2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

투과형 펄스와전류 탐상의 수치해석

신영길*, 최동명*, 이창준**
* 군산대학교 전자정보공학부, ** (주)카이텍

Numerical Analysis of Through Transmission Pulsed Eddy Current Testing

Young-Kil Shin*, Dong-Myung Choi*, Chang-Jun Lee**
* Kunsan National University, ** KAITEC Inc.

Abstract - 투과형 펄스와전류(Pulsed Eddy Current; PEC) 탐상을 대상으로 수치해석 방법을 사용하여 펄스와전류 탐상신호를 예측하고, 펄스의 폭이 신호에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 전도도나 두께가 증가하면 PEC 신호의 최대값이 작아지며 최대값 발생시간이 지연됨을 관찰할 수 있었고, 전도도나 두께를 측정할 때 펄스의 폭이 좁으면 신호의 최대치를 사용하는 것이 유리하고, 펄스의 폭이 넓으면 최대치가 나타나는 시간을 사용하는 것이 판별에 유리하다는 것을 알 수 있었다. 또한, lift-off가 커질수록 PEC 신호의 최대값은 작아지지만, 두 코일 사이의 간격만 일정하면 피검사체가 어디에 위치해도 신호는 거의 동일하며, 같은 두께에서 서로 다른 lift-off 변화는 PEC 신호를 한 점에서 만나게 하는 것을 알 수 있었다.

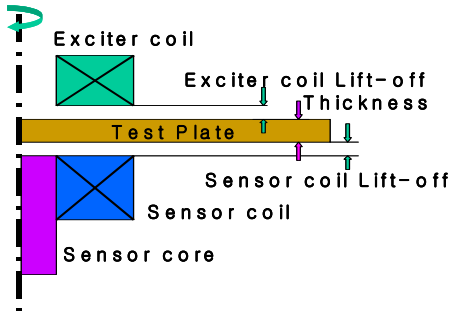
1. 서 론

일반적인 와전류탐상은 단일 주파수 또는 한정된 주파수 대역을 가지는 정현파 신호를 사용한다. 이러한 경우 표피효과에 의해 검사영역이 제한된다. 반면, 펄스와전류(Pulsed Eddy Current; PEC) 탐상에서는 이론적으로 매우 넓은 주파수 대역폭을 가지는 펄스 신호를 사용하여 피검사체에 펄스 형태의 와전류를 유도시킨다. 따라서 많은 수의 주파수를 사용한 일반 와전류 탐상들을 통해 얻어질 수 있는 정보를 펄스와전류 검사에서는 손쉽게 얻을 수 있으리라는 기대를 갖게 하며, 자속의 침투깊이 또한 일반 와전류 탐상에 비해 더 깊어질 것으로 예상된다. 펄스와전류 탐상에서는 단열재나 코팅 층을 제거하지 않고도 금속의 두께 측정이 가능한 장점이 있으며, 비접촉식이기 때문에 피검사체가 고온이거나 표면 상태가 거칠어도 측정이 가능하다[1]-[3]. 본 논문에서는 여러 재질과 두께의 피검사체들에서 펄스의 폭이 신호에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 먼저, 계단입력에 대한 응답을 조사하여 계단응답이 최대치에 도달하는 시간을 펄스의 폭으로 활용하였고, 전도도와 두께, Lift-off 변화에 대한 PEC 신호를 조사하고 특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 수치 모델링

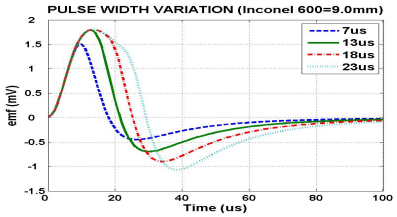
펄스전류는 시간에 따라 변화하므로 과도해석이 필요하고, 이를 위해 공간의 모델링에는 유한요소법을 사용하였고, 시간에 대해서는 유한차분법을 사용하여 모델링 하였으며, time step 크기의 제한이 없는 역진차분법을 사용하였다[3]. 본 연구에 사용된 투과형 펄스와전류 프로브를 그림 1에 보였고, 모델링 데이터를 표 1에 정리하였다.



〈그림 1〉 투과형 PEC 탐상 프로브

〈표 1〉 모델링 데이타

		Exciter	Sensor	Sensor Core	
Coil Size	O.D	6.6[mm]	6.6[mm]	4.8[mm]	
	두께	3.0[mm]	6.0[mm]	12.0[mm]	
	폭	1.2[mm]	1.2[mm]	1.2[mm]	
	권선수	240	240	투자율	1000



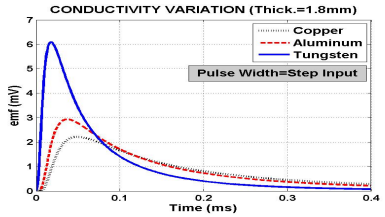
〈그림 2〉 펄스폭 변화에 따른 PEC 신호 변화

2.2 펄스폭 변화의 영향

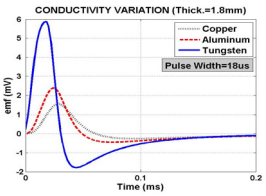
Exciter coil에 인가하는 전류의 펄스폭에 따라 신호가 어떻게 변하는지를 수치적으로 예측하고, 신호의 특징을 조사하여 펄스폭의 영향을 분석하였다. 먼저 여러 재질과 두께의 평판에 대한 계단응답을 계산하여 피크값에 도달하는 시간(피크시간)을 조사하고, 이를 해당 재질과 두께의 평판에 대한 PEC 탐상에서 펄스폭으로 사용하였다. 평판의 두께가 두꺼워지거나 전도도가 커질수록 피크시간이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 두께가 9.0[mm]인 인코넬 600 평판에서의 계단응답 피크시간 전후로 펄스폭을 변화시키면서 PEC 신호를 조사하여 그 결과를 그림 2에 보였다. 계단응답 피크시간인 13[μs]에서 PEC 신호의 피크값이 가장 크며, 그보다 펄스폭을 짧게 하면 펄스의 피크값이 작아지고, 펄스폭을 더 길게 사용하면 피크값은 변하지 않고 피크를 지나면서 서서히 감소하다가 전류가 off 됨에 따라 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 신호변화는 펄스폭의 변화가 PEC 신호에 어떻게 영향을 미치는지 예측할 수 있게 해 준다.

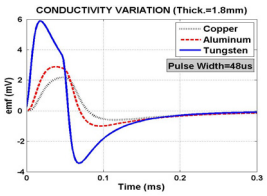
2.3 전도도 변화의 영향

전도도가 변할 때 펄스폭의 변화가 PEC 신호에 미치는 영향을 조사하였다. 먼저, 입력전류를 계단형태로 인가했을 때 나타나는 계단응답을 조사하여 그림 3에 보였다. 이 중 피크시간이 가장 짧은 경우(텅스텐, 18[μs])와 가장 긴 경우(구리, 48[μs])를 펄스폭으로 하여 PEC 신호변화를 관찰해 그림 4에 보였다. 이를 보면, 전도도가 높은 피검사체일수록 피크값이 감소하면서 피크시간이 지연되어 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 전도도가 높은 피검사체일수록 피검사체내에 와전류가 많이 생성되기 때문에



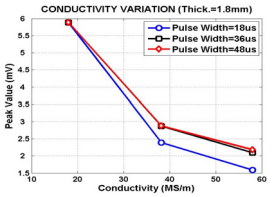
〈그림 3〉 일정 두께 평판의 전도도별 계단응답

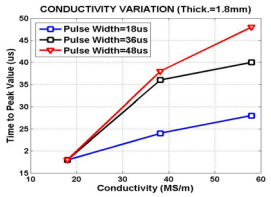




(a) 펄스폭=18 μs (b) 펄스폭=48 μs

<그림 4> 전도도가 변할 때 펄스폭 변화에 따른 PEC 신호 비교

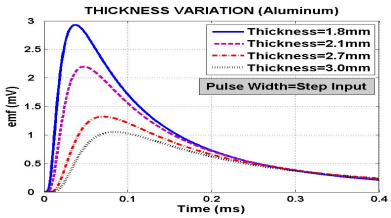




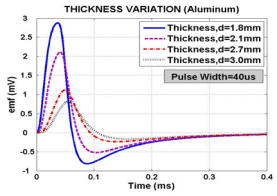
(a) 피크값 변화 (b) 피크시간 변화

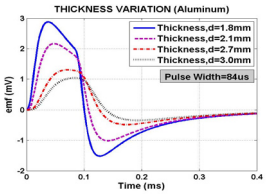
<그림 5> 전도도가 변할 때 펄스폭에 따른 피크값과 피크시간 변화

자속의 흐름을 더 많이 방해하여 sensor coil에 도달되는 자속의 양이 적어지고, 시간적으로도 지연되기 때문으로 판단된다. 그림 4 (a)와 (b)에서 펄스폭이 짧은 경우와 긴 경우의 텅스텐 신호를 비교하면 피크값은 변하지 않지만 펄스폭이 긴 경우 피크값을 지나서 서서히 감소하다가 입력전류가 0으로 떨어질 때 급격히 감소하며, 짧은 펄스폭에서의 하락보다 훨씬 더 크게 하락하는 것을 볼 수 있다. 또한 구리의 경우, 펄스폭이 작은 경우에는 펄스폭이 긴 경우에 비해 피크값이 더 작으며, 그림 3에서의 피크값에도 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이처럼 펄스폭을 다르게 하면 PEC 신호의 분해능에는 어떤 영향이 있는지 그림 5를 통해 조사하였다. 그림 5(a)에서와 같이 피크값을 사용하여 전도도를 평가한다면 펄스폭이 18[μs]일 때 가장 큰 기울기가 얻어진다. 그림 5(b)에 보인 바와 같이 피크시간을 사용하여 전도도를 평가한다면 펄스폭이 48[μs]일 때 가장 효과적임을 알 수 있다. 따라서 피크시간을 사용하여 PEC 신호를 평가한다면 펄스폭을 길게 하는 것이 유리하고, 피크값을 기준으로 PEC 신호를 분석한다면 펄스폭을 짧게 하는 것이 유리할 것이다.



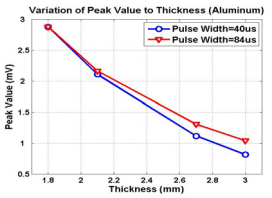
<그림 6> 알루미늄 평판의 두께별 계단응답

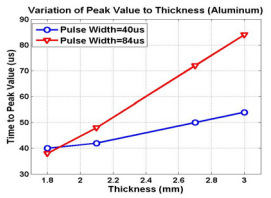




(a) 펄스폭=40 μs (b) 펄스폭=84 μs

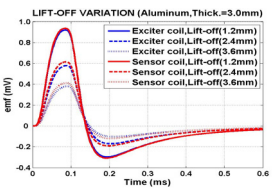
<그림 7> 두께가 변할 때 펄스폭 변화에 따른 PEC 신호 비교

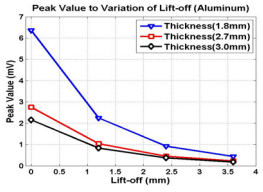




(a) 피크값 변화 (b) 피크시간 변화

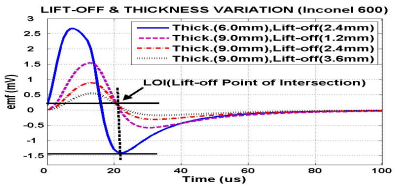
<그림 8> 두께가 변할 때 펄스폭에 따른 피크값과 피크시간 변화





(a) Lift-off 신호 비교 (b) Lift-off 에 따른 피크값

<그림 9> 전도도가 변할 때 펄스폭에 따른 피크값과 피크시간 변화



<그림 10> Lift-off point of intersection

2.4 두께 변화의 영향

그림 6에는 알루미늄 평판에서의 계단응답을 보였는데, 두께가 1.8[mm]일 때에는 피크값이 40[μs]에서 나타났고 두께가 3[mm]일 때는 84[μs]에 나타나 이를 각각 펄스폭으로 선정하여 비교하였다. 각각의 결과는 그림 7(a)와 (b)에 보였는데 두께가 두꺼워질수록 피크값이 감소하며 피크시간도 지연되는 것을 볼 수 있고, 두께가 3 [mm]일 경우에 펄스폭이 짧으면 피크값이 작아지고, 두께가 상대적으로 얇을 때 펄스폭이 길면 피크값은 유지되는 것을 볼 수 있다. 펄스폭이 신호의 분해능에 미치는 영향을 알아보기 위해 두께별 피크값과 피크시간을 조사하여 그림 8에 보였다. 그림에서 두께변화에 대한 피크값이나 피크시간의 변화 곡선이 가파를수록 분해능이 좋을 것이다. 두께가 증가할 때 피크값의 변화를 관찰하면 펄스폭이 40[μs]일 때가 더 가파르고, 피크시간은 펄스폭이 84[μs]일 때가 더 가파르다. 따라서 신호를 평가할 때 피크값을 활용한다면 펄스폭을 짧게 하는 것이 신호의 분해능을 높일 것이며, 반면에 피크시간을 활용하여 신호를 평가한다면 펄스폭을 길게 하는 것이 유리할 것이다.

2.5 Lift-off 변화의 영향

그림 9(a)는 알루미늄 평판에서 sensor coil은 고정하고 exciter coil만 움직인 경우와 그 반대의 경우의 신호들을 비교하여 보인 것이다. Lift-off가 증가하면 신호의 피크값이 감소하며, 어느 코일의 lift-off를 변화시켜도 PEC 신호는 거의 변함이 없다. 따라서 두 코일간의 거리만 일정하게 유지된다면, 두 코일 사이의 어디에 피검사체가 있든지 신호에는 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 그림 9(b)는 lift-off가 변할 때 피크값의 변화를 두께별로 구분하여 나타낸 것이다. 두께가 얇을수록 lift-off의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 한편 두 코일 사이의 간격이 변하면 특이한 현상이 나타나는데, 그림 10에 보인 것과 같이 신호들이 하나의 점을 교차한다는 점이다. 이를 Lift-off point of Intersection 이라 한다. 이러한 현상은 오직 펄스전류가 off 될 때에만 관찰되었으며, lift-off의 영향을 배제하고 두께변화를 측정하는데 활용될 수 있을 것이다.

3. 결 론

투과형 펄스와전류 탐상을 수치해석으로 모사하고 탐상신호를 예측하여, 펄스폭과 재질, lift-off 등이 신호에 미치는 영향을 조사하였으며 펄스와전류 검사에 유용한 정보를 획득할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] C. J. Renken, "The use of a personal computer to extract information from pulsed eddy current tests," Materials Evaluation, Vol. 3, pp. 356-360, 2001.

[2] J. H. V. Lefebvre, C. Mandache, "Lift-off point of intersection (LOI) behavior," Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 24, pp. 523-530, 2005

[3] X. Dai, R. Ludwig, and R. Palanisamy, "Numerical simulation of pulsed eddy-current nondestructive testing phenomena," IEEE Trans. Mag. Vol. 26, No. 6, pp. 3089-3096, 1990.