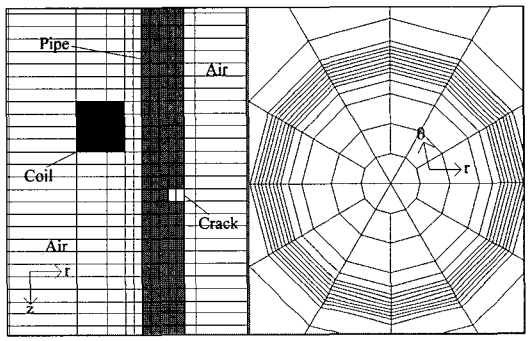


Fig. 2 Model shape and mesh

4.2. 프로그램의 검증

본 연구에서 개발된 3차원 유한요소해석 프로그램을 검증하기 위하여 수치해석 결과와 실험결과를 비교하였다. 사용된 해석모델은 외부결함으로 58% 깊이의 결함이며 원주방향으로 360° 인 축대칭 결함이다. 두 해석결과는 Fig. 3의 임피던스궤적에서 비교되고 있다. Fig. 3에서 실험결과를 얻기 위하여 사용된 와전류탐상기는 ZETEC사의 MIZ-22 장비이며, 장비에서 나오는 신호를 컴퓨터에 저장하기 위하여 Gage사의 CompuScope 512 A/D 보드를 사용하였다. 얻어지는 실험신호는 와전류탐상기에서 내부적으로 스케일링(scaling)되어서 나오기 때문에 정규화하여 사용하였다. Fig. 3에서 신호를 비교하기 위하여 실측된 신호의 크기를 수치해석신호에 맞추어 스케일링하였다. 두 궤적을 비교하면 실험결과와 수치해석결과가 위상 및 신호의 폭등에서 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 정확히 일치하지 않는 이유로는 3차원 모델링시 원주방향을 유한개의 구간으로 근사하기 때문이라고 판단된다. 즉, 원을 유한 다각형으로 근사했

기 때문에 발생되는 오차이다. Fig. 4는 프로브의 위치변화에 따른 임피던스 성분의 변화를 나타내고 있다. 프로브의 이동이 시작되는 처음 위치에서는 전열관 결함의 영향이 거의 없으므로 각 코일의 임피던스 차이 즉 차동와전류 신호는 0이 된다. 점차 프로브가 결함 쪽으로 이동하게 되면 계산되어지는 코일임피던스는 달라지게 되어 임피던스 차이가 점점 커지게 되고 프로브가 결함의 정중앙에 이르게되면 각 코일의 임피던스는 같아지게 되므로 다시 차동와전류 신호는 0이 된다. 프로브가 결함의 중앙을 지나 계속 이동하게되면 프로브의 임피던스 변화는 결함을 중심으로 대칭이 되어, Fig. 4에 보인 바와 같이 차동와전류 신호는 원점을 기준으로 대칭인 형태로 형성된다.

4.3. 전열관 결함 사례연구

본 연구에서 개발된 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하여 결함에 대한 신호를 생성하였다. 사용된 주파수는 100[㎑]이며, 전열관의 내부 및 외부 결함을 대상으로 하였다. 원주방향으로 결함의 크기가 90° , 180° , 270° , 360° 인 경우들에 대하여 결함의 깊이를 변화시켜 가면서 신호를 생성하였다. 결함의 깊이방향으로는 관의 두께 대비 38%, 58%, 75%인 경우들을 대상으로 하였다.

Fig. 5부터 Fig. 7까지는 내부 및 외부 결함의 일정한 결함깊이에서 원주방향으로의 결함각도 변화에 따른 신호들을 보여주고 있다. Fig. 8부터 Fig. 11에서는 내부 및 외부 결함의 원주방향 결함각도가 일정할 때, 결함의 깊이 변화에 따른 신호들을 보여주고 있다.

먼저 외부 및 내부 결함신호를 비교해 보면, 위상의 경우 외부결함에 비하여 내부결함의 경우 약 60° 정도 반시계방향으로 회전되어 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한,

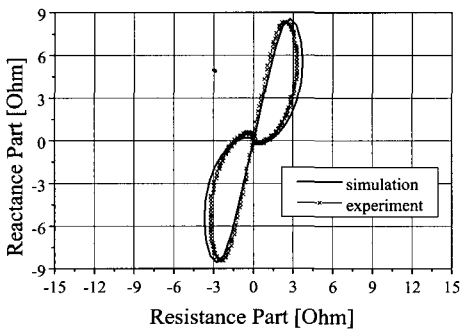


Fig. 3 Comparison of 3-D and experimental results from a 58% depth axisymmetric groove

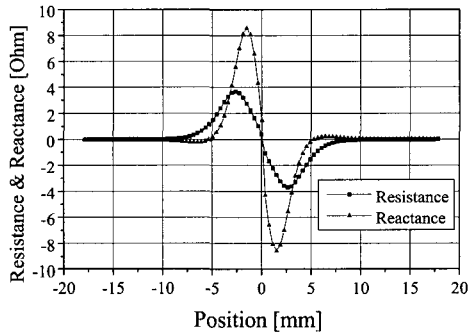
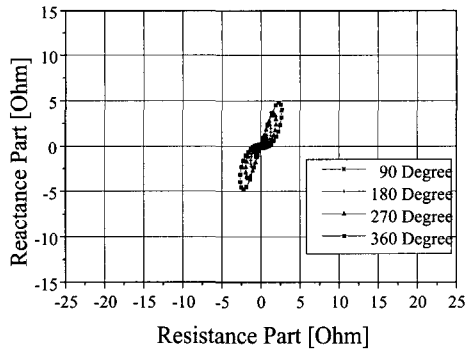
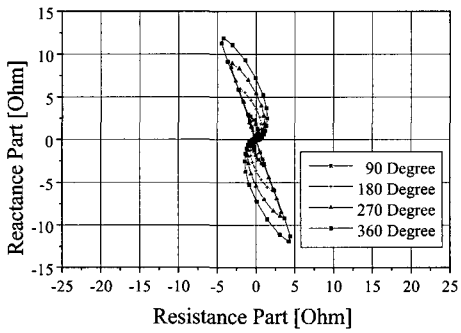


Fig. 4 Resistive and reactive component as probe position

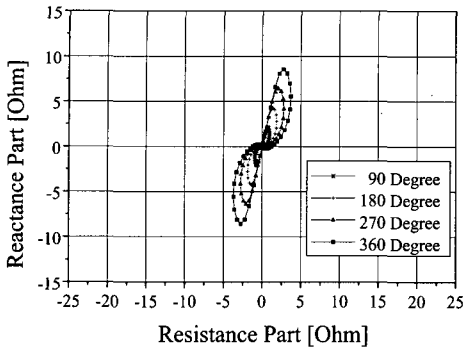


(a) OD defects

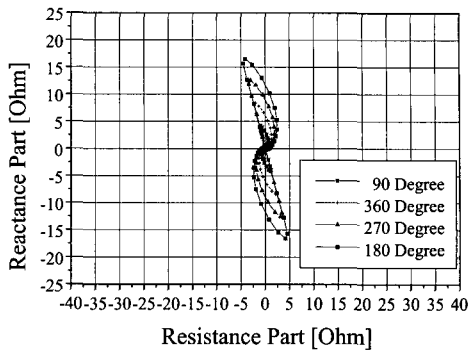


(b) ID defects

Fig. 5 Signals for 38% depth defect

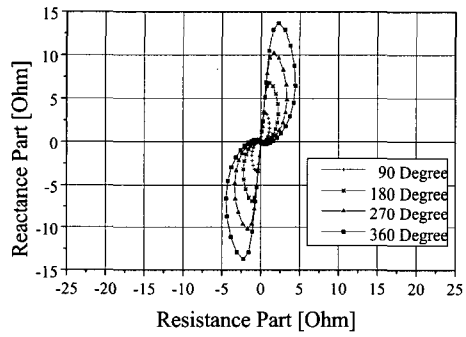


(a) OD defects

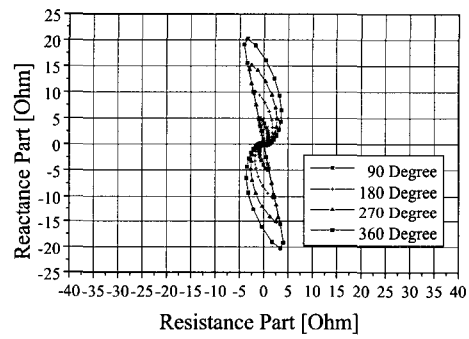


(b) ID defects

Fig. 6 Signals for 58% depth defect

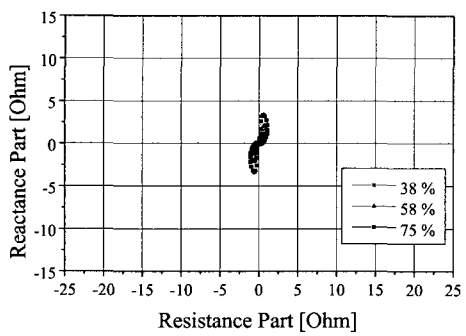


(a) OD defects

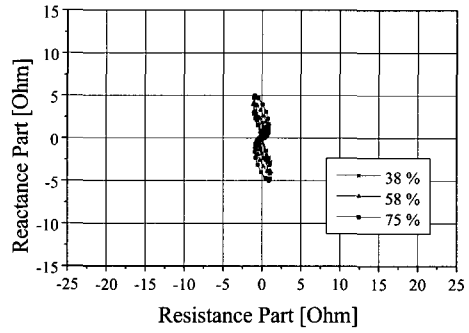


(b) ID defects

Fig. 7 Signals for 75% depth defect



(a) OD defects



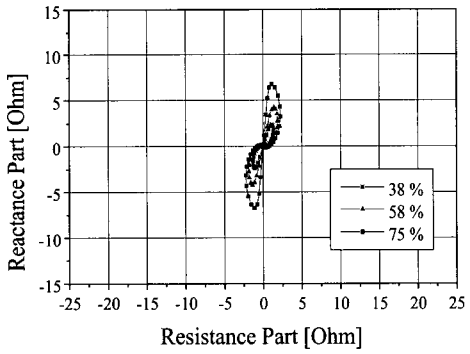
(b) ID defects

Fig. 8 Signals for 90° circumferential defect

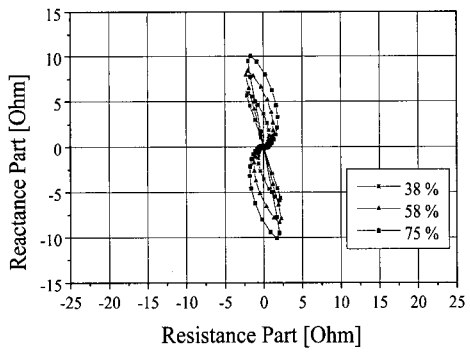
결함신호의 크기에 있어 외부와 내부 결함신호간의 크기의 비는 75%결함의 경우가 38%결함의 경우에 비해 더 작은 것을 알 수 있다. 내부결함이 외부결함에 비해 프로브 임피던스에 미치는 영향이 더 크므로 내부 결함신호의 크기가 더 크며, 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 외부 및 내부의 결함이 프로브 임피던스에 미치는 영향이 점점 비슷해지므로 이러한 결과가 나타나게 된다.

한편, 원주방향으로 결함의 각도가 변함에 따라 내부 및 외부 결함신호 모두에서 위상은 거의 변함이 없고 크기만 각도에 비례적으로 커지고 있음을 관찰 할 수 있다. 깊이의 변화에 따른 결함신호의 변화를 살펴보면, 깊이가 변함에 따라 위상도 변하고 있음을 관찰할 수 있다. 외부결함의 경우 깊이가 깊어짐에 따라 결함신호들이 반시계방향으로 회전하고 있으며, 내부결함의 경우에는 시계방향으로 회전하고 있음을 살펴볼 수 있다. 이는 Fig. 8부터 Fig. 11까지에 보인, 결함각도가 일정하고 깊이가 변화할 때의 결함신호들을 비교해 보면 보다 명확해 진다.

Fig. 12 및 Fig. 13에서는 내부 및 외부 결함에 대하여 결함의 깊이에 따른 임피던스 신호의 최대 크기 및 위상의 변화를 각각 비교하였다. Fig. 12에서 임피던스 신호의 최대 크기는 프로브의 위치에 따른 와전류의 분포영역과 결함의 위치에 의해서 결정된다. 즉, 내부결함의 경우 결함의 위치가 프로브에 가까이 있으므로 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 신호크기의 변화가 둔화되어 그래프상의 기울기가 작아지며, 외부결함의 경우에는 이와 반대로 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 신호크기의 변화가 심화되어 그래프상의 기울기가 커진다. Fig. 13에서는 결함깊이에 따른 신호의 위상변화를 보여주고 있는데, 결함깊이가 커짐에 따라 내부결함에서는 위상이 작아지고 외부결함에서는 커지는 것을 볼 수 있다. 원주방향으로의 결

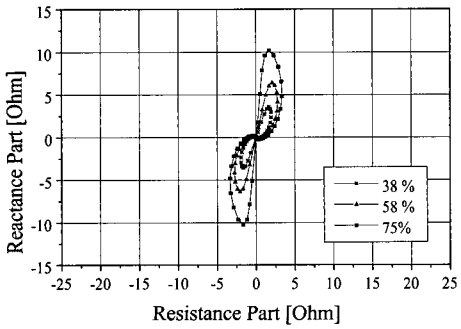


(a) OD defects

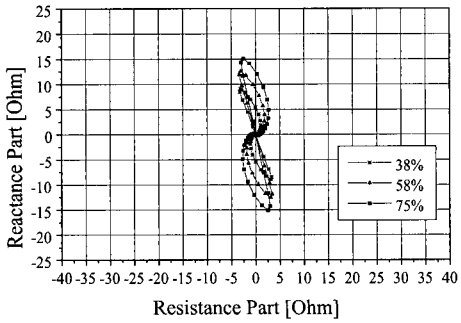


(b) ID defects

Fig. 9 Signals for 180° circumferential defect



(a) OD defects



(b) ID defects

Fig. 10 Signals for 270° circumferential defect

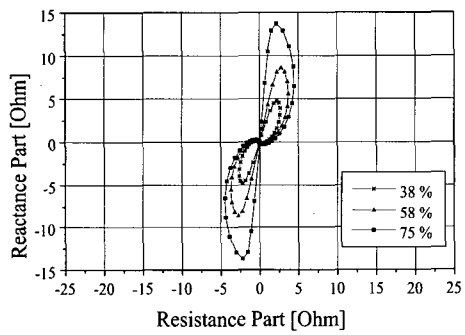
함각도 변화에 대해서는 앞서 살펴 본 바와 같이 위상의 변화가 없었다.

Table 2에서는 수치해석을 수행한 계산시간을 보여주고 있다. 내부결함의 경우 원주방향으로 16등분하였으며, 외부결함의 경우 원주방향으로 12등분하였다. 축방향으로는 내부 및 외부결함 모두 160등분하였다. 코일의 이동은 축방향으로의 전체 160구간 중 59번에서 시작하여 121번까지 63번의 계산을 수행하였다. 1구간의 실제길이는 0.38[㎜]이며 처음 시스템행렬을 변환하는 시간은 내부 및 외부결함에 대하여 각각 1,167초와 2,075초 정도이고 각 구간의 평균 계산시간은 각각 809초와 1,114초가 걸렸다.

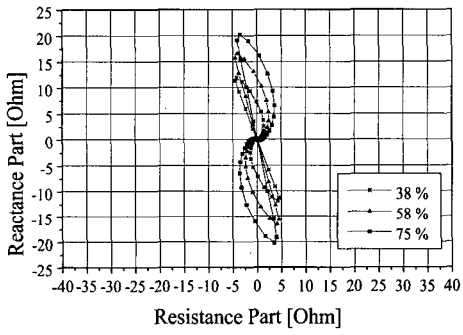
사용된 행렬계산방법은 반복법(iteration method)중 ICCG(In-Complete Conjugate Gradient)방법을 사용하였다. 직접법(direct method)을 사용하기에는 행렬의 크기가 너무 커서 계산이 어렵다. 계산시 사용한 ICCG 방법의 수렴오차는 uniform norm을 사용하여 10^{-11} 이내로 하였다. 사용된 컴퓨터의 CPU는 Intel사의 pentium II-450[㎒], 메모리는 512Mbytes, 사용된 OS는 Linux이며, 사용된 언어는 C 및 Fortran을 사용하였다.

Table 2 Computation time

원주방향구간수	미지수	non-zero수	계산구간수	총계산시간
12	93,219	7,328,997	63	약 14시간
16	124,131	9,770,553	63	약 20시간

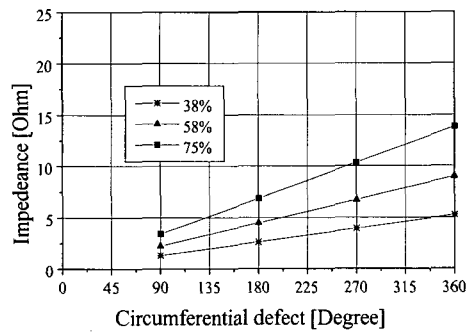


(a) OD defects

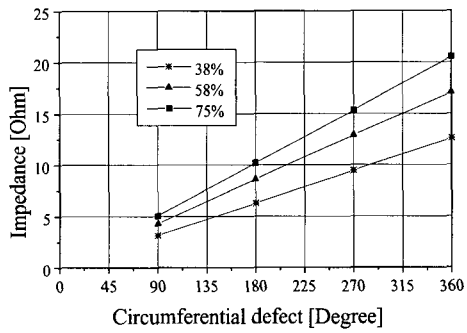


(b) ID defects

Fig. 11 Signals for 360° circumferential defects



(a) OD defects



(b) ID defects

Fig. 12 Maximum differential impedance as the depth of defect increases

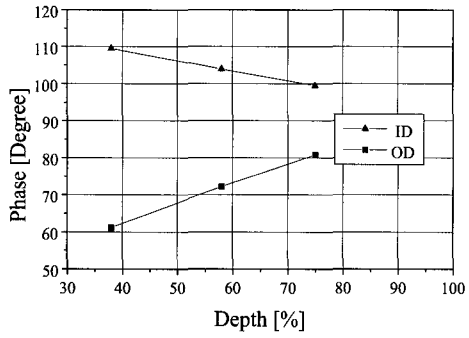


Fig. 13 Maximum differential impedance phase as the depth of defect increases

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 결함을 가진 전열관에 대한 와전류탐상의 수치해석을 3차원 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 해석대상으로는 INCONEL 600 전열관을 사용하였으며, 관의 내부 및 외부에 존재하는 결함을 모델링하여 수치해석을 수행하고, 임피던스로 표현되는 와전류탐상신호를 계산하였다. 결함 시험편에 존재하는 결함에 대하여 본 논문에서 계산된 결과와 실험결과를 비교하였으며, 잘 일치하는 결과를 얻어 본 논문에서 제안된 수치해석 방법의 타당성을 검증하였다. 이를 바탕으로 결함의 깊이 변화(38%, 58%, 75%) 및 원주방향으로의 결함각도 변화(90° , 180° , 270° , 360°)에 따른 탐상신호를 계산하여 결함의 크기변화에 따른 신호의 변화특성을 살펴보았다. 본 논문에서 제안된 3차원 유한요소해석 방법을 사용하면 다양한 3차원 결함에 대하여 신호의 획득이 가능하게 된다. 따라서, 직접 결함시험편을 만들지 않아도 되므로, 탐상조건별 결함의 표준신호 획득과 결함정보 판별을 위한 신경회로망 시스템의 training data 양산에 시간적, 경제적으로 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] R. C. McMaster, P. McIntire and M. L. Mester, "Nondestructive testing handbook", Vol. 4, pp. 458-459, ASNT, U.S.A., (1986)

[2] G. Chen, A. Yamaguchi, and K. Miya, "A novel signal processing technique for eddy-current testing of steam generator tubes", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, pp. 642-648, (1998)

[3] M. V. K Chari, A. Konard, M. A. Palmo and J. D'Angelo, "Three-dimensional vector potential analysis for machine field problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 18, pp. 436-446, (1982)

[4] O. Biro and K. Preis, "Finite element analysis of 3-D eddy currents", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, pp. 418-423, (1990)

[5] O. Biro and K. Preis, "Coupling electric and magnetic vector potentials in 3-D eddy current analysis", COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Volume 9, pp. 45-48, (1990)

[6] O. Biro and K. Preis, "On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of 3-D eddy currents", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, pp. 3145-3159, (1989)

[7] O. Biro, K. Preis and W. Renhart, "Finite element analysis of 3D multiply connected eddy current problems", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 25, No. 5, pp. 4009-4011, (1989)

[8] Gouri Dhatt, Gilbert Touzot and Gilles Cantin, "The finite element method displayed", pp. 114-119, John Wiley & Sons, (1982)