

와전류센서의 설계 및 특성해석

최 덕 수, 이 향 범
 송실대학교 전기공학과

Design and Characteristics Analysis of Eddy Current Sensor

Duck-su Choi, Hyang-beom Lee
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - 본 논문은 수치해석을 이용하여 와전류 센서의 설계 및 특성을 고찰하였다. 와전류센서의 설계에 있어서 직경 및 폭을 변화시켰다. 와전류센서에 인가되는 주파수와 lift-off, 도전율의 변화에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 와전류센서의 임피던스값을 산출하고 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 살펴 보았다. 수치해석결과, 와전류센서의 폭을 크게 하는 것 보다 직경을 크게 하는 것이 감도가 좋은 특성을 나타냈다. lift-off 효과는 와전류센서와 시험대상 사이의 거리가 작을 수록 감도가 좋았다. 도전율 변화에 따른 특성은 도전율이 증가할수록 임피던스도의 반원의 궤적이 아래로 향하는 것을 알 수 있었다.

류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 하며 표피효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의할 수 있다. 침투깊이는 도체의 투자율, 도전율, 주파수에 관계된다.

본 논문에서는 주파수 및 와전류센서의 크기 및 lift-off 변화, 시험대상의 도전율 변화에 따른 특성을 살펴보기 위해 수치해석을 수행하였다. 와전류센서와 해석대상을 3차원 축대칭으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 통해 주파수 및 직경과 폭 변화에 따른 와전류센서의 임피던스값을 산출하였다. 또한 lift-off와 도전율의 변화에 따른 임피던스값을 산출하였다. 산출된 임피던스값으로 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 살펴 보았다.

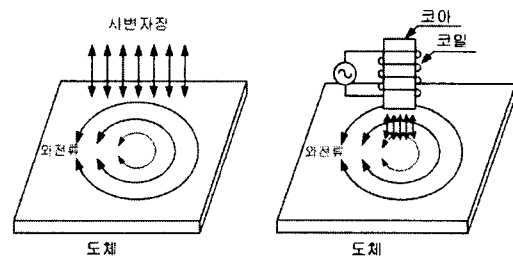
1. 서 론

각종 설비와 구조물에 대한 안전성과 제품에 대한 신뢰성은 항상 요구되어 왔으며 이러한 안전성과 신뢰성은 그 상태를 진단하고 수명을 파악함으로써 평가된다. 여기서 안정성에 대한 진단과 수명을 파악하는데 있어서 가장 효율적인 방법은 비파괴 검사이다. 비파괴 검사는 검사 대상에 손상을 가하거나 파괴하지 않고 대상의 내부와 외부에 존재하는 불연속 혹은 결함을 탐지하거나 검사 대상의 물성을 판단하는 기술이다. 특히 금속과 같이 도전체로 된 제품이나 부품의 표면 상태를 조사하는데 와전류 탐상 방법이 가장 효과적이다. 철강, 비철의 관이나 봉, 선 등에 대하여 고속으로 자동화 하여 생산라인의 전수검사에 유용하다. 또 발전소와 석유 플랜트의 열교환기의 열열관이나 항공기 부품의 정기검사 등의 보수, 보전에 용이하다. 이러한 많은 장점을 가지고 있는 와전류 탐상법은 탐상기와 신호 검출용 센서로 수행되는데 신호 검출용 센서는 시험체에 관한 정보를 검출하기 때문에 시험체의 형상과 검출해야 하는 결함의 크기, 탐상 목적에 따라 와전류 센서의 형태, 종류 특성도 매우 다양하다. 따라서 사용되는 장소나 목적에 따라 적절한 와전류 센서를 적용해야 하므로 그 수요는 상당히 많을 것으로 예상된다. 와전류탐상법은 시험대상과 와전류센서 사이의 거리(lift-off)의 변화에 따라 신호가 변화하므로 이를 이용하여 페인트 등의 막 두께를 측정할 수도 있다. 투자율과 도전율의 변화에 따라 금속 재료의 종류, 합금의 성분, 열처리의 상태, 경도 등을 판별할 수 있다. 와전류 탐상방법에 사용되는 와전류 센서는 시간의 변화에 따라 변화하는 자속을 도체에 가하면 전자기유도현상에 의해 유기전력이 발생한다. 이 유기전력은 렌츠의 법칙에 의해 시간에 따라 변화하는 자장을 방해하는 방향으로 와전류가 흐르게 된다. 도체안에 발생하는 와전

2. 본 론

2.1 와전류탐상 원리

와전류 탐상원리는 그림 1의 (a)와 같이 시간에 따라 변화하는 시변자장을 가하면 전자기유도현상에 의해 도체에 유기전력이 발생하고 이 유기전력은 시변자장을 방해하는 방향으로 유도전류가 발생하게 되는데 이 전류를 와전류라고 한다.



(a) 와전류 발생원리 (b) 와전류탐상
 그림 1. 와전류탐상 원리

이때 도체안에 발생하는 와전류는 도체의 표면에 집중하여 흐르게 되는데 이것을 표피효과라고 한다. 또한 표피효과의 정도를 나타내는 기준을 침투깊이로 정의할 수 있으며 식 (1)과 같다.

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

여기서, f 는 주파수[Hz], σ 는 도전율[S/m], μ 는 투자율[H/m]이다. 침투깊이는 투자율, 도전율, 주파수에 관계된다. 와전류 탐상은 와전류 발생의 원리를 이용해 도체에 결함이나 불연속이 있을 경우 와전류의 변화가 생기고 입력단에 임피던스의 변화가 일어나게 되어 결함의 유무, 크기, 종류 등을 파악할 수 있게 된다.

2.2 유한요소 해석

와전류탐상에 적용되는 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

여기서, \vec{E} 는 전계의 세기[V/m], \vec{H} 는 자계의 세기 [A/m], \vec{B} 는 자속밀도[Wb/m²], \vec{J}_s 는 전 원전류밀도 [A/m²] \vec{J}_e 는 와전류밀도 [A/m²] 이다. 자속밀도와 자계의 세기, 와전류밀도와 전계의 세기 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (6)$$

정현적인 입력만을 취급한다면 식 (1)은 다음과 같다

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (7)$$

자장문제를 풀기 위해서 자기벡터포텐셜 (\vec{A}) 를 구하면 다음과 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_s - j\omega \sigma \vec{A} \quad (8)$$

Helmholtz의 유일성 이론에 따라, 식 (8)에서 유일한 해를 얻기 위하여 다음과 같은 Coulomb's Gauge 조건을 사용한다.

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (9)$$

식 (9)의 게이지조건과 식 (10)의 벡터 항등식을 이용하면 식 (11)와 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} - \sigma j\omega \vec{A} + \vec{J}_s = 0 \quad (11)$$

위의 식 (11)는 와전류탐상의 지배방정식으로, 해석하고자 하는 문제에 이 수식을 적용하고, 경계조건을 대입하여 풀면 된다. 축대칭 문제는 2차원 (r, z) 평면에서 해석이 가능하므로, 자기벡터포텐셜과 전류밀도는 θ 방향의 성분만 존재한다고 볼 수 있다. 따라서 지배방정식 (11)는 축대칭 문제 해석시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \frac{A}{r^2} \right) = -J_s + j\omega \sigma A \quad (12)$$

2.2 해석사례

와전류센서의 특성을 파악하기 위해서 센서의 크기와 주파수를 변화시키고, 시험대상과 와전류센서의 사이의 lift-off와 시험대상의 도전율을 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 그림 2와 같이 해석대상과 와전류센서에 대해 그림 3과 같이 3차원 축대칭으로 모델링하였다. 해석대상은 도전율이 1.39×10⁶[S/m]인 스테인리스강을 사용했다. 주파수는 1[kHz]에서 1[MHz]까지 변화시켰다. 와전류센서와 해석대상과의 lift-off를 0.5[mm]로 하고, 그림 4와 같이 와전류센서의 외경과 내경을 변화시키고, 그림 5와 같이 센서의 폭을 변화시켜 수치해석을 수행하였다. lift-off에 대한 특성을 살펴보기 위해서 lift-off는 0.5[mm], 1.0[mm], 1.5[mm], 2.0[mm], 3.0[mm]로 변화시켰다.

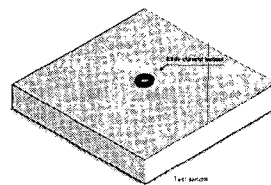


그림 2. 와전류센서와 해석대상

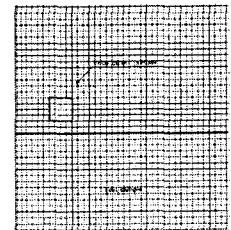


그림 3. 요소망

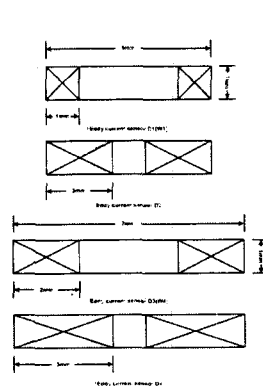


그림 4. 와전류센서 직경변화

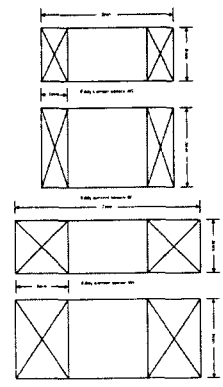


그림 5. 와전류센서 폭변화

시험대상의 도전율은 $1.0 \times 10^{-5}(\text{S/m})$ 에서 $1.0 \times 10^{15}(\text{S/m})$ 로 변화시켜 특성을 살펴보았다. 수치해석은 와전류센서가 해석대상이 없이 공기중에 있을 때 수행하여 리액턴스 값을 산출하고 wL_0 로 나타내었다. 와전류센서와 해석대상이 lift-off의 거리를 가지고 있을 때, 주파수를 변화하여 저항(R) 및 리액턴스(wL) 값을 산출하여 정규화 임피던스도를 그려 와전류센서의 특성을 파악하였다. 수치해석 결과, 그림 6과 같이 주파수 및 외경, 내경 변화에 따른 특성은 주파수의 증가에 따라 반원의 궤적은 아래로 향하고 있으며, 직경의 변화에 있어서 외경의 길이 긴 D3과 D4가 D1 및 D2보다 반원의 궤적이 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 내경 길이가 커짐에 따라 반원 궤적의 크기는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 와전류센서의 폭 변화에 따른 특성은 폭이 가장 작은 와전류센서 W4가 가장 큰 궤적을 그리고 있으며, 폭의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 작아 진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 와전류센서의 특성은 폭 길이를 길게 하는 것보다 외경의 길이를 더 길게 하는 것이 더 좋은 특성을 나타내며, knee position 부근에서 주파수를 선정함으로써 감도가 좋은 센서를 설계할 수 있다. 그림 7은 lift-off 변화에 따른 와전류센서의 특성을 나타냈다. lift-off가 0.5(mm)에서 반원이 가장 크고, lift-off가 증가할수록 반원이 점점 작아진다는 것을 알 수 있다. 따라서, lift-off가 가장 작은 0.5(mm)에서 감도가 가장 좋다는 것을 알 수 있다. 주파수를 고정하고 도전율의 변화에 따른 특성은 그림 8에 나타냈다. 도전율이 증가할수록 반원의 궤적이 아래로 향하는 특성을 보이고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 이용하여 와전류센서의 특성을 해석하였다. 와전류센서와 해석대상을 3차원 축대칭으로 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 와전류센서의 주파수 및 직경변화에 따른 특성은 주파수의 증가에 따라 임피던스 궤적은 아래로 향하는 궤적을 그리고 있으며, 와전류센서의 직경의 변화에 있어서 외경의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 커지지만 내경 길이가 커짐에 따라 반원 궤적의 크기는 거의 변화가 없다는 것을 알 수 있다. 와전류센서의 폭 변화에 따른 특성은 폭의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 작아 진다는 것을 알 수 있다. 따라서, 반원의 궤적이 커짐에 따라 센서의 감도가 좋아짐으로 와전류센서의 설계에 있어서 주파수는 knee position 부근에서 주파수를 선정하고 센서의 폭 변화보다는 외경의 길이를 길게 함으로써 감도가 좋은 와전류센서를 설계할 수 있다. lift-off의 변화에 따른 특성은 lift-off가 작을수록 감도가 좋다. 따라서 와전류탐상 검사에 있어서 와전류센서를 시험대상과 완전히 밀착하여 검사함으로써 잡음이나 진동에 의한 잘못된 신호를 배제할 수 있다. 시험대상의 도전율의 변화에 의해 금속재료의 종류, 합금 성분, 열처리 상태, 경도 등 제품의 품질관리에 이용될 수 있다.

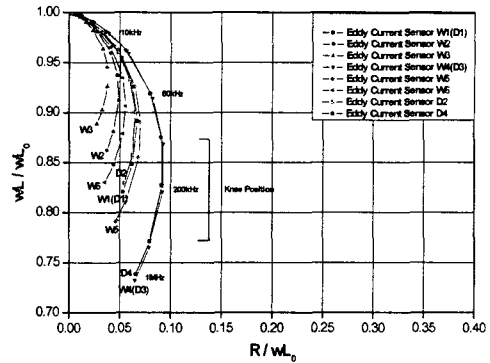


그림 6. 와전류센서의 직경 및 폭 변화에 따른 정규화 임피던스도

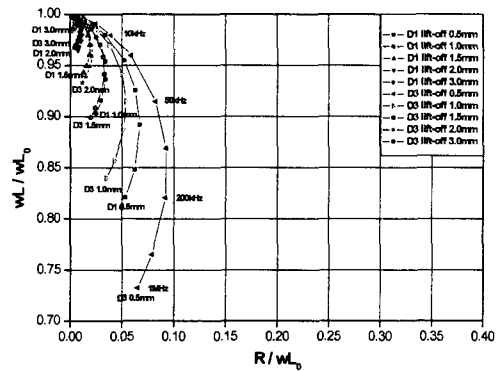


그림 7. lift-off 변화에 따른 정규화 임피던스도

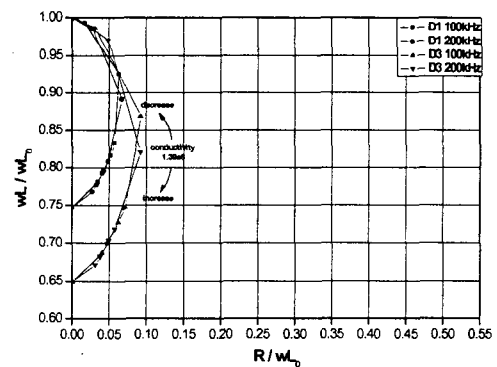


그림 8. 도전율 변화에 따른 정규화 임피던스도

(참 고 문 헌)

- [1] Daniel Ioan, Mihai Rebican, "Numerical Model for Eddy-Current Testing of Ferromagnetic Steel Parts", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.38, No.2, March 2002.
- [2] Kofi D. Anim-Ampiah, Sedki M. Riad, "Analysis and Design of Ferrite Cores for Eddy-Current-Killed Oscillator Inductive Proximity Sensors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 3, May 1997.