

와전류탐상을 위한 PC 프로브의 특성해석 및 설계

김 용 택, 이 향 범
 송실대학교 전기공학과

Characteristic Analysis and Design of PC Probe for Eddy Current Testing

Yong Taek Kim, and Hyang-beom Lee
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - In this paper, characteristic analysis of PC(Pancake Coil) probe with the size variation is presented for eddy current testing. Characteristics of probe are numerically calculated by using the finite element method. From the numerical analysis, the optimum frequency and groups for an experiment are selected. Probes are made and experiment is performed. From the experimental results, the probe shows maximum sensitivity when the size of defect is equal to the size of probe and when the inside diameter is similar to the width of probe and when the height is low. The result can be helpful to the standard of design of PC probe for eddy current testing.

1. 서 론

현재 우리는 각종 구조물과 제품에 대한 안전성이 강조되는 시대에 살고 있다. 안전성은 설계에서부터 공정, 설치, 관리에까지 모든 분야에서 중요하게 고려되고 있으며, 다양한 검사방법을 이용하여 안정성을 향상 시키고 있다. 이러한 검사방법 중에서 비파괴검사는 각종 설비의 손실을 최대한 줄이며 안정성을 검사할 수 있는 가장 효율적인 검사방법으로 제시된다. 비파괴검사는 검사 대상에 손실을 가하거나 파괴하지 않고 내부 및 외부에 대한 구조적 결함을 탐지하며 물질에 대한 특성을 판단할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 가지는 비파괴검사는 공정과정의 품질관리나 설비의 안전관리에 활용되고 있다.

특히 금속제와 같은 도전율이 우수한 재료를 검사할 때는 비파괴검사 중에서 와전류탐상법이 가장 효과적이다. 와전류탐상법은 발전소의 열교환기나 항공기의 부품 등의 정기점검에서 철강 및 비철의 관검사, 전력선검사, 자동화된 생산라인의 전수검사까지 다양한 영역에서 사용된다. 와전류탐상법은 탐상기와 와전류센서로 구성되어 있고, 와전류센서는 검사대상의 형태, 검사시간, 검사형식에 따라 내삽코일, 표면코일, 관통코일로 구분하여 사용된다. 매설된 관이나 원자력발전소 열교환기 세관과 같은 외관에서의 결함검사가 용이하지 않은 관검사에서는 내삽코일이 일반적으로 사용되며 내삽코일은 PC(Pancake Coil)프로브와 보빈(Bobin)프로브로 구분된다. 보빈 프로브는 빠른 검사속도를 가지고 있으나 관의 축방향 결함만 검사가 가능하기 때문에 다양한 결함을 정밀하게 감지하기 위해서는 PC 프로브의 사용이 불가피하다.

따라서, 본 논문에서는 PC 프로브의 특성을 알아보았다. PC 프로브의 외경, 폭, 높이의 변화에 따른 다양한 형태의 모델을 결정하고 유한요소법을 이용한 수치해석프로그램을 사용하여 특성을 해석하였다. 이를 통해 최적구동주파수를 선정하고 제작할 PC 프로브의 실험군을 선정하였다. 또한 선정된 실험군을 통해 실험을 실시

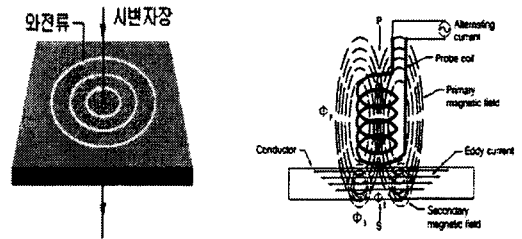
하여 결함에 따른 특성을 고찰함으로써 PC 프로브의 설계에 대한 기준을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 와전류탐상법

금속제와 같은 도전율이 우수한 도체에 시간에 따라 변화하는 자속(시변자장)을 인가하면 도체 내부에 와전류가 발생된다. 그림 1.(a)는 와전류가 유도되는 현상을 보여 주고 있다. 발생한 와전류는 도체내의 결함이나 불균일한 부분에서 변화하게 된다. 이러한 와전류의 변화를 이용하여 도체의 내부를 검사하는 방법이 와전류탐상법이다.

그림 1.(b)와 같이 코일에 교류전류가 흐르면 코일주변에 시변자장이 발생한다. 이 시변자장 내에 도체를 가져가면 전자기유도현상에 의해 유기기전력이 발생하고 렌츠에 법칙에 따라 시변자장을 방해하는 방향으로 와전류가 발생한다. 발생한 와전류에 의해 새로운 시변자장이 생성되고 두 종류의 시변자장의 합성에 의해 코일에 채워지는 총자장이 결정된다. 총자장은 입력단의 전류의 흐름을 변화게 하여 코일의 임피던스변화의 원인이 된다. 이 코일의 임피던스변화는 검사할 도체의 내부의 구조적 결함이나 재질, 상태, 위치들을 파악할 수 있는 중요한 요소가 된다.



(a) 와전류의 유도 (b) 와전류에 의한 자장의 변화

그림 1. 와전류탐상법의 원리

2.2 PC 프로브의 수치해석

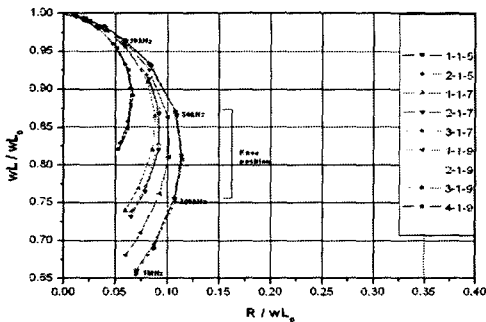
PC 프로브의 제작을 위해서 우선적으로 와전류에 의해 변하는 코일의 임피던스에 대한 수치해석이 필요하다. 모델이 단순한 경우에는 해석적인 해로 해결 가능하나 PC 프로브와 같은 모델에서는 수치해석방법이 요구된다. 수치해석방법으로는 유한요소법(FEM), 유한차분법(FDM), 경계요소법(BEM)등이 있지만 해석영역의 구분이 쉽고 해석할 행렬의 성밀도가 높다는 장점을 가진 유한요소법을 사용한 수치해석프로그램을 사용하였다.

2.2.1 수치해석방법

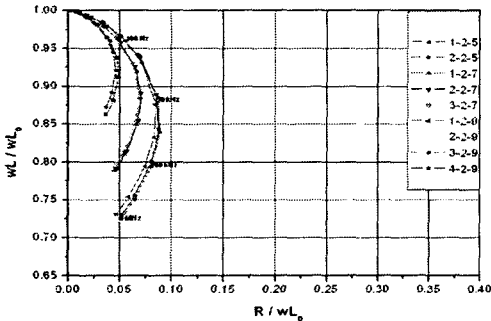
수치해석방법에서는 유한요소법을 이용한 2차원 축대칭 방법을 사용하여 모델링 하였다. 검사대상은 도전율이 $1.39 \times 10^6 [S/m]$ 인 지로칼로이-2(Zircaloy-2)를 사용하였다. PC 프로브의 외경은 5[mm], 7[mm], 9[mm]로, 높이는 1[mm], 2[mm], 3[mm]로 변화하고 폭은 1[mm] 단위로 변화시키면서 수치해석을 하였다. 모델링된 PC 프로브의 번호는 폭-높이-외경의 순서로 지정하였고 크기의 단위는 mm단위를 사용하였다. 주파수는 1[kHz]에서 1[MHz]까지 변화시켰고 지로칼로이-2와 PC 프로브사이의 리프트오프(Lift-Off)는 0.5[mm]로 결정하였다. 수치해석을 통해 임피던스를 계산하고 정규화 임피던스도를 그려 특성을 해석했다.

2.2.2 수치해석 결과

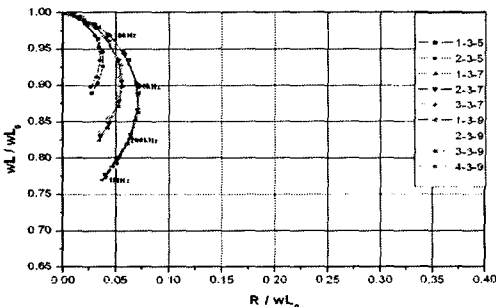
수치해석을 통해 그림 2와 같이 PC 프로브의 정규화 임피던스도를 구하였다. 정규화 임피던스도는 주파수의 증가에 따라 임피던스 궤적은 아래로 향하는 반원의 궤적을 나타내고 있다.



(a) 폭의 길이가 1[mm]일 때



(b) 폭의 길이가 2[mm]일 때



(b) 폭의 길이가 3[mm]일 때

그림 2. 주파수, 직경, 내경변화에 따른 정규화 임피던스도

PC 프로브의 외경의 변화에 있어서 외경의 길이가 커짐에 따라 반원의 궤적이 커지고 있으며, 폭의 변화에서는 폭의 길이가 내경의 길이와 비슷한 곳에서 더 큰 반원의 궤적을 그리고 있다. 또한 높이의 길이가 증가함에 따라 반원의 궤적이 작아진다. 정규화 임피던스도의 반원의 궤적은 커짐에 따라 PC 프로브의 결합검출능력이 좋아짐으로서 PC 프로브의 설계에 있어서 중요한 요소가 된다. 최적주동주파수는 knee position 부근의 200kHz로 선정할 수 있었다.

수치해석 결과를 통해 외경의 길이를 길게 하고 높이는 낮게, 폭과 내경의 길이가 비슷하게 설계하는 것이 PC 프로브의 결합검출능력을 향상시키는 방법이라 할 수 있다.

2.3 제작을 통한 PC 프로브 실험

수치해석을 통해 PC 프로브의 크기변화에 따른 이론적인 데이터를 수집할 수 있었다. 이 수집된 데이터는 2차원 축대칭으로 모델링이 되었음으로서 결합이 없는 부분에서의 데이터이다. 그러므로 PC 프로브의 결합에 따른 결합검출능력을 측정하기 위해서 제작을 통한 실험을 실시하였다. 실험방법은 수치해석에서 나온 데이터를 기반으로 하여 비교해야 할 실험군을 선정하고, 실험군에 따른 PC 프로브를 제작하여 실험을 실시하였다.

2.3.1 PC 프로브의 실험군 선정

수치해석의 결과는 PC 프로브의 결합검출능력에 있어서 외경이 크고 높이가 낮으며 폭과 내경의 비슷한 경우에 우수하게 나타났다. 따라서 실험군의 선정 기준은 외경과 높이 그리고 내경과 폭의 관계를 토대로 하여 3종류로 구분하였다. 실험군1은 폭과 높이를 일정하게 하여 코일의 턴수를 고정시키고 외경의 변화와 결합에 따른 PC 프로브의 결합검출능력을 측정하는 실험군을 선정하였다. 실험군2는 외경과 폭을 고정시키고 높이에 따라 변화하는 실험군을 선정했으며 실험군3에서는 높리와 외경을 일정하게 하여 폭이 변화시키면서 내경과 폭의 관계에 대한 실험군을 선정하였다.

2.3.2 PC 프로브의 제작 실험

앞에서 선정된 실험군을 토대로 하여 PC 프로브를 제작하여 시험을 실시하였다. 0.08[mm]의 마그네틱와이어를 이용하여 PC 프로브를 제작하였으며 검사대상으로 수치해석에서 쓰인 구입이 힘든 지로칼로이-2를 대신하여 도전율이 비슷한 인코넬600(도전율: $1.0 \times 10^6 [S/m]$)를 사용하였다. 결합은 1[mm]의 두께를 가지는 인코넬600에 1[mm], 3[mm], 5[mm], 7[mm], 9[mm]의 길이와 1[mm]의 폭으로 관통하는 크기로 제작하였다.

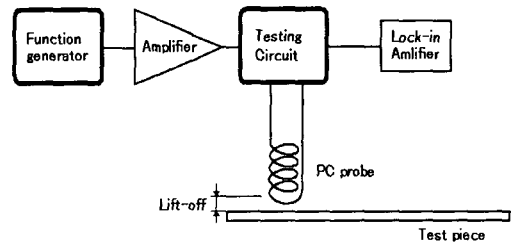


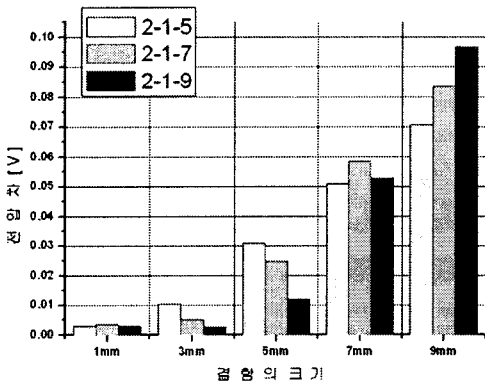
그림 3. 실험 장치 모의도

그림 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 검사대상과 PC 프로브사이의 리프트오프(Lift-Off)는 0.5[mm]로 하였으며 선정된 최적주동주파수인 200kHz를 입력주파수로 사용하였다. 계측장비는 Perkin Elmer사의 7280

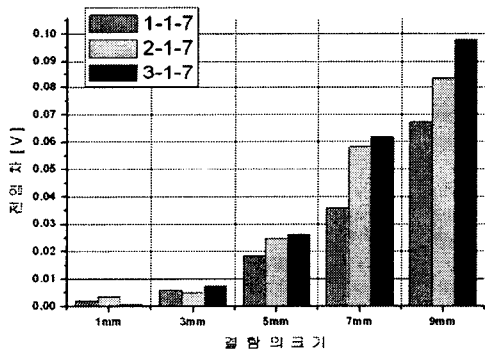
락인앰프를 사용하였다. PC 프로브의 결합검출능력은 건전한 검사대상위에 PC 프로브가 있을 때 측정되는 전압과 결합이 있을 때 측정되는 전압 차의 크기로 비교분석하였다.

2.3.3 PC 프로브의 실험 결과

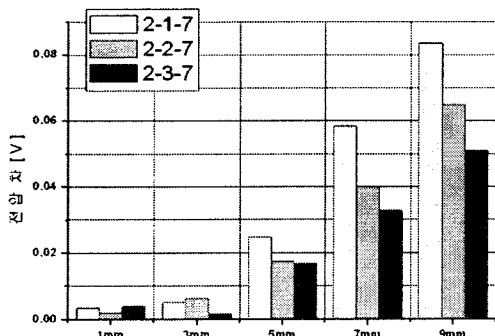
그림 4은 건전한 검사대상에서 측정된 전압과 결합에서 측정된 전압의 차의 크기(ΔV)로 나타내고 있다. 수치해석에서는 외경이 커짐에 따라 결합검출능력이 좋았지만 실험결과에서는 결합의 길이와 PC 프로브의 외경이 같을 때 ΔV 의 크기(그림 6.(a))가 높게 나타났고, 내경과 폭의 길이가 유사할 때와 높이가 낮은 경우에는 수치해석결과와 동일하게 ΔV 의 크기(그림 6.(b),(c))이 높게 나타났다.



(a) 실험군 1 : 외경과 결합크기에 변화에 따른 결과



(b) 실험군 2 : 내경과 폭 변화에 따른 결과



(c) 실험군 3 : 높이변화에 따른 결과

그림 4. 결합에 따른 측정된 전압의 차(ΔV)

위 실험결과에서 결합에 영향을 받는 PC 프로브의 크기는 외경의 길이임을 알 수 있다. 이러한 결과는 PC 프로브에 의해 발생하는 와전류는 외경주위에 집중되어 흐르며 집중된 와전류의 흐름이 검사대상의 결합에 대해 가장 많이 영향을 받는 부분이라는 것이다. 이 영향은 PC프로브의 임피던스에 많은 변화를 가져온다는 결론을 내릴 수 있다.

따라서, 결합의 크기에 따라서 PC 프로브의 외경의 길이가 결정된다. 이러한 결정은 PC 프로브의 설계 단계에서 와전류탐상을 통한 검출 되어야하는 결합의 정확히 인식하고 있어야 함을 의미한다. PC 프로브 설계를 하기 위해서는 우선 검사대상의 결합에 대한 기본 자료를 토대로한 기준 결합의 선정이 중요하다. 구조물의 안전성에 치명적인 결합을 선정하고, 그에 알맞은 크기의 PC 프로브를 설계하여야 한다. PC 프로브의 설계를 할 때 결합의 크기에 의한 외경을 결정하고, 외경에 따른 내경과 폭을 선택한 후 높이를 낮게 설계하는 것으로 검사대상에 대한 결합검출능력을 향상시킬 수 있다.

3. 결 론

수치해석과 제작을 통하여 PC 프로브의 특성을 해석 및 설계조건을 알아보았다. 유한요소법을 이용한 수치해석에서는 건전상의 검사대상에서의 PC 프로브의 특성을 알아보았다. 주파수를 증가하면서 그려지는 정규화 임피던스도에서 반원의 궤적에 따른 구동주파수를 선정하고 크기변화에 따른 PC 프로브의 특성을 알아보았다. 수치해석의 데이터를 중심으로 실험군에 대한 분류의 기준을 선정하여 외경의 변화, 높이의 변화, 내경과 폭에 대한 관계로 실험군을 구분하였다. 실험군에 적절한 PC 프로브를 제작하고, 검사대상에 다양한 결합을 제작하여 실험을 실시하였다. 수치해석과 실험을 비교분석하여 내경과 폭이 유사하고 높이가 낮으며 외경의 크기와 결합의 길이가 유사할 때 결합검출능력이 좋게 나타났다. 위 결과를 토대로 PC 프로브를 이용한 와전류탐상을 설계할 때 고려해야할 점을 알아낼 수 있었다. 우선 결합에 대한 정확한 사전지식이 필요하다는 점과 결합에 따른 알맞은 PC 프로브를 사용하여야 한다는 것이다.

구조물의 안전성검사에서 비파괴검사는 보다 다양한 부분에서 사용하게 될 것이고 와전류탐상법은 중요성 또한 강조될 것이다. 본 논문은 와전류탐상법의 기본적인 설계에 도움이 될 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] Daniel Ioan, Mihai Rebian, "Numerical Model for Eddy-Current Testing of Ferromagnetic Steel Parts", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.38, No.2, March 2002.
- [2] Kofi D. Anim-Amppiah, 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.
- [3] Jack Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing", *Adam Hilger*, 1991.
- [4] 이의중 역, 와류탐상시험, 도서출판 플드, 1999.