

유한요소법을 이용한 결함 진단용 와전류 탐침 코일의 특성 비교

문호영, 김창업, 고희환
호서대학교 전기공학과

Comparison of Eddy Current Testing Probes for Detecting Flaws by Using Finite Element Method

Ho-Young Mun, Chang-Eod kim, Hyoung-Hwan Ko
Department of Electrical Engineering, Hoseo University

Abstract - 본 논문은 3D 타원형 결함을 가진 알루미늄 판에 대하여 와전류 탐상 프로브 중 Impedance, T/R, T/T 프로브를 설계하여 결함에서의 특성을 파악하였다. 특성 파악을 위해 세 가지의 결함에 대하여 프로브 코일 임피던스의 실수, 허수 변화에 따른 와전류 센서의 특성을 비교하였다.

1. 서 론

비파괴 검사는 탐상 시험과 재질시험, 안전성 진단 등 그 상태를 진단하고 파악하는데 있어서 가장 효율적인 방법이다. 특히 금속으로 이루어진 표면 상태의 이상 유무를 확인하는 방법에는 와전류 탐상 방법(Eddy Current Test ; ECT)이 효과적이다. 이러한 와전류 탐상의 프로브는 Impedance 프로브, T/R 프로브, T/T 프로브 등 여러 가지 종류가 있다. 와전류 탐상법의 사용법위가 점차 확대되는 만큼 와전류 프로브의 종류에 따른 특성을 비교 분석할 필요가 있다. 본 논문은 와전류 탐상 검사에서 결함 검출에 사용되는 프로브 중 Impedance, T/R, T/T 프로브 등의 결함 검출 특성을 파악하고자 코일 센서를 모델링 한 후 유한요소법을 통하여 결함에 프로브 코일 임피던스의 실수 및 허수 변화를 비교하여 와전류 센서의 특성을 살펴보았다.

2. 본 론

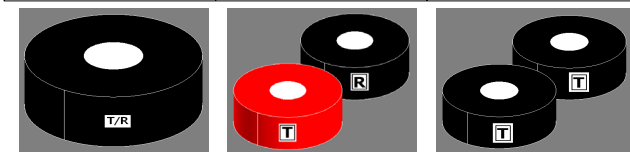
2.1 와전류탐상의 원리

코일의 시변 자장이 피검사체에 인가되면 도체 내에 유기기전력이 발생한다. 이 유기기전력이 시변 자장을 방해하는 방향으로 와전류가 발생하여 새로운 시변 자장이 생성되고, 두 시변자장의 합성은 코일에 쇄교되는 총 자장을 결정하게 된다. 따라서 총 자장은 전류의 흐름을 변하게 하여 프로브 코일의 임피던스를 변화시킨다. 임피던스 변화는 검사할 도체 내부의 결함과 상태 위치들을 파악할 수 있는 중요한 요소가 된다. 이것이 와전류 탐상의 원리이다. 와전류 프로브는 자장을 발생시켜 와전류를 유기기키는 Transmit 코일과 발생한 자장을 검출하여 결함 유무의 신호를 받아들이는 Receive 코일로 나눌 수 있다.

Impedance 프로브는 Transmit/Receive의 역할을 하나의 코일이 담당하고, T/R 프로브는 Transmit/Receive 역할을 분리하는 상호유도형이다. T/T 프로브는 두 개의 Transmit coil로 구성되어 코일간의 임피던스 변화 차로 결함을 파악하는 방식이다. 와전류 프로브 모델은 그림 1과 같이 구성되고 각 coil의 역할은 표 1과 같다[1][2].

<표 1> 와전류 프로브 세 종류

Probe 종류	Coil 형태	Coil 역할
Impedance Probe	Bobbin coil	Transmit/Receive
	Bobbin coil	Transmit/Receive
T/R Probe	Bobbin coil	Transmit
	Bobbin coil	Receive
T/T Probe	Bobbin coil	Transmit
	Bobbin coil	Receive



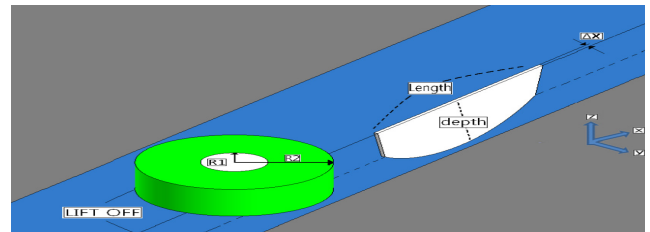
(a) Impedance Probe (b) T/R Probe (c) T/T Probe
<그림 1> 와전류 프로브 모델

2.2 해석 방법의 타당성 검증 해석

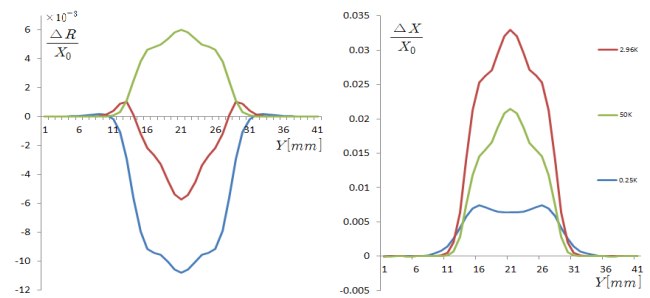
해석 방법의 타당성을 검증하기 위해 기존에 발표된 자료를 토대로 재해석하였다[3]. 도전율은 22.5 MS/m인 판을 사용하였고 Bobbin coil과 결함에 대한 수치는 표 2와 같고 해석 모델은 그림 2와 같이 3D 모델링을 하였다. 해석에 사용된 결함은 타원형 결함이라 하고, 결함의 유무 확인 방법은 Impedance 프로브가 x축으로 일정하게 이동하면서 임피던스의 변화를 유출하여 결함의 유무를 파악하도록 하였다.

<표 2> 비파괴 검사 모델 수치 [mm]

Coil		결함	
R1	1.5	ΔX	0.33
R2	7.5	depth	8.61
Lift off	0.5	Length	22.1
Turn		4000 턴	
L ₀		100.47 mH	



<그림 2> 비파괴 검사 모델



<그림 3> 결함에서의 임피던스 변화(flux 해석)

결함에서의 임피던스 변화는 그림 3과 같이 결함 부근에서 크게 증가하거나 감소한다. 그림 3의 수치와 모양이 기존에 발표된 내용과 거의 동일하다는 것을 확인했다. 본 논문에서 사용한 비파괴 검사방법을 이용하여 프로브의 종류의 특성 해석을 하고자 한다.

2.3 와전류 프로브 세 종류의 특성 비교

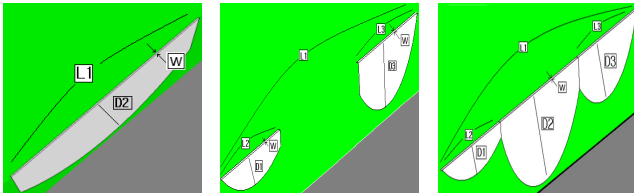
해석 대상으로는 도전율 33.445 MS/m을 가지는 알루미늄 판을 사용하였다. 프로브들의 특성 파악을 위해 사용된 결함은 타원형 결함으로 세 가지 종류로 나뉘며 결함의 크기 및 형상은 표 3 및 그림 4와 같다.

와전류 프로브의 각 Bobbin coil의 크기는 동일하고 사양은 표 4에 나타내었다. T/R, T/T 프로브의 Bobbin coil 간의 간격은 0.8 mm이고, Lift off는 0.45 mm이다. 프로브가 일정하게 x 축 방향으로 이동하면서 해석하도록 하였다[4]. 와전류 프로브의 주파수 선정은 결함 A 중앙에서 Impedance 프로브의 $\Delta V_L/V_L$ 가 상대적으로 큰 8.57 kHz에서 수행하였다. 그림 5는 타원형 결함 A의 모델링에 T/T 프로브를 사용한 해석

모델이다. 각 결함이 들어간 모델에 세 종류의 프로브를 각각 x축으로 일정하게 이동하면서 임피던스 변화를 유출하여 결함의 유무를 파악하였다.

〈표 3〉 결함 모델 수치 [mm]

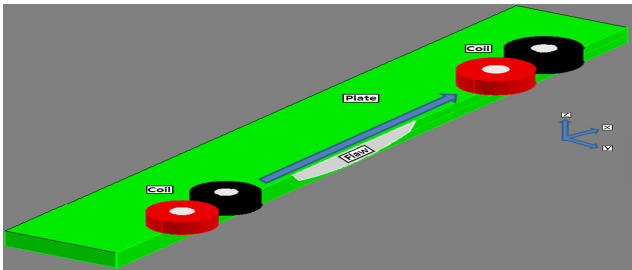
결함 A		결함 B		결함 C	
W(폭)	0.1	W(폭)	0.1	W(폭)	0.1
D1 깊이	-	D1 깊이	1	D1 깊이	1
D2 깊이	3	D2 깊이	-	D2 깊이	3
D3 깊이	-	D3 깊이	2	D3 깊이	2
L1 길이	20	L1 길이	20	L1 길이	20
L2 길이	-	L2 길이	6	L2 길이	6
L3 길이	-	L3 길이	6	L3 길이 </td <td>6</td>	6



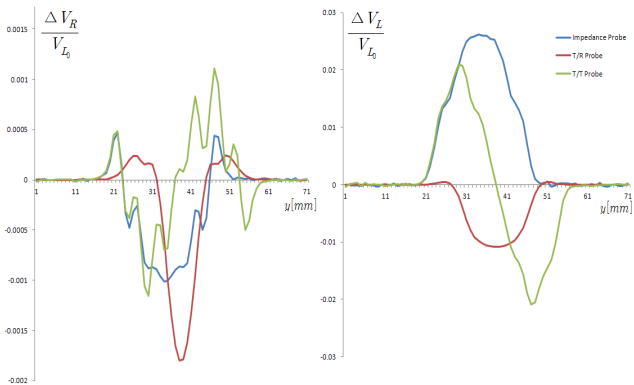
〈그림 4〉 3D 타원형 결함 모델

〈표 4〉 Bobbin Coil 수치 [mm]

Coil	R1	R2	Lift off	턴 수	L ₀
Bobbin coil	1.2	3.6	0.45	80 턴	24.65 μH



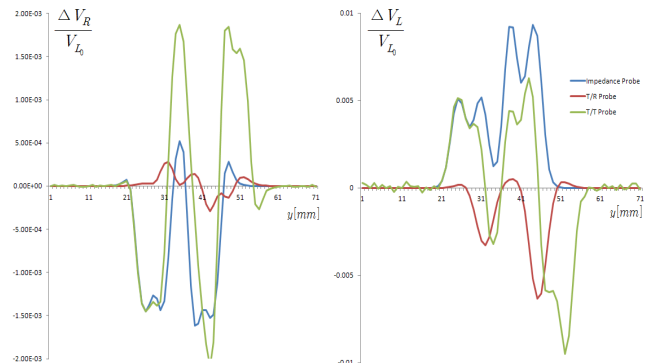
〈그림 5〉 해석 모델



〈그림 6〉 결함 A에 대한 프로브의 실수, 허수 전압 특성 비교

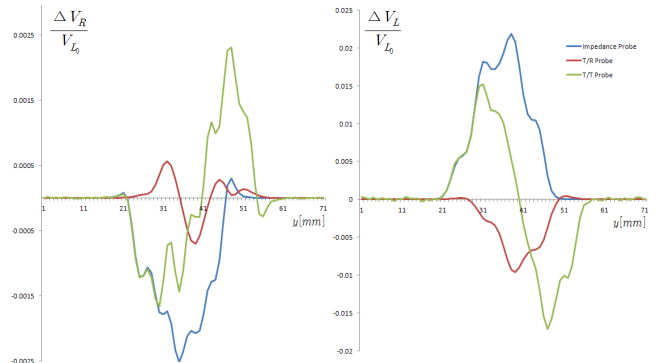
그림 6은 결함 A에서의 Impedance, T/R, T/T 프로브를 동일한 위치에서부터 x축 방향으로 이동을 하면서 결함에 의해 코일의 임피던스 변화를 감지한 그래프이다. Impedance, T/T 프로브는 결함에 가까워질수록 임피던스 변화가 비슷한 특성을 보이지만, 결함 중간부분을 통과하면서 T/T 프로브의 특성에 의해 확인한 차이를 보여준다. T/T 프로브는 각 코일의 임피던스 차이로 결함을 확인하므로 결함에 가까워지면 코일 간의 임피던스 차이가 커지게 되고 프로브가 결함의 정중앙에 이르게 되면 각 코일의 임피던스는 같아지게 되므로 임피던스 차이는 0이 된다. T/T 프로브는 결함의 중앙을 지나면 결함의 중심으로 대칭이 되는 임피던스 변화가 보인다. Impedance, T/R 프로

브의 허수전압 파형에서는 결함 부위에서 신호 전압의 뚜렷한 변화를 볼 수 있다.



〈그림 7〉 결함 B에 대한 프로브의 실수, 허수 전압 특성 비교

그림 7은 결함 B에서의 각 프로브 코일 임피던스 변화를 나타낸 것이다. Impedance 프로브의 중심이 결함의 중앙에 위치를 하면 T/R 프로브와 달리 감소하게 되어 M자 형식의 임피던스 변화를 볼 수 있다.



〈그림 8〉 결함 C에 대한 프로브의 실수, 허수 전압 특성 비교

그림 8은 결함 C에서의 각 프로브 코일 임피던스 변화를 나타낸 것이다. T/T 프로브는 깊이가 다른 연속적인 결함에서의 특성이 단일 결함에서의 특성 반응과 다르다는 것을 알 수 있다. 2개의 Transmit coil 간의 임피던스 변화 차로 결함의 유무를 확인하기 때문에 깊이가 다른 연속적인 결함에서는 단일 결함 검출과 다른 변화를 보여주고 있다.

3. 결 론

와전류 프로브의 타원형 결함에 대한 임피던스 실수, 허수 전압의 변화에 대한 특성을 비교하였다. T/R 프로브는 Impedance 프로브 보다 임피던스 허수부 변화가 작지만 결함 깊이에 따른 임피던스 변화가 잘 나타내어진다. T/T 프로브는 결함 C에서의 임피던스 변화처럼 깊이가 다른 연속적인 결함 신호해석에 어려움이 있다. Impedance 프로브는 동일한 길이의 결함에서 시작과 끝의 임피던스 변화가 비슷하게 발생하게 되고 본 논문의 결함에서의 임피던스 변화가 가장 좋다. 향후 와전류 프로브의 제작 및 성능 향상 연구 자료로 사용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Zheng, "Three-dimensional eddy current analysis by the boundary element method", IEEE Trans on Magnetics, vol. 33 no. 2, pp. 1354-1357, 1997.
- [2] Palanisamy, R. and W. Lord, "Prediction of Eddy Current Probe Signal Trajectories", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 16, no. 5, pp. 1083-1085, 1980.
- [3] Theodoros Theodoulidis, "Developments in efficiently modelling eddy current testing narrow cracks", NDT&E International 43, pp. 591-598, 2010.
- [4] 이항범, 원성연, 신영길 "3차원 관결함에 대한 와전류탐상의 유한요소해석", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 20, no. 3, pp. 191-199, 2000.