

선류의 완전저항특성에 기초한 동박막의 두께결정

장경훈, 김려병

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우자면 발전된 과학기술을 받아들이는것과 함께 새로운 과학기술분야를 개척하고 그 성과를 인민경제에 적극 받아들여야 합니다.》
(《김정일선집》 증보판 제11권 138~139페이지)

변하는 자기마당속에 놓여있는 도체의 내부에 발생하는 회리전류는 고주파유도로나 금속탐지기 등에서 널리 응용되고있다. 최근에 이러한 회리전류를 리용하여 금속판이나 금속도판과 같은 전도성재료의 두께를 평가하기 위한 연구[1-4]가 활발히 진행되고있다. 회리전류에 기초한 측정방법은 X선이나 초음파를 리용하는 다른 비파괴측정방법들에 비하여 측정대상에 직접 접촉하지 않아도 된다는 우점이 있다.

론문에서는 수감선류의 완전저항특성을 리용한 간단한 비접촉식두께측정방법에 대하여 연구하였다.

일반적으로 회리전류에 기초한 검사체계는 수감선류와 검사대상(금속), 신호처리회로로 구성되어있다.

교류가 흐르는 수감선류를 금속과 같은 전도성물체가가이에 가져가면 금속에는 유도전동력이 발생하고 회리전류가 흐르게 된다.(그림 1) 이 회리전류가 만드는 자기마당은 수감선류가 만드는 자기마당과 반대방향으로 향하므로 수감선류를 지나는 자력선뭉침은 감소하고 수감선류의 유도도는 작아지게 된다. 회리전류는 또한 에너지를손실을 가져오는데 이것은 수감선류의 저항이 커진것과 같은 결과를 가져온다. 결국 수감선류의 완전저항은 변화되게 된다.

수감선류의 완전저항은 선류와 금속판사이의 거리와 선류에 흐르는 전류의 주파수, 금속판의 전자기적성질 등에 관계된다. 일반적으로 수감선류의 완전저항과 이러한 조건들사이의 관계는 대단히 복잡하다.

지난 시기 이 문제와 관련하여 많은 해석적연구들[5, 6]이 진행되였다. 그러나 해석적방법을 리용하면 수감선류와 검사대상의 구조가 매우 단순한 경우에도 그 풀기가 대단히 어려우며 복잡한 구조와 형태를 가진 회리전류수감부의 특성을 정확히 알아낸다는 것은 거의 불가능하다. 이로부터 최근에는 유한요소법을 비롯한 여러가지 수값해석방법들을 리용하여 이 문제를 풀기 위한 연구가 심화되고있다. 론문에서는 유한요소해석프로그램인 Ansoft Maxwell 16.0을 리용하여 수감선류의 완전저항특성을 평가하고 그로부터 동박막의 두께를 결정하기 위한 방법을 연구하였다.

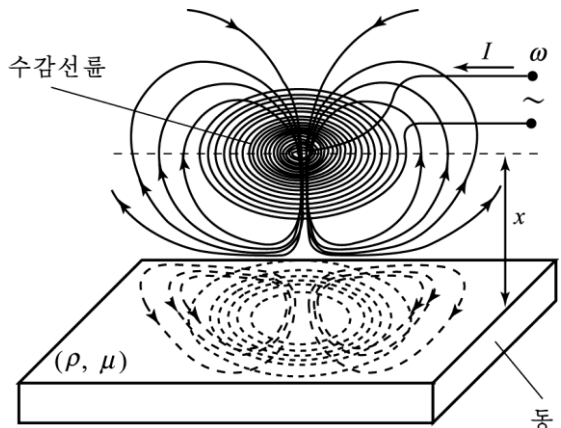


그림 1. 회리전류에 기초한 검사법의 원리

회리전류를 해석하기 위한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}\mathbf{A}\right) = \mathbf{J}_0 = \sigma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}\phi\right) \\ \text{div}\left[-\sigma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}\phi\right)\right] = 0 \end{cases}$$

여기서 \mathbf{A} 는 자기벡터포텐셜이고 \mathbf{J}_0 은 외부전류밀도, ϕ 는 전기스칼라포텐셜이다. 수감선류를 지나는 자력선뭉침은 다음의 식을 리용하여 계산하였다.

$$\Phi = \frac{N}{S} \iiint_{\Omega} \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_s dV$$

여기서 S 와 N 은 각각 선류의 자름면적과 권회수이고 \mathbf{n}_s 는 전류의 흐름방향에 평행인 단위벡터이다. 적분은 선류구역 Ω 에 대하여 진행한다.

선류에 생기는 유도전압은 파라데이법칙을 리용하여 Φ 로부터 계산한다. 회리전류에 의한 선류의 저항과 유도도의 변화는 선류에 생기는 유도전압과 선류으로 흐르는 전류로부터 계산하였다.

먼저 선류와 동박막사이의 거리를 0.2mm로부터 4mm까지 변화시키면서 동박막에서의 회리전류밀도를 계산하였다.

선류는 직경이 0.1mm인 동선을 한층으로 20회 감은것으로서 내경($d_{내}$)과 외경($d_{외}$)은 각각 2, 4mm이다. 동박막은 얇은 원판형으로서 직경이 20mm이고 두께는 0.3mm이다. 선류으로 흐르는 교류의 주파수는 1MHz로 설정하였다. 1MHz의 주파수에서 회리전류의 침투깊이는 약 $65\mu\text{m}$ 로서 설정한 동박막두께의 거의 1/5이다.

선류와 동박막이 모두 축대칭구조이므로 2차원축대칭모형으로 계산을 진행하였다. 이때 축방향을 z 축, 동경방향을 x 축으로 설정하고 공기층의 너비는 박막반경의 3배로 하였다.

선류와 동박막사이의 거리를 0.2mm로부터 4.0mm까지 변화시키면서 계산한 동박막에서의 회리전류밀도변화를 그림 2에 보여주었다. 동경방향에서의 회리전류밀도변화를 보여주는 그림 2의 ㄱ)로부터 회리전류가 기본적으로 선류와 마주한 부분에 집중적으로 분포된다는것을 알수 있다. 또한 깊이방향에서의 회리전류밀도변화를 보여주는 그림 2의 ㄴ)로부터 회리전류가 z 의 증가에 따라 처음에는 급속히 감소하여 부값으로까지 내려갔다가 $z > 4\delta$ (δ : 침투깊이)인 구간에서 령으로 다가간다는것을 알수 있다.

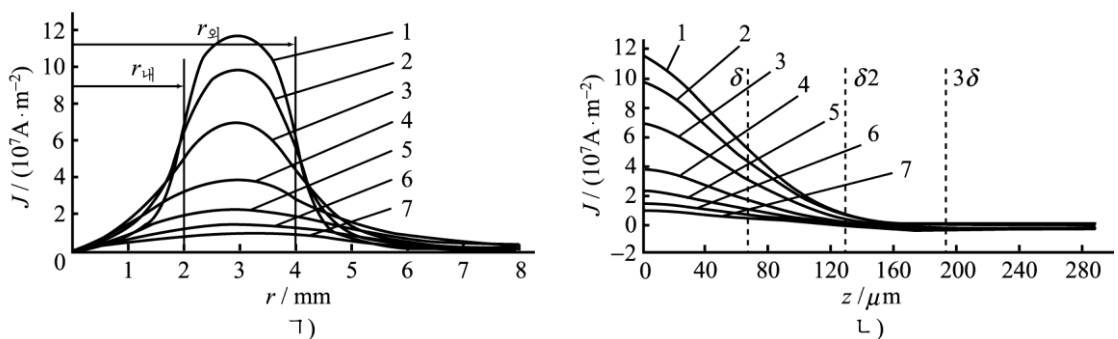


그림 2. 동박막에서의 회리전류밀도변화

1—7은 선류와 동박막사이 거리가 각각 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 2.4, 3.2, 4.0mm인 경우

선류와 동박막사이의 거리가 4.0mm일 때의 회리전류밀도는 이 거리가 0.2mm일 때의 회리전류밀도의 10%정도로 작아진다. 회리전류의 분포영역과 경향성은 선류와 박막사이의 거리에 따라 달라지지 않는다.

z 가 증가함에 따라 회리전류밀도의 부호가 바뀌는것은 동박막의 결면으로 흐르는 1차회리전류가 만드는 자기마당에 의해 박막내부에서 2차회리전류가 흐르면서 회리전류의 흐름방향이 바뀌는것으로 설명할수 있다.

또한 10~80 μm 범위의 각이한 두께를 가진 동박막들에 대하여 선류와 박막사이의 거리에 따르는 수감선류의 저항 및 유도도의 변화를 고찰하였다. 수감선류의 유도도는 처음에 선류와 박막사이의 거리가 커짐에 따라 급격히 커지며 그다음 천천히 증가하여 이 거리가 수감선류의 내경(2mm)보다 커지면 일정한 값으로 다가간다.(그림 3)

그림 3으로부터 수감선류의 유도도는 두께가 10 μm 인 경우를 제외하고는 박막의 두께에 거의 의존하지 않는다는것을 알수 있다.

한편 수감선류의 저항은 유도도와 비슷한 형태로 변하지만 방향은 반대이다. 즉 선류의 저항은 선류와 박막사이의 거리가 증가함에 따라 작아진다. 선류의 유도도곡선은 동박막의 두께에 거의 관계되지 않지만 저항곡선은 박막의 두께에 따라 크게 달라진다.(그림 4)

그림 5에 10~200 μm 범위의 각이한 두께를 가진 동박막들에 대하여 얻은 수감선류의 $R-L$ 곡선들을 보여주었다.

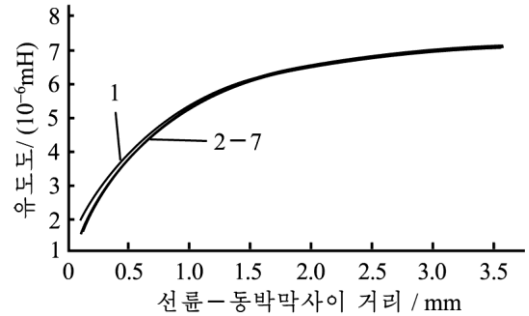


그림 3. 선류-동박막사이 거리에 따르는 수감선류의 유도도의 변화
1-7은 동박막두께가 각각 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 μm 인 경우

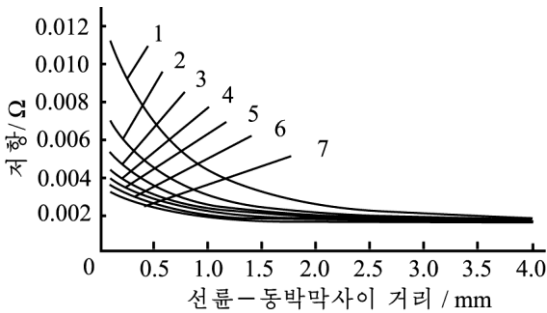


그림 4. 선류-동박막사이 거리에 따르는 수감선류의 저항의 변화
1-7은 동박막두께가 각각 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80 μm 인 경우

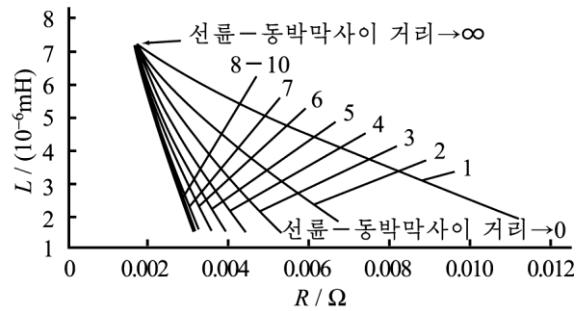


그림 5. 서로 다른 두께를 가진 동박막들에서 수감선류의 $R-L$ 곡선
1-10은 동박막두께가 각각 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 150, 200 μm 인 경우

이 그림을 보면 $R-L$ 곡선의 경사도를 리용하면 동박막의 두께를 결정할수 있다는것을 알수 있다. 그림 5에 보여준 곡선들의 경사도(k)와 동박막의 두께사이의 관계를 그림 6에 보여주었다. 그림으로부터 동박막의 두께가 침투깊이(교류주파수가 1MHz일 때 65 μm)보다 작을 때에는 완전저항곡선의 경사도가 동박막의 두께에 따라 선형적으로 증가한다는

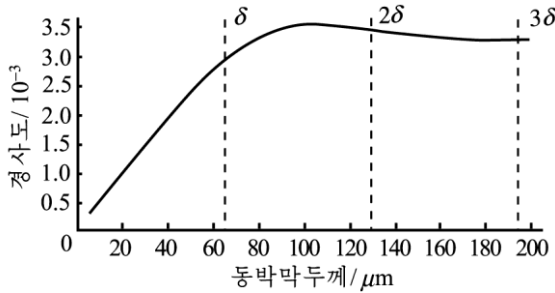


그림 6. 동박막두께에 따르는
그림 5의 경사도

것을 알수 있다. $R-L$ 곡선의 경사도는 두께가 약 $100\mu\text{m}$ 인 동박막에서 최대값에 이르는 다음 약간 작아지며 박막의 두께가 침투깊이의 3배보다 커지면 일정한 값으로 다가간다.

결국 동박막의 두께가 회리전류의 침투깊이보다 작을 때에는 $R-L$ 곡선의 경사도와 박막의 두께 사이에 완전한 선형관계가 성립한다. 이로부터 수감선류의 저항과 유도도를 측정하여 $R-L$ 곡선을 얻고 그 경사도값을 계산하면 그로부터 동박막의 두께를 결정할수 있다.

맺 는 말

동박막에서의 회리전류분포를 연구하고 회리전류가 기본적으로 선류와 마주한 구역에 분포되며 박막의 깊이에 따라 처음에는 급격히 감소하고 일정한 깊이에 이르면 회리전류의 방향이 반대로 된다는것을 밝혔다. 또한 각이한 두께의 동박막들에 대하여 수감선류의 완전저항을 계산하고 박막의 두께가 회리전류의 침투깊이보다 작을 때에는 완전저항곡선의 경사도가 박막의 두께에 따라 선형적으로 증가하며 이것을 리용하여 동박막의 두께를 평가할수 있다는것을 밝혔다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Martin et al.; Sensors, 11, 2525, 2011.
- [2] W. Yin et al.; IEEE Trans. Instrum. Meas., 53, 4, 1335, 2004.
- [3] E. Pinotti et al.; IEEE Trans. Instrum. Meas., 63, 2, 479, 2013.
- [4] J. Kral et al.; IEEE Trans. Instrum. Meas., 62, 7, 2043, 2012.
- [5] C. V. Dodd et al.; J. Appl. Phys., 39, 6, 2829, 1968.
- [6] J. O. Fava et al.; NDT & E. Int., 39, 5, 414, 2006.

주제109(2020)년 12월 5일 원고접수

The Determination of Thickness of Copper Film on the Basis of the Characteristic of Coil Impedance

Jang Kyong Hun, Kim Ryo Myong

We proposed a new method for measuring the thickness of copper film based on the characteristic of the sensing coil impedance. When the thickness of copper film is smaller than the eddy current penetration depth, the slope of $R-L$ curve of coil increases linearly with the thickness of the film, which can be used to evaluate the thickness of copper film precisely.

Keywords: eddy current, impedance, thin film, FEM