

## 와전류를 이용한 교류전위강하법의 전자기적 해석

임건규, 이항범  
 송실대학교 전기공학부

### Electromagnetic Analysis of ACPD Method Using Eddy Current Induction

Geon-gyu Lim, Hyang-Beom Lee  
 School of Electrical Engineering, Soong Sil University

**Abstract** - 와전류를 이용한 전위강하법은 시험체에 와전류를 비접촉식으로 발생 시킬 수 있어 기존의 방식에 비해 결합 검출시 발생하는 오차를 줄일 수 있고 물체의 결합 검출신호의 신뢰성을 향상 시킬 수 있다. 본 논문에서는 와전류를 이용한 전위강하법의 전자기 유한요소 해석을 수행하였다. 3차원 유한요소해석과정에서 해석시간을 단축시키기 위해 각 영역별로 MVP, ESP, RMSP, TMSP의 미지수 변수를 부여하여 유한요소해석을 수행하였다. 기존의 전위강하법에 와전류의 개념을 적용하기 위해서 결합의 깊이와 주파수에 대한 영향을 검토하였다. 정확한 결합검출을 위해 검사과정을 초기검사와 정밀검사로 나누어서 실시하여 결합의 위치를 ±2[mm]까지 도출해 낼 수 있었으며 결합의 폭과 크기도 어느 정도 추측해 낼 수 있었다.

#### 1. 서 론

고도의 산업화와 경제가 성장하면서 각종 설비와 구조물에 대한 높은 안전성과 신뢰도가 요구되면서 진단과 수명을 파악하는 여러 가지 기술이 개발되었다. 그중 비파괴 검사는 검사대상에 손상을 가하지 않고 대상에 존재하는 결함이나 검사대상의 특성을 파악하는 기술이다. 이중 도전성 물체를 검사하는데 와전류를 이용한 검사방법이 가장 효과적이다. 철강제품이나, 금속관, 발전소, 항공기 부품, 석유에너지 수송관등에 대하여 결함이나 물체의 균일함을 고속으로 검사하는데 와전류를 이용한 검사방법이 많이 사용된다. 다양한 분야에 이용되는 와전류는 센서코일에 시간에 따라 변화하는 교류 전류를 인가해주면 코일의 주위에 시변 자장이 발생하게 되고 이 시변자장 내에 도체가 존재하게 되면 전자기 유도 현상 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 의해서 도체내부에 유기기전력이 발생한다. 이 유기기전력은 렌츠의 법칙에 따라 시변자장을 방해하는 전류가 흐르게 되는데 이 전류를 와전류라고 한다. 이 와전류는 다시 센서코일에 영향을 주게 되는데 이 성분을 분석해서 결합측정이나 물체의 특성등을 검사하게 된다. 전위강하법(Potential Drop ; PD)은 검사 대상의 표면에 직접 직류전류(DC)또는 교류전류(AC)를 인가해 주고 표면에 측정 단자를 접촉시켜 단자 사이에 전위를 측정해서 결합을 측정하는 방법과 AC센서를 이용해서 도체 표면에 발생하는 유도전류를 이용해 측정 단자 사이에 전위를 측정하는 방식이 있다. 전위강하법은 검사장비가 간단하고 숙련도가 필요하지 않다. 그러나 검사대상 표면에 직접 전류를 인가해 주는 방식은 표면 상태나 이동에 따라 인가전류가 다르게 되고, 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 이에 와전류를 이용한 ACPD방법을 분석하기 위해 수치해석을 통해서 결과를 고찰하였다. 문제에 대한 수치해석을 수행하기 위해 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식으로 원리를 설명할 수 있는 지배 방정식을 유도 하였고, 모델을 해석하는데 사용된 미지수 변수로는 자기벡터포텐셜(Magnetic Vector Potential ; MVP)  $A$  및 전기스칼라포텐셜(Electric Scalar Potential ; ESP)  $V$ , 리듀스드자기스칼라포텐셜(Reduced Magnetic Scalar Potential ; RMSP)  $\Phi$ , 토탈자기스칼라포텐셜(Total Magnetic Scalar Potential ; TMSP)  $\psi$ 를 사용하여 해석하였다

#### 2. 본 론

##### 2.1 문제 해석을 위한 맥스웰방정식

와전류는 코일에 시간에 따라 변화하는 교류 전류를 인가해주면 코일의 주위에 시변 자장이 발생하게 되고 이 시변자장 내에 도체가 존재하게 되면 전자기 유도 현상 즉 패러데이 법칙(Faraday's Law)에 의해서 도체내에 유기기전력이 발생한다. 이 유기기전력은 렌츠의 법칙(Lenz's Law)에 따라 시변자장을 방해하는 전류가 흐르게 되는데 이를 와전류라 한다. 와전류를 이용한 교류전위강하법(ACPD)을 해석하기 위해서는 전자기적 접근이 필요하다. 해석을 위해 변위전류를 무시한 맥스웰 방정식을 이용하여 구하였으며 아래와 같다.

$$\nabla \times H = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad \dots \dots \dots (1)$$

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

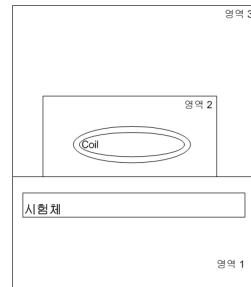
$$\nabla \cdot B = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad \dots \dots \dots (4)$$

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

##### 2.2 각 영역별 유한요소해석을 위한 지배방정식

3차원 문제를 해석하는 경우 미지수를 줄이기 위하여 영역별 해석이 필요하게 된다. 도체가 존재하여 와전류( $\vec{J}_e$ )가 유기되는 영역과 외부에 전류원 즉 전원전류( $\vec{J}_s$ )가 존재하는 영역 와전류( $\vec{J}_e$ )와 전원전류( $\vec{J}_s$ ) 두 개가 존재하지 않는 영역 3가지로 구분할 수 있다. 정식화 과정에서 해의 유일성을 보장하기 위하여 지배방정식에 인위적으로 불통계이지 조건을 집어넣게 된다. 조건을 사용하여 각 영역별로 지배 방정식을 정리하면 아래와 같다.



<그림 1> 영역설정

##### 2.2.1 와전류( $\vec{J}_e$ )가 흐르는 영역 1

MVP와 ESP를 사용하여 지배방정식을 유도하면

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad \dots \dots \dots (7)$$

이 된다.

##### 2.2.2 외부에 전원전류( $\vec{J}_s$ )가 존재하는 영역 2

RMSP를 사용하여 지배방정식을 유도하면

$$\mu \nabla^2 \Phi = \mu \nabla \cdot \vec{H}_s \quad \dots \dots \dots (8)$$

이 된다.

##### 2.2.3 전원전류( $\vec{J}_s$ )와 와전류( $\vec{J}_e$ )가 존재하지 않는 영역 3

TMSP를 이용하여 지배방정식을 유도하면

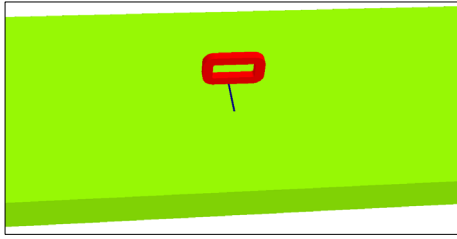
$$\nabla \cdot \mu \nabla \Psi = 0 \quad \dots \dots \dots (9)$$

이 된다.

#### 2.3 ACPD 문제 해석

##### 2.3.1 해석을 위한 모델 제한

본 논문에서는 전자기 유한요소 수치해석방법으로 모델을 해석하였다. 시험체의 재질은 원자력발전소 증기발생기 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600로 하였으며, 결합깊이 2, 4, 6, 10[mm] 4가지 결합에 대하여 각각 시험주파수를 3[kHz]와 30[kHz]로 선정하여 모델을 해석하였다. 센서코일의 종류는 Racetrack을 사용하여 센서에서 발생하는 자속의 영향이 시험체면에 최대한 균일하게 작용할 수 있도록 선정하였다. 시험주파수에 대한 침투깊이는 각 8.76, 2.77[mm]이며, 검사대상과 센서코일의 간격은 10[mm]로 하였다.



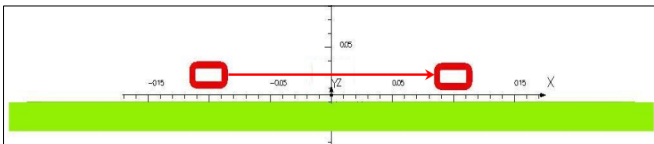
〈그림 2〉 해석 모델

〈표 1〉 해석 모델의 물질상수

| Coil     | Type        | Current [A]        | Frequency [kHz]       | Size [mm]       |
|----------|-------------|--------------------|-----------------------|-----------------|
|          |             | Racetrack          | 2                     | 3, 30           |
| Specimen | Material    | Conductivity [S/m] | Relative Permeability | Size [mm]       |
|          | Inconel 600 | 1.1E6              | 1                     | 500*20*150      |
| Defect   | Size [mm]   | X [mm]             |                       | Skin Depth [mm] |
|          | 1*X*30      | 2, 4, 6, 10        |                       | 8.76, 2.77      |

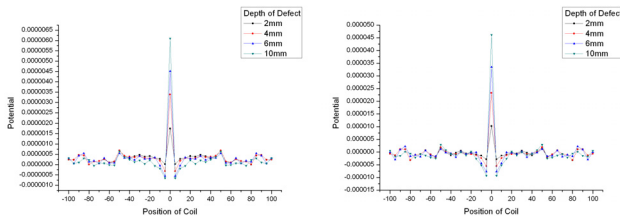
### 2.3.2 모델 해석

#### 2.3.2.1 초기검사



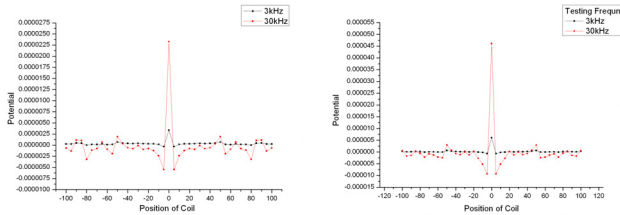
〈그림 3〉 초기검사

모델의 해석방법은 각 5[mm] 간격으로 -100 ~ 100[mm]까지 41단계로 센서코일을 이동시키면서 결함검출을 위한 초기검사를 수행하였다. Potential값의 측정은 센서코일의 중심을 기준으로 간격은 4[mm]로 측정하였다.



(a) 시험주파수 3[kHz]

(b) 시험주파수 30[kHz]



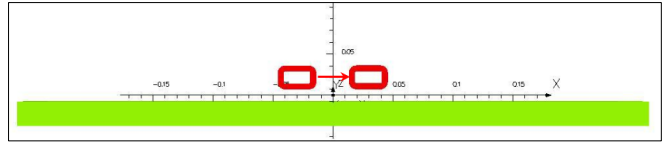
(c) 결함깊이 4[mm]

(d) 결함깊이 10[mm]

〈그림 4〉 Potential 그래프

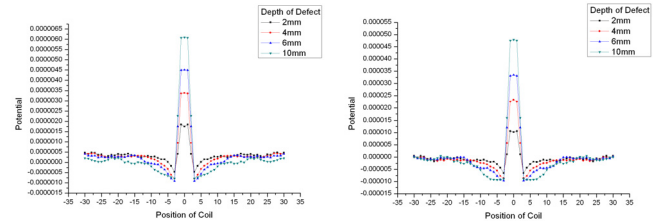
〈그림 4〉에서 보이는 것과 같이 시험체의 결함부위에서 물체의 불연속으로 인해 Potential 값이 급격히 증가하였는데, 그 값은 결함의 깊이가 증가 할수록 〈그림 4〉의 (a) ~ (b)와 시험주파수의 크기가 증가할수록 〈그림 4〉의 (c) ~ (d) 결함 부위에서 그 결과 값이 증가한다. 이는 주파수에 따른 포피효과 때문인데 주파수가 높을 경우 침투깊이가 낮아져 Potential값이 표면에 집중되기 때문이다. 초기검사 수행 후 결함이 있는 부분에 대하여 코일의 이동간격을 작게 하여 정밀검사를 수행하였다.

#### 2.3.2.2 정밀검사



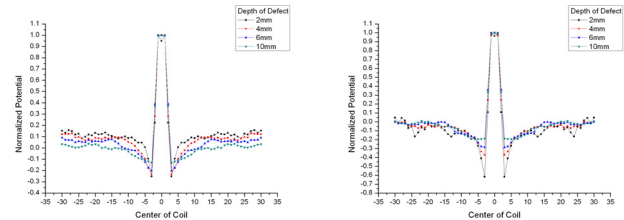
〈그림 4〉 정밀검사

초기검사에서 결함 의심부위에 대해 각 1[mm]간격으로 -30 ~ 30[mm]까지 61단계로 이동하면서 정밀검사를 수행하였다. 이때 해석조건은 초기검사상태와 동일하게 수행하였다.



(a) 시험주파수 3[kHz]

(b) 시험주파수 30[kHz]



(c) 3[kHz] Normalize

(d) 30[kHz] Normalize

〈그림 5〉 Potential 그래프

이 결과 센서코일이 결함을 지날 때 Potential값이 가장 크게 측정되는 것을 볼 수 있었으며 그 값은 〈그림 5〉(a) ~ (b)에서 보이는 것과 같이 결함깊이 2 → 10[mm]의 순서로 선형적으로 그 값이 증가되었다. 측정 Potential값을 Normalize하면 〈그림 5〉(c) ~ (d)에서 알 수 있듯이 결함 깊이에 따른 Potential 패턴을 쉽게 비교 및 분석할 수 있다. 정밀검사 수행으로 결함의 위치와 폭, 깊이를 어느 정도 추측해 낼 수 있었다.

### 3. 결론

본 논문에서는 와전류를 이용한 ACPD를 해석해 보았다. 해석방법은 전자기 유한요소해석을 통해서 이루어 졌으며 맥스웰 방정식과 각 영역별로 미지수 변수 MVP, ESP, RMSP, TMSP를 사용하여 해석해 보았다. 분석결과 결함의 깊이와 시험주파수에 따라 Potential 값이 다르게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 결함의 위치를 ±2[mm] 범위까지 예상할 수 있었으며 어느 정도 결함의 크기도 예측할 수 있었다. 또한 측정된 Potential값을 Normalize해서 비교해본 결과 시험주파수로 계산한 침투깊이가 결함의 깊이보다 깊을 경우 결함부근에서 Potential 값의 기울기가 결함깊이가 깊을수록 작았으며, 침투깊이가 결함의 깊이보다 적을 경우 결함부근에서 Potential 최소값이 결함이 깊을수록 작았다. 본 논문에서의 연구결과 와전류를 이용하여 ACPD법을 시행할 경우 데이터 처리과정과 실험 장비를 단순화 시킬수 있어 결함을 측정을 손쉽게 할 수 있을 것이라 예상된다. 그러나 실제 현장에서 적용할 경우 ACPD의 경우 검사대상의 표면에서 직접 Potential값을 측정해야 하므로 측정부에서 발생하는 오차와 표면의 매끄러움 정도에 따라서 발생하는 오차를 수정해야 한다는 문제를 해결해야 할 것이다.

#### [참고 문헌]

- [1] 이항범 "3차원 와전류 문제의 유한요소해석에서 쿨롱계이지조건과 전류 연속조건 의 영향" 대한전기학회, Vol. 54B-10-5, 2005.
- [2] Fracture and Reliability Research Institute, Tohoku University, "Inspection procedure for PINC RRTs using Mid-thickness DMW specimens by means of Induced Current Potential Drop technique", 2006
- [3] 기초전력공학공동연구소, "유한요소법에 의한 전기기기의 전자계해석", 2003.