

주파수 변화에 따른 축대칭 관결합의 와전류탐상 수치해석

서장원\*, 이향범, 정태연\*  
 숭실대학교 전기공학과, \*(주)카이텍

Numerical Analysis of Eddy Current Testing  
 for Pipe with Axi-symmetric Defect According to Frequency Changes

Jang-Won Seo<sup>o</sup>, Hyang-Beom Lee and \*Tae-Eon Jeong  
 Dept. of Electrical Eng., Soongsil Univ., \*Korea Advanced Inspection Technology (KAITEC)

**Abstract** - This paper presents a numerical analysis of the eddy current testing for pipe with axi-symmetric defect according to frequency changes using the finite element method(FEM). The defects used in this analysis are inner and outer axi-symmetric type. In order to obtain the behaviors of the signals by changing the frequency, the defects with different depths are modeled and analyzed using FEM. It is important to choose proper frequency because of the effect of skin depth in eddy current testing. This paper describes signal characteristics of each defects as frequency is changed

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

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

위 식에서  $\vec{E} [V/m]$ 는 전기장의 세기,  $\vec{H} [A/m]$ 는 자기장의 세기,  $\vec{B} [WB/m^2]$ 는 자속밀도,  $\vec{J}_s [A/m^2]$ 는 전원전류밀도,  $\vec{J}_e [A/m^2]$ 는 와전류밀도를 각각 나타낸다. 식 (3)으로 부터 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 을 정의하고 와전류 문제에 관한 맥스웰 방정식들을 이용하면 최종적으로 구하고자하는 와전류 문제의 지배방정식을 얻을 수 있다.

1. 서론

와전류 탐상법은 금속 표면의 결함 탐지에 우수한 기능을 발휘하기 때문에 원자력 발전설비, 항공기, 송유관과 같은 분야 등 각종 도체 구조물에 널리 사용된다. 특히 와전류 탐상법은 원자력발전소 증기발생기 전열관 결함에 대해서는 그 성능이 탁월하여 세계적으로 많이 사용되는 방법이다. 본 논문에서는 와전류 탐상 유한요소[1] 수치해석을 사용하여 축대칭 결함을 갖는 도체 관에 코일의 주파수를 변화하여 그에 따른 영향들을 알아보았다. 도체 관 내부에 교류전류가 인가된 프로브를 관통시켜 발생되어 나오는 임피던스 신호를 분석함으로써 결함의 존재, 형태 및 크기 등을 알 수 있다. 와전류 탐상시험에서는 시험하고자 하는 재질의 전자기적 특성, 균열 등의 불연속, 코일과 도체의 상대적인 위치 등과 같은 많은 인자들에 의해 잡음이 발생 할 수 있다. 이러한 이유로 하나의 주파수로 탐상하는 경우 결함의 검출 및 판정에 어려움이 있다. 그래서 다중 주파수를 동시에 코일에 인가하여 불필요한 잡음을 제거하는 방법이 사용되어지고 있다[2]. 다중 주파수를 이용한 와전류 탐상법은 서로 다른 2개 이상의 주파수를 코일에 인가하므로 각각의 주파수에 대한 자속의 침투 깊이가 서로 달라 도체 관의 내·외부에서 생길 수 있는 잡음을 감지 할 수 있게 되어 탐상시험의 신뢰성을 높일 수 있다. 따라서 본 논문에서는 와전류 탐상 수치해석을 통해 각각의 결함에 대해 100kHz부터 400kHz범위 내에서 100kHz씩 주파수를 변화하여 축대칭 결함을 갖는 도체 관에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} - j\omega\sigma\vec{A} + \vec{J}_s = 0 \quad (4)$$

위 식(4)는 와전류 문제의 지배방정식으로서 해석하고자 하는 영역에 대하여 위의 지배방정식을 적용한 후 경계 조건을 대입하여 계산하면 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 이 구해진다.

3. 임피던스

와전류 탐상법에서 실질적으로 구하고자 하는 양은 탐상코일의 임피던스이며 이 임피던스는 주어진 전류에 대하여 코일에 유기되는 기전력을 계산하므로써 구할 수 있다. 본 논문에서 해석대상으로 사용한 프로브는 차동 프로브인 보빈프로브로서 일정한 간격을 유지하고 있는 두 개의 코일에 서로 다른 방향의 전류가 흐르는 프로브이다. 그리고 차동코일에 인가된 전류에 의한 역기전력을 계산하여 각 코일에서 바라보는 임피던스를 구할 수 있게된다. 만일 결함이 존재하는 영역을 지날 경우 각각의 코일에서 계산한 임피던스에는 차이가 생기므로 이러한 임피던스의 차를 이용하여 결함신호로서 사용하게 된다. 각각의 코일에서 인식하게 되는 임피던스는 다음 식과 같이 정의된다.

$$Z = R + j\omega L = \frac{V}{I} \quad (5)$$

여기서  $I = \int J_s ds$ 로 표현되며 탐상 코일에 흐르는 전류를 나타내며,  $V = d\Phi/dt = j\omega\Phi$ 로서 탐상 코일에 유기되는 역기전력을 나타낸다. 따라서 와전류 탐상법에서 구하고자 하는 차동임피던스는 식(6)과 같이 표현된다.

$$Z_{diff} = Z_1 - Z_2 \quad (6)$$

2. 와전류 문제의 전자기 모델링

와전류 문제 및 거의 모든 전자기적인 현상을 표현할 수 있는 맥스웰 방정식 중에서 와전류 문제와 관련된 방정식들은 다음의 식으로 구성된다.

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

#### 4. 표피효과

교류 전류가 흐르는 코일에 도체를 접근시키면 전자유도 현상에 의해 도체 안에 와전류가 유도된다. 이때, 도체 안에 발생하는 와전류는 도체에 자속을 준 코일에 가까운 표면에 집중해 흐른다. 와전류는 도체의 내부 표면에 집중하고, 내부 깊을 곳일수록 감소하게 된다. 도체 내부에 발생하고 있는 와전류는 코일의 자속 변화를 없애는 방향의 자속을 발생한다. 따라서 이 와전류보다도 깊은 위치의 자속은 감소하기 때문에 발생하는 와전류는 도체의 내부에 들어 갈수록 감소하는 것이다.

표피효과의 정도를 나타내는 기준으로 침투 깊이가 정의된다. 코일에서 발생되어지는 자속이 도체에 침투할 경우 이때 도체 표면의 깊이가  $x$ 인 곳의 와전류 밀도  $J_e$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$J_e = J_0 \exp(-x\sqrt{\pi f \mu \sigma}) \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8)$$

$$\theta = x\sqrt{\pi f \mu \sigma} = x/\delta \text{ [rad]} \quad (9)$$

여기서  $J_0$  [ $A/m^2$ ]는 도체표면의 전류밀도,  $x$  [ $m$ ]는 도체 표면에서의 깊이이다. 또한  $\delta$ 를 침투 깊이라고 하며 주파수, 도체의 투자율 및 도전율의 제곱근에 반비례한다. 즉, 주파수가 높을 수록, 도전율이 높을 수록 침투 깊이가 얕아진다. 또한 도체에 유기되는 와전류는 도체의 내부에서 침투하는 자속에 따라 크기가 감소할 뿐만 아니라 위상이 변한다. 도체 표면에서 와전류에 대한 도체 안의 와전류 위상  $\theta$ 는 식(9)와 같이 표현 할 수 있다 [2].

#### 5. 사례 연구

와전류탐상 유한요소 수치해석을 위해 사용된 대상은 INCONEL 600 도체 관이다. 그림 1에서는 해석 모델의 형상을 보여주고 내·외부결함에 대하여 주파수를 100kHz에서 400kHz범위 내에서 와전류탐상 수치해석을 수행하여 결함신호를 생성하였으며, 결함형상에 대하여 결함의 깊이를 도체 관 두께의 38%, 58%, 75%, 100%로 변화시켜 가면서 주파수 변화에 대한 결함신호를 계산하였다. 본 논문의 해석모델인 도체 관과 코일 및 결함의 사양은 표 1과 같다. 참고로 주파수 100kHz에서의 침투깊이는 관 두께보다 더 큰 1.518[mm]이고 400kHz에서의 침투깊이는 0.759[mm]이다. 그림 2부터 그림 8에서는 결함의 깊이가 서로 다른 도체 관에 대하여 주파수를 변화시켜 신호를 생성하여 나타내었다. 그림 2, 3, 4는 내부결함에 대한 탐상신호를 나타내었고, 그림 5, 6, 7은 외부결함에 대한 탐상신호를 나타내었다. 그리고 그림 8은 100%결함에 대한 탐상신호를 나타내었다. 그림 2부터 그림 8을 보면 동일한 주파수에서 결함의 깊이가 깊을 수록 탐상신호의 크기가 커지는 것을 보여주고 있다. 또한 동일한 깊이를 갖는 결함에 대해 주파수를 높이면 탐상신호의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 각각의 결함에 대해 주파수를 변화시켜 결함의 신호 크기를 살펴보면 내부결함들이 외부결함들에 비해 신호의 크기가 훨씬 크게 나타난다. 이는 결함이 내부에 존재할 때 주파수의 영향으로 결함이 외부에 존재할 때보다 코일에서 발생하는 자속들이 도체 내부 표면에 집중해서 흐르려는 성질 때문에 내부 결함들의 신호가 주파수에 비례하여 신호가 커지는 것을 알 수 있다. 이에

반하여 외부결함들은 코일에서 발생하는 자속들이 도체 내부로 충분히 관통하지 못하기 때문에 신호의 크기가 내부 결함들에 비해 현저하게 작은 것을 나타내고 있다.

표 1 도체관의 크기 및 결함의 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	15.54	프로브 내경	12.45
프로브 두께	1.52	프로브 간격	1.52
프로브 폭	1.52	결함 폭	0.38

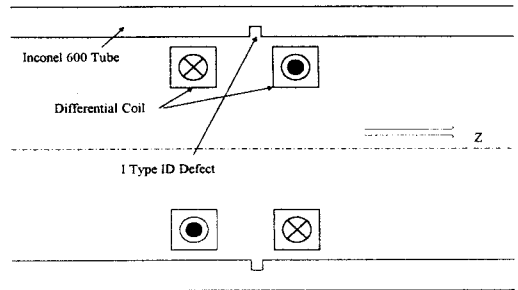


그림 1. 해석 모델

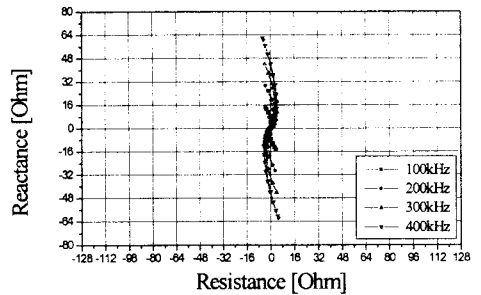


그림 2. 38% 내부결함에 대한 탐상신호

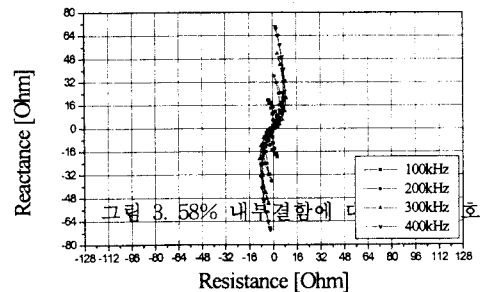


그림 3. 58% 내부결함에 대한 탐상신호

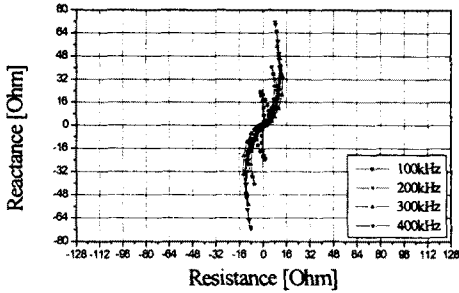
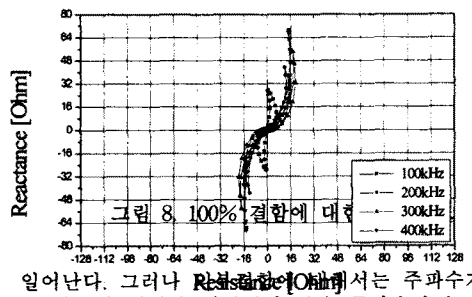
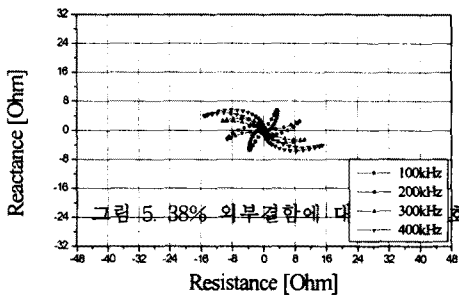
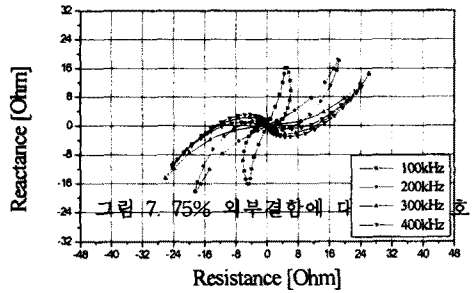
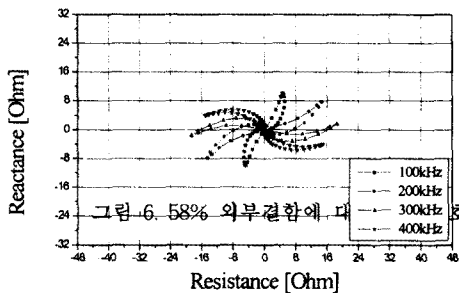


그림 4. 75% 내부결합에 대한 탐상신호



일어난다. 그러나 Reactance [Ohm]에서는 주파수가 높을수록 자속의 침투가 어려워져 낮은 주파수와 높은 주파수에서의 위상 차이가 내부결합에 비해 크게 나타난다. 또한 위상은 주파수의 제곱근에 비례하기 때문에 주파수에 의해서도 위상 변화를 일으킨다.



## 5. 결 론

본 논문에서는 축대칭 결함을 갖는 도체 관에 대하여 주파수 변화에 따른 와전류 탐상 수치해석을 수행하였다. 각각의 결함들은 주파수의 영향을 받는 표피효과로 인해 자속이 도체 내부로 갈수록 크기가 감소하려는 성질과 위상이 변하기 때문에 결함이 코일과 가까이 위치해 있는 내부 표면에 있는 경우 탐상신호가 결함이 파이프의 외부 표면에 있는 경우에 비해 크게 나타나고 위상차는 약간 일어난다. 또한 높은 주파수에서도 결함의 신호가 낮은 주파수에 비해 커짐을 보였다. 따라서 와전류 탐상시험에서 도체의 외부 표면의 상태를 알고 싶으면 낮은 주파수를 이용하여 침투깊이를 크게, 또 내부 표면 근처의 상태를 알고 싶으면 높은 주파수를 사용하여 침투깊이를 작게 할 필요가 있다. 뿐만 아니라 잡음의 요인이 도체 관의 외부 또는 내부에 있을 경우에 다중 주파수를 이용한 탐상시험으로 잡음을 제거하면 탐상신호의 신뢰성을 높일 수 있다고 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] 임 달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1986.
- [2] 이 의중, 와류탐상시험, 도서출판 골드, 1999.
- [3] 이 항범, 김 창욱, 서 장원, 정 태인, "열교환기 전열관에 축대칭 결함에 대한 ECT 유한요소해석" 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 157-168, (2000).

각 결함에 대한 위상을 살펴보면 그림 2에서 그림 8까지의 내부 및 외부결합에 대한 탐상신호에서 동일한 깊이를 갖는 결함에 대해 주파수가 높아짐에 따라 임피던스 궤적이 시계방향으로 회전하는 것을 알 수 있다. 내부와 외부결합에 대한 위상을 자세히 살펴보면 외부결합에 대한 위상의 변화가 내부결합에 비해 크게 일어난다. 와전류는 도체 표면에 균열 등의 불연속이 존재하면 그 크기와 위상이 변하게 된다. 내부결합에서는 코일에서 발생되는 자속들이 결함부위에 직접적으로 영향을 주기 때문에 주파수가 변해도 위상의 차이가 외부결합에 비해 약간 일어난다. 다시 말하면 주파수가 높아지면 자속의 침투깊이는 알아지나 결함이 내부에 존재하여 주파수가 높으나 낮으나 항상 결함부위를 자속들이 침투하기 때문에 주파수가 변해도 위상의 차이가 외부결합에 비해 약간