

고주파 전류의 특성과 자기 센서를 이용한 도체 결함 검사 방법

論 文

49D-3-2

Magnetic Inspection using High-frequency Current Behaviors

林 漢 尙* · 朴 宰 弘**

(Han-Sang Lim · Jae-Hong Park)

Abstract - In this paper, an improved method for magnetic inspection to detect surface defects of a conductor is presented. The presented method is based on the technique of ECP(Electric Current Perturbation), which is to measure the variation of current flow due to defects with a magnetic sensor. The inspection performance is improved by using high frequency current behaviors in order to concentrate the current near the defect and employing the resonant frequency of a search coil as an operating frequency. By analytical results and experiments of the test specimens, the feasibility of the inspection method is shown.

Key Words : magnetic inspection, high-frequency current behaviors, search coil, ECP

1. 서 론

비파괴 검사는 검사 대상물의 성분이나 구조의 손상없이 대상물의 상태를 검사하는 방법으로 방사선 투과 검사, 초음파 검사, 와전류 검사, ECP(Electric Current Perturbation) 등의 방법이 있다. 방사선 투과 검사는 다양한 대상물을 검사할 수 있으나 방사선 유출의 위험이 있고 초음파 검사 역시 다양한 대상물을 검사할 수 있으나 중금속, 플라스틱 등에서는 초음파가 빨리 감쇄되어 적용하기 어렵다. 와전류 검사는 전도율이나 투자율의 측정도 가능하나 대상물이 도체로 제한되며 결과에 영향을 주는 요소가 많아 결과 해석이 어렵고 ECP는 와전류 검사보다 낮은 주파수를 사용하며 노이즈 특성이 좋으나 역시 대상물이 도체로 제한된다는 단점이 있다. 이와 같이 여러 비파괴 검사방법은 서로 다른 장, 단점을 가지고 각기 적합한 분야에 적용되고 있다. [1-5]

본 논문에서는 ECP의 원리를 기반으로 고주파 전류와 서치 코일의 특성을 이용하여 검사 능력을 향상시킨 도체 결함 검사 방법을 제시한다. 도체에 전류를 인가하면 도체의 표면 상태에 따라 전류의 흐름이 변하므로 이 전류의 변화에 의해 유도되는 자기장의 변화를 측정하여 결함 여부를 파악한다. 이 검사법에서는 고주파 전류를 이용하여 전류가 결함 주위로 몰려 흐르도록 제한함으로써[6] 검사 능력을 향상시킨다. 또한 결함 부위만의 적분을 통하여 유도되는 자기장의 크기를 파악할 수 있으므로 검사 결과의 분석이 용이하다.

제시한 검사방법을 원형 결함을 가진 구리기관인 모의 실험물에 적용하여 검사 방법의 타당성을 확인한다. 원형 결함의 크기에 따라 유도되는 자기장의 크기를 이론적으로 해석하고 실험을 통하여 유도 전압을 측정하여 결과를 비교, 분석한다. 자기 센서로는 서치 코일(air-cored induction coil)을 사용하였으며 특히 대상물에 서치 코일의 공진 주파수와 같은 주파수의 전류를 인가하여 코일의 특성을 최적화하였다.

본 논문의 구성은 기본 원리와 도체 결함 검사 방법, 모의 실험물체의 적용으로 이루어진다. 기본 원리에서는 고주파 전류의 특성과 서치 코일의 특성에 대하여 알아보고 도체 결함 검사 방법에서는 검사 방법의 기본 원리, 검사 방법의 특성에 대하여 알아본다. 모의 실험물체의 적용에서는 제시한 검사방법을 모의 실험물에 적용하여 이론적인 자기장 해석과 실험 결과에 대하여 알아 본다.

2. 기본 원리

이 절에서는 본 검사 방법에서 검사 능력을 향상시키기 위해 사용한 고주파 전류의 특성과 자기센서인 서치 코일의 특성을 알아본다.

2.1 고주파 전류의 특성

표피 효과(skin effect)와 옴의 법칙(Ohm's law)에 의한 고주파 전류의 경로 유도 특성을 살펴 본다. 표피 효과는 많이 다루어져 왔으므로 간략히 살펴 보고 본 논문에서는 옴의 법칙에 의한 고주파 전류의 분포를 보다 자세히 살펴 본다.

표피 효과는 고주파 전류가 도체의 단면에 균일하게 분포하지 않고 표면 가까스로 흐르는 현상으로 도체에서 전류의

* 準 會 員 : 서울大 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울大 電氣工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 2月 25日

最終完了 : 2000年 1月 25日

수직적 분포를 제한한다. 표면의 깊이(skin depth), δ 가 전류의 주파수 f 에 대해 식 (1)과 같은 관계가 있으므로 고주파 전류일수록 도체 표면으로 흐르게 된다[7],[8],[9].

$$\delta \propto \frac{1}{\sqrt{f}} \quad (1)$$

옴의 법칙은 일정한 전압이 인가된 임피던스에 흐르는 전류의 크기는 임피던스의 크기에 반비례하는 성질이다. 그러므로 병렬 연결된 여러 임피던스들에 흐르는 전류의 크기는 각 임피던스들의 크기에 반비례하게 된다. 도체에 전압을 인가하면 전압이 인가된 두 지점사이에 많은 전기장이 형성되고 전류는 이 전기장을 따라 흐른다. 따라서 전류가 흐르는 각 경로의 임피던스를 고려하면 도체는 여러 임피던스들이 병렬 연결된 것으로 파악할 수 있으며 각 경로에 흐르는 전류의 크기는 그 경로의 임피던스에 반비례하여 결정된다.

고주파 전류의 경우에는 인덕턴스에 의한 리액턴스 ωL 가 임피던스의 주된 요인이므로 전류는 작은 인덕턴스를 가지는 경로로 흐르게 된다. 그런데 인덕턴스, L 과 전류 경로에 의해 형성되는 루프 면적, S 와는

$$L = \frac{d}{dl} \int_S B \cdot ds \quad (2)$$

의 관계가 있다. 단, I 는 전류, B 는 자기 밀도이다. 식에서 전류 경로의 인덕턴스 성분은 경로에 의해 형성되는 루프 면적에 비례하며 특히 균일한 자기장(homogeneous magnetic field)의 경우

$$L = \frac{d}{dl} B \cdot S \quad (3)$$

로 인덕턴스가 루프면적에 정비례하게 된다. 그러므로 고주파 전류일수록 도체에서 형성하는 루프 면적이 작은 경로를 따라 흐르려 한다[6].

2.2 서치 코일의 특성

서치 코일은 선형성이 좋고 출력 전압이 주파수에 비례하므로 고주파 자기장의 경우 작은 변화에 대해서도 큰 전압 차이를 나타낸다. 권선수가 n 회이고 선재의 지름을 d , 코일 단면의 지름을 D 라고 할 때 서치 코일의 출력 전압은

$$V_o = \frac{\pi^2}{2} n D^2 \mu_0 f H \quad (4)$$

이 된다. 단, f 는 주파수이고 H 는 자기장 세기이다. 그러나 주파수가 증가하면 서치 코일의 기생 성분인 R_{AC} ¹⁾, L , C 의 영향으로 출력 전압, V_{out} 는

$$V_{out} = V_o \frac{1/(j\omega C)}{R_{AC} + j\omega L + 1/(j\omega C)} \quad (5)$$

이 된다[10],[11]. 식 (5)에서 서치 코일의 출력 전압은 L , C 성분에 의해 특정 주파수에서 공진하는 성질이 있음을 알 수 있다.

본 검사에서 사용한 서치 코일은 권선수 45회, 선재의 지

름 0.15 mm, 코일 단면의 지름이 3.6 mm인 단층(single-layer) 코일이다. 그림 1은 사용한 서치 코일의 주파수 특성을 나타내는데 'o'는 실제 측정된 값이고 실선은 측정값 사이를 1차 함수로 보간한 것이다. 그림에서 가로는 주파수이고 세로는 센서의 출력 전압으로 사용한 코일의 공진 주파수가 6.82MHz임을 알 수 있다. 이와 같이 코일의 출력은 공진 주파수에서 최대가 되며 서치 코일이 주파수에 대해 대역 통과 필터(band-pass filter)와 유사한 특성을 가진다.

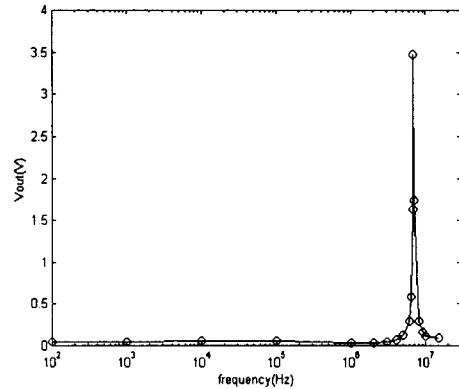


그림 1 사용한 서치 코일의 주파수 특성

Fig. 1 Frequency response of the used search coil

3. 도체 결함 검사 방법

이 절에서는 제시한 도체 결함 검사 방법의 원리와 두가지 특징을 살펴본다.

3.1 도체 결함 검사 방법의 원리

본 논문에서 제시한 결함 검사 방법은 고주파 전류의 특성을 기반으로, 전류에 의해 유도되는 자기장을 측정하여 도체의 결함 여부를 파악하는 것이다. 그림 2는 본 논문에서 제시한 검사 방법을 모의 실험물에 적용한 것이다. 그림에서 모의 실험물은 원형 결함을 가진 구리판으로 다양한 크기의 원형 결함을 가지고 있어 이를 대상으로 결함의 크기와 유도되는 자기장의 관계를 파악한다. 그리고 모의 실험물 위의 굵은 선은 도체에 전압을 인가하는 도선으로, 전압원 V_e 의 양 단자에 도선의 한 쪽 및 같은 쪽의 도체를 연결하여 정현파를 인가한다. 정현파의 주파수는 사용한 서치 코일의 공진 주파수와 같은 6.82MHz이고 크기는 10 V_{pp}이다.

전류는 그림에서와 같이 굵은 도선을 통해 모의 실험물에 인가되고 화살표 방향으로 도선 아래부분의 도체를 거쳐 되돌아 흐른다. 이 때 도체 표면에 결함이 있으면 결함 주위에서 전류의 분포가 변하고 따라서 도체 표면의 결함의 유무 및 크기에 따라 전류에 의해 유도되는 자기장의 크기가 달라진다. 이런 현상을 도체의 표면 검사에 적용하여 유도되는 자기장의 크기를 측정함으로써 도체 표면의 결함 여부

1) 주파수의 증가에 의한 저항 크기의 변화를 나타낸 것으로 주파수가 증가할수록 skin effect와 proximity effect에 의해 증가한다.

를 파악할 수 있다.

그런데 고주파 전류는 형성하는 루프 면적이 작은 경로로 몰려 흐르려 하므로 모의 실험물에서의 전류는 굵은 도선 바로 아래로 몰려 흐른다. 즉, 전압을 인가하는 굵은 도선에 의해 모의 실험물에서의 전류의 분포가 도선 주위로 제한되므로 그림 2와 같이 결함이 있는 경우 전류는 도선과 형성하는 루프 면적이 작도록 결함 주위로 몰려 흐른다. 그러므로 고주파 전류는 결함에 의해 교란되는 전류의 비율이 커지고 저주파 전류의 경우보다 결함에 의한 자기장의 변화가 증가하므로 향상된 검사 능력을 가진다.

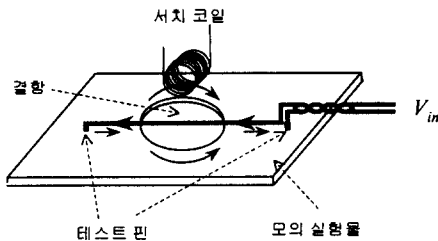


그림 2 도체 결함 검사의 기본 방법
Fig. 2 Basic inspection configuration

3.2 도체 결함 검사 방법의 특징

첫째, 본 검사 방법에서는 [6]에서 확인된 고주파 전류의 특성을 적용하여 도체에서의 전류의 수평적 분포를 제한함으로써 검사 능력을 향상시킨다. 그림 3은 그림 2의 모의 실험물에서 전류의 흐름을 나타낸 것이다. 그림에서 I_1 , I_2 , I_3 로 갈수록 전류 경로의 길이 및 전압을 인가하는 도선과의 전류 루프 면적이 증가하므로 그 경로의 인덕턴스가 증가한다. 그러므로 각 경로의 전류는 $I_1 > I_2 > I_3$ 가 되는데 특히 인덕턴스 성분의 영향은 각속도 ω 에 비례하므로 주파수가 증가하면 $I_1 \gg I_2, I_3$ 가 된다.

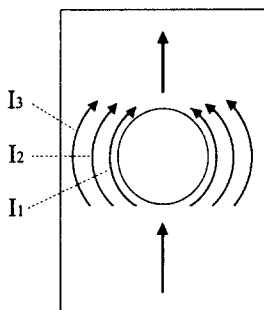


그림 3 모의 실험물에서 전류의 분포
Fig. 3 Current Distribution around the test specimen

이처럼 고주파 전류에서는 인덕턴스의 작은 차이도 임피던스에서 큰 차이를 일으키므로 주파수가 증가할수록 전류는 결함 주위로 몰려 흐르게 되고 이와 같은 고주파 전류의 경로 유도를 통하여 검사 능력을 높일 수 있다. 즉, 인가된 고주파 전류는 도체의 표면으로, 전류를 인가하는 굵은 도선 바로 아래 경로를 따라 몰려 흐르는 성질이 있으므로 저주

파의 경우보다 결함에 의해 더 많은 전류가 교란된다. 따라서 결함이 자기장에 미치는 영향이 증가하고 본 검사 방법은 이와 같은 고주파 전류의 경로 유도 특성을 이용하여 결함 검사 능력을 향상시킨다.

둘째, 본 검사 방법에서는 대상물에 서치 코일의 공진 주파수와 같은 주파수의 전류를 인가하여 검사 능력을 향상시킨다. 그러므로 발생하는 자기장의 주파수는 서치 코일의 공진 주파수와 같게 된다. 공진 주파수 근처에서는 주파수에 대한 서치 코일 출력 전압의 선형성이 떨어지므로 서치 코일은 일반적으로 공진 주파수보다 작은 주파수 범위에서 동작시킨다. 그러나 본 검사 방법에서는 측정하려는 자기장의 주파수가 고정되어 있으므로 주파수에 대한 선형성의 문제가 발생하지 않는다. 그리고 2에서 살펴 본 바와 같이 코일의 공진 주파수를 동작 주파수로 함으로써 출력 전압, V_{out} 은 같은 자기장 세기에 대하여 민감도 (V/I)가 높아지며 다른 주파수 성분의 자기장을 상대적으로 감소시키는 대역 통과 필터처럼 동작하므로 서치 코일의 특성을 최적화한다.

4. 모의 실험물에서의 적용

이 절에서는 3의 검사 방법을 다양한 크기의 원형 결함을 가지는 모의 실험물에 적용하여 본 논문에서 제시한 검사 방법의 타당성을 확인한다. 모의 실험물의 결함의 반지름은 0.0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0(mm)의 10가지이고 각 실험물의 크기는 가로는 70(mm), 세로는 결함의 지름 +20(mm)이다.

4.1 이론적 자기장 해석

모의 실험물에서 결함에 의해 유도되는 자기장의 크기를 수식적으로 구하고 이 식으로부터 결함의 크기와 유도되는 자기장 사이의 이론적인 관계를 파악한다. 자속 밀도 (magnetic flux density), \vec{B} 와 벡터 자위(vector magnetic potential), \vec{A} 사이에는

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

의 관계가 있으며 시고조파 계(time-harmonic field)에서 벡터 자위, \vec{A} 는 식 (7)과 같이 얻어진다[7],[8],[9].

$$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_C \vec{I} \frac{e^{-i\beta R}}{R} d\tau \quad (7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu\epsilon} \quad (8)$$

단, 식 (7),(8)에서 \vec{I} 는 전류, μ 는 투자율, ϵ 은 유전율, ω 는 각속도, R 은 전류소스로부터의 거리이다.

그림 2에서 도선의 높이가 충분히 낮아 결함부분 이외에서는 도선의 전류와 모의 실험물 표면의 전류에 의한 자기장이 서로 상쇄된다고 가정한다. 그러면 본 검사 방법에서 자기장의 변화를 일으키는 전류 경로는 그림 4와 같이 방향이 다른 두개의 반원 루프로 단순화 할 수 있다. 식 (6),(7)로부터 그림 4의 단순화된 전류 루프에 대해 결함의 크기와 유도되는 자기장과의 이론적인 관계를 살펴본다.

그림 5와 같이 원형 결함의 중심에서 높이 z 인 점, $P(0,0,z)$ 에서 그림 4의 전류 루프에 의한 자속 밀도를 구하

면 자속 밀도, \vec{B} 는 두 직선 전류에 의한 자속 밀도, \vec{B}_l 과 시계 방향의 반원 루프에 의한 자속 밀도, \vec{B}_{cw} 및 반시계

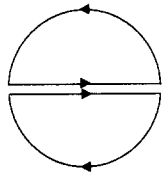


그림 4 단순화된 전류 루프
Fig. 4 Simplified current loop

방향의 반원 루프에 의한 자속 밀도, \vec{B}_{ccw} 의 중첩이므로

$$\vec{B} = \vec{B}_l + \vec{B}_{cw} + \vec{B}_{ccw} \quad (9)$$

이다. 이 때 결함의 반지름을 a , 전류의 크기를 I 라고 하면 \vec{B}_l 은

$$\vec{B}_l = a_y 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{e^{-j\beta\sqrt{x'^2+z^2}}}{\sqrt{x'^2+z^2}} dx' \right] \quad (10)$$

이 된다. 그리고 \vec{B}_{cw} 은

$$\vec{B}_{cw} = a_y \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu I a}{2\pi} \frac{e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{\sqrt{a^2+z^2}} \right] + a_z \left[-\frac{\mu I a^2 e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{4(a^2+z^2)} \left(j\beta + \frac{1}{\sqrt{a^2+z^2}} \right) \right] \quad (11)$$

이고 \vec{B}_{ccw} 는

$$\vec{B}_{ccw} = a_y \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu I a}{2\pi} \frac{e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{\sqrt{a^2+z^2}} \right] + a_z \left[\frac{\mu I a^2 e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{4(a^2+z^2)} \left(j\beta + \frac{1}{\sqrt{a^2+z^2}} \right) \right] \quad (12)$$

이 되므로 반지름 $r=a$ 인 원형 결함에 의한 이론적인 자속 밀도, \vec{B} 는

$$\vec{B} = a_y 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu I}{4\pi} \int_{-a}^a \frac{e^{-j\beta\sqrt{x'^2+z^2}}}{\sqrt{x'^2+z^2}} dx' + \frac{\mu I a}{2\pi} \frac{e^{-j\beta\sqrt{a^2+z^2}}}{\sqrt{a^2+z^2}} \right] \quad (13)$$

와 같다.

식 (13)에서 a_y 만이 있으며 이는 전류에 의한 자속밀도가 y 방향 성분만이 존재한다는 것을 의미한다. 또한 결함에 의해 유도되는 자속 밀도가 모의 실험물 전체 영역의 적분이 아닌 결함 부위만의 적분을 통하여 계산된다. 따라서 결함 크기와 유도되는 자속 밀도와의 관계가 결함 부위만의 계산을 통하여 구해지므로 측정 결과의 분석이 용이하다는 장점이 있다.

식 (13)으로부터 결함의 반지름과 자속밀도의 관계를 알아 본다. 식의 완전한 적분 계산이 안되므로 적분식을 8차 까지 전개한 테일러 급수(Taylor series)로 근사하여 계산하였는데 그림 6은 높이 6mm인 지점에서 각 반지름에 대하여 계산한 자속 밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 가로는 원형 결함의 반지름, 세로는 유도되는 자속 밀도로 결함의 크기가 증가할수록 자속 밀도의 크기가 증가하는 관계를 보인다. 이와 같은 결함의 반지름과 자속밀도의 관계를 실험으로 확

인한다.

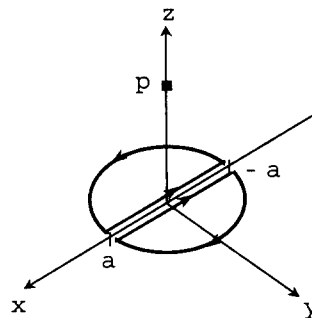


그림 5 모의 실험물 모델의 자기장 해석
Fig. 5 Magnetic flux analysis in the test specimen

4.2 실험

10가지 크기의 원형 결함을 가진 모의 실험물에 고주파 전류를 인가하고 자속 밀도를 측정하여 제시된 검사 방법을 실험으로 확인한다.

4.2.1 실험 장치

3의 검사 방법을 적용하여 결함 검사를 수행한 측정 장치에 대하여 알아 본다. 그림 7은 사용한 측정 장치의 전체 구성을 나타낸다. 측정 장치는 함수 발생기와 오실로스코프, 센서 구동 장치, 자기 센서인 서치 코일, GPIB 보드와 DIO 보드를 내장한 컴퓨터로 구성되어 있다. 그림 8은 실제 구현한 측정 장치의 외형을 보여준다.

함수 발생기로 서치 코일의 공진 주파수인 6.82MHz의 정현파 신호를 검사하려는 도체에 인가하고 DIO 보드를 사용하여 코일의 위치를 컴퓨터로 제어한다. 그리고 오실로스코프를 사용하여 코일의 출력 전압을 측정하며 GPIB 보드는 오실로스코프를 제어하고 측정된 데이터를 수집한다. 이런 모든 과정은 구동 프로그램을 통해서 자동으로 수행된다.

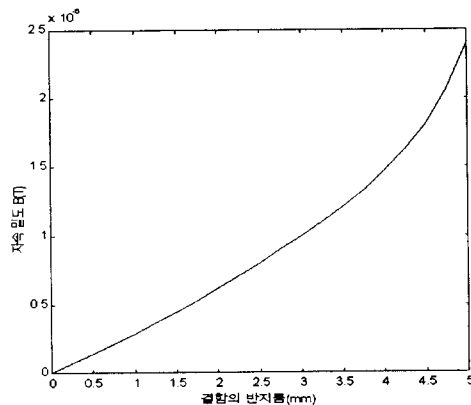


그림 6 모의 실험물에서 결함의 반지름과 자속 밀도의 이론적 관계

Fig. 6 Theoretical relation between radius of flaw and magnetic flux density

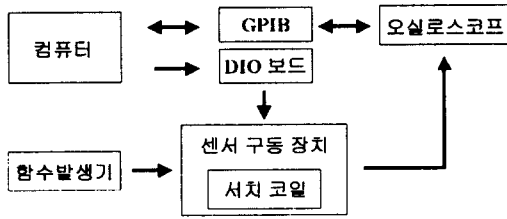


그림 7 측정 장치의 전체 구성도
Fig. 7 Block Diagram of the presented inspection

본 측정 장치에서 함수 발생기는 HP사의 33120A, DIO 보드는 National Instrument사의 AT-DIO 32F보드, GPIB 보드는 National Instrument사의 AT-GPIB/TNT, 오실로스코프는 HP사의 54522A를 사용하였다. 33120A 함수 발생기는 최대 출력 주파수가 15MHz이고 최대 출력 전압은 10 V_{pp}이다. 그리고 54522A 오실로스코프는 샘플 속도가 2GSa/s이고 대역폭은 500MHz이다.

이 장치는 서치 코일을 x, y, z의 3방향으로 움직여서 검사 대상물의 크기에 적합한 측정을 할 수 있다. x, y방향으로의 최소 이동 거리는 0.305mm이며 0.305mm의 배수로 이동할 수 있고 z방향으로의 최소 이동 거리는 0.02mm이며 0.02mm의 배수로 이동할 수 있다. 그리고 코일 중심의 높이는 모의 실험물 표면에서 6mm, 두 테스트 핀사이의 간격은 26mm이다. 이 때 식 (13)에서 \vec{B} 는 y방향 성분만이 존재하므로 그림 2와 같이 코일의 원형 단면이 y축에 수직이 되도록, 즉 전류를 인가하는 도선과 수직이 되도록 코일을 위치시킨다.

4.2.2 실험 결과

모의 실험물을 대상으로 결함 크기에 따른 유도 전압 측정 결과는 표 1과 그림 9에 보여진다. 표 1은 10개의 다른 결함 반지름을 가진 모의 실험물을 대상으로 결함의 반지름에 대해 서치 코일로부터 측정한 전압값들을 정리한 것이다. 표에서 결함의 반지름이 1 mm인 경우 3.678 V, 반지름이 3 mm인 경우 7.045 V, 반지름이 5 mm인 경우 13.047 V

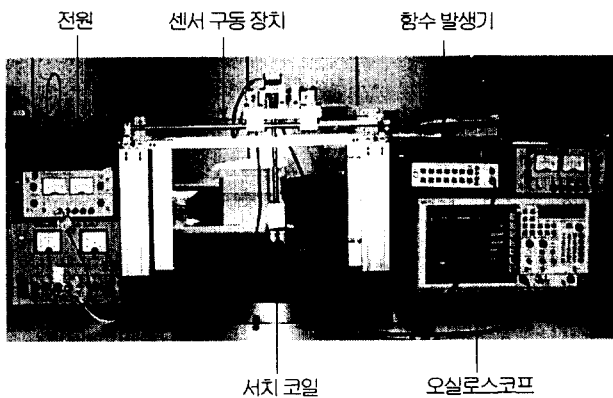


그림 8 측정 장치의 외형
Fig. 8 The inspection system

표 1 모의 실험물 측정 결과

Table 1 Experimental results of test specimen

	결함의 반지름(mm)				
	0.0	1.0	1.5	2.0	2.5
전압(V)	2.986	3.678	4.308	4.948	6.370
	결함의 반지름(mm)				
	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
전압(V)	7.045	8.380	10.381	11.785	13.047

로 4.1의 이론적 해석에서 살펴본 바와 같이 결함의 반지름이 증가할수록 코일에 유도되는 전압이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 9는 표 1의 결함 반지름과 유도 전압과의 관계를 나타낸 것으로 가로는 결함의 반지름 (mm), 세로는 코일에 유도되는 전압 (V)이다.

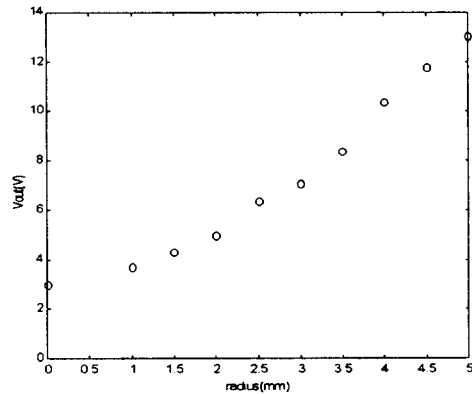


그림 9 모의 실험물에서 실험에 의한 결함의 반지름과 유도 전압의 관계

Fig. 9 Experimental results between radius of flaw and the induced voltage

4.2.3 결함 주위에서의 전압 분포

결함의 주위에서 서치 코일의 위치를 변화시키며 위치에 따른 출력 전압을 살펴 본다. 그림 10은 결함의 지름을 축으로 서치 코일을 움직이면서 전압을 측정한 결과이다. 반지름이 3mm인 결함을 대상으로 결함 중심에서 -11.59mm에서 12.2mm까지의 범위를 0.61mm간격으로 출력 전압을 측정하였다. 가로는 결함 중심으로부터의 거리이고 세로는 코일의 출력 전압으로 결함의 중심에서 7.045V로 가장 크고 중심에서 멀어질수록 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 서치 코일을 이동시키면서 전압을 측정하여 결함의 위치를 파악할 수 있다.

그림 11은 결함의 중심에서 서치 코일을 양방향으로 움직이면서 전압을 측정한 결과이다. 반지름이 3mm인 결함을 대상으로 결함 중심에서 (-11.59mm, -12.2mm)에서 (12.2mm, 12.2mm)까지의 범위를 (0.61mm, 0.61mm)간격으로 서치 코일의 출력 전압을 측정하였다. x축은 결함의 중심에서 x방향의 위치, y축은 결함의 중심에서 y방향의 위치, z축은 서치 코일의 출력 전압이다. 그림에서 출력 전압이 결함의 중심에서 가장 크며 결함의 중심에서 멀어질수록 감소함을 알 수 있다.

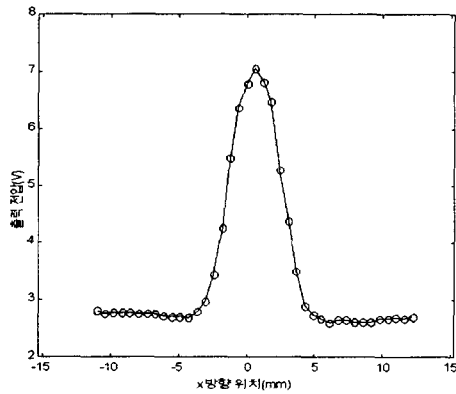


그림 10 r=3mm인 원형 결함 주위에서의 전압 분포 I
Fig. 10 Profile on a circular flaw of r=3mm

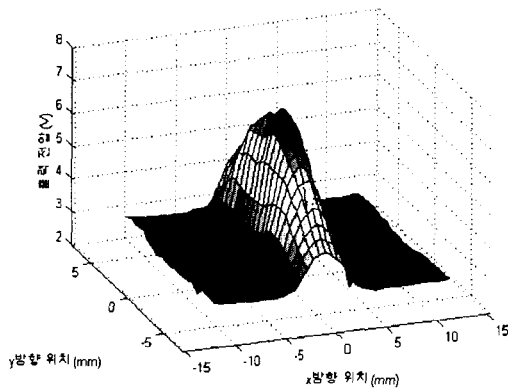


그림 11 r=3mm인 원형 결함 주위에서의 전압 분포 II
Fig. 11 2-D scanning on a circular flaw of r=3mm

4.3 실험 결과 분석

4.1의 이론적 해석과 4.2의 실험 결과를 비교하여 검사 방법의 타당성을 확인한다. 비교에 앞서 자기장의 이론적 해석에서 가정한 가정들의 영향을 보정한 후 보정한 이론값과 실험값을 비교한다. 4.1의 이론적인 해석에서 식 13을 유도할 때 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 원형 결함 부분 이외의 전류에 의한 자기장은 상쇄된다.
2. 도체에서 전류는 결함 주위로 완전히 몰려 흐른다.
3. μ , ϵ 이 주파수에 대해 일정하다.

표 1의 실험 결과를 보면 도선과 도체에 흐르는 전류에 의한 자기장이 완전히 상쇄되지 않아 결함이 없는 경우, 즉 결함의 반지름이 0인 경우에 3.469V의 전압이 측정되었다. 그러므로 각 실험값에서 V_{offset} 인 3.469V를 감하여 가정 1의 영향을 보상한다. 가정 2의 경우 식 (13)에서 실제 전류, I 의 수평적 분포와 가정 3의 경우 주파수에 따른 β 의 변화를 비례 상수로 보정할 수 있다. 또한 서치 코일에서 자속

밀도, B 와 유도전압, V 사이의 $V \propto B$ 의 관계에 의해 식 (13)에 의한 유도전압은 자속 밀도의 상수비로 나타난다.

이런 영향들을 보상해 주는 상수비, k 는 오차 (= 실험값 - k · 이론값)를 최소로 하는 최소자승법으로 구하였다. 이와 같이 V_{offset} 과 상수비 k 를 보상하여 이론값을 보정하고 실험값과 비교한다. 그림 12는 보정한 이론값과 실험값을 나타낸 것으로 가로는 결함의 반지름이고 세로는 출력 전압이다. 그림에서 반지름이 1.0, 1.5, 2.0(mm)인 경우를 제외하고는 보정한 이론값과 실험값의 오차²⁾가 15% 이하이다. 즉, 이론값과 실험값의 경향이 유사하며 이론적 자기장 해석에서 살펴본 바와 같이 결함의 크기가 증가할수록 유도되는 자기장의 크기도 증가함을 확인할 수 있다.

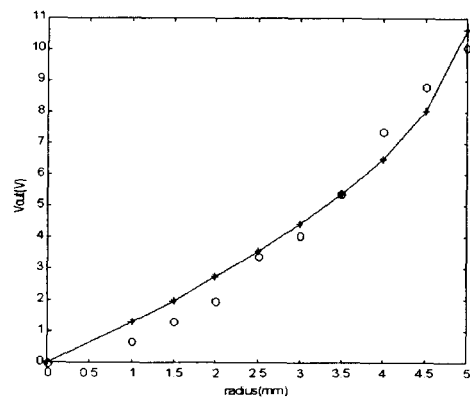


그림 12 모의 실험물에서 유도 전압의 보정한 이론값과 실험값과의 비교

Fig. 12 Comparison experimental data with theoretical ones

5. 결 론

본 논문에서는 도체 결함 여부를 검사하는 비파괴 검사법으로 고주파 전류와 서치 코일의 특성을 이용하여 검사 능력을 향상시킨 자기장 측정법을 제시하였다. 도체에 고주파 전류를 인가하고 결함 부위에서 전류의 교란에 의한 자기장의 변화를 측정함으로써 도체의 결함 여부를 파악하였다. 이 방법은 고주파 전류의 특성을 이용하여 전류가 결함 주위로 몰려 흐르게 유도함으로써 결함에 의한 전류의 교란의 영향을 크게 하여 검사 능력을 향상시켰다. 또한 자기 센서로 사용한 서치 코일의 공진 주파수를 동작 주파수로 하여 코일의 민감도를 최대로 하였다. 그리고 결함 부위만의 적분을 통하여 결함에 의한 유도 전압을 계산함으로써 검사 결과의 분석을 용이하다.

원형 결함을 가진 구리기판인 모의 실험물을 대상으로 이론적인 자기장 해석을 통하여 결함의 크기와 유도되는 자기장 사이의 이론적인 관계를 계산하였다. 그리고 모의 실험물 실험을 통하여 이론적 해석과 비교, 분석하여 제시된 도체 표면 검사 방법의 타당성을 확인하였다.

$$2) \text{오차}(\%) = \frac{\text{실험값} - \text{보정한 이론값}}{\text{보정한 이론값}} \times 100$$

참 고 문 헌

- [1] Warren J.McGonnagle, "Nondestructive Testing", GORDON AND BREACH, 1998
- [2] Don McBride and Don E.Bray, "Nondestructive Testing Technique", JOHN WILEY and SONC.INC, 1992
- [3] J.A.G.Temple, M.G.Silk and A.M.Stoneham, "The Reliability of Non-destructive Inspection", Adam Hilger, Bristol, 1987
- [4] R.Yee and S.B.Lambert, "A Reversizing direct current potential drop system for detecting and sizing fatigue cracks along toes", Journal of Testing and Evaluation, July 1995
- [5] Gary L.Burkhardt and R.E.Beissner, "Electric Current Perturbation NDE", ASM Handbook, 1989
- [6] 임한상 박재홍, "고주파 전류의 수평적 경로 유도", 전기학회 논문지, 48A(6) 1999
- [7] Cheng David K, "Field and Wave Electromagnetics", ADDISON WESLEY, 1992
- [8] Paul Lorrain and Dale R.Corson, "Electromagnetic fields and waves", W.H.Freeman and company, 1970
- [9] Constantine A.Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", WILEY, 1989
- [10] Fredrick Emmons Terman, "Radio Engineers' Handbook", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1943

저 자 소 개



임한상 (林漢尙)

1972년 4월 24일 생. 1996년 서울대 전기공학부 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 888-8374

E-mail : lhs@camus.snu.ac.kr



박재홍 (朴宰弘)

1961년 1월 11일생. 1983년 서울대 공대 제어계측공학과 졸업. 1984년 미시간 주립대 졸업(석사). 1991년 미시간대 졸업 (공학박). 1991년-1994년 미시간대 전자공학부 연구조교수, Vehicular Electronics Laboratory Assistant Director.

1994년 - 1998년 서울대 공대 전기공학부 조교수

1999년 - 현재 서울대 공대 전기공학부 부교수.

Tel : 880-8880

E-mail : jaehong@asri.snu.ac.kr