

〈 논문 〉

## 알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 유한요소해석

이준현\* · 이봉수\* · 이민래\*\*  
(2005년 4월 1일 접수, 2005년 9월 14일 심사완료)

### Finite Element Analysis for Eddy Current Signal of Aluminum Plate with Surface Breaking Crack

Joon-Hyun Lee, Bong-Soo Lee and Min-Rae Lee

**Key Words:** Surface Crack(표면결함), Eddy Current Signal(와전류 신호), Finite Element Method(유한요소법), Impedance Plane(임피던스 평면)

#### Abstract

The detection mechanism of the flaw for the nondestructive testing using eddy current is related to the interaction of the induced eddy currents in the test specimen with flaws and the coupling of these interaction effects with the moving test probe. In this study, the two-dimensional electromagnetic finite element analysis(FEM) for the eddy current signals of the aluminum plate with different depth of surface cracks is described and the comparison is also made between experimental and predicted signals analyzed by FEM. In addition, the characteristics of attenuation of the eddy current density due to the variation of the depth of a conductor are evaluated. The effective parameters for the application of eddy current technique to evaluate surface cracks are discussed by analyzing the characteristics of the eddy current signals due to the variation of crack depths.

#### 1. 서 론

항공기의 각종 중요부품의 검사나 석유화학 플랜트에서 사용중인 열교환기 튜브, 금속판 터빈 블레이드(Turbine Blade), 리벳 홀(Rivet Hole) 등의 균열검출에 비파괴 평가방법중의 하나인 와전류 탐상법(Eddy Current Testing)이 폭넓게 사용되고 있다. 주요 설비의 안전관리와 제품의 품질관리에 사용되는 와전류 탐상법은 코일에 교류전류를 부과하면 전자기유도(Electromagnetic Induction)에 의해 도체 내부에 와전류가 생성되며, 결함이 존재하는 부분에서의 와전류 분포변화를 코일의

임피던스(Impedance) 변화를 통하여 살펴봄으로써 결함의 유무, 형태와 크기 등을 판별하는 비파괴 평가방법이다.<sup>(1,2)</sup>

한편, 와전류 탐상법을 이용하여 알루미늄 평판의 표면결함<sup>(3)</sup> 검출을 목적으로 실제로 적용하기 위해서는 결함의 종류 및 크기 등에 따른 다양한 신호들을 확보하여야 한다. 즉, 미지의 탐상 신호들을 확보된 기준신호와 비교하여야 결함정보의 판별이 가능하기 때문이다. 이처럼 다양한 신호를 확보하기 위해서는 많은 종류의 결함을 가공한 표준 시험편을 만들어 실제 실험을 수행해야 하지만, 이것은 많은 시간과 비용 그리고 탐상조건에 따른 표준신호 획득에 많은 노력이 요구된다. 따라서 결함평가에 대한 기준신호의 확보를 용이하게 하기 위하여 수치해석 방법의 하나인 유한요소 해석<sup>(4,5)</sup>을 이용하여 표면결함에 대한 와전류 신호의 해석이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 와전류 탐상법을 표면결

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부  
E-mail: johlee@pusan.ac.kr  
TEL : (051)510-2430 FAX: (051)512-9835

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

합 평가에 실제로 적용하기 위하여 알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 변화특성을 유한요소 해석을 통하여 수치해석 하고자 하며, 항공기 재료로 이용되고 있는 Al6061 평판에 슬롯 형태의 표면결함을 와이어커팅 가공하여 실제 실험을 통하여 획득한 와전류 신호와 비교, 분석하여 본 논문에서 제안한 유한요소 해석의 타당성을 증명하고자 한다. 또한, 이로부터 결함깊이의 변화에 따른 와전류 신호의 변화특성을 분석함으로써, 실제로 결함평가의 적용에 있어 유효한 변수들을 도출하고자 한다.

## 2. 이론

### 2.1 전자기장의 지배방정식

낮은 주파수 영역에서 시간에 따라 변하는 전자기장 문제를 지배하는 일반적인 미분방정식은 맥스웰 방정식(Maxwell's Equations)과 전자기장의 거동을 표현하는 구성방정식(Constitutive Equation)에 의해 표현할 수 있다.

일반적으로 자기벡터 포텐셜의 유일해를 얻기 위한 와전류 문제를 표현하는 식은 다음과 같다.

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

식 (1)이 모든 와전류 문제를 표현하는 식이 되며, 2D 문제의 경우 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial^2 \vec{A}_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}_z}{\partial y^2} \right) = -\vec{J}_s + j\omega\sigma\vec{A}_z \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 모든 해석영역 내에서 자기벡터 포텐셜과 전기스칼라 포텐셜로 풀어야 하는 방정식이다.

### 2.2 유한요소 정식화

자기벡터 포텐셜의 항으로 2D 문제에 대한 범함수를 나타내면 다음과 같다.

$$F(\vec{A}) = \int_v \left[ \frac{1}{2\mu} \left( \left| \frac{\partial \vec{A}}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial \vec{A}}{\partial y} \right|^2 \right) + \frac{j\omega\sigma}{2} |\vec{A}|^2 - \vec{J}_s \cdot \vec{A} \right] dv \quad (3)$$

여기서,  $dv = dx dy$  이고, 자기벡터 포텐셜은 형상함수  $N_i$ 에 의해 다음과 같이 근사화된다.

$$\vec{A} = \sum_{i=1}^n N_i \vec{A}_i \quad (4)$$

여기서,  $n$ 은 요소의 절점수이다.

식 (1)과 식 (2)에 대한 올바른 해는 해석영역 내에서 에너지 범함수를 최소화함으로써 얻을 수 있다. 즉 근사화된 자기벡터 포텐셜인 식 (4)를 범함수인 식 (3)에 대입하여 각각의 미지수에 대해 1차 편미분을 취해 0으로 놓으면 다음과 같다.

$$\frac{\partial F(\vec{A})}{\partial A_{ik}} = 0 \quad (5)$$

식 (5)를 풀면 각 요소에 대한 유한요소 방정식이 만들어진다.

$$[[K]_e + j\omega\sigma[R]_e]\{A\}_e = \{Q\}_e \quad (6)$$

여기서,  $[K]$ 는 강성행렬의 실수부,  $[R]$ 은 허수부,  $\{A\}$ 는 미지수 벡터 그리고  $\{Q\}$ 는 요소에 가해진 전류벡터를 나타낸다.

식 (6)에 나타난 유한요소 방정식을 모든 요소에 대한 합으로 전체 해석영역을 나타내면 다음과 같다.

$$[G]\{A\} = \{Q\} \quad (7)$$

여기서,  $[G] = [[K] + j\omega\sigma[R]]$ 이다.

식 (7)의 대형행렬식을 계산함으로써 모든 절점에서의 자기벡터 포텐셜을 구할 수 있다.

### 2.3 와전류 밀도와 코일 임피던스 계산

#### 2.3.1 와전류 밀도 계산

와전류 밀도는 식 (8)을 이용하여 자기벡터 포텐셜로부터 바로 구할 수 있다.

$$\vec{J}_e = -j\omega\sigma\vec{A} \quad (8)$$

그러나 자기벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 는 요소의 절점에서의 값이고, 와전류 밀도는 요소내에서의 값이다. 그러므로 와전류 밀도는 한 요소내의 절점에서의 자기벡터 포텐셜을 평균함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$\vec{J}_e = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n j\omega\sigma \vec{A}_i \quad (9)$$

2.3.2 코일 임피던스 계산

2D 전자기장 문제에서 코일 임피던스는 코일 단면적 내의 자기벡터 포텐셜의 값으로부터 계산 되어질 수 있다. 교류전류  $I_s$ 를 운반하는 와이어 루프 하나의 임피던스에 대한 일반적인 식은 다음과 같다.

$$Z = \frac{j\omega}{I_s} \oint \vec{A} dl \tag{10}$$

자기벡터 포텐셜은 코일에 흐르는 전류의 방향으로 단지 하나의 성분만을 가지므로, 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{j\omega l \vec{A}_i}{I_s} \tag{11}$$

여기서,  $I_s$  = the rms value of the current

$A_i$  = the magnetic vector potential

$l$  = length of the coil

단위 면적당 코일의 감은 횟수가  $N_s$ 인 요소면 적에 대해 식 (12)를 적분하면 다음과 같다.

$$Z_i = \frac{j\omega l A_{ci} N_s \Delta_i}{I_s} \tag{12}$$

여기서,  $A_{ci}$  = the magnetic vector potential at the center point of the element

$\Delta_i$  = the elemental area

한 요소내의 자기벡터 포텐셜의 중심값은 요소 내의 각 절점에서의 값을 평균함으로써 나타내어 질 수 있다. 코일의 단면적 내에 있는 모든 요소의 임피던스를 합하고,  $J_s = N_s \times I_s$ 을 이용하면 코일의 전체 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{coil} = \frac{j\omega \vec{J}_s}{I_s^2} \sum_{i=1}^N \Delta_i A_{ci} \tag{13}$$

3. 실험방법 및 유한요소 모델링

3.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 비자성체인 알루미늄 합금(Al6061)으로 고강도 경량화 재료로써 항공기 구조용 재료로 많이 사용되고 있다. 시험편

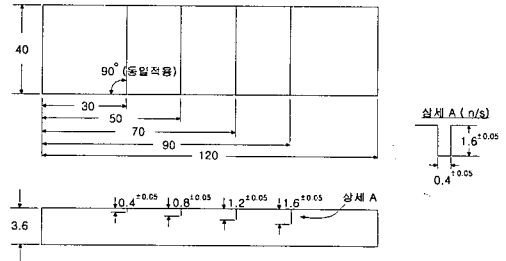


Fig. 1 Dimension and geometry of surface crack(unit:mm)

의 크기는 40mm×120mm×3.6mm이며, 표면균열의 깊이는 각각 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm이다. Fig. 1에 와이어커팅 가공한 표면결합의 형상과 치수가 나타나 있다.

3.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 유한요소 해석에 의하여 얻어진 와전류 신호의 타당성을 검증하기 위하여 와전류 탐상장비(RD/TECH, TC-5700)를 이용하여 와이어 커팅 가공한 알루미늄 평판의 표면결합에 대한 와전류 신호를 측정하였다. 실험에 사용된 와전류 탐상장비의 시스템 구성도 및 코일탐촉자의 개략적인 형상과 크기는 Fig. 2에 나타나 있다. 와전류 탐상장비는 코일 탐촉자로부터 표면결합에 대한 아날로그 형태의 와전류 신호를 수집하여 A/D 변환기를 통하여 디지털 신호로 바꾸어 와전류 탐상장비와 이더넷(Ethernet)으로 연결된 컴퓨터에 신호를 전송한다. 이는 컴퓨터에 설치되어 있는 소프트웨어(Mview)를 통해 화면상에 구현된 후 적절한 신호처리를 통해 임피던스 평면상에 나타난다. 사용된 코일탐촉자는 ZETEC사의 Spring Loaded Spot Probe로 사용주파수 범위는 5~50kHz이다. 주파수가 5kHz일 때와 50kHz일 때의 표준침투깊이를 계산한 결과 각각 1.369mm와 0.433mm이므로 이들 값의 5배되는 깊이는 최대 결함깊이인 1.6mm보다 크므로 5kHz, 10kHz, 20kHz, 30kHz, 40kHz, 50kHz를 시험 주파수로 선정하는 것은 타당하다고 할 수 있다. 각각의 경우에 1V의 교류전압으로 코일을 여기시켰으며, 출력신호는 50dB로 증폭하였다.

결합이 없는 부위에 프로브를 위치시켜 밸런싱 시킨 후 표면결합의 길이방향에 수직인 방향으로 프로브를 일정속도로 움직여 결합부위에서 발생

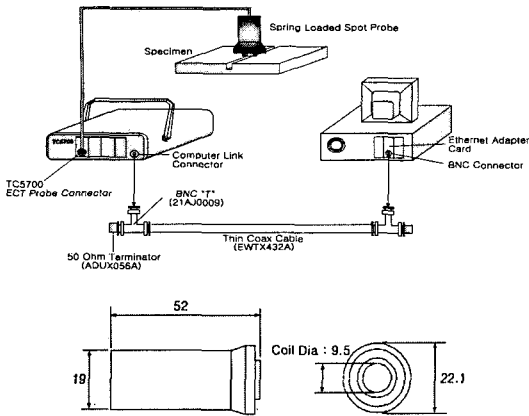


Fig. 2 Schematic diagram of eddy current testing system and configuration of the probe

하는 와전류 신호를 측정하였다. 주파수에 따른 결함신호의 크기와 위상각의 차이를 없애기 위해 결함깊이 1.6mm에서 생기는 신호를 진폭크기 1, 위상각 270°도로 보정하였다. 신호 크기는 임피던스 평면궤적의 peak와 peak 사이의 값이며, 위상각의 측정기준은 ASME 표준 절차를 따랐다.

3.3 유한요소 모델링

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 알루미늄 평판의 표면결함 문제를 2D 문제로 간략화하여 모델링하였다. 4-절점 등계수 요소를 사용하여 등간격 메쉬로 나누어 모델링 하였으며, 이때 사용된 물성치는 Table 1에 나타나 있으며, 해석모델의 크기는 Table 2에 나타나 있다.

2D 문제로 간략화하기 위해 코일은 단면적이 일정하면서 z 방향으로 무한 길이를 가지는 것으로 가정하였다. 코일의 단면적은 1.2mm×1.2mm이며, 해석모델의 바깥쪽 경계영역에서는 코일의 영향을 받지 않는 것으로 가정하여 자기벡터 포텐셜을 0으로 하는 경계조건을 부과하였다. 코일 영역의 각 요소에 -1.0e07 A/m<sup>2</sup> 인 전류밀도를 인가하였으며, 주파수는 실험주파수와 동일하게 부과하였다. Fig. 3에 간략화한 해석모델의 형상과 유한요소메쉬를 도시하였으며, 코일영역을 해석모델의 중간에 위치시키고, lift-off 거리는 0.4mm로 하였다. 알루미늄 평판에 결함이 없을 때의 위치를 초기위치 #A로 하여 평판의 가장자리부터 결함을 위치시켜 0.4mm 간격으로 결함위치를

Table 1 Material properties for finite element model

Material	Relative permeability	Electrical Resistivity (Ohm-m)	Source current density(A/m <sup>2</sup> )
Air	1	0	0
Coil	1	3.0e-08	1.0e07
Aluminum	1	3.7e-08	0

Table.2 Size of analysis model

Component	Size
Air	10mm×6.4mm
Coil	1.2mm×1.2mm
Aluminum	10mm×3.6mm
Crack	width: 0.4mm depth: 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm

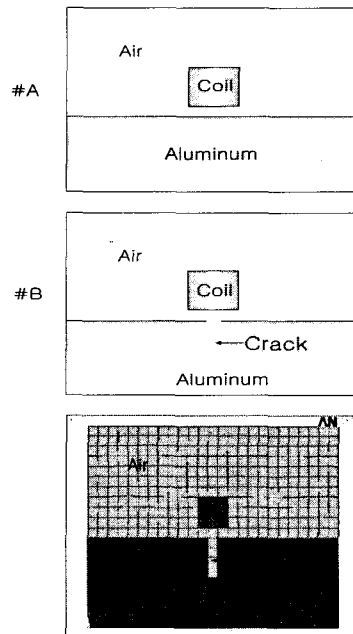


Fig. 3 Schematic diagram showing coil and surface crack

움직여 코일을 움직이는 것과 동일한 효과를 나타냈으며, 결함의 영향을 가장 많이 받는 코일 위치를 #B로 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 와전류 밀도의 감쇠특성

본 연구에서는 프로브의 코일에 의하여 전도체에 유도되는 와전류 밀도의 깊이에 따른 감쇠특

성을 평가하기 위하여 와전류 밀도를 계산하였다.

Fig. 4는 각각의 주파수에서 전도체 표면으로부터 깊이에 따른 와전류 밀도변화를 나타낸 것으로 코일중앙 아래의 위치에서 전도체 영역의 와전류 밀도를 각각 계산하였다. 표면의 와전류 밀도를 기준으로 하여 깊이에 따른 와전류 밀도를 백분율로 나타냈으며, x축은 시험편의 전체 두께에 대한 백분율로 전도체의 깊이를 나타내었다. Fig. 4에서 전도체의 깊이가 증가할수록 와전류 밀도가 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있으며, 주파수가 증가함에 따라 표면영역에서 와전류 밀도의 감쇠비가 증가함을 알 수 있다. 이는 와전류 밀도가 주파수의 함수이므로 와전류 밀도는 주파수에 반비례하여 감소하기 때문이다.

4.2 표면결함 평가

본 연구에서는 알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 변화 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하고 실험신호와 비교, 분석하였다. 코일과 결함의 상대적 위치에 따른 코일 임피던스를 각각 구한 후, 결함이 존재하지 않는 모델에서의 코일 임피던스를 차감하여 전체적인 임피던스 평면케적을 구성하였다.

4.2.1 프로브 위치에 따른 코일임피던스 변화특성

Fig. 5는 5kHz의 주파수로 깊이가 각각 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm, 1.6mm인 표면결함이 가공된 알루미늄 평판에 대하여 실제로 와전류 탐상실험을 통하여 수집한 프로브(Probe) 위치에 따른 코일 임피던스의 실수부와 허수부를 나타낸 것이며, Fig. 6은 이에 대한 유한요소 해석결과 얻어진 코

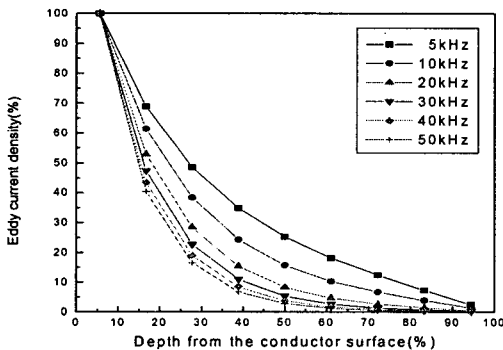


Fig. 4 The variation of eddy current density

일임피던스의 실수부와 허수부를 나타낸 것이다. 실험신호와 해석신호를 상호 비교하기 위하여 두 경우 모두 깊이가 1.6mm인 결함에서 발생하는 와전류 신호의 진폭크기로 전체 신호를 나누어 무차원화 하였으며, 또한 깊이 1.6mm인 결함에서 발생하는 신호의 위상각(Phase Angle)을 270°로 보정하였다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 프로브 위치에 따른 실제 와전류 신호와 해석모델의 와전류 신호를 비교하여 보면, 신호의 일반적인 형태가 상당히 유사함을 알 수 있다. 두 경우 모두 결함깊이가 증가할수록 코일 임피던스의 실수부는 양의 피크값은 감소하는 반면 양의 피크값 전후의 음의 피크값이 증가하는 경향을 보이며, 코일 임피던스의 허수

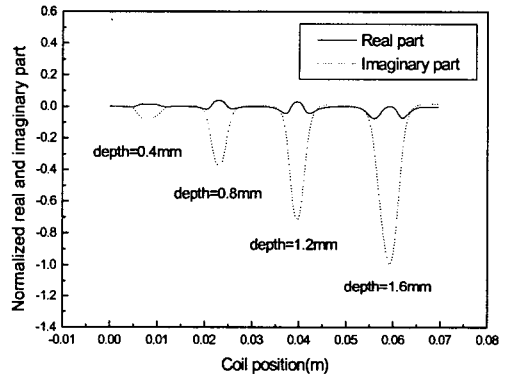


Fig. 5 The variation of the real and imaginary part due to the change of defect depth in the experimental signal (Frequency=5kHz)

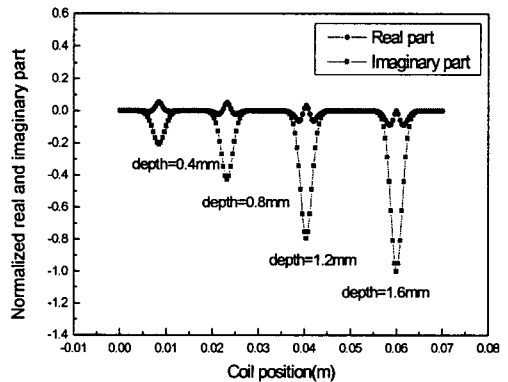


Fig. 6 The variation of the real and imaginary part due to the change of defect depth in the analysis signal(Frequency =5kHz)

부는 음의 피크값이 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 각각의 결함깊이에 대하여 코일 임피던스의 허수부의 변화량이 실수부의 변화량보다 큼을 알 수 있다.

와전류 탐상실험에 사용된 프로브가 absolute type이기 때문에 프로브가 결함의 중앙으로 다가 갈수록 결함에 의한 영향으로 코일 임피던스의 실수부와 허수부의 절대값이 증가하며, 이는 전도체에 유도된 와전류의 흐름이 표면결함의 방해로 인하여 결함부위에서 만들어내는 와전류의 자기장 세기와 결함이 존재하지 않는 부위의 와전류가 만들어내는 자기장 세기 사이에 차이가 발생하는데서 그 원인을 찾을 수 있다. 프로브가 결함의 중앙에 위치할 경우 코일 임피던스의 실수부와 허수부의 절대값이 가장 크게 나타났으며, 프로브가 결함부위를 지나면서 결함에 의한 영향이 감소하면서 코일 임피던스의 실수부와 허수부의 절대값이 감소하면서 마침내는 결함의 영향을 받지 않는 초기 위치로 되돌아가는 것을 알 수 있다.

4.2.2 결함깊이에 따른 와전류 신호의 변화특성

Fig. 7과 Fig. 8은 실험결과와 해석결과와 임피던스 평면궤적을 결함깊이에 따른 와전류 신호의 위상각과 진폭 크기비를 비교한 것이다 (Frequency=5kHz). 실험결과와 해석결과를 상호 비교하기 위하여 깊이가 1.6mm인 결함에서 발생하는 신호를 기준신호로 택하여, 이 신호의 위상각을 270°로 보정하고, 크기를 1로 스케일링 (Scaling)하였다.

Fig. 7에서 결함깊이가 증가할수록 위상각은 증가하며, 이에 따라 와전류 신호가 시계방향으로 회전하는 경향이 나타났으며 결함깊이가 1.2mm, 0.8mm, 0.4mm일 경우 실험결과와 해석결과와의 오차는 각각 0.4°, 1.0°, 2.9°로 나타났다. 또한 Fig. 8에서 결함깊이가 증가할수록 와전류 신호의 진폭 크기비는 선형적으로 증가함을 알 수 있으며, 결함깊이가 1.2mm, 0.8mm, 0.4mm일 경우 실험결과와 해석결과와의 오차는 각각 0.062, 0.115, 0.129로 나타났다. 결함에 따른 와전류 신호의 위상각과 진폭 크기비의 오차는 해석상의 오차로 코일을 단면적이 일정한 무한한 길이를 갖는 것으로 가정하여 2D 전자기장 문제로 해석한 영향이 지배적일 것으로 사료되며, 와이어 커팅으로 가공

한 실제 표면결함의 끝단 부분이 임의의 곡률을 지니게 되는데서 기인하는 오차로도 추정된다. 또한 재료 물성치인 전도체의 전기저항과 코일의 전기저항, 해석모델의 치수인 lift-off 거리에 따른 영향도 다소 존재할 것으로 사료된다. 앞서 언급한 바와 같이 표면결함의 경우 결함깊이가 변하면 위상각과 크기가 모두 변하므로 실제 적용에 있어서 이 두 가지 요소를 모두 고려해야 할 것으로 사료된다. 그러나 깊이가 0.4mm인 결함과 1.6mm인 결함의 위상각 차이는 실험신호에서 11.9°이고, 해석신호에서 14.8°로 나타나며 두 경우 모두 그 차이가 크지 않고, 작업자의 숙련도, 재료표면 상태, 프로브의 이동속도, lift-off의 변화 등에 따라 값의 차이가 생길 수 있으므로 위상각은 결함 깊이를 평가하는 보조적인 수단으로 이용해야 할 것으로 사료된다.

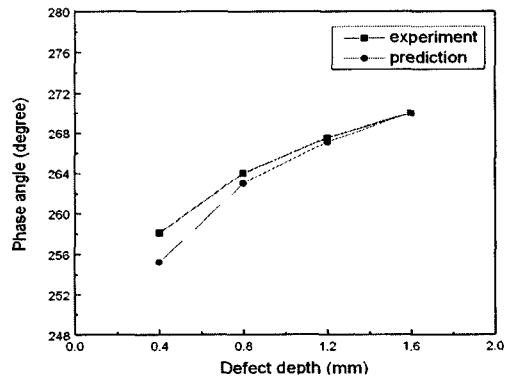


Fig. 7 The variation of phase angle due to the change of defect depth (frequency=5kHz)

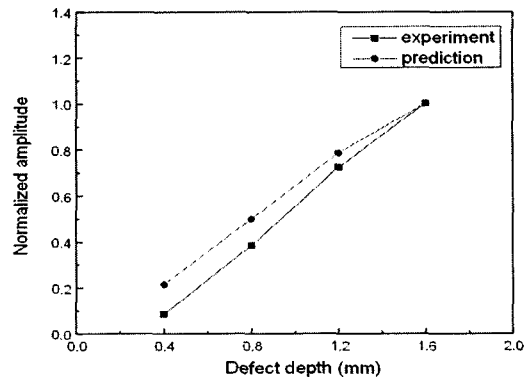


Fig. 8 The variation of normalized amplitude due to the change of defect depth (frequency=5 kHz)

4.2.3 주파수에 따른 검출능

Fig. 9는 주파수에 따른 검출능을 비교하기 위하여 각각의 주파수에서 결함깊이에 따른 결함신호의 크기비를 나타낸 것이며, Fig. 9(a)는 실제 실험결과이고, Fig. 9(b)는 해석결과이다. 두 경우 모두 각각의 주파수에서 깊이가 1.6mm인 결함에서 발생하는 와전류 신호의 진폭크기로 모든 신호를 나누어 무차원화 하였다.

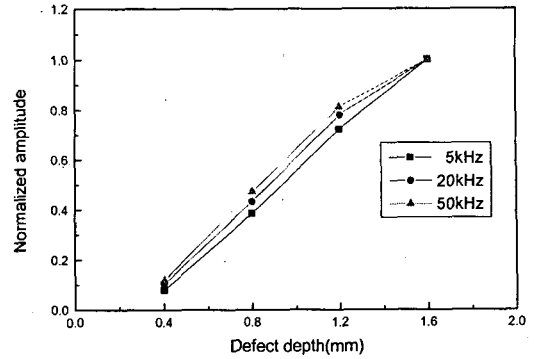
Fig. 9(a)에서 주파수가 5kHz에서 50kHz로 증가함에 따라 깊이 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm인 결함에 대한 와전류 신호의 진폭 크기비의 증가는 각각 0.038, 0.088, 0.088로 나타나며, Fig. 9(b)에서 주파수가 5kHz에서 50kHz로 증가함에 따라 깊이 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm인 결함에 대한 와전류 신호의 진폭 크기비의 증가는 각각 0.045, 0.157, 0.086으로 나타났다. 이는 주파수 증가에 따라 전도체 표면과 표면직하에 유도되는 와전류 밀도의 세기가 증가하기 때문이다.

Fig. 10은 전도체의 각각의 깊이에서 주파수 증가에 따른 와전류 밀도변화를 나타낸 것이며, 주파수가 5kHz일 때의 와전류밀도로 나누어 무차원화하였다. 여기서, d는 전도체의 표면에서의 깊이를 나타낸다. Fig. 10에서 주파수 증가에 따라 전도체의 표면영역과 표면직하 영역에서 와전류 밀도의 증가가 나타나며, 깊이가 1.4mm인 영역부터는 와전류의 skin effect에 의하여 와전류 밀도가 오히려 감소함을 알 수 있다. 즉, 5kHz~50kHz의 주파수에서 전도체에 유도되는 와전류가 최대결함깊이까지 존재하므로, 주파수증가는 전도체의 표면영역과 표면직하의 와전류 밀도세기의 증가를 일으키고 이는 낮은 주파수일 때보다 코일임피던스에 더 큰 영향을 미치므로 검출능의 향상을 가져오는 것으로 사료된다.

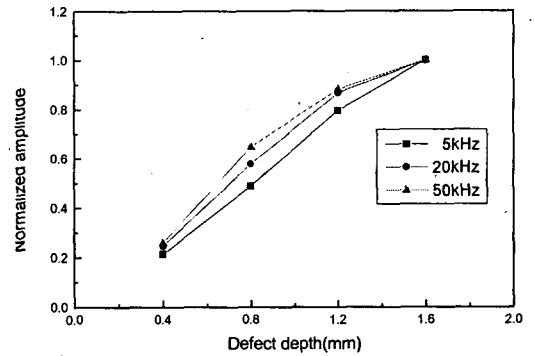
그러나 주파수 증가에 따라 기준결함크기에 대하여 각각의 결함에서 발생하는 와전류 신호의 크기비 증가로 검출능의 향상은 기대되지만, 이들 신호들을 결함깊이에 대한 기준신호로서 선정하여 결함 깊이를 평가하는 분해능은 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 결함깊이에 대한 검출능과 분해능을 고려하여 시험주파수를 고려하여야 할 것으로 사료된다.

4.2.4 전도체의 전도율변화에 따른 와전류 신호의 변화특성

본 연구에서는 전도체의 전도율 변화에 따른



(a) Experimental signal



(b) Predicted signal

Fig. 9 Change of normalized amplitude due to the frequency

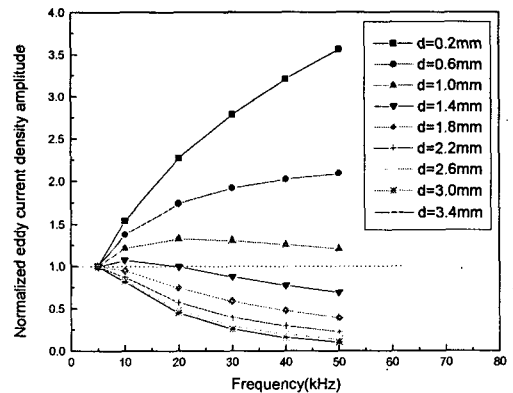


Fig. 10 The variation of normalized eddy current density due to frequency

와전류 신호의 변화특성을 평가하기 위해 해석모델의 입력변수인 전도체의 전기저항을 변화시켜 와전류 신호의 크기비를 비교하였다.

Fig. 11은 전도체의 전도율에 따른 와전류 신호

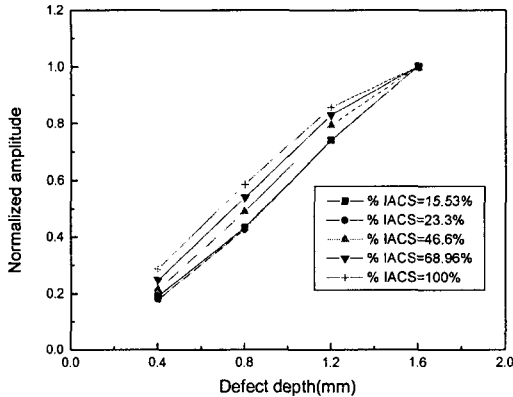


Fig. 11 The variation of normalized amplitude due to the conductor conductivity(Frequency=5kHz)

의 크기비를 비교하기 위하여 각각의 %전도율에서 결함깊이에 따른 결함신호의 크기비를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 Al6061의 %전도율이 46.6%보다 %전도율이 증가할수록 기준 결함신호의 크기에 대하여 각각의 결함에서 발생하는 와전류 신호의 크기비가 증가하며, %전도율이 감소할수록 와전류 신호의 크기비의 감소가 나타나다가 %전도율이 23.3% 이하일 경우 와전류 신호의 크기비에 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이로부터 %전도율이 감소할수록 실험결과와 해석결과의 오차를 줄이는 결과를 가져오는 것을 알 수 있다. 즉, 유한요소 해석에 있어 실제 재료의 물성치인 전도체의 전기저항을 정확히 측정하여 입력변수로 사용하여야 할 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 변화특성을 유한요소 해석을 이용하여 수치해석하고 실험결과와 비교, 분석하였다. 또한 전도체의 전도율 변화에 따른 와전류 신호의 변화특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 알루미늄 평판의 표면결함에 대한 와전류 신호의 유한요소 해석과 와전류 탐상장비를 이용한 실험결과를 비교, 검토함으로써 본 논문에서 제안된 수치해석 방법의 타당성을 검증하였다. 이를 바탕으로 표면결함의 깊이변화에 따른 와전

류 신호의 변화특성을 평가한 결과, 결함깊이가 증가할수록 와전류 신호의 크기와 위상각 모두 증가함을 알 수 있었다.

(2) 결함깊이의 정량적인 평가를 목적으로 시험 주파수를 선정할 경우 표준침투깊이의 5배되는 깊이가 검출하고자 하는 결함의 깊이보다 크게 되는 주파수를 선택해야 할 것이며, 본 연구의 경우 5kHz의 주파수가 최적주파수로 사료된다.

(3) 해석모델로부터 전도체의 전도율 변화에 따른 와전류 신호의 변화특성을 평가한 결과, 유한요소 해석의 입력변수인 전도체의 전기저항은 결함에서 발생하는 와전류 신호의 크기에 지대한 영향을 미치는 요소임을 알 수 있다. 즉 전도체의 전도율을 감소시킴에 따라 결함신호와 해석신호의 오차를 줄이는 결과를 가져오므로, 유한요소 해석에 있어 실제 재료의 물성치인 전도체의 전기저항을 각 방향에 대하여 정확히 측정하여 벡터량으로 입력함으로써 유한요소 해석의 정확성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- (1) Lee, J.H. and Je, Y.S., 1999, "Finite Element Analysis for the Nondestructive Evaluation of Steam Generator Tube using Eddy Current," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 23, No. 3, pp. 512~519.
- (2) Jung, Y.M., 1991, "Analytic Model of Eddy Current Signal using Integration Method," *KSNT*, Vol. 11, No. 2, pp.7~14.
- (3) Bowler, J. R. and Harfield, N., 1998, "Evaluation of Probe Impedance Due to Thin-Skin Eddy-Current Interaction with Surface Cracks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 34, No. 2, pp. 515~523.
- (4) French, P. C. and Bond, L. J., 1988, "Finite-Element Modeling of Eddy Current Nondestructive Evaluation(NDE)," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 7, Nos. 1/2, pp. 55~69.
- (5) Pchelintsev, A. and de Halleux, B., 2000, "Two-Dimensional Finite Element Model for a Long Rectangular Eddy Current Surface Coil," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No. 2, pp. 571~576.