

두께 평가를 위한 차폐된 반사형 펄스 와전류 탐촉자의 설계

Design of a Shielded Reflection Type Pulsed Eddy Current Probe for the Evaluation of Thickness

신영길*[†], 최동명*

Young-Kil Shin*[†] and Dong-Myung Choi*

초 록 본 논문에서는 반사형 펄스와전류 탐상법을 사용하여 두께를 효과적으로 평가하기 위해 여러가지 탐촉자 모델들을 설계하고, 수치해석 방법을 사용하여 피검사체의 두께 변화에 따른 펄스와전류 신호의 특징 변화, 민감도 등을 조사하였다. 반사형 탐상에서는 센서코일이 여자코일 자체보다는 피검사체에 형성된 와전류로 인한 자계를 감지해야 하므로, 구리-페라이트로 차폐한 모델들과 페라이트만으로 차폐한 모델들에서의 펄스와전류 신호를 조사하였다. 이러한 신호들에서 두께 판별에 유용한 특성을 조사하여 신호의 피크값과 zero crossing time을 선정할 수 있었고, 이들의 두께변화에 대한 민감도를 조사하였다. 그 결과, 두 종류의 차폐 모델들에서 모두 피크값 민감도가 zero crossing time 민감도보다 효과적이라는 것을 알 수 있었고, 구리-페라이트로 차폐한 모델 보다 페라이트만으로 차폐한 모델에서의 피크값 민감도가 훨씬 더 높다는 것을 알 수 있었다.

주요용어: 펄스와전류, 반사형, 차폐, 여자/센서 코일, 두께평가, 수치해석방법

Abstract For better evaluation of material thickness by using the reflection type pulsed eddy current method, various probe models are designed and their response signals, characteristics, and sensitivities to thickness variation are investigated by a numerical analysis method. Since the sensor needs to detect magnetic fields from eddy currents induced in a test material, not from the exciter coil, two types of models that are shielded by the combination of copper and ferrite and only by ferrite are considered. By studying response signals from these shielded probe models, the peak value and the zero crossing time are selected as useful signal features for the evaluation of material thickness. Investigation of sensitivities of these two features shows that the sensitivity of peak value is more useful than that of zero crossing time and that the probe shielded only by ferrite gives much better sensitivity to thickness variation.

Keywords: Pulsed Eddy Current, Reflection Type, Shield, Exciter/Sensor Coil, Thickness Evaluation, Numerical Analysis Method

1. 서론

펄스와전류(pulsed eddy current; PEC) 탐상은 1950년대 말 원자력에너지 산업과 같은 특수 분야에서 적용되기 시작하였다. 일반적인 와전류탐상에

서는 단일 또는 소수의 주파수를 사용함으로써 표 피효과에 의한 제한을 많이 받는다. 하지만 여자코일에 펄스 전류를 흘려주고 그로 인해 전도성 피검사체에 발생했다가 사라지는 펄스 와전류의 영향을 센서로 측정하여 검사하는 펄스와전류 탐상에서는

이론적으로 매우 넓은 주파수 대역폭을 가지는 펄스 신호를 사용하므로, 펄스와전류 신호는 여러 주파수 성분에 해당하는 여러 깊이에서의 정보를 포함할 것으로 기대되고 있으며, 자속의 침투깊이 또한 일반적인 와전류탐상에 비해 더 깊어질 것이라고 예상된다[1,2]. 또한 펄스와전류 탐상은 비접촉식이므로 단열재나 코팅을 제거하지 않고도 관이나 철판의 두께를 측정할 수 있으며 피검사체가 고온이거나 표면 상태가 거칠어도 측정이 가능하다는 장점이 있고, 신호가 lift-off 변화에 큰 영향을 받지 않는다고 알려져 있다[3]. 한편, 주어진 시간 내에서 펄스전류에 의해 소모되는 에너지는 정현파 전류에 비해 상대적으로 적으며, 따라서 일반 와전류 탐상에 비해 훨씬 높은 입력전압을 사용할 수 있다는 장점이 있다[2].

펄스와전류 탐상의 기본 형태는 여자코일과 센서코일이 피검사체의 한쪽 면에만 위치하는 반사형(reflection system)과 피검사체의 양쪽 면에 각각 위치하는 투과형(through transmission system)[4]으로 대별된다. Waidelich는 cladding 된 금속의 두께 측정을 위해 반사형 펄스와전류 탐상시스템을 제안하였으며, lift-off가 신호에 미치는 영향을 줄이기 위해 신호 교차점의 활용방법을 연구하였다[3]. 반사형 시스템에서는 피검사체에 생성되어 반사되는 와전류의 영향을 센서가 민감하게 반영하도록 하기 위하여, 여자코일의 자계가 센서코일에 직접 도달하지 못하도록 차폐하는 것이 중요하다. 또한 차폐는 자속선이 퍼지는 것을 막고 탐상에너지를 관심영역에 집중시켜주는 역할을 하므로 분해능을 높여 준다[2]. Renken[5]이나 Wittig[6]는 차폐체로 구리를 사용한 바 있다. 이러한 차폐체의 설계는 대부분 경험이나 실험을 통해서 이루어져 왔는데, 차폐체의 재질, 위치 및 두께, 코일의 구경 및 방향 설정을 위해서는 보다 정밀한 수치해석을 통한 연구가 필요하다. Allen[7]은 투과형 펄스와전류 시스템을 대상으로 펄스에 포함된 주요 고조파 주파수들을 사용하여 페이지로 표현된 확산방정식을 유한요소법으로 풀고, 그 결과들을 합하여 다시 시간영역 표현으로 바꾸어 펄스신호를 예측한 바 있고, Xiao-wei Dai[8]는 맥스웰 분포된 전류밀도를 입력으로 하고 유한요소법과 차분법이 혼합한 수치모형을 사용하여 금속내부에서의 펄스와전류 분포를 예측하였고, 반 무한평면위의 코일에 유도되는 전압을 계산하여 해석적인 해와 비교한 바 있다.

펄스와전류 탐상에서의 신호는 코일을 이용한 기전력이 될 수도 있고, 반도체 소자를 사용한 자속이 될 수도 있다[9]. 탐상신호의 처리는 아직 일반 와전류탐상과 같은 수준으로 개발되지는 못한 상태인데, 그것은 아직 펄스와전류 신호의 특성이 완전히 파악되지 못했기 때문이며, 보다 많은 정보를 신호로부터 추출하기 위해서는 펄스신호가 형성되는 원리에 대한 연구가 선행되어야 한다고 판단된다. 이를 위해 본 논문에서는 send/receive 형태의 반사형 차폐 탐촉자를 설계하면서 코일들의 위치, 차폐물질의 영향, 전도도가 높거나 낮은 피검사체의 두께변화로 인한 신호특성 변화, 신호 민감도 등을 조사하였다.

2. 펄스 와전류탐상의 수치 모델링

본 연구에서 설계한 반사형 탐촉자는 Fig. 1과 같이 여자코일과 센서코일로 구성되어 있고, 여자코일의 자계가 센서코일에 직접적으로 영향을 미치지 않도록 두 코일을 모두 차폐시켰다. 이러한 탐촉자 모델에서의 전자기적 현상을 수치적으로 해석하고, PEC 신호를 예측하였다. 펄스전류는 시간에 따라 값이 변하므로 과도해석이 필요하고, 이를 위해 공간의 모델링에는 유한요소법을 사용하였지만 시간에 대해서는 차분법을 사용하여 모델링 하였으며, 미소시간폭(time step) 크기의 제한이 없는 역진차분법을 사용하였다.

펄스와전류 탐상의 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기에서 μ , σ , V , \bar{A} , \bar{J}_s 는 각각 투자율, 전도도, 전위, 벡터 자위, 인가전류밀도를 의미한다. Fig. 1과 같은 상황에서는 원통좌표계로 지배방정식을 표현할 수 있는데, 공간에 대한 유한요소 정식화를 행하면 다음과 같은 행렬식을 얻게 된다.

$$[S]\{A\} + [C] \left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\} = \{Q\} \quad (2)$$

여기에서 각 계수행렬은 다음과 같이 표현되며, N 은 요소의 절점에서 형상함수를 뜻한다.

$$[S] = \int_v \frac{1}{\mu} \left\{ \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} + \frac{N_i}{r} \right) \left(\frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{N_j}{r} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} dv \quad (3)$$

$$[C] = \int_v \sigma N_i N_j dv \quad (4)$$

$$\{Q\} = \int_v J_s N_i dv \quad (5)$$

다음으로, 시간에 대한 미분항을 처리하기 위하여 미소시간폭을 설정하고 그 시간 구간 내에서는 자위값이 선형으로 변화한다고 가정한다. 본 연구에서는 역진 차분법을 사용하였는데, 역진차분법에서는 시간 $t_{n+1} = t_n + \Delta t$ 에서 모든 항들을 계산하므로 시간에 대한 미분항은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$\left\{ \frac{\partial A}{\partial t} \right\}^{n+1} = \frac{\{A\}^{n+1} - \{A\}^n}{\Delta t} \quad (6)$$

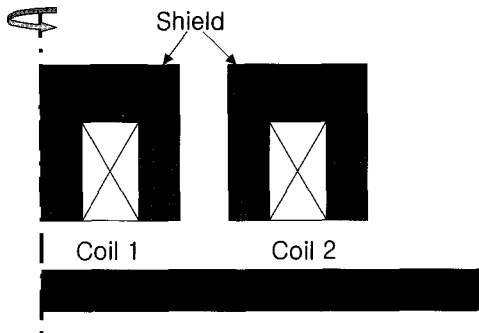


Fig. 1 Reflection type send/receive PEC probe to design

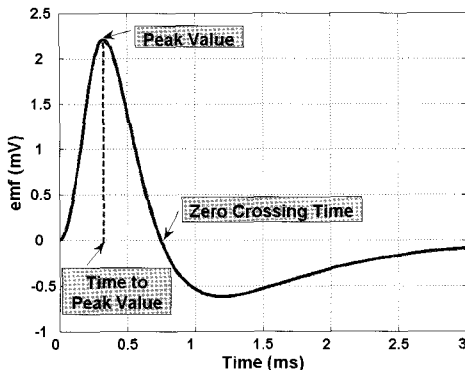


Fig. 2 General shape of PEC signal

여기에서 $\{A\}^{n+1}$ 은 시간 $t = t_{n+1}$ 에서 계산된 $\{A\}$ 값이다. 식 (6)을 사용하여 식 (2)를 다시 쓰면, 식 (7)와 같은 반복계산 공식을 얻을 수 있고, 이를 통해 특정 시각에서의 해를 구할 수 있다.

$$\left[\frac{1}{\Delta t} [C] + [S] \right] \{A\}^{n+1} = \{Q\}^{n+1} + \frac{1}{\Delta t} [C] \{A\}^n \quad (7)$$

펄스와전류검사에서 탐상신호는 센서코일에 유도되는 기전력으로, 센서코일 영역의 절점 값들로부터 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$V_{emf} = \oint \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot d\vec{l} = \frac{\{A\}^{n+1} - \{A\}^n}{\Delta t} 2\pi r_c \quad (8)$$

여기서 r_c 는 센서코일을 형성하는 요소들의 중심에서의 r 값을 의미한다.

3. 차폐 탐촉자 설계 및 두께측정 성능 평가

3.1. 구리-페라이트로 차폐된 탐촉자

일반적인 펄스와전류 신호의 형태는 Fig. 2와 같은데, 신호의 특성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 피크값(peak value), 피크값 도달시간(time to peak value), 신호가 양에서 음의 값으로 처음 변할 때의 시간(zero crossing time)을 조사하였다. 먼저, 구리와 페라이트를 차폐체로 사용하고 여자코일(exciter coil)과 센서코일(sensor coil)의 위치를 교차하여 Fig. 3과 같이 네 개의 모델을 선정하여 테스트 하였다. Fig. 3에서 D는 여자코일 차폐체와 센서코일 차폐체간의 거리(mm)를 나타낸다. 탐촉자 모델들의 성능을 시험하기 위해 구리 평판에는 200 μ S 동안 펄스를 인가하고, Inconel 600 평판의 경우에는 15 μ S 동안 펄스를 인가하여 PEC 신호를 조사하였다.

Fig. 4는 Fig. 3에서 D=3 mm로 디자인된 각각의 탐촉자 모델을 구리 평판 위에 위치한 상태에서 펄스전류를 인가할 때 나타나는 PEC 신호를 수치적으로 계산한 것이다. 이렇게 예측된 신호에서 신호의 피크값, 피크값 도달시간, zero crossing time 등을 조사하여 Fig. 5, 6, 7에 각각 보였다. Fig. 5에 의하면 두께가 증가할수록 피크값은 감소하며, Fig. 6에

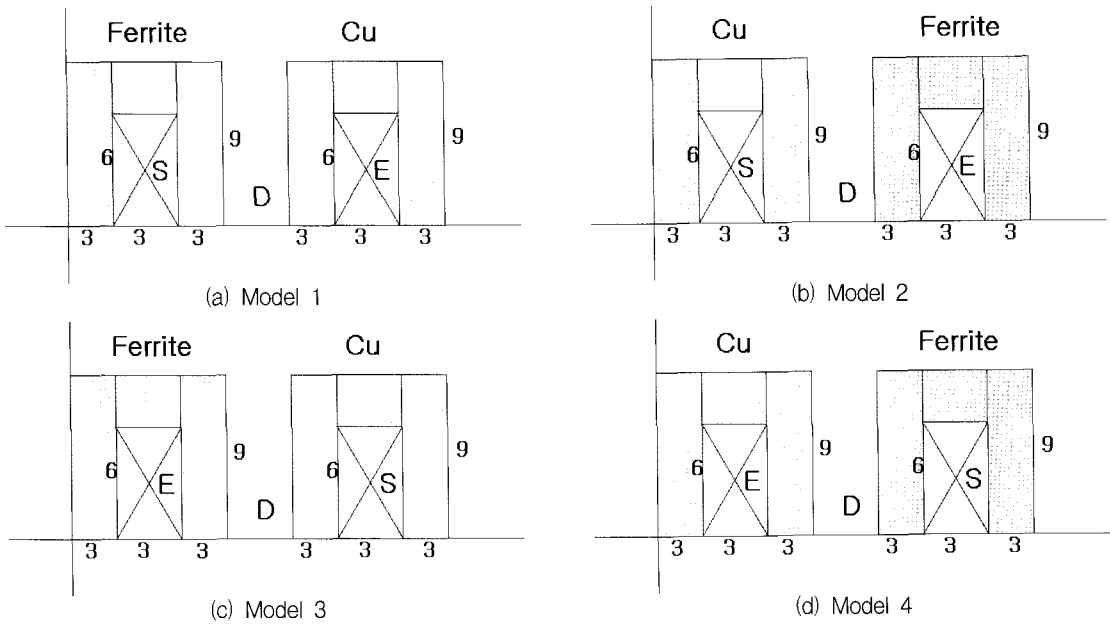


Fig. 3 Four design models using copper and ferrite shields [unit = mm]

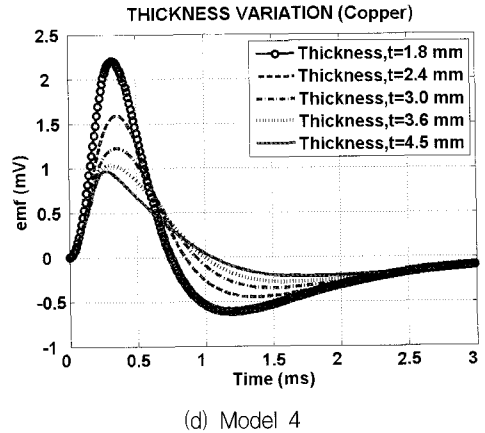
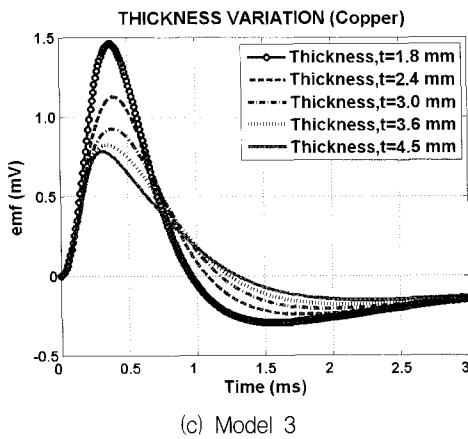
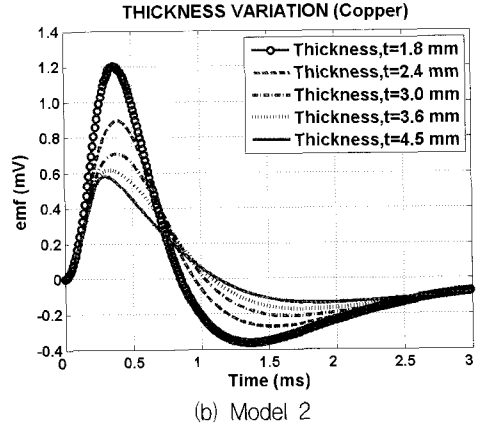
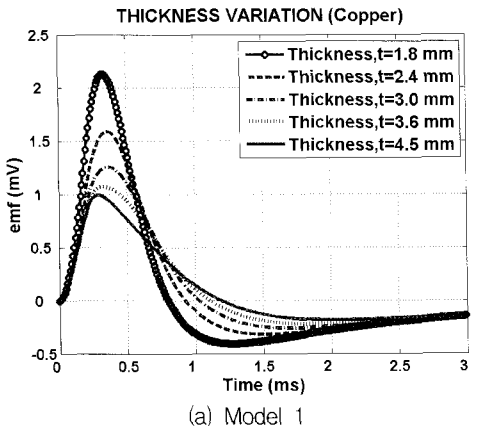


Fig. 4 PEC signals from copper plate using design models in figure 3 [D = 3 mm]

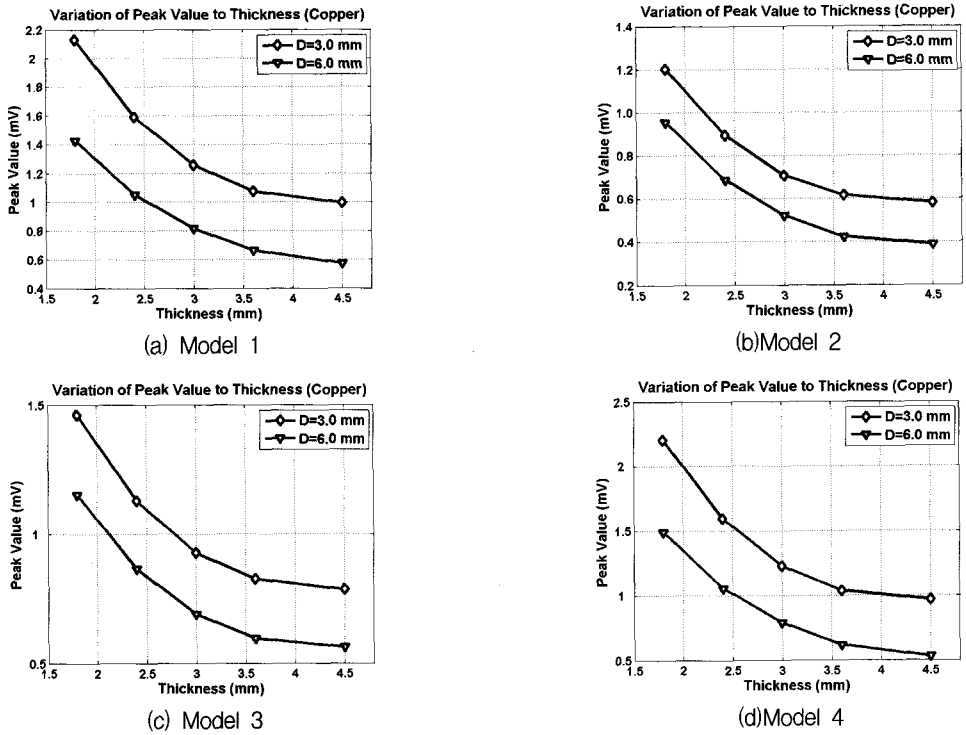


Fig. 5 Peak value variations due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 3 are used

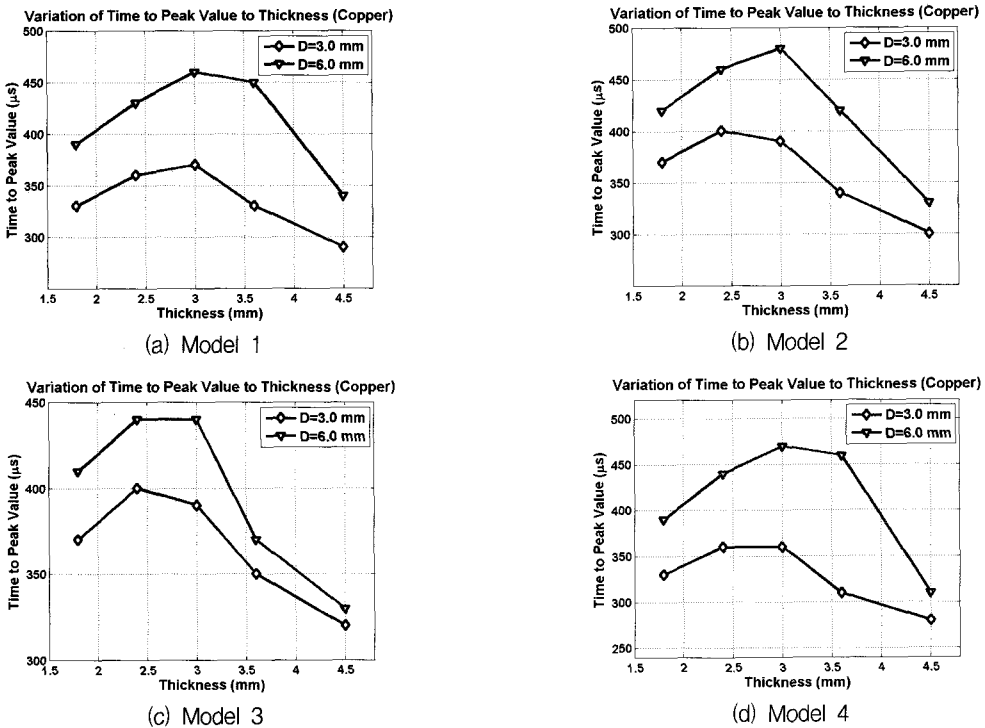


Fig. 6 Variations of time to peak value due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 3 are used

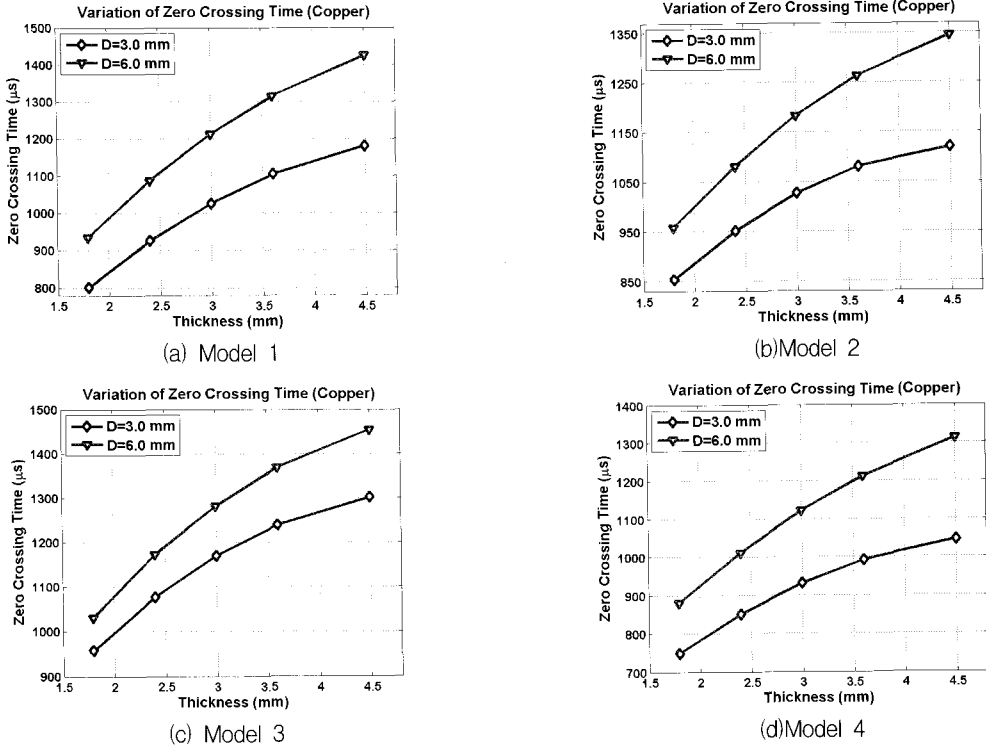


Fig. 7 Variation of zero crossing time due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 3 are used

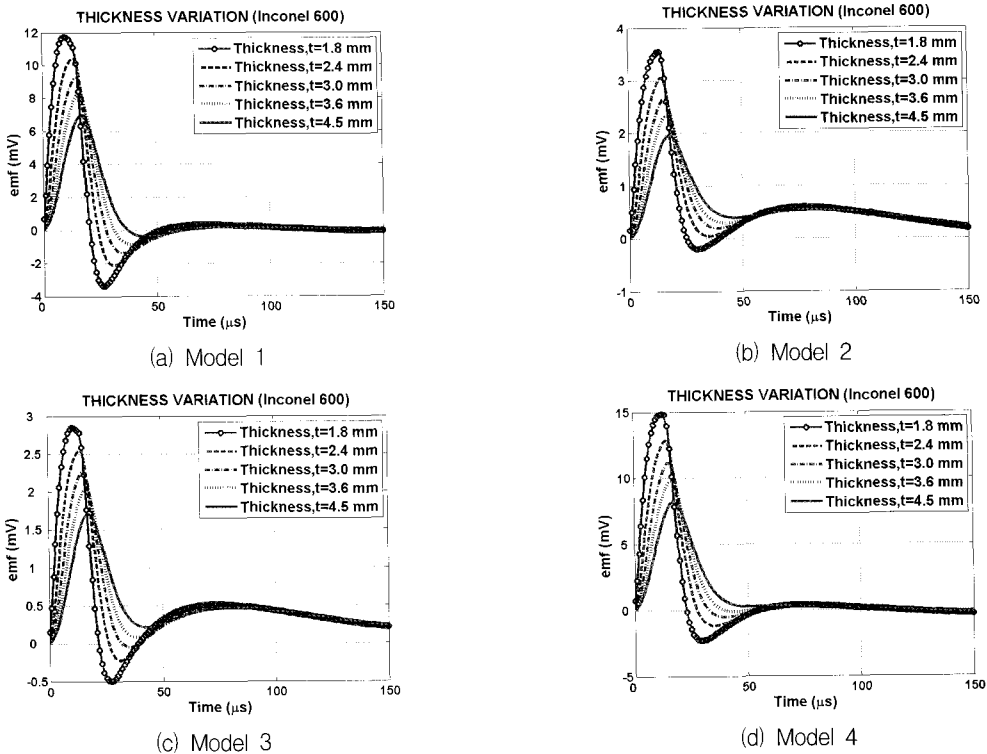


Fig. 8 PEC signals from inconel plate using design models in figure 3 [$D = 3\text{ mm}$]

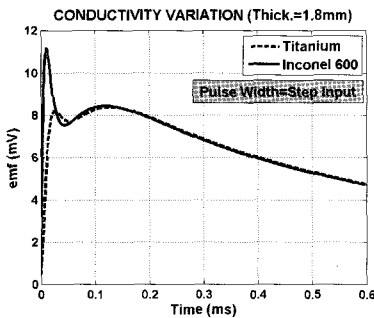
보인 피크값 도달시간은 일정 깊이까지는 증가하다가 그 이상이 되면 감소한다. 그러나 Fig. 7에 보인 zero crossing time은 두께증가와 거의 선형적으로 비례하여 증가하는 것을 볼 수 있다. 차폐체간의 거리, D가 3 mm에서 6 mm로 증가한 경우도 조사하여 함께 보였는데, 피크값은 작아지고 피크값 도달시간이나 zero crossing time은 증가하는 것으로 나타났다.

모델 1과 모델 4의 신호와 피크값들을 비교해 보면 여자코일이 안쪽에 위치한 모델 4에서 신호의 피크값이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, 모델 2와 모델 3의 신호와 피크 값을 비교해 보아도 여자코일이 안쪽에 위치한 것이 신호의 피크값이 더 크다. 한편, 여자코일이 안쪽에 위치한 모델 3과 모델 4의 신호들을 비교해 보면 여자코일은 구리로 차폐하고 센서코일은 페라이트로 차폐한 것에

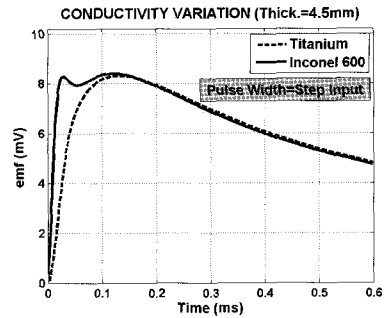
서 신호의 피크값이 더 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그러나 두께변화에 따른 피크값의 변화량 자체 보다는 신호의 피크값 민감도를 조사하는 것이 더 중요하다고 판단되었다. 피크값 민감도는 두께변화에 따른 신호의 피크값 변화를 신호의 피크값들 중에서 최대치로 나누어 정규화 시킨 것이라고 정의하고, 이를 계산하여 Table 1에 정리하였다. 이 결과들을 보면 두 코일 차폐체간의 간격이 클수록, 그리고 전도도가 높을수록 두께변화에 대한 피크값 민감도가 좋아지는 것을 알 수 있다. 두 코일 차폐체간의 간격이 증가하면 비록 신호의 크기는 작아지더라도 여자코일의 자체가 센서코일에 직접적으로 미치는 영향이 줄어들고 따라서 피검사체의 상태를 신호에 반영하는 와전류의 영향이 증가할 것이며, 피검사체의 전도도가 높으면 와전류의 크기도 증가하기 때문에 이러한 결과가 나타난 것이

Table 1 Sensitivity of peak value to thickness variation obtained from probe models shielded by copper and ferrite

	구리		텅스텐		인코넬 600	
	D=3 mm	D=6 mm	D=3 mm	D=6 mm	D=3 mm	D=6 mm
Model 1	53.3%	59.78%	41%	46.5%	40.7%	47%
Model 2	51.6%	59.4%	42.17%	49.17%	44.96%	51.7%
Model 3	46.2%	51.15%	35.8%	41.9%	40%	47.4%
Model 4	56.16%	64.76%	45%	51.7%	44.7%	52%

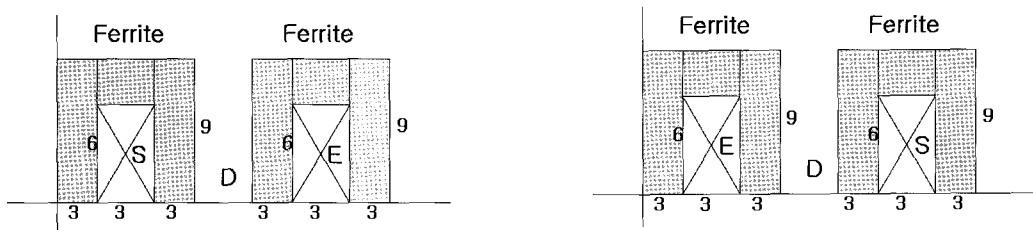


(a) Thickness = 1.8 mm



(b) Thickness = 4.5 mm

Fig. 9 Step responses obtained by model 1 from low conductive plates with different thickness



(a) Model 5

(b) Model 6

Fig. 10 Two probe design models using only ferrite shields [unit = mm]

라고 판단된다. 한편, zero crossing time도 두께변화에 거의 선형적으로 비례하여 사용이 가능하므로 이에 대한 민감도도 조사하여 Table 2에 보였다. 앞서와 마찬가지로 차폐체간의 간격이 클수록, 전도도가 높을수록 민감도가 향상되는 것을 볼 수 있다. 그러나 zero crossing time 민감도는 피크값 민감도에 비해 전반적으로 훨씬 작은 값을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

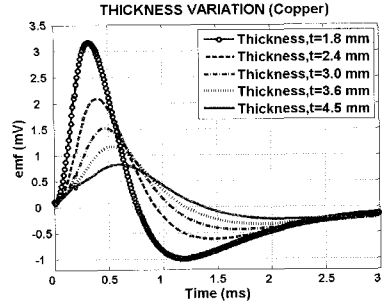
Table 2 Sensitivity of zero crossing time to thickness variation obtained from probe models shielded by copper and ferrite

	구리		텅스텐	
	D=3 mm	D=6 mm	D=3 mm	D=6 mm
Model 1	32.24%	34.35%	21.15%	30.93%
Model 2	23.82%	28.79%	21.3%	24.29%
Model 3	26.48%	29.02%	23.6%	26.3%
Model 4	28.41%	32.93%	24.63%	27.9%

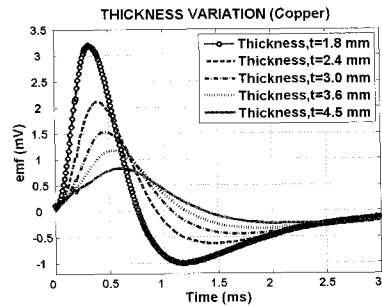
Fig. 8은 각 탐촉자 모델을 인코넬 평판 위에 위치시키고 펄스전류를 인가할 때 나타나는 PEC 신호를 보인 것이다. 모델 2와 모델 3에 의한 신호에서는 첫 피크 뒤에 작지만 또 다른 피크가 형성됨을 볼 수 있다. 또한, 모델 1에서 펄스의 폭을 제한하지 않고 계단입력을 가한 경우의 계단응답을 Fig. 9에 보였는데 전도도가 다른 물질들과 두께변화에 대해서도 두 번째 피크의 값과 위치는 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 탐촉자 자체의 영향 때문이라고 판단되는데, Fig. 4와 Fig. 8의 신호들을 비교해 보면 전도도가 낮은 평판에서의 신호는 매우 빨리 나타나므로, 첫 번째 피크는 전도도가 낮은 피검체로 인해 발생한 것이고 두 번째 피크는 차폐체로 사용한 전도도가 매우 높은 구리에 발생된 와전류의 영향 때문이 아닌가 의심된다.

3.2. 페라이트만으로 차폐된 탐촉자

차폐체로 전도도가 높은 물질을 쓰면 그 차폐체 자체에도 와전류가 유도되어 전도도가 낮은 물질의 검사시 PEC 신호에 영향을 미치는 것을 구리-페라이트 차폐체 모델들에서 확인할 수 있었다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 전도도는 매우 낮고 투자율은 높은 페라이트만을 차폐체로 사용하여 PEC 신호를 조사하였다.

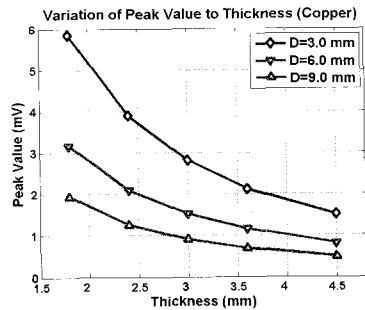


(a) Model 5

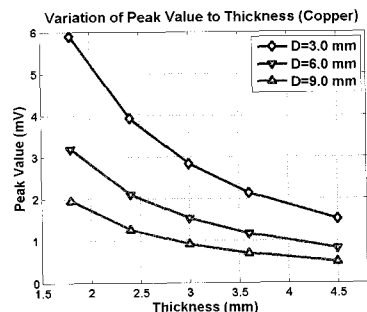


(b) Model 6

Fig. 11 PEC signals from copper plate using design models in figure 10 [D = 6 mm]



(a) Model 5



(b) Model 6

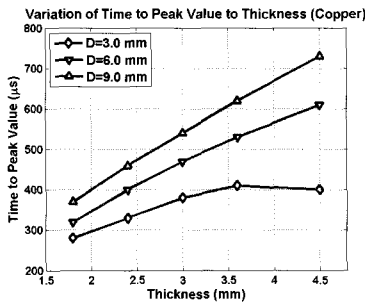
Fig. 12 Peak value variations due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 10 are used

Table 3 Sensitivity of peak value to thickness variation obtained from probe models shielded only by ferrite

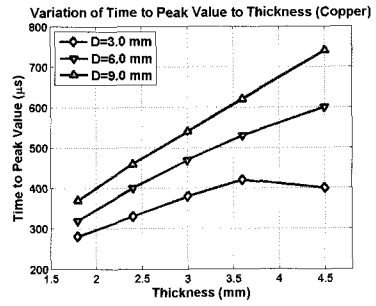
	구리			인코넬 600		
	D=3 mm	D=6 mm	D=9 mm	D=3 mm	D=6 mm	D=9 mm
Model 5 (센서코일 안쪽)	74.3%	74.2%	74.5%	44.3%	60.2%	65.8%
Model 6 (여자코일 안쪽)	74.3%	74.2%	74.5%	50.96%	60.2%	65.8%

Table 4 Sensitivity of zero crossing time to thickness variation obtained from probe models shielded only by ferrite

	구리			인코넬 600		
	D=3 mm	D=6 mm	D=9 mm	D=3 mm	D=6 mm	D=9 mm
Model 5 (센서코일 안쪽)	40.13%	43.9%	46.41%	35.29%	34.12%	38.05%
Model 6 (여자코일 안쪽)	40.11%	43.89%	46.42%	27.94%	34.07%	38.02%

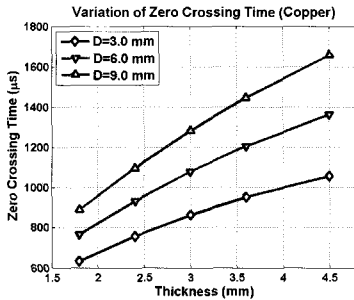


(a) Model 5

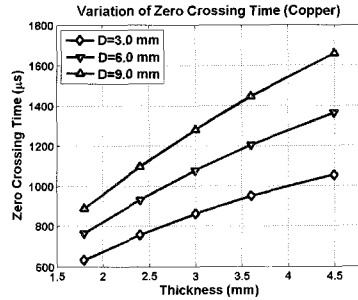


(b) Model 6

Fig. 13 Variations of time to peak value due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 10 are used

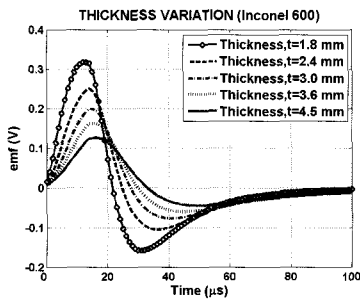


(a) Model 5

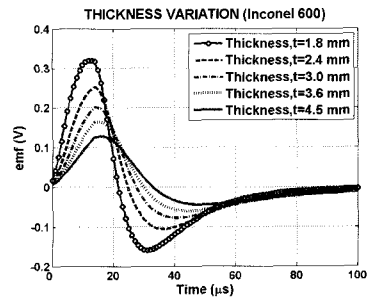


(b) Model 6

Fig. 14 Variation of zero crossing time due to different thickness of copper plate and coil separations when design models in figure 10 are used



(a) Model 5



(b) Model 6

Fig. 15 PEC signals from inconel plate using design models in figure 10 [D = 6 mm]

탐촉자 설계모델은 Fig. 10에 보인 바와 같이 여자 코일의 위치에 따라 모델 5와 모델 6로 선정하였고, 구리 평판을 대상으로 하여 얻은 PEC 신호는 Fig. 11에, 신호의 피크값은 Fig. 12에, 피크값 도달 시간은 Fig. 13에, 그리고 zero crossing time은 Fig. 14에 각각 보였다. 입력펄스의 폭은 앞서와 마찬가지로 구리 평판에서는 200 μ S를 사용하였고, 인코넬 600 평판에서는 15 μ S를 사용하였다. 조사된 PEC 신호는 두께가 증가하면 피크값이 점점 작아지는 경향은 같았으나 구리-페라이트 차폐 탐촉자에 비해 신호의 크기가 훨씬 컸고, 피크값 도달시간도 두 차폐체간의 거리가 6 mm와 9 mm인 경우에는 두께증가에 선형적으로 비례하는 것으로 나타나 신호특성이 개선되었음을 알 수 있다. Zero crossing time도 앞서와 마찬가지로 두께증가에 거의 선형적으로 비례하여 증가하였다. 차폐체간의 거리가 증가한 경우도 조사하였는데, 피크값은 작아지고, 피크값 도달시간이나 zero crossing time은 증가하는 현상이 앞서와 마찬가지로 나타났다. 또한 구리-페라이트 차폐 모델들에서 차폐체와 평판의 전도도 차이가 큰 경우 발생되었던 두 번의 피크는 Fig. 15에 보인 바와 같이 나타나지 않았다. 그리고 페라이트만을 차폐체로 사용한 모델 5와 모델 6에서의 신호는 거의 차이가 나지 않아, 신호가 두 코일의 상대적 위치에 별 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

페라이트만으로 차폐한 모델들의 신호에서 피크값 민감도와 zero crossing time 민감도를 조사하여 Table 3와 4에 각각 보였다. 이 조사결과들은 모두 피검사체의 전도도가 높을수록, 그리고 차폐체간의 거리가 멀수록 두께변화에 대한 민감도가 향상되는 것을 보여주고 있다. 그러나 앞서와 마찬가지로 피크값 민감도가 zero crossing time 민감도에 비해 훨씬 높은 수치를 보였다. 그리고, Table 1과 Table 3를 비교해 보면 구리-페라이트 차폐 모델들에서의 민감도에 비해 페라이트만으로 차폐한 모델의 피크값 민감도가 훨씬 높아진 것을 알 수 있으며, 따라서 차폐 탐촉자 설계가 개선된 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 반사형 펄스와전류 탐상법을 사용하여 평판의 두께평가에 효과적인 탐촉자를 설계하

기 위해 코일의 배치 및 차폐체의 효과에 대해 조사하였다. 설계된 탐촉자들에 의한 펄스와전류 신호에서 공통적이고 유용한 특징은 피검사체의 두께가 증가하면 피크값이 감소하며, zero crossing time이 거의 선형적으로 증가한다는 것이다. 하지만 피크값 도달시간은 증가하다가 일정 두께 이상에서는 다시 감소하는 경향이 나타나서 활용하기에 어려움이 있을 것으로 보였다. 다만, 차폐체의 선정과 코일 간격의 조정을 통해 두께변화에 대한 선형적 변화를 이끌어 낼 수는 있었다.

구리-페라이트로 차폐된 탐촉자를 사용한 결과는 구리로 차폐한 여자코일이 페라이트로 차폐한 센서 코일보다 안쪽에 있을 때 더 큰 신호 피크값이 나타남을 보여 주었다. 그리고 두께변화에 대하여 피크값과 zero crossing time을 이용한 민감도 조사에서는 피검사체의 전도도가 높을수록, 코일 차폐체간의 거리가 멀수록 높은 민감도가 나타난다는 것을 알 수 있었으며, 피크값 민감도가 더 효과적임을 알 수 있었다. 페라이트만으로 차폐한 탐촉자의 경우에도 거의 유사한 신호 경향이 나타났다. 다만, 신호의 크기 자체가 커지고, 두 코일의 상대적 위치에 신호가 영향 받지 않음을 알 수 있었다. 여기에서도 민감도는 피검사체의 전도도가 높을수록, 차폐체간의 거리가 멀수록 높아졌으며, 피크값 민감도가 zero crossing time 민감도에 비해 더 효과적이었다. 조사된 모든 탐촉자 모델들에서의 민감도를 비교해 보면, 구리-페라이트 차폐 모델들에 비해 페라이트만으로 차폐한 모델에서의 피크값 민감도가 훨씬 더 높게 나타난다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2007-00467)

참고문헌

- [1] C. J. Renken, "The use of a personal computer to extract information from pulsed eddy currents," *Materials Evaluation*, Vol. 3, pp. 356-360, (2001)
- [2] Jack Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing*, Adam Hilger, Bristol,

- England, (1991)
- [3] D. L. Waidelich and S. C. Huang, "The use of crossing points in pulsed eddy current testing," *Materials Evaluation*, Vol. 30, No. 1, pp. 20-24, (1972)
- [4] Young-Kil Shin and Dong-Myung Choi, "Numerical analysis of through transmission pulsed eddy current testing and effects of pulse width variation," *Journal of the KSNT*, Vol. 27, No. 3, pp. 255-261, (2007)
- [5] C. J. Renken and A. Sather, "A pulsed eddy current test system for hot cell use: Manual of operation," ANL 7973, Argonne, Illinois, Argonne National Laboratory, (1972)
- [6] V. Wittig, "About applications of pulsed eddy current methods in nondestructive testing," *Materialprüfung*, Vol. 19, (1977)
- [7] B. L. Allen, *Finite Element Modeling of Pulsed Electromagnetic NDT Phenomena*, MS Thesis, Colorado State University, (1983)
- [8] Xiao-wei Dai, Reinhold Ludwig, and R. Palanisamy, "Numerical simulation of pulsed eddy-current nondestructive testing phenomena," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 26, No. 6, pp. 3089-3096, (1990)
- [9] 이정기, 서동만, 이승석, "펄스 와전류를 이용한 알루미늄 두께 평가", *비파괴검사학회지*, Vol. 25, No. 1, pp. 15-19, (2005)