Jiles 이론을 이용한 비선형 자기 베어링 모델 개발

백승국[1], 김지미[2], *노명규[3]

[1]충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단, [2]LG 생산기술원, [3] 충남대학교 메카트로닉스 공학과

Development of Nonlinear Magnetic Bearing Model Using Jiles-Artherton Theory

S. K. Paek[1], J. M. Kim[2] , *M. Noh[3]

[1] BK21Mmechatronics Group at CNU, [2] LG Production Engineering Research Ins. [3] Mmechatronics Eng. CNU

Key words : 히스테리시스 (Hysteresis), 와전류 (Eddy Current), FPGA (Field Programmable Gate Array)

1. 서론

자기 부상 시스템은 기계적 비접촉식 방법으로, 윤활제를 사용하지 않고 고속, 고효율 작동이 가능하며 소음이 적어, 반도체 제조 공정, 정밀 화학 가공 분야 같은 초청정 환경을 요구하는 제조 공정 등 많은 산업 분야에서 적용이 가능하다. 비접촉식 운동 기구의 경우 마찰 등으로 인한 먼지의 발생이 적고 열 발생이 적으며 시스템의 정밀도를 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 히스테리시스와 와전류의 영향을 포함한 자기 베어링 모델을 정립하려 한다. 이를 위해서 여러 히스테리시스 모델 중 Jiles-Atherton 모델을 사용하여, 비선형 자화모델을 포함하는 자기회로 모델을 개발하고 이를 실험을 통하여 검증한다. 이론적 해석과 실험적 검증은 자체 측정 정밀도와 동적 특성의 성능 한계를 밝혀 비선형 자화 특성의 영향을 최소화하는 최적의 자체 측정 자기 베어링을 설계하는데 도움이 될 것이다.

2. 히스테리시스 모델링

히스테리시스는 Jiles-Atherton 이론을 사용하여 히스테리시스 모델링을 하려한다. [2], [3]

Jiles-Atherton 모델은 재료 자체의 물리적 특성을 고려한 수학적 모델로 도메인과 도메인 사이에 존재하는 벽의 움직임 (domain wall motion : 이동과 회전) [6] 에 의해서 발생하는 에너지를 이용하여 도출 되었다. 재료의 자화 특성은

$$B = \mu_0 (H + M(H)) \tag{1}$$

와 같이 표현할 수 있는데, B 는 자속 밀도를 나타내고, μ_0 는 공극의 투자율, H 는 외부 자화강도, M 은 내부 자화강도를 나타낸다.

Jiles-Atherton Model 은 Anhysteresis Magnetization, Irreversible Magnetization, Reversible Magnetization 으로 구성 되는데, Anhysteresys Magnetization 식은 다음과 같이 표현된다.

$$M_{an} = M_S \left[\coth(\frac{H_e}{a}) - \frac{H_e}{a} \right] \tag{2}$$

$$H_e = H + \alpha M \tag{3}$$

이때, M_S 는 Saturation Magnetization 이고, H_e 는 유효 자기장 (Effective Field), a 와 α 는 Jiles-Atherton 모델의 파라미터를 나타낸다.

Irreversible Magnetization (M_{irr})은 도메인의 pinning 에 의한 에너지 손실을 표현한 것으로 식은 다음과 같다.

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \tag{4}$$

Irreversible Magnetization 을 이용하여 Reversible Magnetization 을 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \tag{5}$$

이때, k 와 c 는 Jiles-Atherton 모델의 파라미터를 나타내고, δ 는 식 (4) 에서 자기장(H)이 증가할 때 +1 의 값을 가지며, 감소할 때 -1 의 값을 가진다.

Total Magnetization 은 각각 H 에 관한 미분방정식의 해를 구하여 더하면 얻을 수 있는 값으로 아래와 같이 표현된다.

$$M = M_{rev} + M_{irr} \tag{6}$$

Jiles-Atherton Model 에 사용될 파라미터 값들을 실험적으로 구한 자화 특성을 통해 결정 할 수 있다. Fig. 1 의 실선은 Flux Meter 를 이용하여 얻은 재료의 자화 곡선이다. 이 자화 곡선에 가장 부합하는 파라미터 값들을 Simplex 방법으로 구하였다. 그 값들은 Table. 1 에 정리되어 있으며, Jiles-Atherton Model 에 의한 자화 곡선이 Fig. 1 의 점선으로 나타나 있다.

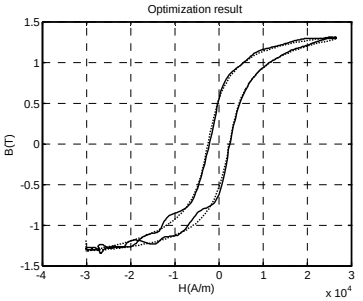

Fig. 1 JA 파라미터 최적화 결과

변수	변수 값
M_S	$1.2262\times10^{6}\ A\cdot m^{-1}$
a	$5796.7\ A\cdot m^{-1}$
k	$16878\ A\cdot m^{-1}$
α	1.1617×10^{-2}
c	0.82243

Table. 1 파라미터 값

3. 자기회로 모델

3.1 자기회로 모델링

자기회로 이론을 이용하여 히스테리시스와 와전류를 포함한 8-Pole 자기베어링의 전압, 전류, 자속의 관계를 도출하였다. 이를 이용하여 회로 전체의 구동 전원이 되는 전압으로부터 히스테리시스와 와전류가 회로에 미치는 영향을 고려하여 실제 코일을 지나는 전류에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션을 통해 알아 볼 수 있다. Fig. 2 는 8- pole 자기 베어링의 자속 경로를 나타낸 그림이다.

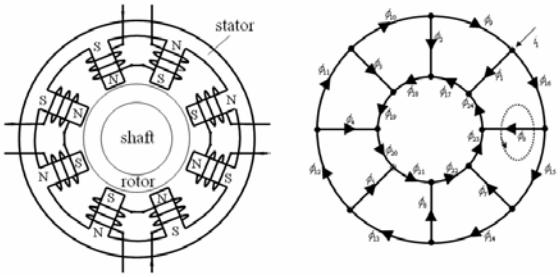

Fig. 2 8-pole 자기 베어링의 자속 경로

와전류의 영향은 자속 경로를 감싸고 있는 가상의 코일을 통해 모델링 할 수 있는데 [4] [7], 가상 코일에 대한 Faraday 법칙은 다음과 같다.

$$\alpha \frac{d\phi_i}{dt} = r_{ec_i} i_{ec_i} \ , \quad i = 1, 2, \cdots, 24 \tag{7}$$

입력 전압이 주어졌을 때 발생하는 전류와 자속의 변화량

에 관한 식은 [5]에 정리되어 있으며,

$$\Phi = f(H, v)$$
$$i = g(H, v) \quad (8)$$

와 같은 형태로 기술할 수 있다. 식 (8) 에서 함수 f 와 g 는 Non-linear Matrix Equation 형태이다.

3.2 모델 검증

시뮬레이션모델의 검증을 위해 실험을 수행하였다. 실험은 자기 베어링의 코일에 PWM Switching 전압을 인가하고, 코일의 전류를 측정 하였다. Fig.3 은 실험에서 얻은 전류 파형과 시뮬레이션 결과를 비교한 그림이다. 전류 파형이 바뀌는 부분에서 끝부분의 모양이 왜곡되어 직선으로 떨어지는 구간을 확인 할 수 있는데, 이는 히스테리시스와 와전류의 영향이며 자기 베어링 철심의 적층 두께를 얇게 할수록 왜곡이 줄어드는 것으로 보아 히스테리시스 보다는 와전류가 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있다.

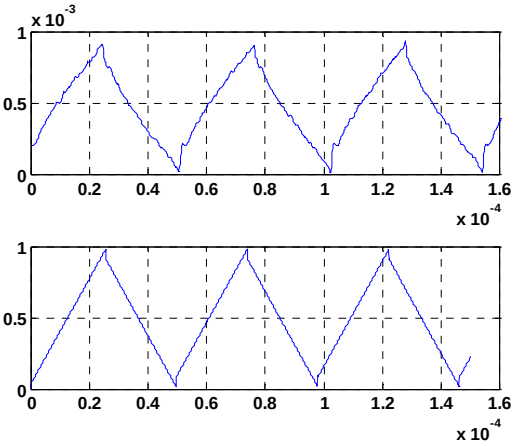

Fig. 3 실험 전류 파형과 시뮬레이션 전류 파형

4. FPGA

이상에서 알아본 바와 같이 자기 베어링 시스템은 히스테리시스와 와전류에 의해서 전류 파형이 변하게 된다. 자체 측정 베어링은 전류로부터 회전체의 위치를 추정하여 이를 제어에 이용하게 되는데, 와전류와 히스테리스스에 의한 전류 왜곡은 자체 측정 성능에 영향을 미치게 된다. 와전류와 히스테리시스를 포함하는 자체 측정 알고리즘은 이러한 영향을 최소화 할 수 있다. 선형 모델에 기초한 기존의 자체 측정 알고리즘 [1] 은 아날로그 회로에 의해 구현되었으나 와전류와 히스테리시스를 포함하는 비선형 알고리즘은 아날로그 회로로 구현하는데 어려움이 있다. 또한 DSP 를 이용한 디지털 회로로서도 구현에 한계가 있다. 기존의 DSP 시스템이 제공하는 처리 속도로는 신뢰도 있는 전류 측정이 가능하지 않다. 이와 같은 문제를 해결하고자 본 논문에서는 FPGA (Field Programmable Gate Array) 를 사용하여 자체 측정 알고리즘을 구현하려고 한다.

FPGA 는 기존의 DSP Processor 와 비교해 볼 때 현저히 빠른 처리 속도가 장점이다. 기존의 DSP Processor 는 직렬로 데어터 처리를 한 반면에 FPGA 는 병렬로 신호 처리를 한다. 따라서 복잡한 신호 처리를 할 수록 처리 속도의 차이는 커지게 된다. 본 눈문의 실험에서 사용한 FPGA 는 Xilinx 사의 Virtex-4 에 기초한 Extreme DSP Kit 는 105 MSPS 의 A/D 처리 속도와, 160 MSPS 의 D/A 처리 속도를 가진다.

Fig. 4 는 가상의 전류 신호를 FPGA 를 사용하여 A/D , D/A 변환 후 오실로스코프(GPIB 사용)로 측정한 결과이다. Fig.4 의 1 번 파형은 가상의 입력 신호로서 100 mV, 15 MHz 이고, 2 번 파형은 입력 신호에 따른 출력 파형이다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 고주파 입력을 출력 파형이 잘 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. 입력신호와 출력신호의 미세하게 변형되는 부분을 확인 할 수 있다. 이 부분은 함수 발생기를 분기 커넥터를 사용하여 입력 신호로 분기해서 사용할 때 발생하는 노이즈로 생각된다. 이때, FPGA 는 HDL 코딩을 사용하였다.

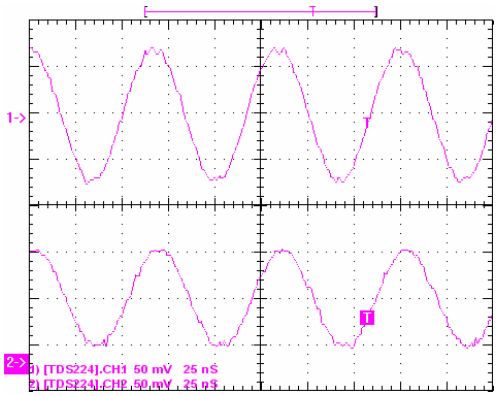

Fig. 4 FPGA 를 사용한 출력 파형

5. 결론

본 논문에서는 Jiles-Atherton 모델의 파라미터들을 구해 최적화된 히스테리시스 곡선을 구하고, 각 자속 경로에 존재하는 가상의 코일에 의해 발생하는 와전류를 모델링 하여, 이 두 영향을 포함하는 자기 베어링 자화 모델을 세우고 실험을 통해 검증 하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 히스테리시스보다 와전류의 영향이 큰 것을 확인 할 수 있었고, 시뮬레이션 전류 값이 실제 측정 전류 값보다 큰 경향이 나타났다.

자기 베어링을 자체 측정 시스템을 사용하여 제어 하고자 할 때, 가장 중요하게 고려해야 하는 것이 제어 시스템의 처리 속도이다. 따라서, 기존의 DSP 보다 처리 속도가 빠른 FPGA 를 사용하여, 자체 측정 시스템을 구현하고자 한다.

참고문헌

1. M. D. Noh, “Self-Sensing Magnetic Bearing Driven by a Switching Power Amplifier.” Ph.D. dissertation
2. D. C. Jiles, “Frequency dependence of hysteresis curve in conducting magnetic materials.” Journal of Applied Physics, 55(6):2115-2120, March 1984
3. D. C. Jiles and D. L. Atherton, “Theory of ferromagnetic hysteresis.” Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 61:48-60, 1986
4. Myoung Noh, Min-Kyoung Jeong, “The Effects of Eddy Currents and Hysteresis on the Performance of Inductive Position Sensor”
5. Myounggyu D. Noh, Dominick T. Montie , Eric H. Maslen and Anthony Kondoleon, “A Simulation Model For analysis of transient magnetic bearing performance” , IEEE Transactions on Magnetics
6. D. C. Jiles, Introduction to Magnetism and Magnetic Materials, Chapman and Hall, 1991
7. J. J. Feeley “A Simple dynamic model for eddy currents in a magnetic actuator, IEEE Trans, Magn, vol 132, pp 453-458, 1996
8. D. C. Jiles and J. B. Thoelke, “Theory of ferromagnetic hysteresis : determination of model parameters from experimental hysteresis loops” , IEEE Transactions on Magnetics, Vol.25, No5, September 1989