

유한요소해석에 의한 절대코일 와전류 신호의 임피던스 평면도 작성

Drawing of Impedance Plane Diagrams of Absolute Coil ECT Signals by Finite Element Analysis

신영길*[†], 이윤태*, 이정호*, 송명호**

Young-Kil Shin*[†], Yun-Tai Lee*, Jeong-Ho Lee* and Myung-Ho Song**

초 록 와전류 탐상에서 차동형 탐촉자는 신호에 영향을 미치는 변수들을 줄일 수 있어 흔히 사용된다. 그러나 차동신호는 인접한 두 코일의 임피던스 차이를 신호로 사용하기 때문에 신호예측이나 해석이 쉽지 않다는 단점이 있다. 반면에 절대코일에 의한 신호는 상대적으로 형태가 단순하므로 신호예측이나 해석이 더 수월하다. 따라서 서로의 장, 단점을 상호보완적으로 사용하면 검사 신뢰도를 향상시키는데 큰 도움이 될 것이다. 본 논문에서는 인코넬 평판과 튜브에서 절대코일 신호를 예측하기 위하여 유한요소해석을 수행하였고, 리프트 오프, 충전율, 전도도, 탐상 주파수, 피검사체의 두께, 내, 외부 결함 등이 신호에 미치는 영향을 계산하여 임피던스 평면도로 작성하고, 신호특징을 분석하였다. 그 결과, 절대신호에 대한 많은 실용적인 지식을 축적할 수 있었고, 절대신호와 차동신호 특성의 유사성을 이해하게 되었으며, 결함깊이와 주파수 변화에 따른 신호의 기울기를 대응곡선 그래프로 작성할 수 있었다.

주요어: 와전류 탐상, 절대코일 신호, 임피던스 평면도, 유한요소해석

Abstract In eddy current testing(ECT), differential probes have been frequently used since they can reduce the number of parameters that influence ECT signals. However, differential signal is actually the difference of the two coils' impedance so that signal prediction and interpretation are not easy. On the other hand, absolute coil signal is rather straightforward to predict and analyze. Therefore, combined use of the two types of signals would increase the test reliability. In this paper, absolute coil signals from Inconel plate and tubes are predicted by the finite element analysis and effects of lift-off, fill-factor, conductivity, operating frequency, test specimen thickness, inner diameter defects, and outer diameter defects are investigated. As a result, various impedance plane diagrams are drawn and analyzed. Significant practical knowledge about absolute signals is accumulated and similar characteristics of the two types of signal could be understood. Finally, slope angle versus defect depth calibration curves are prepared for three different frequencies.

Keywords: eddy current testing, absolute coil signal, impedance plane diagram, finite element analysis

1. 서 론

와전류 탐상(eddy current testing: ECT)은 코일

임피던스의 변화를 관찰함으로써 피검사체 표면 근처의 결함이나 물질 특성의 변화를 탐지해 내는 검사방법이다. 교류전류가 코일을 통해 흐르면, 코일

내부와 주위에 교류자계가 발생되는데, 이를 도체가 가까이 가져가면 코일의 시변 자계는 파라데이의 법칙에 따라 도체 내부에 전류를 유도한다. 유도된 전류는 맴돌이 형태로 흐르므로 와전류라 부른다. 피검사체 내에서 와전류의 분포나 밀도는 피검사체의 물질특성뿐만 아니라 비정상적인 부위의 존재에 의해서도 영향 받는다. 한편, 와전류는 자기 자신의 자계를 발생시키는데, 렌츠의 법칙에 따라 원래의 코일 자계와는 반대방향으로 형성된다. 따라서, 피검사체의 물질특성과 상태가 달라지면 와전류 밀도와 분포가 변하게 되며, 코일에 쇄교되는 자속의 양도 변하므로 결국 코일의 임피던스 변화로 나타나게 된다. 와전류 탐상은 비접촉식이어서 검사속도가 빠르고, 결함검사 뿐만 아니라 전기적 특성과 관련이 있는 기계적, 금속성 특성들을 간접적으로 측정하는데 사용되기도 하며, 또한 피검사체의 두께 및 치수 측정에도 사용된다[1-4]. 그러나, 와전류 탐상으로 이렇게 많은 변수들을 검사할 수 있다는 것은, 다른 관점에서 보면, 어떤 신호변화에 어떤 변수가 영향을 미쳤는지 파악하기 어렵게 만드는 것일 수도 있으므로 오히려 단점이 될 수도 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 인접한 두 코일의 임피던스 차이를 신호로 사용하여, 두 코일에 공통으로 작용하는 변수들의 영향을 제거하는 차동형 탐촉자가 흔히 사용된다. 그렇지만, 차동신호는 신호 값이 두 코일 임피던스의 차이이므로, 그 차이 값을 예측하거나 해석하기가 쉽지 않다는 단점이 있다[5,6]. 반면에 절대코일을 사용하면, 신호에 영향을 미칠 수 있는 변수들이 많다는 단점이 있기는 하지만, 가공되지 않아서 상대적으로 이해하기 쉬운 신호들이 나타나기 때문에 신호예측이나 해석이 더 수월할 수 있다. 따라서, 절대코일 신호와 차동코일 신호를 상호보완적으로 함께 사용하면 검사 신뢰도의 향상과 정확한 신호해석에 큰 도움이 될 것이다.

본 논문에서는 인코넬 평판과 튜브에서 리프트 오프(Lift-off), 충전율(Fill factor), 전도도, 탐상 주파수, 피검사체의 두께, 내, 외부 결함 등의 영향이 절대코일 신호에 어떻게 나타나는지를 유한요소법으로 계산하여 그 결과를 정규화 임피던스 평면상에 도해로 작성하였으며, 결함의 경우에는 차동신호와 신호 기울기를 비교해 보고 유사한 신호변화 경향이 나타나는 이유를 분석하였다. 수치해석에 의해 예측된 신호들은 잡음이 없는 이상적인 신호

이므로 결함과 신호와의 연관성이 명확하며, 잡음이 포함된 탐상신호에서 결함신호의 기본 패턴을 짐작할 때 배경지식이 될 수도 있을 것이다. 또한, 결함신호로부터 결함에 대한 정보를 알아내기 위해 신경회로망을 사용할 때, 학습용 신호로도 사용될 수 있다[5,6].

2. 정규화 임피던스 평면도(2-4)

교류전류가 절대코일에 흐를 때 그 코일은 Fig. 1(a)와 같이 저항과 인덕터로 구성된 교류회로로 나타낼 수 있다. 저항과 인덕터의 전압을 각각 V_R 과 V_L 로 정의하면 전체 전압, V_T 는 페이지 표현으로

$$V_T = V_R + V_L = I(R + j\omega L) \quad (1)$$

이 되며, 시간의 함수로는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_T(t) &= IR \sin(\omega t + 0) + I\omega L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \sin(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \quad (3)$$

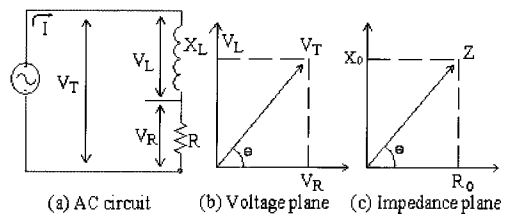


Fig. 1 Equivalent AC circuit

이 전압은 식 (2),(3)의 크기와 위상을 사용하여 Fig. 1(b)와 같이 전압평면상의 한 점으로 도시할 수 있다. 또한, 식 (2)를 전류 I로 나누면 임피던스가 되므로, 저항 성분과 리액턴스 성분을 Fig. 1(c)와 같이 임피던스 평면상에 도시할 수 있다. 코일의 위치이동은 코일 임피던스를 변화시키고 임피던스 평면상에서의 위치를 이동시키므로 임피던스 신호 궤적이 형성된다.

이와 같이 발생되는 와전류 신호는 피검사체의 특성 및 검사조건에 크게 영향 받는다. 와전류 신호의 근본인 임피던스 값에 영향을 미치는 피검사체의 주요 특성으로는 전도도, 투자율, 치수, 결합의 유무, 위치, 크기 등이 있고, 주요 검사조건으로는 탐상 주파수, 코일의 크기 및 형태 그리고 코일의 자계가 피검사체와 결합하는 정도, 즉 리프트 오프 혹은 충전율, 등을 들 수 있다. 절대코일 임피던스는 피검사체의 특성뿐만 아니라 코일의 특성에도 영향을 받으므로, 다양한 크기의 코일로부터 얻어진 검사신호들을 비교하기 위해 공통의 신호표시 방법을 사용한다. 즉, 절대코일 임피던스는 리액턴스 성분을 공기 중에서의 코일 리액턴스 (X_0)로 나누고, 저항 성분은 코일의 자체 저항을 뺀 후 X_0 로 나누어 코일 크기의 영향을 정규화시켜 나타낸다. 포피효과를 고려하지 않고, 코일 자계가 피검사체와 100% 결합한다고 가정한 등가회로 해석에서는, 정규화 임피던스 궤적이 정규화 복소수 평면상에서 중심을 (0, 0.5)에 두고 반경이 0.5인 반원으로 제 1 사분면에 형성되며, 피검사체의 전도도, 두께, 주파수, 그리고 검사코일과 튜브의 직경 등이 증가하면 작동점이 반원 궤적을 따라 시계 방향으로 아래쪽으로 이동되고, 반대로 감소하면 반시계 방향으로 위쪽으로 이동된다는 것을 보인 바 있다[2]. 본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 등가회로 해석보다 더 정확하게 신호궤적을 계산하였다.

3. 지배방정식과 유한요소 정식화

와전류 탐상의 기본 원리는 전자기 유도현상으로, 맥스웰 방정식들을 조합하면 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다[6].

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \bar{A}) = \bar{J}_s - \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (4)$$

여기서, \bar{J}_s , \bar{A} 는 각각 전류 밀도, 자기벡터 포텐셜을 나타내며, 우변 두 번째 항은 와전류 밀도를 나타낸다. 교류 정상상태와 튜브, 코일, 결합의 축대칭을 가정하면 지배방정식은 원통좌표계로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (rA) \right\} \right] - j\omega\sigma A + J_s = 0 \quad (5)$$

여기서, ω 는 각주파수이다. 식 (5)에 Galerkin 가중잔차법을 적용하여 유한요소 정식화 과정을 거치면 다음과 같은 요소당 행렬식이 구해지며,

$$([S] + j[C])(A) = \{Q\} \quad (6)$$

각 행렬의 요소는 다음과 같이 표현된다.

$$S_{ij} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left\{ \left(\frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \left(\frac{N_j}{r} + \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} 2\pi r dr dz, \quad (7)$$

$$C_{ij} = \int_{\Omega} \omega\sigma N_i N_j 2\pi r dr dz, \quad (8)$$

$$Q_i = \int_{\Omega} J_s N_i 2\pi r dr dz. \quad (9)$$

여기서 N_i 는 사각형 요소의 각 절점에서의 형상함수이다. 모든 요소당 행렬식을 합하여 하나의 대형 행렬식을 구성하고, 그 식을 풀면 각 절점에서의 자기벡터 포텐셜 값을 구할 수 있는데, 코일 임피던스는 파라데이의 법칙과 스톡스 이론을 사용하여 식 (10)과 같이 계산할 수 있다. 평판과 튜브 검사 모델링에 사용된 데이터들은 Table 1과 2에 각각 정리하였다.

$$Z = \frac{-j\omega \int \bar{B} \cdot d\bar{S}}{I} = \frac{-j\omega \oint \bar{A} \cdot d\bar{l}}{I} \quad (10)$$

Table 1 Surface coil data used in plate inspection modeling

평판 검사 모델링			
평판의 전도도	0.99×10^6	코일 크기	코일 폭 : 4 [mm]
평판의 비투자율	1		코일 두께 : 2 [mm]
평판두께	1.1, 4 [mm]		코일 외경 : 10 [mm]
입력전류 밀도	3×10^6 [A/m ²]		코일 내경 : 2 [mm]
Lift-off	0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.4 [mm]		권선수 : 50

Table 2 Bobbin absolute coil data used in tube inspection modeling

튜브 검사 모델링			
튜브의 전도도	0.986×10^6	코일 크기	코일 외경: 16.268[mm]
튜브의 비투자율	1		코일 내경: 14.128[mm]
입력전류 밀도	$3 \times 10^6 [A/m^2]$		코일 두께: 1.07 [mm]
			코일 폭 : 1.07 [mm]
튜브 크기	외경: 19.05 [mm]	코일 권선수	36
	내경: 16.91 [mm]		
	두께: 1.07 [mm]		

4. 유한요소해석 결과

4.1. 평판 검사 모델링

4.1.1. 리프트 오프 및 전도도 궤적

표면코일과 피검사체 사이의 거리가 가까워지면 코일의 자계가 피검사체와 결합하는 정도가 커지므로 비자성 도체에서는 와전류가 발생하여 코일에 쇄교되는 자속을 감소시키고 저항은 증가시켜, 임피던스 평면상에서 오른쪽 아래로 궤적이 발생된다. 이러한 리프트 오프 궤적을 Fig. 2에 보였으며, 전도도가 다른 두께 4 mm의 여러 비자성 합금에서 100 kHz 주파수를 사용하였을 때의 궤적들을 함께 보였다. 또, 리프트 오프가 같은 경우 여러 합금에서의 작동점을 연결하여 형성된 전도도 궤적도 나타내었는데, 전도도가 커지면 작동점이 시계방향으로 아래로 이동한다는 것을 알 수 있다. 리프트 오프가 작아야 자계와 피검사체의 결합도가 높아져서 신호 민감도가 좋아지는데, 리프트 오프를 일정하게 유지하지 못하면 임피던스가 민감하게 변하여 그 궤적이 잡음의 역할을 하게 된다. 따라서, 리프트 오프 궤적을 수평방향으로 발생되게 하고 신호의 수직방향 변화에 더 주목하는 신호 도시법이 사용되고 있다[14].

4.1.2. 탐상 주파수 변화의 영향

Fig. 3은 탐상 주파수가 증가함에 따라 각 물질에서의 작동점이 시계방향으로 아래쪽으로 이동하는 것을 보여준다. 그런데, 50 kHz의 낮은 주파수에서

은 인코넬에서의 리프트 오프 궤적과 전도도 궤적 사이의 각이 매우 작으므로, 피검사체 일부분의 전도도 변화가 리프트 오프 잡음으로 잘못 해석될 수 있을 것이다. 이 경우, 탐상주파수를 증가시키면 Fig. 3과 같이 두 궤적 사이의 사잇각이 커지게 된다. 따라서, 전도도 변화를 찾기 위한 탐상 주파수는 두 궤적 사이의 각을 최대로 만들어 주는 주파수가 가장 적절할 것이며, 그러한 사잇각이 형성되는 곳은 전도도 궤적의 무릎점 근처임을 알 수 있다.

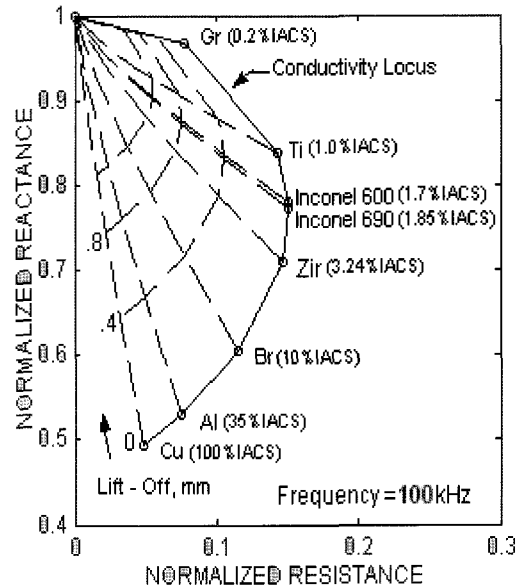


Fig. 2 Lift-off and conductivity loci

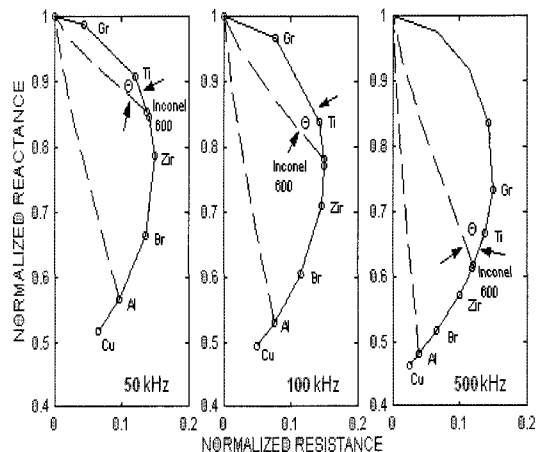


Fig. 3 Variation of discrimination angle due to frequency increase

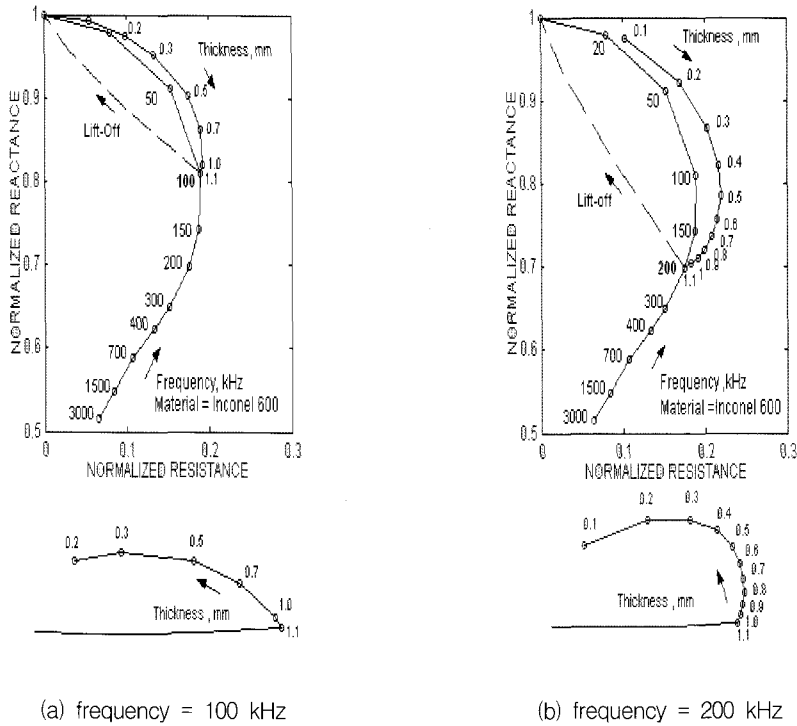


Fig. 4 Frequency and thickness reduction loci of Inconel tube that is modeled as a plate

4.1.3. 인코넬 평판에서의 주파수 및 두께감소 궤적

코일의 크기가 튜브의 곡률에 비해 충분히 작다고 한다면, MRPC(motorized rotating pancake coil)로 인코넬 튜브를 검사하는 것은 표면형 절대코일로 인코넬 평판을 검사하는 것으로 모델링 할 수 있다. Fig. 4에 두께 1.1 mm의 인코넬 평판에서 주파수 변화와 튜브의 두께감소에 따른 궤적을 보였다. 주파수가 100 kHz와 200 kHz일 때 리프트 오프 궤적과 두께감소 궤적을 함께 보였는데, 리프트 오프 궤적을 수평이 되도록 회전시킨 후의 두께감소 궤적을 아래에 별도로 보였다. 주파수가 증가하면 작동점이 시계방향으로 아래쪽으로 이동하며, 두께가 감소하면 작동점이 반시계 방향으로 위로 이동하는데 두께가 얇아질수록 작동점 사이의 간격이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 인코넬 평판의 두께변화를 효과적으로 측정하려면, 리프트 오프 궤적과 두께변화 궤적이 서로 잘 구별될 수 있도록 두 궤적 사이의 각이 거의 직각이 되는 것이 좋을 것이다. 그러므로 Fig. 4의 비교에서 100 kHz보다는 200 kHz의 탐상 주파수가 두께변화 검사에 더 유리할 것이다.

4.2. 튜브 검사 모델링

4.2.1. 충전율 및 주파수 궤적

튜브 검사에서 코일과 튜브의 단면적 비로 계산되는 충전율은 코일의 자계가 피검사체와 결합되는 정도를 나타내는 수치이므로 그 영향은 리프트 오프 효과와 거의 비슷할 것이다. 여러 주파수에서 두께 1.07 mm인 인코넬 튜브를 내삼형 절대코일로 검사하는 경우의 충전율 궤적을 계산하여 Fig. 5에 보였는데, 그 발생방향이 리프트 오프 궤적과 매우 흡사함을 볼 수 있다. 또한, 함께 보인 주파수 궤적은 Fig. 4의 표면형 절대코일에 의한 주파수 궤적과는 약간 다르다는 것을 알 수 있다.

4.2.2. 튜브에서의 두께변화 궤적

Fig. 6은 인코넬 튜브의 두께변화를 내삼형 절대코일로 검사하는 경우의 결과를 보인 것으로, 튜브의 두께가 1.07 mm이고 충전율이 0.8일 때 100 kHz 탐상 주파수에서 충전율과 두께변화 궤적이 거의 직각이 되는 것을 볼 수 있다. 평판의 경우와 마찬가지로

지로 이렇게 사잇각이 직각이 되도록 하는 주파수가 두께변화 검사에 유리한 탐상 주파수가 될 것이다.

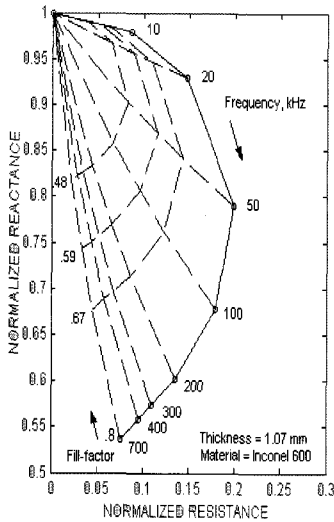


Fig. 5 Fill factor and frequency loci

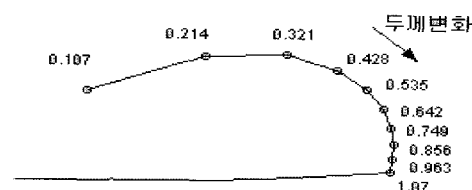
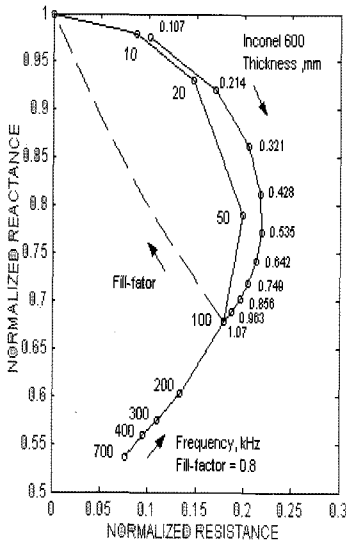
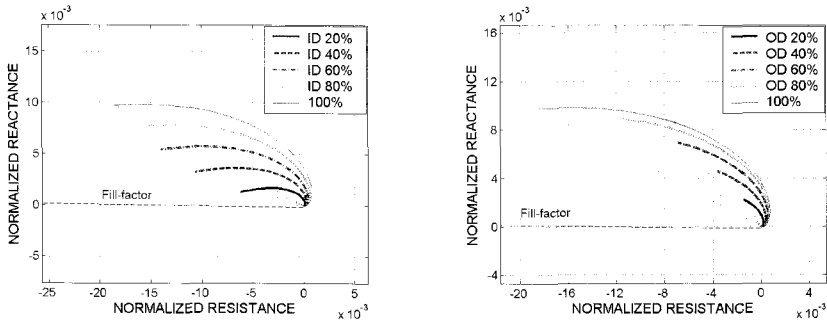


Fig. 6 Thickness variation locus at 100 kHz

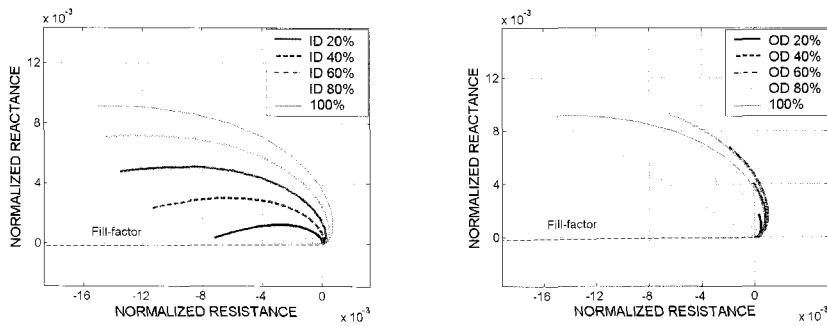
4.2.3. 내, 외부 결함의 깊이 및 주파수 변화에 따른 신호학적 특성

Fig. 7은 폭 0.428 mm, 깊이가 튜브 두께의 20, 40, 60, 80, 100%인 홈 형태의 내부(ID) 및 외부(OD) 결함들을 100, 300, 500 kHz의 주파수로 검사할 때, 발생되는 절대신호들을 충전율 계적이 수평하게 되도록 회전시켜 보인 것이다. 같은 주파수에서 내, 외부 결함신호의 크기는 깊이가 깊을수록 더 커지는 것을 볼 수 있다. 또한, 내부결함 신호의 두 끝점을 잇는 선이 음의 수평축과 이루는 각은 어떤 주파수에서건 100% 결함신호의 두 끝점을 잇는 선이 음의 수평축과 이루는 각보다 작으며, 그 각들은 깊이가 깊어질수록 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 반면에, 외부결함 신호에서 형성되는 각들은 어떤 주파수에서건 100% 결함신호의 두 끝점을 잇는 선이 음의 수평축과 이루는 각보다 크며, 깊이가 깊어질수록 그 각들은 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 한편, 같은 깊이의 결함에서 주파수가 증가하면 내부결함의 경우에는 그 각들이 약간씩 감소하는데 반해, 외부결함의 경우에는 그 각들이 상당히 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 특성은 내, 외부 결함을 구별하는데 활용될 수 있을 것이다. 주파수가 각각 50, 400 kHz 일 때 폭 0.856 mm, 깊이 60%인 내, 외부 결함으로부터의 신호들이 정규화 임피던스 평면상에 나타나는 모습을 Fig. 8에 보였다. 충전율 계적이 수평하게 되도록 회전시킨 후의 신호들도 함께 보였는데, 낮은 주파수에서는 내, 외부 결함의 구별이 어렵지만, 주파수를 높이면 확실하게 구별되는 것을 볼 수 있다. 이는 표피효과에 의한 위상 지연[2-4] 때문으로, 주파수가 높아지면 표피두께가 감소하여 외부결함의 경우에는 위상 지연이 더욱 증가하므로 신호의 기울기가 내부결함신호와 더 차이가 나게 된다.

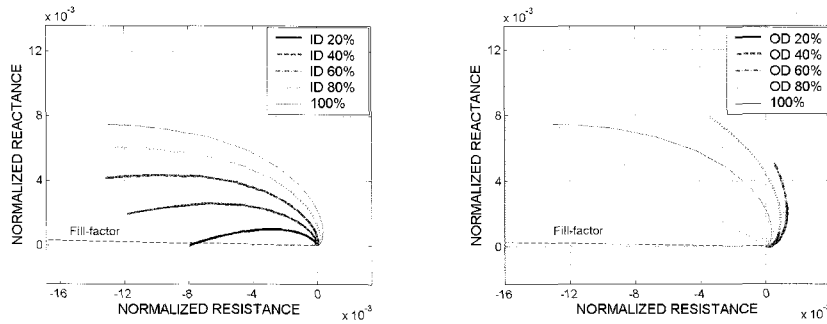
비교를 위하여 같은 결함들에 대한 차동신호들도 조사하였다. 차동신호는 ASME code[7]에 따르면 100% 관통결함으로 인한 신호의 직선부분을 음의 수평축과 40°의 각도를 이루도록 회전시켜 도시한다. 본 논문에서는, 결함의 깊이가 일정하고 원주방향의 길이만 증가하는 경우 차동신호의 기울기는 전혀 변하지 않고 신호크기만 커진다는 이전의 연구결과[6,8]를 활용하여, 절단된 100% 결함으로부터의 신호를 음의 수평축과 40°의 각도를 이루도록 회전시켰으며, 이를 위해 수치해석 계산에 의한



(a) ID and OD defect signals at 100 kHz



(b) ID and OD defect signals at 300 kHz



(c) ID and OD defect signals at 500 kHz

Fig. 7 Absolute signals from ID and OD defects obtained at 3 different frequencies

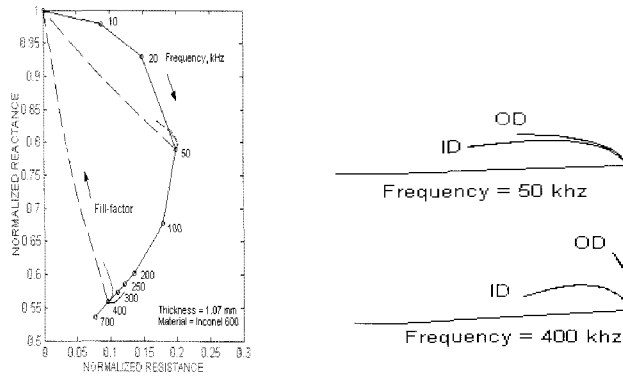
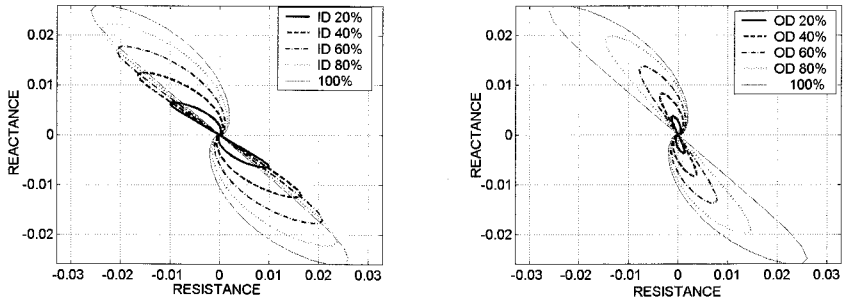
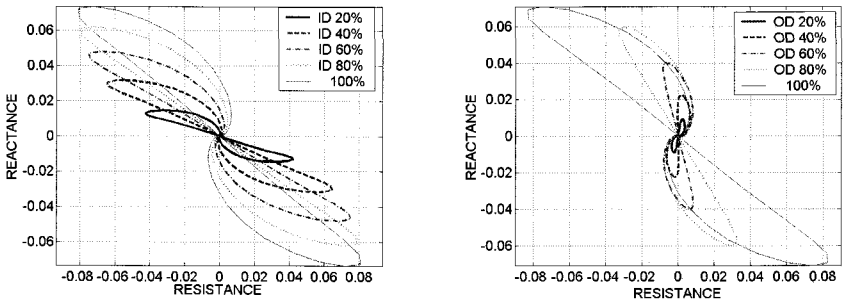


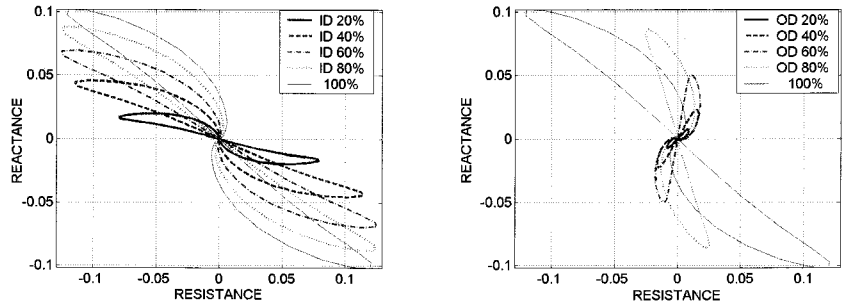
Fig. 8 Separation of ID and OD defect signals using higher frequency



(a) ID and OD defect signals at 100 kHz



(b) ID and OD defect signals at 300 kHz



(c) ID and OD defect signals at 500 kHz

Fig. 9 Differential signals from ID and OD defects obtained at 3 different frequencies

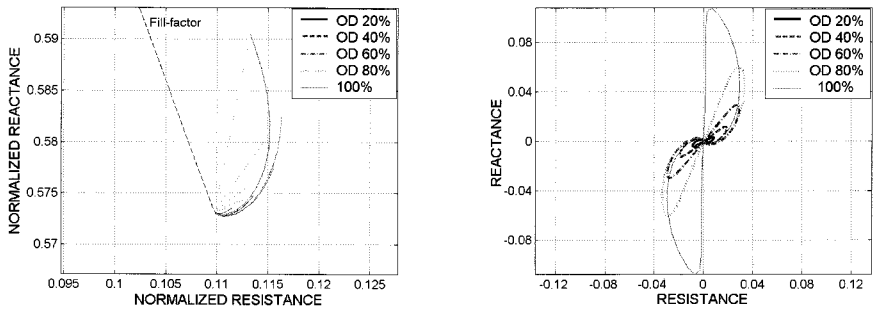


Fig. 10 Comparison of absolute and differential signals obtained at 300 kHz before rotation

100% 결합신호를 얼마나 회전시켜야 하는지를 결정하고, 다른 결합신호들도 같은 각도만큼 회전시켜 도시하였다. 그 결과를 Fig. 9에 보였는데, 차동신호에서도 절대신호와 마찬가지로, 깊은 결합에서 더 큰 신호가 발생되고, 내부결합 신호가 음의 수평축과 형성하는 각들은 어떤 주파수에서건 100% 결합신호가 형성하는 각보다 작으며 그 각들은 깊이가 깊어질수록 증가하고, 외부결합 신호가 형성하는 각들은 항상 100% 결합신호가 형성하는 각보다 크며 그 각들은 깊이가 깊어질수록 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 같은 깊이의 내, 외부결합에서 주파수가 증가할 때 절대신호에서 나타났던 신호 기울기의 변화 경향들이 똑같이 차동신호에서도 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 절대신호와 차동신호가 유사한 경향을 나타내는 이유는 다음과 같이 설명될 수 있다. Fig. 10은 300 kHz의 주파수를 사용하였을 때 외부결합에서 발생하는 절대 및 차동 신호들을 계산하여 도시한 것으로 아무런 신호회전도 하지 않은 상태를 보인 것이다. 차동신호를 앞 코일의 임피던스로부터 뒷 코일의 임피던스를 뺀 결과라고 하면, 결합에 접근할 때 앞 코일의 임피던스는 결합의 영향을 받아 변화되 뒷 코일의 임피던스는 아직 변하지 않는 거리까지는 차동신호와 절대신호가 같은 형태를 보일 것이다. 즉, 차동신호의 시작 부분은 절대신호와 똑같은 형태가 될 것이며, Fig. 10에서 이를 확인할 수 있다. 따라서 두 신호는 여러 유사한 경향을 나타내게 되며 단지, 신호의 기울기 각도만 서로 다른 정의에 의해서 절대코일이 약간 더 큰 값을 갖게 된다.

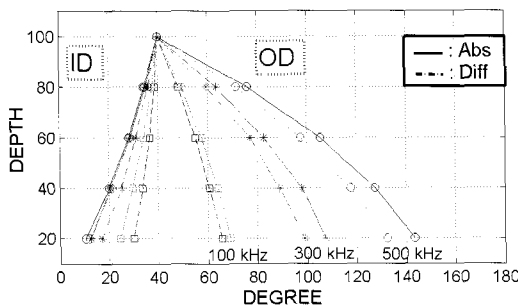


Fig. 11 Slope angle versus defect depth calibration curves of absolute and differential signals

내, 외부결합의 깊이에 따른 절대신호와 차동신호의 기울기 각도를 측정하여 대응곡선을 Fig. 11과 같이 작성하였다. 여기서는 비교를 위해 절대코일 신호의 기울기를 100% 결합신호의 두 끝점을 잇는 선이 음의 수평축과 40°의 각도를 이루도록 회전시켰고, 다른 신호들에도 같은 각도만큼 적용하였다. 작성된 대응곡선을 보면, 외부결합 신호의 경우에는 절대신호의 기울기 각도가 차동신호보다 약간 더 크며, 내부결합 신호의 경우에는 절대신호의 기울기 각도가 차동신호에 비해 약간 작다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

차동코일 신호들은 온도변화나 탐촉자 흔들림의 영향을 적게 받고 갑작스런 변화에 민감하지만, 신호해석이 어렵고 서서히 변화하는 물질특성이나 두께감소는 검출하기 어렵다. 반면에 절대코일 신호들은 피검사체의 감육과 같은 크기나 물질특성 변화를 잘 반영하고 신호해석이 단순하지만, 온도나 탐촉자 흔들림의 영향을 크게 받는다. 따라서 서로의 장, 단점을 상호보완적으로 사용하면 검사의 신뢰도 향상과 신호해석에 큰 도움이 될 것이다. 본 논문에서는 인코넬 평판과 튜브에서 발생하는 절대코일 신호와 특성을 예측해 보기 위하여 유한요소 해석을 수행하였고, 리프트 오프, 충전율, 전도도, 주파수, 피검사체의 두께, 내, 외부 결합 등의 다양한 변수들이 신호에 미치는 영향을 임피던스 평면도해로 작성하였다. 이 과정에서 절대코일 신호들을 효과적으로 해석하거나 구별하는데 도움이 될 많은 지식을 축적할 수 있었다. 최적 주파수의 결정과 내, 외부 결합의 판별을 위한 실용적인 방법을 알게 되었고, 절대 및 차동신호 특성의 유사성을 이해하게 되었으며, 결합깊이와 주파수 변화에 따른 신호의 기울기를 그래프로 작성하였다. 절대신호와 차동신호의 기울기를 비교해 본 결과, 절대신호의 기울기 변화가 더 크기 때문에 신호를 잡음 없이 얻을 수만 있다면 절대코일이 외부결합의 깊이판별에 더 유리할 것으로 판단되었다. 수치해석 결과들은 잡음이 없기 때문에 어떤 비정상적인 부위가 신호에 미치는 영향을 명확히 파악할 수 있으며, 실제 가공이 어려운 내부결합의 깊이변화로 인한 신호들도 쉽게 생성할 수 있었다. 이와 같이 수치해석은 탐상신호에서 결합의 존재를 찾아내거나

찾아낸 결함신호로부터 결함에 대한 정보를 추출할 때 필요한 배경지식을 제공하는 유용한 수단이 될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-107) 주관으로 수행된 과제임.

참고문헌

- [1] D. J. Hagemaiier, "Eddy Current Impedance Plane Analysis," *Materials Evaluation*, Vol. 41, pp. 211-218, (1983)
- [2] V. S. Cecco, G. Van Drunen and F. L. Sharp, "Eddy Current Testing," pp. 8-142, GP courseware, Inc., Columbia, MD 21044, (1987)
- [3] D. J. Hagemaiier, "Fundamentals of Eddy Current Testing," pp. 25-82, ASNT, (1990)
- [4] E. Dane Harvey, "Eddy Current Testing Theory and Practice," pp. 15-52, ASNT, (1995)
- [5] Sung-Jin Song and Young-Kil Shin, "Eddy current flaw characterization in tubes by neural networks and finite element modeling," *NDT & E International*, Vol. 33, No. 4, pp. 233-243, (2000)
- [6] 신영길, "와전류 탐상신호 예측을 위한 3차원 수치해석 프로그램 확립", 기초전력공학공동연구원, 과제관리번호 96-중-02, 최종보고서, (1999)
- [7] ASME Section V, Article 8, Appendix I, "Eddy Current Examination Method for Installed Nonferromagnetic Steam Generator Heat Exchanger Tubing," (1986)
- [8] 이항범, 원성연, 신영길, "3차원 관결함에 대한 와전류탐상의 유한요소해석", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 3, pp. 191-199, (2000)