

## 튜브, 봉류의 와전류 탐상시 시편 변위에 의한 신호 변화

김 영 주\* · 김 영 길\*

### Wobble and Nonconcentricity Effects in Eddy Current Test of Tubes or Rods

Y. J. Kim and Y. G. Kim

**Abstract** The purpose of this paper is to estimate the effect of wobble and nonconcentricity of tubes or rods in eddy current test with encircling test coils. Because the eddy current induced in a sample is related to the total magnetic flux linkages, the information about magnetic field distribution in a coil is important. In theoretical study, magnetic field distribution in a single turn coil was calculated and variation of impedance according to the difference of sample positions was presumed. Magnetic field intensity at inside of a solenoidal coil was measured and compared with the theoretical estimation. In experiment, impedance loci of a coil encircling an aluminum rod were measured at different sample positions. The effect of crack positions was examined at same sample positions.

#### 1. 서 론

비파괴검사 방법중 와전류탐상법은 도체의 표면이나 표면근처의 불연속 측정에 유용한 방법이다. 이 검사 방법은 자장변화에 의한 임피던스의 변화를 측정하는 방법이므로 sensitivity가 뛰어나 표면근처의 작은 결함에도 큰 신호를 얻을 수 있다.

그런데 튜브나 봉류의 와전류탐상시 고려해야 하는 pa-

rameter들로는 재료의 전기전도도, 투자율, 주파수, fill factor 등이 있다. 이중 코일의 직경과 재료의 상대적 인비에 관계되는 fill factor의 변화는 탐상수행에 직접적 영향을 미치므로 이에 대한 많은 연구가 이루어져 있다.<sup>1)</sup>

그러나 fill factor의 변화는 없으나 시험편이 coil내에서 진동하거나 시험편의 중심축과 coil의 중심축의 간격이 변함에 따라 코일과 재료사이의 Mutual Induc-

\* 한국표준연구소 비파괴시험연구실  
접수 : 1989년 9월 28일

tance가 변화게 된다. 이러한 현상은 완전류 탐상을 수행하는데 중요한 error요인이 된다.본 연구는 코일의 중심축과 시험편의 중심축과의 거리에 따른 영향을 조사하기 위해 코일 내부의 자장 분포를 계산하여 측정된 결과와 비교하고 시험편이 코일 내부에서 그 위치가 변할 때의 코일의 Impedance 변화를 코일 내부의 자장분포와 연관지어 고찰하고 이에 따른 error 발생 원인을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

코일에 의하여 발생되는 자장의 세기는 공간적 위치에 따라 변환된다. 그러므로 재료가 놓이는 위치와 방향등에 따라서 자장의 변화량과 양상이 다르게 될 것을 예측할 수 있다. 이런 변화에 의한 영향을 고찰하기 위해서는 먼저 공간적 자장분포를 알아야 하므로 본 연구에서는 이론적 계산에 의하여 자장분포를 계산하고 이의 결과를 토대로 차후 측정될 실험측정치와 비교분석할 수 있도록 하였다. 이론 연구에서는 수학적 계산을 간단히 하기 위하여 Fig. 1의 원기둥 좌표(cylindrical coordinates)에서 반경 a인 단일 코일을 생각하고 원주와 동일 평면상의 자속밀도 Bz를 구하였다. Fig. 1에서 공간좌표(r, φ, z)에서의 벡터 포텐셜 A의 각 성분은 식 1과 같이 나타내진다<sup>2)</sup>

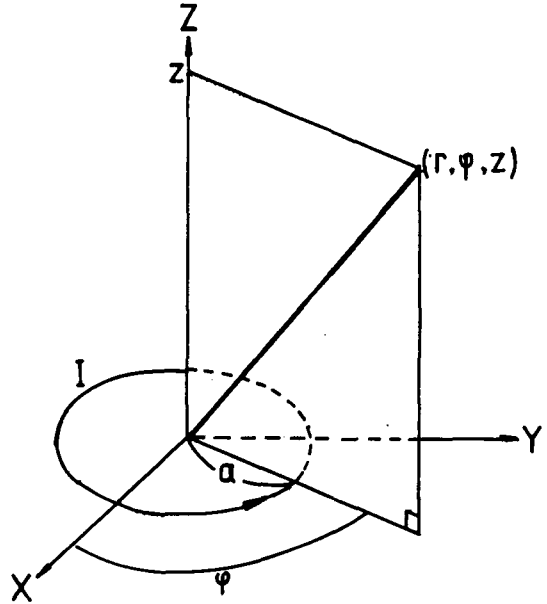


Fig. 1 Single turn coil in the cylindrical coordinates.

따라서 좌표(r, φ, z)에서의 자속밀도를 식 2로 표시된 벡터포텐셜로부터 구할 수 있다. 완전류 탐상에서의 주요 관심대상은 코일의 근접장(near field)이므로 single turn coil의 원주와 동일평면상에서의 자속밀도를 구하면 식 3이된다.<sup>2)3)</sup>

$$A_r = 0$$

$$A_z = 0$$

$$A_\phi(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{\cos \alpha \, d\alpha}{(a^2 + r^2 + z^2 - 2ar \cos \alpha)^{3/2}} \dots (1)$$

식 1의 적분항을 전개한 후 Elliptical Integral K(k<sup>2</sup>) 과 E(k<sup>2</sup>)으로 표시하면 식 1은 식 2와 같이 표시된다.<sup>2)</sup>

$$A_\phi(r, \phi, z) = \frac{\mu_0 I}{\pi} \frac{2a/k^2}{\sqrt{(a+r)^2 + z^2}} \cdot \left[ \left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k^2) - E(k^2) \right] \dots (2)$$

$$K(k^2) = \int_0^{\pi/2} \left( 1 + \frac{1}{2} k^2 \cos^2 \theta + \frac{3}{8} k^4 \cos^4 \theta + \frac{15}{48} k^6 \cos^6 \theta + \dots \right) d\theta$$

$$E(k^2) = \int_0^{\pi/2} \left( 1 - \frac{1}{2} k^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \frac{3}{8} k^4 \cos^4 \theta - \frac{1}{5} \frac{15}{48} k^6 \cos^6 \theta - \dots \right) d\theta$$

$$B_z \quad z=0 = \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi)$$

$$= \frac{\mu_0 I a^2}{16} \left[ 4 \frac{2a-r}{(a+r)} + 12a \frac{3ar-2r^2}{(r+a)^3} + 75a^2 \frac{4ar^2-3r^3}{(r+a)^5} \dots \right] \dots (3)$$

식 3으로부터 single turn coil 내부의 자장분포를 예측할 수 있다. 식 3의 r=0에서의 Bz는 μ<sub>0</sub>I/2a가 되며 Bz의 r에 대한 미분값은 0이 된다. 그리고 r=0에서의 2차 미분값은 양이 되므로 single turn coil 내부에서의 Bz는 r=0에서 극소가 된다. 한편 ∂Bz/∂r의 일방향을 추출하여 정리하면 a > r > 0인 범위에서 항상 양이 된다. 따라서 r=0에서의 Bz는 최소값이 된다. 그러므로 single turn coil 내부의 자속밀도는 r=0에서 최소값을 갖고 r이 증가할수록 Bz가 증가해가는 분포를 나타낸다. 한편, 코일 내부의 금속시험편은 2차 코일의 역할을

하며 2차 코일이 있을 경우 2차코일을 쇠교하는 magnetic flux양은 2차코일의 중심과 1차코일의 중심과의 거리가 멀수록 즉 Fig. 2에서 deviation t가 클수록 많아지게 된다. 이와같이 deviation t의 변화에 따라 Mutual Inductance도 변화하게 되는데 Mutual Inductance의 변화는 1차 코일의 Impedance에 변화를 초래하며 그 관계는 식 4와 같다.<sup>4)</sup>

$$Z = R_0 + j\omega\mu L_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_1 + j\omega\mu L_1} \dots\dots\dots (4)$$

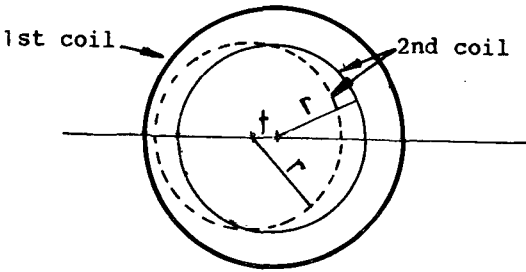


Fig. 2 Deviation t between two coils.

여기서  $R_0$ ,  $L_0$ 는 독립된 1차 코일의 저항과 Inductance이며  $R_1$ ,  $L_1$ 은, 2차코일의 저항과 Inductance이다. 식 4를 저항성분과 Reactance 성분으로 분리하면, 다음과 같다.

$$R = R_0 + \frac{\omega^2 M^2 R_1}{R_1^2 + \omega^2 \mu^2 L_1^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\omega L = \omega\mu L_0 - \frac{\omega^3 M^2 \mu L_1}{R_1^2 + \omega^2 \mu^2 L_1^2} \dots\dots\dots (6)$$

식 5, 6을 보면 Mutual Inductance의 증가로 저항성분은 증가하며 Reactance 성분은 감소한다. 즉 deviation t가 증가하면 Mutual Inductance M이 증가하게 되고 이로부터 탐촉자의 Impedance가 변하게 된다.

3. Solenoid coil 내부의 magnetic field 분포조사

와전류 탐상시 사용되는 탐촉자는 solenoid coil로 이루어져 있다. Solenoid coil은 single turn coil이 여러겹으로 중첩되어 있는 것으로 간주할 수 있으므로

이 코일 내부에서의 magnetic field를 조사하여<sup>2)</sup> 앞의 이론 결과와 비교하였다. Fig. 3은 0.6mm 지름의 에나멜 동선으로 감아지고 내경 10mm, 외경 20mm, 높이 20mm인 코일에 10kHz, 10volt의 전압을 가한 후 자장 분포를 측정된 결과이다. 이 측정결과는 코일 가장자리부위의 magnetic field intensity가 가운데 부분보다 큰것을 나타낸다. 이는 앞에서의 이론연구와 잘 일치함을 알 수 있다.

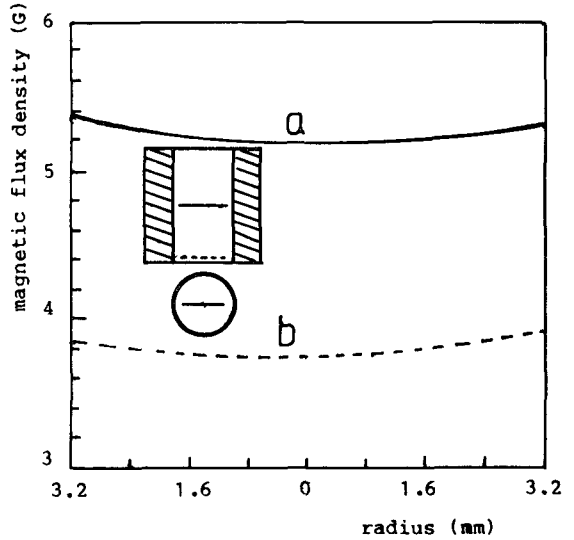


Fig. 3 Magnetic field intensity of a coil : a : at center, b : at edge.

4. 실험 및 결과

코일내부에서 시험편이 진동하거나 코일의 축과 시험편의 축이 concentric하지않은 영향을 고찰하기 위하여 solenoid형 코일에 aluminum 봉을 삽입하고 중심축으로 부터 변위시키면서 Impedance를 측정하였다. 시험에 사용된 코일은 내경 25.2mm, 외경 39mm, 길이 22mm, 선경 0.6mm 이며 aluminum 봉의 지름은 20mm, 전기 전도도는 32.1% IACS이다. Fig. 4는 주파수변화에 따라 코일축과 aluminum봉의 축과의 거리가 각각 0, 3mm일 때의 Impedance 값을 측정하여 시험편이 없을 때의 코일의 임피던스 성분인  $R_0$ ,  $\omega L_0$ 에 대하여 정규화한 값들을 나타낸다. 이 결과를 보면 Fig. 2의 t의 증가에 따라 Mutual Inductance의 증가로 저항성분은

커지고 Reactance 성분은 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 앞서서의 이론적 계산결과와 부합한다. 따라서 와전류 탐상시 tube가 코일내부에서 진동하게 되면 코일의 Impedance가 Fig. 4의 graph상에서 화살표 방향으로 요동하게 되어 noise가 발생하게 된다.

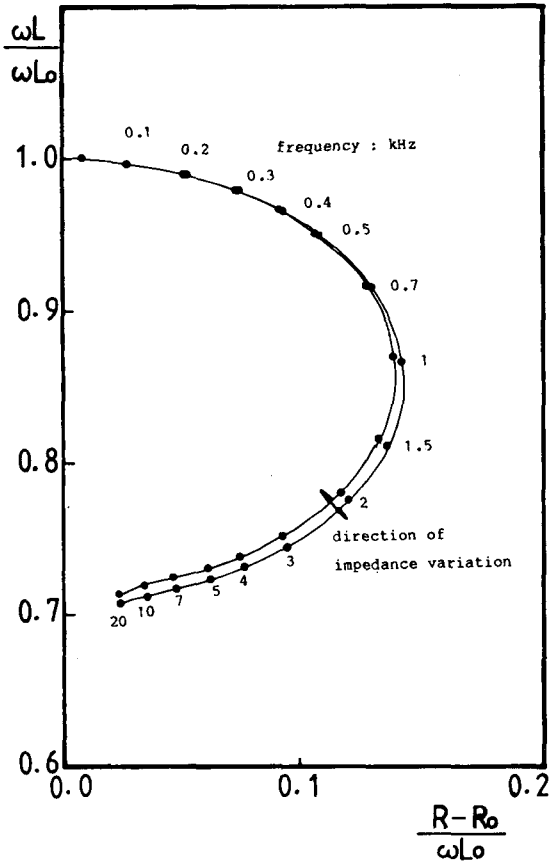


Fig. 4 Normalized Impedance loci of a coil at different sample potions.

한편 tube의 진동뿐 아니라 튜브가 코일중심에서 벗어나 deviation t를 유지하면서 지날 때 결함 신호 크기의 변화를 고찰하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 축 방향으로 길이 10mm, 깊이 1mm, 너비 0.4mm의 결함이 있는 시험편을 코일내부에 삽입하고, 위치를 변화시키면서 Impedance를 측정하였다.

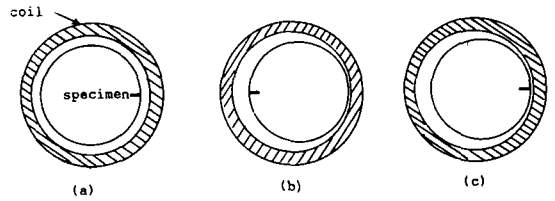


Fig. 5 Flawed specimen at three different positions.

Fig. 6에서는 결함의 위치가 t의 변화에 따라 임피던스 변화에 미치는 영향을 측정한 결과이다. 가장 왼편의 graph부터 Fig. 5의 a, c, b, 위치에서의 Impedance 궤적이다. 이 결과에서 결함에 의한 코일의 임피던스는 시험편의 위치와 결함의 위치에 따라서 달라지는 것으로 나타났다. 즉 a위치와 c위치에서의 임피던스를 비교하면 deviation에 따라 결함부위에서의 임피던스가 다르고 b위치에서의 c위치에서의 측정 결과로부터 de-

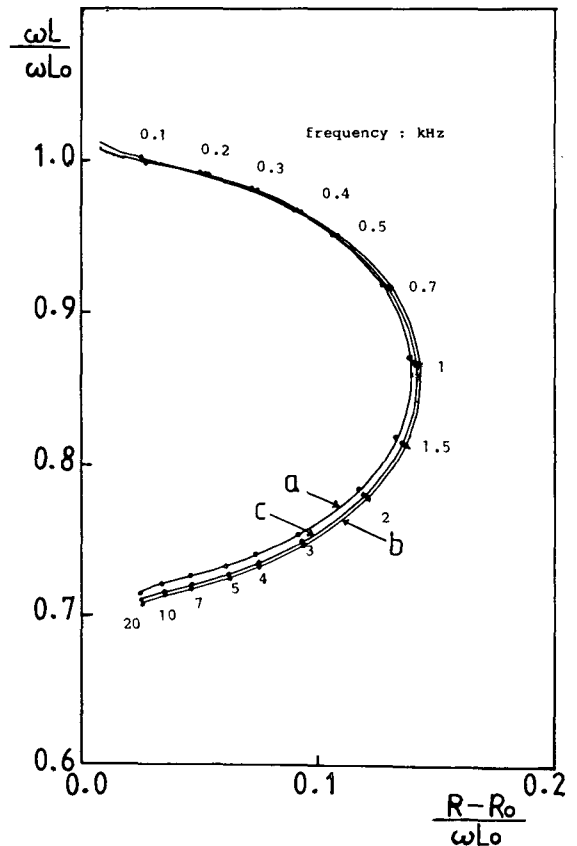


Fig. 6 Normalized Impedance loci of a coil in positions (a), (b), (c) of the Fig. 5.

viation이 같은 경우라도 결함의 위치 또는 각도에 따라 임피던스가 달라지는 것을 알 수 있다. 결함에 의한 임피던스 변화는 저항성분이 감소하고 Reactance 성분이 증가하는데<sup>9)</sup> Fig. 6의 결과는 c위치의 결함이 b위치의 결함보다 무결함 시험편에서의 임피던스로 부터 더 큰 저항의 감소와 Reactance의 증가를 초래한다. 결국 결함에 의해 변화되는 코일의 임피던스는 일정 하지 않고 시험편의 위치에 따라 변한다. 따라서 와전류 탐상시 시험편이 항상 코일의 중심부를 통과하여야 일관성있는 결함신호 크기를 기대할 수 있다.

### 5. 결 론

동일한 시험편이 코일내에 놓일 때 시험편의 축과 코일의 축의 거리가 멀어짐에 따라 Mutual Inductance가 증가하게 되어 코일 임피던스의 저항성분은 증가하고 Reactance 성분은 감소한다. 이러한 영향으로 거리의 변화 요인이 되는 시험편의 진동이 noise의 원인이 되며, 시험편이 진동하지 않는 경우라도 시험편이 중심에서 벗어나 있을 경우에는, 같은 결함이라 하더라도 그 결함과 코일과의 거리가 변하게 되어 결함신호의 재

현성을 기대할 수 없다. 즉 탐상신호의 신뢰성이 줄어들게 된다. 따라서 와전류 탐상시에는 fill factor를 크게하여 Mutual Inductance를 높여야 할 뿐만 아니라, 시험편과 코일의 축이 동심에 가깝도록하여 탐상결과의 재현성을 높여야 한다.

### References

1. H. L. Libby, Introduction to electromagnetic nondestructive test method, Wiley-Interscience, New York, 1977.
2. KSRI-88-11-IR Eddy current testing standards.
3. G. Arfken, Mathematical methods for physicists, Academic Press, New York, 1970.
4. 박 송배, 교류회로 이론.
5. D. J. Hagemaiier, Eddy current impedance plane analysis Material Evaluation, 41, Feb. 1983.
6. C. V. Dodd and W. E. Deed, J. Appl. Phys. 39,2929, 1968.