

홀센서를 사용한 펄스와전류탐상 신호의 수치모델링 및 코일센서 신호와의 특성 비교

Numerical Modeling of the Hall Sensor Signal Used in Pulsed Eddy Current Testing and Comparison of Its Characteristics with a Coil Sensor Signal

신영길

Young Kil Shin

초 록 펄스와전류탐상에서 탐상 신호는 주로 센서코일에 유도되는 기전력의 시간에 따른 변화를 측정하여 사용되었는데, 최근에는 홀센서(Hall sensor)로 측정된 신호를 사용하는 경우도 많아지고 있다. 본 논문에서는 펄스와전류탐상에서 나타나는 홀센서 신호를 수치적으로 모델링하여 예측하였다. 이를 위해 두께 측정을 위한 탐촉자를 설계하고 먼저 계단입력전류를 사용한 수치해석을 수행하여 홀센서를 사용하였을 경우의 신호를 예측하였다. 또한, 코일을 센서로 사용하였을 경우의 신호도 동시에 계산하였다. 수치모델링 결과로 예측된 홀센서 신호들은 실험 연구를 통해 보고된 신호들과 유사한 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 피검사체의 두께 변화에 따른 두 신호들의 특성을 분석하고 비교해 본 결과, 홀센서 신호에서는 코일센서 신호에 비해 두께 변화를 판별하기 위한 정보가 더 적게 제공된다는 것을 알 수 있었다. 펄스입력전류를 사용한 경우의 탐상 신호들도 계산해 본 결과, 두 신호 모두 사용된 펄스의 폭이 지난 시간에는 계단입력전류를 사용한 경우의 응답이 반대가 되어 감소하는 형태로 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.

주요용어: 펄스와전류탐상, 홀센서 신호, 코일센서 신호, 두께 판별

Abstract Pulsed eddy current (PEC) testing signals have typically been obtained from the electromotive force induced in a sensor coil. However, an increasing number of studies have elected to incorporate the Hall plate as a sensor. Thus, accurate numerical modeling of the Hall sensor signal is necessary. In this study, a PEC probe is designed and a numerical modeling program is written so that Hall sensor signals and coil sensor signals can be calculated simultaneously. First, a step current is used as the input current. The predicted Hall sensor signals show similar characteristics to those of the experimental signals reported by other researchers. The characteristics of the two types of signals are then analyzed and compared as the thickness of test object changes. The results show that the Hall sensor signal provides less information for evaluating the thickness of the test object than the coil sensor signal. The response signals from a pulsed input current are also calculated, and it is confirmed that an equivalent reversed signal pattern appeared after the pulse width at both signals.

Keywords: Pulsed Eddy Current Testing, Hall Sensor Signal, Coil Sensor Signal, Thickness Evaluation

1. 서 론

펄스전류는 여러 개의 주파수를 가진 정현파 전류의 합으로 나타낼 수 있는데, 이러한 여러 주파수 성분 때문에 펄스와전류(PEC) 탐상은 일반 와전류탐상에 비해 넓은 주파수 대역폭을 가

지며, 따라서 일반 와전류탐상보다 피검사체에 대한 정보가 풍부하고, 침투 깊이도 더 깊을 것으로 기대되고 있다[1-3]. 펄스와전류탐상에서 탐상 신호는 주로 센서코일에 유도되는 기전력의 시간에 따른 변화를 측정하여 사용되는데, 최근에는 홀센서(hall sensor)로 측정된 신호를 사용하

는 경우도 많아지고 있다. 이는 코일을 사용하는 측정 방법에 비해 홀센서를 사용하는 측정 방법이 저주파에서도 민감도가 떨어지지 않는다는 홀소자의 특징을 활용하기 위함이라고 판단된다 [4,5].

본 논문에서는 이러한 추세에 따라 펄스와전류 탐상에서 홀센서를 사용하여 측정되는 탐상 신호를 수치모델링을 통해 예측해 보았다. 이를 위해 먼저 알루미늄 판의 두께를 측정하기 위한 펄스와전류 탐촉자를 설계하였다. 탐촉자는 여자코일과 센서로 구성되었는데 센서들의 신호 특성을 비교해 보기 위해 홀센서와 센서코일을 함께 배치하여 홀센서 신호와 코일센서 신호가 동시에 계산될 수 있도록 설계하였다. 입력전류로는 탐상 신호의 수월한 분석을 위해 먼저 계단입력전류를 사용하여 수치해석을 수행하고 계단입력에 대한 응답으로 나타난 탐상 신호들을 분석해 본 후에 펄스전류를 입력하여 펄스와전류탐상 신호들을 예측하였다. 계단입력에 대한 응답신호들의 분석은 펄스와전류탐상 신호들의 이해와 예측을 가능하게 해 주었다.

2. 수치 해석 방법

펄스와전류탐상의 지배방정식은 식(1)과 같이 확산방정식으로 표현된다.

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

여기서 $\mu, \sigma, \bar{J}_s, \bar{A}$ 은 각각 투자율, 전도도, 코일의 전류밀도, 벡터자위를 의미한다. 변수의 시간에 따른 변화는 시간에 대한 미분항을 차분형태로 변환시켜 계산한다. 본 연구에서는 시간에 대한 후향차분법을 사용하였고, 공간에 대해서는 유한요소법을 사용하였다. 식(1)의 지배방정식에 에너지법이나 갤러킨 가중잔차법을 사용하여 유한요소 공식화를 수행하면 [6] 다음과 같은 행렬식이 구해지며,

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

이 식에서 각 계수행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[S] = \int_v \frac{1}{\mu} [\nabla N]^T [\nabla N] dv \quad (3)$$

$$[C] = \int_v \{N\} \sigma [N] dv \quad (4)$$

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

이 식들에서 사용된 $\{N\}$ 은 사변형 요소의 형태함수를 의미한다. 한편, 시간에 대한 후향차분법을 적용하여 시간에 대한 미분항을 표현하면 다음과 같다.

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

여기서 $\{A\}^n$ 은 시간 t^n 에서의 자위 값이다. 식(6)을 사용하여 식(2)를 다시 쓰면 식(7)과 같은 반복 계산식이 구해지므로, 전 시간단계에서 구해진 자위 값을 사용하여 다음 시간단계에서의 자위 값을 반복해서 계산해 나갈 수 있다.

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

홀센서를 사용하였을 경우의 펄스와전류 신호는 홀센서를 수직으로 지나는 자속밀도이므로, Fig. 1과 같이 홀센서가 배치된 경우의 홀센서 신호는 자속밀도의 Z-방향(축방향) 성분이 된다. 이를 원통좌표계에서 계산하면 다음과 같이 표현된다.

$$B_z = \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{A_c}{r_c} \quad (8)$$

여기서 A_c 와 r_c 는 해당 사변형 요소 중심에서의 자위 값과 원통좌표계의 중심축으로부터 해당 사변형 요소 중심까지의 반경을 의미한다.

한편, 코일센서를 사용하는 경우의 펄스와전류 신호는 센서코일에 유도되는 기전력이므로 각 시간단계에서 구해진 자위 값을 사용하여 식(9)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{emf} = \frac{\{A\}^{n+1} - \{A\}^n}{\Delta t} 2\pi r_c \quad (9)$$

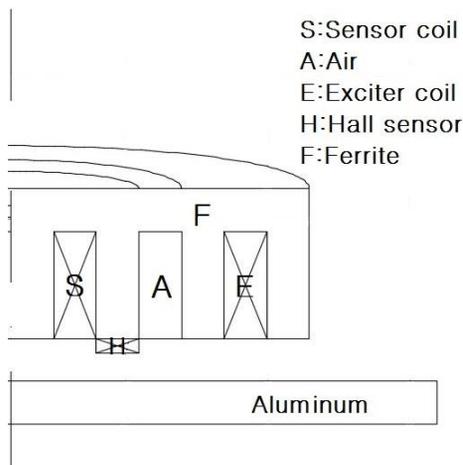


Fig. 1 Probe used for numerical modeling

3. 탐촉자 설계 및 계단응답 PEC 신호

펄스와전류탐상에서 홀센서로 측정되는 탐상 신호를 수치모델링을 통해 계산하기 위해 피검사체의 두께를 측정하기 위한 펄스와전류 탐촉자를 설계하였는데, 탐촉자는 여자코일과 센서로 구성되었으며 비교를 위해 홀센서와 센서코일을 함께 배치하여 홀센서 신호와 코일센서 신호를 동시에 계산하였다. 센서의 사용 목적은 피검사체에 유도된 와전류가 피검사체의 정보를 반영하여 발생시키는 와전류의 자계를 채취해 내는 것이므로 세기가 상대적으로 강하고 피검사체의 정보도 포함하지 않은 여자코일의 자계가 직접 센서에 도달되지 않도록 Fig. 1에 나타난 바와 같이 여자코일과 센서 사이를 페라이트를 사용하여 차폐시켰다[7,8].

먼저 3 mm 두께의 알루미늄 판을 대상으로 계단입력전류가 사용되었을 경우의 수치모델링을

수행하였다. 그 결과로 나타난 등자위선 분포의 시간 경과에 따른 변화를 Fig. 2에 보였다. 자속 밀도와 등자위선은 항상 같은 방향으로 평행하므로 Fig. 2는 자속 분포의 시간에 따른 변화로도 해석될 수 있다. 따라서 시간이 흐름에 따라 자속 분포가 탐촉자 내의 여자코일로부터 피검사체인 알루미늄 판을 따라 확산되어 가는 과정을 볼 수 있으며, 알루미늄 판에서는 공기 중에 비해 확산되는 속도가 느려지는 것을 볼 수 있다. 이는 알루미늄 판 내에 유도된 와전류의 영향 때문이라고 판단된다.

Fig 3은 계단입력전류를 사용하였을 경우의 홀센서 신호와 코일센서 신호를 계산하여 예측한 결과이다. 홀센서 신호는 센서를 수직으로 지나가는 자속밀도를 측정된 것으로, 입력전류가 시간이 경과해도 계속 같은 값을 유지하므로 처음의 과도기를 지나면 일정한 자속밀도 값으로 수렴하게 된다. 이 값은 DC전류를 사용한 정상상태 해석 결과와 일치할 것이다. 예측된 홀센서 신호들은 실험 연구[5]를 통해 보고된 신호들과 유사한 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 한편, 코일센서 신호는 코일에 유도되는 기전력 즉, 전압을 측정된 것인데, 식(9)와 같이 시간에 따른 미분으로 표현되므로 입력전류가 시간이 경과해도 계속 같은 값을 유지하게 되면 최종적인 값은 0이 될 것이다. 그러나 이 신호에서는 처음의 과도기에 피크가 발생했다가 사라지는 특성을 있음을 볼 수 있다. 이는 알루미늄 판에 유도되는 와전류의 영향 때문이라고 추측할 수 있다. 이를 보다 명확하게 알아보기 위해 와전류가 유도되는 양이 변화될 수 있도록 두께를 달리하여 조사해보았다.

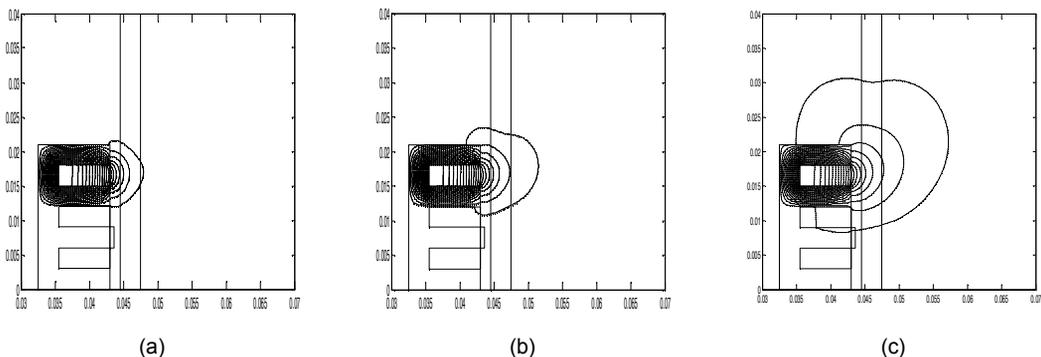
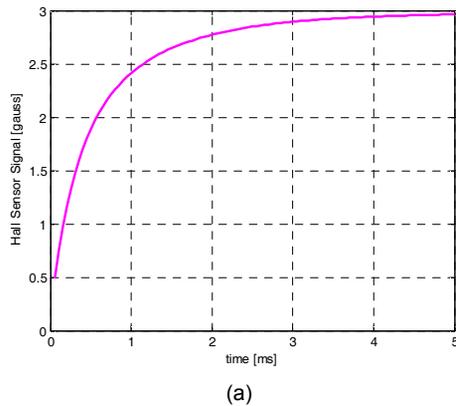
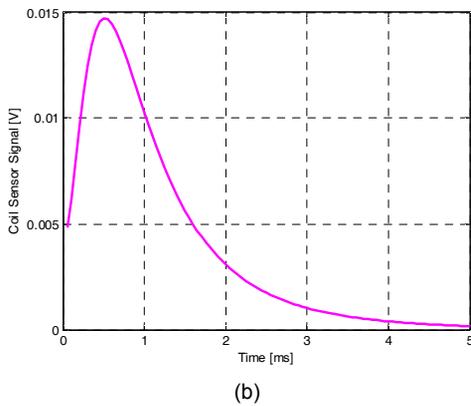


Fig. 2 Evolution of flux distribution as time elapses; (a) time = 0.25 ms, (b) time = 0.5 ms, (c) time = 1.5 ms



(a)

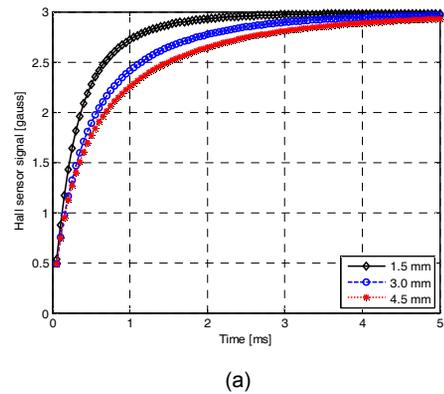


(b)

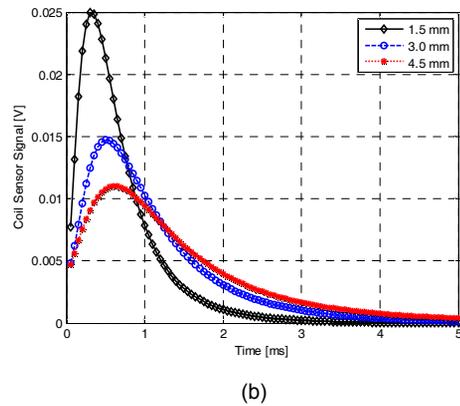
Fig. 3 Predicted step response signals at 3 mm thick aluminum plate; (a) Hall sensor signal, (b) coil sensor signal

4. 두께 변화에 따른 계단응답 PEC 신호들의 변화 및 신호 특성 검토

알루미늄 판의 두께가 1.5, 3.0, 4.5 mm로 다른 경우의 계단응답 PEC 신호들을 계산하여 Fig. 4에 비교하여 보였다. 홀센서 신호와 코일센서 신호 모두 두께가 두꺼워지면 신호의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 알루미늄 판에 유도된 와전류는 자기 자신의 자계를 발생시키는데 그 방향은 렌츠의 법칙[9]에 따라 자신을 생성시킨 여자코일의 자계와 반대방향으로 형성된다. 따라서 두께가 증가하면 알루미늄 판에 유도되는 와전류가 증가하고 반대방향의 자계도 증가하게 된다. 그러므로 여자코일의 자계와 와전류의 자계가 벡터적으로 합해져서 나타나는 쇄교자속이 감소하기 때문에 홀센서 신호는 두께가 증가하면 신호의 크기가 감소하게 된다. 한편, 코일센서 신호들



(a)



(b)

Fig. 4 Change of step response PEC signals due to thickness variation (a) Hall sensor signal, (b) coil sensor signal

은 신호의 전반부와 후반부가 다른 양상을 보이는데, 전반부에서 나타나는 피크는 두께가 증가하면 그 값이 작아지고 피크가 나타나는 시간도 점점 느려진다. 피크치 감소는 앞서와 마찬가지로 두께 증가에 따른 와전류의 증가와 쇄교자속의 감소로 설명될 수 있을 것이다. 그리고 두께 증가로 늘어난 와전류의 방해로 인해 Fig. 2에서 보았던 것처럼 쇄교자속이 센서 위치까지 확산되어 오는데 걸리는 시간이 증가하여 피크가 발생하는 시간이 느려지는 것으로 생각된다. 신호의 후반부에서는 코일에 유도되는 기전력이 시간에 대한 미분으로 표현되므로 변화하지 않는 입력전류의 영향은 사라지고 도체 내에서 와전류의 확산과정에서 발생하는 기전력이 신호로 나타나게 되어, 두께가 두꺼울수록 더 큰 값이 유지되다가 결국엔 사라지는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과들을 보면 두께를 판단하기 위한 정보는 홀센

서보다는 코일센서를 사용한 신호에서 더 많이 제공된다는 것을 알 수 있다.

5. 펄스응답 PEC 신호들의 예측

3 mm 두께의 알루미늄 판을 대상으로 계단입력전류를 사용하였을 경우의 코일센서 신호에서 피크가 나타난 시간이 0.25 ms이었으므로 펄스입력전류의 폭을 0.25 ms으로 하여 수치모델링을 수행하고 펄스응답 PEC 신호들을 계산해 보았다. 그 결과들을 Fig. 5에 보였는데, 두 신호 모두 펄스의 폭에 해당하는 시간까지는 계단응답 신호와 동일하게 증가하다가, 그 시간이 지나 입력전류가 0이 된 후부터는 계단응답신호와 반대로 감소하는 형태로 바뀌어 나타나는 것을 볼 수 있다.

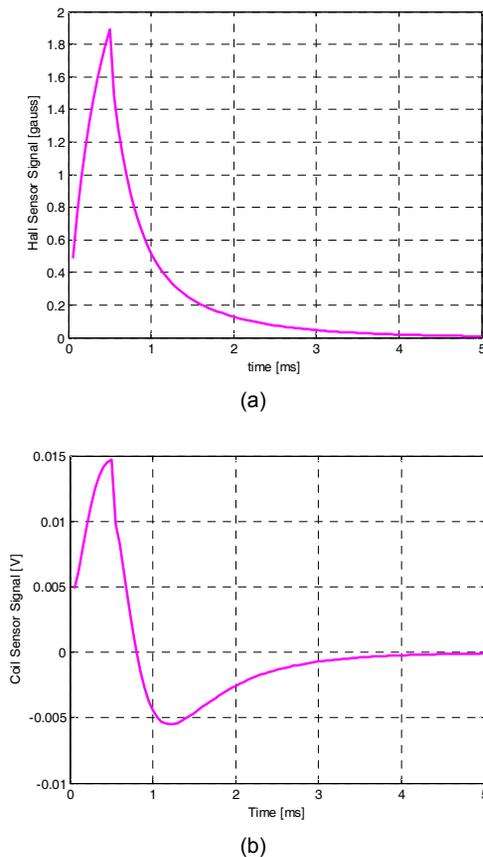


Fig. 5 Predicted pulse response signals (a) Hall sensor signal, (b) coil sensor signal

6. 결론

펄스와전류탐상에서 홀센서를 사용하여 측정되는 탐상 신호를 수치모델링을 통해 예측하고 코일센서 신호와 비교해 보았다. 이를 위해 알루미늄 판의 두께를 측정하기 위한 펄스와전류 탐촉자를 설계하였는데, 센서들의 신호 특성을 비교해 보기 위해 홀센서와 센서코일을 함께 배치하여 홀센서 신호와 코일센서 신호가 동시에 계산될 수 있도록 하였다. 입력전류로는 먼저 계단입력전류를 사용하여 수치 해석을 수행하고 계단입력에 대한 응답으로 나타난 신호들을 분석해 본 후에 펄스전류를 입력하여 펄스와전류탐상 신호들을 예측하였다.

계단응답신호에서 홀센서 신호는 처음의 과도기를 지나 일정한 자속밀도 값으로 수렴하며, 코일센서 신호는 초기 과도기의 피크를 거쳐 최종적으로 0이 되는 것으로 나타났다. 두께를 변화시켜 조사해 본 결과는 두 종류의 신호들 모두 두께가 두꺼워지면 신호의 크기가 감소하는 것으로 나타났으며 두께를 판단하기 위한 정보는 홀센서보다 코일센서를 사용한 신호에서 더 많이 제공된다는 것을 알 수 있었다. 펄스입력전류에 의한 PEC 신호들은 두 신호 모두 펄스의 폭에 해당하는 시간까지는 계단응답신호와 동일하게 증가하다가, 그 시간이 지나면 계단응답신호와 반대로 유사한 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 계단입력에 대한 응답신호들의 분석은 펄스와전류탐상 신호들의 이해와 예측을 가능하게 해 줄 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Blitz, "Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing," Bristol: Adam Hilger (1991)
- [2] C. J. Renken, "The use of a personal computer to extract information from pulsed eddy current," *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 3, pp. 356-360 (2001)
- [3] A. Sophian, G. Y. Tian, D. Taylor and J. Rudlin, "A feature extraction technique based on the principal component analysis for pulsed

- eddy current NDT," *NDT&E International*, Vol. 36, No. 1, pp. 37-41 (2003)
- [4] R. A. Smith and G. R. Hugo, "Transient eddy current NDE for aging aircraft capabilities and limitations," *Insight*, Vol. 43, No. 1, pp. 14-25 (2001)
- [5] C. S. Angani, D. G. Park, G. D. Kim, C. G. Kim and Y. M. Cheong, "Differential pulsed eddy current sensor for the detection of wall thinning in an insulated stainless steel pipe," *Journal of Applied Physics*, Vol. 107, 09E720 (2010)
- [6] D. S. Burnett, "Finite Element Analysis from Concepts to Application," Reading: Addison-Wesley (1988)
- [7] Y. K. Shin, "Design of shielded encircling send-receive type pulsed eddy current probe using numerical analysis method," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 33, No.6, pp. 505-510 (2013)
- [8] Y. K. Shin and D. M. Choi, "Design of a shielded reflection type pulsed eddy current probe for the evaluation of thickness," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 27, No. 5, pp. 398-408 (2007)
- [9] M. N. O. Sadiku, "Elements of Electromagnetic," Oxford: Oxford University Press (2001)