

와전류와 히스테리시스를 고려한 유도형 변위 센서의 자기회로 모델 개발

노명규*(충남대 메카트로닉스 공학과)

정민경(충남대 메카트로닉스공학과 대학원), 박병철(충남대 메카트로닉스 공학과 대학원)

A Magnetic Circuit Model of Inductive Sensor Considering Eddy Currents and Hysteresis

Myounggyu Noh (Dept. Mechatronics Eng., CNU),

Minkyoung Jeong (Dept. Mechatronics Eng., CNU), Byoungchul Park (Dept. Mechatronics Eng., CNU)

ABSTRACT

The accuracy and the dynamic bandwidth are the two most important indices that an inductive position sensor is evaluated with. Eddy currents and magnetic hysteresis affect both of these performance indices. As the modulation frequency of the sensor increases to improve the dynamic bandwidth, the effects of eddy currents and hysteresis also increases, which results in the loss of accuracy. In this paper, a magnetic circuit model of the differential inductive sensor is developed. This model includes the effects of hysteresis and eddy currents. Experimental results confirm the validity of the model. The model predicts that the eddy current effects are not significant below the modulation frequency of 50kHz, as long as the lamination thickness is adequate.

Key Words : Inductive Position Sensor(유도형 위치센서), Hysteresis(히스테리시스), Eddy Currents (와전류)

기호설명

V : 전압
 R : 코일 저항
 μ_0 : 공기 투자율($4\pi \times 10^{-7}$)
 μ_r : 자성체의 상대투자율
 ϕ : 자속
 B : 자속밀도
 H : 자화강도
 δ : 와전류 표피 두께(skin depth)
 σ : 저항계수(resistivity)

1. 서론

능동형 자기 베어링 시스템은 불안정성을 극복하기 위하여 부상체의 위치 신호를 검출하여 귀환 제어가 필요하다. 부상체의 위치 신호를 측정하는 센서로는 주로 와전류형이 많이 사용되는데 이는 만족할 만한 정확도와 동적응답속도를 보장하기 때

문이다. 와전류형 센서의 단점은 상용 센서의 경우 고가이어서 자기 베어링 시스템의 전체 가격에서 매우 큰 비중을 차지한다는 것이다.

유도형 센서는 와전류형 센서에 비해 정확도나 응답 속도면에서 떨어지지만, 작동 원리가 간단하여 제작이 용이하고 경제적이라는 장점이 있어 자기 베어링 시스템에 활용도가 커지고 있다. 유도형 센서는 와전류형과 마찬가지로 고주파 전압 신호를 센서 코일에 인가하고, 변위에 따른 신호의 변화를 이용하여 위치를 측정한다.

유도형 변위 센서의 정확도와 응답 속도는 센서를 구동하는 고주파 신호의 주파수와 직접적인 관계가 있다. 고주파 성분을 제거하기 위해 신호 처리 회로는 필터를 사용하는데, 이 필터의 Cut-off 주파수는 고주파 신호의 주파수의 약 10%정도에서 결정된다. 따라서, 센서의 정적 정확도는 필터의 Cut-off 주파수가 낮을수록 잡음이 줄어들므로 인해 향상되는 반면, 센서의 동적 성능은 저하된다.

센서의 구동 주파수를 높이면 센서의 민감도와 동적 성능을 동시에 향상시킬 수 있지만, 고주파 신호에 의해 센서가 구동되기 때문에 와전류의 영향이 커지게 된다. 본 연구에서는 센서의 구동 주파수에 따른 와전류의 영향과 자성 재료의 비선형 특성인 히스테리시스 영향을 고려하기 위해 유도형 센서의 자기 회로 모델을 개발하고 이를 실험적으로 검증하고자 한다.

2. 유도형 센서의 모델

2.1 유도형 차동 변위 센서의 원리

자성체에 코일을 감았을 때, 코일에 인가되는 전압과 전류의 관계는 Faraday 법칙에 의해

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1)$$

와 같이 쓸 수 있다. 센서의 민감도를 향상하기 위해 Fig.1 과 같이 2 개의 센서 프로브를 차동형으로 배치하였을 때, 각각의 코일의 인덕턴스는

$$L_1 = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2(g-x)} \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2(g+x)} \quad (3)$$

로 주어지며, 만일 전압이 매우 빠른 주파수로 $+V_s$ 와 $-V_s$ 를 반복한다면, 식 (1)로부터

$$\frac{1}{L_2} \frac{1}{L_1} = \frac{\Delta i_2 - \Delta i_1}{V_s \Delta t} \quad (4)$$

와 같은 관계식을 얻을 수 있다. 따라서, 전압과 전류의 측정치로부터 위치를 추정할 수 있다.

2.2 히스테리시스와 와전류 모델

히스테리시스와 와전류 모델은 [1]에 자세하게 기술되어 있다. 간단하게 요약하면, 히스테리시스와 자기포화(saturation)는 흔히 사용되는 미분방정식이나 적분방정식의 형태가 아닌 대수방정식의 형태로 주어지는 자화 모델에 의해 기술될 수 있다. 이 자화 모델은 몇 개의 파라미터들에 의해 정의되는데, 이 파라미터들은 재료의 실험적 자화곡선을 이용하여 구할 수 있다. 와전류의 영향은 가상의 코일을 가정하여 재료내의 자속 변화를 간단하게 기술할 수 있다. 즉, 와전류로 인해 줄어드는 자속을 가상의 코일에 의한 것으로 가정하고, 이 가상의 코일의 특성을 결정하는 표피두께와 코일 저항을 추정함으로써 와전류의 영향을 고려할 수 있다.

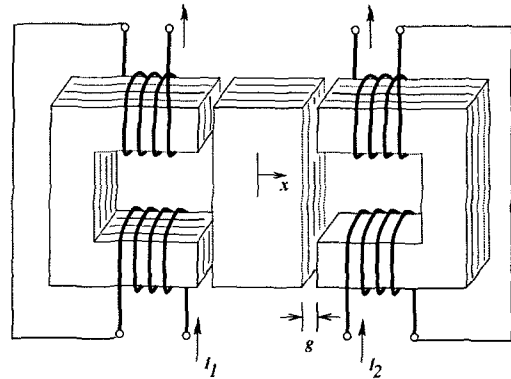


Figure 1. Differential Inductive Probe

Fig.2 는 자심을 이루는 판에서 와전류의 흐름과 표피 두께의 정의를 보여준다.

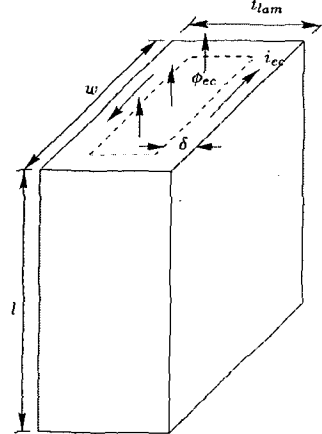


Figure 2. Eddy Current Loop and Skin Depth

표피두께는 와전류의 영향을 결정하는 중요한 파라미터이다. 표피두께의 크기는 이론적으로 판 두께의 절반 이상이 될 수 없으며 시뮬레이션과 실험 결과를 비교함으로써 유추할 수 있다. 와전류의 영향을 결정하는 또 하나의 인자는 가상의 코일이 지니는 저항인데 이는 재료의 저항계수와 가상의 코일의 길이 및 단면적을 이용하여 식 (5)와 같이 추정할 수 있다.

$$R_{ec} = \frac{2\sigma w}{l\delta} \quad (5)$$

식 (5)에서 σ 는 재료의 저항계수(resistivity)를 나타내며 l 과 w 는 판의 길이와 폭을 나타낸다.

표피 두께가 정의되면 적층된 각 판에 흐르는 자속은

$$\phi_{ec} = \frac{(t_{lam} - \delta)}{t_{stack}} \phi \quad (6)$$

와 같이 결정된다.

2.2 센서의 자기회로 모델

자기회로 이론을 적용하여 유도형 센서의 동적 모델을 구하기 위해 2 개의 자속 경로를 각각 4 개 구간으로 나누어 자속 보존의 법칙을 적용하면

$$[\phi_1 \ \phi_2 \ \phi_3 \ \phi_4] = [1 \ -1 \ -1 \ -1] \hat{\phi}_1 \quad (7)$$

$$[\phi_5 \ \phi_6 \ \phi_7 \ \phi_8] = [1 \ -1 \ -1 \ -1] \hat{\phi}_2 \quad (8)$$

와 같은 관계를 구할 수 있다. 같은 방법으로 가상 코일에 흐르는 와전류는

$$[I_{ec1} \ I_{ec2} \ I_{ec3} \ I_{ec4}] = [1 \ -1 \ -1 \ -1] \hat{I}_{ec1} \quad (9)$$

$$[I_{ec5} \ I_{ec6} \ I_{ec7} \ I_{ec8}] = [1 \ -1 \ -1 \ -1] \hat{I}_{ec2} \quad (10)$$

와 같이 표현될 수 있다. 자심 부분의 reluctance 가 모두 같다고 가정하면 다음과 같은 패러데이 법칙을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 2N & 0 \\ \alpha & 0 \\ 0 & 2N \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d\hat{\phi}_1}{dt} \\ \frac{d\hat{\phi}_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} V - \begin{bmatrix} 2R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{ec} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2R & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{ec} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_{ec1} \\ \hat{I}_2 \\ \hat{I}_{ec2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(11)에서 α 는 코일전류에 의해 생성된 자속과 와전류 루프에 걸리는 자속의 비를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{l_{lam} - \delta}{l_{stack}} \quad (12)$$

와전류 루프를 포함한 암페어 법칙은 행렬 형태로

$$\begin{bmatrix} 2N & 0 \\ 0 & 2N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 40 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{ec1} \\ \hat{I}_{ec2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix} H_c + \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} H_g \quad (13)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식(13)에서 자심의 자화강도 H_c 는 자속의 함수로써 히스테리시스 모델로부터 결정된다.

식(11)과 식(13)로부터 유도형 센서의 코일에 인가되는 전압과 코일 전류 그리고 자속의 관계를 얻을 수 있다.

Table 1. Sensor Specification

Core material	Silicon Iron(SiFe)
Pole width	4.93mm
Stack thickness	4.2mm
Nominal air gap	0.5mm
Coil turns per pole	80
Switching Frequency	20KHz
Supply Voltage	48V

3. 실험 장치

자기회로 이론에 의한 센서 모델을 검증하기 위해 실험장치가 제작되었다.

Fig.3 은 실험 장치의 사진으로서 2 개의 유도형 센서가 차동형으로 고정되어 있다. Table 1 은 실험에 사용된 유도형 센서의 제원을 보여 준다. 센서 타겟은 마이크로 포지셔너에 의해 구동되며 0.1 μm 의 정확도를 가진 와전류 센서(AEC 5706PS)에 의해 위치를 측정하였다.



Figure 3. Experimental Setup

4. 결과 및 고찰

앞에서 구한 유도형 센서의 모델을 이용하여 시뮬레이션한 센서 코일의 전류 파형이 Fig.4 에 나타나 있다. 전압 스위칭이 일어나는 부분에서 전류가 왜곡됨을 보여준다. 이 왜곡은 와전류와 히스테리시스의 영향이며, 실험에서도 잘 관찰된다 (Fig.5).

센서의 성능을 결정하는 두 가지 요소는 정확도와 응답 속도이다. 본 논문에서 기술하는 유도형 센서의 경우, 정확도와 응답 속도는 상반된 관계에 있다. 정확도를 향상시키기 위해서는 응답 속도의 손실을 감수하여야 하고, 응답 속도 증가에 따른 동적 특성을 향상시키기 위해서는 잡음의 증가에 의해 정확도가 떨어지게 된다. 센서의 응답 속도와 직접적인 관계에 있는 것이 센서 구동 회로의 스위칭 주파수이다. 스위칭 주파수가 높아지게 되면 신호 처리 회로의 필터 주파수를 높일 수 있게 되고, 이에 따라 응답 속도의 증가를 가져 올 수 있다. 그러나, 스위칭 주파수의 증가는 센서의 정적 민감도(Sensitivity)의 감소를 초래한다. 와전류와 히스테리시스는 이 민감도의 감소를 더욱 악화시킨다 [1]. 따라서, 와전류와 히스테리시스의 영향을 최소화하기 위해서 적층된 규소 강판의 두께를 줄인 다거나, 투자율이 높은 재료를 사용한다.

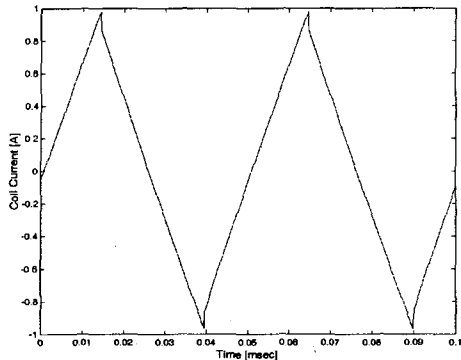


Figure 4. Simulated Coil Current

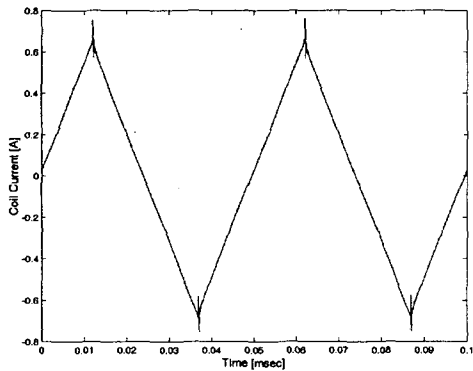


Figure 5. Actual Coil Current

Table 2 는 스위칭 주파수의 변화에 따른 센서 민감도의 변화를 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 결과를 보여 준다. 예상한 바와 같이, 민감도는 스위칭 주파수가 20kHz 에서 50kHz 로 증가할 때 약 1/3 정도로 감소하는 것을 볼 수 있다. 규소 강판의 두께가 0.1mm 인 경우와 0.35mm 인 경우의 민감도 변화 차이는 매우 작아 스위칭 주파수가 50kHz 까지는 와전류의 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있다. (실험의 경우 0.1mm 강판은 36.2%로 감소, 0.35mm 강판은 35.8%로 감소) 따라서, 스위칭 주파수가 그리 높지 않은 경우 강판 표준 두께 중 최소 두께인 0.35mm 를 사용하는 것과 추가 가공이 필요한 0.1mm 강판을 사용하는 것은 센서 성능에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 유도형 센서의 경제성에 큰 영향을 미칠 수 있다.

매우 빠른 응답 속도를 위해 센서 스위칭 주파수가 50kHz 이상이 되어야 하는 경우는 0.1mm 강판의 사용이 높은 가격에도 불구하고 장점이 있을 수 있다. 시뮬레이션을 통해 50kHz 이상의 스위칭 주

파수가 사용된 경우 와전류의 영향에 의해 0.1mm

Table 2. Sensitivity Change due to Switching

Switching Freq.	Simulation		Experiment	
	0.1mm	0.35mm	0.1mm	0.35mm
20kHz	2.514 (100)	2.494 (100)	4.73 (100)	4.66 (100)
50kHz	0.779 (30.9)	0.756 (30.3)	1.715 (36.2)	1.67 (35.8)
70kHz	0.539 (21.4)	0.511 (20.4)	N/A	
100kHz	0.374 (14.8)	0.337 (13.5)		

의 강판이 사용된 경우와 0.35mm 의 경우 민감도 변화의 차이가 커짐을 알 수 있는데, 노이즈의 영향과 실험 장치의 한계로 인해 실험 결과를 통한 비교가 불가능하였다.

5. 결론

본 논문에서는 와전류와 히스테리시스를 고려한 유도형 센서의 자기 회로 모델을 개발하여 이를 통하여 와전류와 히스테리시스가 센서의 성능에 미치는 영향을 고려하였다. 개발된 센서 모델에 전류 파형은 실험에서 관측된 파형과 매우 비슷한 형태로 와전류에 의한 전류 왜곡을 잘 나타내며, 스위칭 주파수 변화에 따른 센서 민감도의 변화도 실험과 같은 변화 추이를 보였다.

본 연구에서 개발된 모델은 정적 실험뿐만 아니라 동적 실험을 통한 검증이 필요하며, 모델에서 고려되지 않은 자속의 Leakage 나 Fringing 에 대한 고려도 필요할 것이다. Leakage 나 Fringing 는 자기 회로 모델을 수정[2]함으로써 고려할 수 있다. 센서의 동적 특성 실험은 현재 실험 장치를 준비중에 있다.

참고문헌

1. 노명규, 정민경, "자기베어링용 유도형 변위센서의 성능에 미치는 와전류와 히스테리시스의 영향," 기계학회 2001 춘계학술대회
2. Meeker, D.C., Maslen, E.H., Noh, M., "An Augmented Circuit Model for Magnetic Bearings Including Eddy Currents, Fringing and Leakage," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 4, pp. 3219-3227.